

VERWERFUNGEN

Brüche (*fractures*) sind planare Verformungsdiskontinuitäten, d.h. Unterbrechungen in der physikalischen Kontinuität der Gesteine, die sich infolge von Spannungen entwickeln. Geologische Brüche treten in jedem Massstab auf, so dass keine grosse Gesteinsmasse ohne sie ist. Diese Diskontinuitäten sind mit der plötzlichen Freisetzung von elastischer Energie, die in den Gesteinen gespeichert ist, verbunden.

Die geologischen Trennflächen haben auch grosse ökonomische Bedeutung. Im Bereich der Hydrologie und Erdölexploration ist der Verlust der Kontinuität in den intakten Gesteinen wichtig, weil er die Permeabilität, Migration und Anreicherung von Flüssigkeiten wie Grundwasser und Erdöl steuert. Oft haben sie zum Aufbau von Erzkörpern beigetragen. Reservoirs und Aquifere die von Brüchen durchzogen werden, sind gewöhnlich anisotrop, da ihr Durchlassvermögen durch die leitenden Eigenschaften der Brüche gesteuert wird, welche wiederum teilweise durch das lokale Spannungsfeld kontrolliert sind. Geologische Brüche können teilweise oder ganz durch Ausfällungen von sekundären Mineralien aufgefüllt werden, was Vererzungen verursachen kann, oder die Rekristallisation der ursprünglichen Mineralien.

Planare Diskontinuitäten, entlang denen die Gesteine ihre Kohäsion während ihres spröden Verhaltens verlieren, werden:

- **Klüfte** (*joints*) genannt, wenn keine Verschiebungskomponente parallel zur Ebene der Diskontinuität besteht (es kann eine geringe orthogonale Trennung auftreten; Klüfte sind Dehnungsbrüche), und
- **Verwerfung** (*fault*) wenn die Blöcke zueinander parallel zur Fläche verschoben wurden (Verwerfungen sind Scherbrüche).
- **Adern** (*veins*) wenn die Brüche durch sekundäre Kristallisation gefüllt worden sind.

Klüfte und Verwerfungen unterteilen Gesteine in **Blöcke**, deren Grösse und Form müssen im Ingenieurwesen, Steinbruch, Bergbau und in der Geomorphologie berücksichtigt werden.

Terminologie der Verwerfungen

Definition

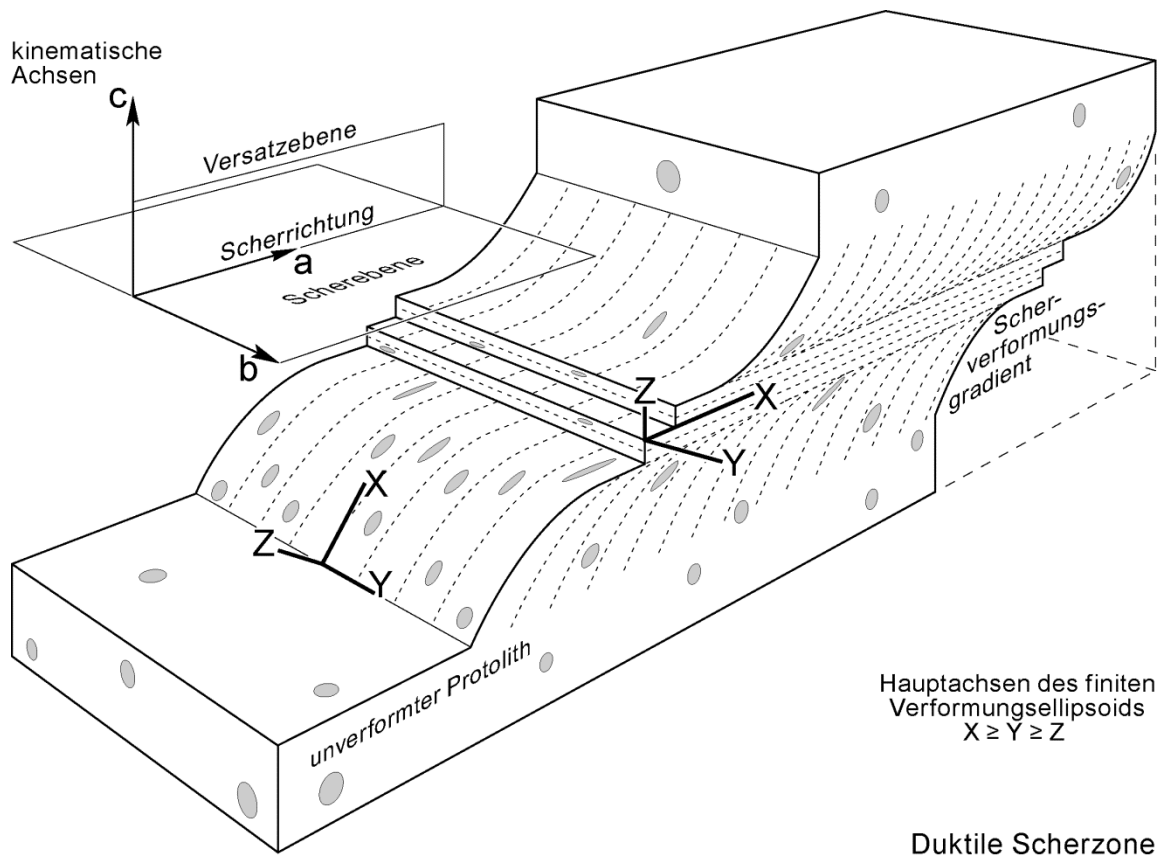
Von einer Verwerfung spricht man, wenn sich zwei aneinander grenzende Gesteinsblöcke aufgrund einer angesetzten Spannung aneinander vorbeibewegt haben. Der Begriff der lokalisierten Bewegung führt zu zwei genetisch verschiedenen Kategorien von Verwerfungen, die zwei grundlegende Reaktionen der Gesteine auf das Anlegen von Spannung widerspiegeln: spröde und duktile Verwerfungen.

Spröde Verwerfung

Eine **Verwerfung** (*fault*) ist ein Bruch zwischen zwei Gesteinsblöcken, die parallel zur Verwerfung in eine bestimmte Richtung relativ aneinander vorbeigeschoben wurden. Eine **Verwerfungs- oder Bruchzone** (*fault zone*) ist ein Gebiet, in welchem mehrere parallele oder **anastomosierende** (d.h. ausbreitende und sich wieder anschliessende) Verwerfungen vorkommen. Jeder mögliche Splitter innerhalb dieser Zone, die durch Verwerfungen begrenzt ist, ist eine **Schuppe** (*horse*). Verwerfungen und Verwerfungszonen können identifiziert werden wenn ein Erdbeben auftritt oder durch die geologische Kartierung, die zeigt, dass eine Bewegung entlang einer Diskontinuität in der Vergangenheit aufgetreten ist.

Duktile Verwerfung

Scherzonen (*shear zone*) sind das Analog in duktilen Materialien zu Verwerfungen in spröden Materialien. Eine Scherzone ist eine Zone, in der zwei Gesteinsblöcke aneinander vorbeigeschoben wurden, ohne dass sich ein spröder Bruch entwickelt hat. Scherzonen stellen Gebiete mit duktiler ununterbrochener Verformung dar (unter ausreichend hoher Temperatur und/oder hohem Umgebungsdruck), im Gegensatz zu Verwerfungszonen, die durch örtlich spröde Deformation gekennzeichnet sind. Scherzonen sind folglich duktile Verwerfungen, im Gegensatz zu den spröden.

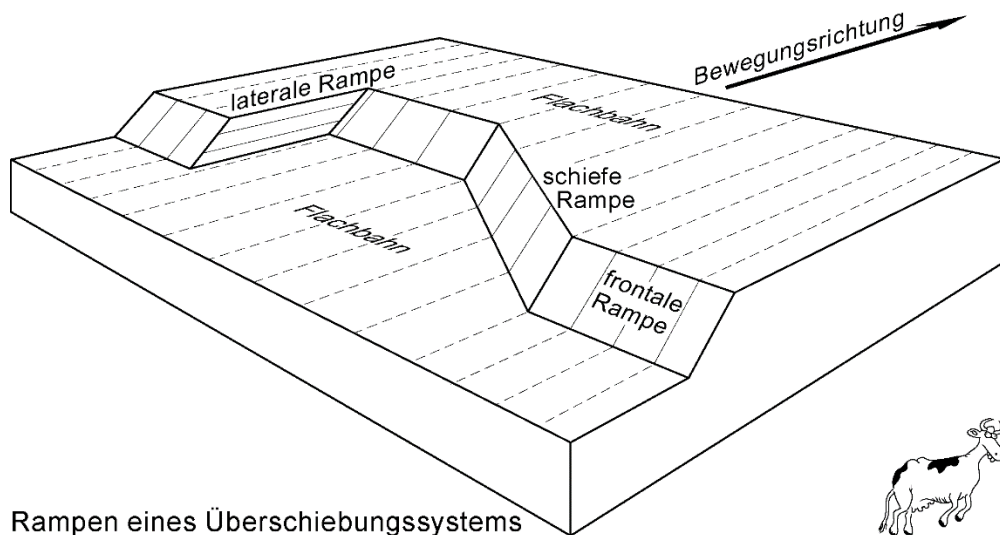


Geometrische Klassifikation

Verwerfungsebene

Verwerfungen, die steiler sind als 45° , nennt man **Steilwinkelverwerfung** (*high angle faults*), solche mit geringerem Einfallen **Flachwinkelverwerfung** (*low angle faults*). Die meisten langen Verwerfungen sind **segmentiert** (*segmented*), wobei jedes Segment seine eigene Geschichte hat; Verwerfungssegmente sind normalerweise nicht koplanar. Die Verwerfungsflächen sind im Allgemeinen wellenförmig. Die Wellenform der Verwerfungsflächen ist häufig in dreidimensionalen seismischen Daten zu sehen. Die dadurch identifizierten Verwerfungswellungen (*corrugation*) werden der Verknüpfung von Verwerfungssegmenten im Laufe der Zeit zugeschrieben. Eine **listrische Verwerfung** (*listric fault*) ist eine gebogene, nach oben hin konkave Verwerfung, die gegen die Tiefe hin abflacht.

Wo Flachwinkelverwerfungen sich in gut geschichteten, horizontal gelagerten Formationen ausbilden, bauen sie im Allgemeinen eine treppenförmige Geometrie (*staircase geometry*) auf. Die Stufen der Treppen werden als **Rampen** (*ramps*), die flacheren Verwerfungsflächen als **Flachbahnen** (*flats*) bezeichnet. Die Flachbahnen befinden sich dort, wo sich die überliegenden Gesteine durch relativ inkompetente Formationshorizonte bewegen. Die Flachbahnen nennt man manchmal auch **décollement-Flächen**, was sich auf eine Flachbahn bezieht, an der ein Unterschied im Versatz, Verformungsstil und/oder der Verfaltungsart zwischen den überliegenden und unterliegenden Blöcken auftritt. Die Rampen klettern durch eine bestimmte stratigraphische Abfolge, die typischerweise in einem Winkel von etwa 30° zur Horizontalen geschnitten werden. Rampen streichen nicht unbedingt senkrecht zur Bewegungsrichtung (**frontale Rampe**, *frontal ramp*); sie können auch schief (**schiefe Rampe**, *oblique ramp*) oder parallel zur Transportrichtung verlaufen (**seitliche Rampe**, *lateral ramp* oder *tear-fault*).

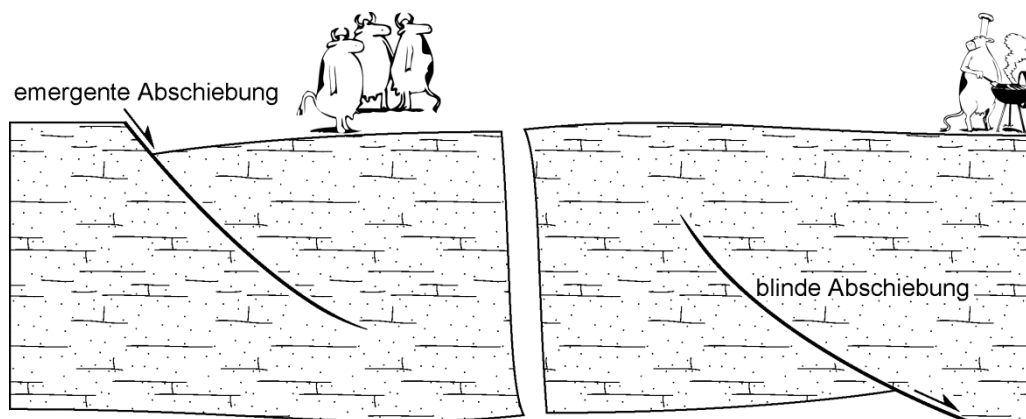


Rampen eines Überschiebungssystems

Die Verwerfung, die die Oberfläche geschnitten hat, während sie aktiv war, wird als **emergent** (auftauchende) Verwerfung bezeichnet, im Gegensatz zu **blinden** Verwerfungen, die nicht die Oberfläche geschnitten haben. Auftauchende Verwerfungen produzieren eine Stufe in der Topographie, die **Verwerfungsböschung** (*fault scarp*). Manche Verwerfungen können als seismogene Spur identifiziert werden, obwohl diese nicht einer an der Oberfläche sichtbaren Verwerfungsebene zugeordnet werden können.

Bemerkung:

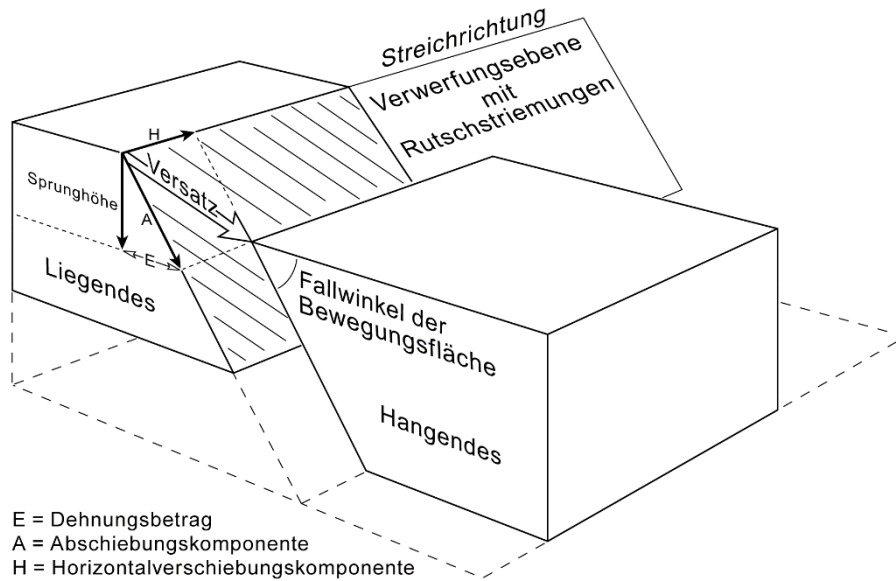
Eine auftauchende Störung ist keine erodierte Störung. Unterscheiden Sie: die Erosion, die eine Verwerfung erreicht, hinterlässt eine Spur auf der Erdoberfläche.



Verwerfungsblöcke

Die beiden Gesteinskörper einer nicht vertikalen Verwerfung oder Scherzone werden oberhalb derselben als **Hangendes** (*hanging wall*) und unterhalb als **Liegendes** (*footwall*) bezeichnet.

Geometrien von Verwerfungen und messbare Komponenten der Gleitbewegung



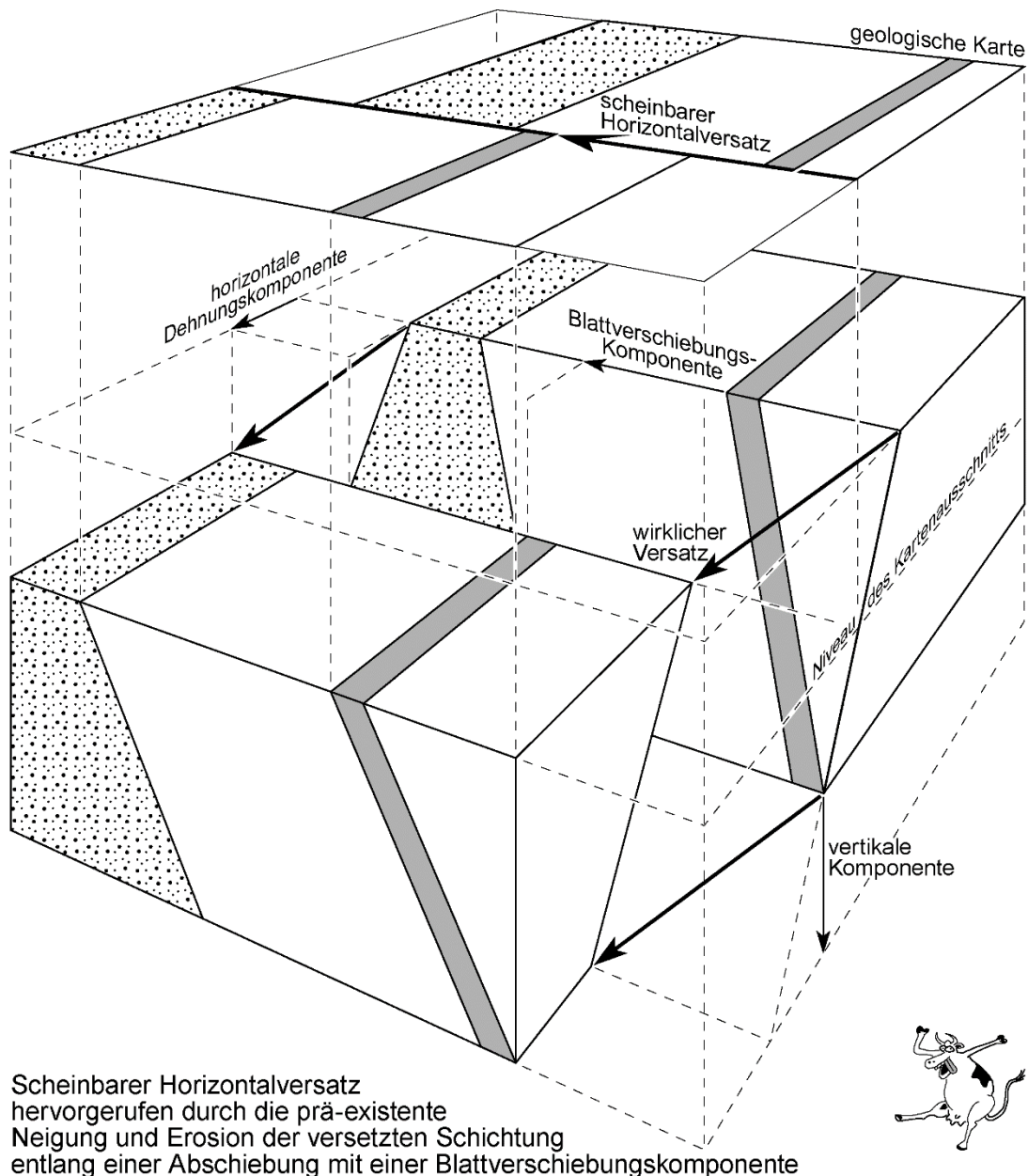
Allochthon ist ein Ausdruck für jeden Verwerfungsblock oder Gesteinskörper, der auf einer Verwerfung wesentlich bewegt worden ist. Gesteine, die über eine grosse Distanz von ihrem ursprünglichen Ablagerungsort überschoben wurden, sind **allochthon** (*allochthonous*). Allochthone Gesteine, die ihre Verbindung mit dem ursprünglichen Standort verloren haben, sind **wurzellos** (*rootless*). Sie liegen dann auf **autochthonen** (*autochthonous*) Gesteinen, die ihre ursprüngliche Lage beibehalten haben. Wenn die Relativbewegung gering ist, spricht man vom „autochthonen“ als **Parautochthon**.

Kinematische Klassifikation

Verschiebungsvektoren

Die Verschiebungsrichtung ist die Bewegungsrichtung eines Blockes relativ zum anderen. Der Vektor, der ursprünglich (vor der Verschiebung) zusammenfallende Punkte (**piercing points**) auf entgegengesetzten Seiten der Verwerfungsfläche verbindet, wird **Versatzvektor** (**Verschiebungsbetrag, Schublänge: net slip**) genannt. Die Länge des Versatzvektors stellt die Grösse des Versatzes auf der Verwerfung, die gewöhnlich die Addition von mehreren Bewegungen ist, dar.

Der Versatzvektor auf einer Verwerfungsfläche kann in irgendeine Richtung zeigen. Er kann in zwei zueinander senkrecht stehende Komponenten aufgegliedert werden: erstens die **Horizontalkomponente** parallel zum Streichen der Verwerfungsfläche (*strike slip*), und zweitens, parallel zum Fallen, die **Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente** (*dip slip*). Die **Neigung** (*rake*) ist der Winkel gemessen auf der Verwerfungsfläche zwischen Streichrichtung und Verschiebungsrichtung. Das **Tauchen** (*plunge*) ist der Winkel gemessen in der vertikalen Ebene, welche die Gleitlinie enthält, zwischen der Horizontalen dieser Ebene und der Verschiebungsrichtung.



Die durch eine Leitschicht in einem vertikalen Profil senkrecht zur Verwerfung gezeigte Seitenverstellung nennt man **scheinbaren Versatz** (*dip separation*). Die vertikale Komponente des scheinbaren Versatzes ist die **Sprunghöhe** (*throw*) und die Horizontalkomponente senkrecht zum Streichen der Verwerfung ist der **Dehnungsbetrag** oder **Verkürzungsbetrag** (*heave* oder *offset*).

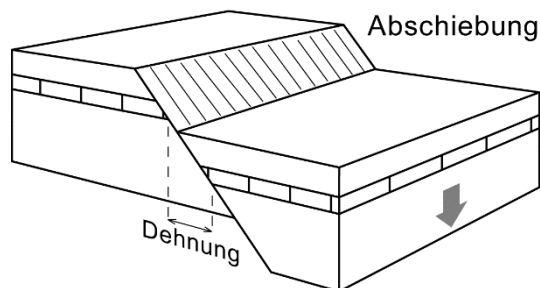
Achtung! Beachten Sie, dass der scheinbare Versatz nicht mit der Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente identisch ist, da der scheinbare Versatz von der Orientierung der Trennfläche und auch von der Art der Versetzung abhängig ist. Eine Schichtfläche allein kann nie benutzt werden, um den Versatz festzustellen.

Verwerfungen werden nach der Richtung der relativen Bewegung zwischen Verwerfungsblöcken klassifiziert, die mit dem Spannungstyp, der die Verwerfung verursacht, in Beziehung steht.

Verwerfungstypen

Abschiebung

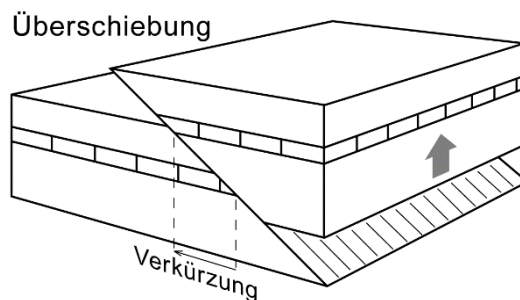
Eine **Abschiebung** (*normal fault*) ist eine Grosswinkelverwerfung, in der der Hangendblock in die Abtauchrichtung gegenüber dem Liegendblock nach unten versetzt ist. Jüngere Gesteine werden über ältere versetzt. In Vertikalschnitten durch die Verwerfung fehlt ein Teil der stratigraphischen Abfolge. Wegen der Art der Trennung der geologischen Horizonte an einer Abschiebung, spricht man auch von **Dehnungsverwerfungen** (*extensional faults*).



Rampen mit Extension sollte man als **Abscherung** bezeichnen. Eine Abschiebung, die weniger als 45° einfällt, nennt man manchmal auch **lag** oder *denudation fault*. Ein typischer Abscherhorizont hat keine Wurzeln und folgt einem stratigraphischen Horizont.

Aufschiebung

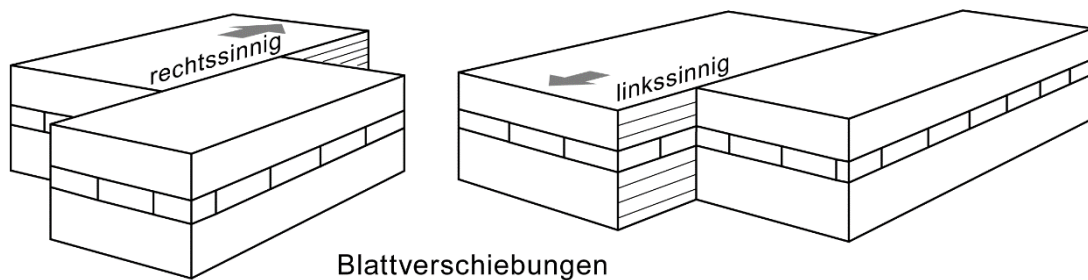
Eine **Aufschiebung** (*reverse fault*) ist eine Steilwinkelverwerfung, wobei sich das Hangende über das Liegende nach oben verschoben hat. Ältere Gesteine werden über jüngere gebracht. Solche Verwerfungen führen in der Vertikalen zur **Wiederholung** (*repetition*) eines geologischen Horizonts und werden gewöhnlich als **Kompressionsverwerfungen** (*compressional fault*) bezeichnet. Eine **Überschiebung** (*thrust fault*) ist eine flach einfallende Aufschiebung entlang welcher das Hangende **Decken** (*thrust-sheets, nappes*) von allochthonen Gesteinen bildet, die auf autochthonem oder parautochthonem Liegendem platzgenommen haben.



Meistens klettern die Überschiebungen durch eine bestimmte stratigraphische Abfolge zur Erdoberfläche in Richtung des tektonischen Transportes.

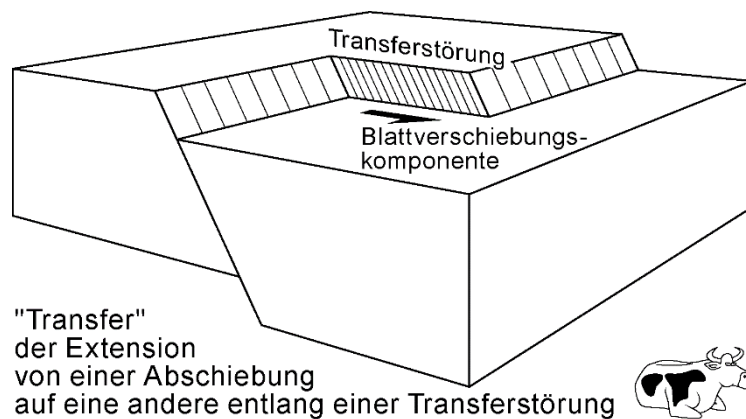
Blattverschiebungen

Blattverschiebungen (*strike slip fault*) haben gewöhnlich sehr steile oder vertikale Fallwinkel und die horizontale relative Bewegung zwischen benachbarten Blöcken ist parallel zum Streichen der Verwerfungsfläche. Grosse Blattverschiebungen werden auch als **transcurrent faults**, **tear faults** oder **wrench faults** bezeichnet. Die Richtung der streichenden Verschiebung auf einer Verwerfung wird mit den Ausdrücken **linkssinnig** (*sinistral*) und **rechtssinnig** (*dextral*) gekennzeichnet. Eine Verwerfung ist linkssinnig, wenn der Beobachter, der auf einem Verwerfungsblock steht, in die Richtung des Gegenblockes blickt und eine **scheinbare Verschiebung** (*apparent displacement*) des gegenüberliegenden Verwerfungsblockes nach links feststellt. Wenn im Gegensatz die Verschiebung nach rechts verläuft, ist die Verwerfung rechtssinnig.

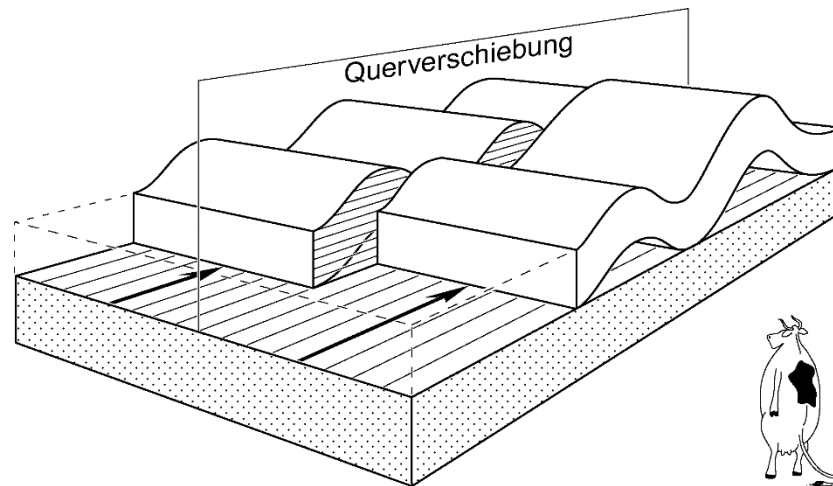


Blattverschiebungen

Eine **Transferverwerfung** (*transfer fault*) ist eine Blattverschiebung, welche die Versätze zwischen zwei ähnlich orientierten Verwerfungssegmenten (z.B. zwei Abschiebungen) überträgt. Sie endet auf diesen zwei anderen Strukturen. Transferverwerfungen sind normalerweise auf das Hangende von abgetrennten Systemen begrenzt (d.h. das Grundgebirge unter einem Décollement oder Abscherhorizont der nicht mit einbezogen wurde) und enden, wo sie die verbundenen Verwerfungen anschliessen. Transferverwerfungen (oder -zonen) sind laterale Rampen, die häufig unterschiedliche Bewegung oder Verformung in aneinander grenzende Blöcke (unterschiedliche Beträge von Verkürzung oder von Extension auf beiden Seiten) erklären. Wenn die Überschiebungen oder Abschiebungen in einem grossen Winkel zum Versatz streichen, sind die Transferverwerfungen, welche die beiden Verwerfungen verbinden nahezu parallel zur Bewegungsrichtung. Folglich haben Transferverwerfungen normalerweise Gleitkomponenten, die entlang des Streichens variieren, wenn sich der Versatz entlang der Transferzone ändert.



Eine **Querverschiebung** (*tear-fault*) ist eine Blattverschiebung, die quer zum Streichen eines Kompressions- oder Extensionssystems, im Hangendblock von flach einfallenden Abscherhorizonten, läuft. Die Querverschiebung nimmt den unterschiedlichen Versatz zwischen zwei Segmenten des Systems auf. Solche Verwerfungen sind normalerweise auf das allochthone Hangende von Abschiebungs- und Überschiebungssystemen begrenzt (d.h. sie haben auf das Grundgebirge nicht einwirkt).



Transformstörung

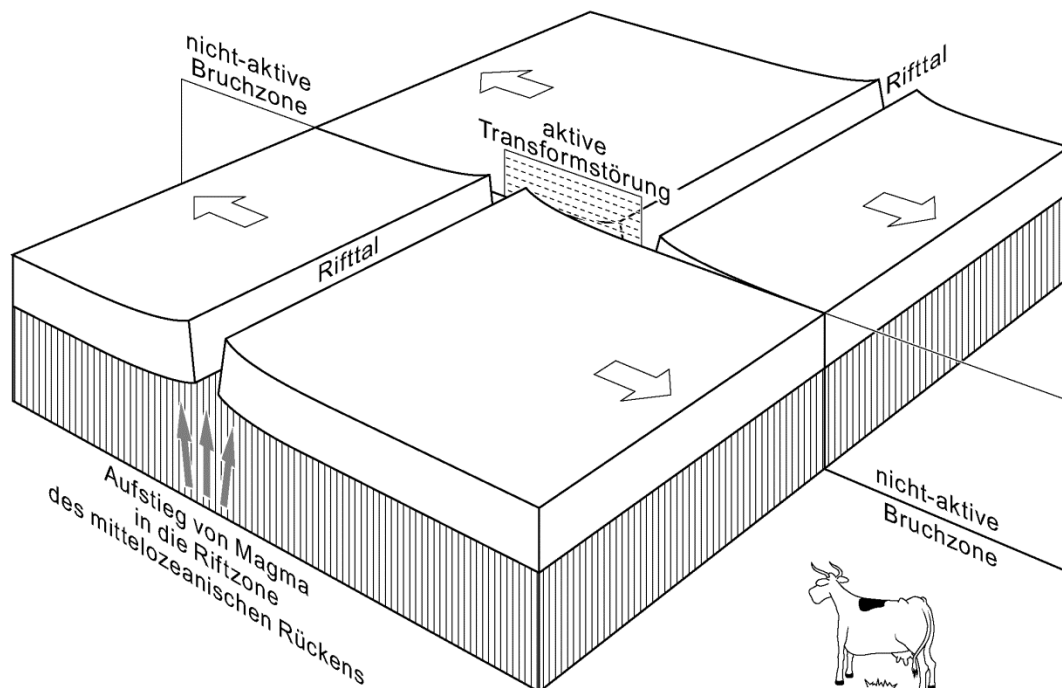
Eine **Transformverwerfung** (*transform fault*) ist eine Blattverschiebung, die an Plattengrenzen liegt. Es gibt drei Arten:

Rücken-Rücken Transformverwerfungen, die zwei Segmente einer konstruktiven Plattengrenze verbinden.

Rinnen-Rinnen Transformverwerfungen, die zwei Segmente einer destruktiven Plattengrenze verbinden.

Rücken-Rinnen Transformverwerfungen, die eine konstruktive Plattengrenze und eine destruktive Plattengrenze verbinden.

Divergierende Plattengrenze mit einer Transformstörung



Rücken-Rücken Transformverwerfungen treten am häufigsten auf. Typische Transformverwerfungen sind Bruchzonen, die normalerweise im nahezu rechten Winkel zum mittelozeanischen Rücken verlaufen und diesen horizontal versetzen. Sie unterscheiden sich aber von normalen Blattverschiebungen, indem sie eine entgegengesetzte Verschiebung vollführen, als der Versatz der mittelozeanischen Rücken suggeriert. Die Transformverwerfungen sind nur zwischen den Rücken aktiv, über die Rücken hinaus sind sie inaktiv. Sie sind parallel zu Kleinkreisen, deren Zentrum der

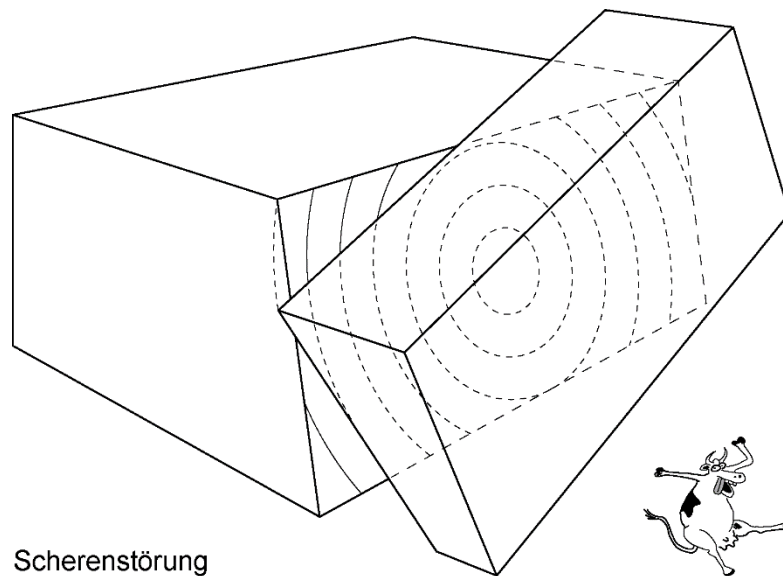
Rotationspol der jeweiligen Platte ist. Der Versatz an den Verwerfungen ist viel grösser als die Länge des aktiven Segments.

Hybride Verwerfung

Die Ausdrücke Abschiebung und Überschiebung werden für Verwerfungen, die keine Blattverschiebungskomponente enthalten, angewendet. Die Begriffe werden allerdings auch dort angewendet, wo die fall-parallele (*dip-slip*) Verschiebungskomponente relativ gross gegenüber der Blattverschiebungskomponente (*strike slip*) ist. Wo die fall-parallele und die Blattverschiebungen dieselbe Magnitude haben, wird die Verwerfung als ***oblique slip fault*** (Verwerfung mit schiefer Verschiebung) bezeichnet.

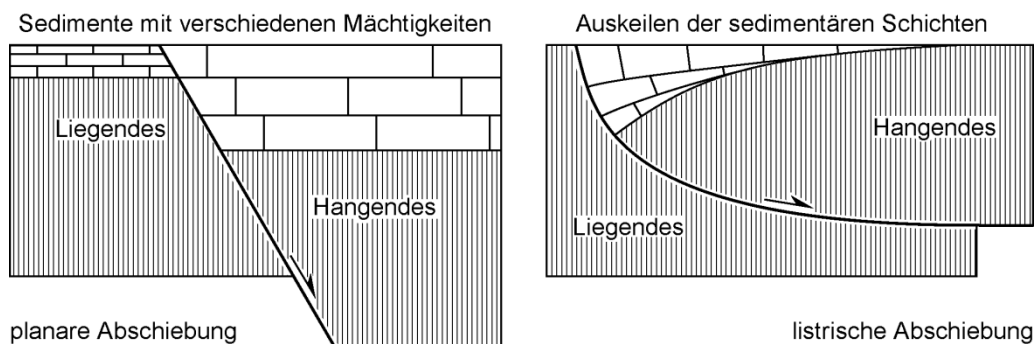
Scherenverwerfung

Ein Verwerfungsblock kann um eine Achse senkrecht zur Verwerfungsfläche einer **Scherenverwerfung** (*scissors fault*) rotieren.



Wachsende Verwerfungen

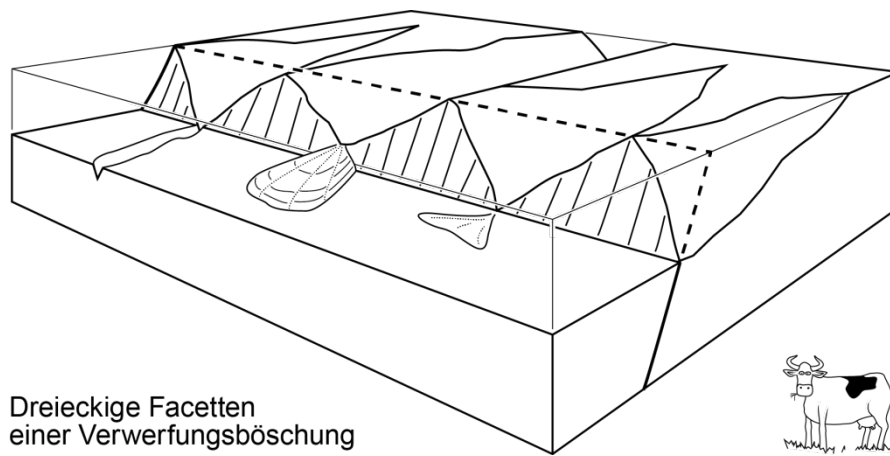
Eine mächtigere stratigraphische Abfolge im Hangenden verglichen mit Sedimentschichten gleichen Alters im Liegenden einer Verwerfung deuten auf eine Verwerfungsbewegung während der Sedimentation. **Wachsende Verwerfungen** (*growth faults*) bilden sich charakteristisch, aber nicht ausschliesslich, in Lockersedimenten, die im Becken abgelagert wurden und die aktiv in Breite und Tiefe wachsen.



Wachsende Abschiebungen mit assoziierten Extensionsbecken

Topographische Effekte

Vertikale Verschiebungskomponenten von Verwerfungen an der Erdoberfläche erzeugen lineare topographische **Steilränder** oder **Böschungen** (*scarps*). Verwerfungsböschungen können durch Erosion angeschnitten werden und **dreieckige Facetten** bilden.



Dreieckige Facetten
einer Verwerfungsböschung

Versatz /Länge Verhältnis

Die allgemeine elliptische Form von Einzelereignis-Bewegungsflächen suggeriert eine Beziehung zwischen einem Verhältnis der maximalen Länge der Verwerfungsfläche (lange Achse der Ellipse) und der maximalen Höhe (kurze Achse der Ellipse). Die Verteilung der Bewegung wird als symmetrisch um ein zentrales Bewegungsmaximum betrachtet. Dieser geometrische Gesichtspunkt hat zu mechanischen Modellen geführt, die auf der Annahme bestehen das Gesteine homogene elastische Materialien sind. Diese Modelle verbinden den maximalen Versatz (D_{\max}) am Mittelpunkt der Verwerfung mit der Länge (L) der Verwerfung.

Der allgemeine Ausdruck hierfür ist:

$$\frac{D_{\max}}{L} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} (\sigma_d - C\sigma_y)$$

Wobei: σ_d die Antriebsscherspannung ist (d.h. die Scherspannung, die zu Coulomb Reibungsgleiten führt),
 σ_y die Festigkeit des intakten Gesteins an der Spitze der Verwerfung ist, und
 C ist eine Variable oder eine Funktion, die spezifiziert, wie die theoretische Spannungseigenheit an der Verwerfungsspitze entfernt wird ($C = 1/\pi$ in den linearen Versatzmodellen).

E und ν sind das Young'sche Verhältnis und das Poisson Verhältnis des Gesteins.

Die oben aufgeführte allgemeine Gleichung zeigt, dass das maximale Verhältnis Versatz/Länge von Verwerfungen, drei Eigenschaften des Umgebungsgesteins widerspiegelt: sein Schermodul, sein elastisches Verformungslimit und seine Antriebsscherspannung. Typische Verhältnisse für isolierte, kleine Abschiebungen in sedimentären Gesteinen reichen von 0.002 bis 0.04, mit einem Durchschnitt von 0.01. Für Blattverschiebungen in Turbiditen wurden Verhältnisse von 0.4 bis 0.004 und einem Durchschnitt von 0.02 berichtet. Lithologische Veränderungen könnten die Spannweite der Werte erklären, wobei schwächere Gesteine höhere Verformungsgradienten an den Spitzen der Verwerfungen erreichen und demzufolge ein höheres D_{\max}/L Verhältnis aufzeigen als stärkere Gesteine.

3-dimensionale seismische Daten zeigen an, dass das Verhältnis zwischen Verwerfungslänge und Größe des Verschiebungsbetrages nur über einen begrenzten Bereich schwankt. Dieses fast konstante Verhältnis Versetzung D/L änge L ist abhängig vom tektonischen Milieu:

* $D/L = 12-40$: Mehrere Bruchscharenssysteme; die Verwerfungen grenzen häufig aneinander.

* D/L= 25-75: Ein dominierendes Bruchscharensystem; Ab- und Überschiebungen haben eine begrenzte Blattverschiebungskomponente.

* D/L= 50-150: Grosse Blattverschiebungskomponente. Auch für Oberflächennahe Verwerfungen in den deltaischen (wachsende Verwerfung = *growth-fault*) Systemen. Systematisch kleinere maximale Verschiebungsbeträge für Ab- und Aufschiebungen auf dem Mars (durch einen Faktor von ca. 5) und dem Merkur hängen mit der verringerten Schwerkraft auf diesen Planeten im Verhältnis zur Erde zusammen.

Aktivität von Verwerfungen

Oggleich jede Verwerfung sich bewegt hat und reaktiviert werden kann, haben Geologen eine qualitative Klassifikation von drei Kategorien entwickelt, um seismische Gefahren abzuschätzen.

- eine aktive Verwerfung hat sich während der letzten 10 000 Jahre bewegt.
- eine möglicherweise aktive Verwerfung hat sich während des Quartärs bewegt.
- eine inaktive Verwerfung hat sich vor dem Quartär bewegt.

Jedoch ist es schwierig ohne historische Aufzeichnungen von Erdbeben zu prüfen, ob eine Verwerfung aktiv ist. Jede Verwerfung ist eine Schwächezone, die zur Reaktivierung "fähig" ist.

Beziehungen zwischen Verwerfungen

Verwerfungen sind selten isoliert. Kleinere **Nebenverwerfungen** (*subsidiary faults*) geringerer Ausdehnung begleiten oft die **Hauptverwerfung** (*master fault*). Man trifft sie gewöhnlich in Gruppen an, die innerhalb einer Bruchzone oftmals dieselbe Art der Verschiebung anzeigen, parallel sind und geologische Körper in sogenannte **Bruchflügel** oder **Verwerfungsblöcke** (*blocks*) gliedern.

Konjugierte Verwerfungen

Ein geologischer Körper kann durch zwei **konjugierte Verwerfungen** (*conjugate faults*) begrenzt sein. Ein konjugiertes Bruchsystem ist dadurch charakterisiert, dass Verwerfungen der gleichen Art, die während der gleichen Deformationsphase gebildet wurden, in zwei symmetrischen Scharen mit parallelem Streichen, aber entgegengesetztem Einfallen und gegenüberliegendem oder gegenseitigen Bewegungssinn auftreten.

Triaxiale Experimente (die drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 haben Magnituden ungleich Null) zeigen, dass sich Verwerfungen zum jeweils angelegten Spannungsfeld orientiert ausbilden.

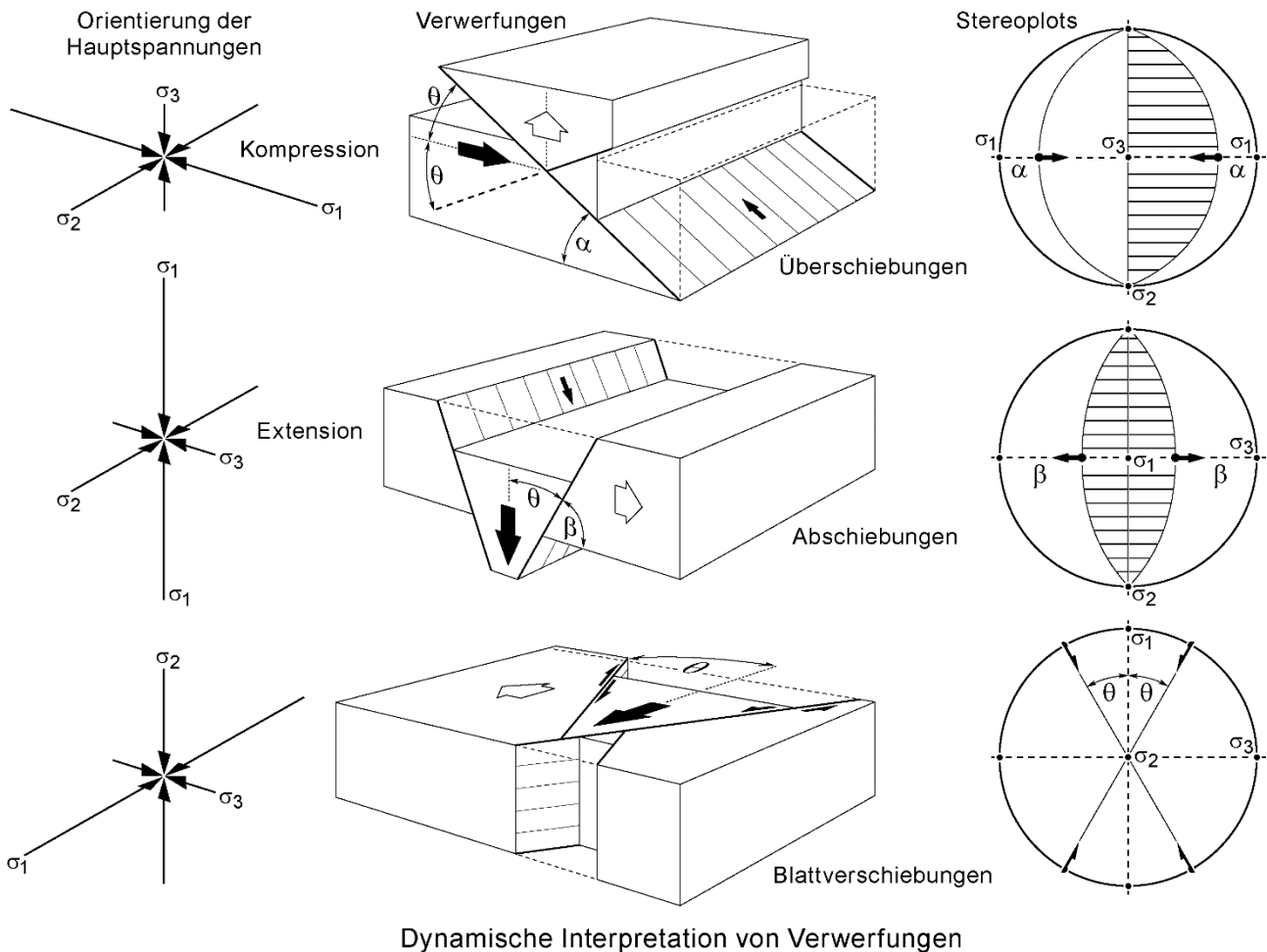
- Konjugierte Verwerfungen kreuzen sich auf einer Linie die parallel zur intermediären Hauptspannungsachse σ_2 verläuft.
- Der spitze Winkel zwischen den konjugierten Verwerfungen wird von der grössten Hauptspannungsachse σ_1 halbiert, der stumpfe Winkel von σ_3 .
- Strömungen, welche die Bewegungsrichtung abbilden, liegen per Definition parallel zur Schnittlinie zwischen der Verwerfungsfläche und der (σ_1, σ_3) Ebene.
- Das Material wird parallel zu σ_1 verkürzt und parallel zu σ_3 gestreckt.

Diese Beobachtungen sind die Grundlage für eine dynamische Interpretation der Verwerfungssysteme. Zusätzlich hat Anderson hervorgehoben, dass die Erdoberfläche eine freie Oberfläche mit einer Flüssigkeit (Luft) ist und Flüssigkeiten nicht imstande sind, Scherspannung zu übertragen (dies ist eine physikalische Definition von Flüssigkeiten). Folglich ist die Erdoberfläche eine Hauptspannungsfläche (erinnern Sie sich daran, dass eine Hauptspannung per Definition senkrecht zu einer Fläche steht die keine Scherfläche ist. Wenn angenommen wird, dass die Erdoberfläche eine Horizontale ist (was in Regionen mit niedrigem Relief fast zutreffend ist), dann ist eine der drei Hauptspannung fast vertikal zur Oberfläche. Welche Art von konjugierten Verwerfungen sich in der Nähe der Oberfläche entwickelt, hängt davon ab welche von den drei Hauptspannungen fast vertikal ist;

σ_1 vertikal: Abschiebungen, die ca. 60° einfallen.

σ_2 vertikal: Vertikale Blattverschiebungen.

σ_3 vertikal: Abschiebungen, die ca. 30° einfallen.



Diese Interpretation bezieht mit ein, dass die vertikale Spannung der lithostatische Druck ist und dass regionale Spannungsveränderungen an den Änderungen der Grösse der horizontalen Spannung im Verhältnis zu der vertikalen Gravitationslast liegen. Es gibt drei Möglichkeiten:

- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen um verschiedene Grösse ab.
- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen um verschiedene Grösse zu.
- Eine horizontale Hauptspannung erhöht sich, während die andere horizontale Hauptspannung sich verringert.

Übung

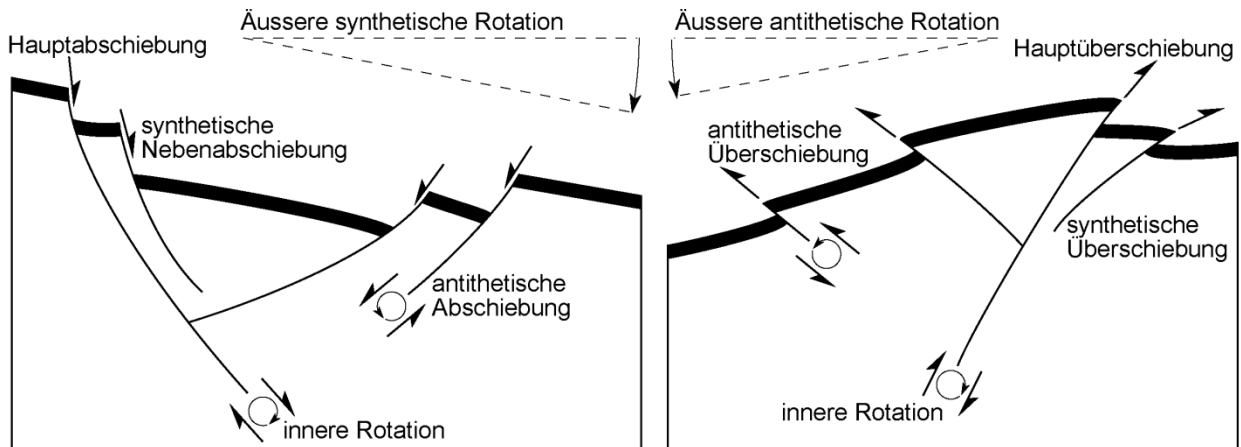
Nehmen Sie an, dass eine der Hauptspannungen die Gravitationslast ist. Zeichnen Sie drei Mohr-Diagramme, die den drei Anderson „Standard Spannungszuständen“ entsprechen, mit dem gleichen Coulomb-Bruchkriterium und der gleichen vertikalen Spannung. Kommentieren Sie die Abschiebung, Überschiebung und Blattverschiebung hinsichtlich der Differentialspannungen.

Diese Formulierung erklärt viele Störungssysteme, aber flache Abschiebungen und steile Aufschiebungen sind identifizierte natürliche Fälle, die sich nicht an die Anderson Regel halten. Erklärungen hierfür können der Einfluss der Anisotropie oder schon bestehende Brüche in natürlichen Gesteinen sein. Diese beeinflussen die Orientierung der Verwerfung und möglicherweise auch die

Verformung entlang der σ_2 -Richtung. Andere Erklärungen beziehen Rotation der Verwerfungsflächen in Richtung unkonventionelle Orientierung mit ein.

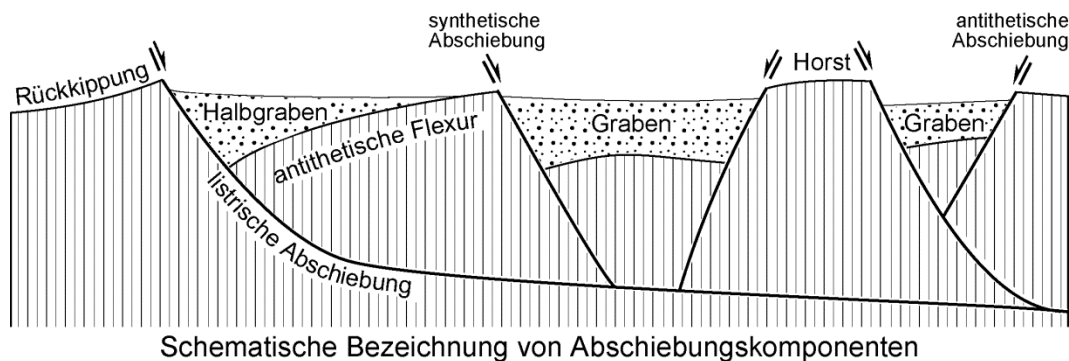
Synthetische und antithetische Verwerfungen

Synthetische Verwerfungen (*synthetic faults*) sind parallel zur Hauptverwerfung und haben dieselbe Relativbewegung. Die kleineren genetisch in Verbindung stehenden konjugierten Verwerfungen, welche in die entgegengesetzte Richtung zur Hauptstörung einfallen, nennt man **antithetisch** (*antithetic*).



Abschiebungen

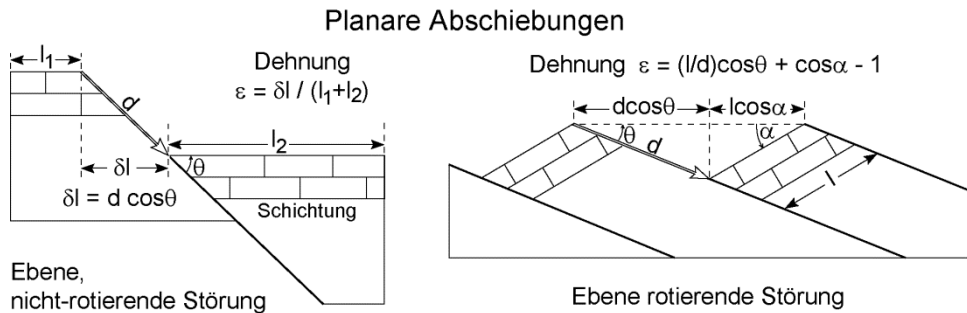
Einen nach unten versetzten Block, welcher durch konjugierte Abschiebungen, die gegeneinander einfallen, begrenzt ist, nennt man **Graben** (*graben*). Umgekehrt wird ein nach oben verschobener Block, der durch nach aussen einfallenden Abschiebungen begrenzt ist, als **Horst** (*horst*) bezeichnet. Gräben, die sich über grosse Breiten erstrecken, heissen **Rifts** (*rifts*). Ein Graben, der nur durch ein Set von Abschiebungsflächen begrenzt wird, hat einen dreieckigen Querschnitt und man bezeichnet ihn als **Halbgraben** (*half-graben*).



In idealen Graben- und Horstsystemen sind die Wachstumsraten der Verwerfungen gleich, damit die Verwerfungsblöcke nicht rotieren und der Graben während des ganzen Extensionsereignisses symmetrisch bleibt. In den natürlichen Verwerfungssystemen jedoch wachsen die Verwerfungen mit unterschiedlicher Rate und verursachen folglich asymmetrische Graben und Blockrotation. Tatsächlich gehen Verwerfungen häufig mit Rotationen einher. Es gibt zwei Arten von Abschiebungen bei denen Rotationen wichtig sind: Planare und listrische Abschiebungen.

Planare Abschiebungen

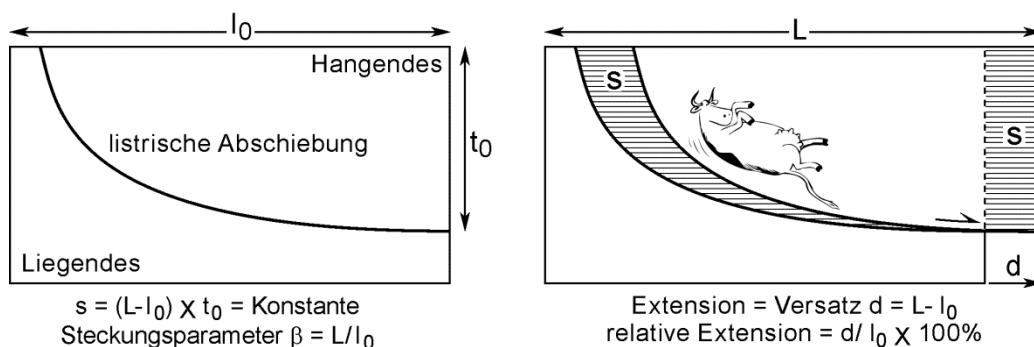
Planare, rotationale Abschiebungen rotieren über einen basalen Abscherhorizont oder über einen spröde-duktilen Übergang. Sie trennen gegeneinander versetzte und gekippte Blöcke, ohne interne Deformation. Ebene rotierende Verwerfungen werden als **Domino-** oder **büchergestellartige Verwerfungen** bezeichnet, weil die Blöcke und mit ihnen auch die Verwerfungsebenen gleichzeitig rotieren.



Mit einem verknüpften Verwerfungssystem enden alle Verwerfungen an einer bestimmten Tiefe in einem Abscherhorizont am duktilen Übergang zwischen der oberen und der unteren Kruste. Jeder neue Bruchblock hat seinen eigenen Halbgraben. Jede Verwerfung muss den gleichen Versatz und gleiche Verkippung haben, ansonsten entsteht an der Unterseite des Systems ein Platzproblem (Öffnung von Lücken). Planare, rotationale Abschiebungen und Blöcke grenzen im Allgemeinen an Transfer- und Scherenverwerfungen.

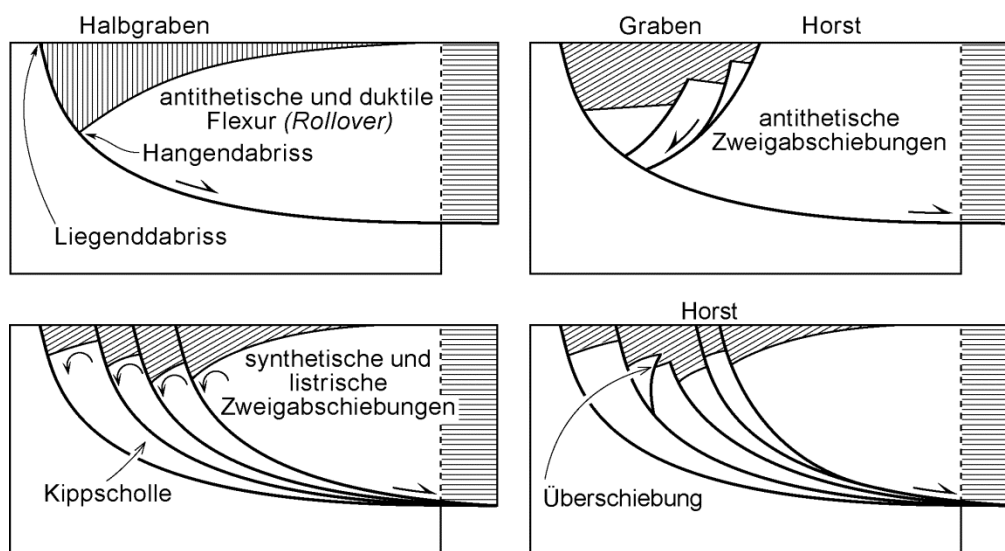
Listrische Abschiebungen

Häufig sind die Abschiebungen, insbesondere die Hauptabschiebungen, listrisch (nach oben hin konkave Verwerfung). Die Abschiebung ist meist sehr steil nahe der Oberfläche und flacht zur Tiefe hin ab.



Häufig sind die Abschiebungen, insbesondere die Hauptabschiebungen, **listrisch** (*listric*, nach oben hin konkave Verwerfung). Die Abschiebung ist meist sehr steil nahe der Oberfläche und flacht zur Tiefe hin ab. Falls die Verwerfungsblöcke spröde und starr sind, führt dies zu einem Platzproblem. Denn wenn die nebeneinander liegenden Blöcke versetzt werden, können Blöcke nicht überall aneinander bleiben. Eine Lücke entsteht zwischen den Hangenden und den Liegenden. Um die geometrische Kompatibilität beizubehalten, müssen die Schichten des Hangenden in Richtung Verwerfung rotieren und einfallen. Kollaps und Rotation des Hangenden füllt die Lücke und antithetische und/oder synthetische Abschiebungen, die sich der flachen Sohlhauptverwerfung anschließen, ausgleichen schliesslich die resultierende **antithetische Flexur** (*rollover*). Löcher können mit Gesteinsbruchstücken der Verwerfungsfläche aufgefüllt werden, oder aus zirkulierenden Wässern scheiden sich darin Mineralien aus. Wichtig ist, dass die Dreiecksform eines Halbgrabens, das heisst die Schrägstellung der Schichten des Hangenden, sowohl von der Geometrie der listrischen Abschiebung, als auch vom Verschiebungsbetrag abhängt.

Die listrische Geometrie ist wichtig, weil sie bei gleichem Verfrage eine viel grössere Ausdehnung als planare Abschiebungen aufnehmen kann. Der begrenzende steile Teil des listrischen Dehnungssystems ist die **Abbruchverwerfung** (*break-away fault*).



Kollapsverformung des Hangenden einer listrischen Hauptabschiebung, um die Lücke zwischen dem Hangenden und dem Liegenden zu füllen.

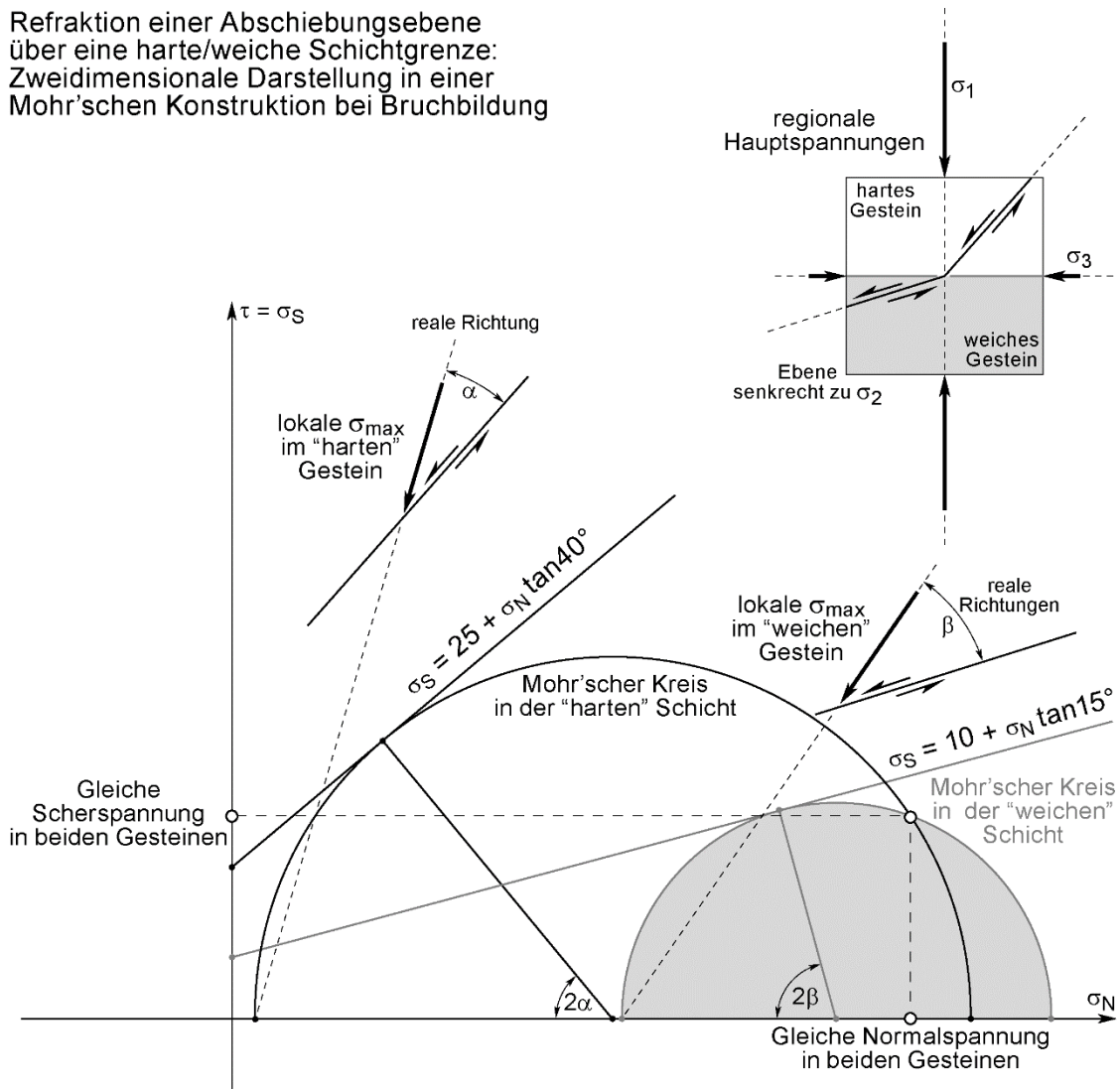
Gebogene und aufsteigende Verwerfungsflächen

Im Allgemeinen sind Verwerfungsflächen gekrümmt. Variationen in der Orientierung der Verwerfungsflächen in einem konsistenten Spannungsfeld lassen sich wie folgt erklären:

Eine Erklärung ist die Form der Mohr'sche Umhüllende (siehe Kapitel Bruchbildung), dessen stufenweise Abnahme mit zunehmendem Umgebungsdruck impliziert, dass die Verwerfungsfläche zur Tiefe hin abflacht.

Eine andere Erklärung bezieht sich auf die Materialeigenschaften. Verschiedene Gesteine haben unterschiedliche Reibungswinkel. Das Bruchkriterium (Coulomb) eines Gesteins mit grossem Reibungswinkel und wahrscheinlich einer hohen Kohäsion (z.B. Sandstein) unterscheidet sich von einem Gestein mit niedrigerem Reibungswinkel und Kohäsion (z.B. Lehm). Diese Bedingungen zeigen in einem Mohr-Coulomb Diagramm, dass sich eine Verwerfungsfläche bezüglich σ_1 über der Schichtfläche ändern sollte, wenn diese Gesteine übereinander geschichtet sind. Beide Gesteine müssen sich im selben Bruchbildungszustand befinden. Dies bedeutet, dass die beiden Gesteine unter verschiedenen Spannungszuständen stehen. Vorausgesetzt das beide Gesteine den gleichen Porendruck aufweisen, müssen die Normal- und Scherkomponenten die gleichen Werte auf der Schichtfläche haben. Dies trifft aber nur an dem Punkt zu, wo sich die beiden Mohr Kreise bei der Bruchbildung schneiden. Die σ_N - und σ_S -Achsen fallen mit den x- und z-Achsen des realen (physischen) Raums zusammen. Daher sollten die Spannungen und der physische Raum auf dem gleichen Diagramm zusammen dargestellt werden. Stellen Sie sich eine Abschiebung mit σ_1 senkrecht zur horizontalen Schichtung vor. Eine horizontale Linie durch den (σ_N, σ_S) -Spannungspunkt ist die Spur der horizontalen Schichtung auf die die betrachteten σ_N und σ_S Spannungskomponenten wirken. Die Schnittpunkte dieser Linie mit den Mohr Kreisen werden **Pole** genannt. Die Kreissehne, die einen Pol mit dem σ_1 -Punkt verbindet, definiert die reale Richtung der Ebene senkrecht zur lokalen σ_1 , und damit die lokale Richtung der maximalen Spannung im entsprechenden Gestein. Wenn der 2θ -Winkel zwischen der Bruchfläche zur lokalen σ_1 bekannt ist, kann man die Verwerfungsflächen in den zwei angrenzenden Gesteinen konstruieren und leicht erkennen, wie die Scherfestigkeit auf den Verwerfungsflächen schwankt.

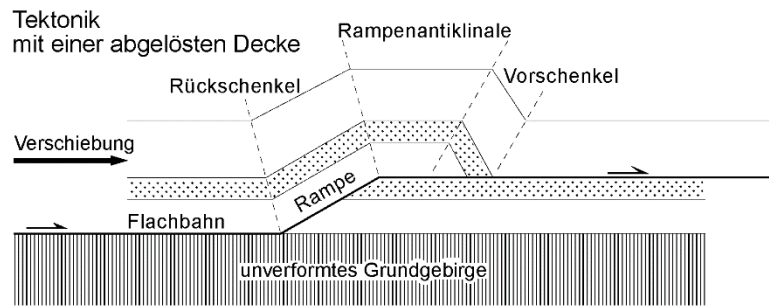
Refraktion einer Abschiebungsebene
über eine harte/weiche Schichtgrenze:
Zweidimensionale Darstellung in einer
Mohr'schen Konstruktion bei Bruchbildung



Das gleiche Spiel kann für Überschiebungen durchgespielt werden. Die Abweichung der Bruchfläche ist noch stärker ausgeprägt, wenn schichtparallele Scherung beteiligt ist, wie es passieren kann, wenn die Schichten nach Faltung oder Kippung zur regionalen maximalen Hauptspannung geneigt sind, oder wenn eine viskose Schicht (Salz oder geschmolzene mittlere Kruste in grösserem Massstab) seitlich unter einer spröden Gesteinsdecke fließt. Dann wird die Bruchfläche der duktilen Schichtgrenze folgen.

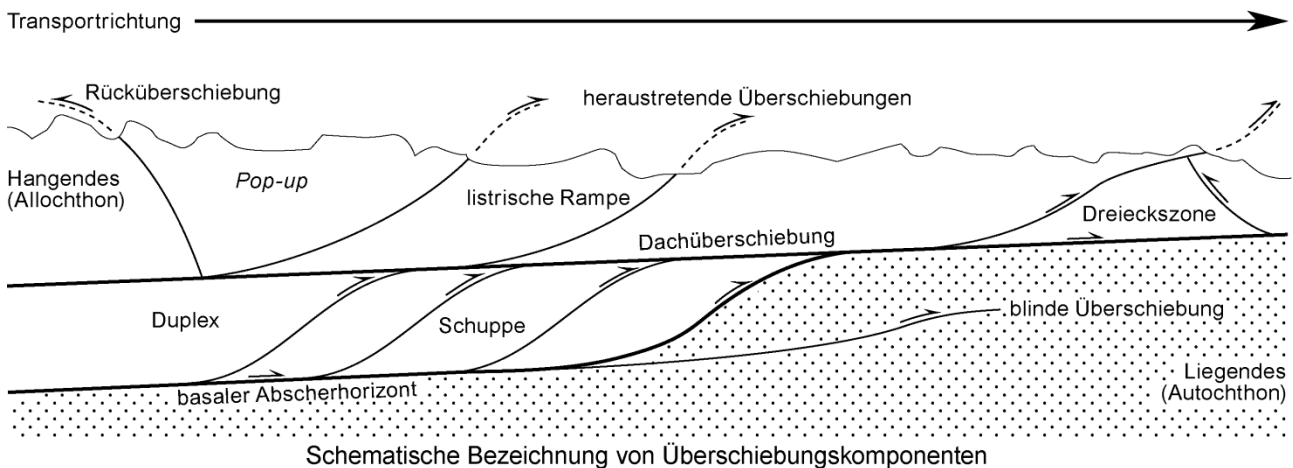
Mehr von Mohr: der physische Raum im Mohr-Diagramm

Eine visuelle Unannehmlichkeit der Mohr Diagramme ist das die Winkel das Doppelte ihres tatsächlichen, physischen Wertes anzeigen. Die eigentliche Richtung der Ebene, auf die die Spannungen wirken, wird durch die Festlegung des **Pols** (*pole*) auf dem Mohrs Kreis ersichtlich. Der einfachste Weg, um diesen Pol zu finden, ist eine horizontale Linie durch den betrachteten (σ_N, σ_S) Punkt zu ziehen. Diese Linie stellt eine Ebene parallel zur σ_N -Achse, parallel zur σ_1 -Richtung und beinhaltet σ_2 . In Bezug auf die Spannungs- und Raumachsen, ist die Linie eigentlich parallel zur Senkrechten einer Fläche auf der die Spannung σ_1 bekannt ist. Eine vertikale Linie, die parallel zur Senkrechten einer Ebene ist, auf die die Spannung σ_3 wirkt, würde tatsächlich den diametral entgegengesetzten Polschnittpunkt (**Gegenpol**, *antipole*) im unteren Halbkreis liefern. Verwirft man die Zeichenkonvention und interessiert sich nur für die Orientierung, dann genügt der obere Halbkreis.



Deckschicht-Tektonik deutet auf grosse horizontale Bewegungen hin, wobei die stratigraphische Abfolge über dem unteren, flachen Décollement mehrmals angehäuft werden kann, so dass eine Decke auf die nächste folgt. Die Decken sind im Allgemeinen dünn im Vergleich zu ihrer seitlichen Ausdehnung. Neue Überschiebungen können sich in der Reihenfolge entweder in der Richtung des Transportes (bekannt als **prograding**) oder entgegengesetzt dazu (rückwärts) ausbilden. Wo spätere, jüngere Überschiebungen im Liegenden einer älteren entstehen, werden die älteren Decken im Hangenden durch die jüngeren, tiefer gelegenen Decken **huckepack-artig** (*piggyback*) vorwärts getragen. Im Gegensatz dazu entsteht eine **overstep** (Überschneidungs-) Abfolge, wenn die jüngeren Überschiebungen rückwärts migrieren.

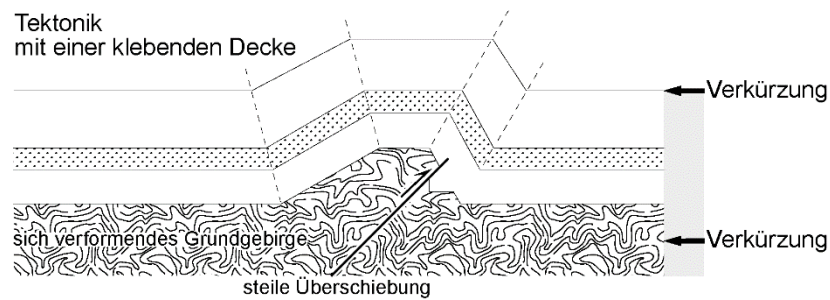
Die mehrfache Entstehung von Überschiebungsabfolgen führt oft zu einer Stapelung von Überschiebungsdecken, die durch subparallele Überschiebungen getrennt sind. Es entsteht eine **Schuppenzone** (*imbricate zone*). Wenn die Schuppenzone nach oben und unten hin durch Hauptüberschiebungs- oder Décollement-Flächen begrenzt wird, spricht man von einem **Duplex** (*duplex*). Die einzelnen Duplexe innerhalb der Duplexstruktur werden als Schuppen (*horses*) bezeichnet, die im Profil gewöhnlich linsenförmig sind. Eine typische Duplexstruktur besteht daher aus einem flachliegenden **roof thrust** (Dachüberschiebung) und einer Sohlfläche, die die einzelnen aufeinander gestapelten Schuppen begrenzt.



Untergeordnete Überschiebungen mit entgegengesetztem Versatz zur Hauptüberschiebung werden **Rücküberschiebungen** (*backthrusts*) genannt. Strukturen mit einem herausgehobenen Block, der sich zwischen einer Überschiebung und einer Rücküberschiebung befindet, werden als **Pop-up Strukturen** (*pop-up structure*) bezeichnet. Wenn eine Rücküberschiebung eine ältere Überschiebung abschneidet, entsteht eine **Dreieckszone** (*triangle zone*).

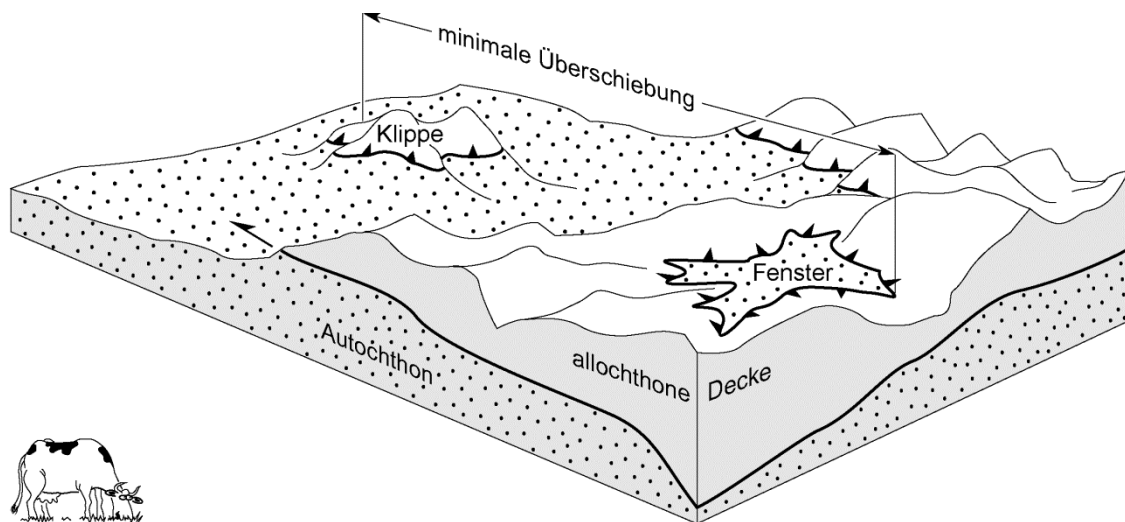
Tektonik mit einer klebenden Decke (Dickhäutige Tektonik)

In metamorphen Gebieten sind Überschiebungen häufig mit intensiver und verteilter duktiler Deformation assoziiert. Die Stufen-, Flachbahnen- und Rampengeometrie wird nicht berücksichtigt, obgleich Überschiebungen dazu neigen, Flächen rheologischen Kontrasts zu folgen aber dabei das Grundgebirge mit einbeziehen. Die Hauptüberschiebungen erstrecken sich steil bis zum Grundgebirge. Diese Form wird **dickhäutig** (*thick-skin*) genannt.



Erodierte Überschiebungen

Ein (tektonisches) **Fenster** (*window*) ist ein durch die Erosion entstandener Aufschluss, wo Gesteine der nächst tieferen Einheit, das heisst unterhalb einer Überschiebung, sichtbar werden. Der Aufschluss ist völlig umgeben von der darüber liegenden Überschiebungsmasse. Eine **Klippe** (*klippe*) ist ein isolierter, von der Erosion übriggebliebener Rest der Überschiebungsdecke, der ganz von Gesteinen des Liegenden umgeben ist.

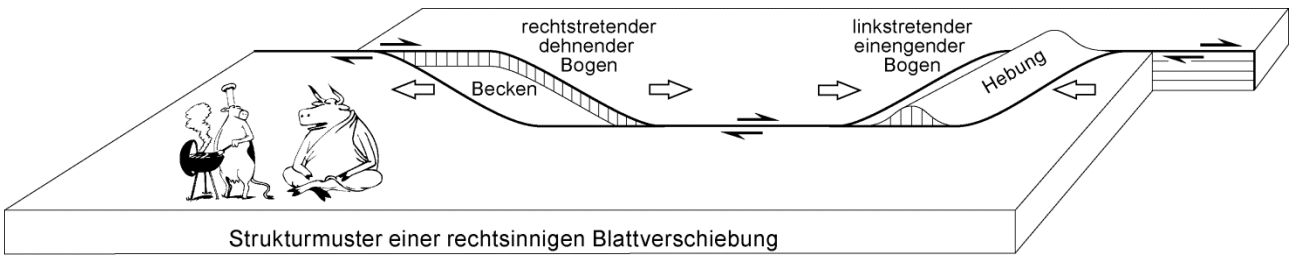


Gravitationsgetriebene Überschiebungen

Ein Teil der Serie ist vom Gipfel der Antiklinale weggerutscht aufgrund gravitationsgetriebenem **Kollaps** (*collapse*). **Gleitdecken** (*slip sheet*) werden gebildet, wenn ein zusammenhängender Teil einer Serie infolge von gravitationsgetriebenem Kollaps von einem Antiklinalscheitel auf eine erodierte Fläche der angrenzenden Synklinale geglitten ist.

Blattverschiebung

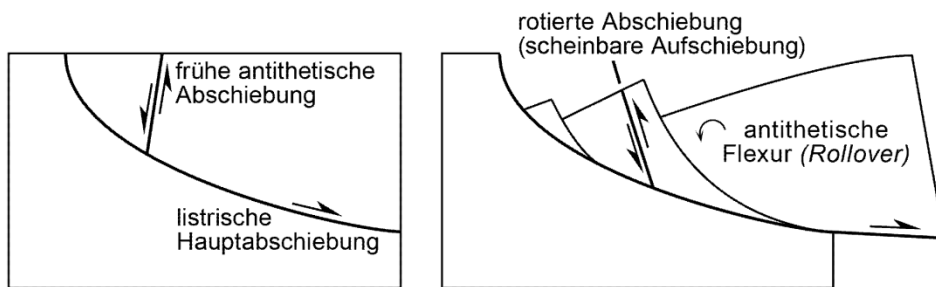
Blattverschiebungen sind im Allgemeinen vertikal und entwickeln sich ca. 30° zur horizontalen Kompressionsrichtung. Sie entwickeln häufig Flächen mit **rechtstretenden** (*right-stepping*) und **linkstretenden** (*left-stepping*) Verwerfungen (von der oberen zur unteren Verwerfung gehend). Während rechtstretende Verwerfungen eine Extensionszone bilden, erzeugen die linkstretenden Verwerfungen eine Konvergenzzone und umgekehrt, entsprechend der Bewegungsrichtung der Verwerfung.



Nebenverwerfungen von gebogenen Hauptverwerfungen

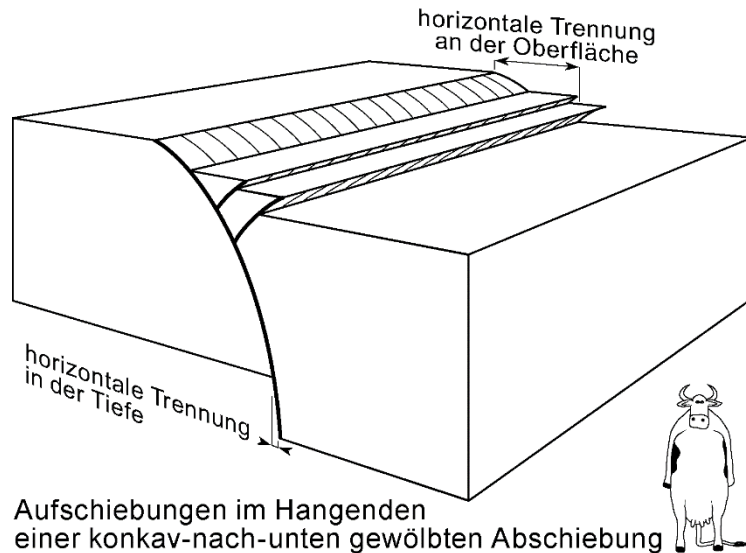
Normalerweise gehören Nebenverwerfungen zur gleichen Kategorie wie die Hauptverwerfung. Dies gilt aber nicht bei gebogenen Hauptverwerfungen, was in einer komplizierten Verformung des Hangenden durch die Entwicklung von Akkomodationsverwerfungen resultiert:

- Rotation des Hangenden in einer listrischen Abschiebung kann eine ehemalige antithetische Abschiebung in eine scheinbare Aufschiebung ändern.



Rückrotation einer antithetischen Zweigabschiebung zu einer scheinbaren Aufschiebung im Hangenden einer listrischen Hauptabschiebung

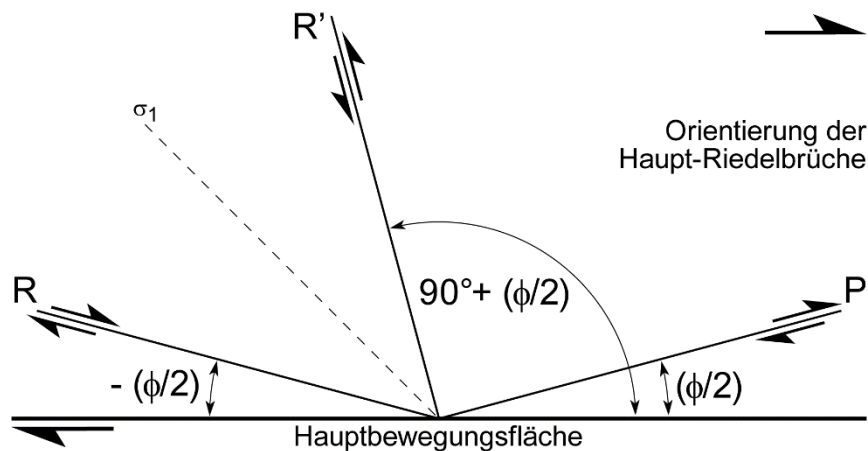
- Aufschiebungen können sich im Hangenden einer nach-oben-konvexen Abschiebung bilden.



Aufschiebungen im Hangenden einer konkav-nach-unten gewölbten Abschiebung

- Aufschiebungen können sich in gekippten Schichten bilden um die schichtparallele Ausdehnung, infolge der grossräumigen Abschiebung, aufzunehmen.

- **R'-Brüche** sind konjugierte, antithetische Verwerfungen zu den R(iedel) shears (d.h. mit Versatz entgegen der Gesamtbewegung), die in einem steilen Winkel $[90^\circ + (\phi/2)]$ zur Hauptverwerfungsebene orientiert sind. Sie kommen bevorzugt zwischen zwei parallelen R-Brüchen vor. R und R'-Brüche schneiden sich in einem spitzen Winkel $\beta = 90^\circ - \phi$.



- **P-Brüche** sind synthetische kleinere Verwerfungen, symmetrisch zu den R-Brüchen und zur Verwerfungsebene orientiert (mit $+\phi/2$ zur Verwerfungsebene). P-Brüche verbinden allgemein R-Brüche und neigen dazu bei grossen Bewegungen zu entstehen.
- Wie für R-Riedelscherbrüche kann es ebenso auch **P'-Brüche** konjugiert zu den P-Brüchen (mit $-45^\circ - \phi/2$ zur Hauptverwerfungsebene) geben, sie sind aber von sehr untergeordneter Bedeutung.
- **Y-Brüche** sind synthetische Mikrobrüche, die subparallel zur Hauptverwerfung liegen.

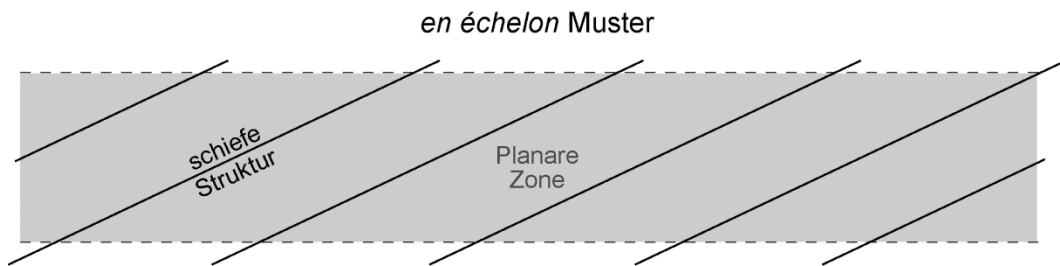
Verwerfungspopulationen und netzartige Anordnung von Verwerfungen

Die Analyse der Verwerfungspopulationen hat gezeigt, dass Verwerfungen viele Eigenschaften von **Fraktalen** haben. Ein Fraktal ist ein Objekt, dessen geometrische Eigenschaften (z.B. Form) unabhängig von seiner Grösse ist („selbst-gleichartig“ = *self similar*) oder eine einfache Beziehung mit seiner Grösse („selbst-ähnlich“ = *self affine*) hat. Diese Eigenschaft bedeutet, dass ein Verwerfungsmuster, das auf Satellitenbildern gesehen wird, dasselbe Verwerfungsmuster wie in einem Aufschluss ist. Das bedeutet, dass einige Eigenschaften (z.B. das Länge/Versatz-Verhältnis) relativ unabhängig von der Verwerfungsgrösse sind. Wie auch immer, die Analyse von Verwerfungen mit 3-dimensionalen Daten hat gezeigt, dass im Log-Log Diagramm ein einfaches lineares Verhältnis zwischen Häufigkeit und der Grösse von Verwerfungen besteht. Dieses Verhältnis zwischen Grösse (Länge oder maximale Verschiebung) und Anzahl der Verwerfungen mit einer bestimmten Grösse (wenige grosse Verwerfungen, viele kleine Verwerfungen) kann verwendet werden, um die Dichte von kleinen, sozusagen sub-seismischen (d.h. unterhalb der Auflösung der Seismik) Störungen vorherzusagen.

Es gibt einige wichtige Ausdrücke, die die Anordnung von Verwerfungen in der Karten-Ansicht beschreiben.

En échelon Muster

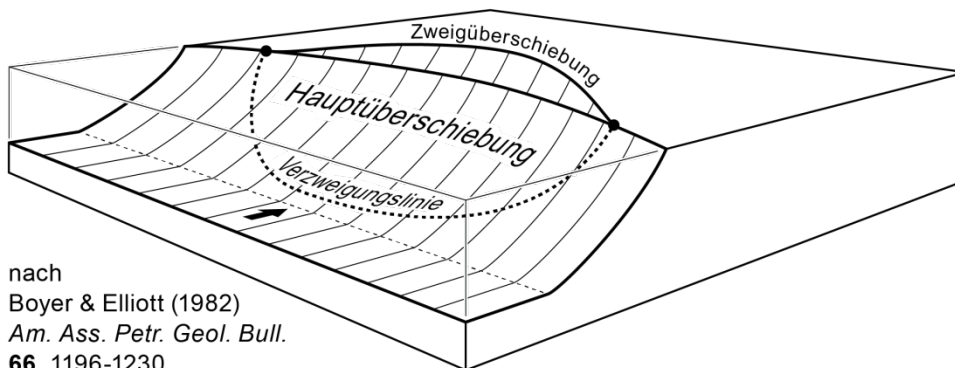
"En-échelon" (in Staffeln) bedeutet "Treppen-ähnliche Anordnung" und beschreibt eine durchweg überschreitende und überlappende Einregelung von subparallelen, räumlich eng bemessenen Strukturen, die schief zur planaren Zone sind, in der sie auftreten. Solche Muster hängen im Allgemeinen mit möglichen Verwerfungen zusammen.



Zusammenlaufende Verwerfungen

In Gebieten mit Sprödbbruch und in Beschädigungszonen verzweigen sich Verwerfungen in komplexe Anordnungen von kleineren Verwerfungen, die in einem spitzen Winkel von der Richtung der Hauptverwerfung wegbiegen.

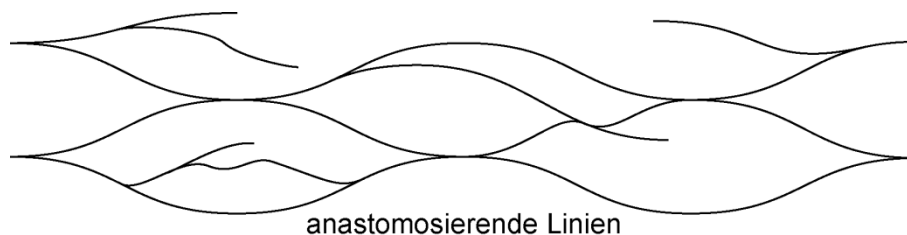
Schuppenzone mit einer Verzweigungslinie und zwei Verzweigungspunkte



Eine **Verzweigungslinie** (*branch line*) ist eine Intersektionslinie, an der sich eine Verwerfung in zwei Verwerfungen desselben Typus aufspaltet. Hinter dieser Linie haben die verzweigten **Zweigverwerfungen** (*splay faults*) die gleiche relative Bewegung wie die Hauptverwerfung. Sie bilden einen **Verwerfungsfächer** (*imbricate fan*), der zu einer Ausbreitung der Verschiebung (und Verformung) auf ein Gesteinsvolumen führt. Alle Verwerfungen finden an der Frontallinie ein Ende, an denen die relative Verschiebung auf null geht und die Deformation im umgebenen Gestein aufgenommen wird. Eine Zweigverwerfung ist ein kleines häufig inaktives Verwerfungssegment oder -zweig, der während des Verwerfungswachstums (**harte Verknüpfung**, *hard linkage*) oder der Ausbreitung (Verzweigung) erstellt wurde. **Weiche-Verknüpfung** (*soft-linkage*) bezieht sich auf die Verwerfungssegmente, die nicht verbunden sind.

Anastomosierendes Muster

Riedel-Mikrobrüche können sich auf jeden Massstab verbinden und so ein anastomosierendes Netzwerk von Brüchen in engen Bruchzonen bilden, deren Ränder parallel zur Hauptverwerfung liegen.



Anastomosierend (*anastomosing*) beschreibt ein sich ausbreitendes und wieder zusammenbringendes Netz von aperiodischen Flächen oder Linien, die wie Zopfströme oder Adern verflochten sind.

Skalierung von Verwerfungsverteilungen

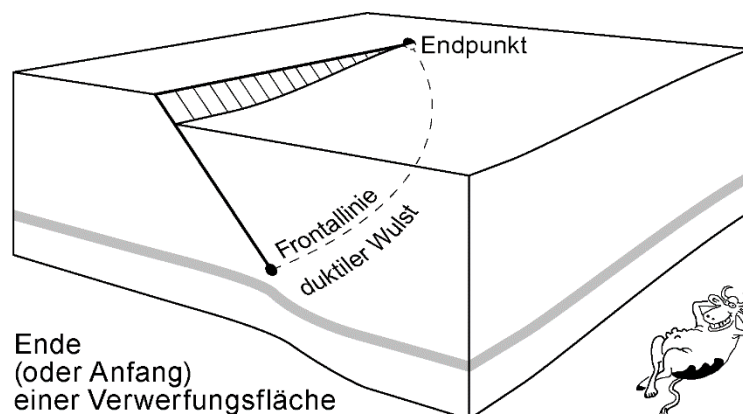
Häufig wird eine Potenzgesetzverteilung angenommen, um die Verwerfungsverteilungen zu beschreiben. In der Praxis könnte die Bedeutung eines einzelnen Potenzgesetzexponenten hierarchische Muster in einem komplizierten Bruchsystem aufdecken, das alle Arten von Brüchen mit verschiedenen Massstäben umfasst.

Anatomie der Verwerfungen

Verwerfungen sind nicht unendlich lang. Sie bestehen aus der Scherfläche (**Störungskern** bei „dicken“ Verwerfungen, gebildet durch anastomosierende Scherbrüche) und einer umhüllenden **Beschädigungszone** (*damage zone*), die eine gewisse Breite umfasst. Diese zwei Elemente enden entweder an anderen Verwerfungen oder sie laufen einfach entlang ihres Streichens aus. Im letzteren Fall vereinen sich die Verwerfungen entweder oder werden durch die anderen Verwerfungen abgeschnitten. Resultierend aus dem Wachstum von Verwerfungen und deren Verschmelzung entwickeln sich **Netzwerke von Verwerfungen** (*fault network*).

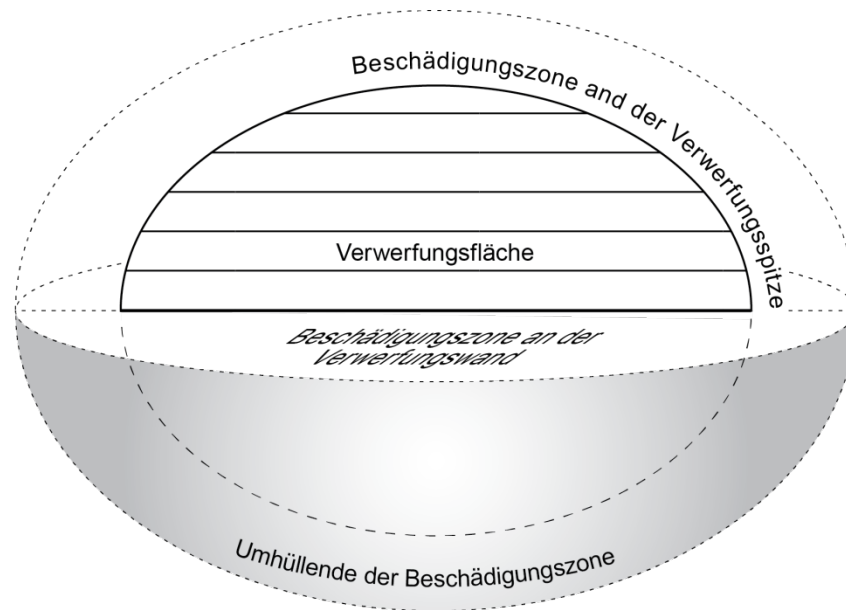
Frontallinie und Frontalzone

Einzelne, isolierte Verwerfungen haben ungefähr eine elliptische (geschlossene) Oberfläche, entlang der die meiste Verschiebung stattgefunden hat. Diese elliptische Form verschwindet, wenn die Verwerfung die Erdoberfläche schneidet. Die Verschiebung muss nach aussen abgebaut werden. Das Ende (oder der Anfang) einer Verwerfungsfläche ist eine Linie, auf der der Verschiebungsbetrag der Gleitregion auf null geschrumpft ist.



Das Verhältnis zwischen Länge und Breite der elliptischen Fläche bei Abschiebungen ist ungefähr > 1 und < 5 . Diese Linie, die die elliptische Bewegungsfläche umgibt, wird **Frontallinie** (*tip line*) genannt. Das heisst, dass die Frontallinie bewegte von nicht-bewegten Gesteinen trennt. Über die Frontallinie hinaus wird die Verschiebung durch Verformung in der **Frontalzone** abgebaut und auf verschiedene Art und Weise untergebracht. Dies hängt ab vom Verhältnis der Verwerfungslänge zum Betrag der Verschiebung.

- Wenn die Verschiebung im Verhältnis zur Länge des aktiven Segments sehr klein ist, können die Raum- und Kontinuitätsprobleme durch allmähliche Reduktion der Verschiebung gegen die Frontallinie hin untergebracht werden. Die Abnahme der Verschiebung auf der Verwerfungsfläche wird kompensiert durch nicht-spröde Deformation (penetrative Verformung und/oder Faltung) im angrenzenden Gestein entlang des Verwerfungsendes, dem sogenannten **duktilen Wulst** (*ductile bead*).
- Wo die Verschiebung im Verhältnis zur Länge der Verwerfung gross ist, kann die Deformation um die Verwerfung herum innerhalb einer **Beschädigungszone** (*damage zone*) durch Assoziation von kleineren Verwerfungen und zusätzlichen Brüchen, besonders im Hangenden, angepasst werden.

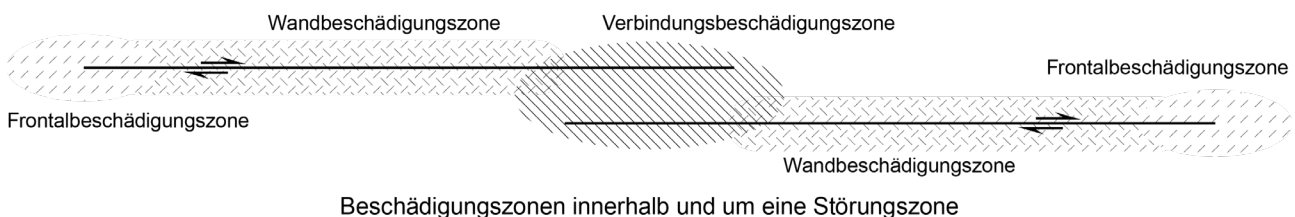


3D konzeptionelles Modell einer Beschädigungszone um eine Störung

Beschädigungszonen

Beschädigungszonen sind verwobene kleine Verwerfungen und Brüche entlang grösseren Verwerfungsflächen. Die Dichte von Verwerfungen und Brüchen nimmt in der Regel exponentiell ab mit zunehmender Entfernung zur Hauptverwerfung. Die Beschädigungszonen treten infolge von Spannungskonzentration, besonders an den Verwerfungsspitzen und in den Verbindungszonen auf; sie bilden sich auch, um Veränderungen im Versatz in oder entlang der Verwerfung aufzunehmen. Bruchbildung, Ausbreitung und Interaktion teilen Beschädigungszonen in Frontal-, Wand- und Verbindungsbeschädigungszonen ein in Bezug auf ihren Standpunkt innerhalb und um eine Verwerfungszone ein.

- Eine Frontalbeschädigungszone entwickelt sich in Reaktion auf Druckkonzentration an einer Verwerfungsspitze.
- Wandbeschädigungszonen können entlang der gesamten Spur einer Verwerfung verteilt werden. Sie können die Frontalbeschädigungszonen darstellen, die in den Wandgesteinen zurückbleiben, während sich Störungen durch die Gesteine fortpflanzen. Sie können auch die Deformation der Wandgesteine darstellen, die mit der Vergrößerung des Versatzes verbunden ist.



Beschädigungszonen innerhalb und um eine Störungszone

- Verbindungsbeschädigungszonen werden durch die Interaktion und die Verbindung der Verwerfungssegmente in einer verhältnismässig kleinen Region verursacht. Sie sind durch den angehäuften Versatz und durch die Interaktion der Beschädigungszonen an der Wand- und Spitze von zwei benachbarten Verwerfungen verkompliziert. Folglich können die Verbindungsbeschädigungszonen eine Reihe von Bruchmustern entwickeln, abhängig von der Interaktion zwischen den zwei Verwerfungssegmenten.

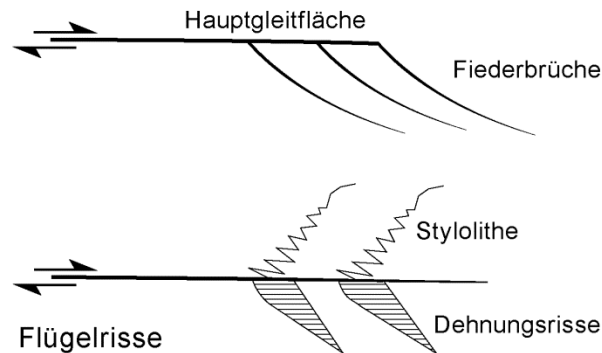
Die Enden von Verwerfungen

Mesoskopische Beschädigungszonen vor den Frontallinien werden in vier Unterteilungen entsprechend der dominierenden Art und der Orientierung der entwickelten Brüche unterteilt:

Flügelrisse, Fiederbrüche und synthetische bzw. antithetische Zweigverwerfungen. Beschädigungszonen an den Verwerfungsspitzen sind leicht zu erkennen, selbst im grossen Massstab.

Flügelrisse

Flügelrisse (*wing cracks*) treten auf, wo es eine schnelle Abnahme des Versatzes an der Verwerfungsspitze gibt, an Unregelmässigkeiten der Verwerfungsfläche wie Bogen, Treppen oder Relaiszonen und an Punkten von variablen Reibungseigenschaften entlang der Verwerfungsfläche. Sie berühren die Hauptverwerfungsfläche und sind Dehnungsbrüche, die dazu neigen sich parallel zur lokalen σ_1 -Richtung im Dehnquadrant der Verwerfungsspitze zu entwickeln.



Anticracks

Anticracks sind Lösungsflächen (**Styloлите**), die symmetrisch zu Flügelrissen in Bezug auf die Hauptscherfläche entstehen. Sie entwickeln sich senkrecht zur lokalen σ_1 -Richtung im Druckquadrant der Verwerfungsspitze.

Fiederbrüche

Flügelrisse (*wing cracks*) treten auf, wo es eine schnelle Abnahme des Versatzes an der Verwerfungsspitze gibt, an Unregelmässigkeiten der Verwerfungsfläche wie Bogen, Treppen oder Relaiszonen und an Punkten von variablen Reibungseigenschaften entlang der Verwerfungsfläche. Flügelrisse sind Dehnungsbrüche, die die Hauptverwerfungsfläche berühren. Sie neigen dazu sich parallel zur lokalen σ_1 -Richtung im Dehnquadrant der Verwerfungsspitze zu entwickeln.

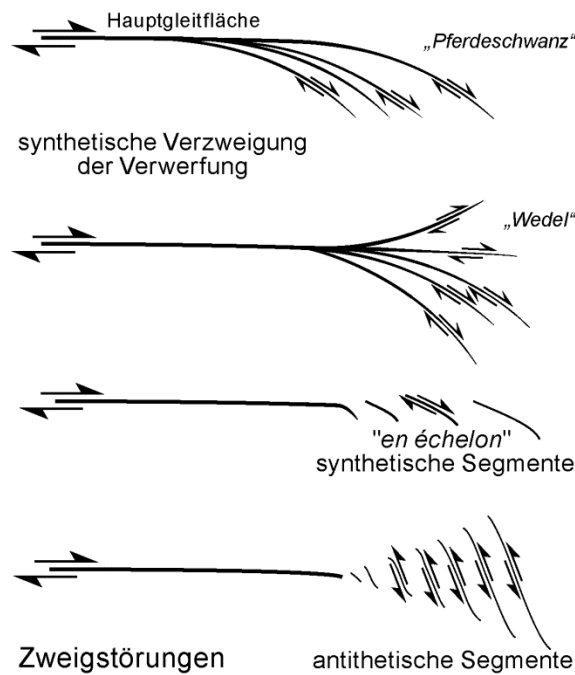
Zweigverwerfungen

Synthetische Zweigverwerfungen

Synthetische Zweigverwerfungen (*synthetic splay faults*) sind Flügelrissen geometrisch und mechanisch ähnlich, sind aber feiner und näher beieinander mit verhältnismässig niedrigen Winkeln zu den Hauptverwerfungen. Sie haben die gleiche Bewegungsrichtung wie die Hauptverwerfung und können sich mit einem benachbarten Verwerfungssegment verbinden. „**Schachtelhalm**“-**Brüche** (*horsetail fractures*) scheren asymmetrisch, häufig auf einer Seite der Hauptstörung in einem fächerförmigen Netz heraus. Sie neigen sich dort zu entwickeln, wo die relative Bewegung eher stufenweise in Richtung zur Störungsspitze abnimmt, anders als bei Flügelrissen.

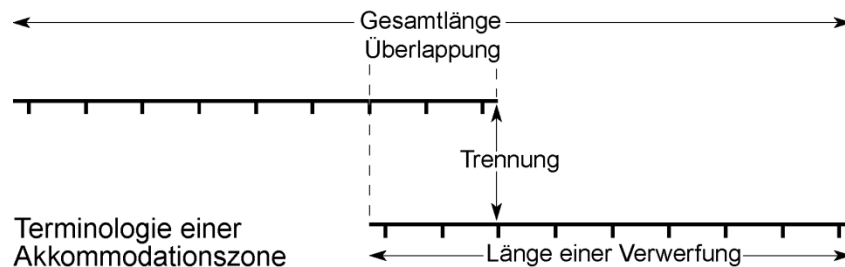
Antithetische Zweigverwerfungen

Antithetische Zweigverwerfungen (*antithetic splay faults*) haben eine Bewegungsrichtung entgegengerichtet zu der der Hauptverwerfungen und entwickeln sich meist in einem hohen Winkel ($60-70^\circ$) zur Hauptverwerfung. Sie sind isolierte Verwerfungen die von der Hauptverwerfung separiert sind. Ihre Länge und ihr Abstand zueinander vergrössern sich mit dem Abstand von der Verwerfungsspitze.



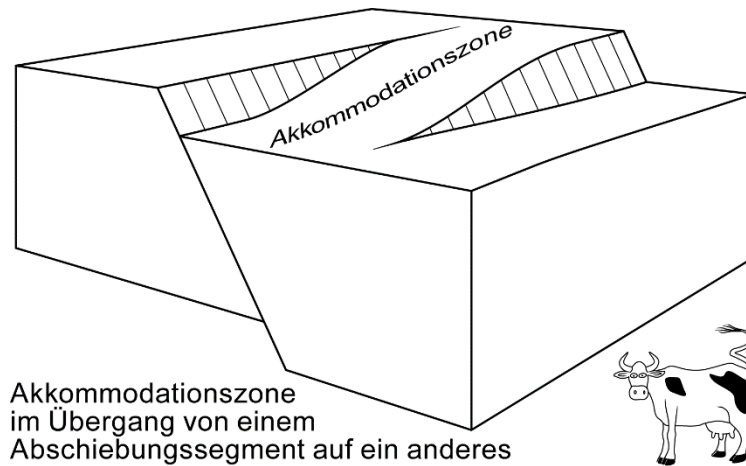
Akkommodationszonen

Eine **Relaiszone** ist eine Zone in einem Gestein, durch die der Versatz von einem Verwerfungssegment auf ein anderes nicht in der gleichen Ebene liegendes Verwerfungssegment übertragen wird. Durch diese Übertragung werden Relais-Strukturen geschaffen durch die lokalen Komplikationen in der Kinematik und Verformung aufgenommen. Die **Überschreitung** (*overstep*) ist der offene Abstand zwischen den zwei subparallelen Verwerfungssegmenten (eigentlich zwischen zwei ähnlichen Strukturen). Wenn die Normale der Spitze einer überschreitenden Verwerfung die anderen Verwerfungen schneidet, gibt es **Überlappung** (*overlap*). Die Alternative ist **Unterlappung** (*underlapping*).



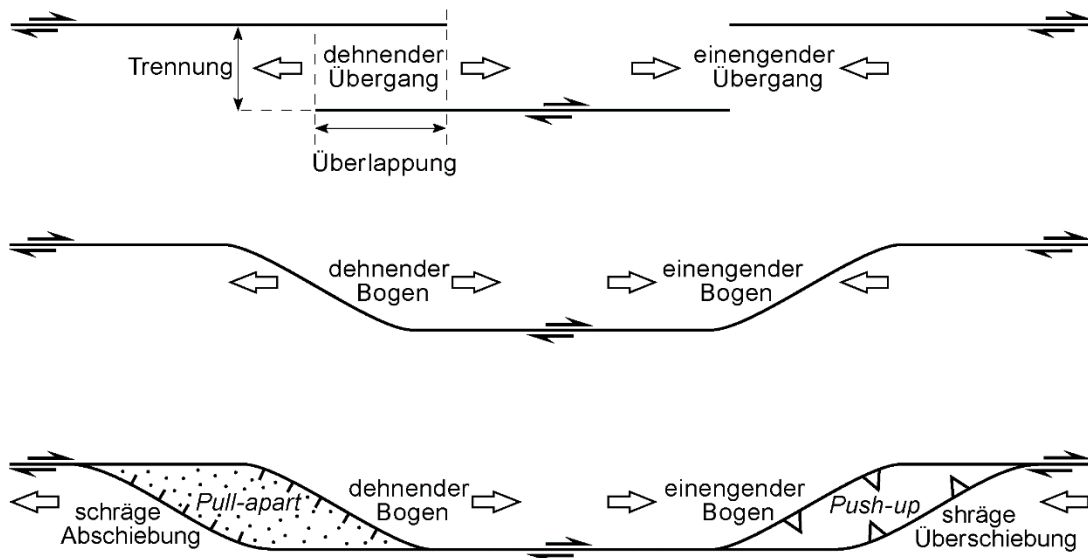
Überlappungen werden beschrieben, als **rechts-** oder **links-„springend“** (*right-* oder *left-stepping*), abhängig von der Richtung des Sprungs von einer Struktur zur folgenden. Der Abstand zwischen den überlappenden, parallelen Verwerfungssegmenten ist die **Trennung** (*separation*). Trennung/Überlappung-Verhältnisse liefern ein grobes Mass der Abhängigkeit zwischen den Verwerfungen. Der Grad von Abhängigkeit lässt sich besser bestimmen, wenn die Trennungs- und Überlappungs-Werte zur Verwerfungslänge von einer und zu einer beliebigen der zwei aufeinander einwirkenden Verwerfungen normiert werden.

Relaiszonen können zu grossen **Relaisstrukturen** (*relay structure*) führen. Eine **Relaisrampe** (*relay ramp*) ist ein Bereich in dem die Schichtung gebogen ist. Die Relaisrampe überträgt die Versätze zwischen zwei sich überschreitenden Verwerfungen, die häufig gleichzeitig sind.

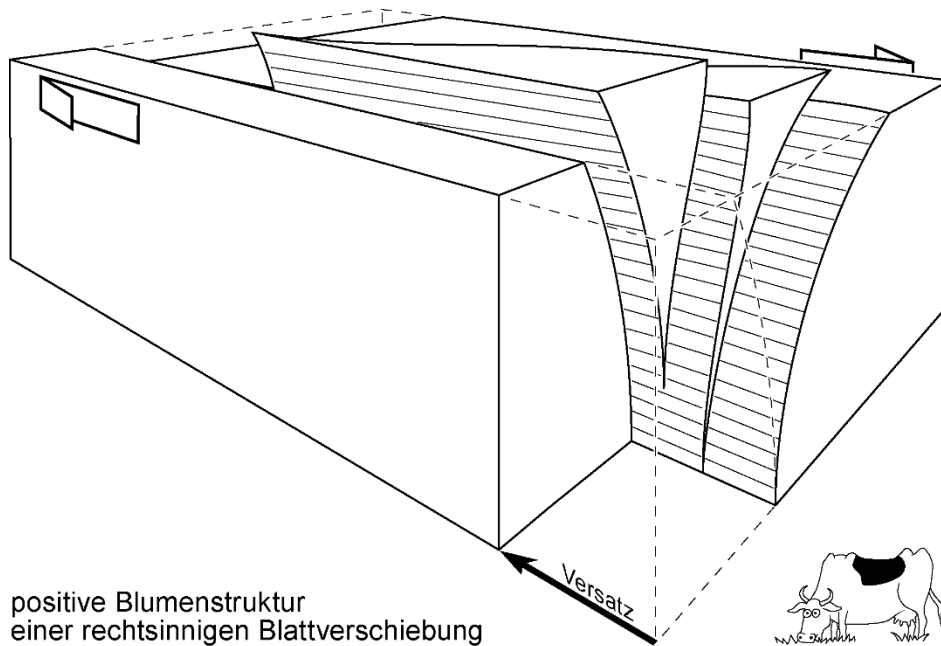


Die Relaisrampen sind vorübergehende Strukturen, die sich während der Störungsausbreitung entwickeln, bis sie durch **Durchbrüche** (*breaching faults*) ersetzt werden, die die aufeinander interagierenden Störungssegmente zusammenfügen (Entwicklung von Weich- zur Hartverknüpfung) um eine einzelne, durchgehende Verwerfungsoberfläche zu bilden. Die Verknüpfung von einzelnen und Doppelspitzen sind offensichtliche Muster, die Verwerfungskrümmungen und Versetzungen bilden, wobei sich das Einfallen und das Streichen einer Blattverschiebung ändern. Änderungen in der Orientierung der Verwerfungsfläche führen zu kompressiven oder extensiven Deformationszonen, je nach der Form der Versetzung in Bezug auf die Verwerfungsbewegung.

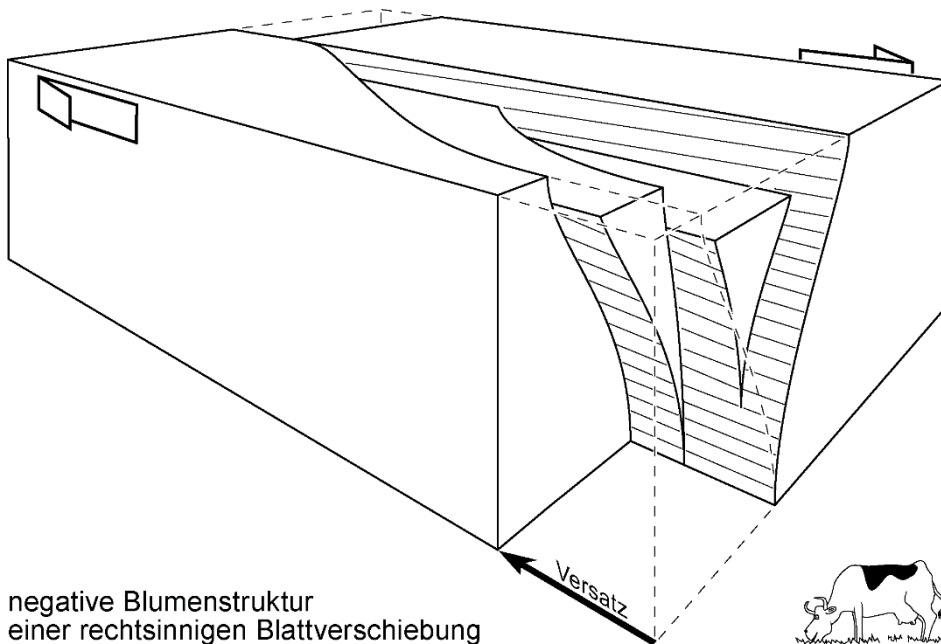
Geometrie von einengenden und dehrenden Übergängen und Bögen entlang einer rechtssinnigen Blattverschiebung



Eine parallele, jedoch seitlich versetzte Anordnung von Blattverschiebungen, ist kinematisch verknüpft. Auf diese Art wird beispielsweise in der **Überlappungszone** (*overlap zone* oder *transfer zone*) zweier paralleler dextraler Verwerfungssegmente das Gestein gestreckt. Die Streckung findet gewöhnlich durch Ausbildung von Abschiebungen statt, und bildet damit Lücken oder Dehnungsbereiche gefüllt mit Adermaterial oder Beckensedimente (**rhombenförmige Becken**: *rhone-shaped basin*, sogenannte **pull-apart Becken**: *pull-apart basins*). Falls in der Überlappungszone zweier Verwerfungen Kompression auftritt, so bilden sich Lösungsstrukturen, Antiklinalen oder Horste. Solche Überlappungsstrukturen, bei denen die Überschiebungen der Überlappungszone in grossen Blattverschiebungen wurzeln, werden manchmal auch **Blumenstrukturen** (*flower-structures*) genannt.



Manchmal wird auch von positiven Blumenstrukturen bei kompressiven Überlappungszonen, und von negativen Blumenstrukturen bei gestreckten, pull-apart Becken gesprochen. **Verschiebungsgradienten** (*throw gradients*) neigen dazu, in den Relaiszonen am höchsten zu sein.



Gesteine in Bruchzonen

Verwerfungszonen sind oft mit zerstörten Gesteinen aufgefüllt. Die geltende Klassifikation von Gesteinen in Bruchzonen, d.h. die Gesteinsarten, die durch Bruchbildung verursacht werden, benutzt die Kohäsion zu der Zeit der Verwerfungsbewegung und die Anwesenheit eines planaren Gefüges.

Zwei Hauptarten von Gesteinen können in Bruchzonen identifiziert werden:

- Inkohäsive Gesteine in den spröden Verwerfungszonen. Diese Gesteine haben ein willkürliches Gefüge.
- Kohäsive Gesteine in den duktilen Verwerfungszonen. Diese Gesteine haben ein geschiefertes Gefüge.

Inkohäsive und nicht-geschieferte Verwerfungszonengesteine

Bruchbildung im spröden Bereich wird durch **Zerkleinerung** (*comminution*) der Gesteine gekennzeichnet. Die resultierenden, inkohäsiven und richtungslosen Verwerfungszonengesteine werden **Kataklasite** (*cataclasite*) genannt.

Beschreibung – Definition

Kataklasite sind zufällig verteilte Aggregate aus eckigen, zerbrochenen Fragmenten des Gesteins an den Seitenwänden der Verwerfung. Die Fragmente sind unterschiedlich gross und können durch ein zementartiges Material (Ausfällungen aus zirkulierenden Flüssigkeiten) verkittet werden. Entsprechend der Grösse der Elemente, unterscheidet man:

- * **Verwerfungsbrekzien (Kakirite)** (*fault breccia*), wenn sichtbare, eckige Fragmente mehr als 30% des Gesteins ausmachen; Brekzien können zementiert oder nicht zementiert sein; Gesteinsfragmente können von Sandgrösse bis zu grossen Gesteinsblöcken reichen, welche häufig geschrammt sind.
- * **Mikrobrekzien** (*microbreccia*), wenn die Fragmente mikroskopisch klein sind;
- * **Verwerfungsletten** (*gouge*) liegt vor, wenn mehr als 70% des Materials hauptsächlich aus sehr feinkörnigem, tonartigem und häufig dunklem Pulver, das kleine eckige Fragmente enthält, besteht. Tonmineralien resultieren aus Verwitterung und/oder hydrothermalen Umwandlung der zerquetschten Verwerfungsgesteine. Verwerfungsletten und gleichwertige feinkörnige Verwerfungsabnutzungen werden selten verfestigt.

Späte Bewegungen können ein eindeutiges planares Gefüge in diesen gebrochenen Gesteinen verursachen, die jedoch spröde, d.h. nicht verfestigt bleiben.

Terminologie der Verwerfungszonengesteine

metamorphe Bedingungen	sehr niedriggradig	niedriggradig	mittelgradig	hochgradig	
	Kataklasite		Mylonite		
Hauptarten von Gesteinen an Bruchzonen	inkohäsiv		kohäsiv		
	Fragmente %			Matrix %	
	>30	Brekzie		Protomylonit	<50
		Mikrobrekzie		Mylonit	50<<90
	<30	Verwerfungsletten		Ultramylonit	>90
			Pseudotachylit (geschmolzen)		>85
				stark rekristallisierter Blastomylonit	

Stellung

Hauptverwerfungen weisen keine getrennte Scherfläche sondern einen planaren **Kern** auf, der bis zu einigen Metern dick ist. Dieser Kern wird im Wesentlichen vom Abnutzungsdetritus, der von den Störungswänden stammt, gebildet. Kataklasite, die gebrochenen Gesteine, bilden die Beschädigungszone, die das ausgebreitete Volumen der verformten Gesteine um eine Störungsfläche oder -kern darstellt.

Kataklase

Kataklase (*cataclasis*) entsteht aus der Bruchbildung, der Ausbreitung, der Interaktion und der Versatzansammlung entlang einer Verwerfung. Die inkohäsiven Verwerfungszonengesteine werden im Wesentlichen durch Kataklase gebildet: Dieser Deformationsprozess schliesst sowohl das Zerbrechen von Kristallen und Kristallgrenzen wie auch **Dilatanz** (*dilatancy*), die Festkörperrotation zwischen körnigen Partikeln erlaubt, mit ein. Es kann beschrieben werden als mechanische Granulation und/oder Zerquetschen, das den zusammenhängenden Fels pulverisiert. Der Prozess ist

in der oberen Kruste häufig, weil die Verformungsrate schnell, der Umgebungsdruck und die Temperatur verhältnismässig niedrig sind (< 500 MPa, $200-300^{\circ}\text{C}$). Die Grössenverteilung der zerkleinerten Partikel ist ein Mass der Energie, die für Kataklyse verwendet wird. Die Verwerfungsletten zeigen Grössenverteilungen mit fraktalen Dimensionen $> 1,6$.

Kohäsive und geschieferte Verwerfungszonengesteine

Kohäsive, geschieferte, meist linierte Gesteine gehören zur **Mylonitserie** (*mylonite*). Sie sind im Dünnschliff charakterisiert durch eine geplättete oder stängelige Struktur. Körner der Gesteinsmatrix sind in der Grösse ohne den Verlust der Primärzusammensetzung verringert worden. Die Mylonite sind charakterisiert durch feine Korngrössen und eine Mikrostruktur, die auf duktile Deformation und dynamische Rekristallisation zurückgeführt werden kann (viskoses Kriechen). Sie können grössere Fragmente oder Mineralien des Ursprungsgesteins enthalten; diese Fragmente werden **Porphyroklasten** genannt. Mylonitisierung ist ein gradueller Prozess von Korngrössenreduktion, in dem drei Gesteinsarten für die Klassifikation von mylonitischen Gesteinen mittels des relativen Anteils von Porphyroklasten zur feinkörnigen Matrix festgelegt werden:

- Ein **Protomylonit** (*protomylonite*) ist ein Gestein in der Anfangsphase der Mylonitisierung, das mehr als 50% Porphyroklasten enthält.
- Ein zutreffender Mylonit enthält 10-50% an Porphyroklasten.
- Eine äusserst intensive Korngrössenverkleinerung und dynamische Rekristallisation entlang von Störungen kann zu einer harten, dunklen Füllung aus ultramikroskopischen Körnern führen, welche weniger als 10% von kleineren Porphyroklasten enthält. Dieses Material nennt man **Ultramylonit** (*ultramylonite*).

Der Ausdruck **Blastomylonit** (*blastomylonite*) wird hingegen nur für nach der Mylonitisierung stark rekristallisierte Gesteine angewendet.

Ein **Phyllonit** (*phyllonite*) ist ein glimmerreicher Mylonit der mesoskopisch aussieht wie ein Schiefer.

Pseudotachylite

An gewissen Verwerfungen treten dünne, glasige und dunkle Adern kohäsiver und untexturierter Gesteine auf, die aussehen wie vulkanisches Glas. Sie sind unter dem Namen **Pseudotachylit** (*pseudotachylite*) bekannt. Typischerweise haben sie die Form eines Netzwerks verzweigter Injektionsadern, das von der Bruchzone ins angrenzende Gestein, meist Kristallin, eindringt. Diese Adern zeigen an, dass der Pseudotachylit einen flüssigen Aggregatzustand hatte. Die glasige Matrix, die gewöhnlich Gesteinseinschlüsse und mikroskopische Sphärolithe enthält, bestätigt, dass die Ader abrupt gekühlt wurde. In den meisten Fällen hat spätere Entglasung (Devitrifikation) zum Verlust der glasigen Beschaffenheit geführt. Es wird angenommen, dass Pseudotachylite durch eine seismische Bewegung und eine lokale Dekompression entstehen, in Verbindung mit schnellem Schmelzen, gefolgt von Abschrecken und von der Verfestigung des flüssigen Materials. Berechnungen der Temperaturen für die lokale Schmelzung der Wandgesteine geben an, dass die Reibungswärme infolge einer raschen (0.1 bis 1 m/s) Bewegung zweier Gesteinskörper entlang einer Verwerfungsebene zustande kam. Pseudotachylite werden daher als Indikatoren für paläoseismische Aktivität verwendet.

Verwerfungszonengesteine in der Tiefe

Die verschiedenen Arten von Störungsgesteinen neigen dazu, sich in verschiedenen Tiefen zu bilden:

Inkohäsive Verwerfungsletten und Breckzie:	0-5 km
Kohäsive Kataklysite und Pseudotachylite:	10-15 km
Kohäsive Mylonite:	$> 10-15$ km

Bestimmung der Verschiebung

Es können verschiedene Methoden angewendet werden, wenn möglich in Kombination, um eine Verwerfungsverschiebung zu bestimmen.

Seitenverschiebung geologischer Strukturen

Ein erstes Anzeichen, dass man eine Verwerfung erkannt hat, basiert auf der Kenntnis der stratigraphischen Abfolge. Z.B. in einem Bohrloch, kann die Ursache für eine **Wiederholung** (*repetition*) von Schichten eine Überschiebung und die Ursache für **Lücken** (*omission*) von Schichten eine Abschiebung sein. Diese Vereinfachung ignoriert indessen die möglichen horizontalen Bewegungen an Blattverschiebungen mit einem eigenem Fallwinkel.

Für eine umfassende Bestimmung der Verschiebung ist es erforderlich, die Positionen von zwei ursprünglich zusammentreffenden Punkten auf jeder Seite der Verwerfung festzustellen. Solche Punkte können definiert werden durch die Kreuzung der Verwerfungsebene mit einem linearen Element, z.B. einem Faltenscharnier, das bereits vorhanden war, und durch die Verwerfung verschoben wurde. **Durchstichpunkte** (*piercing points*) sind Punkte, wo ein lineares Element die Verwerfung durchsetzt.

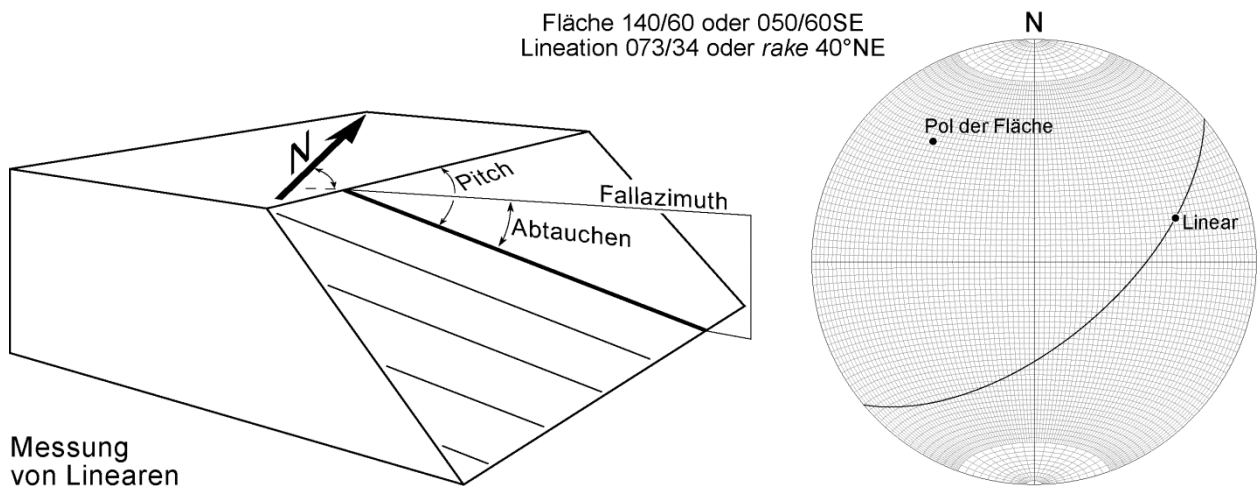
Wo das versetzte Linearmerkmal durch die Kreuzung von zwei planaren Strukturen festgelegt ist, müssen die beiden planaren Strukturen der Verwerfung vorangegangen sein. **Versatz-Kontaktlinien** auf geologischen Karten können gänzlich irreführend sein, weil sie durch die Kreuzung einer geologischen Ebene, die älter als die Verwerfung ist, und eine topographische Oberfläche, die jünger ist als die Verwerfung, begrenzt sind. Dasselbe kann für Versätze in einem Profil zutreffen, oder wenn man dasselbe in Aufschlüssen irgendeiner Orientierung beobachtet. Um den Versatz planarer Merkmale vom Versatz linearer Merkmale zu unterscheiden, nennt man die erstere **Trennung** (*separation*).

Generell lassen sich Blattverschiebungen und die horizontale Komponente bestimmen. Weil diese Karten keine (primäre) Höheninformation enthalten ist keine Aussage über vertikale Versätze möglich.

Ein Minimalwert der totalen Sprunghöhe einer Verwerfung kann dort angegeben werden, wo z. B. ältere Gesteine über jüngere überschoben wurden, oder durch die Distanz zwischen Klippe und Fenster. Bitte beachten Sie indessen, dass die Klippe-zu-Fenster-Methode unbrauchbar ist, wenn die vom Fenster zur Klippe gezogene Linie nicht beinahe parallel zur Verschiebungsrichtung verläuft.

Diagnostische Bewegungsstrukturen innerhalb von Verwerfungsflächen

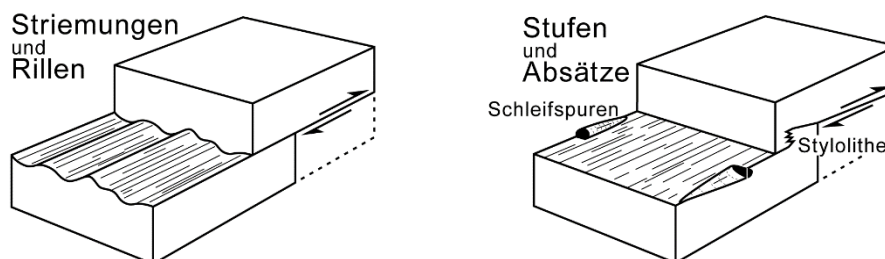
Gesteine am Kontakt zu Verwerfungsflächen haben oft glänzende, weiche oder polierte Oberflächen von mineralisiertem Material, die sogenannten **Gleitflächen** oder **Spiegelharnische** (*slickensides*). Diese entstehen durch abschleifende Wirkung und können nichts sagend sein, doch manchmal fühlen sie sich in Gleitrichtung glatter (unter dem Finger) an. In der Tat sind parallele **Striungen** (*striation*) oft auf den Verwerfungsflächen zu erkennen. Solche **kataklastische Lineationen** (*cataclastic lineation*) sind parallel zum Gleitvektor auf der Verwerfungsfläche. Der Winkel, gemessen auf der geneigten Verwerfungsfläche zwischen der Horizontalen (Streichrichtung) und der Linie der Striungen, wird *pitch* oder *rake* genannt. Die assoziierten asymmetrischen Oberflächenstrukturen sind **kinematische Indikatoren** (*kinematic indicators*) für den Bewegungssinn.



Die häufigsten und zuverlässigsten Bewegungsindikatoren, die im Aufschluss auf Harnischflächen beobachtet werden können, sind:

Kratzspuren

Gleitflächen besitzen für gewöhnlich auffällige **Striungen** (*striations*) oder **Kratzer** (*scratches*), die in jedem Massstab auftreten. Experimente haben gezeigt, dass diese Abnutzungskratzer parallel zur Relativbewegung der Verwerfung verlaufen. Die meisten Striungen (**Rutschharnische**) sind definiert durch Streifen von Mineralien in feinkörnigem Material entlang der Verwerfungsebene. Einige **Rutschstriemen** (*striae*) können die **Rillen** (*grooves*) oder **Rinnen** (*gutters*) eines harten Objekts der anderen Bruchseite sein, die vorbeigleitet. Kanten und Rillen können lange, lineare, Wellen auf der Störungsfläche sein. Im mikroskopischen Massstab kennzeichnet eine bevorzugte Orientierung der Körner solche Lineationen, insbesondere in den weichen Sedimenten. Diese geraden Strukturen zeigen die Bewegungsrichtung an, nicht aber den Bewegungssinn.



Kratzspuren und Schleifspuren durch Bruchstücke

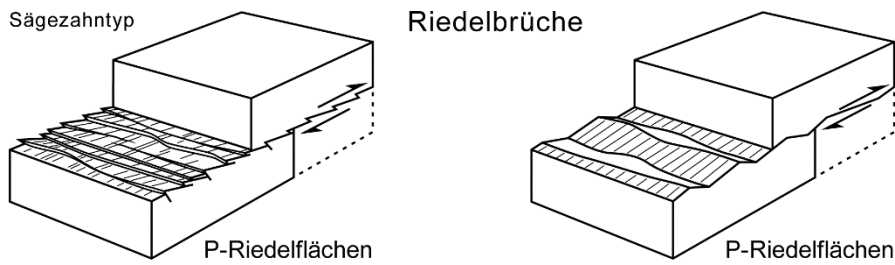
Ein hartes eingestauchtes Objekt kann in der einen Wand der Störungsfläche stecken, während die dazugehörige Rille oder Vertiefung auf der entgegengesetzten Oberfläche zu finden ist. Manchmal zeigt eine Vertiefung um das harte Objekt die wie ein Löffel geformt den relativen Schersinn der Bewegung an. Das Objekt kann dann am äussersten Ende einer Rille steckend gefunden werden. Damit ist der Sinn der relativen Bewegung bestimmt. Andererseits kann sich das harte Bruchstück in Richtung des Gleitens hinter einer Unebenheit, vor Erosion geschützt, befinden und eine Spur in Bewegungsrichtung bilden. **Letten** (*gouges*) können hinter harten Objekten anwachsen, und so die Bestimmung der Gleitrichtung ermöglichen.

Nadelharnische

Unregelmässigkeiten auf der Verwerfungsfläche, Rauheiten (*asperities*) oder kleine Stufen können eine gestreifte oder stylolithische Oberfläche (**Nadelharnische**, *slickolites*) aufweisen, welche die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks anzeigt. Nadelharnische definieren die Lösungsflächen, die zur Versatzrichtung zeigen mit mikrostylolithischen Spitzen die einen niedrigen Winkel zur Störungsfläche haben und gegen die Bewegungsrichtung gerichtet sind.

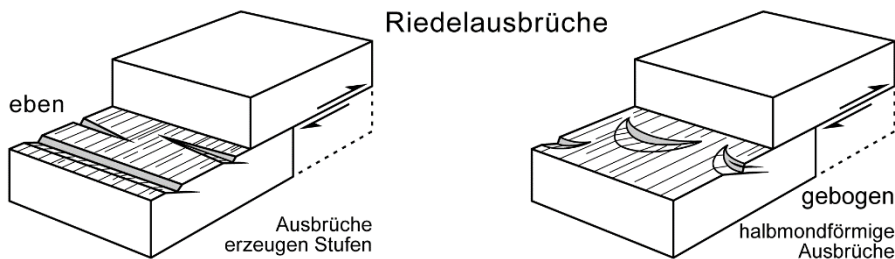
Abrisskanten

Rattermarken (*chatter marks*) sind kleine, asymmetrische **Stufen** oder **Absätze** (*steps*), deren Kanten in eine Richtung schauen und mehr oder weniger senkrecht zu den Striemungen stehen. Diese Stufen wurden traditionsgemäß als Bewegungssinnanzeiger gedeutet, indem die Absätze dem relativ vorbeigleitenden Block „nachschaun“, mit dem Absatz der Versatzrichtung der entgegengesetzten Oberfläche der Gleitfläche gegenübergestellt. Es wurde im Experiment aufgezeigt, dass verschieden orientierte Stufen einhergehend mit reibungstragender Striemung oder auch schräge Stylolithenreihen mit Stufen gegen die Bewegungsrichtung entstehen können. Es gibt aber bezüglich der kinematischen Bedeutung solcher Stufen keine schlüssige Regel.



Riedelscherflächen

Kleine gestriemte R-Riedelbrüche schneiden häufig die Störungsfläche und sind fast orthogonal zur Bewegungsrichtung. R- und R'-Riedelbrüche weisen meistens einen regelmässigen Abstand auf und weisen ein gezacktes Profil zur Störungsfläche auf, mit Stufen die gegen die Bewegungsrichtung zeigen. Die Kombinationen von R- und P-Riedelbrüchen, die fast senkrecht zur Bewegungsrichtung sind, ergeben wechselnde gestriemte Flächen (P-Scherbrüche weisen gegen die Bewegungsrichtung) und nicht gestriemte Flächen (R-Scherbrüche in der Schutzseite von Unebenheiten). Die Intensität der Striemenbildung oder nicht-Striemenbildung, die vom Verhalten der topographischen Unebenheiten auf der Störungsfläche abhängig ist, ist ein herkömmliches kinematisches Kriterium.



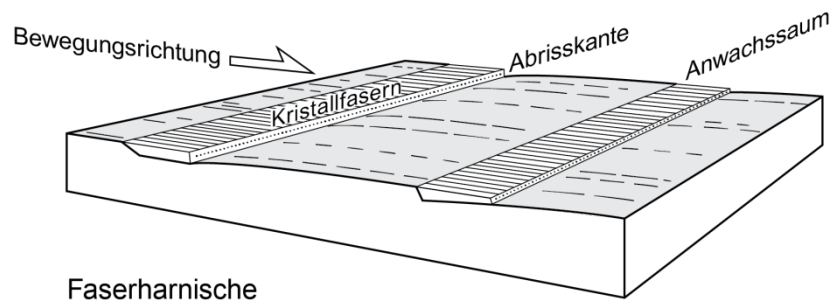
Reibungsbrüche

Reibungsbrüche (*friction fractures*) fallen mit der Bewegungsrichtung ein (R-Riedelbrüche). Sie sind konkav, damit ist ihre Schnittlinie mit der Verwerfungsoberfläche gebogen (**halbmondförmigen Spur**; *crescent-shape*). Die Spitzen der halbmondförmigen Ausbrüche zeigen die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks an.

Faserharnische

Die bevorzugte Richtung des Mineralwachstums produziert faserige Kristalle während sich die Wände bei der Störungsbewegung trennen. Solche Mineralien haben ihre Längsachse parallel zur dominierenden Gleitrichtung und wachsen in sich öffnenden Hohlräumen hinter Stufen oder Rauheiten auf der Gleitfläche. Die Stein-zu-Faser-Beziehung über eine Stufe hinweg macht diese **Faserharnische** (*slickenfibres*) (oder **Anwachskristallisate**) besonders nützlich, um die Richtung und den Bewegungssinn abzuleiten. Die Fasern wachsen entweder während des langsamen, aseismischen Verwerfungskriechens oder sind sogenannte *crack-seal fibers*, die eine grosse Zahlen von Mikroerdbeben aufzeichnen (solche Faserkristallisate geben also auch die Grösse des Versatzes an,

da sie ursprünglich zusammengehörige Punkte verbinden). Gekrümmte oder aufeinander liegende Kristallfasern sind ein Dokument der Veränderungen in der Versetzungsrichtung. Im Gegensatz dazu können gewöhnliche Gleitflächenkratzer oft ausradiert oder überprägt werden, wenn Änderungen in der Verwerfungsrichtung auftreten. Gewöhnliche Kratzer können nur die letzte gleichförmige Verschiebung aufzeichnen.



Nicht-gestriemte, mineralisierte Spalten

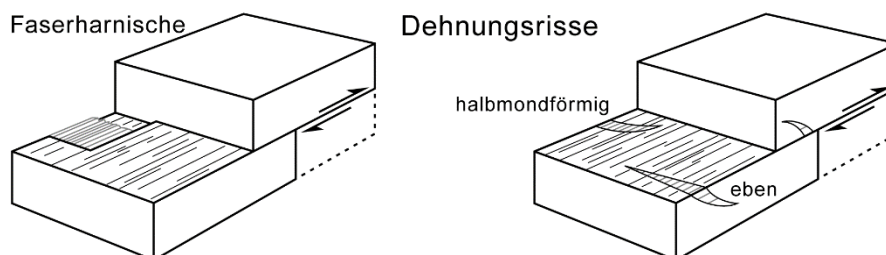
Gerade, vorwärts-einfallende, flache und halbmondförmige Brüche bilden sich in einem niedrigen Winkel zur Störungsfläche und neigen dazu, sich in Richtung zu größeren Winkeln während der Deformation der Wandgesteine infolge der Reibung zu rotieren. Während der Rotation öffnen sich die Brüche für Sekundärmineralkristallisation. Gerade Brüche werden „Kammbrüche“ (*comb fractures*) genannt. Die Spitzen der halbmondförmigen Ausbrüche zeigen die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks an.

Diagnostische Bewegungsstrukturen innerhalb von Verwerfungszonen

Die bewegungsbezogenen Strukturen in den Verwerfungszonen und auf den Erosionsflächen, die orthogonal zur Verwerfungsfläche und parallel zur Bewegungsrichtung sind, werden benutzt, um die Verwerfungs kinematik zu definieren.

Dehnungsbrüche; Fiederspalten

Dehnungsbrüche (*tensile fractures*) oder **Fiederspalten** (*tension gashes*), die normalerweise parallel zur regionalen maximalen Hauptspannung (Kompression) stehen, können gewöhnlich nahe der Bruchfläche mit Winkeln kleiner als 45° zur Bruchfläche auftreten. Ihre Schnittfläche mit der Verwerfungsfläche ist fast senkrecht zur kataklastischen Lineation.



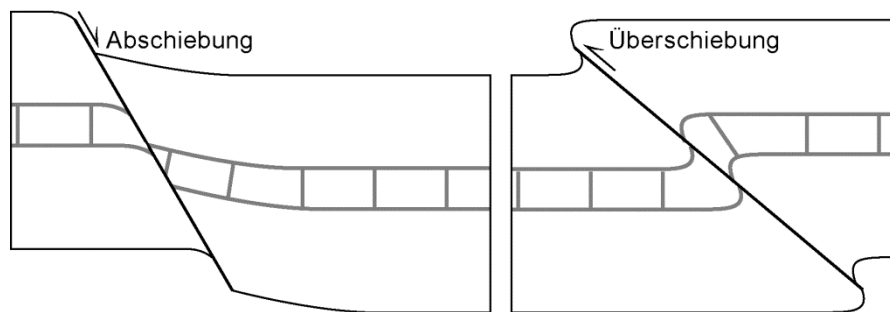
Ihre Winkelbeziehungen können für die Bestimmung der Bewegungsrichtung hilfreich sein, wie auch später bei den Fiederklüften abgehandelt wird. Zusätzlich können sich S- oder Z- Formen, abhängig von linkssinniger beziehungsweise rechtsinniger Scherrichtung, entlang der Verwerfung ausbilden.

Schleppfalten

Schleppfalten (*drag folds*) sind lokale Flexuren von anfänglich flachen oder geraden Markierungen angrenzend an die Verwerfung, die sich in Bewegungsrichtung des gegenüberliegenden Blocks krümmen. Diese Benennung umfasst die Interpretation, die postuliert, dass eine Verwerfung zuerst eingeleitet wird, und dass die Faltung entsteht, indem ein Block neben dem andern entlanggezogen wird.

Die resultierende Geometrie wäre nicht anders, wenn verwerfungsparallele, duktile Scherung einer Verwerfung durch eine Scherzone vorangeht, egal ob diese eine konstante (einfache Scherung) oder eine nach unten abnehmende Dicke (**trishear**, für Verformung in einer dreieckigen Zone) hat.

Schleppfalten entlang Verwerfungsflächen



Diese Anwendung kann irreführend sein, weil die Krümmung auch im entgegengesetzten Sinn zur Verschiebung (*reverse drag*) vorkommt. Umgekehrte Schleppung ist eindeutig unabhängig von eigentlichen Schleppeffekten. Im Einzelfall ist sie jedoch kaum zu unterscheiden von der wirklichen Schleppung. Zudem ist die Orientierung solcher Falten oft nicht durch die Bewegungsrichtung gesteuert, sondern eher von der Schnittlinie zwischen Schichtung und Verwerfungsebene. Schleppfalten sollten deshalb mit grösster Sorgfalt interpretiert werden.

Riedelscherflächen

Riedelscherflächen sind diagnostische Merkmale, die mit einem kleinen Winkel zur Hauptverwerfungsebene in die Störungswand eintauchen. Sie sind üblicherweise in die gleiche Richtung wie die Hauptverwerfung geschrammt, schneiden sich mit dieser Ebene in einem hohen Winkel zur Bewegungsrichtung und tauchen in Bewegungsrichtung ein.

Experimentelle Verwerfungsbildung im Sand

Bereits sehr früh haben Studenten in mechanischem Gesteinsverhalten beobachtet, dass trockener Sand Verwerfungsstrukturen aufweist, die ähnlich zu denen im Gestein sind. Tatsächlich ist es empirisch überprüft worden, dass trockener Sand dem Kriterium des Coulomb'schen Verhaltens mit einem gesteinsähnlichen internen Reibungswinkel (30-40°, abhängig von der Packungsdichte) und einer Kohäsion um 100 Pa entspricht. Folglich ist trockener Sand eine ausgezeichnete Analogie für die Simulation spröder Deformation in der oberen Kruste unter dem Einfluss des Erdgravitationsfelds.

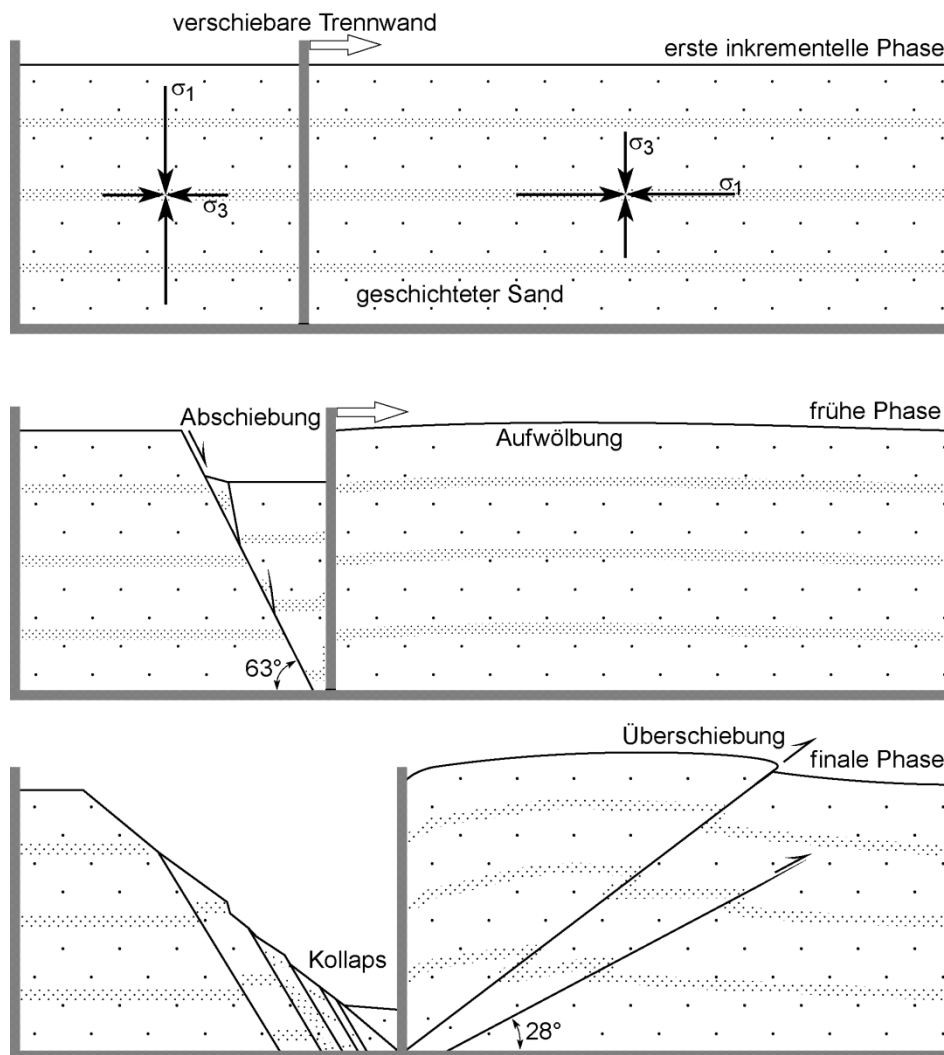
Ein berühmtes Experiment wurde von Hubbert durchgeführt. Er baute einen Glaskasten, der durch eine steife, bewegliche Trennwand in zwei Teile geteilt wurde, die zur langen Achse des Kastens parallel versetzt werden kann. Der Kasten wurde mit losem Gipspulver mit unterschiedlichen Farben gefüllt, damit Schichten und horizontale Markierungen besser gesehen werden konnten. Wenn die Abtrennung rechts (mit einer Schraube) verschoben wird, wird das linke seitliche Fach verlängert, während das rechte seitliche Fach durch den gleichen Betrag verkürzt wird.

Die erste Sache die geschieht, ist im verlängerten Fach die Entwicklung einer eindeutigen Abschiebung, die 60-65° eintaucht. Währenddessen ist im verkürzten Fach nur ein geringfügiges Ausbeulen zu sehen. Wird die Abtrennung weiter verschoben, treten in der verkürzten Seite Aufschiebungen, die mit 25-30° einfallen, auf. Diese tauchen in die gleiche Richtung ein und dehnen sich von der Unterseite des Kastens nahe dem Fuss der Abtrennung bis zur Oberfläche des Sandes aus, wo sich Steilstufen bilden.

Das Verhalten des Sandes ist in beiden Fächern offensichtlich identisch. So veranschaulicht das doppelte Experiment, dass

- 1) Bruch schneller in Extension als in Kompression erreicht wird
- 2) Abschiebungen steiler als Aufschiebungen sind

- 3) die Klassifikation von Verwerfungen nach Anderson (Orientierung der Störungsfläche in Bezug auf das Spannungsellipsoid) in oberflächennahen Bedingungen anwendbar ist.



Experimentelle Verwerfungsbildung im Sand

gezeichnet nach Experimenten von Hubbert 1951 *Geol. Soc. Am. Bull.* **62**(4), 355-372

Zusammenfassung

Verwerfungen sind Brüche, entlang welchen makroskopisch sichtbare Verschiebungen erfolgt sind. Spiegelharnische, Rutschharnische und Rillen, die durch die Oberflächenrauigkeit (Unebenheiten) verursacht werden, werden verwendet, um die Versatzrichtungen zu definieren. Es werden drei verschiedene Verwerfungstypen unterschieden: 1) Abschiebungen (das Hangende nach unten), 2) Überschiebungen (das Hangende nach oben), und 3) Blattverschiebungen (horizontale Bewegung). Die Verwerfungsflächen entsprechen nicht den theoretischen Flächen grösster Scherspannung. Dies deshalb, weil ein von der Lithologie abhängiger Reibungsfaktor die Bildung der Verwerfungsebene beeinflusst. Hohe Porenflüssigkeitsdrücke können Bruchbildung einleiten, unter welchen bei trockenen Bedingungen keine Änderung im mechanischen Zustand erfolgen würde.

Hauptverwerfungen bestehen aus einem zentralen Kern und einer umhüllenden Beschädigungszone. Verwerfungen entstehen unter spröden Voraussetzungen und stellen plötzliche Versetzungsereignisse dar, die mit Erdbeben im Zusammenhang stehen. Sie bilden sich aus kleinen Scherbrüchen, die sich fortpflanzen, miteinander zusammenwirken, sich verbinden, um

schlussendlich grössere Verwerfungen zu bilden. Ihre Gesamtbewegung resultiert im Allgemeinen aus der Addition vieler kleiner Bewegungsereignisse.

Empfohlene Literatur

- Gupta A. & Scholz C.H. - 2000. A model of normal fault interaction based on observations and theory. *Journal of Structural Geology*. **22** (7), 865-879, 10.1016/S0191-8141(00)00011-0
- Hancock P.L. - 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*. **7** (3-4), 437-457, 10.1016/0191-8141(85)90048-3
- Hancock P.L. & Barka A.A. - 1987. Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey. *Journal of Structural Geology*. **9** (5-6), 573-584, 10.1016/0191-8141(87)90142-8
- Hubbert M.K. - 1961. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*. **62** (4), 355-372, 10.1130/0016-7606(1951)62[355:MBFCFG]2.0.CO;2
- Mandl G. - 1988. *Mechanics of tectonic faulting*. Elsevier, Amsterdam. 407 p.
- McClay K.R. - 1992. *Thrust tectonics*. Chapman & Hall, London. 447 p.
- Monzawa N. & Otsuki K. - 2003. Comminution and fluidization of granular fault materials: implications for fault slip behavior. *Tectonophysics*. **367** (1-2), 127-143, 10.1016/S0040-1951(03)00133-1
- Petit J.-P. - 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*. **9** (5-6), 597-608, 10.1016/0191-8141(87)90145-3
- Ramsay J.G. & Huber M.I. - 1987. *The techniques of modern structural geology - Volume 2 : Folds and fractures*. Academic Press, London. 700 p.
- Twiss R.J. & Moores E.M. - 1992. *Structural geology*. W.H. Freeman & Company, New York. 532 p.
- Wernicke B. & Burchfiel B.C. - 1982. Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*. **4** (2), 105-115, 10.1016/0191-8141(82)90021-9
- Meschede M. (1994) *Methoden der Strukturgeologie*. Enke Verlag, Stuttgart. 169 S.