

VERWERFUNGEN

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

Die geologischen Trennflächen haben auch eine grosse ökonomische Bedeutung. Im Bereich der Hydrologie und der Erdölexploration ist der Verlust der Kontinuität in intakten Gesteinen wichtig, da er die Permeabilität, die Migration und die Anreicherung von Flüssigkeiten wie Grundwasser und Erdöl beeinflusst. 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, die wiederum teilweise vom lokalen Spannungsfeld beeinflusst werden. Geologische Brüche können teilweise oder vollständig durch Ausfällungen sekundärer Mineralien aufgefüllt werden, was Vererzungen verursachen kann, oder durch 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 sind.

Klüfte und Verwerfungen unterteilen Gesteine in **Blöcke**, deren Grösse und Form im Ingenieurwesen, im Steinbruch, im Bergbau und in der Geomorphologie zu berücksichtigen sind.

Terminologie der Verwerfungen

Definition

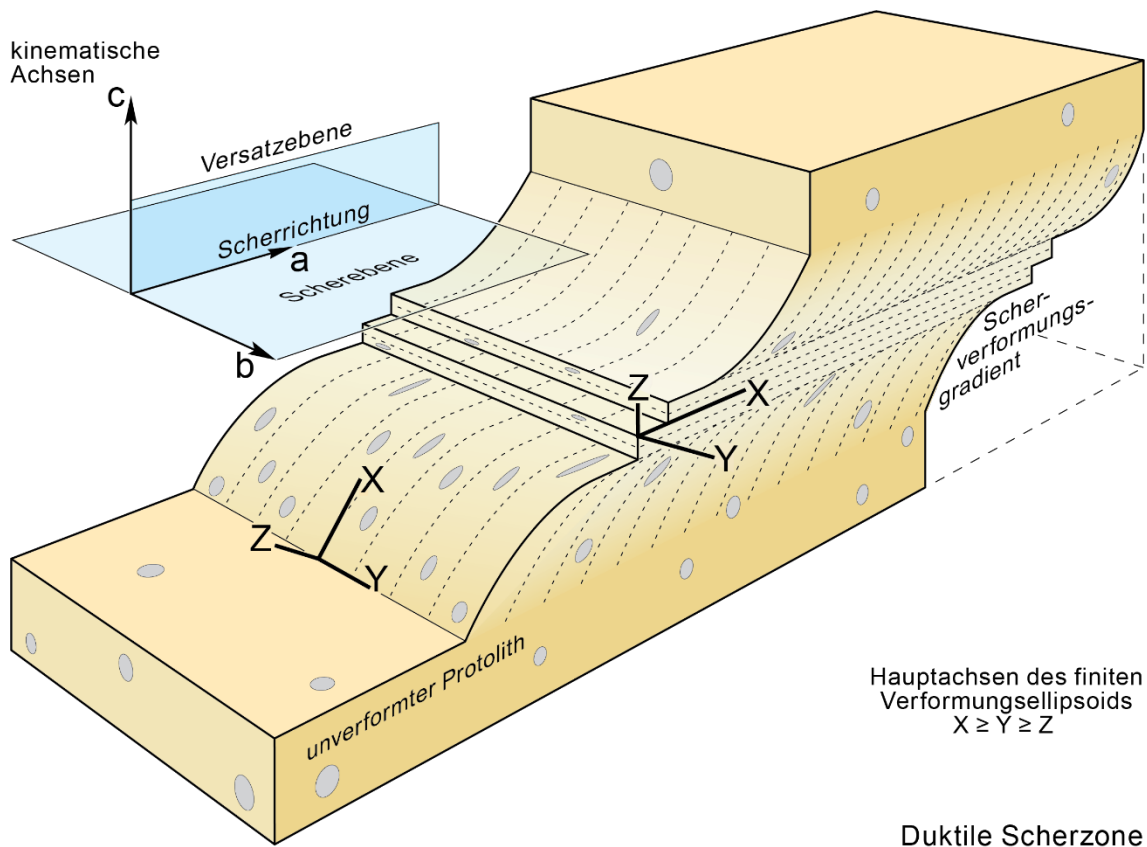
Von einer Verwerfung spricht man, wenn sich zwei aneinandergrenzende Gesteinsblöcke aufgrund einer angesetzten Spannung aneinander vorbeibewegen. Der Begriff der lokalisierten Bewegung führt zu zwei genetisch verschiedenen Kategorien von Verwerfungen, die zwei grundlegende Reaktionen der Gesteine auf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

Spröde Verwerfung

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

Duktile Verwerfung

Scherzonen (*shear zones*) sind die Analogie zu Verwerfungen in spröden Materialien. Eine Scherzone ist eine Zone, in der zwei Gesteinsblöcke aneinander vorbeigeschoben wurden, ohne dass ein spröder Bruch entsteht. Scherzonen stellen Gebiete mit duktiler, ununterbrochener Verformung dar (bei ausreichend hoher Temperatur und/oder hohem Umgebungsdruck), im Gegensatz zu Verwerfungszone, die durch örtlich spröde Verformung gekennzeichnet sind. Scherzonen sind folglich duktile Verwerfungen, im Gegensatz zu spröden Verwerfungen.

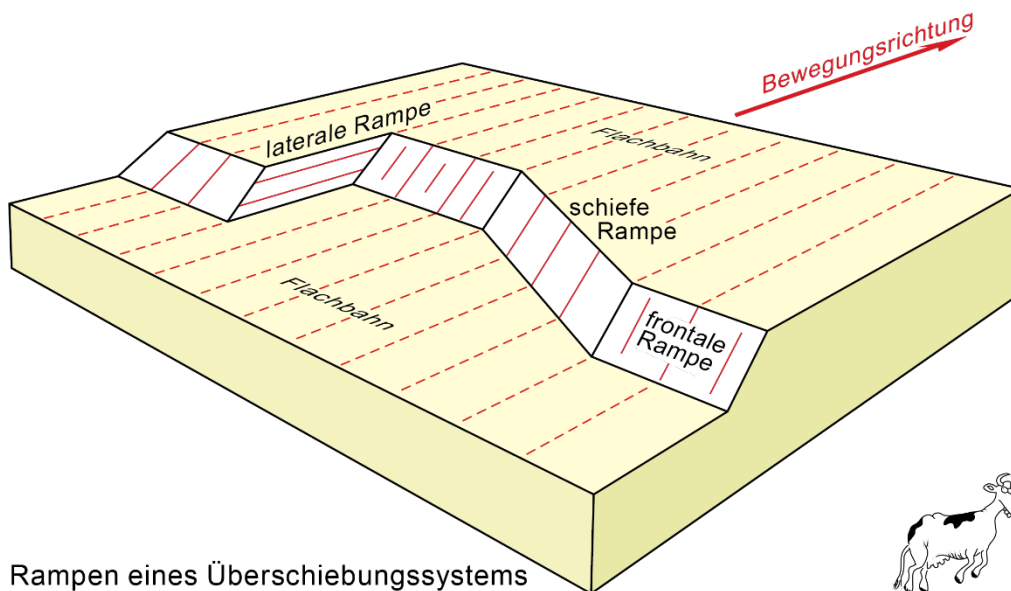


Geometrische Klassifikation

Verwerfungsebene

Verwerfungen, die steiler als 45° sind, nennt man **Steilwinkelverwerfungen** (*high-angle faults*); solche mit geringerem Einfallen, Flachwinkelverwerfungen (*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 erkennbar. 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 konkaver Verwerfung, die in Richtung der Tiefe hin abflacht.

Wo sich Flachwinkelverwerfungen in gut geschichteten, horizontal gelagerten Formationen bilden, entstehen im Allgemeinen **treppenförmige Geometrien** (*staircase geometry*). 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 entlang inkompetenter Formationshorizonte bewegen. Die Flachbahnen nennt man manchmal auch **décollement-Flächen**, die sich auf eine Flachbahn beziehen, auf der ein Unterschied im Versatz, im Verformungsstil und/oder in 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*).

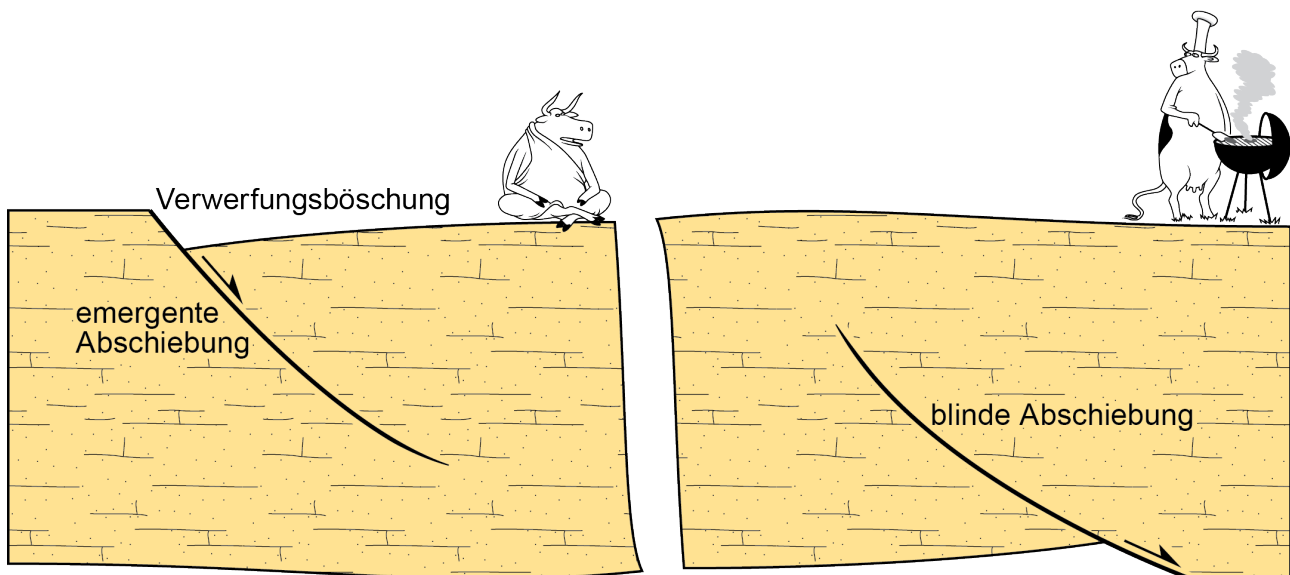


Rampen eines Überschiebungssystems

Die Verwerfung, die die Oberfläche während der Aktivität geschnitten hat, wird als emergent (auftauchende) Verwerfung bezeichnet, im Gegensatz zu blinden Verwerfungen, die die Oberfläche nicht geschnitten haben. Auftauchende Verwerfungen erzeugen eine Stufe in der Topografie, die **Verwerfungsböschung** (*fault scarp*). Manche Verwerfungen lassen sich als seismogene Spur identifizieren, obwohl sie nicht einer an der Oberfläche sichtbaren Verwerfungsebene zugeordnet werden können.

Bemerkung:

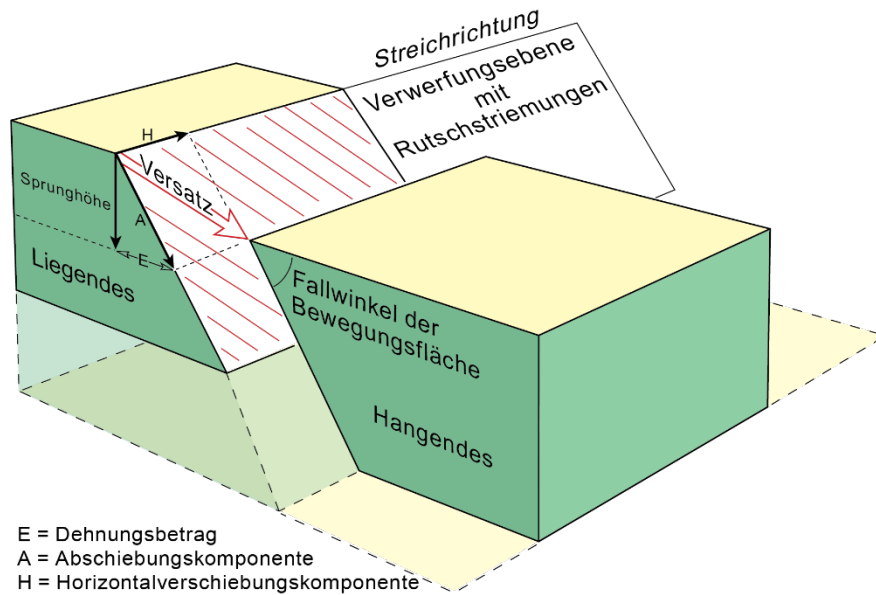
Eine auftauchende Störung ist keine erodierte Störung. Unterscheiden Sie: Die Erosion, die eine Verwerfung erreicht, hinterlässt auf der Erdoberfläche eine Spur.



Verwerfungsblöcke

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

Geometrie einer Verwerfung und messbare Komponenten der Gleitbewegung

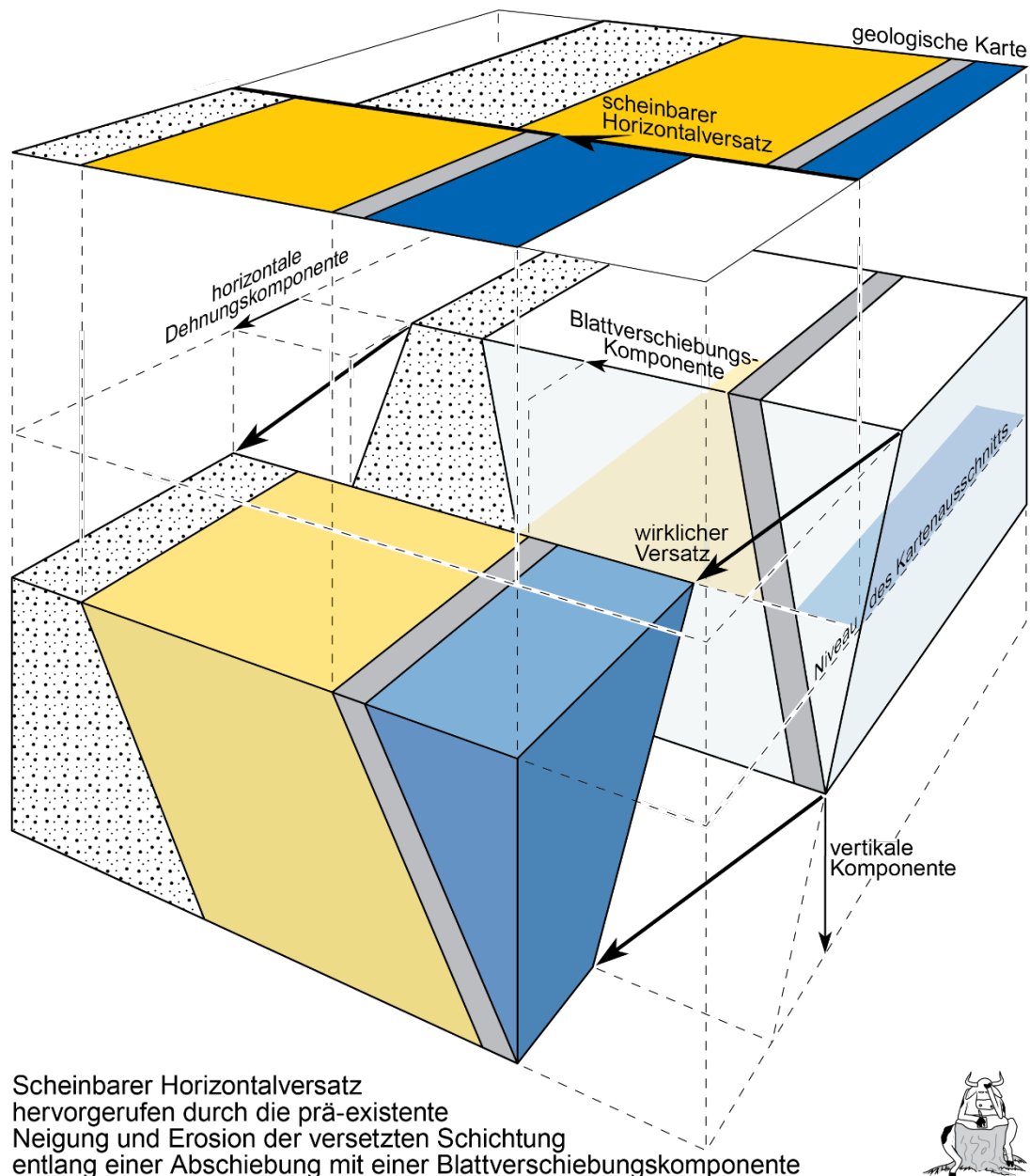


Allochthon ist ein Ausdruck für jeden Verwerfungsblock oder Gesteinskörper, der durch eine Verwerfung wesentlich bewegt wurde. Gesteine, die über eine grosse Distanz von ihrem ursprünglichen Ablagerungsort transportiert wurden, sind **allochthon** (*allochthonous*). Allochthone Gesteine, die ihre Verbindung zu ihrem 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“ bzw. „parautochthonen“.

Kinematische Klassifikation

Verschiebungsvektoren

Die Verschiebungsrichtung ist die Bewegungsrichtung eines Blockes relativ zu einem anderen Block. 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 gibt die Grösse des Versatzes auf der Verwerfung an, der gewöhnlich die Summe mehrerer Bewegungen ist. Der Versatzvektor auf einer Verwerfungsfläche kann in beliebiger Richtung verlaufen. Er lässt sich in zwei zueinander senkrecht stehende Komponenten aufgliedern: erstens die **Horizontalkomponente** parallel zum Streichen der Verwerfungsfläche (*strike slip*) und zweitens die Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente parallel zum Fallen (*dip slip*). Die **Neigung** (*rake*) ist der Winkel, der auf der Verwerfungsfläche, zwischen der Streich- und der Verschiebungsrichtung gemessen wird. Das **Tauchen** (*plunge*) ist der Winkel, gemessen in der vertikalen Ebene, der die Gleitlinie mit der horizontalen Ebene einschliesst.



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

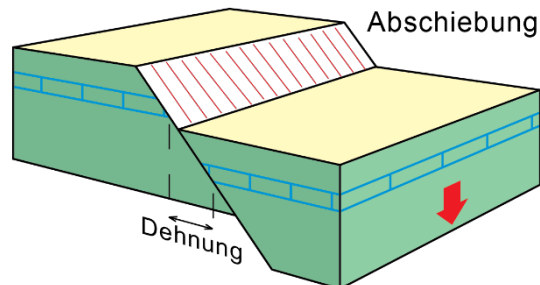
Achtung! Beachten Sie, dass der scheinbare Versatz nicht mit der Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente identisch ist, da er von der Orientierung der Trennfläche sowie von der Art der Versetzung abhängt. Eine Schichtfläche allein kann nie verwendet werden, um den Versatz festzustellen.

Verwerfungen werden nach der Richtung der relativen Bewegung zwischen den Verwerfungsblöcken klassifiziert, die mit dem Spannungstyp zusammenhängt, der die Verwerfung verursacht.

Verwerfungstypen

Abschiebung

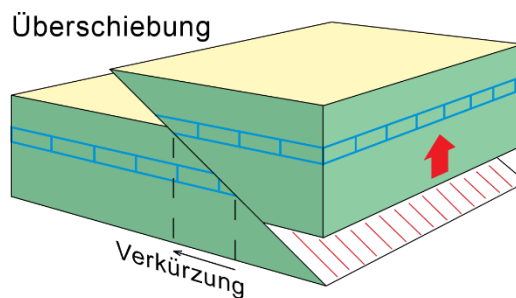
Eine **Abschiebung** (*normal fault*) ist eine Grosswinkelverwerfung, bei der der Hangendblock gegenüber dem Liegendblock in die Abtauchrichtung nach unten versetzt ist. Jüngere Gesteine werden über ältere versetzt. In Vertikalschnitten durch die Verwerfung fehlt ein Teil der stratigrafischen Abfolge.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



Rampen mit Extension sollte man als **Abscherung** bezeichnen. Eine Abschiebung, die weniger als 45° beträgt, nennt man manchmal auch **Lag-** oder *Denudation fault*. Ein typischer Abscherhorizont hat keine Wurzeln und folgt einem stratigrafischen Horizont.

Aufschiebung

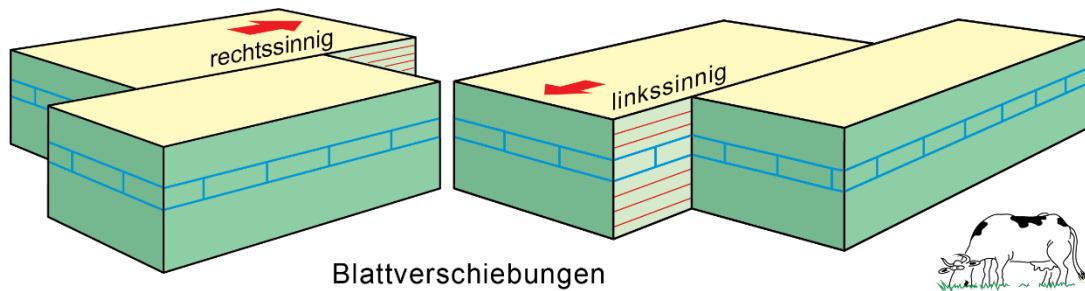
Eine **Aufschiebung** (*reverse fault*) ist eine Steilwinkelverwerfung, bei der sich das Hangende über das Liegende nach oben verschoben hat. Ältere Gesteine werden über jüngere Gesteine gebracht. Solche Verwerfungen führen in der Vertikalen zur **Wiederholung** (*repetition*) eines geologischen Horizonts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



Meistens klettern die Überschiebungen durch eine bestimmte stratigrafische Abfolge zur Erdoberfläche hin, in Richtung des tektonischen Transports.

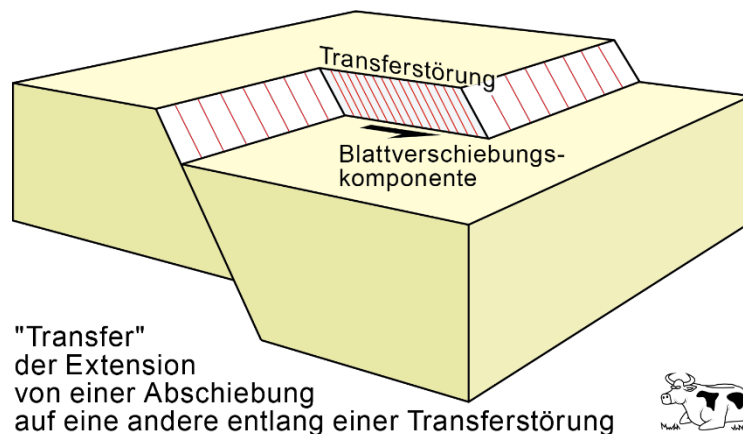
Blattverschiebungen

Blattverschiebungen (*strike-slip faults*) haben gewöhnlich sehr steile oder vertikale Fallwinkel, und die horizontale relative Bewegung zwischen benachbarten Blöcken ist parallel zur Richtung 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*) bezeichnet. Eine Verwerfung ist linkssinnig, wenn der Beobachter, der auf einem Verwerfungsblock steht, in Richtung des Gegenblockes blickt und eine **scheinbare Verschiebung** (*apparent displacement*) des gegenüberliegenden Verwerfungsblocks nach links feststellt. Wenn die Verschiebung nach rechts erfolgt, ist die Verwerfung rechtssinnig.



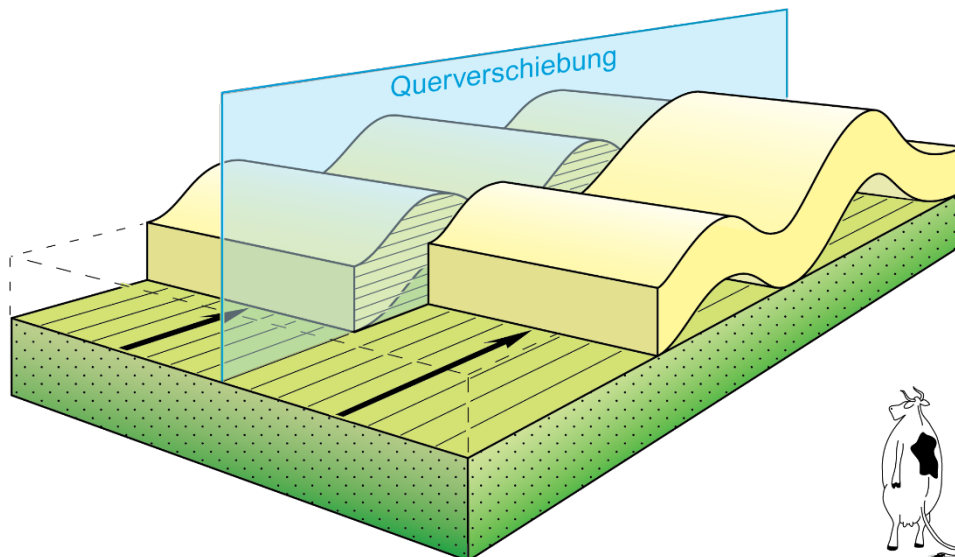
Blattverschiebungen

Eine **Transferverwerfung** (*transfer fault*) ist eine Blattverschiebung, die die Versätze zwischen zwei ähnlich orientierten Verwerfungssegmenten (z.B. zwei Abschiebungen) überträgt. Sie endet bei diesen beiden anderen Strukturen. Transferverwerfungen sind normalerweise auf das Hangende abgetrennter Systeme begrenzt (d.h. auf 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 eine unterschiedliche Bewegung oder Verformung zwischen aneinandergrenzenden Blöcken (unterschiedliche Verkürzung oder Extension auf beiden Seiten) erklären. Wenn die Überschiebungen oder Abschiebungen in einem grossen Winkel zum Versatz streichen, sind die Transferverwerfungen, die die beiden Verwerfungen verbinden, nahezu parallel zur Bewegungsrichtung. Folglich weisen Transferverwerfungen normalerweise Gleitkomponenten auf, die beim Streichen variieren, wenn sich der Versatz entlang der Transferzone ändert.



"Transfer"
der Extension
von einer Abschiebung
auf eine andere entlang einer Transferstörung

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



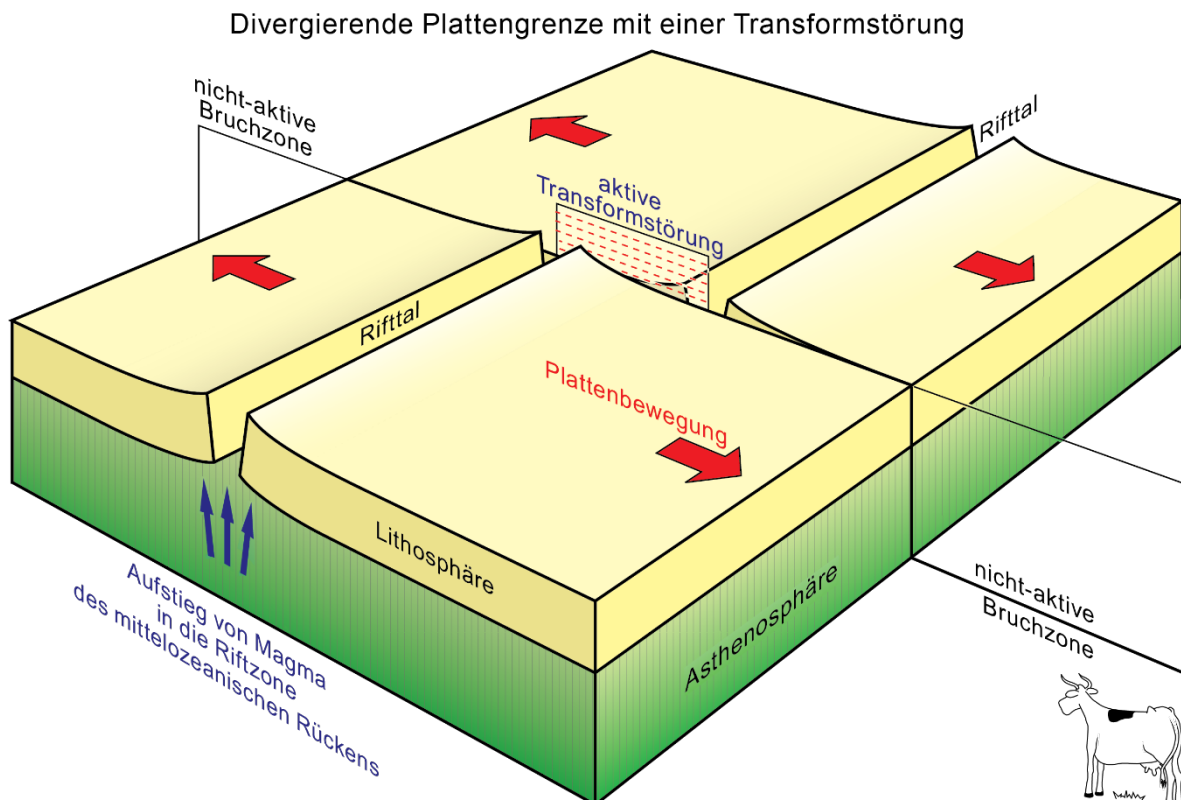
Transformstörung

Eine **Transformverwerfung** (*transform fault*) ist eine Blattverschiebung, die an einer Plattengrenze 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.



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 jedoch von normalen

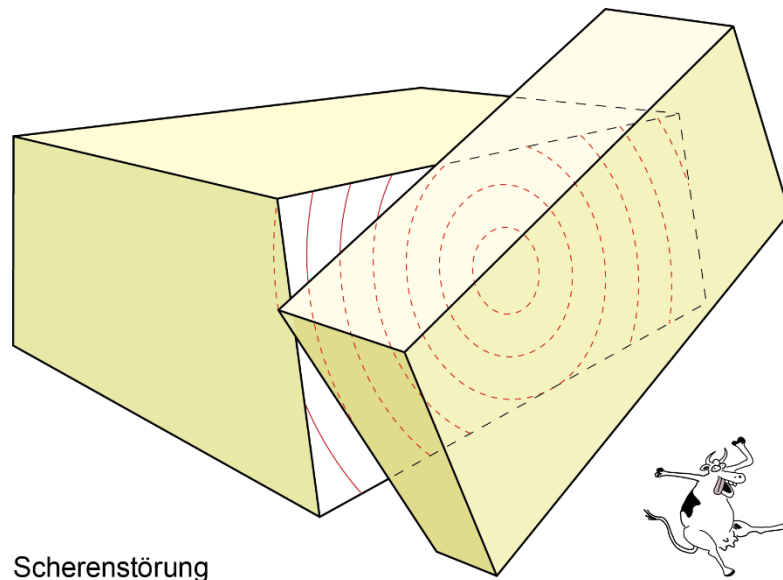
Blattverschiebungen, indem sie eine entgegengesetzte Verschiebung auslösen, die der Verschiebung des mittelozeanischen Rückens entgegensteht. Die Transformverwerfungen sind nur zwischen den Rücken aktiv, über die Rücken hinaus sind sie inaktiv. Sie sind parallel zu den Kleinkreisen, deren Zentrum der Rotationspol der jeweiligen Platte ist. Der Versatz der Verwerfungen ist deutlich grösser als die Länge des aktiven Segments.

Hybride Verwerfung

Die Ausdrücke Abschiebung und Überschiebung werden auf Verwerfungen angewendet, die keine Blattverschiebungskomponente enthalten. Die Begriffe werden allerdings auch dort angewendet, wo die **Fallparallele** (*dip-slip*) Verschiebungskomponente relativ gross gegenüber der **Blattverschiebungskomponente** (*strike-slip*) ist. Wenn die Fallparallele und die Blattverschiebungen in dieselbe Richtung zeigen, wird die Verwerfung als **schiefe Verwerfung** (*oblique slip fault*) bezeichnet.

Scherenverwerfung

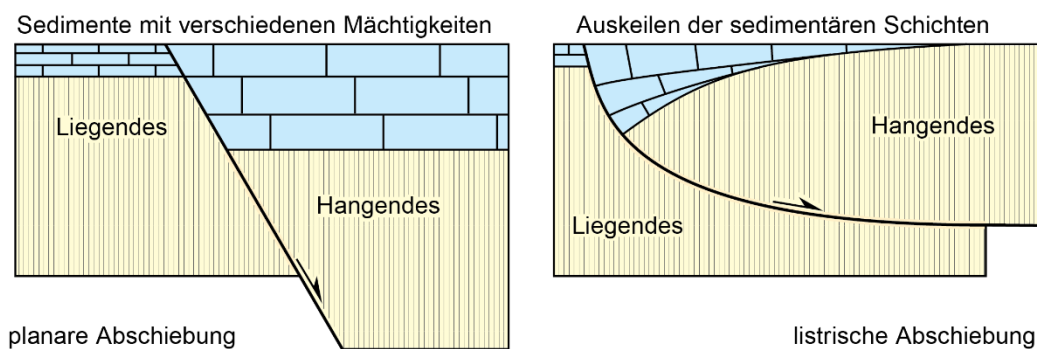
Ein Verwerfungsblock kann um eine Achse, die senkrecht zur Verwerfungsfläche einer **Scherenverwerfung** (*scissors fault*) verläuft, rotieren.



Scherenstörung

Wachsende Verwerfungen

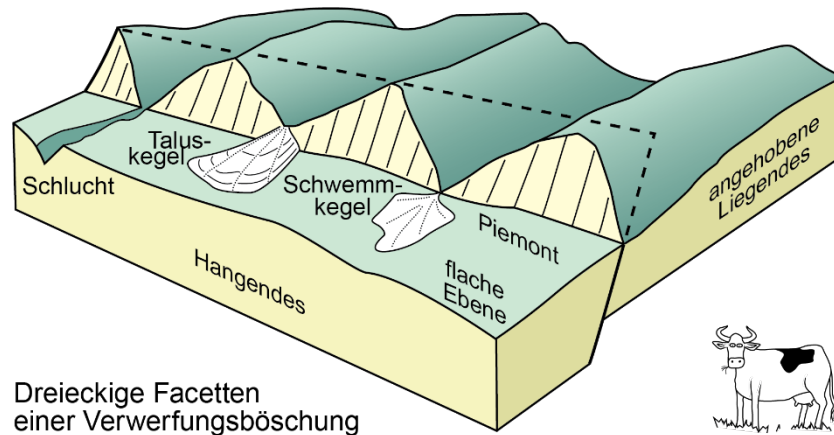
Eine mächtigere stratigraphische Abfolge im Hangenden, verglichen mit Sedimentschichten gleichen Alters im Liegenden einer Verwerfung, deuten auf eine Verwerfungsbewegung während der Sedimentation hin. **Wachsende Verwerfungen** (*growth faults*) bilden sich charakteristisch, aber nicht ausschliesslich,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



Wachsende Abschiebungen mit assoziierten Extensionsbecken

Topographische Effekte

Vertikale Verschiebungskomponenten von Verwerfungen an der Erdoberfläche erzeugen lineare topografische Steilränder (**Böschungen**, *scarps*). Verwerfungsböschungen können durch Erosion angeschnitten werden und dabei **dreieckige Facetten** (*triangular facets*) bilden.



Versatz /Länge Verhältnis

Die allgemeine elliptische Form von Einzelereignis-Bewegungsflächen legt eine Beziehung zwischen dem Verhältnis der maximalen Länge der Verwerfungsfläche (lange Achse der Ellipse) und der maximalen Höhe (kurze Achse der Ellipse) nahe. Die Verteilung der Bewegung wird als symmetrisch um ein zentrales Bewegungsmaximum betrachtet. Dieser geometrische Gesichtspunkt hat zu mechanischen Modellen geführt, die auf der Annahme beruhen, dass die 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 der Verwerfungen drei Eigenschaften des Umgebungsgesteins widerspiegelt: sein Schermodul, sein elastisches Verformungslimit und seine Antriebsscherspannung. Typische Verhältnisse für isolierte, kleine Abschiebungen in sedimentären Gesteinen liegen zwischen 0.002 und 0.04, mit einem Durchschnitt von 0.01. Für Blattverschiebungen in Turbiditen wurden Verhältnisse von 0.4 bis 0.004 sowie ein 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.

Dreidimensionale seismische Daten zeigen, dass das Verhältnis zwischen Verwerfungslänge und Größe des Verschiebungsbetrags nur über einen begrenzten Bereich hinweg schwankt. Dieses fast konstante Verhältnis Versatz/Länge L ist abhängig vom tektonischen Milieu:

- * $D/L = 12-40$: Mehrere Bruchscharensysteme; 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 deltaisichen (wachsende Verwerfung = *growth-fault*)-Systemen. Systematisch kleinere maximale Verschiebungsbeträge für Ab- und Aufschiebungen auf dem Mars (durch einen Faktor von ca. 5) und auf dem Merkur hängen mit der geringeren Schwerkraft auf diesen Planeten im Vergleich zur Erde zusammen.

Aktivität von Verwerfungen

Obgleich sich jede Verwerfung bewegen und reaktivieren kann, haben Geologen eine qualitative Klassifikation in drei Kategorien entwickelt, um seismische Gefahren abzuschätzen.

- eine aktive Verwerfung hat sich in den letzten 10 000 Jahren bewegt.
- eine möglicherweise aktive Verwerfung hat sich während des Quartärs bewegt.
- eine inaktive Verwerfung hat sich vor dem Quartär bewegt.

Ohne historische Aufzeichnungen über Erdbeben ist es jedoch schwierig, zu prüfen, ob eine Verwerfung aktiv ist. Jede Verwerfung ist eine Schwächezone, die anfällig für Reaktivierung 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 zeigen, parallel sind und geologische Körper in sogenannte **Bruchflügel** oder **Verwerfungsblöcke** (*blocks*) gliedern.

Konjugierte Verwerfungen

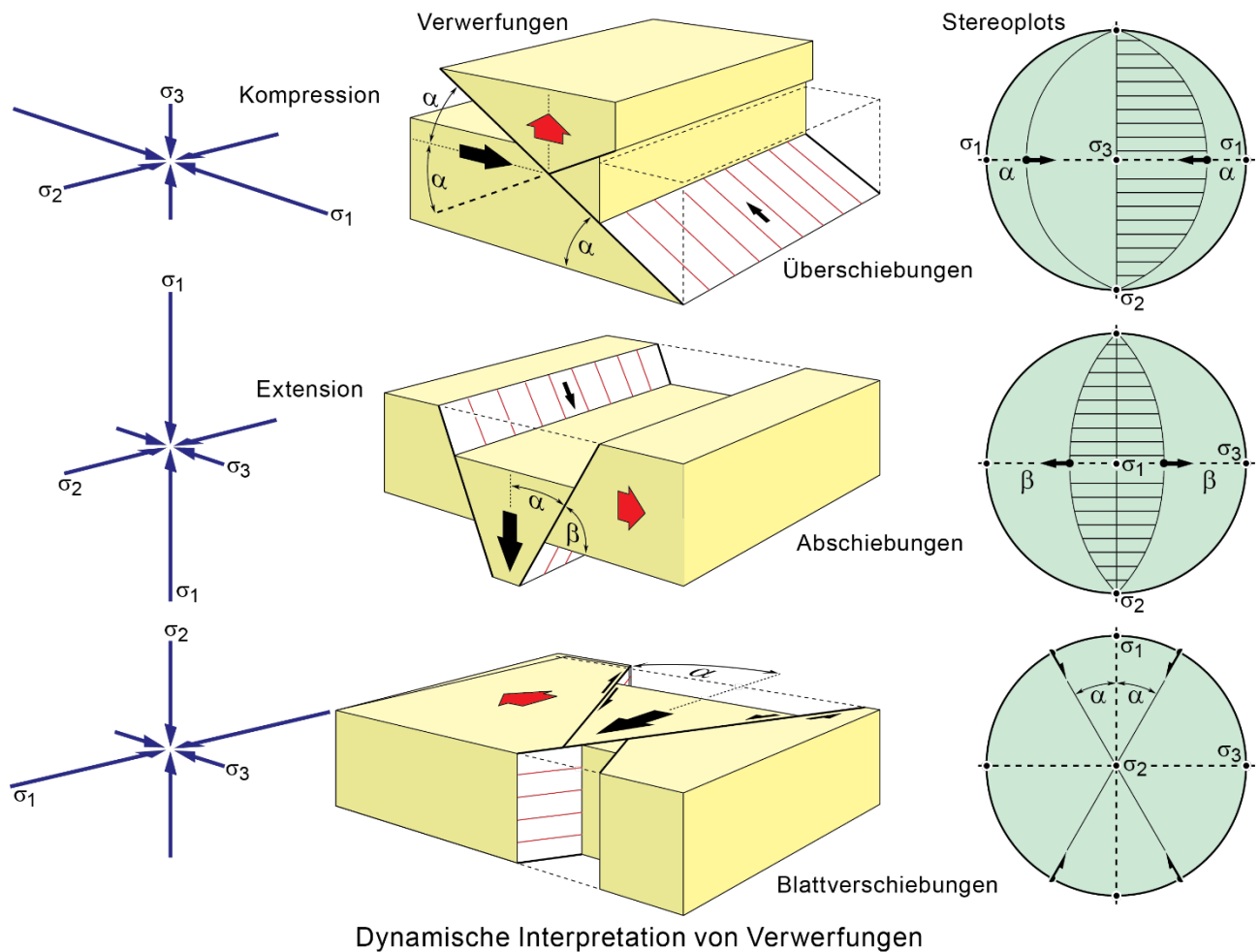
Ein geologischer Körper kann durch zwei **konjugierte Verwerfungen** (*conjugate faults*) begrenzt sein. Ein konjugiertes Bruchsystem ist dadurch charakterisiert, dass Verwerfungen derselben Art, die während derselben Deformationsphase gebildet wurden, in zwei symmetrischen Scharen mit parallelem Streichen,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

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

- 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 definitionem 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 bilden die Grundlage für eine dynamische Interpretation der Verwerfungssysteme. Zusätzlich hat Anderson hervorgehoben, dass die Erdoberfläche eine freie Flüssigkeitsoberfläche (Luft) ist und dass Flüssigkeiten nicht imstande sind, Scherspannung zu übertragen (was eine physikalische Definition von Flüssigkeiten ist). Folglich ist die Erdoberfläche eine Hauptspannungsfläche (erinnern Sie sich daran, dass eine Hauptspannung per definitionem senkrecht zu einer Fläche steht, die keine Scherfläche ist. Wenn angenommen wird, dass die Erdoberfläche horizontal ist (was in Regionen mit niedrigem Relief nahezu zutrifft), dann liegt eine der drei Hauptspannungen nahezu senkrecht 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 zur vertikalen Gravitationslast liegen. Es gibt drei Möglichkeiten:

- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen je nach Grösse ab.
- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen um verschiedene Beträge zu.
- Die horizontale Hauptspannung nimmt zu, während die andere abnimmt.

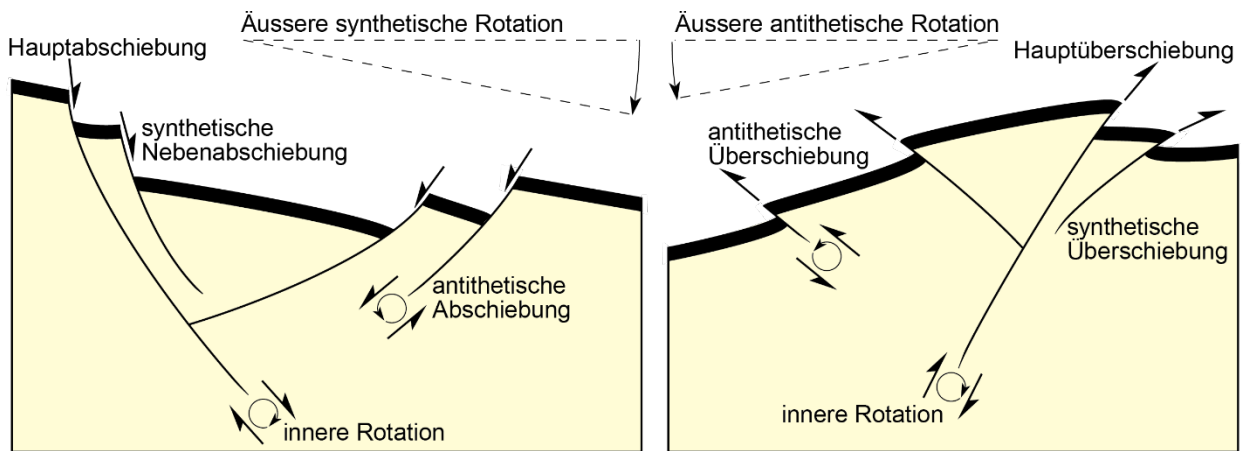
Übung

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

Diese Formulierung beschreibt viele Störungssysteme, aber flache und steile Abschlänge sind identifizierte natürliche Fälle, die nicht der Anderson-Regel entsprechen. Erklärungen hierfür können der Einfluss der Anisotropie oder bereits bestehende Brüche in natürlichen Gesteinen sein. Diese beeinflussen die Orientierung der Verwerfung und möglicherweise auch die Verformung entlang der σ_2 -Richtung. Andere Erklärungen berücksichtigen die Rotation der Verwerfungsflächen in Richtung einer unkonventionellen Orientierung.

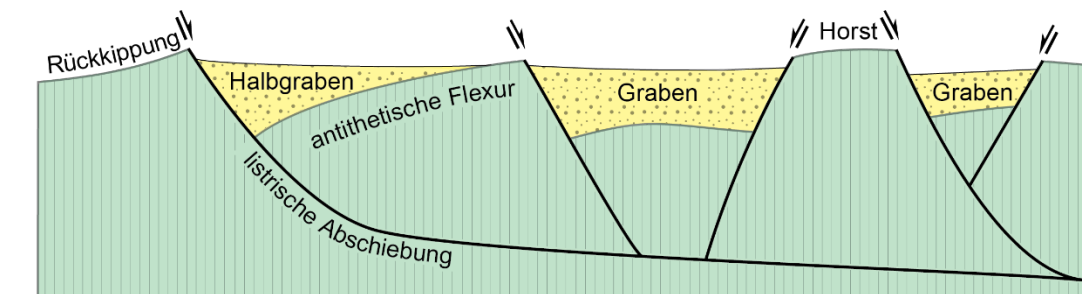
Synthetische und antithetische Verwerfungen

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



Abschiebungen

Ein nach-unten versetzter Block, der durcheinander einfallende konjugierte Abschiebungen begrenzt ist, nennt man einen **Graben** (*graben*). Umgekehrt wird ein nach-oben verschobener Block, der durch nach-aussen einfallende 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 ist, hat einen dreieckigen Querschnitt und wird als Halbgraben (half-graben) bezeichnet.

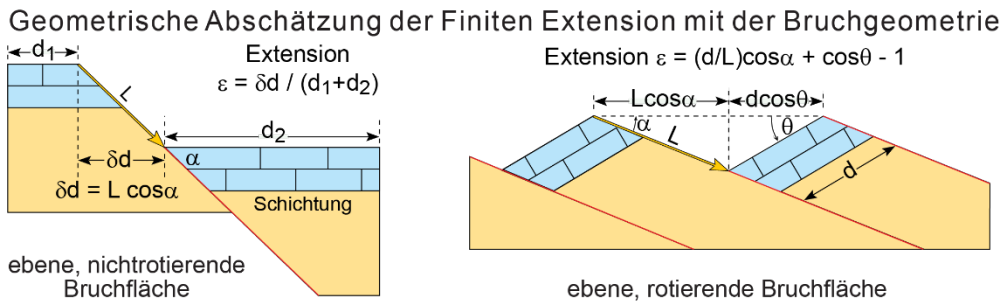


Schematische Bezeichnung von Abschiebungskomponenten

In idealen Graben- und Horstsystemen sind die Wachstumsraten der Verwerfungen gleich, sodass die Verwerfungsblöcke nicht rotieren und der Graben während des gesamten Extensionsereignisses symmetrisch bleibt. In natürlichen Verwerfungssystemen wachsen die Verwerfungen jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und führen folglich zu asymmetrischen Graben- und Blockrotationen. Tatsächlich gehen Verwerfungen häufig mit Rotationen einher. Es gibt zwei Arten von Abschiebungen bei denen Rotationen wichtig sind: Planare und listrische Abschiebungen.

Planare Abschiebungen

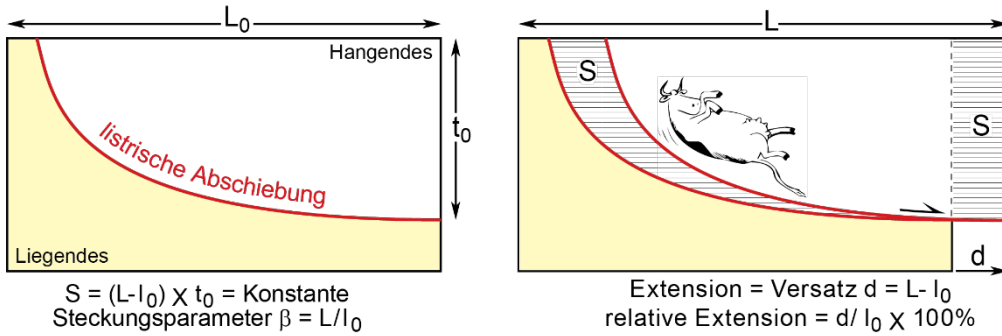
Planare, rotationale Abschiebungen erfolgen über einen basalen Abscherhorizont oder über einen spröd-duktilen Übergang. Sie trennen gegeneinander versetzte und gekippte Blöcke, ohne interne Deformationen. Ebene rotierende Verwerfungen werden als **Domino-** oder **büchergestellartige Verwerfungen** bezeichnet,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



Mit einem verknüpften Verwerfungssystem enden alle Verwerfungen in einem Abscherhorizont am duktilen Übergang zwischen der oberen und der unteren Kruste. Jeder neue Bruchblock hat seinen eigenen Halbgraben. Jede Verwerfung muss denselben Versatz und dieselbe Verkippung aufweisen, andernfalls entsteht an der Unterseite des Systems ein Platzproblem (Lückenbildung). Planare, rotationale Abschiebungen und Blöcke grenzen im Allgemeinen an Transfer- und Scherenverwerfungen.

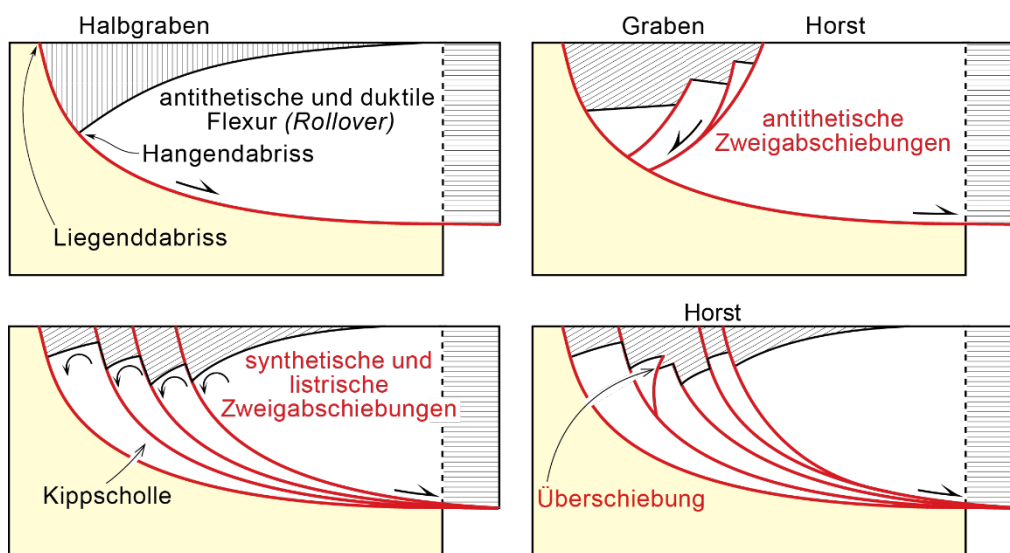
Listrische Abschiebungen

Häufig sind die Abschiebungen, insbesondere die Hauptabschiebungen, **listrisch** (aufwärts konkav). Die Abschiebung ist meist sehr steil nahe der Oberfläche und flacht mit der Tiefe ab.



Falls die Verwerfungsblöcke spröde und starr sind, führt dies zu einem Platzproblem. Denn wenn die nebeneinanderliegenden Blöcke versetzt werden, können sie nicht überall aneinander liegen. 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 füllen 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 Mineralien scheiden sich darin aus den zirkulierenden Wässern. 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 aufweisen kann als planare Abschiebungen. 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

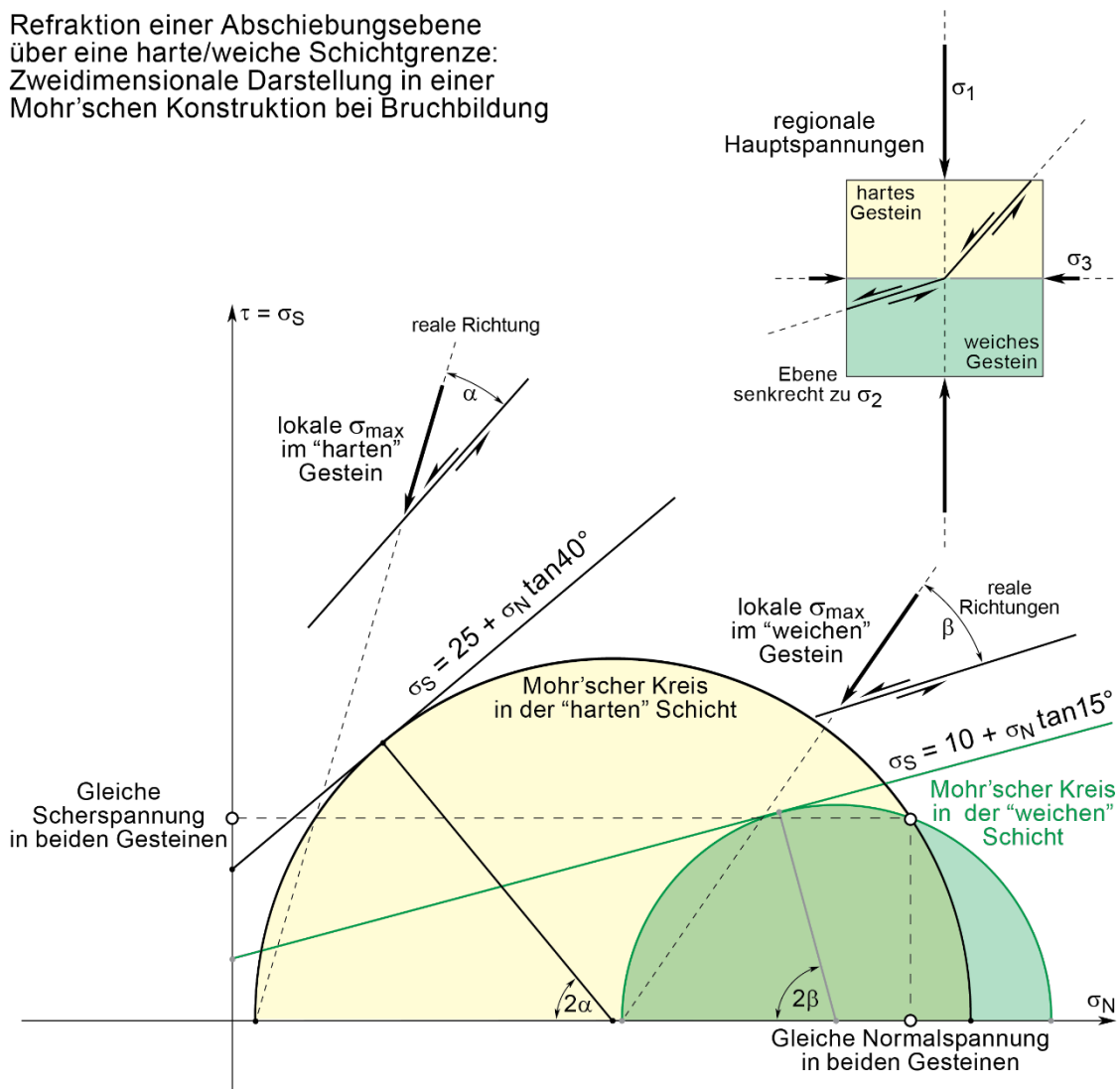
Im Allgemeinen sind Verwerfungsflächen gekrümmt. Variationen in der Orientierung der Verwerfungsflächen in einem konsistenten Spannungsfeld lassen sich wie folgt erklären:

Eine Erklärung ist die Form der Mohr'sche Umhüllende (siehe Kapitel Bruchbildung), deren 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 hoher Kohäsion (z.B. Sandstein) unterscheidet sich von dem eines Gesteins mit niedrigerem Reibungswinkel und hoher 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 übereinandergeschichtet sind.

Beide Gesteine müssen sich im selben Bruchbildungszustand befinden. Dies bedeutet, dass die beiden Gesteine in unterschiedlichen Spannungszuständen stehen. Vorausgesetzt, beide Gesteine haben denselben Porendruck, müssen die Normal- und Scherkomponenten an der Schichtfläche denselben Wert annehmen. Dies trifft aber nur an dem Punkt zu, an dem 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 zusammenführen. Daher sollten die Spannungen und der physische Raum auf demselben Diagramm zusammengefasst 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 jeweiligen Gestein. Wenn der 2θ -Winkel zwischen der Bruchfläche zur lokalen σ_1 bekannt ist, kann man die Verwerfungsflächen in den beiden angrenzenden Gesteinen konstruieren und leicht erkennen, wie die Scherfestigkeit auf ihnen schwankt.

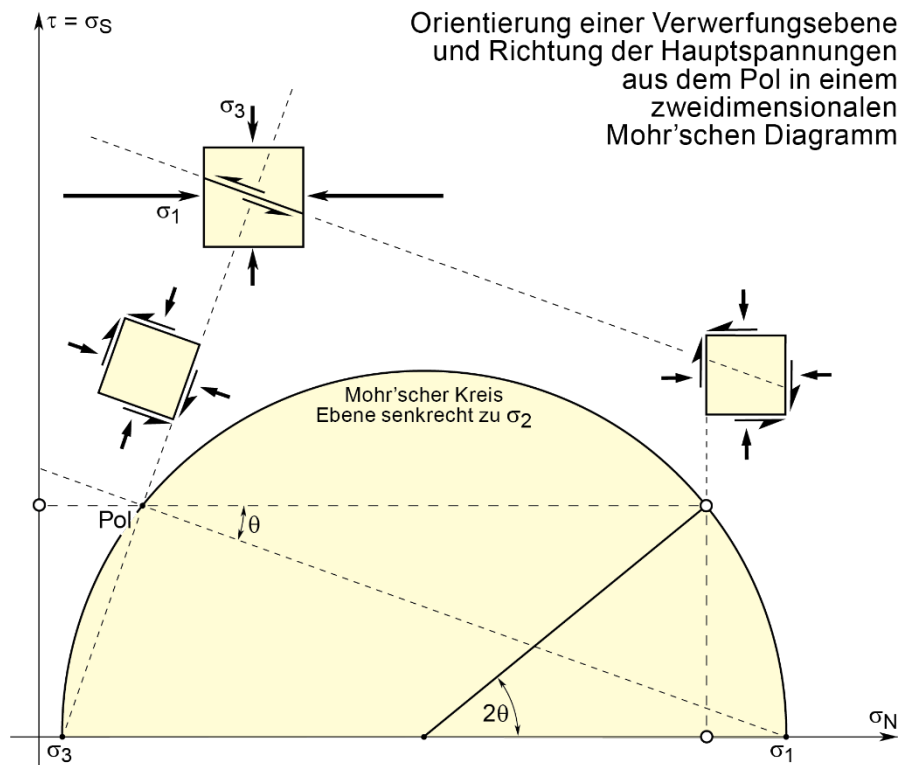
Refraktion einer Abschiebungsebene
über eine harte/weiche Schichtgrenze:
Zweidimensionale Darstellung in einer
Mohr'schen Konstruktion bei Bruchbildung



Das gleiche Spiel kann auch für Überschiebungen verwendet 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 des Mohr'schen Spannungskreises besteht darin, dass die Winkel das Doppelte ihres tatsächlichen, physischen Werts anzeigen. Die eigentliche Richtung der Ebene, auf die die Spannungen wirken, wird durch die Festlegung des **Polen (pole)** auf dem Mohr'schen 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 Pol-Schnittpunkt (Gegenpol, Antipol) im unteren Halbkreis liefern. Verwirft man die Zeichenkonvention und interessiert sich nur für die Orientierung, genügt der obere Halbkreis.



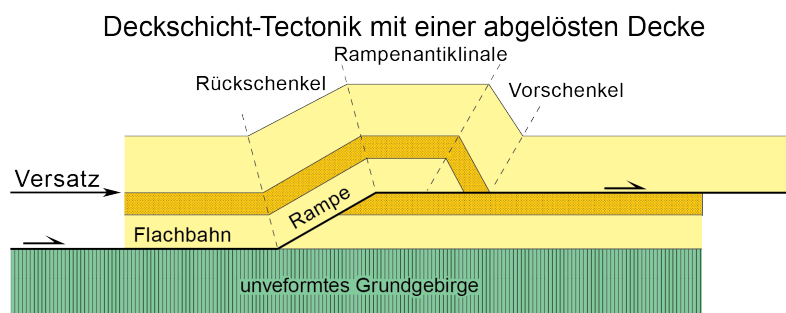
Ein elementares Theorem der euklidischen Geometrie besagt, dass jeder Umfangswinkel (Peripheriewinkel) halb so gross ist wie sein zugehöriger Mittelpunktswinkel (Zentriwinkel). Eine besondere Situation ergibt sich, wenn ein rechter Winkel in einem Halbkreis eingeschrieben ist. Daher sind die zwei Linien zwischen dem Gegenpol und den σ_1 und σ_3 Punkten senkrecht und eine dieser zwei Linien definiert mit der horizontalen Linie durch den Punkt (σ_N, σ_S) den Winkel $= \theta$. Diese zwei Linien, die den Gegenpol und die Hauptspannungspunkte verbinden, repräsentieren also physisch die Richtung der zwei senkrechten Ebenen auf die σ_N und σ_S bzw. die Normal- und Scherspannungen.

Überschiebung

Zwei Stilarten werden allgemein verwendet, um Überschiebungstektonik zu beschreiben: **Deckschicht-Tektonik** (*thin-skinned tectonics*) und **dickhäutige Tektonik** (*thick-skinned tectonics*). Sie beziehen sich darauf, wie viel des Grundgebirges des Überschiebungssystems einbezogen ist.

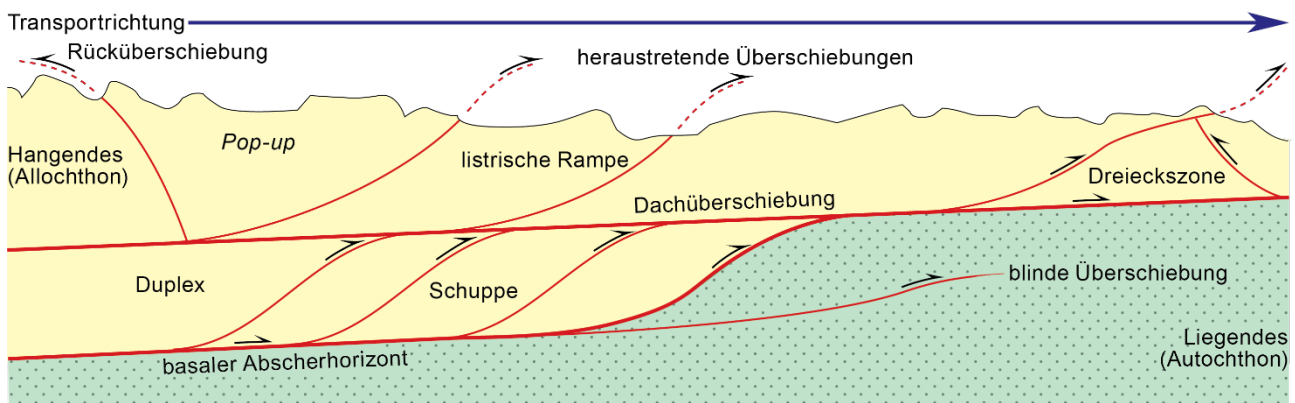
Tektonik mit einer abgelösten Decke (Deckschicht-Tektonik)

In Falten- und Überschiebungsgürteln in vielen Vorländern spielt die Schichtung als kontrollierender Faktor bei der Ausbildung stufenartiger, flacher Rampensysteme eine Rolle. Die sedimentäre Abdeckung ist gewöhnlich vom Grundgebirge entlang der Verwerfungsflächen abgelöst. Diese **Sohlflächen** (*sole thrusts*) bleiben über dem starken, kristallinen Grundgebirge erhalten, während dieses von den Überschiebungen unverformt bleibt. Dieser Deformationsstil ist als Deckschicht-Tektonik bekannt.



Deckschicht-Tektonik deutet auf grosse horizontale Bewegungen hin, wobei die stratigrafische 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 Richtung des Transportes (*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 linsenförmig sind. Eine typische Duplexstruktur besteht daher aus einem flachliegenden **roof thrust** (Dachüberschiebung) und einer Sohlfläche, die die einzelnen aufeinander gestapelten Schuppen begrenzt.

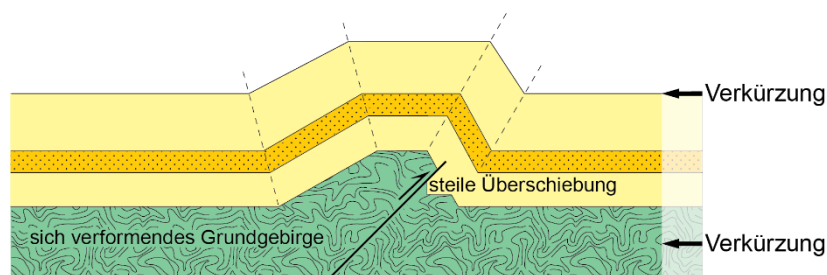


Schematische Bezeichnung von Überschiebungskomponenten

Untergeordnete Überschiebungen mit entgegengesetztem Versatz zur Hauptüberschiebung werden als **Rücküberschiebungen** (*backthrusts*) bezeichnet. Strukturen mit einem herausgehobenen Block, der zwischen einer Überschiebung und einer Rücküberschiebung liegt, 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)

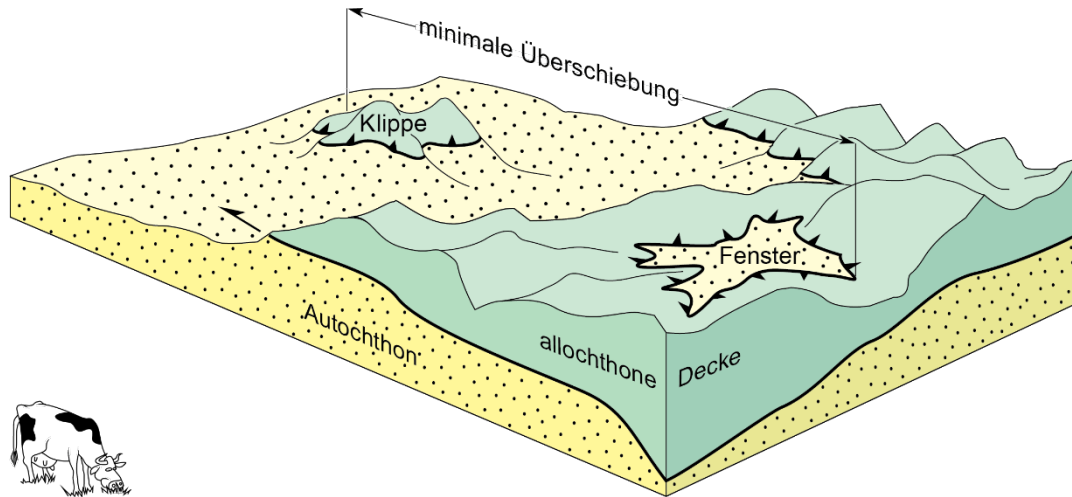
In metamorphen Gebieten sind Überschiebungen häufig mit intensiver und verteilter duktiler Deformation assoziiert. Die Stufen-, Flachbahnen- und Rampengeometrie wird nicht berücksichtigt, obgleich Überschiebungen dazu neigen, Flächen rheologischen Kontrasts zu folgen, dabei jedoch das Grundgebirge mit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



Dickhäutige-Tektonik mit einer klebenden Decke

Erodierte Überschiebungen

Ein (tektonisches) **Fenster** (*window*) ist ein durch Erosion entstandener Aufschluss, in dem Gesteine der nächsttieferen Einheit, das heißt unterhalb einer Überschiebung, sichtbar werden. Der Aufschluss ist vollständig von der darüberliegenden Überschiebungsmasse umgeben. Eine **Klippe** (*klippe*) ist ein isolierter, von der Erosion übriggebliebener Rest der Überschiebungsdecke, der vollständig von Gesteinen des Liegenden umgeben ist.

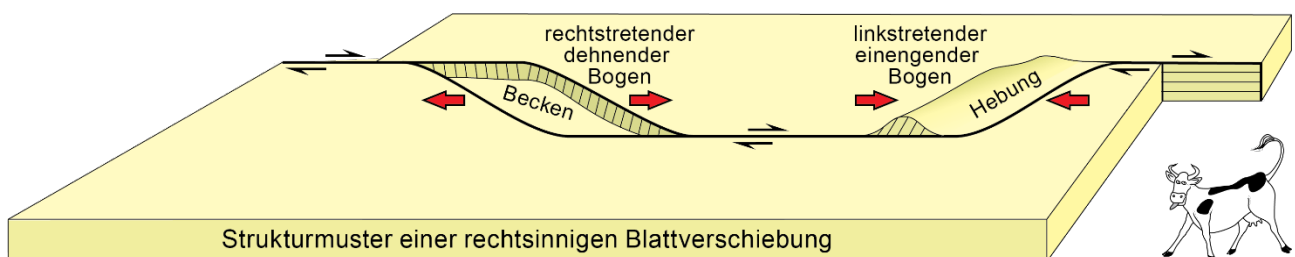


Gravitationsgetriebene Überschiebungen

Ein Teil der Serie ist vom Gipfel der Antiklinale aufgrund gravitationsgetriebenen **Kollapses** weggerutscht. **Gleitdecken** (*slip sheets*) entstehen, wenn ein zusammenhängender Teil einer Serie infolge eines gravitationsgetriebenen Kollapses von einem Antiklinalscheitel auf eine erodierte Fläche der angrenzenden Synklinale geglitten ist.

Blattverschiebung

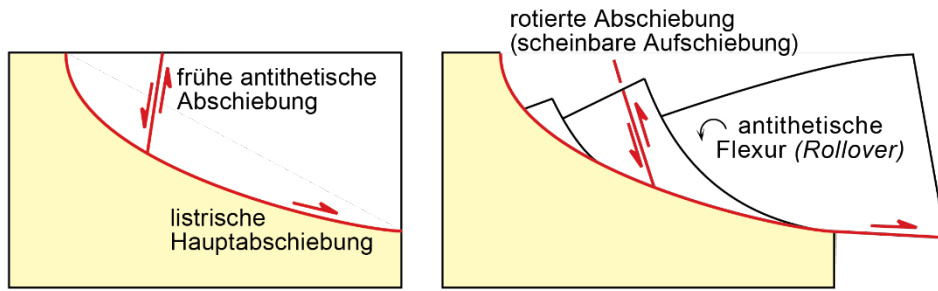
Blattverschiebungen sind im Allgemeinen vertikal und neigen um ca. 30° zur horizontalen Kompressionsrichtung. Sie entwickeln häufig Flächen mit **rechtstretenden** (*right-stepping*) und **linkstretenden** (*left-stepping*) Verwerfungen (von der oberen zur unteren Verwerfung). Während rechtstretende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



Nebenverwerfungen von gebogenen Hauptverwerfungen

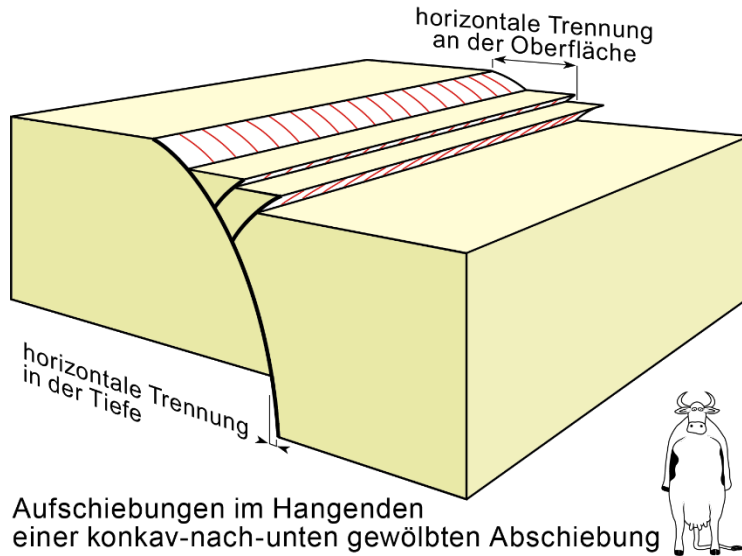
Normalerweise gehören Nebenverwerfungen zur gleichen Kategorie wie die Hauptverwerfung. Dies gilt aber nicht bei gebogenen Hauptverwerfungen, was in einer komplizierten Verformung des Hangenden durch die Entwicklung von Akkomodationsverwerfungen resultiert:

- Rotation der Hangenden bei listrischer Abschiebung kann eine ehemalige antithetische Abschiebung in eine scheinbare Aufschiebung umwandeln.



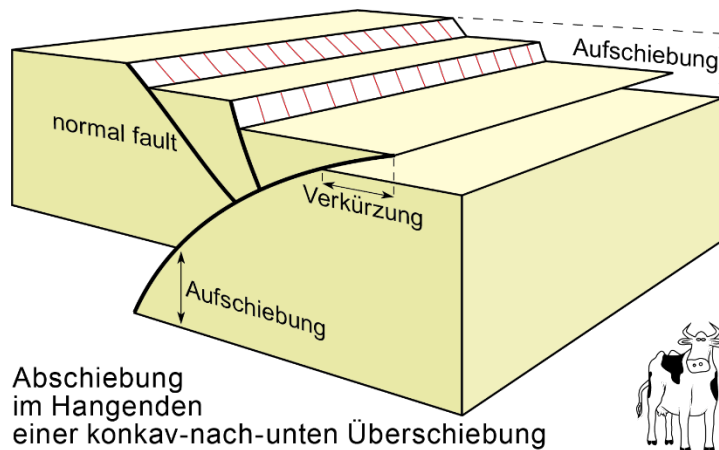
Rückrotation einer antithetischen Zweigabschiebung zu einer scheinbaren Aufschiebung im Hangenden einer listrischen Hauptabschiebung

- 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.



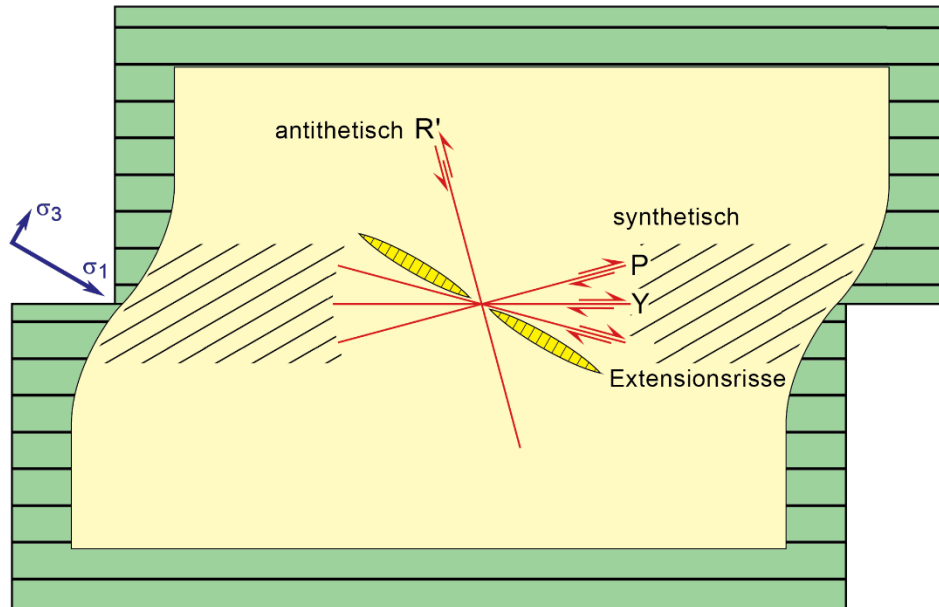
Abschiebung im Hangenden einer konkav-nach-unten Überschiebung

- Abschiebungen können sich im Hangenden einer nach-oben konvexen Aufschiebung bilden.

Nebenbrüche = Riedelbrüche

Kleinere **Riedelbrüche** (*Riedel shears*) pflanzen sich meist nur in der Nähe von der Hauptverwerfung fort. Diese Bezeichnung wird auch bei Betrachtungen im grossen Massstab von Verwerfungsfeldern verwendet. Riedelbrüche bilden ein Netzwerk, das gewöhnlich während der frühen Stadien der Bruchbildung entstanden ist. Sie bilden eine systematische Anordnung, die für eine grosse Vielfalt an Materialien und über einen breiten Massstabereich hinweg selbstähnlich zu sein scheint.

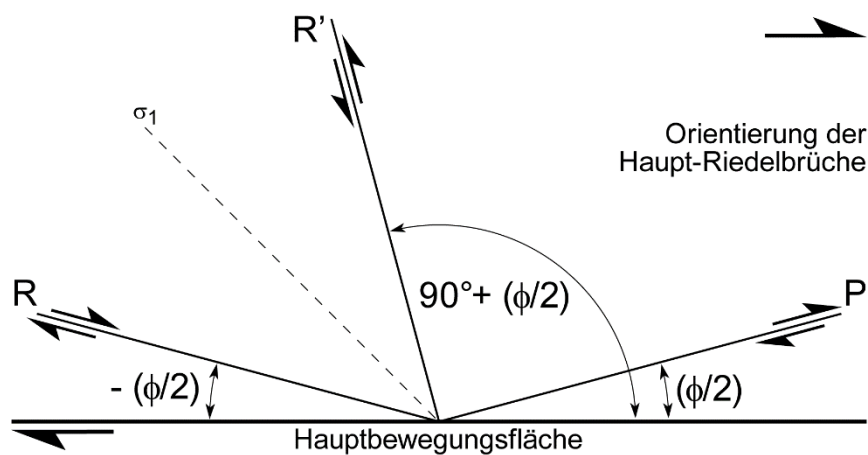
Riedel-Scherflächen in einer Störungszone



Die grundlegende Geometrie besteht aus konjugierten **R- und R'-Brüchen**, sodass die Winkelhalbierende des spitzen Winkels die Richtung der maximalen Kompressionsspannung angeben.

- **R-Riedelbrüche** entstehen unter einem kleinen Winkel (typisch $10\text{--}20^\circ$) zur Hauptverwerfung (oft in einer en-échelon-Anordnung). Sie sind synthetisch zur Hauptverwerfung. En-échelon beschreibt das ausgerichtete Muster einer Reihe paralleler, kurzer Brüche, die, in Perspektive gesehen, wie Sprossen einer Strickleiter angeordnet sind. Die grösste Hauptspannung σ_1 liegt während der einfachen Scherung 45° zur Hauptscherfläche. Das Mohr-Coulomb Bruchkriterium sagt voraus, dass die konjugierten Bruchflächen optimal $\pm(45^\circ - \phi/2)$ zu σ_1 geneigt sind, wobei ϕ der Winkel der inneren Reibung des Materials ist. Der spitze Winkel zwischen den Riedelbrüchen und der Hauptverwerfung ist $-\phi/2$. Dieser Winkel zeigt in Richtung der relativen Gleitrichtung entlang der Hauptverwerfung.

- **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 bei grossen Bewegungen dazu, zu entstehen.
- Wie für R-Riedelscherbrüche kann es auch **P'-Brüche** konjugiert zu den P-Brüchen (mit $-45^\circ - \phi/2$ zur Hauptverwerfungsebene) geben, sie sind jedoch von sehr untergeordneter Bedeutung.
- **Y-Brüche** sind synthetische Mikrobrüche, die subparallel zur Hauptverwerfung verlaufen.

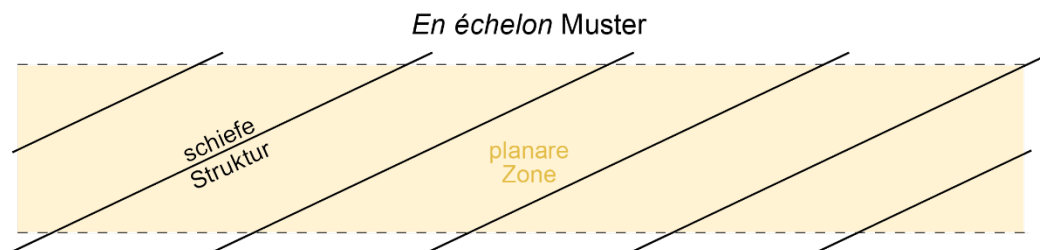
Verwerfungspopulationen und netzartige Anordnung von Verwerfungen

Die Analyse der Verwerfungspopulationen hat gezeigt, dass Verwerfungen zahlreiche fraktale Eigenschaften aufweisen. Ein Fraktal ist ein Objekt, dessen geometrische Eigenschaften (z.B. Form) unabhängig von seiner Grösse sind („selbst-gleichartig“ = *self-similar*) oder eine einfache Beziehung mit seiner Grösse haben („selbst-ähnlich“ = *self-affine*). Diese Eigenschaft bedeutet, dass ein auf Satellitenbildern sichtbares Verwerfungsmuster dasselbe ist wie in einem Aufschluss. Das bedeutet, dass einige Eigenschaften (z.B. das Längen-Versatz-Verhältnis) relativ unabhängig von der Verwerfungsgrösse sind. Wie auch immer, die Analyse von Verwerfungen anhand dreidimensionaler Daten hat gezeigt, dass im Log-Log-Diagramm ein einfaches lineares Verhältnis zwischen Häufigkeit und der Grösse der 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 kleiner, sozusagen subseismischer (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

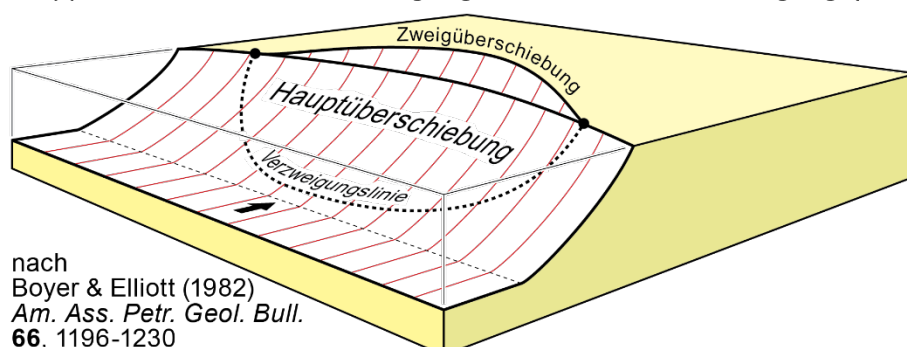
"En-échelon" (in Staffeln) bedeutet "treppenähnliche Anordnung" und beschreibt eine durchweg überschreitende und überlappende Einregelung subparalleler, räumlich eng bemessener Strukturen, die schief zur planaren Zone stehen, in der sie auftreten. Solche Muster gehen im Allgemeinen mit Verwerfungen einher.



Zusammenlaufende Verwerfungen

In Gebieten mit Sprödbrech und in Beschädigungszonen verzweigen sich Verwerfungen zu komplexen Anordnungen kleinerer Verwerfungen, die in einem spitzen Winkel zur Hauptverwerfung wegbiegen.

Schuppenzone mit einer Verzweigungslinie und zwei Verzweigungspunkte

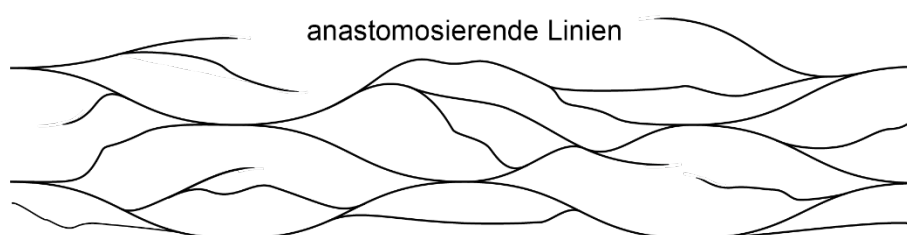


nach
Boyer & Elliott (1982)
Am. Ass. Petr. Geol. Bull.
66, 1196-1230

Eine **Verzweigungslinie** (*branch line*) ist eine Intersektionslinie, an der sich eine Verwerfung in zwei Verwerfungen desselben Typus aufspaltet. Hinter dieser Linie erfährt die verzweigte **Zweigverwerfung** (*splay fault*) dieselbe relative Bewegung wie die Hauptverwerfung. Sie bilden einen **Verwerfungsfächer** (*imbricate fan*), der die Ausbreitung von Verschiebung (und Verformung) in einem Gesteinsvolumen begünstigt. 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) entsteht. **Weiche Verknüpfung** (*soft-linkage*) bezeichnet Verwerfungssegmente, die nicht miteinander verbunden sind.

Anastomosierendes Muster

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



Anastomosierend (*anastomosing*) bezeichnet ein sich ausbreitendes und wieder zusammenführendes Netz aus aperiodischen Flächen oder Linien, das wie Zopfströme oder Adern verflochten ist.

Skalierung von Verwerfungsverteilungen

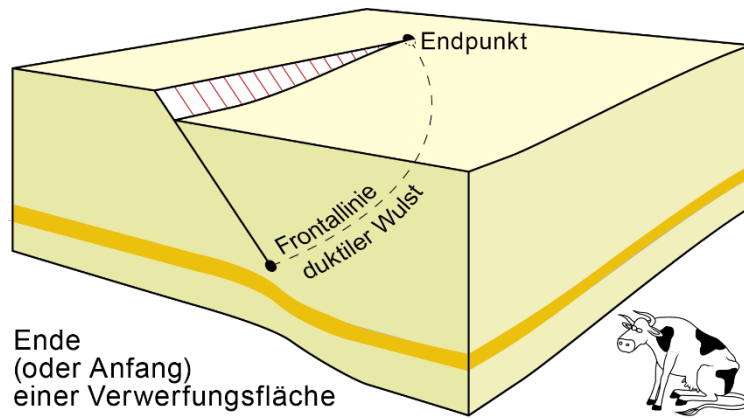
Häufig wird eine Potenzverteilung angenommen, um Verwerfungsverteilungen zu beschreiben. In der Praxis könnte die Bedeutung eines einzelnen Potenzgesetzexponenten hierarchische Muster in einem komplexen Bruchsystem aufdecken, das alle Arten von Brüchen in unterschiedlichen Massstäben umfasst.

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 aufweist. Diese beiden Elemente enden entweder an anderen Verwerfungen oder laufen einfach entlang ihres Streichens aus. Im letzteren Fall vereinen sich die Verwerfungen entweder oder werden durch die anderen abgeschnitten. Durch das Wachstum von Verwerfungen und deren Verschmelzung entstehen Netzwerke von Verwerfungen (*fault networks*).

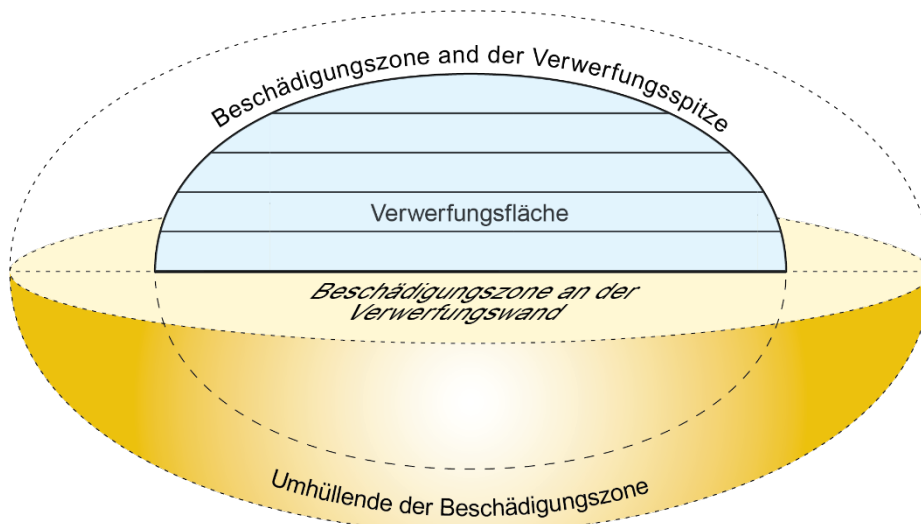
Frontallinie und Frontalzonen

Einzelne, isolierte Verwerfungen haben eine ungefähr 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, an der der Verschiebungsbetrag der Gleitregion auf null geschrumpft ist.



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

- 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 hinuntergebracht werden. Die Abnahme der Verschiebung auf der Verwerfungsfläche wird durch nicht-spröde Deformation (penetrative Verformung und/oder Faltung) im angrenzenden Gestein entlang des Verwerfungsendes kompensiert, 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 die Assoziation kleinerer Verwerfungen und zusätzlicher Brüche, besonders im Hangenden, angepasst werden.



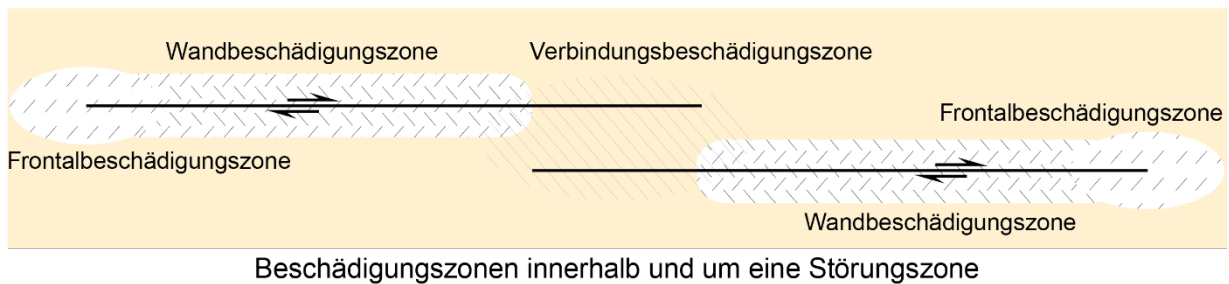
3D konzeptionelles Modell einer Beschädigungszone um eine Störung

Beschädigungszonen

Beschädigungszonen sind verwobene kleine Verwerfungen und Brüche entlang grösseren Verwerfungsflächen. Die Dichte von Verwerfungen und Brüchen nimmt in der Regel mit zunehmender Entfernung zur Hauptverwerfung exponentiell ab. Die Beschädigungszonen entstehen infolge von Spannungskonzentrationen, insbesondere an den Verwerfungsspitzen und in den Verbindungszonen; sie bilden sich auch, um Veränderungen des Versatzes in oder entlang der

Verwerfung aufzunehmen. Bruchbildung, Ausbreitung und Interaktion teilen Beschädigungszonen hinsichtlich ihres Standpunkts innerhalb und um eine Verwerfungszone herum in Frontal-, Wand- und Verbindungsbeschädigungszonen ein.

- Eine Frontalbeschädigungszone entsteht in Reaktion auf die Druckkonzentration an einer Verwerfungsspitze.
- Wandbeschädigungszonen können sich entlang der gesamten Spur einer Verwerfung verteilen. 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 zunehmendem Versatz einhergeht.



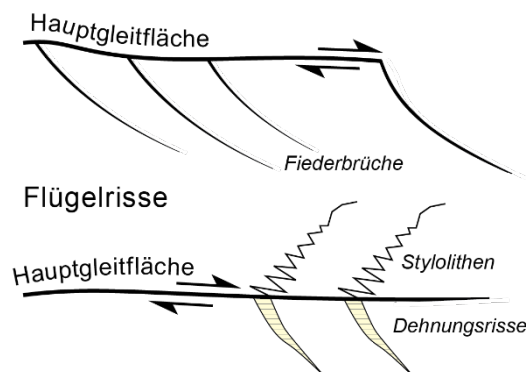
- Verbindungsbeschädigungszonen entstehen durch die Interaktion und Verbindung der Verwerfungssegmente in einer verhältnismässig kleinen Region. Sie sind durch den angehäuften Versatz und die Interaktion der Beschädigungszonen an der Wand und an der Spitze zweier benachbarter Verwerfungen kompliziert. Folglich können die Verbindungsbeschädigungszonen eine Reihe von Bruchmustern entwickeln, je nach Interaktion zwischen den beiden 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 sowie an Punkten mit 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 Verwerfungsfront zu entwickeln.



Anticracks

Anticracks sind Lösungsflächen (**Styloolithen**), die symmetrisch zu den Flügelrissen bezüglich der Hauptscherfläche entstehen. Sie entwickeln sich senkrecht zur lokalen σ_1 -Richtung im Druckquadrant der Verwerfungsfront.

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 sowie an Punkten mit 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 Verwerfungsfront zu entwickeln.

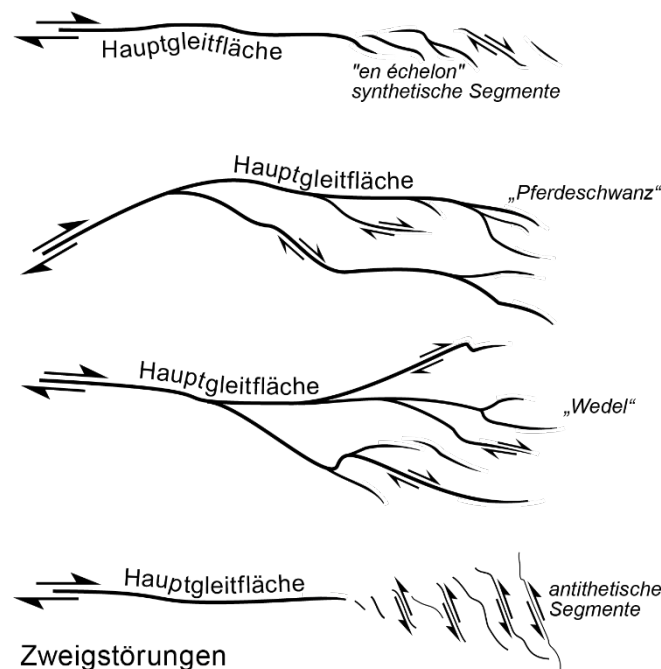
Zweigverwerfungen

Synthetische Zweigverwerfungen

Synthetische Zweigverwerfungen (*synthetic splay faults*) sind geometrisch und mechanisch den Flügelrissen ähnlich, feiner und näher beieinander, mit verhältnismässig niedrigen Winkeln zu den Hauptverwerfungen. Sie haben dieselbe Bewegungsrichtung wie die Hauptverwerfung und können sich mit einem benachbarten Verwerfungssegment verbinden. „**Schachtelhalm**“-**Brüche** (*horsetail fractures*) scheren asymmetrisch, häufig an 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

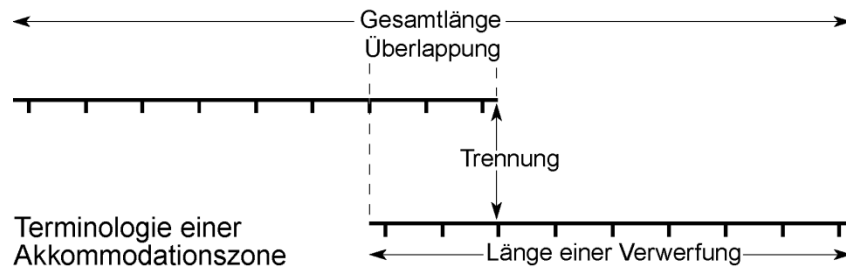
Antithetische Zweigverwerfungen (*antithetic splay faults*) haben eine Bewegungsrichtung, die entgegengerichtet ist zur Hauptverwerfung, und entwickeln sich meist in einem hohen Winkel (60-70°) zur Hauptverwerfung. Sie sind isolierte Verwerfungen, die von der Hauptverwerfung getrennt sind. Ihre Länge und ihr Abstand zueinander nehmen mit zunehmendem Abstand zur Verwerfungsspitze zu.



Akkomodationszonen

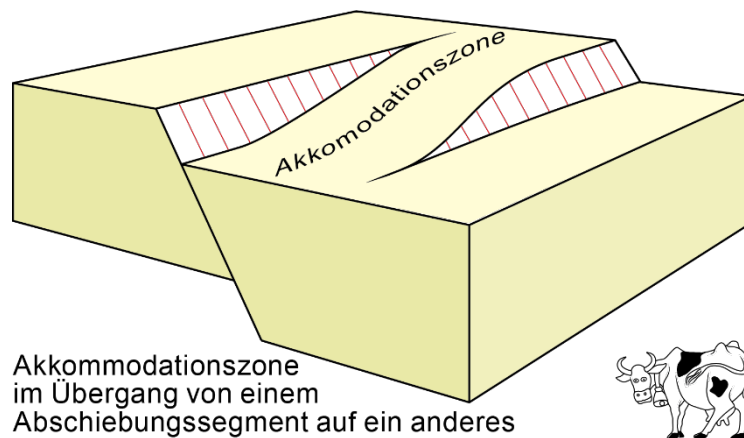
Eine **Relaiszone** ist eine Zone in einem Gestein, durch die der Versatz von einem Verwerfungssegment auf ein anderes, nicht in derselben Ebene liegendes Verwerfungssegment übertragen wird. Durch diese Übertragung werden Relaisstrukturen geschaffen, die lokalen

Komplikationen in der Kinematik und Verformung aufnehmen. Die **Überschreitung** (*overstep*) ist der offene Abstand zwischen den beiden subparallelen Verwerfungssegmenten (tatsächlich zwischen zwei ähnlichen Strukturen). Wenn die Normale der Spitze einer Überschreitverwerfung die Normale der anderen Verwerfungen schneidet, liegt **Überlappung** (*overlap*) vor. Die Alternative ist **Unterlappung** (*underlapping*).



Überlappungen werden als **rechts-** oder **linksspringend** (*right-* oder *left-stepping*) beschrieben, je nach Richtung des Sprungs von einer Struktur zur nächsten. Der Abstand zwischen den überlappenden, parallelen Verwerfungssegmenten ist die **Trennung** (*separation*). Trennung/Überlappungsverhältnisse liefern ein grobes Mass der Abhängigkeit zwischen den Verwerfungen. Der Grad der Abhängigkeit lässt sich besser bestimmen, wenn die Trennungs- und Überlappungswerte der Verwerfungslänge von einer und von einer beliebigen der beiden aufeinander einwirkenden Verwerfungen normiert werden.

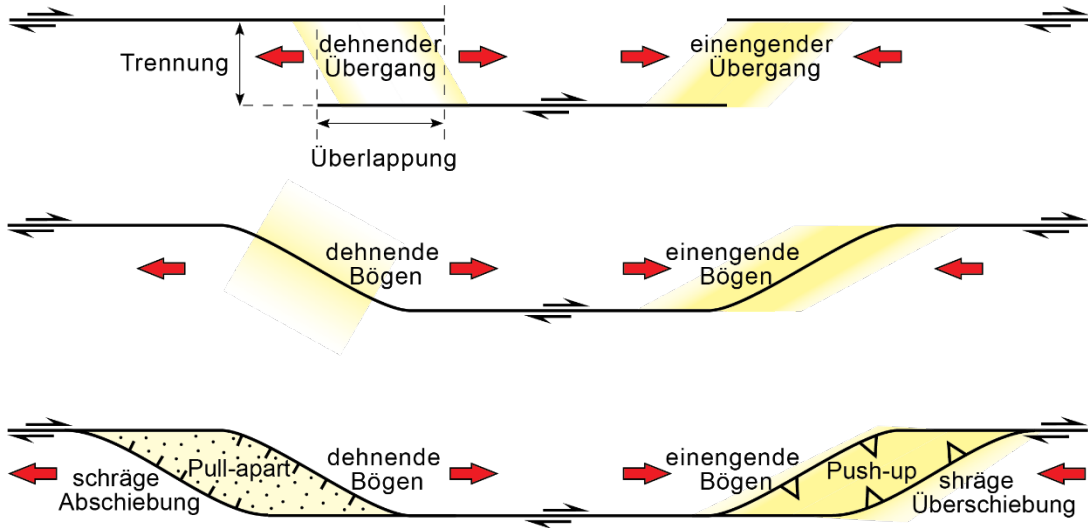
Relaiszonen können zu grossen **Relaisstrukturen** (*relay structure*) führen. Eine **Relaisrampe** (*relay ramp*) ist ein Bereich, in dem die Schichtung gebogen ist. Die Relaisrampe überträgt die Versätze zwischen zwei sich überschneidenden Verwerfungen, die häufig gleichzeitig auftreten.



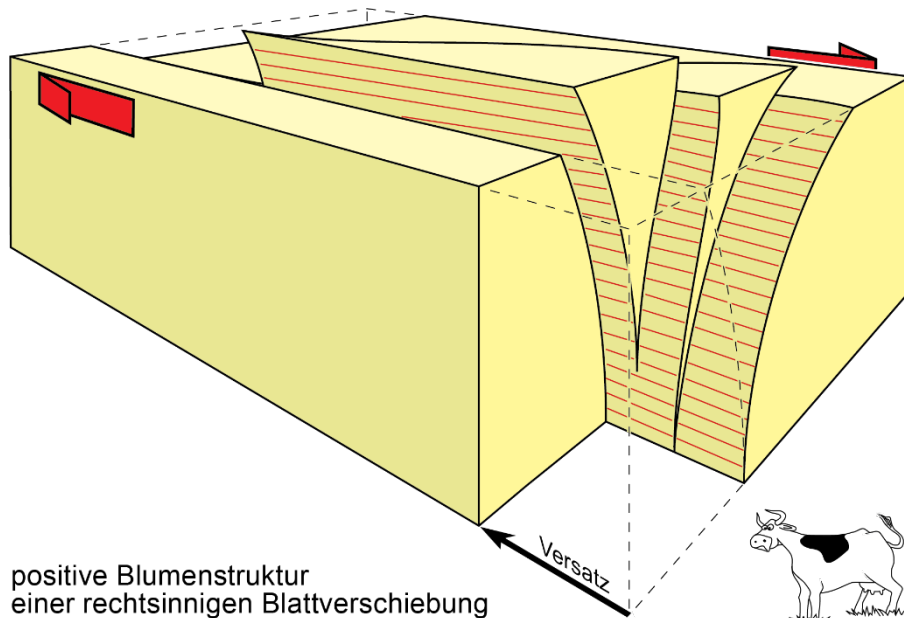
Die Relaisrampen sind vorübergehende Strukturen, die sich während der Störungsausbreitung entwickeln, bis sie durch **Durchbrüche** (*breaching faults*) ersetzt werden, die die aufeinander interagierenden Störungssegmente zusammenfügen (Entwicklung von Weich- auf Hartverknüpfung) und so eine einzelne, durchgehende Verwerfungsoberfläche 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 der Orientierung der Verwerfungsfläche führen zu kompressiven oder extensiven Deformationszonen, je nachdem, ob die Versetzung in Bezug auf die Verwerfungsbewegung kompressiv oder extensiv ist.

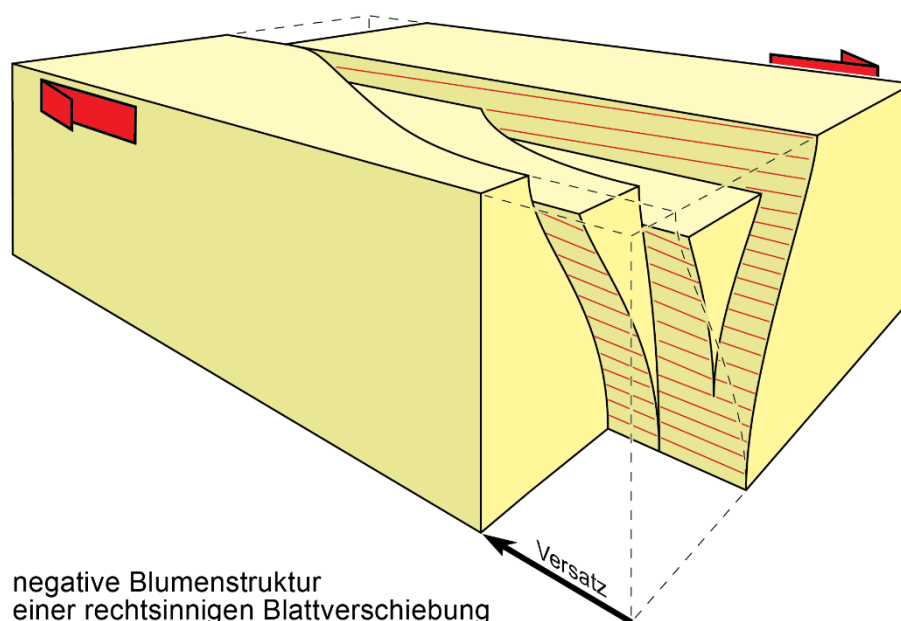
Geometrie von einengenden und dehrenden Übergängen und Bögen entlang einer rechtsinnigen Blattverschiebung



Eine parallele, jedoch seitlich versetzte Anordnung von Blattverschiebungen, ist kinematisch verknüpft. Auf diese Weise wird beispielsweise in der Überlappungszone (*overlap zone* oder *transfer zone*) zweier paralleler dextraler Verwerfungssegmente das Gestein gestreckt. Die Streckung erfolgt gewöhnlich durch Ausbildung von Abschiebungen und bildet damit Lücken oder Dehnungsbereiche, die mit Adermaterial oder Beckensedimenten gefüllt sind (**rhombenförmige Becken**: *rhomb-shaped basin*, sogenannte **pull-apart-Bäcken**: *pull-apart basins*). Falls in der Überlappungszone zweier Verwerfungen Kompression auftritt, 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 in kompressiven Überlappungszonen und von negativen Blumenstrukturen in 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, setzen die Kohäsion bei der Verwerfungsbewegung und die Anwesenheit eines planaren Gefüges voraus.

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 die **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 Gesteinsfragmenten 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, die 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 bestehen, das kleine eckige Fragmente enthält. Tonminerale entstehen durch Verwitterung und/oder hydrothermale Umwandlung zerquetschter Verwerfungsgesteine. Verwerfungsletten und gleichwertige feinkörnige Verwerfungsabnutzungen verfestigen selten.

Späte Bewegungen können ein eindeutiges planares Gefüge in diesen gebrochenen, spröden Gesteinen verursachen, 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 auf, sondern einen planaren Kern, der bis zu einigen Metern dick ist. Dieser Kern wird im Wesentlichen durch 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 einen Störungskegel herum darstellt.

Kataklase

Kataklase (*cataclasis*) entsteht durch Bruchbildung, Ausbreitung, Interaktion und Versatzansammlung entlang einer Verwerfung. Die inkohäsiven Verwerfungszonengesteine werden im Wesentlichen durch Kataklase gebildet: Dieser Deformationsprozess schliesst sowohl das Zerschneiden von Kristallen und Kristallgrenzen als auch **Dilatanz** (*dilatancy*), die Festkörperrotation zwischen körnigen Partikeln, ein. Es kann als mechanische Granulation und/oder als Zerquetschen beschrieben werden, wobei der zusammenhängende Fels pulverisiert wird. Der Prozess ist in der oberen Kruste häufig, weil die Verformungsrate hoch ist und der Umgebungsdruck sowie die Temperatur verhältnismässig niedrig sind (< 500 MPa, 200–300 °C).

Die Grössenverteilung der zerkleinerten Partikel ist ein Mass der Energie, die für die Kataklase verwendet wird. Die Verwerfungsletten zeigen Grössenverteilungen mit fraktalen Dimensionen von > 1,6.

Kohäsive und geschieferte Verwerfungszonengesteine

Kohäsive, geschieferte, meist linierte Gesteine gehören zur **Mylonitserie** (*mylonite*). Sie sind im Dünnschliff durch eine geplättete oder stängelige Struktur gekennzeichnet. Körner der Gesteinsmatrix sind in Grösse ohne Verlust der Primärzusammensetzung verringert worden. Die Mylonite sind durch feine Korngrössen und eine Mikrostruktur gekennzeichnet, die auf duktile Deformation und dynamische Rekristallisation zurückzuführen sind (viskoses Kriechen). Sie können grössere Fragmente oder Mineralien des Ursprungsgesteins enthalten; diese werden **als Porphyroklasten** bezeichnet. 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 % Porphyroklasten.
- Eine äusserst intensive Korngrössenverkleinerung und eine dynamische Rekristallisation entlang von Störungen können zu einer harten, dunklen Füllung aus ultramikroskopischen Körnern führen,

die weniger als 10% kleinerer Porphyroklasten enthält. Dieses Material nennt man **Ultramylonit** (*ultramylonite*).

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

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

Pseudotachylite

An gewissen Verwerfungen treten dünne, glasige und dunkle Adern kohäsiver, untexturierter Gesteine auf, die wie vulkanisches Glas wirken. 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, dass der Pseudotachylit einen flüssigen Aggregatzustand aufwies. Die glasige Matrix, die gewöhnlich Gesteinseinschlüsse und mikroskopische Sphärolithe enthält, belegt, dass die Ader abrupt gekühlt wurde. In den meisten Fällen hat die spätere **Entglasung** (*devitrification*) zum Verlust der glasigen Beschaffenheit geführt. Es wird angenommen, dass Pseudotachylite durch eine seismische Bewegung und lokale Dekompression entstehen, in Verbindung mit schnellem Schmelzen, gefolgt von Abschrecken und der Verfestigung des flüssigen Materials. Berechnungen der Temperaturen zur lokalen Schmelzung der Wandgesteine zeigen, 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 Brekzien:	0-5 km
Kohäsive Kataklastite 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 dafür, dass man eine Verwerfung erkannt hat, ist die 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 bei Blattverschiebungen mit eigenem Fallwinkel.

Für eine umfassende Bestimmung der Verschiebung ist es erforderlich, die Positionen zweier ursprünglich zusammentreffender Punkte auf beiden Seiten der Verwerfung festzustellen. Solche Punkte können durch die Kreuzung der Verwerfungsebene mit einem linearen Element, z.B. einem Faltenscharnier, definiert werden, das bereits vorhanden war und durch die Verwerfung verschoben wurde. **Durchstichpunkte** (*piercing points*) sind Punkte, an denen ein lineares Element die Verwerfung durchsetzt.

Wo das versetzte Linearmerkmal durch die Kreuzung zweier planarer Strukturen festgelegt ist, müssen die beiden planaren Strukturen der Verwerfung vorausgegangen sein. **Versatz**-Kontaktlinien auf geologischen Karten können gänzlich irreführend sein, weil sie durch die Kreuzung einer geologischen Ebene, die älter als die Verwerfung ist, mit einer topografischen Oberfläche, die jünger ist als die Verwerfung, begrenzt werden. Dasselbe kann für Versätze in einem Profil zutreffen oder wenn man sie in den Aufschlüssen irgendeiner Orientierung beobachtet. Um den Versatz linearer

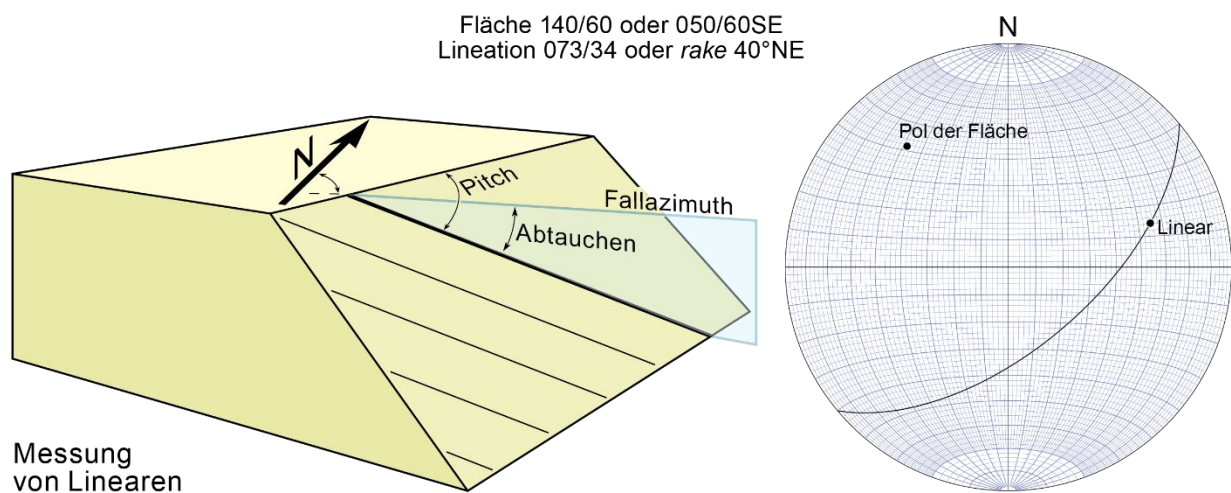
Merkmale vom Versatz nichtlinearer Merkmale zu unterscheiden, nennt man die erstere **eine Trennung** (*separation*).

Generell lassen sich Blattverschiebungen sowie die horizontale Komponente bestimmen. Weil diese Karten keine (primären) Höheninformationen 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 Gesteine überschoben wurden, oder anhand der 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 nahezu parallel zur Verschiebungsrichtung verläuft.

Diagnostische Bewegungsstrukturen innerhalb von Verwerfungsflächen

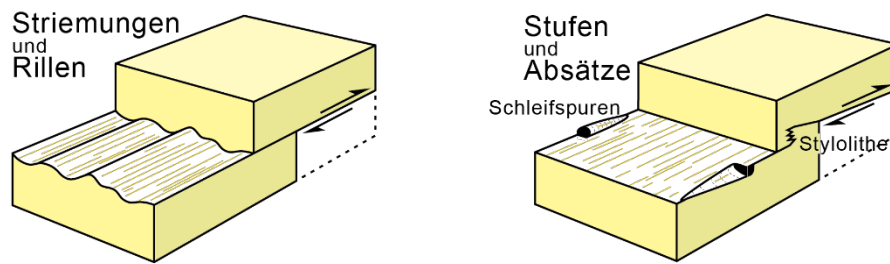
Gesteine am Kontakt zu Verwerfungsflächen weisen oft glänzende, weiche oder polierte Oberflächen aus mineralisiertem Material auf, sogenannte **Gleitflächen** oder **Spiegelharnische** (*slickensides*). Diese entstehen durch eine abschleifende Wirkung und können nichts sagend wirken, doch manchmal fühlen sie sich unter dem Finger glatter 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 Striemenlinie, wird als **pitch** oder **rake** bezeichnet. Die assoziierte asymmetrische Oberflächenstruktur ist ein **kinematischer Indikator** (*kinematic indicator*) für den Bewegungssinn.



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

Kratzspuren

Gleitflächen weisen für gewöhnlich auffällige **Striungen** (*striations*) oder **Kratzer** (*scratches*) auf, die in jedem Maßstab sichtbar sind. Experimente haben gezeigt, dass diese Abnutzungskratzer parallel zur Relativbewegung der Verwerfung verlaufen. Die meisten Striungen (**Rutschharnische**) sind durch Mineralstreifen in feinkörnigem Material entlang der Verwerfungsebene definiert. Einige **Rutschstriemen** (*striae*) können die **Rillen** (*grooves*) oder **Rinnen** (*gutters*) eines harten Objekts der anderen Bruchseite sein, die sie vorbeileiten. Kanten und Rillen können lange, lineare Wellen auf der Störungsfläche bilden. Im mikroskopischen Maßstab kennzeichnen bevorzugt orientierte Körner solche **Lineationen**, insbesondere in weichen Sedimenten. Diese geraden Strukturen zeigen die Bewegungsrichtung an, jedoch nicht den Bewegungssinn.



Kratzspuren und Schleifspuren durch Bruchstücke

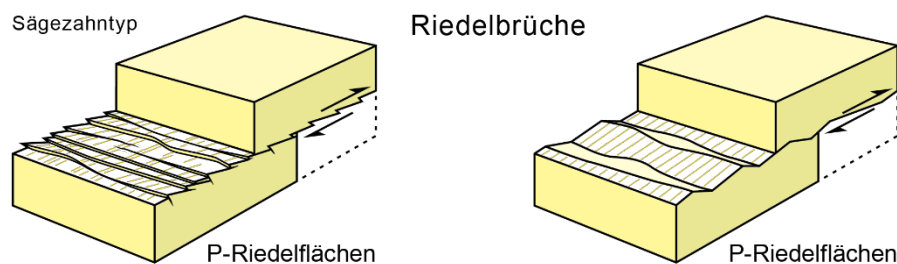
Ein hartes, eingestauchtes Objekt kann in der einen Wand der Störungsfläche stecken, während die dazugehörige Rille oder Vertiefung auf der gegenüberliegenden Wand liegt. Manchmal zeigt eine Vertiefung um das harte Objekt die wie ein Löffel geformt den relativen Schersinn der Bewegung an. Das Objekt kann dann am äussersten Ende einer Rille steckend gefunden werden. Damit ist der Sinn der relativen Bewegung bestimmt. Andererseits kann sich das harte Bruchstück hinter einer Unebenheit in Richtung des Gleitens, vor Erosion geschützt, befinden und dabei 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, die die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks anzeigt. Nadelharnische definieren die Lösungsflächen, die zur Versatzrichtung zeigen, mit mikrostylolithischen Spitzen, die einen geringen Winkel zur Störungsfläche bilden und gegen die Bewegungsrichtung gerichtet sind.

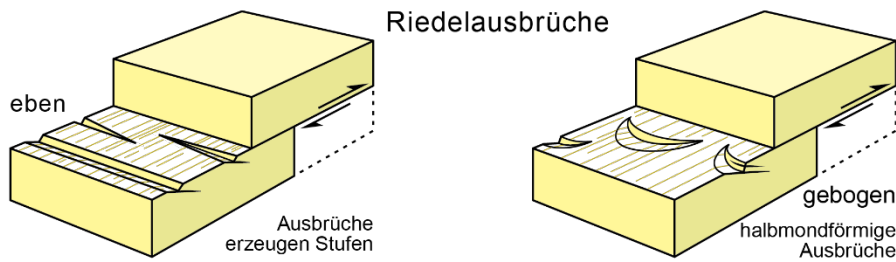
Abrisskanten

Rattermarken (*chatter marks*) sind kleine, asymmetrische **Stufen** oder **Absätze** (*steps*), deren Kanten in eine Richtung weisen und mehr oder weniger senkrecht zu den Strömungen stehen. Diese Stufen wurden traditionsgemäss als Bewegungssinnanzeiger gedeutet, indem die Absätze dem vorbeigleitenden Block „nachschaun“, wobei der Absatz der Versatzrichtung der entgegengesetzten Oberfläche der Gleitfläche gegenübergestellt wird. Es wurde im Experiment aufgezeigt, dass verschieden orientierte Stufen einhergehen können, entweder mit reibungstragender Strömung oder mit schrägen Stylolithenreihen, die gegen die Bewegungsrichtung ausgerichtet sind. Es gibt jedoch hinsichtlich der kinematischen Bedeutung solcher Stufen keine schlüssige Regel.



Riedelscherflächen

Kleine gestriemte R-Riedelbrüche schneiden häufig die Störungsfläche und sind nahezu orthogonal zur Bewegungsrichtung. R- und R'-Riedelbrüche weisen meist einen regelmässigen Abstand auf und ein gezacktes Profil der Störungsfläche mit Stufen, die gegen die Bewegungsrichtung zeigen. Die Kombinationen von R- und P-Scherbrüchen, die fast senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen, 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 der Nicht-Striemenbildung, die vom Verhalten der topografischen Unebenheiten auf der Störungsfläche abhängt, ist ein herkömmliches kinematisches Kriterium.

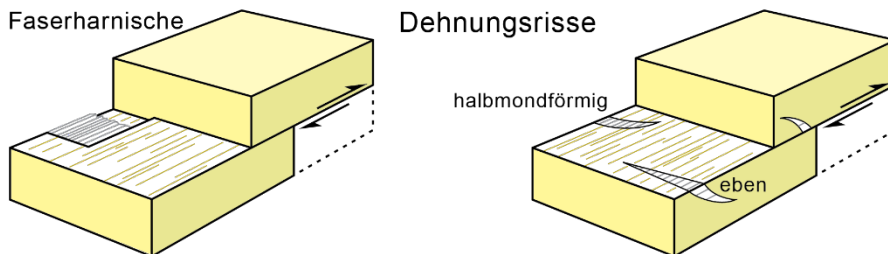


Reibungsbrüche

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

Faserharnische

Die bevorzugte Richtung des Mineralwachstums führt zu faserigen Kristallen, 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-Fasern*, die eine grosse Zahl von Mikroerdbeben aufzeichnen (solche Faserkristallisate geben also auch die Grösse des Versatzes an, da sie ursprünglich zusammengehörige Punkte verbinden). Gekrümmte oder aufeinanderliegende Kristallfasern sind ein Dokument der Veränderungen der Versetzungsrichtung. Im Gegensatz dazu lassen sich gewöhnliche Gleitflächenkratzer oft ausradiert oder überprägt werden, wenn sich die Verwerfungsrichtung ändert. Gewöhnliche Kratzer können nur die letzte gleichförmige Verschiebung erfassen.



Nicht-gestriemte, mineralisierte Spalten

Gerade, vorwärts eindringende, flache und halbmondförmige Brüche bilden sich in einem niedrigen Winkel zur Störungsfläche und neigen, infolge der Reibung während der Deformation der Wandgesteine, sich während der Deformation in Richtung grösserer Winkel zu drehen. Während der Rotation öffnen sich die Brüche für die 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 ausgerichtet sind, werden zur Definition der Verwerfungskinetik herangezogen.

Dehnungsbrüche; Fiederspalten

Dehnungsbrüche (*tensile fractures*) oder **Fiederspalten** (*tension gashes*), die normalerweise parallel zur regionalen maximalen Hauptspannung (Kompression) verlaufen, können nahe der Bruchfläche

mit Winkeln kleiner als 45° zur Bruchfläche hin auftreten. Ihre Schnittfläche mit der Verwerfungsfläche ist nahezu senkrecht zur kataklastischen Lineation ausgerichtet.

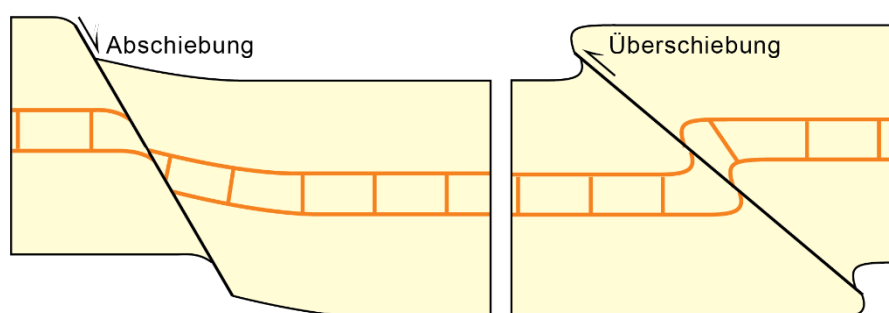
Ihre Winkelbeziehungen können bei der Bestimmung der Bewegungsrichtung hilfreich sein, wie später bei den Fiederklüften gezeigt wird. Zusätzlich können sich S- oder Z- Formen, abhängig von linkssinniger beziehungsweise rechtsinniger Scherrichtung, entlang der Verwerfung ausbilden.

Schleppfalten

Schleppfalten (*drag folds*) sind lokale Flexuren an anfänglich flachen oder geraden Markierungen, die sich in Bewegungsrichtung des gegenüberliegenden Blocks krümmen. Diese Benennung umfasst die Interpretation, die voraussetzt, dass eine Verwerfung zuerst eingeleitet wird und die Faltung entsteht, indem ein Block nach dem anderen 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 abnehmender Dicke (**trishear**, für Verformung in einer dreieckigen Zone) hat.

Schleppfalten entlang Verwerfungsflächen



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

Riedelscherflächen

Riedelscherflächen sind diagnostische Merkmale, die in die Störungswand mit einem kleinen Winkel zur Hauptverwerfungsebene 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 diese ein.

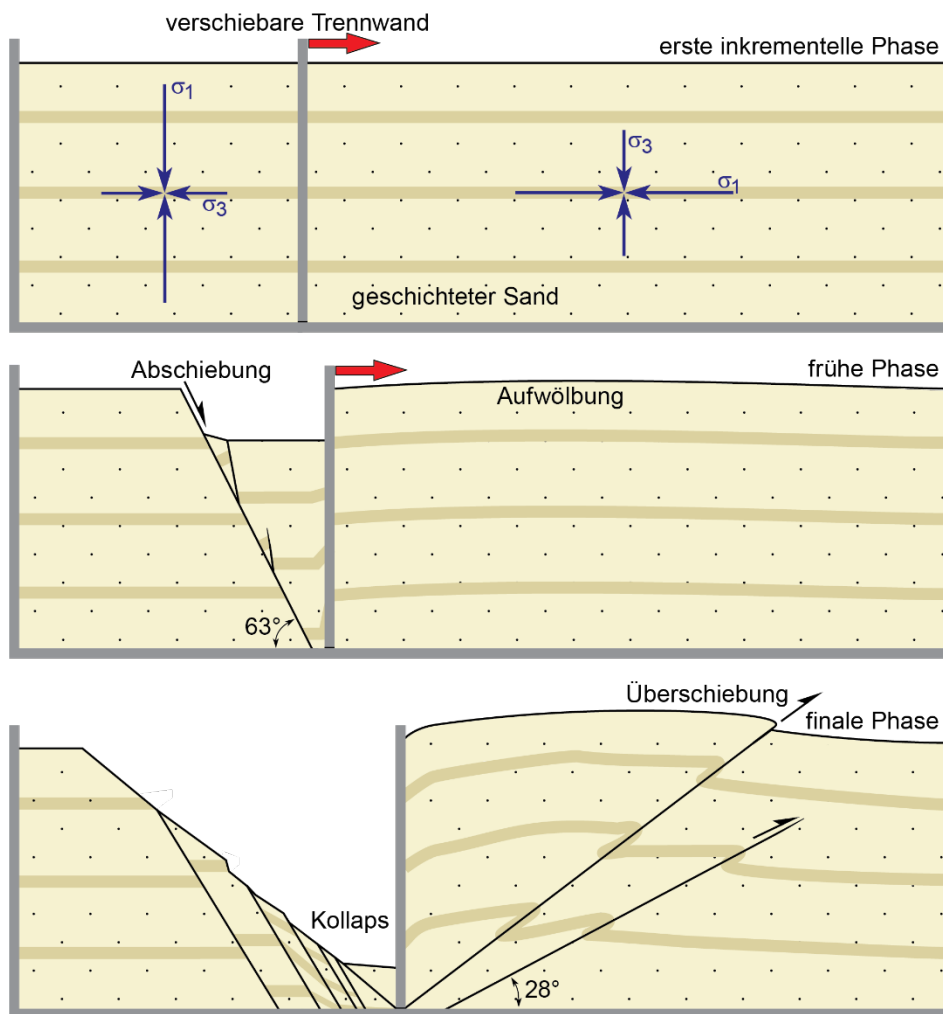
Experimentelle Verwerfungsbildung im Sand

Bereits sehr früh haben Studenten im mechanischen Gesteinsverhalten beobachtet, dass trockener Sand Verwerfungsstrukturen aufweist, die den Strukturen im Gestein ähneln. Tatsächlich wurde empirisch bestätigt, dass trockener Sand dem Kriterium des Coulomb'schen Verhaltens entspricht, mit einem gesteinsähnlichen internen Reibungswinkel ($30\text{--}40^\circ$, abhängig von der Packungsdichte) und einer Kohäsion von ca. 100 Pa. Folglich ist trockener Sand eine ausgezeichnete Analogie für die Simulation spröder Deformationen 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 war, die sich entlang der langen Achse des Kastens parallel verschieben ließen. Der Kasten wurde mit losem Gipspulver in unterschiedlichen Farben gefüllt, damit Schichten und horizontale Markierungen besser sichtbar wurden. Wenn die Abtrennung rechts (mit einer Schraube) verschoben wird, wird das linke seitliche Fach verlängert, während das rechte seitliche Fach um denselben 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 erkennen. Wird die Abtrennung weiter verschoben, treten in der verkürzten Seite Aufschiebungen auf, die mit 25-30° einfallen. Diese tauchen in dieselbe 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 derer makroskopisch sichtbare Verschiebungen stattgefunden haben. Spiegelharnische, Rutschharnische und Rillen, die durch Oberflächenrauigkeit (Unebenheiten) entstehen, dienen dazu, 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 der grössten Scherspannung. Dies liegt daran, dass ein lithologieabhängiger Reibungsfaktor die Bildung der Verwerfungsebene

beeinflusst. Hohe Porenflüssigkeitsdrücke können Bruchbildung einleiten, bei der unter trockenen Bedingungen kein mechanischer Zustandswandel auftritt.

Hauptverwerfungen bestehen aus einem zentralen Kern und einer umhüllenden Beschädigungszone. Verwerfungen entstehen unter spröden Bedingungen und stellen plötzliche Versetzungsereignisse dar, die mit Erdbeben in Zusammenhang stehen. Sie bilden sich aus kleinen Scherbrüchen, die sich fortpflanzen, miteinander zusammenwirken, sich verbinden, um schlussendlich grössere Verwerfungen zu bilden. Ihre Gesamtbewegung ergibt sich 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.