

Grundlagen der Tektonik mit Beispielen von der Gamsalp

Viele Höhlen auf der Gamsalp sitzen Klüften auf. Wir sprechen dann von Kluffugenhöhlen, erweiterten Karstspalten, mitunter auch von Verwerfungen. Alle diese Begriffe, die in der Speläologie eher ‚intuitiv‘ benutzt werden, sind in der Tektonik genau definiert. Der folgende Beitrag soll einen Überblick über die verschiedenen Typen tektonischer Brüche geben und damit helfen, beobachtbare tektonische Strukturen in Höhlen zu erkennen und richtig zu deuten.

 Arnfried Becker

Einleitung

Die **Tektonik** ist die Lehre von der Struktur der Erdkruste und den verursachenden Kräften aus dem Erdinneren. Allgemein wird unterschieden zwischen der **Bruchtektonik**, die sich auf Zerbrechungserscheinungen bezieht, und der **Faltentektonik**, die sich mit den verschiedenen Bauformen tektonischer Falten und Decken befasst (Murawski & Meyer 2004). Da Falten und Decken im Gebiet der Gamsalp kaum oder gar nicht in Erscheinung treten, werden wir uns im Folgenden auf die Erscheinungsformen der Bruchtektonik konzentrieren.

Messungsmethodik

Diejenigen Geologen, die sich vor allem mit der Tektonik befassen, nennen sich **Tektoniker** oder **Strukturgeologen**.

Ihr wichtigstes Arbeitsgerät ist nicht der Geologen-Hammer, sondern der **Geologen-Kompass** (Abb. 1). Mit ihm wird die räumliche Orientierung geologischer Flächen eingemessen. Üblicherweise wird die Raumorientierung durch die Streichrichtung, den Fallwinkel und die Fallrichtung angegeben (Abb. 2).

Die Streichrichtung oder das **Streichen** einer Fläche ist der Winkel zwischen der Nordrichtung und einer gedachten horizontalen Linie auf der einzumessenden geologischen Fläche (Abb. 2). Dieser Winkel, **Azimut** genannt, wird im Uhrzeigersinn von Nord (N) über Ost (E) gemessen und wird nur zwischen 0 und 180° angegeben. Der Fallwinkel, auch das Einfallen oder **Fallen** genannt, ist der grösste Winkel zwischen der gedachten Horizontalebene,

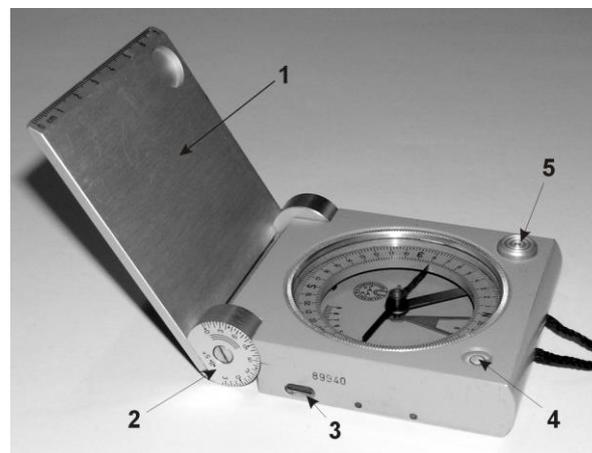


Abb. 1 Gefüge-Kompass nach CLAR mit Anlegeplatte (1) und Höhenkreis (2) zum Messen des Fallwinkels, Röhrenlibelle (3), Dosenlibelle (4) sowie Arretiertaste (5).

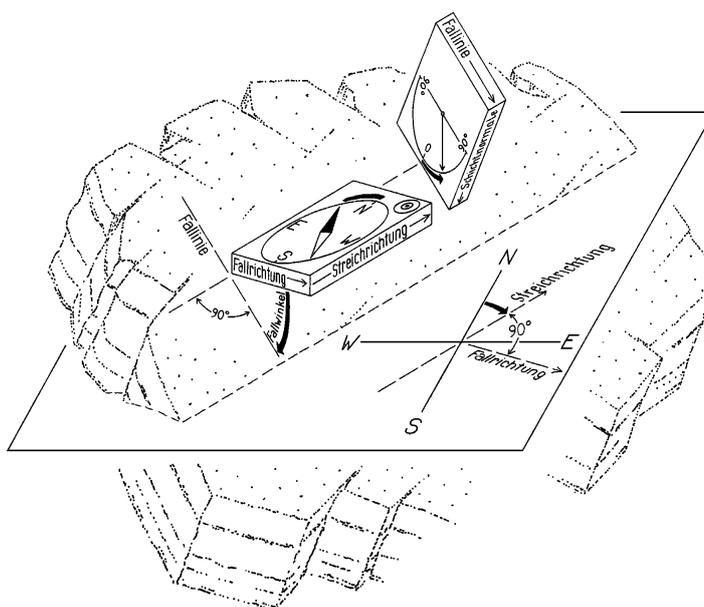


Abb. 2 Einmessen geologischer Flächen mit dem Geologen-Kompass und Zusammenhang zwischen Streichrichtung, Fallrichtung und Fallwinkel (aus Brinkmann 1972).

die durch die Streichlinie geht, und der geologischen Fläche. Der grösste Fallwinkel wird genau senkrecht zur Streichrichtung in Richtung der so genannten Falllinie gemessen (Abb. 2). Das Fallen wird von der Horizontalen aus gemessen. Eine horizontale Fläche hat somit einen Fallwinkel von 0°, eine senkrechte von 90°.

Zusätzlich zum Streichen und Fallen muss noch die **Fallrichtung** angegeben werden. Da die Falllinie genau senkrecht zum Streichen steht, ist eine Angabe wie W, S, E oder N völlig ausreichend. Eine vollständige Angabe für die räumliche Orientierung einer geologischen Fläche könnte beispielsweise folgendermassen lauten:

120/50W

D.h., die Fläche streicht mit 120° und fällt mit 50° in Richtung 210° ($= 120^\circ + 90^\circ$) in westlicher Richtung ein. Mit der Angabe „W“ im Messwert wird die alternative Fallrichtung ($120^\circ - 90^\circ$) ausgeschlossen.

Die räumliche Orientierung geologischer Flächen wird meistens mit einem **Gefügekompas** nach CLAR (Abb. 1) eingemessen. Dieser Geologenkompass besitzt eine Anlegeplatte, die auf die einzumessende Fläche gelegt wird und mit einer „Libelle“ horizontal gestellt wird. Damit können **Fallrichtung** und **Fallwinkel** in einem Arbeitsgang bestimmt werden. Der im Uhrzeigersinn gemessene Azimut der Fallrichtung wird zwischen 0° und 360° angegeben, der Fallwinkel zwischen 0 und 90° . Eine weitere Angabe zur Fallrichtung ist überflüssig. Im oben erwähnten Beispiel wäre der Messwert mit einem Gefügekompas **210/50**, d.h. die Fläche fällt in Richtung 210° mit 50° ein.

Das besondere Kennzeichen eines **Geologen-Kompasses** ist, dass **W** und **E** auf dem Kompass-Teilkreis **vertauscht** sind. Den Grund zeigt Abb. 3, in der die schwarze Linie eine vertikal stehende Fläche (Fallwinkel = 90°) markieren soll, die NE-SW (45°) streicht.

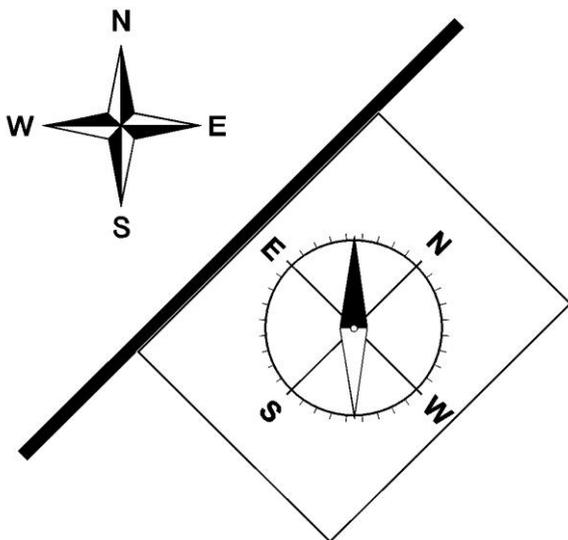


Abb. 3 45° streichende, vertikale Fläche (schwarze Linie) mit angelegtem Geologen-Kompas. Zur erleichterten Ableseung der Streichrichtung sind beim Geologen-Kompas E und W vertauscht.

Am Kompass wird der Azimut auf dem Kompass-Teilkreis dort abgelesen, wo die (schwarze) magnetische Nordnadel steht. Wären E und W auf dem Geologenkompass-Teilkreis nicht vertauscht, würde das Streichen mit NW-SE abgelesen werden, was offensichtlich falsch ist. Das Vertauschen von W und E ist eine Messhilfe, die die Einmessung geologischer Flächen erleichtert.

Bruchstrukturen

Die tektonischen Bruchstrukturen können anhand der Relativbewegungen an den Bruchflächen in Ab-, Auf- und Seitenverschiebungen unterteilt werden.

Abschiebungen, auch **Verwerfungen** genannt, sind relativ steile Bruchflächen mit Einfallswinkeln häufig zwischen 50 und 70° (Abb. 4). Dabei bewegt sich die Bruchscholle, die auf der Bruchfläche liegt, in Richtung der Falllinie nach unten. Damit diese Hangende Scholle¹ überhaupt absinken kann, muss die Erdkruste gedehnt werden. Abschiebungen sind daher Extensions- oder Dehnungsstrukturen. Ein gutes Beispiel dafür ist ein tektonischer **Graben**. Haben zwei benachbarte Abschiebungen angenähert gleiches Streichen, die Bruchflächen aber gegenläufiges Einfallen, dann entsteht ein Keil zwischen den beiden Bruchflächen, der sich absenkt. Diese Senke wird Graben genannt (Abb. 4). Ein bekanntes Beispiel für einen Graben ist der Oberrheingraben, der sich vom Jura- und südlich von Basel bis in die Gegend von Frankfurt/M über 320 km Länge erstreckt und durchschnittlich 35 km breit ist. Die Hochgebiete beidseits des Grabens werden als Grabenschultern bezeichnet. Im Falle zweier parallel streichender Gräben wird das dazwischen liegende Hochgebiet **Horst** genannt.

Verschieben sich die Schollen horizontal entlang der Bruchfläche, dann wird von einer **Horizontalverschiebung** gesprochen, was gleichbedeutend mit Seiten-, Lateral- oder Blattverschiebung ist (Abb. 4). Horizontalverschiebungen gehören in die Gruppe der translozierenden Strukturen, entlang denen benachbarte Punkte auf den angrenzenden Bruchschollen relativ gegeneinander horizontal verschoben werden. Die Bruchfläche steht senkrecht oder hat ein sehr steiles Einfallen ($70 - 90^\circ$).

¹ Man spricht von der „Hangenden Scholle“ im Gegensatz zur „Liegenden Scholle“, kurz auch Hangendes bzw. Liegendes genannt.

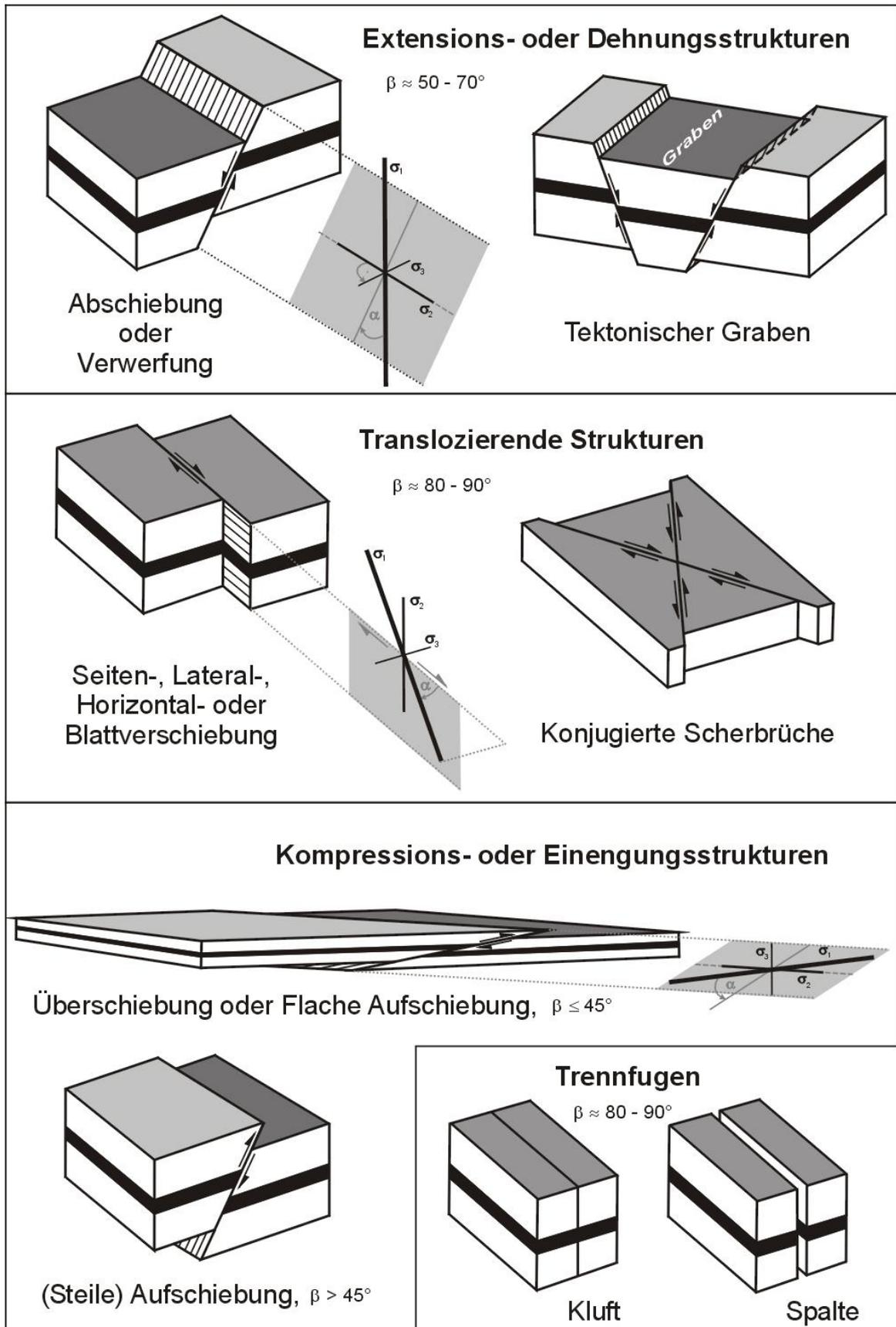


Abb. 4 Tektonische Brüche und ihre Beziehung zum tektonischen Spannungsfeld. β gibt den Bereich typischer Einfallswinkel für die Bruchflächen der unterschiedlichen tektonischen Brüche an, α ist der Winkel zwischen der Bruchfläche und der Richtung der grössten tektonischen Hauptspannung σ_1 . α nimmt typischerweise Werte von $30^\circ \pm 10^\circ$ an.

Steht man auf einer Scholle und schaut von dort auf die gegenüberliegende Scholle, so spricht man von **sinistralen** oder linkshändigen Horizontalverschiebungen, wenn sich die gegenüberliegende Scholle relativ zum Betrachter nach links bewegt, andernfalls von einer **dextralen** oder rechtshändigen Horizontalverschiebung. Das Blockbild in der Abb. 4 – Mitte links – zeigt somit eine dextrale Horizontalverschiebung.

Zu den Kompressions- bzw. Einengungsstrukturen gehören **Auf-** und **Überschiebungen**, die Ausdruck einer Erdkrustenverkürzung sind. Eine Aufschiebungsfläche hat eine Neigung $>45^\circ$, eine Überschiebungsfläche $<45^\circ$.

In einer tektonischen Kollisionszone wie den Alpen spielen Aufschiebungen und vor allem Überschiebungen (Abb. 5) eine sehr wichtige Rolle.

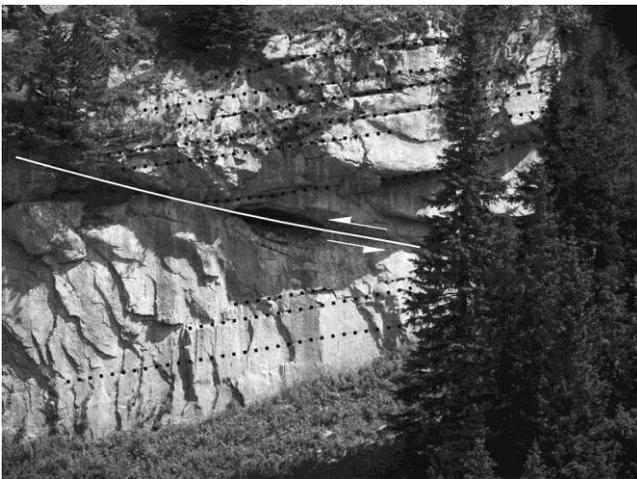


Abb. 5 Überschiebung im Schrattekalk am Westabbruch des Seichbergs.

Schichtung: schwarze Punktlinien, Überschiebung: weisse Linie mit Angabe des Bewegungssinns.

Entlang der Überschiebungsfläche haben sich mehrere Höhlengänge mit phreatischen Profilen gebildet.

Decken-Überschiebungen, kurz **Decken** genannt, können ganz aussergewöhnliche Überschiebungsbeträge erreichen, mitunter mehr als 100 km. Über die riesigen Dimensionen, die Decken erreichen können, gibt uns die Gamsalp eine Vorstellung. Obgleich dieses Gebiet mit seinen flach nach Norden einfallenden Schichten geologisch relativ einfach gebaut ist, ist es ein Teil der Säntis-Decke, die an der Basis abgeschert und in nördlicher Richtung verschoben wurde. In unserem Arbeitsgebiet sieht man davon aber nichts!

Eine Sonderstellung unter den tektonischen Bruchstrukturen nehmen die Trennfugen ein. Zu ihnen

gehören Klüfte und Spalten. Beide Strukturen zeigen ein steiles Einfallen ($80-90^\circ$).

Eine **Kluft** ist eine Bruchfläche ohne erkennbare Relativverschiebung (Abb. 4). Klüfte sind in den meisten Hartgesteinen allgegenwärtig.

Eine **Spalte** geht beispielsweise aus einer Kluft hervor, die sich senkrecht zum Streichen mechanisch (also nicht korrosiv, d.h. nicht durch Lösung des Kalksteins) geöffnet hat. Sie kann nachträglich mit Sediment oder durch Mineralneubildungen verfüllt werden. Spalten stehen oft mit Hangbewegungen im Fels im Zusammenhang. In unserem Arbeitsgebiet sind Spalten mit Öffnungsbeträgen von über 1 m auf dem Garschella-Sattel nicht selten (Becker 2004). Sie führen dort zu einer blockartigen Zerlegung besonders der oberen Garschella-Formation (Aubrig-Schichten).

Eine Besonderheit unter den Spalten sind die **Fiederspalten** (Abb. 6). Sie bilden immer ein System einer in Reihe, schräg hintereinander, staffelförmig oder *en échelon* angeordneter, kurzer Brüche. Im mittleren Teil ist ihre Öffnungsweite am grössten. Sie nimmt zu den Rändern ab, oft unter gleichzeitiger Änderung der Streichrichtung in eine Richtung angenähert parallel zu der allgemeinen Richtung, in der die Fiederspalten *en échelon* angeordnet sind.

Fiederspalten kommen in allen Grössen vor. Auf der Gamsalp sind sie vor allem im Schrattekalk als mit grobkörnigem Calcit verheilte Spaltensysteme von einigen Zentimetern bis zu wenigen Dezimetern Länge zu sehen (Abb. 6).

Fiederspalten können aber auch beträchtliche Dimensionen erreichen, bis zu mehreren km Länge und mehreren 100 m Breite. Auf dem Gamserrugg (Abb. 7) sind auf einem Luftbild Fiederspalten entlang einer sinistralen Horizontalverschiebung zu sehen, die ungefähr 100 m lang sind und Öffnungsbeträge von ca. 10 m aufweisen. Da sich in dieser Senke Schnee auch im Sommer erhält, sind sie auf dem Luftbild gut erkennbar (Abb. 7).

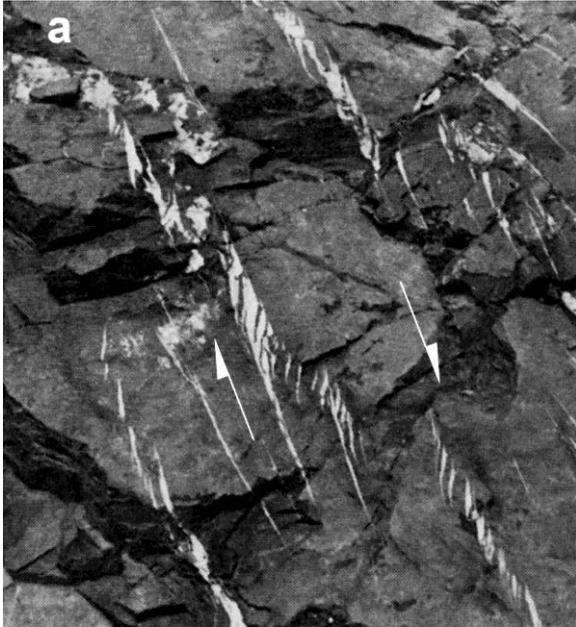


Abb. 6 Mit Calcit verheilte Fiederspalten, (a) bei dextraler Scherung (nach Brinkmann 1972), (b) bei sinistraler Scherung. Der spitze Winkel zeigt gegen die Scherrichtung (Foto: H. Ita).
In (b) sind die Fiederspalten, die mit grobkörnigem Calcit verheilt sind, korrosiv herausgewittert [Höhle O 72].

Fiederspalten treten an der Grenze zweier gegeneinander verschobener Gesteinsschollen auf. Sie können also im Zusammenhang mit Ab-, Auf-, und Überschiebungen sowie Horizontalverschiebungen entstehen. Voraussetzung ist aber, dass die Verschiebungsbeträge klein sind. Bei grossen Verschiebungen wird sich eine diskrete Bruchfläche ausbilden, die die Fiederspalten parallel zu ihrer generellen staffelförmigen Anordnung schräg durchschlägt. Aus der Anordnung der Fiederspalten kann auf den Schersinn geschlossen werden: Der spitze Winkel zeigt immer in Richtung gegen den Schersinn (Abb. 6 b). So ist der Schersinn in Abb. 6 a dextral, in Abb. 6 b und Abb. 7 aber sinistral.

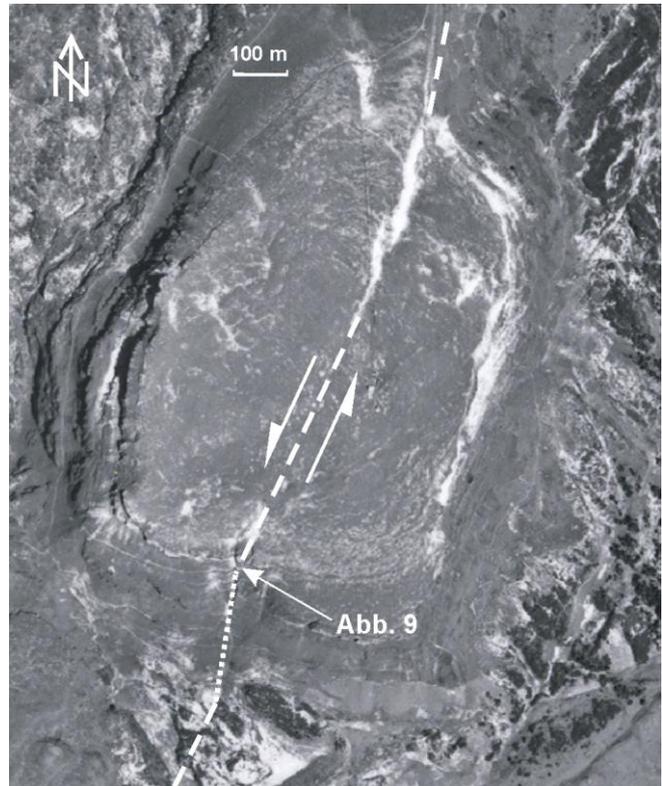


Abb. 7 Sinistrale Horizontalverschiebung mit schneegefüllten Fiederspalten im Norden des Gamserruggs. Die Beobachtungen von Abb. 9 stammen vom Süden des Gamserruggs, wo ein Aufschluss die Bruchzone zeigt.

Gebirgsdruck

Alle tektonischen Brüche hängen mit dem **Gebirgsdruck** zusammen, d.h. den tektonischen **Spannungen**.² Sie sind Ausdruck des Überschreitens der Festigkeit – fast immer der Scherfestigkeit – des Gesteins.

Beim Überschreiten der Scherfestigkeit steht die Bruchfläche meistens in einem Winkel von 30° ($\pm 10^\circ$) zur Richtung der grössten Hauptspannung (σ_1). Ausserdem bewegen sich die Bruchschollen in die Richtung des kleinsten Widerstandes, d.h. in Richtung der kleinsten Hauptspannung (σ_3). Damit kann die Orientierung des tektonischen Spannungsfeldes zum Zeitpunkt der Entstehung der Brüche bestimmt werden („Anderson-Prinzip“).

Für eine Abschiebung gilt, dass σ_1 vertikal, σ_2 parallel und σ_3 senkrecht zum Streichen der Abschiebungsfläche steht (Abb. 4 oben). Die Orientierung des Spannungsfeldes bestimmt somit die Orientierung, d.h. die Streichrichtung der Struktur. Bei gleichem Streichen sind aber immer noch zwei unterschiedliche, entgegengesetzte, aber gleichwertige Einfallrichtungen möglich, in denen der Einfallswinkel einen Winkel von ungefähr 30° zur Richtung von σ_1 einschliesst. Das ist der Grund, weshalb sich ein Graben ausbilden kann (Abb. 4, rechts oben): Ein Erdkrusten-Segment senkt sich entlang parallel streichender, aber gegenläufig einfallender Abschiebungen keilförmig ab.

Solche konjugierten Brüche, die sich im gleichen Spannungsfeld mit verschiedenen Raumorientierungen ausbilden, gibt es auch für Horizontalverschiebung und Überschiebungen. In beiden Fällen wirkt die grösste Kraft σ_1 in horizontaler Richtung.

Im Fall von Horizontalverschiebungen nimmt die grösste horizontale Hauptspannung σ_1 einen Winkel von ca. 30° zur Bruchfläche ein. σ_2 steht vertikal und die kleinste Spannung σ_3 senkrecht auf der σ_1 - σ_2 -Ebene. In Bezug auf σ_1 können sich wiederum zwei gleichwertige, vertikale Scherbruchflächen ausbilden, die einen Winkel von ungefähr 30° mit der σ_1 -Richtung einschliessen. Diese beiden **konjugierten Scherbrüche** (Abb. 4 Mitte rechts) werden sich also um ca. 60° ($\pm 20^\circ$) in ihren Streichrichtungen unterscheiden.

Bei einer Überschiebung (Abb.4, zweit-unterst) ist σ_1 auch horizontal orientiert, steht senkrecht zum Streichen und nimmt einen Winkel von ca. 30° mit der Überschiebungsfläche ein. Im Gegensatz zur Horizontalverschiebung wirkt die kleinste

Spannung σ_3 in vertikaler Richtung und σ_2 ist parallel zum Streichen der Überschiebungsfläche orientiert. Auch hier gibt es konjugierte Brüche, wobei von einer Überschiebung und einer Rücküberschiebung gesprochen wird.

Bei einer Aufschiebung sind die Orientierungen der Hauptspannungen in Bezug auf die Raumlage der Bruchfläche im Prinzip gleich wie bei einer Überschiebung, allerdings mit dem Unterschied, dass σ_1 und σ_3 nicht horizontal bzw. vertikal orientiert sind, sondern geneigt. Bei einer mit 60° einfallenden Bruchfläche sollte σ_1 um ungefähr 30° geneigt sein und σ_3 senkrecht dazu stehen. Bei Klüften steht σ_3 zwar senkrecht zur Klufffläche, σ_1 und σ_2 können aber nicht genauer festgelegt werden, als dass sie in der Ebene der Klufffläche liegen.

Bewegungsspuren

Die meisten tektonischen Brüche sind alt, oft sogar sehr alt (mehrere 10 Millionen bis wenige 100 Millionen Jahre), d.h. sie haben eine ‚Vorgeschichte‘. Was wir heute sehen, ist das Resultat der Entstehung einer Struktur und ihrer Reaktion auf eine sich ändernde tektonische Umgebung, ausgedrückt in der zeitlichen Variation des tektonischen Spannungsfeldes.

Wir müssen also damit rechnen, dass eine Struktur in ihrer Geschichte mehrmals aktiv war, teilweise in einer Art und Weise, die nicht voll im Einklang steht mit der aus der Geometrie der Bruchfläche erwarteten Verschiebung. So kann beispielsweise eine Abschiebung zu einem späteren Zeitpunkt als Horizontalverschiebung aktiviert werden.

Überhaupt gibt es zwischen den verschiedenen Bruchtypen (Abb. 4) alle möglichen Übergänge: Schräg-Aufschiebung, Schräg-Abschiebung, Horizontalverschiebung mit Abschiebungskomponente etc. Für eine Interpretation ist es deshalb unerlässlich, im Gelände direkte Hinweise auf die Bewegungen an einer Bruchfläche zu erhalten.

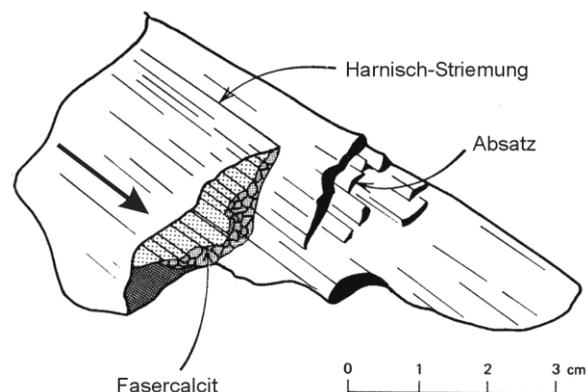


Abb. 8 Harnisch-Striemung und Fasercalcit auf einer Scherfläche (modifiziert nach Hobbs et al. 1976).

² Die „Spannung“ ist eine Kraft, die auf eine Fläche bestimmter Grösse (1 cm², 1 m², etc.) einwirkt. Sie wird durch 3, im Raum senkrecht aufeinander stehender Komponenten beschrieben, wobei σ_1 die grösste und σ_3 die kleinste Hauptspannung ist.

Solche Bewegungsspuren nennt man **Harnische** (Abb. 8). Das sind parallele Striemen auf der Bruchfläche, die dadurch entstanden sind, dass härtere Gesteinskomponenten auf der Bruchfläche eine Kratzspur in Richtung der Verschiebung hinterlassen haben. Oft kommen zusammen mit den Harnischen kleine Absätze auf den Bruchflächen vor. Hier ist infolge der Bewegungen auf der Bruchfläche ein Teil des Nebengesteins ausgebrochen. Diese Absätze sind meistens angenähert senkrecht zur Bewegungsrichtung orientiert. Bei andauernder Bewegung öffnet sich hinter dem Absatz ein Hohlraum, der aber mit der gleichen Rate, wie er sich öffnet, wieder mit Calcit verheilt wird. Dieser **Fasercalcit** (Abb. 8) ist auf frischen Bruchflächen oft zu sehen. Die Stufe (Absatz), die der Fasercalcit auf einer Seite bildet, weist in die Bewegungsrichtung der abgetragenen Gesteinsscholle. Vorsicht: Wenn kein Fasercalcit vorhanden ist, sondern nur kleine Absätze im Fels der Bruchfläche zu sehen sind, ist die Bewegungsrichtung meistens gegensinnig.

Ein schönes Beispiel für einen Harnisch findet sich direkt am Wanderweg am Südrand des Gamserruggs in Verlängerung des in Abb. 7 gezeigten Bruches (Abb. 9). Die Bruchfläche streicht ungefähr N-S ($176 - 188^\circ$) und fällt mit $76 - 81^\circ$ steil nach E ein (im Mittel 002/79E oder 092/79). Die Harnisch-Striemung fällt mit $16 - 25^\circ$ nach Süden ein. Der Bruch, der sich über den gesamten Gamserrugg zieht (Abb. 7), kann somit als sinistrale Horizontalverschiebung mit geringer Aufschubskomponente (1 - 4 m) beschrieben werden.

Klüfte sind Trennfugen, bei denen das Gestein zerbrochen wurde, ohne dass die Bruchschollen gegeneinander verschoben wurden. Charakteristisch für diese Trennbrüche sind so genannte **Besen-Strukturen** (Abb. 10). Auch diese Strukturen finden wir auf der Gamsalp, besonders in den Sandsteinen der unteren

Garschella-Formation (Abb. 10 b). Sie haben Ähnlichkeit mit einer Feder, wobei vom zentralen Federkiel, der oft in der Mitte einer Gesteinsbank liegt, die Seitenäste spitzwinkelig abzweigen. An dieser Struktur lässt sich sogar ablesen, wie sich der Bruch einmal fortpflanzte: in Abb. 10 b von rechts nach links, d.h. entgegengesetzt zu der Richtung, die durch den spitzen Winkel angezeigt wird, den die Seitenäste bilden. Auch im Kalkstein können auf frischen Bruchflächen solche Besen-Strukturen beobachtet werden.

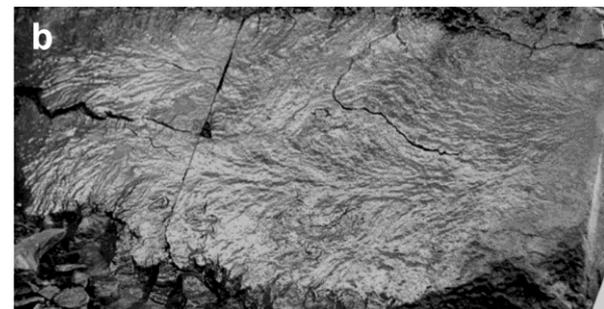
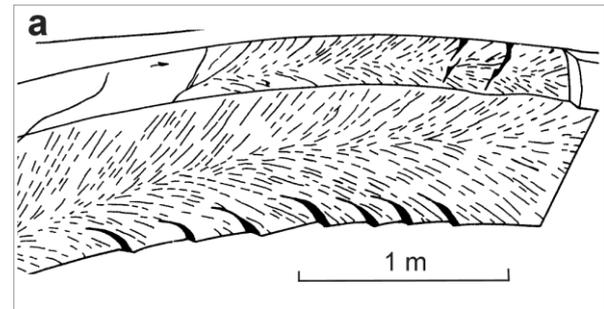


Abb. 10 Besen-Strukturen auf Trennfugen,
 (a) mit Bruchfortpflanzungsrichtung von links nach rechts (modifiziert nach Hobbs et al. 1976),
 (b) in Sandsteinen der unteren Garschella-Formation vom Westrand des Gamserruggs mit Bruchfortpflanzungsrichtung von rechts nach links (Foto: H. Ita).

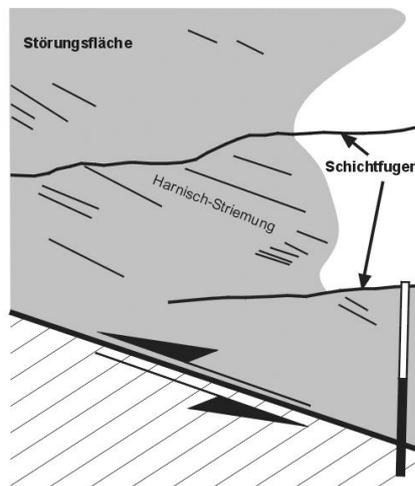


Abb. 9 Bruchfläche (002/79E) mit Harnisch-Striemung (176/20) in horizontal liegendem Seewerkalk am Südrand des Gamserruggs. Die Bruchfläche gehört zu einer sinistralen Schrägaufschubung, die den gesamten Gamserrugg quert (vgl. Abb. 6). Maßstab: 40 cm.

Beispiel O21

Die Korrosion, der wir die interessanten Höhlen auf der Gamsalp verdanken, löscht bereits nach kurzer Zeit die Bewegungsspuren auf den Bruchflächen aus. Ob Besen-Struktur, Harnisch oder Fasercalcit: nach wenigen Jahren sind ihre Spuren verschwunden. Wir müssen deshalb indirekte Hinweise, die sich beispielsweise aus der Schichtenabfolge des Nebengesteins ergeben, in die Interpretation der Bruchstrukturen einbeziehen. Dazu das Beispiel der **Höhlen O21a-d** (Stünzi 1997).

Diese Höhlen sitzen einem Bruch auf: 150/80W bzw. 240/80. Der Bruch fällt sehr steil ein und sollte nach unserem Klassifikationsschema (Abb. 4) am wahrscheinlichsten eine Horizontalverschiebung oder eine Kluft sein. Stünzi (1997) beschreibt aber im Schacht O21C drei Muschelbänke, die jeweils um einen Betrag von 45 cm vertikal versetzt sind, wobei die SSW Muschelbänke relativ zu den NNE gehoben sind (Abb. 11). Mit dieser Beobachtung kann eine Kluft ausgeschlossen werden: definitionsgemäss erfolgen an einer Kluftfläche keine Relativbewegungen. Aber auch eine Abschiebung bzw. Verwerfung kann ausgeschlossen werden: die SSW-Scholle ist auf die steil nach SSW einfallende Bruchfläche aufgeschoben worden, womit Einengung verknüpft ist, nicht Dehnung, wie für eine Abschiebung erforderlich. Kann es eine Aufschiebung sein? Möglich, aber eher unwahrscheinlich bei der Steilheit der Bruchfläche.

Bleiben wir also doch noch einmal bei der ursprünglichen Idee einer Horizontalverschiebung. Ist es möglich, durch die horizontale Verschiebung benachbarter Bruchschollen die Muschelbänke so zu positionieren, dass sie in der SSW-Höhlenwand um 45 cm höher liegen als auf der NNE-Wand? Ja, wenn die Schichten geneigt sind, wie das „Seitenverschiebungsmodell“ in Abb. 11 zeigt. Daraus lässt sich sogar eine Beziehung zwischen dem beobachteten Versatz ($h = 45 \text{ cm}$), dem Horizontalverschiebungsbetrag (d) und dem Schichteinfallen (parallel zur Bruchfläche) (β) ableiten:

$$d = h \cdot \cot \beta$$

Wird also die SSW-Scholle, deren Schichten ein Einfallen von β haben, um den Betrag d nach NW (330°) verschoben, dann kann der beobachtete Vertikalversatz von 45 cm erreicht werden. Das Schichteinfallen liegt im Bereich des O21 bei $5\text{-}10^\circ$ in nördlicher Richtung. Eingesetzt in die obige Gleichung gibt das einen Verschiebungsbetrag von 2.50 m bis maximal 5 m an einer dextralen Horizontalverschiebung.

Die Oberflächenkartierung der Bruchfläche, auf der die Höhle aufsitzt, gibt weitere interessante Informationen (Stünzi 1997): Der Bruch zeigt kleine Absätze (Abb. 11), die bei einer dextralen Scherung entlang der Bruchfläche zu rhombenförmigen, von Bruchflächen begrenzten Senken führen sollten. Das scheint in der Tat zuzutreffen, besonders deutlich zu sehen beim O21A. Nimmt man an, dass diese Rhomboeder-Becken vor der Scherung geschlossen waren, dann lässt sich aus der Öffnungsweite parallel zum Scherbruch der maximale Horizontalverschiebungsbetrag ableiten. Für die verschiedenen Grundrisse aus dem O21A (an der Oberfläche sowie Profil P8 und Grundriss G10) können aus der Publikation von Stünzi (1997) die drei Werte 5, 2 und 3 m abgelesen werden (Abb. 11), mit einem Mittelwert von 3.3 m. Setzt man diese Werte für d in die obige Formel ein, dann ergeben sich Schichteinfallswerte zwischen 5 und 13° , im Mittel bei ungefähr 8° . Dies stimmt gut mit dem für das betreffende Gebiet zu erwartende Schichteinfallen überein.

Die Interpretationen der Muschelbänke und der Grundrisse geben praktisch dasselbe Resultat. Demnach sitzt die Höhle O21 einer dextralen Horizontalverschiebung auf mit einer 150° streichenden und 80° nach W einfallender Bruchfläche und einem Horizontalversatz von ca. 3-4 m.

Schlussbetrachtung

In unserem Arbeitsgebiet sind Klüfte, Spalten, Überschiebungen, Horizontalverschiebungen, Fiederspalten, Harnische und Besen-Strukturen zu sehen. Trotz der guten Aufschlussverhältnisse ist es aber schwer und manchmal sogar für Geologen unmöglich, die tektonischen Strukturen richtig zu interpretieren. Viel wichtiger als eine Interpretation der Strukturen ist daher eine möglichst genaue Beobachtung und eine gute Dokumentation. Mit einer guten Dokumentation kann auch noch zu einem späteren Zeitpunkt versucht werden, die Situation zu interpretieren. Unvollständige Dokumentationen hingegen, womöglich in Verbindung mit falschen Interpretationen, führen meistens zu Informationsverlusten und können zu völlig falschen Schlussfolgerungen in Bezug auf die Tektonik und Speläogenese des betreffenden Gebietes führen!

Falls man also nicht sicher ist, um welche tektonische Struktur es sich handelt, können Bezeichnungen wie „**Bruch**“ oder „**Störung**“ verwendet werden. Diese Bezeichnungen umfassen alle Bruchstrukturen und werden auch von Geologen oft und gerne benutzt – meistens dann, wenn sie nicht mehr weiterwissen.

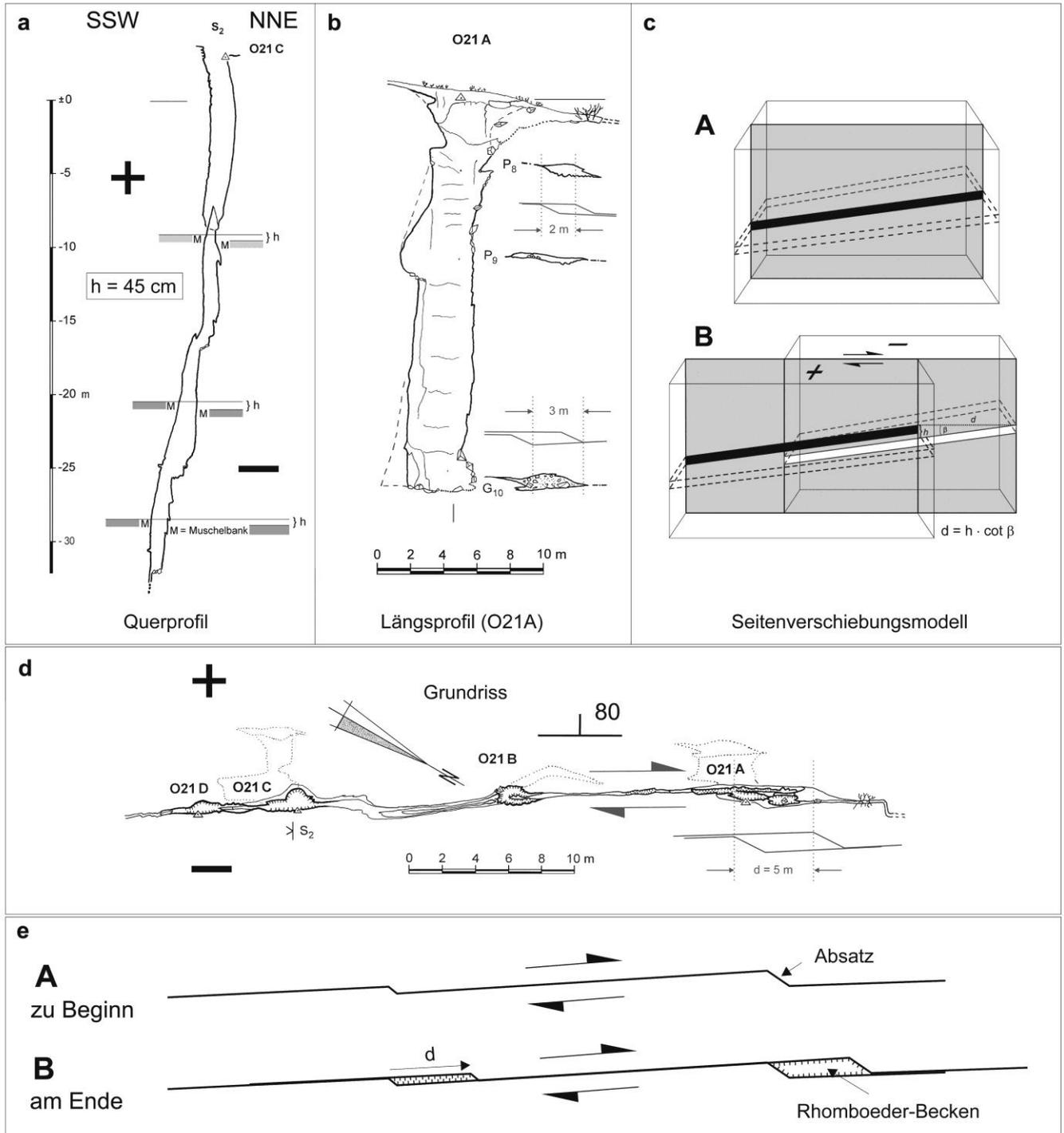


Abb. 11 Höhle O21 mit (a) Querprofil O21C, (b) Längsprofil O21A und (d) Grundriss, modifiziert nach Stünzi (1997), (c) Seitenverschiebungsmodeill im Blockbild und (e) im Grundriss zum Zeitpunkt vor der Seitenverschiebung [A] und danach [B].

Literaturverzeichnis

- Becker, A. (2004): Die Seen auf dem Garschella-Sattel.- AGS Info, **2/04**: 49-52.
 Brinkmann, R. (1972): Lehrbuch der Allgemeinen Geologie, Bd. 2: Tektonik.- 579 S., Stuttgart (Enke).
 Hobbs, B.E.; Means, W.D. & Williams, P.F. (1976): An outline of structural geology.- 571 S., New York (Wiley).
 Murawski, H. & Meyer, W. (2004): Geologisches Wörterbuch.- 11. Aufl., 262 S., Heidelberg (Akad. Verlag).
 Stünzi, H. (1997): Das Gamsalp-Forschungsgebiet: Churfürsten-Zone O.- AGS Info, **2/97**: 35-44.