

## **Klüfte und Deformationsstrukturen in jungpleistozänen Beckensedimenten des Rißtales, Bayern**

Daniel Costantini und Hugo Ortner

Institut für Geologie, Universität Innsbruck,  
Innrain 52, 6020 Innsbruck

### **Kurzfassung**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im bayrisch-tirolerischen Rißtal im nördlichen Karwendelgebirge. Es umfasst größtenteils quartäre Ablagerungen, wie Kiese, Sande und Schluffe, die entlang des Rißbaches aufgeschlossen sind. Die Prozesse, die zum heutigen Erscheinungsbild führten, fanden im Zuge der Würm-Vergletscherung statt. Insbesondere die neueren Untersuchungen lieferten den Beweis für die zeitweise Aufstauung des Rißbaches zu einem fjordähnlichen See und einer anschließenden Überfahung durch den Gletscher. Kompaktierte Kies-Sand-Gemische mit geknackten Geröllen sind Zeugen dieser Deformationsprozesse. Massiger, toniger Schluff ist durch systematisches Auftreten von vertikalen und horizontalen Klüften charakterisiert. Eine Kartierung im Maßstab 1:8000 sowie eine Analyse der Klüfte in Bezug auf konchoidale Oberflächenstrukturen wie Rippenmarken und radiale Streifung deutet vorwiegend auf die Anwesenheit von Extensionsklüften mit einer starken Prävalenz in Richtung W-E hin. Die Orientierungsanalyse der Klüfte zeigte sechs Klüftscharen, die je nach Messzone Extensions- und/oder hybride Klüfte sind. Die meisten vertikalen Klüfte stehen mehr oder weniger normal zur jeweiligen Aufschlussoberfläche im gewundenen Bachbett des Rißbaches. Eine Überschneidungsmatrix zur relativen Altersbestimmung der Klüfte zeigt, dass diese Klüfte der ältesten Generation angehören. In einer genetischen Interpretation werden diese als Schrumpfungsrisse gesehen, die normal zu Aufschlussoberfläche orientiert sind. Jüngere, subhorizontale Klüfte sind vermutlich Entlastungsklüften subparallel zur Landoberfläche. Für die relativ jüngste Klüftchar wird eine Entstehung als Folge von regionalen neotektonischen Spannungsfeldern vermutet, da sie unabhängig von den Aufschlussoberflächen ist, und parallel zu den Brüchen in geknackten Klasten in Schottern.

### **Abstract**

The area of investigation is located in the Riß valley of Bavaria, in the northern Karwendel Mountains. It includes mainly Quaternary deposit, including gravel, sand, and clayey silt, which are exposed along the Riß river. The processes which led to the present appearance are a result of the last glacial period (Würmian). Recent investigations confirmed that the sediments of the Riß valley formed in a fjord-like lake and where then overrun by the glacier. Overcompacted mixtures of gravel and sand with cracked pebbles are witnesses of this deformation process. Massive clayey silts are characterized by the presence of horizontal and vertical joints. Field mapping at a scale of 1:8000 and an analysis of the joints regarding conchoidal surface structures, like rib marks and plumose structures, mainly indicate the presence of extension joints. Orientation analysis shows six joint sets interpreted as extension- or hybrid joints, whereby the vertical joints are always sub-perpendicular to the surface topography. Relative age dating of the joints shows that the vertical joints are the oldest generation of joints. In a genetic interpretation these joints are related to shrinking processes, causing joints oriented sub-perpendicular to the outcrop surface (oldest joint set). A younger, subhorizontal joint set could be caused by exfoliation parallel to the present-day land surface. The youngest joint set, which is parallel to fractures of cracked pebbles in the gravels and independent of outcrop surfaces, may have formed as a result of neotectonic activity in the area.

## 1. Einleitung

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung von Klüften und Deformationsstrukturen in quartären Sedimenten des Rißtales im Karwendelgebirge in Oberbayern. Die durch den Rißbach anerodierten Sedimente ziehen sich entlang der terrassenförmigen Geländestufen des Rißtales bis zur Flussmündung in die Isar im Norden hin. Quartärgeologische Untersuchungen (Brandstätter, 2006; Büsel, 2008) bestätigten die Theorie der Bildung eines Eisstausees mit resultierender Überflutung des Rißtales vor ungefähr 25.000 Jahren. Während

dieser Periode lagerten sich feinkörnige diamiktische Sedimente ab, die nach Süden mit Kiesen verzahnen. Die gut aufgeschlossenen Diamikte sind von systematischen horizontalen und vertikalen Klüften durchzogen. Diese und weitere Deformationsstrukturen, wie geknackte Klasten, wurden näher untersucht. Die Untersuchung der Kluftmuster und Kluftgenese wurden einer Orientierungsanalyse unterzogen. Die quartären Sedimente, in denen die Klüfte vorkommen wurden im Maßstab 1: 8.000 kartiert.

## 1. Quartärgeologischer Überblick

### 1.1. Das Quartär

Die Sedimente des Rißbaches wurden in der letzten Eiszeit, dem Würm-Glazial abgelagert. Die maximale Eisausdehnung wurde im Zeitraum zwischen 31.000 und 21.000 vor heute erreicht, als die Alpen von einem sehr kalten und trockenem Klima dominiert waren, mit einer Absenkung der mittleren Jahrestemperatur um 10-12°C sowie ein Rückgang des jährlichen Niederschlags um 500-750 mm/a (Frenzel et al., 1992). Mit dem Beginn Spätglazials begann ein rapide einsetzender Eisschwund. Diese Eiszerfallsphase fand etwa vor 21.000 bis 19.000 Jahren statt (Reitner, 2011). Das Abschmelzen des Eises führte in den Tälern durch frei gewordenes Schmelzwasser zu hohen Erosionsraten und zur kurzzeitigen Bildung von Seen. Bis zum Erreichen des heutigen Gletscherniveaus kam es noch zu weiteren Phasen des Eisvorstoßes. Das Vorkommen von Kristallingeschieben im Bereich des Fernpasses und des Seefelder Sattels zeugt vom Vordringen des Inn-gletschers nach Norden. Nördlich des Seefelder Sattels teilte sich das vom Inn-gletscher nach Norden abfließende Eis; ein Teil des Eisstromes floss bei Wallgau nach Osten in das Isartal Richtung Bad Tölz. Aus dem Karwendelgebirge stieß im Hochwürm der Rißgletscher vor. Im nördlichen Teil des Tales zwischen Vorder- und Hinterriß kam es also zum Zusammentreffen zweier Gletscher.

Bevor das Eis seine Maximalmächtigkeit im Hochwürm erreichte, ca. 1700 m in Hinterriß und 1500 m in Vorderriß, kam es im Rißtal zu einer Stausituation. Zu diesen Ergebnissen kommt Brandstätter (2006), die in den Terrassensedimenten des Rißtales präglaziale Deltakörper nachweisen konnte. Die Deltaschotter verzahnen mit feinklastischen Sedimenten, die meist völlig homogen sind und lokal reichlich gekritzte Geschiebe (z.T. *dropstones*) enthalten. Die lokal erhaltenen Sedimentstrukturen, wie Lamination, Rippel- und Wickelschichtung, Rutsch- und Entwässerungsstrukturen, Gradierung und Erosionsrinnen weisen auf Eisstausedimente mit hoher Sedimentationsrate hin. Die in dieser Arbeit untersuchten Klüfte finden sich zum Großteil innerhalb dieser feinklastischen, homogenen Sedimente. Die einzige Ausnahme sind geknackte Gerölle, die in den Deltaschottern auftreten.

### 1.2. Nomenklatur

Die im Arbeitsgebiet vorgefundenen Sedimente sind alle, mit Ausnahme des obertriassischen Hauptdolomits, quartären Ursprungs. Die verschiedenen Abfolgen, welche im Gelände beobachtet wurden und in der geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1: 8000 dargestellt sind, sollen in den Aufschlüssen beschrieben werden.

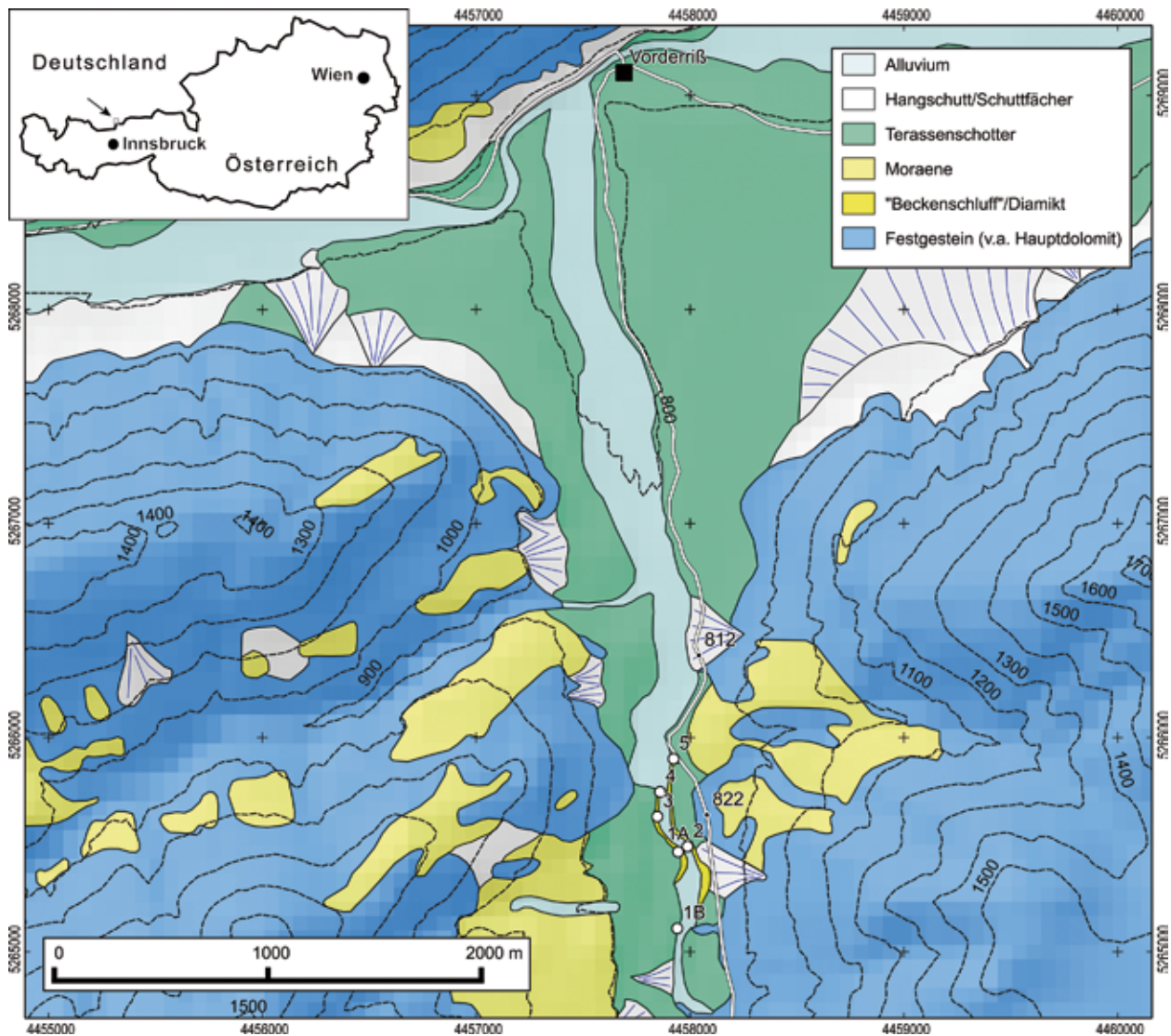


Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets, Geologie nach Doben (1993). Oben links Lage des Untersuchungsgebiets (graues Rechteck markiert durch Pfeil). Koordinatensystem: DHDN, Zone 4.

Die Kurzcharakterisierung der quartären Sedimente wurde mithilfe der Lithofazies-Codes von Keller (1996) näher erläutert. Die Klassifikation erfolgt anhand von drei Unterteilungen, die als Groß- oder Kleinbuchstaben dargestellt werden. Die erste Klassifikation benennt die Korngröße mit Großbuchstaben. Folgende Bezeichnungen werden verwendet: Kies G (angerundet bis gut gerundet), Schutt Sc (eckig bis angerundet), Diamikt D, Kies-Sandgemisch GS (angerundet bis gut gerundet), Sand S, heterolithische Sedimente H (Wechselagerung Ton, Silt und Sand) und Feinsediment F (Ton und Silt). Beim Auftreten größerer Komponenten kommen werden vor

den Großbuchstaben folgende Kleinbuchstaben gesetzt: g für Kies, sc für Steine und b für Blöcke. An dritter Stelle wird die Struktur der Sedimente beschrieben. So werden die Buchstaben m für massiv, l für laminiert, b für geschichtet, g für gradiert, i für invers gradiert, d für deformiert sowie p für planar schräg geschichtet verwendet.

Als Beispiel wird hier ein Profil nahe Aufschluss 2 (siehe unten) angeführt (Abb. 2). An der Basis des Profils liegt eine 30 cm mächtiger massiver matrixgestützter Diamikt (Dmm) mit einigen Klanten. Dieser wird von 30 cm matrixgestütztem Kies (Gms) überlagert; es folgt darüber eine

30 cm mächtige Schicht aus Diamikt (Dmm), eingeschaltet mit einer 20 cm mächtigen Schicht aus matrixgestütztem Kies (Gms). Darauf liegt eine 30 cm mächtige Schicht aus matrixgestütztem Diamikt (Dmm), überlagert von einer 50 cm

mächtigen Schicht aus massivem Sand (Sm), sowie eine 40 cm dicke Schicht aus massiv bis z.T. geschichtetem Kies-Sand-Gemisch (GSm), mit einem gekritzten Geschiebe.

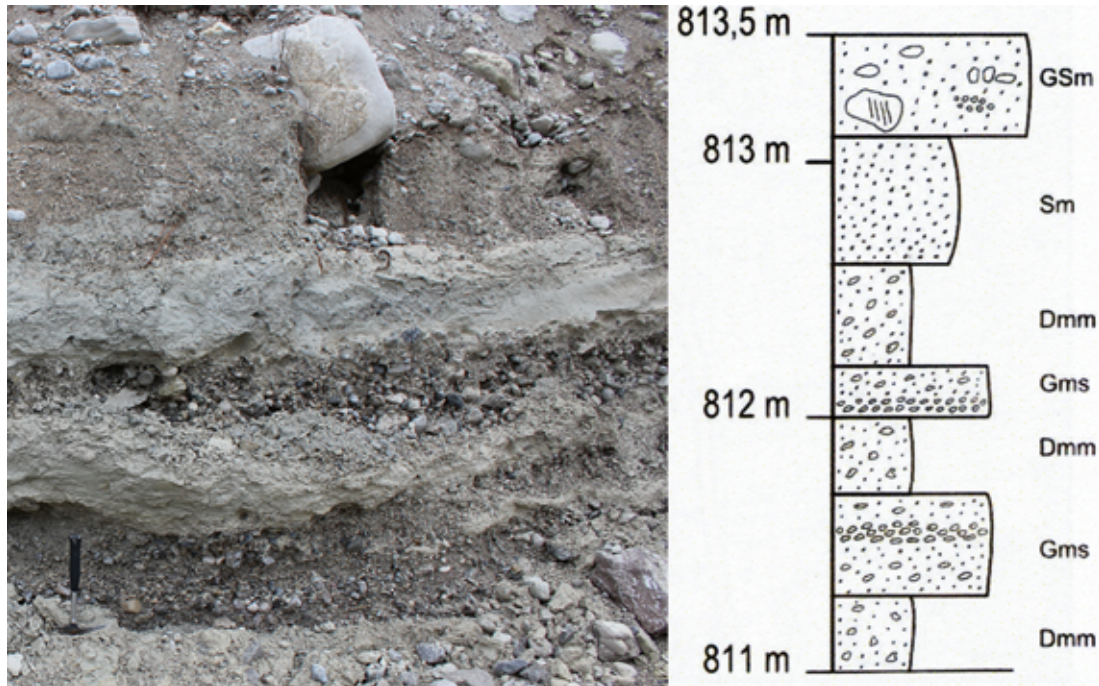


Abb. 2. Foto und Profilaufnahme nach der Nomenklatur von Keller (1996) einer ca. 30 m von Aufschluss 2 entfernten Sedimentabfolge.

## 2. Aufschlussbeschreibung

Alle Aufschlüsse liegen am Rißbach zwischen der Oswald-Hütte im Süden und der Kote 812 auf der Landesstrasse nach Hinterriß (Abb. 3).

### 2.1. Aufschluss 1

#### 2.1.1. Aufschluss 1A

Aufschluss 1A liegt auf der orographisch linken Seite des Rißbaches, direkt südlich an der Brücke Forstweg angrenzend. Der Aufschluss liegt auf einer Höhe von 820 m. Die Gesamtlänge beträgt ca. 40 m, die Höhe im Durchschnitt 2,50 m. Die Abfolge besteht am Top aus unverfestigten, matrixgestützten Blöcken und Kiesen mit einer Mächtigkeit von 1,10 m. Hierbei handelt es sich um fluviatile Ablagerungen, da die Blöcke teilweise

erkennbare Einregelungen zeigen (bGms). Unter einer Diskordanz liegt eine Abfolge aus Diamikt (Dmm), einer schlecht sortierten Kies-Sand-Silt-Mischung. Die ersten 40 cm sind von einem Kies-Sand-Gemisch überdeckt, das von der oberen Schicht erodiert wurde und den Top des Diamikts teilweise bedeckt. Der Diamikt wirkt massig, unsortiert und ungeschichtet (Abb. 4A). Die Abfolge hat eine Mächtigkeit von insgesamt 1,40 m und enthält sowohl gerundete als auch eckige Komponenten und ist mitunter von Sedimentlinsen durchzogen. Gekritzte Geschiebe wurden auch beobachtet. Der Diamikt wird von horizontalen und vertikalen Klüften mit einer Öffnung von 2-5 mm und einem regelmäßigen Abstand von 75-90 cm durchzogen (Abb 4B, C).

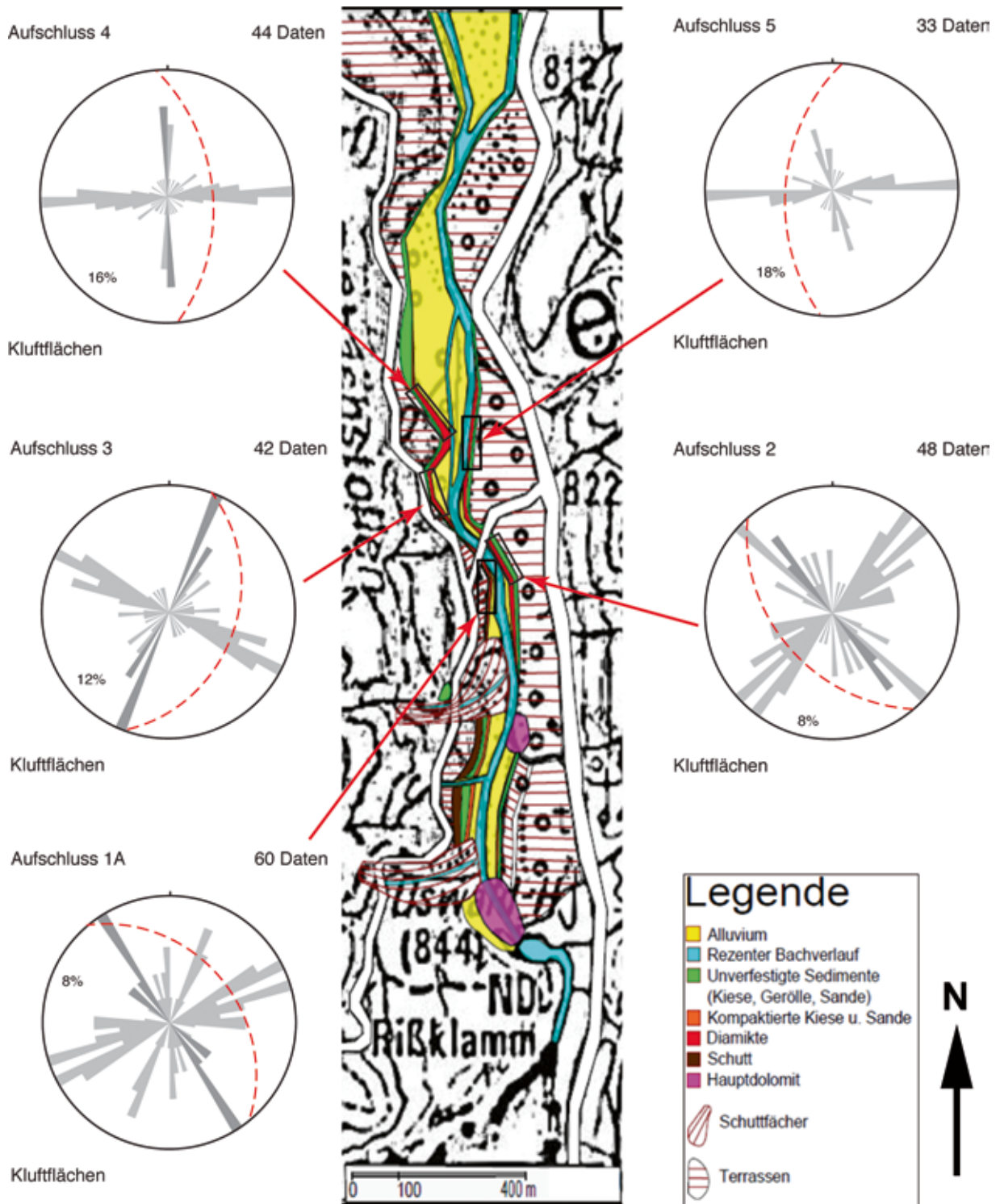


Abb. 3: Detailkarte des untersuchten Gebiets auf Grundlage der Bayerischen Topographischen Karte 1:25.000. Am Rand die Orientierung der gemessenen Klüfte in Rosendiagrammen. Die Orientierung der Klüfte ändert sich mit der Orientierung der Aufschlußoberfläche (roter gestrichelter Großkreis). Hellgraue Balken: subvertikale Klüfte, dunkelgraue Balken: subhorizontale Klüfte.

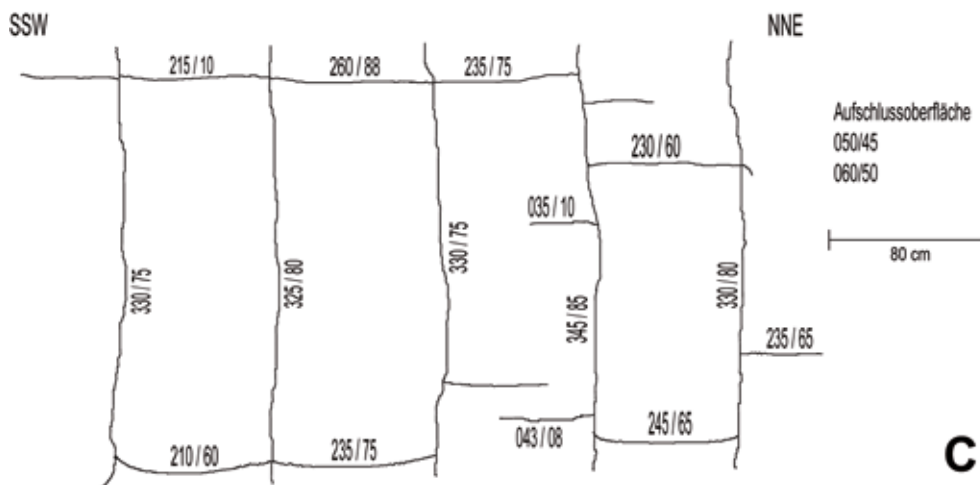


Abb. 4: Klüfte im Aufschluss 1A. A, B: Vertikale Klüfte im regelmäßigen Abstand von 75-90 cm. Die horizontalen Klüfte sind unregelmäßiger, schneiden die vertikalen Klüfte meist im rechten Winkel und verzweigen sich gelegentlich bei Annäherung an die vertikalen Klüfte. C: Schematische Darstellung der Klüfte und der Klüftorientierungen.

### 2.1.2. Aufschluss 1B

Aufschluss 1B liegt 50 m südlich von Aufschluss 1A. Er liegt auf einer Höhe von 820 m, hat eine Gesamtlänge von 50 m und eine Mächtigkeit von 25 m. Es sind hier sehr kompakte, korngestützte Kies-Sand-Gemische (SC) aufgeschlossen. Am Top liegen Hangschuttablagerungen mit einer Mächtigkeit von ca. 4 m. Die Schotter weisen viele geknackte Gerölle auf. Die meisten Brüche sind parallel zueinander orientiert (Abb. 5A). Mehrere Klasten sind so stark durch Brüche zerschlagen, sodass sie in splittrige Plättchen zerfallen (Abb. 5B).

### 2.2. Aufschluss 2

Aufschluss 2 befindet sich gegenüber Aufschluss 1A auf der anderen Bachbettseite, also orographisch rechts an der Forstweg Brücke in südlicher Richtung angrenzend. Er liegt auf einer Höhe von 820 m und hat eine Mächtigkeit von ca. 10 m. Der Aufschluss bildet eine Terrasse in Richtung Osten, die eine Ausdehnung von über 20 m erreicht. Terrassen in dieser Größenskala treten nur bei diesem Aufschluss auf.

Abb. 5:  
Geknackte Klasten im Aufschluss 1B. A: Parallele Brüche in verschiedenen, nicht unmittelbar benachbarten Klasten. B: Rote Pfeile: Mehrfaches Zerbrechen von Klasten, dadurch Entstehen von scharfkantigen Plättchen. Grüner Pfeil: Punktkontakte, von dem die Bruchbildung ausgeht.



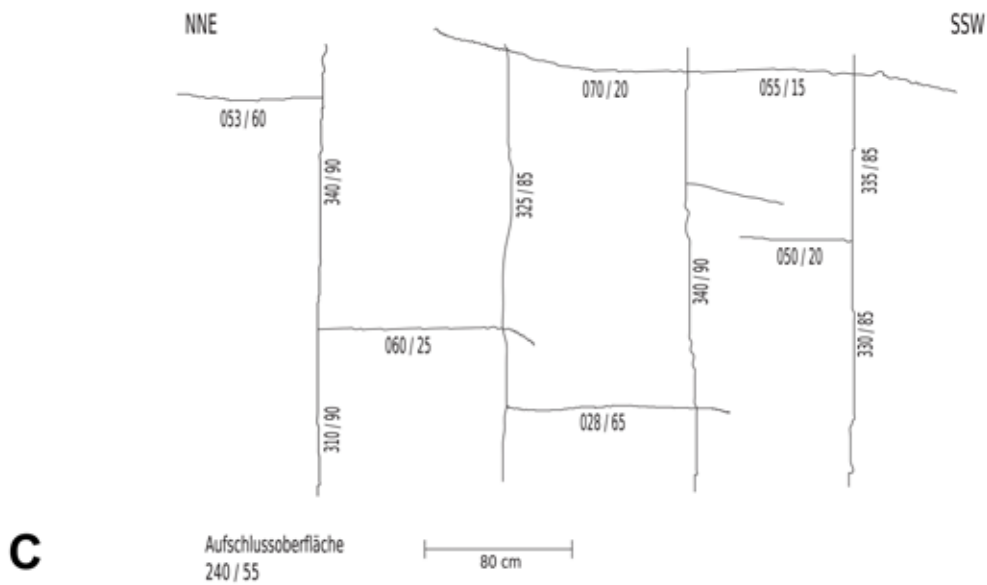
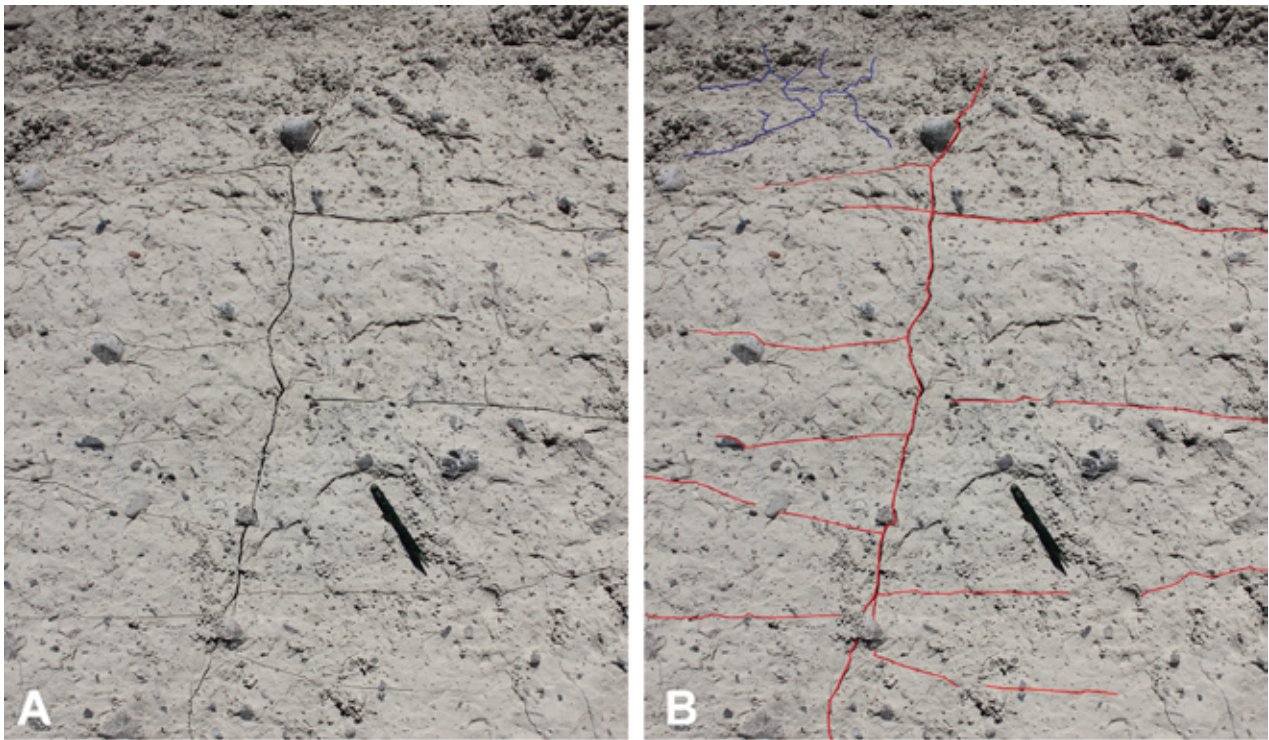


Abb. 6: Klüfte im Aufschluss 2. A, B: Vertikale Kluft und horizontale Klüfte im regelmäßigen Abstand von 10-30 cm. Oben links sind Trockenrisse (blau) erkennbar. Diese unterscheiden sich deutlich von den vertikalen und horizontalen Klüften, nicht zuletzt durch ihre Unregelmäßigkeiten. C: schematische Darstellung der Klüfte und der Kluftorientierungen.



Die Abfolge besteht nur aus Diamikt, also aus einer kompaktierten, schlecht sortierten Kies-Sand-Schlamm-Mischung (Dmm). Sie wird wieder von horizontalen sowie vertikalen Klüften wie bei Aufschluss 1 durchzogen (Abb. 6A&B). Die Messdaten der Klüfte weichen nur geringfügig gegenüber jenen von Aufschluss 1A ab (Abb. 6C). Das regelmäßige Auftreten von orthogonalen Klüften führt am SSW-Ende des Aufschlusses zum Ausbrechen von m-großen quaderförmigen Kluffkörpern (Abb. 7).

### 2.3. Aufschluss 3

Aufschluss 3 befindet sich ca. 50 m hinter der Forstbrücke in Richtung Norden, also auf der orographisch linken Seite des Reißbaches. Er liegt auf einer Höhe von 820 m und hat eine Mächtigkeit von ca. 8 m. Die Abfolge besteht am Top aus unverfestigten, matrixgestützten Blöcken und Kies (bGms) mit einer Mächtigkeit von ca. 1,5 m. Im tieferen Bereich dieser Abfolge kann man lokal Einregelungen der Klasten beobachten, ein klarer Hinweis auf fluviatile Ablagerungsgeometrie. Untergelagert werden diese von einer kompakten, schlecht sortierten Kies-Sand-Schlamm Mischung (Dmm) mit einer Mächtigkeit von 6–6,5 m. Die Klüfte im Diamikt (Abb. 8A, B) zeigen im Verhältnis zu Aufschluss 1A und Aufschluss 2 deutliche Abweichungen in der Einfallrichtung. Je weiter man in Richtung Süden geht, desto ähnlicher werden die Messwerte zu denen im Aufschluss 1 (Abb. 8C).

### 2.4. Aufschluss 4

Aufschluss 4 befindet sich ca. 40 m weiter nördlich von Aufschluss 3. Er liegt auf der orographisch linken Seite des Reißbaches und befindet sich auf einer Höhe von 820 m. Seine Mächtigkeit liegt im Durchschnitt bei ca. 25 m, die horizontale Ausdehnung bei knapp 60 m. Überlagert wird der Diamikt wieder von einer knapp 5 m mächtigen fluviatilen Abfolge (Gms), erkennbar an den verschiedenen Korngrößen sowie den gerundeten Klasten, die z.T. eine Einregelung in Transportrichtung zeigen (Abb. 9A & B, oben). Darunter liegen die kompaktierten, strukturlosen Seesedimente (Dmm), die hier von horizontalen und von besonders markanten, durch die Erosion



Abb. 7: Meter-große quaderförmig Kluffkörper, ausgebrochen am SSW-Ende des Aufschlusses 2.

herauspräparierten, vertikalen Klüften durchzogen werden. Der Dmm keilt hier gegen Norden hin aus und ist durch einen plötzlichen Übergang von verfestigtem zu unverfestigtem Diamikt charakterisiert, ferner begleitet durch die Abnahme der Klüfte (Abb. 9A & B, rechts).

### 2.5. Aufschluss 5

Aufschluss 5 befindet sich auf der orographisch rechten Seite des Reißbaches, 30 m nördlich auf der gegenüberliegenden Bachbettseite von Aufschluss 4. Er befindet sich auf einer Seehöhe von 820 m, die Höhe beträgt ca. 2,5 m. Am Top besteht die Abfolge aus unverfestigten, matrixgestützten Blöcken und Kies (Gms), die durch erkennbare Einregelung der Komponenten eindeutig einer fluviatilen Ablagerung zugewiesen werden können. Ihre Mächtigkeit beträgt 1 m. Unterlagert wird diese Abfolge vom Diamikt (Dmm) mit einer Mächtigkeit von 1,5 m. Zwischen diesen beiden Ablagerungen besteht eine unregelmäßig ausgebildete, jedoch scharfe Grenze, die durch Quellaustritte charakterisiert ist. Auch hier ist der Diamikt von Klüften durchzogen (Abb. 10).

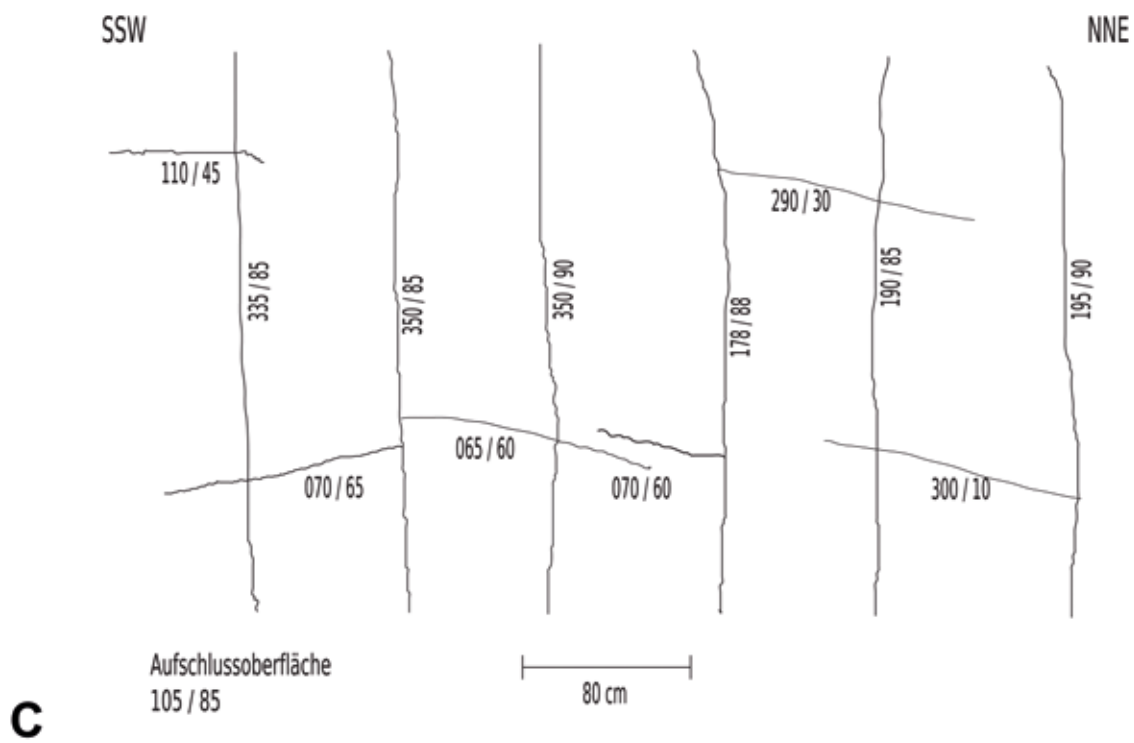
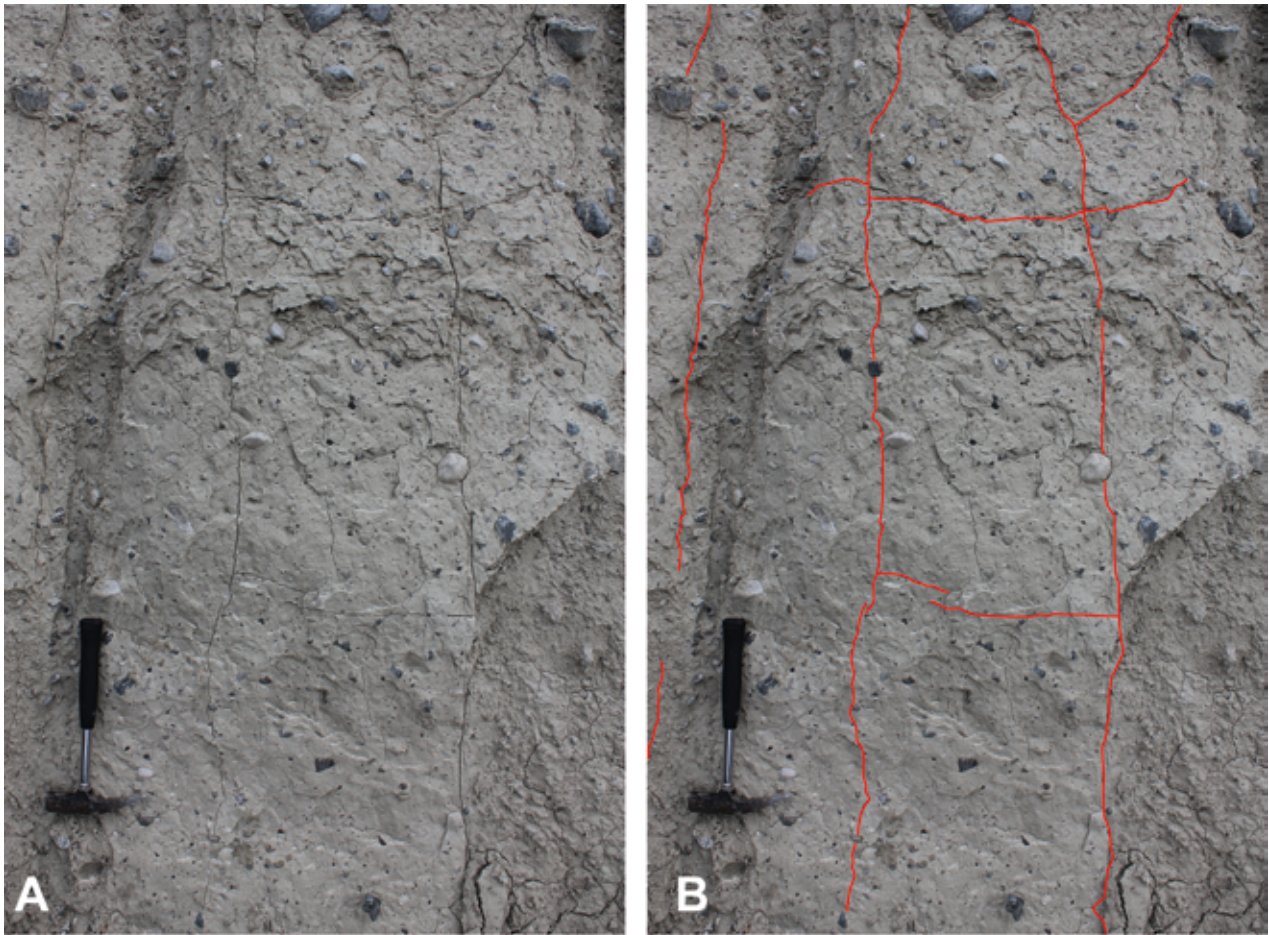


Abb. 8: Klüfte im Aufschluss 3. A, B: Ausschnitt des geklüfteten Diamikts mit vertikalen und horizontalen Klüften. Rechts unten im Bild Trockenrisse. C: Schematische Darstellung der Klüfte und der Kluftorientierungen.

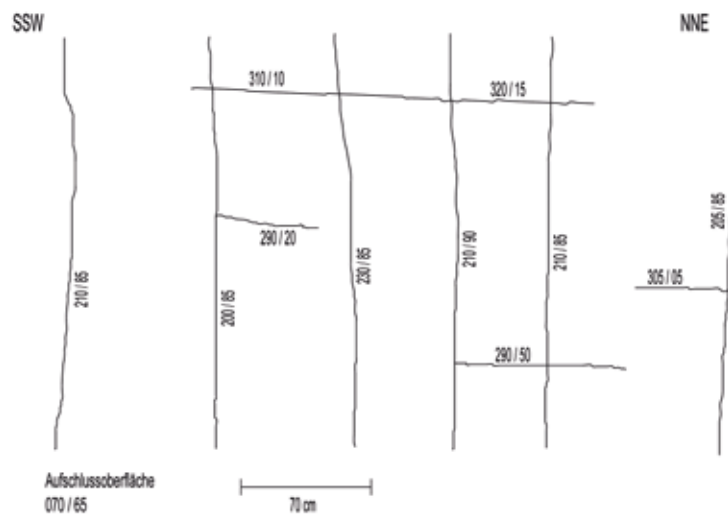


Abb. 9: Klüfte im Aufschluss 4. A, B: Überblick über den Aufschluss 4 mit durch Erosion entlang der Trennflächen hervorgehobenen Klüften. Die Überlagerung durch fluviatile Schotter ist oben rechts der Mitte sichtbar. C: Schematische Darstellung der Klüfte und der Kluftorientierungen.

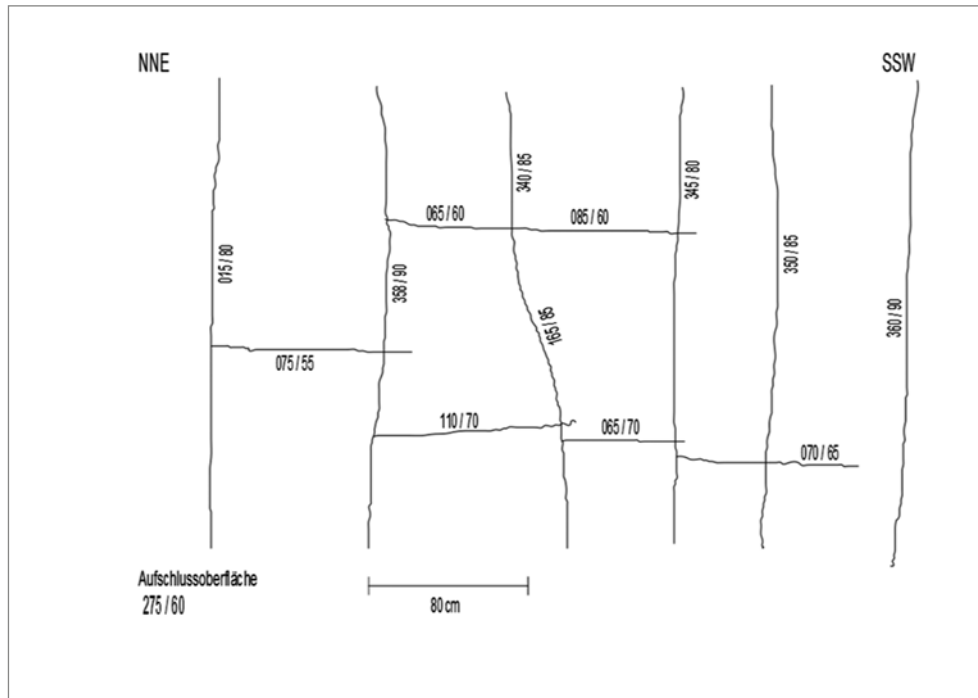


Abb. 10: Klüfte im Aufschluss 5. Schematische Darstellung der Klüfte und der Klüftorientierungen.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Klüfte: Allgemeiner Überblick

Klüfte sind diskontinuierliche Strukturen im Gestein, an denen mit freiem Auge, im Gegensatz zu Störungen, kein Versatz erkennbar ist. Klüfte des Bruchmodus I bilden Trennflächen bei Extension, d.h. die zwei Wände der Öffnung bleiben für gewöhnlich im zusammenpassenden Kontakt (Abb. 11; Pollard & Aydin, 1988). Der Versatz einer Kluft ist zu gering, um ihn mit freiem Auge zu erkennen. Scherklüfte sind hingegen den Modi II & III zuzurechnen. Die Bruchmodi sind nicht streng zu trennen; häufig treten hybride Scherklüfte auf, die eine Kombination des Dehnungs- und Scherklüften sind.

Klüfte können lokaler wie auch regionaler Natur sein; ihren Entstehungsprozess kann man auf tektonische sowie nicht-tektonische Spannungsfelder zurückführen. Eine Einteilung in nicht-tektonische sowie tektonische Extensionsbrüche ist daher für eine erste Charakterisierung von Nutzen.

Klüfte können durch Kompressionsspannungen in einem Gebirgsgürtel (regionale Tektonik), Faltung sowie durch Bruchbildung bei Entlastung oder Abkühlung entstehen. Zu den speziellen nicht-tektonischen Extensionsbrüchen zählt man Exfoliation, durch Entlastungsprozesse hervorgerufen, sowie Bergschläge und Schrumpfrisse (e.g. Price & Cosgrove, 1991). Das Wachstum der Klüfte wird beeinflusst von der mechanischen Schichtstärke des Mediums, die Oberflächenmorphologie hängt hingegen von der Art der Bruchausbreitung ab. Ausgangspunkte für Extensionsbrüche sind bereits vorhandene Mikrorisse, an deren Ende sich die Bruchfront ausbreiten kann.

#### 3.2. Morphologie der Klüfte

Die parallel angeordneten und in regelmäßigen Abständen von 70-90 cm auftretenden Klüfte im massiven Diamikt enden jeweils an der oberen

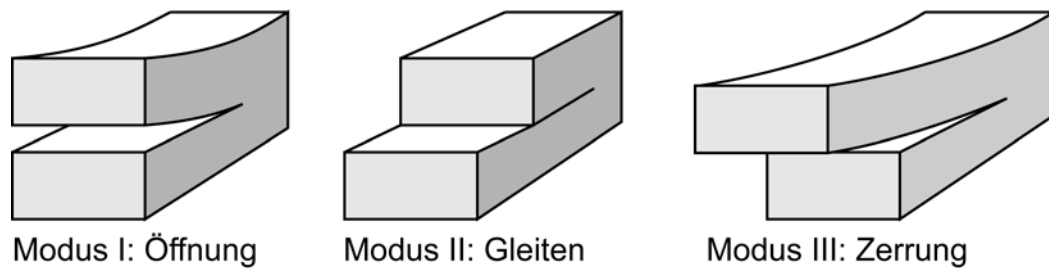


Abb. 11: Die drei Bruchmodi bei Klüften, vereinfacht nach Pollard & Aydin (1988).

bzw. unteren Grenze der Schicht, es handelt sich also um Schichtklüfte (*bedding-contained joints*). Ihre Öffnung liegt im Bereich von 0,2 bis maximal 0,5 cm und sie sind meist mit rezenten Erosionsprodukten wie feinsandige Tone (sog. Kluftletten) gefüllt. Wie schon aus den Aufschlussbeschreibungen hervorgeht, ist der Diamikt von regelmäßigen vertikalen und sub-horizontalen (fast oberflächenparallelen) Klüften durchzogen. Diese regelmäßigen, größtenteils parallel auf tretenden Klüfte können als Kluftscharen klassifiziert werden. Im Zuge der Geländearbeit und der Auswertung (Abschnitt 3.4) wurden sechs Kluftscharen erfasst.

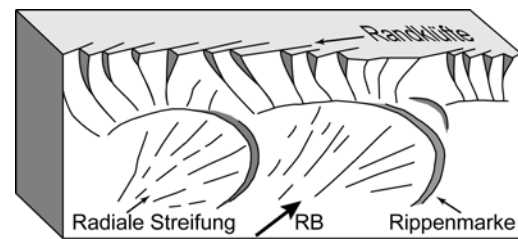


Abb. 12: Strukturen auf Kluftoberflächen nach Eisbacher (1991), basierend auf Hodgson (1961). Blockbreite etwa 1m. RB = Richtung der Bruchausbreitung.

### 3.3. Strukturen auf Kluftoberflächen

Im Zuge der Kartierung bzw. der Messungen der Trennflächen wurden besondere Strukturen an deren Oberfläche erkannt, die charakteristisch für Dehnungs- bzw. Extensionsklüfte sind. Jede Trennung entlang einer Kluft bewirkt eine Entspannung in der unmittelbaren Umgebung der Kluft. So treten auf den ebenen Trennflächen der Klüfte strahlenförmig-radial angeordnete Streifen (plumose Strukturen) oder ringförmig-konzentrische Stufen, sogenannte Rippenmarken auf (Hodgson, 1961; Twiss & Moores, 1992; Abb. 12). Die radiale Streifung verzweigt sich dabei in Richtung der Bruchausbreitung, die Rippenmarken bilden hingegen regelmäßige bogenförmige Wechsel oder Stufen und deuten wahrscheinlich auf einen kurzen Stillstand der Bruchausbreitung hin. Bei der Annäherung an freie Oberflächen, z.B. Schichtgrenzen beginnt die Kluft aufzufiedern, dabei entstehen Randklüfte (Abb. 12). Rippenmarken werden zu den konchoidalen Strukturen gerechnet. Versuche haben gezeigt, dass sich solche Strukturen bei schnell fortpflanzenden

Brüchen bilden, da die Brüche in ein festes Medium eindringen, wodurch das Spannungsfeld vibriert. Die Rippenmarken zeigen die Änderung der Propagationsrichtung des Bruches, während der Änderung des Spannungsfeldes (Twiss & Moores, 1992). Die radiale Streifung äußert sich in Form von linearen Wellenformen, die sich fächerartig aus einer Linie oder einem Punkt nach außen hin bewegen. Radiale Streifen zeigen die Veränderung der Fortpflanzungsrichtung der Bruchfront hin. Ferner hängen sie von der Heterogenität und der Korngröße des Materials ab. Aus verschiedenen Experimenten geht hervor, dass sich die Strahlen immer parallel zur Bruchausbreitung entwickeln und Brüche mit radialer Streifung eine Ausbreitungsgeschwindigkeit eineinhalb Mal jener der Schallgeschwindigkeit haben (Twiss & Moores, 1992). Die Beobachtung von radialer Streifung (Abb. 13) und Randklüften (Abb. 14) in den untersuchten Klüften erlaubt die Zuordnung der entsprechenden Kluftscharen zu den Modus I Klüften, also Dehnungsklüften.



Abb. 13: Radiale Streifung auf der Aufschlußoberfläche von Aufschluß 2. Die Aufschlußoberfläche ist demnach eine Dehnungskluft (K5), die entlang einer vertikalen Kluft (K1-3) von oben nach unten aufgerissen ist, wobei der Bruch an einer horizontalen Kluft (K4) endet.



Abb. 14: Randklüfte auf der Aufschlußoberfläche (?K5) am Südrand von Aufschluss 2. Die Randklüfte zeigen, dass die Kieslage am unteren Rand des Bildes den Diamikt darüber mechanisch entkoppelt und als freie Oberfläche wirkt.

### 3.4. Orientierung und Analyse der Klüfte

Die statistische Auswertung der Kluftrichtungen sowie deren Häufigkeitsverteilung erfolgten mittels stereographischer Projektion und Kluftrosen-Diagramme. Alle Netzdarstellungen wurden mit der Software TectonicVB (Ortner et al., 2002) hergestellt. Für eine übersichtliche Darstellung wurden die Aufschlüsse einzeln dargestellt. Aus den Großkreisdarstellung der einzelnen Aufschlüsse (Abb. 15) erkennt man schon auf den ersten Blick, dass die Kluftscharen K1, K2 und K3 senkrecht und etwa im rechten Winkel zur Aufschlußoberfläche (roter Großkreis) orientiert sind. Die Kluftschar K4 hingegen liegt subhorizontal und fällt flach in die entgegengesetzte Richtung wie die Aufschlußoberfläche. Einige Klüfte verlaufen etwa parallel zur Aufschlußoberfläche, fallen aber steil in Gegenrichtung ein. Kluftscharen K1 bis K5 zeigen deutliche Symmetrie zur Aufschlußoberfläche. Die Kluftschar K6 liegt hingegen in allen Aufschlüssen in denen sie beobachtet wurde (1A, 1B, eventuell 2, 5) unabhängig von der Aufschlußoberfläche immer NNE-streichend.

Zur prozentualen graphischen Darstellung wurden die Kluftscharen in Rosendiagrammen mit einem Zählintervall von  $5^\circ$  abgebildet (Abb. 16). Eine statistische Auswertung ergab, dass fast 60% der Klüfte mit einem überaus steilen Winkel (im Mittel  $83^\circ$ ) einfallen. Ein errechneter Mittelwert von 8% liegt bei  $343/83$ . Die häufigsten Klüfte sind dabei steil in Richtung WSW-ENE orientiert und können den Kluftscharen K1, K2 und K3 zugerechnet werden. Erst in den Rosendiagrammen lassen

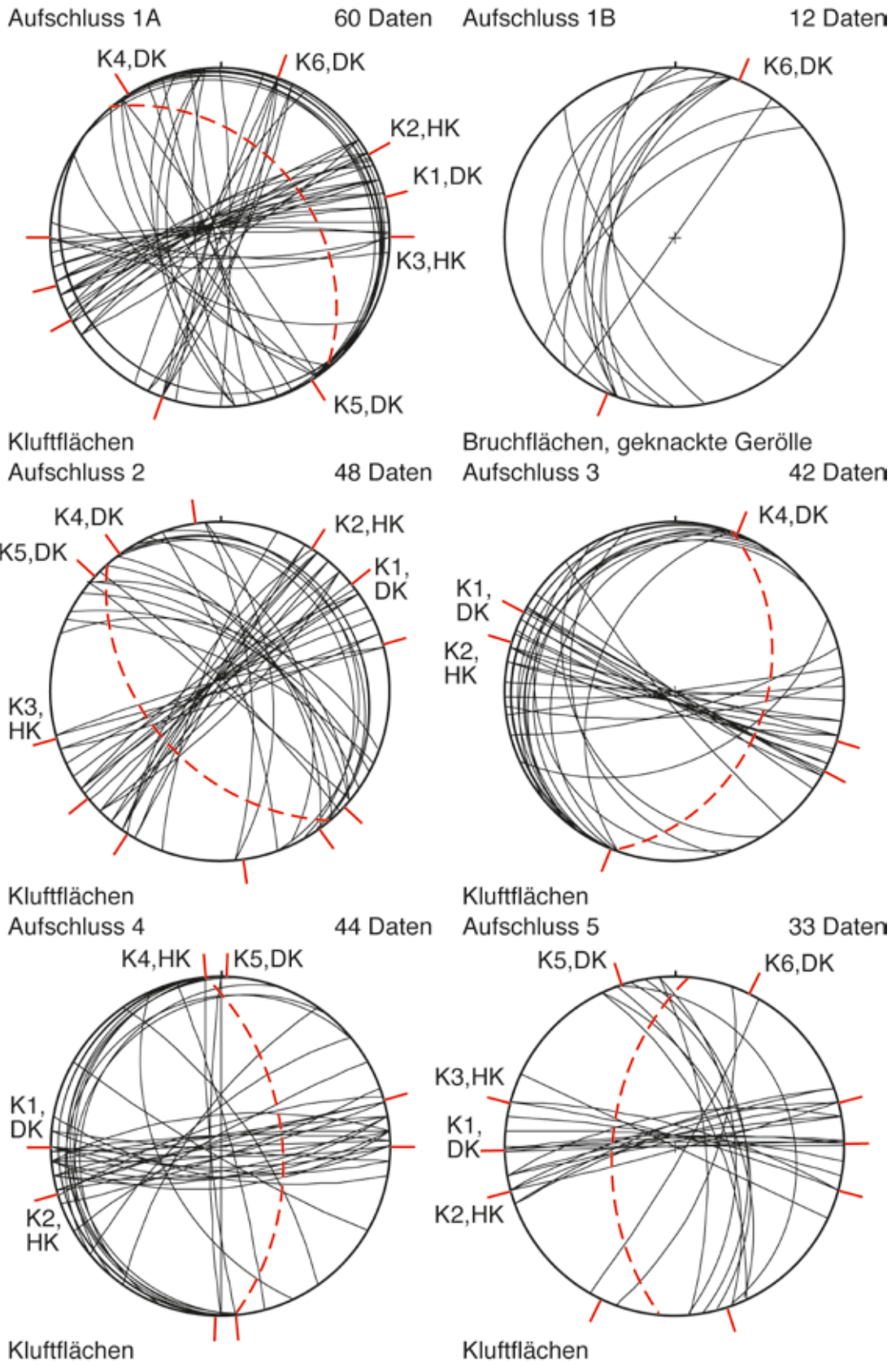


Abb. 15: Darstellung der Kluftorientierungen als Großkreise. Gestrichelter roter Großkreis repräsentiert die Aufschlussoberfläche. Die Kluftscharen sind den Gruppen K1 bis K6 zugeordnet, und als DK = Dehnungsklüfte oder HK = hybride Klüfte interpretiert.

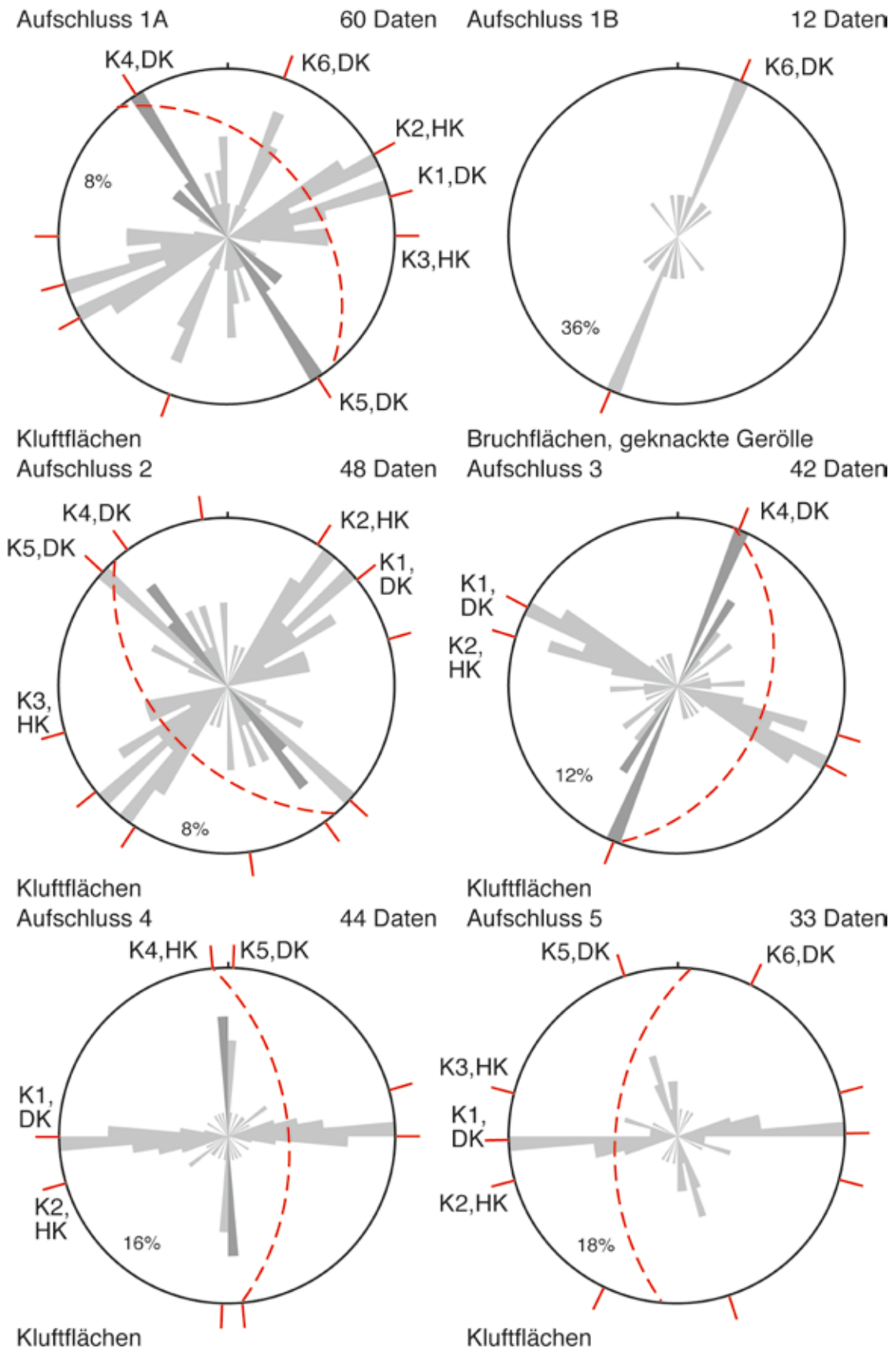


Abb. 16: Auswertung der Streichrichtungen der Klüfte in Rosendiagrammen (Zählintervall 5°). Gestrichelter roter Großkreis repräsentiert die Aufschlussoberfläche. Hellgraue Balken: subvertikale Klüfte, dunkelgraue Balken: subhorizontale Klüfte. Die Klufscharen sind den Gruppen K1 bis K6 zugeordnet, und als DK = Dehnungsklüfte oder HK = hybride Klüfte interpretiert.



sich die Kluftscharen K1, K2 und K3 trennen, da in Aufschluss 1A und 2 drei Maxima innerhalb der Klüfte normal zur Aufschlussoberfläche erkennbar sind. In den Aufschlüssen 3, 4 und 5 fehlt jeweils entweder das K1 oder K3-Maximum. Sucht man aber in der Großkreisdarstellung danach, findet man in der Großkreisdarstellung von Aufschluss 5 die Klüfte der K1 und K3 Kluftscharen, auch wenn sie statistisch nicht hervortreten. Die Analyse der Fallwerte in Rosendiagrammen zeigt die Dominanz der subvertikalen Klüfte (Abb. 17). Lediglich 10% fallen flacher als 20° ein, diese gehören größtenteils zur Kluftscharen K4, und auch die steil in den Hang einfallenden Klüfte der Kluftscharen K4 treten mit einem eigenen Maximum hervor.

Anhand der Analyse der stereographischen Projektionen der fünf Aufschlüsse kann man nun die Kluftscharen genetisch interpretieren. Extensionsklüfte (Modus I Brüche) entstehen immer senkrecht zur minimalen Hauptspannungsrichtung  $\sigma_3$  und parallel zur  $\sigma_1$ - und  $\sigma_2$ -Ebene, unter der Berücksichtigung, dass nicht alle Kluftscharen bei der gleichen Orientierung des Spannungsfeldes entstanden sind. Bei geringen differentiellen Spannungen des Bruchmediums entstehen immer Extensionsklüfte, bei Zunahme des Umlagerungsdruckes zuerst hybride Scher-Extensionsklüfte und schließlich Scherklüfte, wobei  $\theta \approx 60^\circ$ .

Die Kluftscharen sollen nun auf der Basis ihrer Orientierung zueinander interpretiert werden. Die Kluftscharen K1 bis K3 müssen gemeinsam diskutiert werden, da sie im Aufschluss nicht unterscheidbar sind. Im Rosendiagramm ist der Winkel zwischen K1 und K2 bzw. K1 und K3 jeweils ca. 10°-15°. Diese Beobachtung erlaubt eine Interpretation von K1 als Dehnungsklüfte und K2 bzw. K3 als genetisch verwandte hybride Scherklüfte, die im gleichen Spannungsfeld gebildet wurden. Die Aufschlussfotos Abb. 4, 6, 8, 9 zeigen den unregelmäßigen Verlauf der vertikalen Klüfte. Auf solch unregelmäßigen Flächen muss es mit der Änderung der Orientierung auch zu einer Änderung der Kluftentstehung von Dehnungsklüften zu hybriden Scherklüften kommen, was in der Literatur auch seit langem bekannt ist (z.B. Hancock, 1985).

Die Interpretation der flach liegenden Kluftscharen K4 ist nicht klar, da die Kluftoberflächen der Beobachtung nicht zugänglich sind, und nur

ein straff geregeltes Flächenbündel vorhanden ist. Der Regelungsgrad nach Wallbrecher (1986) ist 99%. Der Typ der Kluft kann nur in Zusammenhang mit der Genese interpretiert werden (Abschnitt 5). Auf den Oberflächen der Kluftscharen K5 wurden die für Dehnungsklüfte typische Oberflächenstrukturen gefunden, sie werden als

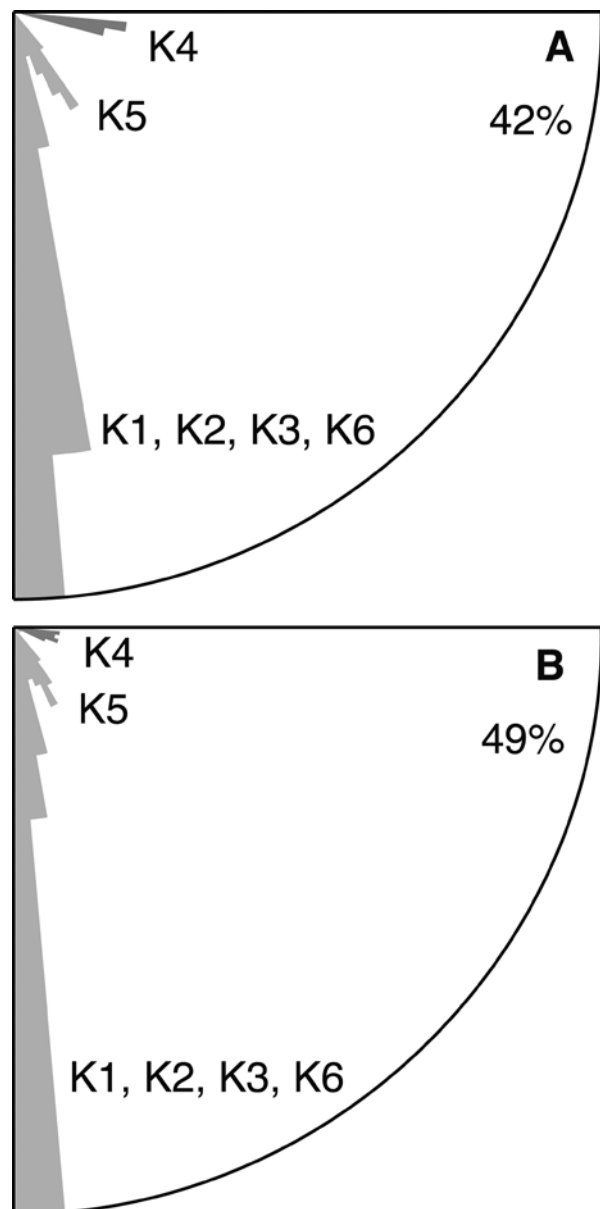


Abb. 17: Auswertung der Fallwerte der Klüfte in Rosendiagrammen (Zählintervall 5°). A: Auswertung der Klüfte von Aufschluss 2. B: Auswertung aller Klüfte. Durch die Dominanz der subvertikalen Klüfte treten die flacheren, weniger häufigen Klüfte in der Auswertung aller Klüfte weniger stark hervor. Hellgraue Balken: subvertikale Klüfte, dunkelgraue Balken: subhorizontale Klüfte. Die Kluftscharen sind den Gruppen K1 bis K6 zugeordnet.

solche interpretiert. Die Kluftschar K6 die parallel zu den geknackten Klasten von Aufschluß 1B orientiert ist, muss ebenfalls als Dehnungsküfte interpretiert werden. Ferner wurde der Winkel zwischen den Polen der Aufschlussoberfläche und der subvertikalen Klüften für jeden Aufschluss berechnet (Tabelle 1). Aus der Berechnung ergibt sich, dass der Winkel nahezu bei allen Aufschlüssen, mit Ausnahme von Aufschluss 5, einen Wert zwischen 69°-72° hat.

### 3.5. Geknackte Klasten

Die in-situ geknackten Klasten wurden ausschließlich in Aufschluss 1B vorgefunden. Man findet sie in der kompaktierten, korngestützten Kies-Abfolge (Gc) an der Basis des Aufschlusses. Die Überlagerung beträgt hier ca. 25-30 m. Die Bruchrichtung durchsetzt die Klasten größtenteils subvertikal (Abb. 5A); die Berührung der Klasten erfolgt meist über Punktkontakte (Abb. 5B). Der Bruch einiger Klasten ist so ausgeprägt, dass diese z.T. auch gänzlich in splittrige Plättchen oder Fragmente zerbrochen sind. Bei den vertikal geknackten Geröllen wurde eine keilförmige Öffnung beobachtet. Dasselbe Frakturmuster lässt sich über mehrere Lithoklasten hinweg verfolgen (Abb. 5).

### 3.6. Alter der Klüfte

Die unterschiedlich orientierten Kluftscharen (K1-K6) resultieren aus verschiedenen Deformationsperioden, die auf wechselnde Spannungszustände im Lauf der Zeit zurückzuführen sind. Unter Einbeziehung der Oberflächenstrukturen sowie Interpretation der stereographischen Projektionen kann eine relative Alterseinteilung der Klüfte erstellt werden. Das Prinzip der Altersdatierung folgt einigen einfachen mechanischen Gesetzen, die zum Verständnis hier kurz aufgeführt werden sollen.

Ältere Klüfte neigen dazu relativ lang und ununterbrochen zu sein. Weil bereits vorhandene Klüfte die Hauptspannungen nahe der Kluft neu orientierten, da sie als freie Oberflächen wirken, an denen keine Scherspannung wirken kann, modifizieren sie die Orientierung von jüngeren Klüften. Das führt dazu, dass jüngere Klüfte fast immer im rechten Winkel auf ältere Klüfte treffen und an ihnen aufhören. Diese Gesetzmäßigkeit ist in den Abbildungen 6, 8 und 9 klar ersichtlich. Die relative Alterseinteilung mit Hilfe einer Überschneidungsmatrix (Tabelle 2) ergab, dass die dominierenden Kluftscharen K1, K2 und K3 die ältesten sind. Die Kluftschar K4 ist älter als die Kluftschar K5, wobei einige widersprüchliche Beobachtungen gemacht wurden. Das könnte auf eine gleichzeitige Entstehung hindeuten. Klüfte der Kluftschar K6 sind die jüngsten.

Tab. 1: Berechnung des Winkels zwischen den Polen der Aufschlussoberfläche und der subvertikalen Klüfte.

	Aufschluss 1A	Aufschluss 2	Aufschluss 3	Aufschluss 4	Aufschluss 5
<b>Aufschlussoberfläche</b>	050/45	240/55	105/85	070/65	275/60
<b>Subvertikale Klüfte K1, K2, K3 (Mittelwert)</b>	163/45	052/53	272/24	237/45	109/60
<b>Winkel dazwischen</b>	72°	72°	71°	69°	60°

Tab. 2: Überschneidungsmatrix zur relativen Altersbestimmung der Klüfte. Jeder Strich in den Kästchen repräsentiert eine Beobachtung. Die Kluftscharen K1 bis K6 sind chronologisch von der relativ ältesten zur jüngsten Kluftschar nummeriert.

		jünger als			
		K1, 2, 3	K4	K5	K6
älter als	K1, 2, 3		IIII	IIIIIIII	IIII
	K4	II			I
	K5		III		I
	K6				

## 4. Diskussion - Ursprung der Klüfte

Die Orientierungsanalyse der Klüfte im Kapitel 5.4 hat gezeigt, dass es sich im Wesentlichen um Extensions- und Scherklüfte handelt, auch bestärkt durch die beobachteten Kluftoberflächenstrukturen und Kluftorientierungsmuster. Die Entstehung von Klüften kann verschiedenen Ursachen haben. Im folgenden Abschnitt sollen die verschiedenen Kluftscharen verschiedenen Modellen der Genese zugeordnet werden.

### 4.1. Trockenrisse

Der ursprünglich sicher wassergesättigte Diamikt könnte bei der langsamen Austrocknung Trockenrisse ausbilden. Auf den ersten Blick erscheint diese Variante unwahrscheinlich, da Austrocknungsrisse polygonale, typischerweise sechseckige Muster bilden (Price & Cosgrove, 1991; p. 83ff.), wie in den Abbildungen 6 und 8 gut ersichtlich ist. Austrocknungsmuster können aber modifiziert werden, wenn das austrocknende Material bereits eine primäre Anisotropie besitzt. Im Verzahnungsbereich der Diamikte mit Delta-Körper zwischen den Aufschlüssen 1A und 1B sind flach nach Norden einfallende Diamikte wechsellagernd mit teilverfestigten Schottern und Sanden erhalten. In diesen Diamikten gibt es Klüfte, die im rechten Winkel zur Schichtung stehen und sichtbar mit der Änderung des Einfallens der Schichtung von vertikal zu steil südfallend drehen (Abb. 18). Da die subvertikalen Klüfte der Kluftscharen K1, K2

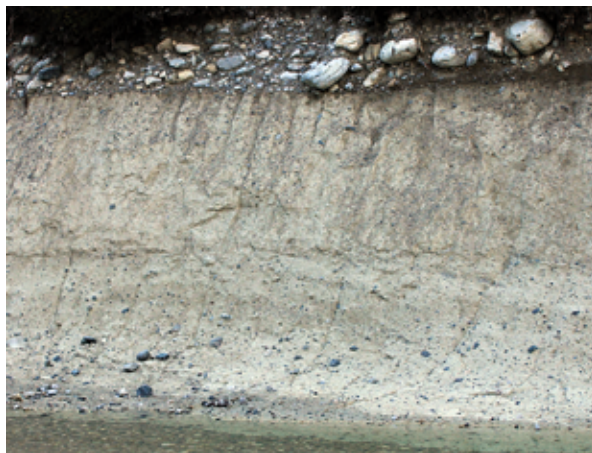


Abb. 18: Änderung des Fallens der subvertikalen Klüfte der Kluftsets 1 bis 3 einhergehend mit der Änderung des Einfallens der Schichtung im Diamikt.

und K3 die ältesten Klüfte sind, sich deren Orientierung aber mit der Änderung der Orientierung der Aufschlußoberfläche ändert, müssen diese Klüfte nach der Bildung des rezenten Talverlaufs bei Austrocknung von der Aufschlußoberfläche her entstanden sein. Aus diesem Grund muss in den Diamikten eine deutliche Anisotropie parallel zur Schichtung vorhanden sein, welche die Orientierung der Klüfte kontrolliert. Eine Kluftentstehung durch (Eis-)auflast ist unwahrscheinlich, da (1) zu erwarten wäre, dass die Klüfte unabhängig von der heutigen Aufschlußoberfläche orientiert sein müssten, und (2) wegen der gleichmäßigen Auflast polygonale Muster bilden sollten.

Auf eine Genese durch Austrocknung deuten die relativ großen Kluftöffnungen hin (Abb. 6 & 8), die bei Trockenrissen in weichen Sedimenten häufig beobachtet werden, selten bei anderen Klüften. Die Austrocknung ist durch die Aufschlußoberfläche kontrolliert, die Klüfte sollten im rechten Winkel dazu stehen. Die Analyse der Winkel zwischen Aufschlußoberfläche und steilen Klüften zeigt aber, dass diese Winkel zwischen 60° und 70° liegen (Tabelle 1). Die Erosion der Aufschlußoberflächen des Diamikts an den Prallhängen des Rissbachs geht relativ schnell (vgl. Abb. 7). Das lässt vermuten, dass die heute auf den Aufschlußoberflächen vorhandenen Klüfte von einer älteren Oberfläche eines älteren Prallhangs propagiert sind, der aufgrund der seitlichen Verlagerung vermutlich eine geringfügig andere Orientierung im rechten Winkel zu den Klüften hatte.

### 4.2. Entlastungsklüfte

Im Zuge der Geländearbeit stellte sich die Frage, inwiefern die Entstehung der Klüfte auf glazitektonischen Prozessen zurückzuführen ist. Durch Hebung und Erosion nimmt der Umgebungsdruck ab, was zu Dehnungsprozessen des Materials führen kann. Entlastungsklüfte bilden sich im Verlauf der langsamen Bruchausbreitung als planare bis leicht gekrümmte Extensionsbrüche, die parallel zur Erdoberfläche bzw. normal zur minimalen Hauptspannungsrichtung  $\sigma_3$  orientiert sind (z.B. Brunner & Scheidegger, 1973). Im Gelände würde man so oberflächenparallele, flachliegende

Kluftgruppen beobachten. Wie aus den stereographischen Projektionen eindeutig hervorgeht, sind die vertikalen Klüfte der Kluftscharen K1, K2, K3 und K6 in einem hohen Winkel zur Topographie orientiert, und ein Ursprung der Klüfte aufgrund Entlastung kann daher ausgeschlossen werden. Die Kluftchar K4 mit ihrer subhorizontalen Orientierung (Abb. 16) könnten sich als Reaktion auf subrezente Erosionsprozesse gebildet haben. Ungewöhnlich ist, dass solche Entlastungsklüfte sich als zweite Kluftgeneration bilden, da sie in homogenen Gesteinen normalerweise die älteste Kluftgeneration sind (Brunner & Scheidegger, 1973). Entlastungsklüfte wurden bisher aber nicht in Koexistenz mit Trockenrissen beschrieben. Eine Zunahme der Kluftabstände von der Oberfläche in die Tiefe, wie sie für Entlastungsklüfte typisch wäre, konnten nicht beobachtet werden (Abb. 4, 6, 8), was auch an der geringen vertikalen Höhe der Aufschlüsse an Bachanrissen liegen kann.

Die Kluftchar K5 ist subparallel zur rezenten Aufschlussoberfläche an den Bachanrissen orientiert, und fällt aber mit etwa  $60^\circ$  in die Gegenrichtung ein. Die Aufschlussoberfläche und die Kluftchar K5 könnten ein konjugiertes System von Scherklüften bilden, wenn sie nicht Eigenschaften von Dehnungsklüften haben würden (Abb. 13, 14). Daher spekulieren wir hier, dass die Ausbildung dieser Kluftchar mit der ungleichmäßigen Austrocknung von unten nach oben zusammenhängt: Der Reißbach führt meist Wasser, wodurch der Hangfuß der Bachanrisse nass bleibt, während das Material weiter oben stärker austrocknet. Unter der Voraussetzung, dass die Austrocknung mit einer Abnahme der Zugfestigkeit einhergeht, müssten Entlastungsklüfte, die genetisch mit der Oberfläche der Bachanrisse gekoppelt sind, von dieser Oberfläche in den Hang hinein einfallen. Sowohl die Kluftchar K4 als auch K5 müssen bei einer Interpretation als Entlastungsklüfte Dehnungsklüfte sein, was zumindest Kluftchar K5 lokal zeigt.

#### 4.3. Tektonische Klüfte

Die häufigste Ursache für natürliche Extensionsbrüche geht auf regionale Spannungsfelder zurück. Lokale Dilatation und Extension ist oft am Ende bzw. im Umfeld von Bewegungsflächen zu beobachten. Tektonische Extensionsbrüche sind meist relativ ebene Trennflächen, die sich im Gelände häufig als lang durchziehende Diskontinuitäten beobachten lassen. Die Analyse der Klüfte hat jedoch gezeigt, dass sich ihre Orientierung in Abhängigkeit von der Orientierung der Aufschlussoberfläche ändert. Da die Orientierung der Aufschlussoberfläche erst durch rezente Erosion des Reißbaches entstanden ist, kann man schlussfolgernd eine Entstehung der Kluftscharen 1-5 infolge von Tektonik ausschließen.

Die Kluftchar K6 ist unabhängig von den Aufschlussoberflächen orientiert, und parallel zu den geknackten Klasten im Aufschluss 1B (Abb. 15, 16). Nach Brandstätter (2006) sind die geknackten Klasten durch die darüberliegende Gletscherauflast entstanden, bestärkt durch die Kompaktheit der Kiesabfolge. Die eingemessenen Brüche der geknackten Klasten zeigen im Rosendiagramm eine Prävalenz in Richtung NNE-SSW. Brandstätter (2006) deutet dies im Zusammenhang mit dem Eisstrom des Würm-Glazials. Außer Gletscherauflast könnte eine mögliche Ursache für das Zerbrechen der Klasten die Sedimentauflast sein. Für matrixgestützte Konglomerate wurde errechnet, dass eine Überlagerung von mehreren 100 m Sediment notwendig ist, damit es zum Bruch in Geröllen kommt (Eidelman and Reches, 1992). Für korngestützte Konglomerate sind keine vergleichbaren Angaben verfügbar, es ist jedoch anzunehmen, dass aufgrund der Punktkontakte zwischen den Geröllen (Abb. 5) die Bruchbildung bereits bei geringerer Überlagerung eintritt.

Eine weitere Hypothese wäre ein Zerbrechen der Klasten aufgrund von Erdbebenaktivität (vgl. Meyer et al. 2006). In einer korngestützten Kiesabfolge können sich die Klasten bei Beschleunigung, wie es bei der Fortpflanzung von Erdbebenwellen der Fall ist, noch relativ frei bewegen. Die

verhältnismäßig geringe Überlagerung (25-30 m) lässt einen gewissen „Freiraum für Bewegung“ offen. In der Tat zeigen die geknackten Gerölle dieselbe Orientierung wie die Kluftschar K6 (Abb. 15, 16), die aufgrund der relativen Datierung der Kluftscharen die jüngste Kluftgeneration ist und damit jünger als die letzte Eiszeit ist. Eine Entstehung

dieser Frakturen aufgrund von Erdbeben ist daher möglich. Einige Herdflächenlösungen von Erdbeben in den Nördlichen Kalkalpen nördlich von Innsbruck haben Herdflächen mit NNE-orientierten P-Achsen (Ortner et al., 2007) ergeben, in Übereinstimmung mit der Orientierung der Kluftschar K6 und deren Interpretation als Dehnungsklüfte.

## 5. Zusammenfassung

Die Untersuchung der Klüfte in den Sedimenten des Reißbaches zeigt die Anwesenheit von sechs Kluftscharen. Folgende Kluftscharen wurden unterschieden:

- Kluftscharen K1, K2 und K3 sind subnormal zur Aufschlussoberfläche orientiert, und werden als Schrumpfrisse aufgrund von Austrocknung von der Aufschlussoberfläche her interpretiert.
- Kluftschar K4 ist subhorizontal orientiert, und wird mit Vorbehalt als Entlastungsklüfte parallel zur heutigen Landoberfläche interpretiert.
- Kluftschar K5 ist subparallel zur Aufschlussoberfläche orientiert, fällt aber in die entgegengesetzte Richtung ein, und wird mit Vorbehalt als Entlastungsklüfte in Zusammenhang mit der Aufschlussoberfläche interpretiert.
- Die geknackten Gerölle haben dieselbe Orientierung wie die Kluftschar K6; eine neotektonische Entstehung der Klüfte zeitgleich mit den Frakturen ist nicht auszuschließen.

Alle Klüfte sind sehr jung, da bereits die älteste Kluftschar eine Orientierung abhängig vom heutigen Bachverlauf zeigt.

## 6. Danksagung

Diese Arbeit ist aus der Bachelorarbeit des Erstautors unter der Betreuung des Koautors entstanden. Die Autoren bedanken sich bei C. Spötl, der bei einer Exkursion ins Karwendel auf das Thema der Klüfte im Quartär aufmerksam machte und den quartärgeologischen Teil durchgesehen hat.

## 7. Literatur

- Brandstätter, S. (2006): Quartärgeologische Untersuchungen im nördlichen Rißtal – Karwendel (Bayern – Tirol). - 96 S., Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Innsbruck, Innsbruck.
- Büsel, K. (2008): Untersuchung quartärer Ablagerungen im Tiroler Rißtal – Karwendel (Tirol). - 113 S., Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Innsbruck, Innsbruck.
- Brunner, F. K., Scheidegger, A. E., (1973): Exfoliation. - *Rock Mechanics*, 5: 43-62.
- Doben, K. (1993): Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Blatt 8434 Vorderriß. Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- Eidelman, A., Reches, Z. (1992): Fractured pebbles, a new stress indicator.- *Geology* 20: 307-310.
- Eisbacher, G. H. (1991): Einführung in die Tektonik. - 425 S., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Frenzel, B., Pesci, M. & Velicho, A. A. (1992): Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the Northern Hemisphere. - 153 S., Geographical Research Institute, Budapest.
- Hancock, P. L. (1985): Brittle microtectonics: principles and practice. - *J. Struct. Geol.*, 7: 437 - 457.
- Hodgson, R. A. (1961): Classification of structures on joint surfaces. *Am. J. Sci.*, 259: 493-502.
- Keller, B. (1996): Lithofazies-Codes für die Klassifikation von Lockergesteinen, Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik, 132: 5-12.
- Meyer, M. C., G. Wiesmayr, M. Brauner, H. Häusler, and D. Wangda (2006): Active tectonics in Eastern Lunana (NW Bhutan): Implications for the seismic and glacial hazard potential of the Bhutan Himalaya.- *Tectonics*, 25(3), TC3001, doi 10.1029/2005TC001858.
- Mutschlechner, G. (1949): Spuren des Inngletschers im Bereich des Karwendelgebirges. – *Jahrb. Geol. Bundes.-Anst.*, 93: 155-206.
- Ortner, H., Reiter, F., Acs, P. (2002): Easy handling of tectonic data: the programs TectonicVB for Mac and TectonicsFP for Windows(TM).- *Computers & Geosciences*, 28: 1193-1200.
- Ortner, H., Reiter, F., Brandner, R., Lenhardt, W. (2007): The Inn valley - does geological history help to understand present-day tectonic processes? *Geophysical Research Abstracts*, 9: 08094.
- Pollard, D. D., Aydin, A. (1988): Progress in understanding jointing over the past century. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100: 1181-1204.
- Price, N. J., Cosgrove, J. W., (1991): Analysis of Geological Structures. - 502 S., Cambridge University Press, Cambridge.
- Reitner, J. M. (2011): Das Inngletschersystem während des Würm-Glazials. - Arbeitstagung der geologischen Bundesanstalt 2011, Blatt 88 Achenkirch, 79-88.
- Sanders, D. (2008): Eislast-Erscheinungen und Intraklasten in der Höttinger Brekzie (Riss-Würm Interglazial) bei Innsbruck (Österreich).- *Geo.Alp*, 5, 149-164.
- Twiss, R. J., Moores, E. M. (1992): *Structural Geology*. – 532 S., Freeman, New York.
- Wallbrecher, E. (1986): Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen. Graphische, rechnerische und statistische Verfahren. - 244 S., Enke, Stuttgart.