

Zur Entstehung der Rauhacke

Autor(en): **Müller, Walter H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **75 (1982)**

Heft 3

PDF erstellt am: **14.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-165239>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zur Entstehung der Rauhacke¹⁾

Von WALTER H. MÜLLER²⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Rauhacken (cornieules) sind extrem poröse Dolomit-Kalzit-Breccien mit verschiedenen akzessorischen Beimengungen.

- Eine sedimentäre Wechselfolge von Dolomit- und Anhydrit- bzw. Gipsgesteinen ist erste Bedingung. Sie ist zumindest genetisch an ein stratigraphisches Niveau gebunden.
- Tektonische Beanspruchung führt zu einer Brecciiierung des Dolomits infolge seines extrem unterschiedlichen Materialverhaltens gegenüber dem Sulfatgestein. Anhydrit ist bei tektonischen Bewegungen schon bei Temperaturen unter 100 °C sehr mobil, wohingegen sich Dolomit bei gleichen Bedingungen noch spröde verhält. So erfolgt eine Brecciiierung der Dolomitlagen entweder durch Boudinierung bei Plättung und einfache Scherung oder durch generelles Zerbrechen bei Faltung.
- Der dritte Prozess, die chemische Verwitterung, verwandelt dann diese Breccie erst in die eigentliche Rauhacke (BRÜCKNER 1941). Bei kontinuierlicher Zirkulation von Wasser wird Anhydrit und Dolomit gelöst, die Magnesium- und Sulfationen abgeführt und in den entstandenen Hohlräumen Kalzit auskristallisiert.

ABSTRACT

Rauhackes (cornieules) are very porous dolomite/calcite breccias with various accessory minerals. Three conditions are necessary for the formation of rauhacke.

- The first condition is a sedimentary association of dolomite and anhydrite or gypsum. At the very least the two rock types should occur together in the same stratigraphic unit.
- The second is that tectonic processes produce a brecciation of the dolomites. This results from the extreme differences in deformation properties between dolomite and the calcium sulfate rocks. Even at temperatures of less than 100 °C anhydrite is easily deformed whereas under these conditions dolomite is still brittle. Tectonic processes thus lead to a brecciation of the dolomite through boudinage, through flattening and simple shearing or through general fracturing accompanying folding.
- The third condition is the existence of chemical weathering which changes the breccia finally into a true rauhacke (BRÜCKNER 1941). Continued circulation of groundwater dissolves the anhydrite and dolomite, transports the magnesium and sulfate ions out of the system and calcite is precipitated in the resulting space.

1. Einleitung

Über die Genese von Rauhacken existiert eine grosse Anzahl Hypothesen. Das Spektrum reicht von rein sedimentärer Entstehung (BRUNNSCHWEILER 1948, CA-

¹⁾ Beitrag Nr. 211 des Labors für Experimentelle Geologie.

²⁾ Geologisches Institut, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich. Gegenwärtige Adresse: Nagra, Parkstrasse 23, CH-5401 Baden.

DISCH 1953, JERZ 1966) über die Bildungsmöglichkeit durch reine Verwitterung (BRÜCKNER 1941, BACHMANN & MÜLLER 1981) bis zur rein tektonischen Entstehung (SPITZ & DYHRENFURTH 1914, CORNELIUS 1927, 1935, JÄCKLI 1941, LEINE 1971 und MASSON 1972).

Als Ursprungsgestein vermuten jedoch die meisten Autoren, mit Ausnahme von z. B. LEINE (1971) und MASSON (1972), eine Wechselfolge von Dolomit- und Anhydrit- bzw. Gipsgesteinen. Generell kann beobachtet werden, dass Rauhacken meist als konkordante Einlagerungen im Schichtverband vorkommen und sich an bestimmte stratigraphische Horizonte halten. Intensivere tektonische Beanspruchung kann jedoch eine diskordante Lagerung zum Schichtverband bewirken. So machte z. B. JÄCKLI (1941) die Feststellung, dass Rauhacke bei tektonischer Beanspruchung derart mobil war, so dass sie «als hangende Gesteinsschicht in die Risse und offenen Klüfte ihres Liegenden eindringen kann wie Konfitüre ins Brot».

Die uns interessant erscheinenden Hypothesen seien im folgenden kurz erwähnt; einen guten Überblick gab zudem LEINE (1971).

- BRUNNSCHWEILER (1948) sieht die Entstehung der Rauhacke als sedimentäres Ereignis an. Ihm zufolge sind es echte, sedimentäre Breccien, entstanden als Erosionsprodukt im Gefolge von Meeresspiegelschwankungen.
- Nach CADISCH (1953) muss die stratiforme Rauhacke als lagunäre Bildung aufgefasst werden.
- JERZ (1966) fasste die Rauhacken als resedimentierte Bildungen auf. Groblutisches bis arenitisches Karbonatsediment wurde in einem diagenetisch wenig verfestigten Zustand aufgearbeitet, umgelagert und wieder sedimentiert.
- Für BRÜCKNER (1941) sind Rauhacken ein Verwitterungsprodukt, rezente Quellbreccien, entstanden aus einer Wechsellagerung von Dolomit- und Anhydritbänken. Der Anhydrit wandelt sich bei Wasserzufuhr in Gips um, verbunden mit einer Volumenzunahme bis zu 57%. Bei diesem Quellprozess sollen die Dolomitbänke brecciiert werden. Der Gips wird schliesslich ersetzt durch Kalzitcement unter gleichzeitiger Auflösung des Dolomits.
- SPITZ & DYHRENFURTH (1914) und CORNELIUS (1935) betrachteten die Rauhacken als eine eigentliche Einsturzbreccie, welche durch unterirdische Auflösung von Gips entstand, wobei eine nachträgliche tektonische Durchbewegung erfolgte.
- Nach JÄCKLI (1941) Auffassung ist Wasser ein essentieller Faktor bei der Entstehung der Rauhacke. Er nimmt einen «vollständig von Wasser durchtränkten Gesteinskomplex» an, «der gegenüber tektonischer Beanspruchung nicht mehr als fester Stoff, sondern als plastische, breiige Flüssigkeit wirkt». So verhält sich gemäss JÄCKLI die Rauhacke bei tektonischen Bewegungen als eine hochviskose Flüssigkeit. Dieser Brei ist fähig, Fremdkomponenten aus dem Hangenden und Liegenden aufzunehmen.
- Nach LEINE (1971) und GENGE (1952) sind Rauhacken karbonatische Breccien tektonischen Ursprungs, welche gewöhnlich eine ausgiebige Rekristallisation und Kalzitisierung erlitten haben. Ausserdem wurden diese Breccien tiefgehend verwittert, wodurch sie ein typisch poröses bis kavernöses Aussehen erhielten.
- Nach MASSON (1972) ist die Rauhacke eine dolomitische Breccie. Die Breccieierung erfolgte durch hydraulische Bruchbildung (hydraulic fracturing). Der dazu

notwendige sehr hohe Porendruck (der Porendruck müsste grösser als der lithostatische Druck sein) soll bei der Brecciiierung an der Basis der alpinen Decken geherrscht haben. Er erklärt damit auch die grosse tektonische Mobilität der Rauhacken.

Im folgenden versuchen wir, aus der grossen Anzahl von Hypothesen uns richtig erscheinende Teile zu extrahieren und zu einer zusammenfassenderen Erklärung neu zusammenzufügen. Wir sehen uns dazu veranlasst, weil wir über neue Erkenntnisse aus Experimenten sowie über neues Beobachtungsmaterial von Bohrungen und aus Stollen verfügen. Es sind dabei zwei Punkte von Bedeutung.

- Grosse Quelldrücke bei der Umwandlung von Anhydrit in Gips, wie dies BRÜCKNER (1941) erwartete, treten offenbar nicht auf. Dies zeigten Laborexperimente über das Quellverhalten von Anhydrit. Die Quelldrücke würden kaum genügen für eine Breccienbildung der darunter- und darüberliegenden Dolomitbänke.
- Triaxialexperimente mit Anhydrit und Dolomit ergaben ein extrem unterschiedliches rheologisches Verhalten dieser beiden Gesteine. Während sich Anhydrit schon bei Temperaturen unter 100 °C und bei geologisch relevanten Deformationsraten duktil verhält, reagiert Dolomit bei gleichen Bedingungen extrem spröde. Durch dieses unterschiedliche Verhalten der beiden Gesteine kommt es schon bei schwacher tektonischer Beanspruchung zur Breccienbildung in den Dolomitlagen.

Die Erklärungsmöglichkeiten für die Entstehung der Rauhacke liegen in drei verschiedenen genetischen Stadien:

1. Sedimentäre bzw. frühdiagenetische Entstehung,
2. Entstehung durch tektonische Vorgänge,
3. Entstehung durch Verwitterung und Auslaugung.

Eine wirkliche, echte Rauhacke ist das Endprodukt einer bestimmten Gesteinsabfolge, die diese drei Stadien durchlaufen hat. Deshalb drehte sich die Diskussion über die Genese der Rauhacke auch immer wieder um diese drei Punkte. Zuerst muss die *sedimentäre Voraussetzung* erfüllt sein, d. h. dass eine Wechsellagerung von Dolomit und Anhydrit bzw. Gipsgesteinen vorliegt. Eine *tektonische Beanspruchung* führt später zur Brecciiierung der Dolomitbänke. Schliesslich führt die *chemische Verwitterung*, durch Lösung von Anhydrit und Gips, sowie die Dedolomitisierung und Kalzit-Ausfällung zum Gestein, das wir als Endprodukt Rauhacke nennen.

2. Das Ausgangsgestein

Ausgangsgestein der Rauhacke war nach Ansicht der meisten Autoren eine Wechsellagerung von Anhydrit- bzw. Gips- und Dolomitgesteinen, die möglicherweise auch noch etwas Kalk und Ton enthielten. Dies deckt sich auch mit unserer Ansicht. So kommen z. B. in den Engadiner Dolomiten die mächtigen Rauhacke der Raibler Formation in unmittelbarer Nähe der Gipsgesteine vor, die an der Oberfläche aufgeschlossen sind (z. B. Ofenpass, Alp da Munt). An Hand von Kernen der Raibler Schichten aus der Tiefbohrung Vorderriss I konnten BACHMANN & MÜLLER (1981) feststellen, dass das unverwitterte Ausgangsgestein eine Dolo-

mit-Anhydrit-Wechselfolge ist. BRÜCKNER (1941) hatte ähnliche Beobachtungen beim Lötschbergtunnel gemacht. Während Rauhwaacke ausserhalb des Tunnels in grosser Mächtigkeit anstand, fand er im Tunnel eine Dolomit-Anhydrit-Abfolge, die jedoch an der Oberfläche nirgends vorkam. Er schloss daraus, dass die Rauhwaacken-Genese an primär anhydritführende Gesteine gebunden sein müsse.

3. Zur Entstehung der Breccien

Eine tektonische Brecciiierung von rein karbonatischen Gesteinen, wie dies LEINE (1971) vorschlägt, kann zu Gesteinen führen, die den Rauhwaacken z. T. durchaus ähnlich sind. Dabei entstehen aber Kakirite und Kataklasite, die vorwiegend diskordant zum Schichtverband stehen dürften. Zudem würden sie kaum grössere Mächtigkeiten erreichen, und die deutlichen Hinweise auf Streckung (Fig. 2), wie bei Rauhwaacken oft beobachtet, müssten fehlen. Die Entstehung dieses Gesteinstyps steht hier jedoch nicht zur Diskussion. So wie LEINE aber seine Proben beschreibt, handelt es sich dabei wahrscheinlich weitgehend um echte Rauhwaacken. Auch die Hypothese von MASSON (1972), der eine Brecciiierung durch hydraulische Bruchbildung vorschlägt, würde nach unserer Auffassung zu Gesteinen führen, die nicht unserer Vorstellung von Rauhwaacke entsprechen.

Als Ursprungsgestein nehmen wir eine Wechsellagerung von Dolomiten und evaporitischen Gesteinen, vorwiegend Anhydrit und Gips, an. Zur Brecciiierung der Dolomite stehen drei Möglichkeiten (und ihre Kombinationen) zur Diskussion:

1. Sedimentäre bis frühdiagenetische Entstehung,
2. Entstehung durch Hydratation von Anhydrit in Gips (Quellung),
3. Entstehung bei tektonischen Vorgängen.

Zu 1. Hinweise, die auf eine *sedimentäre bis frühdiagenetische Entstehung* hindeuten, konnten wir am uns zur Verfügung stehenden Material keine finden, weder Breccien in noch schwach lithifizierten Sedimenten noch Sedimentstrukturen, die darauf hindeuten. Sedimentäre bis frühdiagenetische Breccienbildungen, z. B. durch Sturmfluten, Hurrikane, durch Entwässerung von Gips oder Schrumpfung der Sedimente durch Austrocknung usw., kommen natürlich vor, sind jedoch für die Rauhwaacken-Genese wahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung.

Zu 2. BRÜCKNER (1941) nahm an, dass die Brecciiierung der Dolomitbänke durch das *Quellverhalten von Anhydrit* erklärt werden kann. Durch die Hydratation von Anhydrit entsteht eine Volumenzunahme. Durch die dabei auftretenden Quelldrücke erwartet BRÜCKNER ein Zerbrechen der Dolomitlagen. Eigene Untersuchungen sowie solche, die am Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich durchgeführt wurden, zeigten jedoch, dass sich keine sehr grossen Quelldrücke und keine extremen Volumenzunahmen bei der Hydratation von mehr oder weniger reinen Anhydritgesteinen ergeben. Die Langzeit-Oedometertests ergaben für relativ reine Anhydritgesteine (kleiner Tongehalt) Quelldrücke, die deutlich unter 2 kg/cm² lagen (AMBERG 1977, GYSEL 1977). Es wurden auch zylindrische Anhydritproben (40 × 38 mm Ø) aus verschiedenen Orten der Schweiz (MÜLLER 1976) während längerer Zeit in Wasser gelagert. Die Volumenzunahme in Funktion der Zeit (Fig. 1) ist anfänglich von einem raschen Anstieg gekennzeichnet. Nach einer gewissen Zeit nimmt das Volumen jedoch nur sehr geringfügig zu. Im ganzen gesehen blieb bei

diesen Versuchen die Volumenzunahme bescheiden. So überstiegen die Werte (mit einer Ausnahme) nie die 1%-Grenze (MÜLLER & BRIEGEL 1977, AMBERG 1977, GYSEL 1977). Ein entsprechend inverses Bild zeigten dagegen die Kurven im Diagramm «Porosität in Funktion der Zeit» (Fig. 1). Die Porosität nimmt anfänglich deutlich ab und pendelt sich dann im Laufe der Zeit auf einen bestimmten Wert ein. Es konnte beobachtet werden, dass die kommunizierenden Klüfte und Poren von einer sich bildenden Gipshaut ausgekleidet werden, welche eine fortschreitende Hydratation verlangsamt oder gar verhindert. Beobachtungen an derartigen Quellversuchen lassen vermuten, dass die Umkristallisation von Anhydrit in Gips über die flüssige Phase verläuft. So bildet sich Gips vermutlich nur dort, wo genügend Platz vorhanden ist.

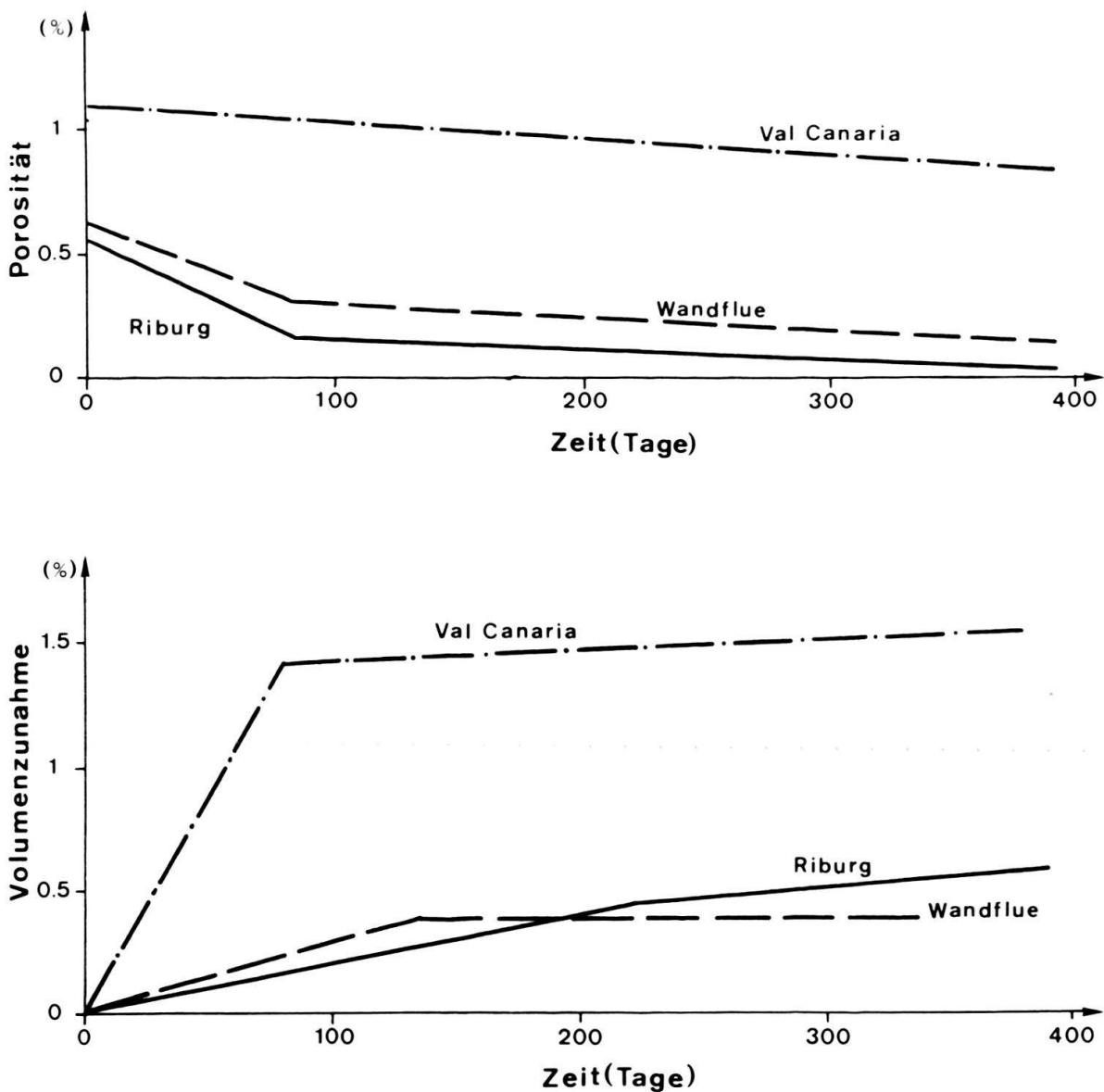


Fig. 1. Quellversuche an verschiedenen zylindrischen Anhydritproben aus der Val Canaria (Piora-Mulde) und dem Tafeljura (Wandflue und Riburg). a) Porosität in Funktion der Zeit, b) Volumenzunahme in Funktion der Zeit.

Diese Ergebnisse zeigten, dass eine Brecciiierung der Dolomitbänke im Sinne von BRÜCKNER (1941) kaum möglich ist, da die kleinen Quelldrücke nicht ausreichen, um Dolomitlagen zu zerbrechen.

Ein Ereignis, das diesem Befund scheinbar widerspricht, muss jedoch noch diskutiert werden. Beim Bau des Belchentunnels kam es im Bereich des Anhydrits des Keupers zu enorm hohen Quellungsraten bis zu 10% (GROB 1972). Die Anhydritgesteine in der Anhydritgruppe und im Gipskeuper des Jura bestehen stellenweise aus einer feinen Wechsellagerung von Anhydrit und Ton. Die Gesteine des Jura unterlagen jedoch keiner Metamorphose, welche ausreicht, die Quellfähigkeit der Tonmineralien zu zerstören. An den festgestellten hohen Quellungsraten scheinen nun weitgehend die Tonmineralien verantwortlich zu sein. Der Einfluss der Tonmineralien auf die Quellfähigkeit der Anhydritgesteine illustrierte uns eindrucksvoll eine Anzahl Bohrkerne von der Wandflue (Tafeljura). Diese Kerne stammten aus der Anhydritgruppe und waren etwa zwei Jahre unter freiem Himmel in Bohrkisten gelagert worden. An Stellen, wo die Anhydritkerne einen grösseren Anteil von Tonmineralien enthielten, waren die Bohrkisten durch gequollene Kerne gesprengt worden. An Stellen mit kleinem Tongehalt besaßen die Anhydritkerne noch weitgehend ihren ursprünglichen Kerndurchmesser. Nur eine Haut aus Gips von weniger als 1 mm Dicke umsäumte die Kerne. Bei Anhydriten aus Gebieten mit erhöhter Metamorphose sind keine solchen Quellerscheinungen nachgewiesen worden, da offenbar die Quellfähigkeit des Tonmineralanteils verlorenging.

Zu 3. Die meisten Indizien zur Brecciiierung der Dolomitbänke weisen jedoch auf *tektonische Vorgänge* hin.

- So finden sich Rauhacken oft stratiform an tektonischen Abscherungshorizonten. Ein Beispiel dazu ist die Abscherung des Oberbaues vom Unterbau in den Engadiner Dolomiten, die vorwiegend an die Rauhacke der Raibler Formation (SPITZ & DYHRENFURTH 1914) gebunden ist. Ein weiteres Beispiel ist die Trennung der beiden Lechtaldecken I und II. Die Überschiebung erfolgt nach BACHMANN & MÜLLER (1981) in der chemischen Serie der Raibler Schichten. Der Abscherungshorizont besteht aus Anhydrit- und Dolomitgesteinen. Weitere Beispiele nennen auch etwa LEINE (1971), JÄCKLI (1941) oder GENGE (1952).
- In nicht allzu stark deformierten Rauhacken findet man oft Strukturen, die auf Zerrung hinweisen. So lassen sich auf Schichtflächen oft «chocolate tablets»-Strukturen erkennen, z. B. in der Rauhacke der Raibler Formation im Ofenpassgebiet (Fig. 2). Im Schnitt senkrecht zur Schichtung findet man schichtparallele Strukturen mit rechteckigen, rhomben- oder trapezförmigen Breccienkomponenten oder gleichgeformte ausgelaugte Hohlräume der einstigen Komponenten, gekammert durch ein Gerüst von Kalzitwändchen.

Diese beiden Strukturtypen entstehen bei Plättung und einer zusätzlichen einfachen Scherung, wie dies in Figur 3 schematisch dargestellt wurde. Eine solche Boudinierung der Dolomitbänke scheint uns eine plausible Möglichkeit der Brecciiierungen zu sein. Bedingung für einen solchen Mechanismus ist ein genügend grosser Kompetenzkontrast zwischen den beiden Materialien. Um dies zu prüfen, wurden Triaxialexperimente an den vermutlich beteiligten Materialien Anhydrit und Dolomit durchgeführt. Für die Versuchsbeschreibung siehe MÜLLER & BRIE-

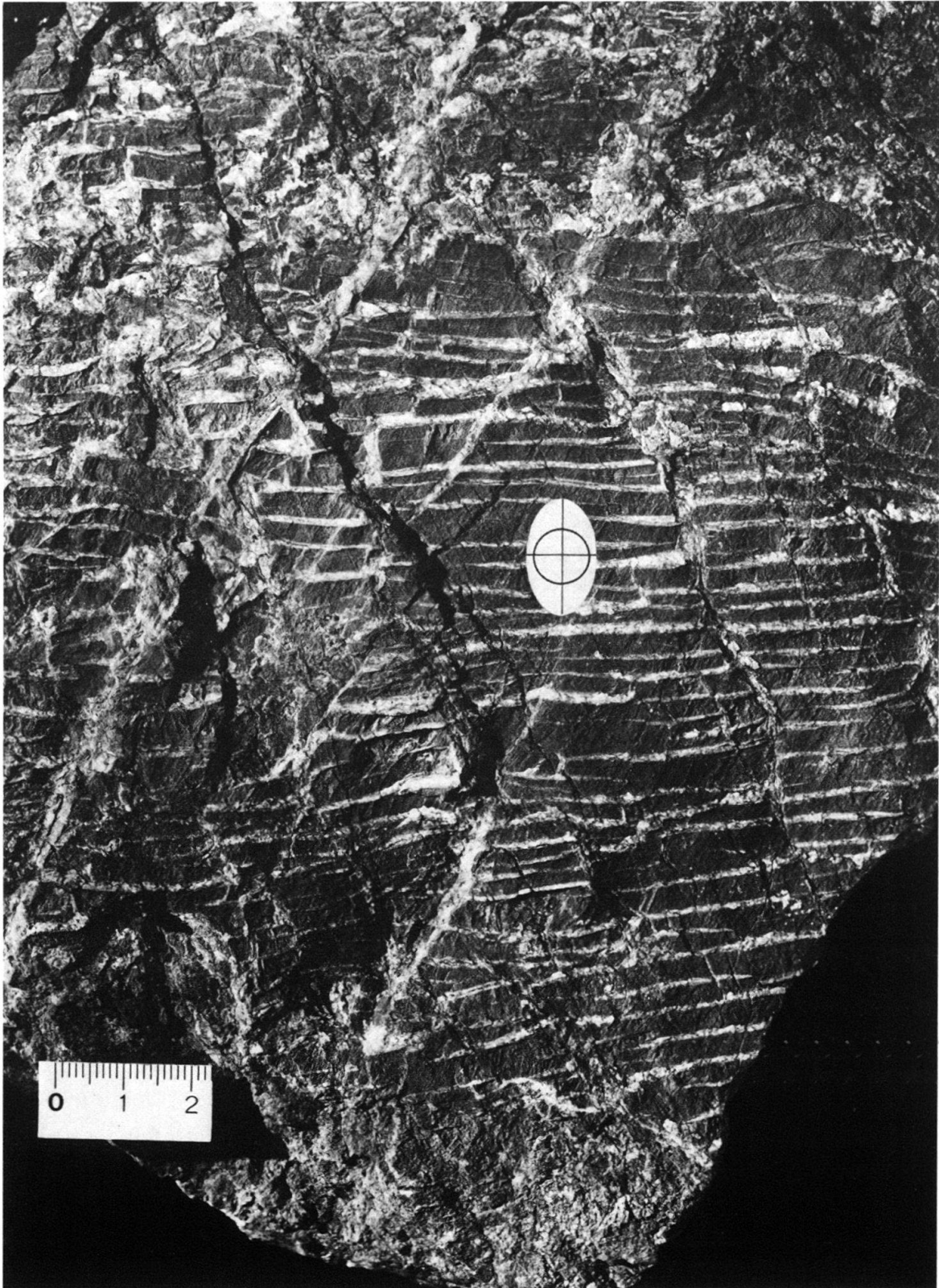


Fig. 2. «chocolate tablets»-Strukturen aus der Rauhwacke der Raibler Schichten (Engadiner Dolomiten). Die grösste Streckungskomponente liegt in Nord-Süd-Richtung, eine weitere, kleinere Streckungskomponente verläuft in West-Ost-Richtung. Auch die kleine Achse des Verformungsellipsoids ist noch grösser als der ursprüngliche Kreisdurchmesser.

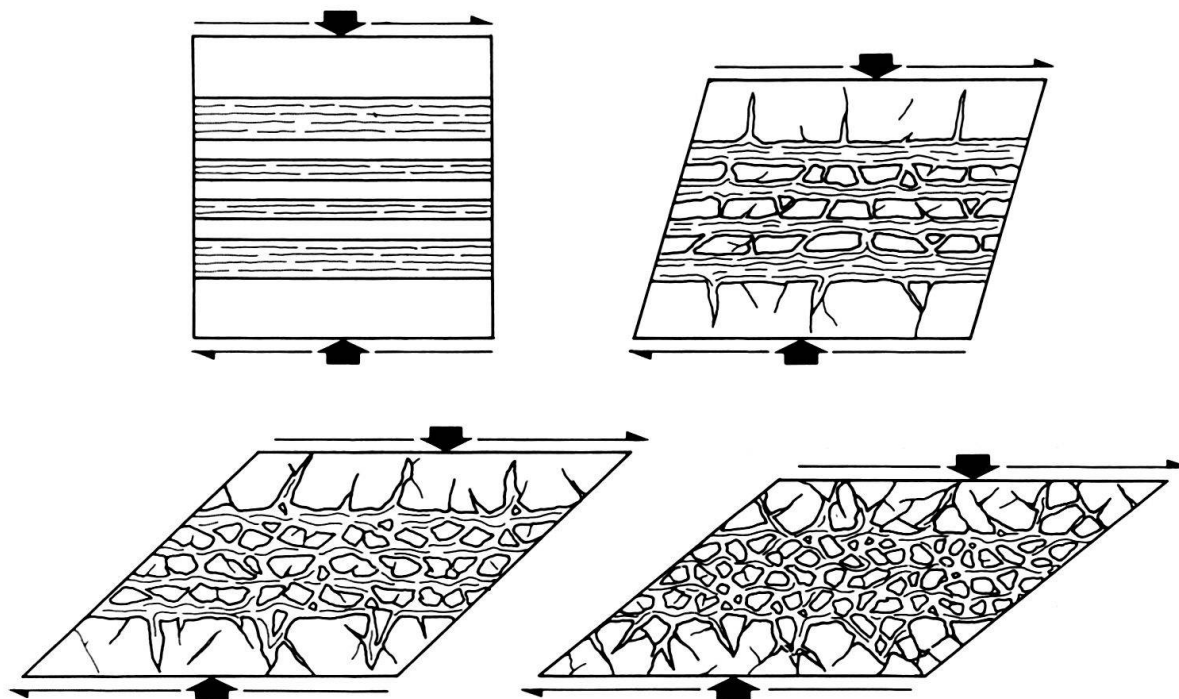


Fig.3. Schematische Darstellung der Brecciation einer Dolomit-Anhydrit-Wechselagerung durch Boudinage.

GEL (1977). Die Experimente wurden bei verschiedenen Manteldrücken, bei einer Temperatur von $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Verformungsrate von $2 \times 10^{-5}/\text{sec}$ durchgeführt. Als Probenmaterial diente feinkörniger Rötidolomit und feinkörniger Anhydrit (MÜLLER et al. 1981). Aus dem Diagramm «Festigkeit in Funktion des Manteldrucks» (Fig.4) ist der sehr deutliche Kompetenzunterschied zwischen dem extrem harten, spröden Dolomit und dem sich duktil verformenden Anhydrit ersichtlich. Während die Dolomitkurve mit zunehmendem Manteldruck linear steil ansteigt, verlässt die Anhydritkurve den Sprödbereich schon bei einem Manteldruck um 500 bar.

Ein weiteres Experiment demonstriert die Brecciation einer Dolomitlage in einer Anhydritmatrix. Für diesen Versuch wurden zylindrische, 30 mm lange Anhydritproben halbiert und dazwischen eine 1 mm dicke Scheibe von Rötidolomit eingelegt. Dieses «Sandwich» wurde dann bei einem Manteldruck von 1,5 kbar, sonst aber bei denselben Bedingungen über 40% deformiert. Die Anschliffaufnahme (Fig.5) zeigt deutlich die beginnende Sprödbuchbildung der Dolomitlage, während der Anhydrit duktil verformt ist. Dieses Beispiel zeigt, dass eine Brecciation der Dolomitlagen bei Laborbedingungen erfolgen kann.

Figur 6 zeigt Daten für Anhydrit (MÜLLER et al. 1981) und Dolomit (HEARD 1976) aus Laborexperimenten auf geologisch relevante Deformationsraten von $10^{-10}/\text{sec}$ und $10^{-14}/\text{sec}$ extrapoliert. In diesem Diagramm ist die Fließfestigkeit in Funktion der Temperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass Anhydrit bei einer Verformungsrate von $10^{-14}/\text{sec}$ schon bei einer Temperatur unter $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu fließen beginnt, der Dolomit hingegen bei gleichen Bedingungen sich noch extrem spröde und somit kompetent verhält. Eine Brecciation der Dolomitbänke bei

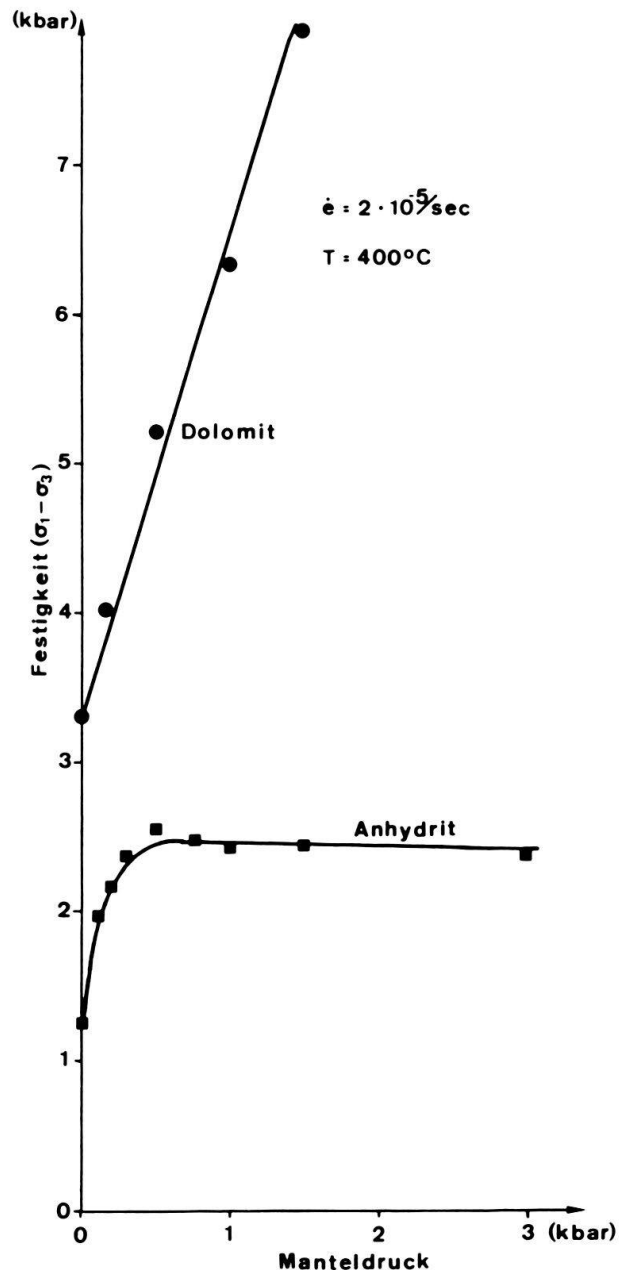


Fig.4. Festigkeit in Funktion des Manteldrucks für Rötidolomit sowie feinkörnigen Anhydrit der Wandflue. Die Triaxialexperimente wurden bei einer Versuchstemperatur von 400°C und einer Verformungsrate von $2 \times 10^{-5}/\text{sec}$ durchgeführt.

diesen geologisch relevanten Bedingungen ist also auch aus rheologischer Sicht möglich. Solche tektonischen Dolomitbreccien in einer Anhydritmatrix findet man oft in Stollen oder in Bohrkernen (BACHMANN & MÜLLER 1981, Tf. 1b), jedoch nicht an der Oberfläche, da Anhydrit bei Anwesenheit von Wasser schon bei Temperaturen unter 55°C nicht mehr stabil ist. Aus der Schweiz kennen wir Dolomitbreccien in Anhydritmatrix aus Bohrungen bei Bex (Ultrahelvetische Zone). Auch BRÜCKNER (1941) beschrieb zahlreiche Dolomitbreccien in anhydritischer Matrix aus dem Lötschbergtunnel. Figur 7 zeigt ein stark deformiertes Anhydrit-/Dolomitgestein aus einem Druckstollen in Guatemala. Das unterschiedliche rheologische Verhalten von Dolomit und Anhydrit ist deutlich erkennbar. Die eckigen Dolomitkomponenten, die bei der Deformation entstanden sind und nun vom Anhydrit umflossen werden, weisen auf sprödes Bruchverhalten des Dolomits hin.

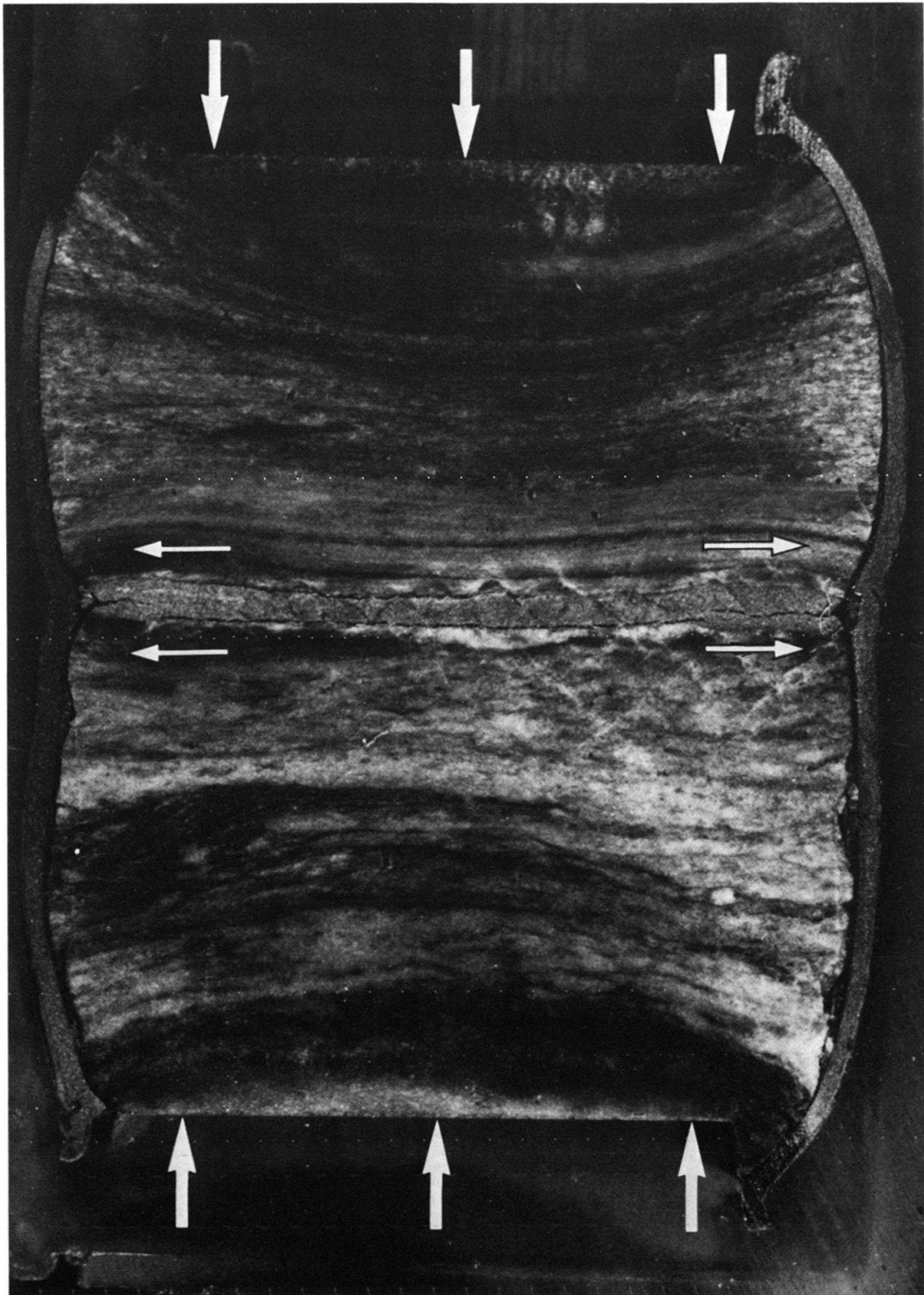


Fig. 5. Beginnende Breccienbildung einer Dolomitlage in einer duktil verformten Anhydritmatrix. Das Triaxialexperiment wurde bei einer Temperatur von 400 °C, einem Manteldruck von 1,5 kbar und einer Verformungsrate von 2×10^{-5} /sec durchgeführt. Die Probe wurde um über 40% verformt.

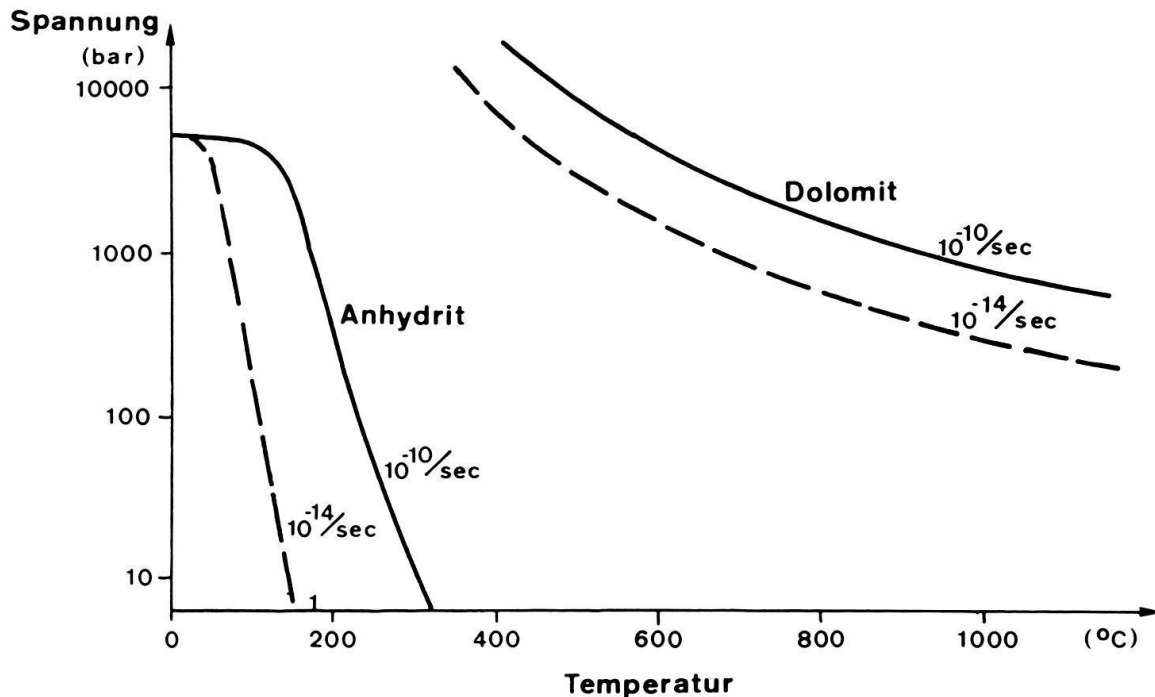
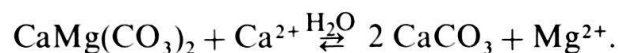


Fig.6. Fließverhalten von Anhydrit und Dolomit bei geologisch relevanten Deformationsraten von $10^{-10}/\text{sec}$ und $10^{-14}/\text{sec}$.

4. Verwitterung

Die Rauhacke erhält ihr eigentliches Aussehen erst durch die Verwitterung. Dies konnte BRÜCKNER (1941) nachweisen, indem er beim Bau des Lötschbergtunnels feststellte, dass oberflächlich anstehende Rauhacke im Tunnelinnern nur als unverwittertes Dolomit-/Anhydritgestein vorkam. Der Verlauf der wichtigsten Reaktion des Verwitterungsprozesses lässt sich auf folgende vereinfachte Kurzform bringen:



Bei einem $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ -Verhältnis ≥ 1 läuft die Reaktion in Richtung Dolomitisation ab (Hsü 1967), andernfalls in Richtung Dedolomitisation.

BRÜCKNERS Quellwasseranalysen aus bekannten Rauhacken-Gebieten ergaben $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ -Verhältnisse, die alle deutlich unter 1 liegen. Der Kalziumionenüberschuss, der die Richtung der Reaktion bestimmt, wird vorwiegend von Anhydrit oder Gips geliefert, da diese Sulfatgesteine viel leichter löslich sind als Dolomit und Kalzit. In diesen Ca-reichen Porenwässern geht Dolomit leicht in Lösung, wobei Kalzit ausgeschieden wird.

Dieser Dedolomitisationsvorgang erklärt auch die oft beobachtete zellenartige Struktur sowie die grosse Porosität der Rauhacken. Aus der ehemaligen tektonischen Breccie werden die dolomitischen Komponenten gelöst und die anhydritische Matrix durch den ausscheidenden Kalzit ersetzt. Freiwerdende Mg^{2+} - und SO_4^{2-} -Ionen, die keine schwerlöslichen Verbindungen eingehen, sowie überschüssige Ca^{2+} - und CO_3^{2-} -Ionen werden durch die zirkulierenden Porenwässer abgeführt. Dieser Substanzverlust erklärt die grosse Porosität der Rauhacken.

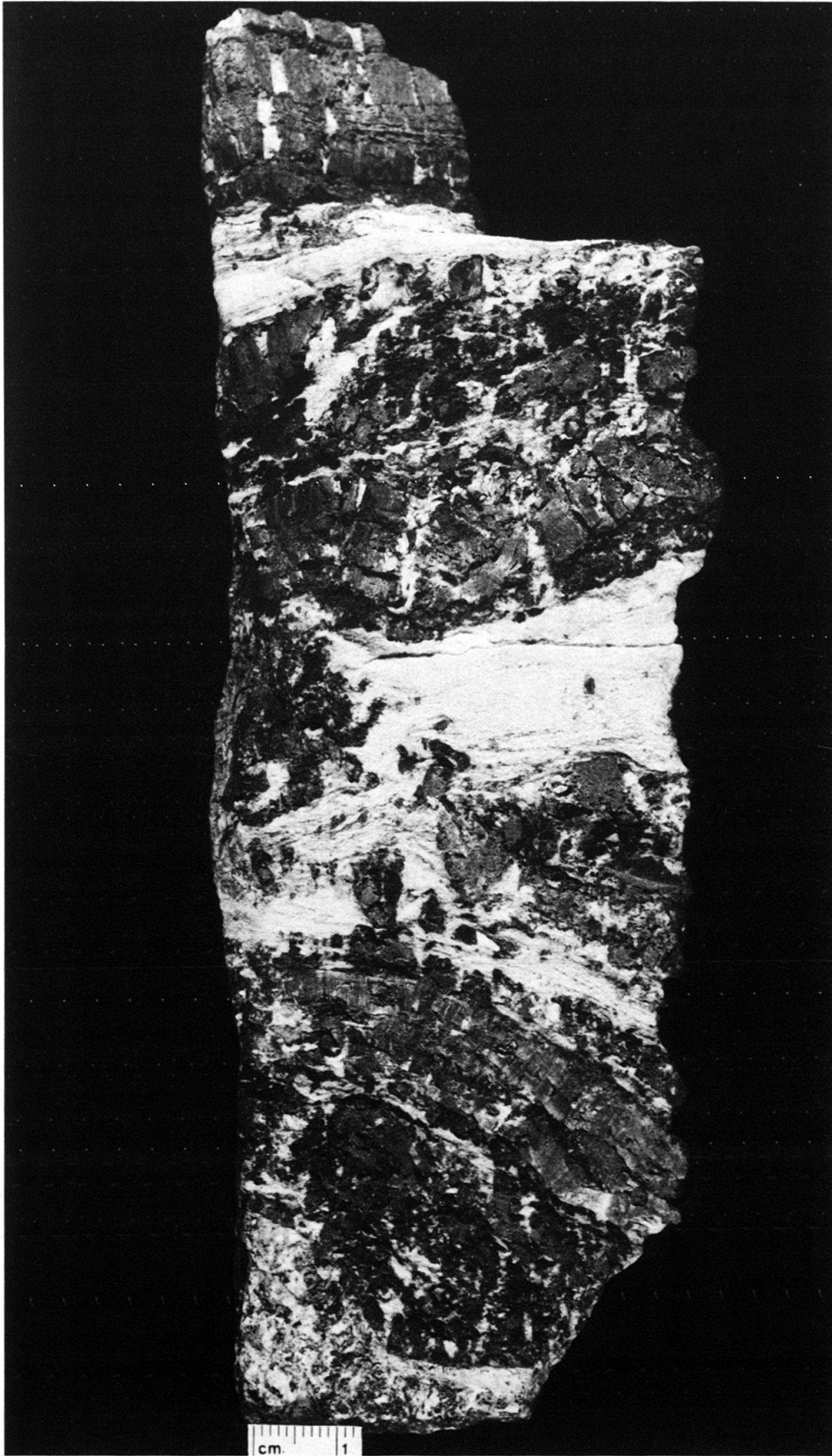


Fig. 7. Breccie mit dunklen Dolomitkomponenten in heller, duktil verformter Anhydritmatrix. Probe aus einem Druckstollen in Pueblo Viejo-Quixal (Guatemala).

5. Schlussfolgerung

- Das Ausgangsgestein von Rauhacke oder Zellendolomit ist eine Wechsella-
gerung von Dolomit- und Anhydrit- bzw. Gipssteinen, die akzessorisch auch
noch Kalk und Ton enthalten können.
- Die Rauhacken sind darum, zumindest ursprünglich, stratigraphisch horizon-
tierte Gesteine.
- Eine Brecciiierung der Dolomitlagen erfolgt durch das extrem unterschiedliche
Materialverhalten von Anhydrit und Dolomit bei tektonischer Beanspruchung.
Während feinkörniger Anhydrit bei geologisch relevanten Deformationsraten
schon bei Temperaturen unter 100 °C zu fließen beginnt, verhält sich Dolomit
bei gleichen Bedingungen spröde. Die grosse Mobilität des Anhydrits prädesti-
niert diese Schichten als Abscherungshorizonte. Bei tektonischer Beanspruchung
kommt es dann zu schichtparallelem Gleiten, bedingt durch einfache Scherung,
und einer zusätzlichen Plättung. Eine Brecciiierung der Dolomitbänke erfolgt
durch Boudinierung oder durch Zerbrechen bei Faltung.
- Der Name Rauhacke gilt nur für verwittertes Gestein (BRÜCKNER 1941); es ist
also nur eine oberflächliche Erscheinung. Anhydrit und Gips sind relativ
leichtlöslich. In Lösungen mit einem grossen Anteil an Kalziumionen wird
Dolomit leicht zersetzt. Der Überschuss an Kalziumionen vermindert die
Löslichkeit des Kalziumcarbonats, wodurch sekundär Kalzit ausgeschieden
wird. Dies vor allem an jenen Stellen, wo Anhydrit zuerst weggelöst wurde. Man
findet oft die negative Abbildung der ursprünglichen Breccienstruktur, d.h. die
Komponenten sind weggelöst und die Matrix durch Kalzit ersetzt. Ein Grossteil
des ursprünglichen Materials wird in Lösung (z. B. Mg²⁺-, SO₄²⁻- sowie über-
schüssige Ca²⁺- und CO₃²⁻-Ionen) kontinuierlich abgeführt, wodurch die grosse
Porosität dieses Gesteins erklärt werden kann.

Verdankungen

Der Autor dankt U. Briegel und A. Uhr für die kritische Durchsicht des Manuskripts, M. Casey für die Übersetzung des Abstracts, W. Klemenz für die Proben aus Guatemala sowie U. Gerber für photographische Arbeiten. Die Professoren H. Laubscher und R. Trümpy haben als Begutachter des Manuskripts wertvolle Hinweise beigetragen.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMBERG, G. (1977): *Quelluntersuchungen an Anhydritgestein*. – Inst. für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, Ber. Nr. 3622.
- BACHMANN, G.H., & MÜLLER, M. (1981): *Geologie der Tiefbohrung Vorderriss I*. – Geologica bavar. 81, 17–53.
- × BRÜCKNER, W. (1941): *Über die Entstehung der Rauhacken und Zellendolomite*. – Eclogae geol. Helv. 34, 117–134.
- BRUNNSCHWEILER, R.O. (1948): *Beiträge zur Kenntnis der Helvetischen Trias östlich des Klausenpasses*. – Mitt. Geol. Inst. Univ. Zürich (C), 33.
- CADISCH, J. (1953): *Geologie der Schweizer Alpen*. – Wepf, Basel.
- CORNELIUS, H.P. (1927): *Über tektonische Breccien, tektonische Rauhacken und verwandte Erscheinungen*. – Cbl. Mineral. Geol. Paläont. [Abt. B], p. 120–130.
- (1935): *Geologie der Err-Julier-Gruppe*. – Beitr. geol. Karte Schweiz 70.

- GENGE, E. (1952): *Einige Beobachtungen an Rauhackenvorkommen der Klippendecke im hinteren Diemtigtal (Berner Oberland)*. – *Eclogae geol. Helv.* 45, 281–284.
- GROB, H. (1972): *Schwellendruck im Belchentunnel*. In: GROB, H., & KOVARI, K.: *Berichte, Int. Symp. für Untertagebau, Luzern*.
- GYSEL, M. (1977): *A Contribution to the Design of a Tunnel Lining in Swelling Rock*. – *Rock Mech.* 10, 55–71.
- HEARD, H. C. (1976): *Comparison of the flow properties of rocks at crustal conditions*. *Phil. Trans. r. Soc. London (A)*, 283, 173–186.
- HSÜ, K. J. (1967): *Chemistry of dolomite formation*. In: *Developments in Sedimentology, 9B, Carbonate Rocks* (p. 169–191). – Elsevier, Amsterdam.
- JÄCKLI, H. (1941): *Geologische Untersuchungen im nördlichen Westschams (Graubünden)*. – *Eclogae geol. Helv.* 34, 17–105.
- JERZ, H. (1966): *Untersuchungen über Stoffbestand, Bildungsbedingungen und Paläogeographie der Raibler-Schichten zwischen Lech und Inn (nördliche Kalkalpen)*. – *Geologica bavar.* 56, 3–100.
- LEINE, L. (1971): *Rauhacken und ihre Entstehung*. – *Geol. Rdsch.* 60, 488–524.
- MASSON, H. (1972): *Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique*. – *Eclogae geol. Helv.* 65/1, 27–41.
- MÜLLER, W. H. (1976): *Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit (Bericht Nr. 1)*. – Lab. exper. Geol. ETH Zürich.
- MÜLLER, W. H., & BRIEGEL, U. (1977): *Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit (Bericht Nr. 2)*. – Lab. exper. Geol. ETH Zürich.
- (1977): *Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit aus der Schweiz*. – *Eclogae geol. Helv.* 70/3, 685–699.
- MÜLLER, W. H., SCHMID, S. M., & BRIEGEL, U. (1981): *Deformation experiments on anhydrite rocks of different grain sizes: rheology and microfabric*. – *Tectonophysics* 78, 527–543.
- SPITZ, A., & DYHRENFURTH, G. (1914): *Monographie der Engadiner Dolomiten zwischen Schuls, Scansfs und dem Stilfserjoch*. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 44, 1–235.