

Zeitschrift:	Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber:	Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band:	88 (1995)
Heft:	1
Artikel:	Die Entstehung von Rauhwacken durch die Verkarstung von Gips
Autor:	Schaad, Walter
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-167665

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Entstehung von Rauhwacken durch die Verkarstung von Gips

WALTER SCHAAD¹

Key words: Evaporites, karstification, karst sediments, collapse breccias

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	60
2 Die evaporitischen Ausgangsgesteine der Rauhwacken	61
2.1 Einführung	
2.2 Beschreibung der untersuchten Evaporite	
2.3 Interpretation	
3 Beispiele von Gips- und Rauhwackevorkommen	63
3.1 Gips und Rauhwacken des Ultrahelvetikums am Stübleni, Lenk i.S.	
3.2 Die Rauhwacken der oberostalpinen Raibler Schichten in den Engadiner Dolomiten des Münster-tals (Graubünden)	
3.3 Gips und Rauhwacken in der helvetischen Glarner Decke am Wissmilen und Gipsgrat, Flumserberge	
3.4 Die wichtigsten Punkte der Feldbeobachtungen	
4 Die Entstehung von Rauhwacken: das Modell	74
4.1 Die Verkarstung der Becken-Evaporite: Bildung von Karstsedimenten	
4.2 Die Verkarstung der Sabkha-Evaporite: Bildung von Kollapsbrekzien	
4.3 Diskussion des Verkarstungsmodells	
5 Einige allgemeine Bemerkungen zu Rauhwacken	81
5.1 Datierung der Rauhwacken	
5.2 Tiefgang der Evaporitverkarstung	
5.3 Die tektonische Komponente in den Rauhwacken	
5.4 Zementation und Verwitterung der Rauhwacken	
5.5 Einige Gedanken zum «Rauhwackeproblem»	
6 Schlussfolgerungen	88

¹ Geologisches Institut, Baltzerstrasse 1, 3012 Bern

ZUSAMMENFASSUNG

Mit Felduntersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei der Verkarstung von evaporitischen Ausgangsgesteinen Rauhwacken gebildet werden. Bei den evaporitischen Ausgangsgesteinen können dolomitführender Gips und gipsführender Dolomit als Endglieder ausgeschieden werden. Die Verkarstung dieser unterschiedlichen Ausgangsgesteine führt auch zu unterschiedlich ausgebildeten Rauhwacken. Mit den dolomitführenden Gipsgesteinen sind unstrukturierte, häufig polymikte Rauhwacken assoziiert, welche die Formen der Karsthohlräume nachzeichnen (Karstsedimente s.str.). Bei der Verkarstung von gipsführenden Dolomitgesteinen entstehen stratiforme Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten (Kollapsbrekzien).

In allen von uns untersuchten Beispielen sind die Rauhwacken nach den alpinen Deformationen entstanden und wahrscheinlich quartären Alters. In einigen Fällen dürfte die Verkarstung der Evaporite mit fluviatilen oder fluvioglazialen Prozessen an der Erdoberfläche verbunden gewesen sein. Deshalb haben die Rauhwacken selber nichts mit der alpinen Tektonik zu tun. Es sind vielmehr ihre evaporitischen Ausgangsgesteine, die eine wichtige Rolle als Abscherhorizonte bei Deckenbewegungen und als inkomp petente Schichten bei Faltung gespielt haben.

ABSTRACT

Rauhwackes (cornieules or cargneules) are breccias with a calcareous matrix and mainly dolomitic components that weather to form cavernous rocks. They are very often associated with tectonic contacts, e.g. detachment horizons. The origin of rauhwackes is still controversial, but has been attributed to the weathering and alteration of dolomite-bearing evaporites, the tectonisation of dolomites or other processes.

New data based on field investigations show that the karstification of evaporites leads to the formation of rauhwackes. Two end member evaporitic protoliths can be distinguished: dolomite-bearing gypsum and gypsum-bearing dolomite. The karstification of the different protoliths leads to the formation of structurally distinct rauhwackes. Dolomite-bearing gypsum is associated with unstructured, often polymictic rauhwackes which reflect the shape of the karst cavities and which are interpreted as karst sediments. Gypsum-bearing dolomite occurs with stratiformal rauhwackes with fitting dolomite fragments that are arranged in layers. These rauhwackes can be regarded as collapse breccias.

All investigated rauhwackes seem to have been formed after the alpine deformations and are probably of Quaternary age. In certain cases, the karstification of the evaporites and the formation of rauhwackes may have been favoured by fluvial or fluvioglacial processes at the surface. Therefore these rauhwackes have nothing to do with alpine tectonics. Rather, it was the evaporitic protoliths of the rauhwackes that acted as detachment horizons and incompetent layers during folding.

1. Einleitung

Seit der Arbeit von Brückner (1941) zur Genese von Rauhwacken ist eine ganze Reihe von Publikationen erschienen, die sich mit den verschiedenen Aspekten der Entstehung dieser Gesteine auseinandergesetzt haben. Dementsprechend vielfältig sind die Rauhwacken auch gedeutet worden, beispielsweise als sedimentäre Brekzien (Brunnenschweiler 1948, Krauter 1971), als kataklasierte Dolomitgesteine (Leine 1971, Riedmüller 1977), als verwitterte Dolomit-Gips-Brekzien (Brückner 1941, Müller 1982, Vearncombe 1982), als Produkte hydraulischer Bruchbildung in Dolomitgesteinen (Masson 1972), als Verkarstungsprodukte brekziierter Karbonate (Jeanbourquin 1986, 1988) oder als Dedolomite (Jeanbourquin 1986). Dabei ist es zur Tradition geworden, die Theorien zur Genese von Rauhwacken und deren Verfechter in drei Gruppen einzuteilen: die erste Gruppe deutet die Rauhwacken als primär-sedimentäre Brekzien, die zweite Gruppe als tektonische Brekzien und die dritte Gruppe als Verwitterungsprodukte von meist evaporitischen Ausgangsgesteinen. Obwohl viele Autoren das Zusammenspiel verschiedener Prozesse von der Ablagerung bis zur Verwitterung der (Ausgangs-)Gesteine betont haben,

zieht diese Dreiteilung wie ein roter Faden durch die Rauhwackeliteratur. Wir verzichten hier auf einen historischen Abriss des «Rauhwackeproblems» und verweisen auf die Ausführungen von Müller (1982) und Jeanbourquin (1986, 1988). Eine Quintessenz der bisherigen Arbeiten scheint zu sein, dass ähnlich aussehende Gesteine unterschiedlicher Entstehung als Rauhwacken bezeichnet werden können und dass das Rauhwackeproblem zu einem Teil auf der losen Definition des Begriffs Rauhwacke beruht. Die vorliegende Arbeit hat nun nicht zum Ziel, eine weitere Synthese zur Entstehung von Rauhwacken im allgemeinen zu liefern. Unsere Untersuchungen beschränkten sich auf die mit evaporitführenden Gesteinen assoziierten Rauhwacken, weil die Daten in der Literatur einen Zusammenhang zwischen Evaporit- und Rauhwackevorkommen nachzuweisen schienen; andererseits waren jedoch die Prozesse, die zur Umwandlung der Evaporite in Rauhwacken führten, keinesfalls geklärt, und zur Datierung und tektonischen Bedeutung der Rauhwacken gab es widersprüchliche Angaben. Mit unseren Untersuchungen wurde nicht das ganze Spektrum der möglichen Rauhwacke-Entstehungsarten abgedeckt, deshalb dürfen die Resultate auch nicht auf alle als Rauhwacken bezeichneten Gesteine angewandt werden. Die neue Deutung der Prozesse, die bei der Rauhwackisierung von Evaporitgesteinen ablaufen, liefert nun aber bessere Anhaltspunkte für die Interpretation von Rauhwackevorkommen und zur Unterscheidung von unterschiedlich entstandenen Rauhwacken.

In den folgenden Ausführungen werden zuerst die evaporitischen Ausgangsgesteine der Rauhwacken vorgestellt und interpretiert (Kap. 2), anschliessend drei Feldbeispiele von Rauhwackevorkommen beschrieben (Kap. 3) und daraus ein Modell für die Entstehung von Rauhwacken abgeleitet (Kap. 4). Im Kapitel 5 schliesslich werden einige allgemeine Aspekte der Rauhwackengenese zur Sprache kommen.

2. Die evaporitischen Ausgangsgesteine der Rauhwacken

2.1 Einführung

Die Ablagerung bzw. Ausfällung von Evaporiten geschieht vorwiegend in heißen, ariden Klimazonen und kann subaquatisch oder subaerisch erfolgen (Schreiber 1986). Die subaerischen Evaporite werden im Supratidal von flachen Küstengebieten, in sogenannten Sabkhas (= Salzebenen) gebildet, wo flachmarine, siliziklastische oder karbonatische Sedimente durch Gips und Anhydrit zementiert und/oder verdrängt werden. Die Karbonate (v.a. Aragonit) werden dabei meist dolomitisiert. Diese diagenetischen Vorgänge führen bei karbonatischen Küsten zur Bildung von dolomitischen Gesteinen mit evaporitischen Porenfüllungen und Zementen sowie cm- bis dm-mächtigen Krusten aus Gips bzw. Anhydrit (Schreiber 1986, Shinn 1986).

Die subaquatischen Evaporite werden in den oberflächennahen Bereichen von hypersalinen Wasserkörpern (Lagunen, Salinas) direkt aus dem Wasser ausgefällt und am Boden der Becken abgelagert. Auf diese Weise können relativ mächtige, z.T. halitführende Sulfatlagen gebildet werden. Gegen die Beckenränder zu schalten sich dolomitierte Karbonatlagen in die Evaporite ein und leiten schliesslich in eine Sabkha-Fazies über (Schreiber 1986).

Die Sabkha- und Becken-Evaporite sind meist eng miteinander verknüpft; sie sind nicht auf grundsätzlich verschiedene Ablagerungsmilieus zurückzuführen, sondern auf

unterschiedliche Ablagerungsmechanismen. Beide sind einem Sabkha-Milieu im weiteren Sinne zuzuordnen. Vereinfacht betrachtet kann festgestellt werden, dass die Becken-Evaporite aus Gips mit dolomitischen Lagen, die Sabkha-Evaporite (Sabkha s.str.) aus Dolomit mit evaporitischen Einschaltungen bestehen.

2.2 Beschreibung der untersuchten Evaporite

Alle von uns untersuchten Evaporitgesteine bestehen an der Erdoberfläche aus Gips und Dolomit. Relikte von Anhydrit und Vergleichsproben aus dem Lötschberg-Bahntunnel deuten darauf hin, dass der Gips aus der oberflächennahen Hydratation von Anhydrit hervorgegangen ist. Erfahrungen aus Gipsgruben zeigen, dass der Gips in einer Tiefe von etwa 30–40 m ab Oberfläche in Anhydrit übergeht (pers. Mitt. K. Stucki, Gipsunion AG, Holderbank). Der Einfachheit halber wird im folgenden Text jeweils nur von Gips die Rede sein; es darf jedoch nicht vergessen werden, dass ein Teil der Prozesse (z.B. Deformation) den anhydritischen Vorgänger des Gips betroffen hat. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Dolomit/Gips-Verhältnisse konnten folgende zwei Endglieder als Ausgangsgesteine der Rauhwacken ausgeschieden werden:

- dolomitführende Gipsgesteine
- gipsführende Dolomitgesteine

Diese beiden Endglieder sind durch Gesteine mit beliebig variierenden Dolomit/Gips-Verhältnissen miteinander verbunden.

Die dolomitführenden Gipsgesteine (Fig. 1a) bestehen aus einer Grundmasse aus Gips mit lose eingestreuten oder in Lagen angeordneten Dolomitfragmenten. Charakteristisch für die Dolomitbrekzienlagen ist ihr oft regelmässiges An- und Abschwellen (pinch and swell, Fig. 11a, b; Kap. 5.3); in den linsenförmigen Partien können die Dolomitfragmente korrespondierende (zusammenpassende) Trümmergrenzen aufweisen.

Bei den gipsführenden Dolomitgesteinen (Fig. 1b) überwiegt der Dolomitanteil denjenigen des Gips. Die Dolomitschichten sind auch in diesen Gesteinen zerbrochen, die Fragmente sind aber kaum auseinandergerissen und rotiert worden und besitzen korrespondierende Trümmergrenzen. Der Gips bildet geringmächtige Lagen zwischen den Dolomitschichten und füllt Adern und ehemalige Hohlräume innerhalb derselben.

2.3 Interpretation

Die zusammenpassenden Fragmente in den Dolomitbrekzien deuten darauf hin, dass der Dolomit ursprünglich intakte Lagen gebildet hat (Richter & Füchtbauer 1981) und dass die Ausgangsgesteine der Rauhwacken aus Wechsellagerungen von Dolomit und Gips bestanden haben. Das An- und Abschwellen der Brekzienlagen dürfte tektonischen Ursprungs sein (Kap. 5.3).

Die sedimentologische Deutung von evaporitischen Ablagerungen beruht auf der Analyse der Kristallformen, der Mikrostrukturen und der frühdiagenetischen Phänomene in diesen Gesteinen. Diese Eigenschaften sind Produkte der frühesten Entwicklungsstadien der Gesteine und in den von uns untersuchten Beispielen durch die alpinen Defor-

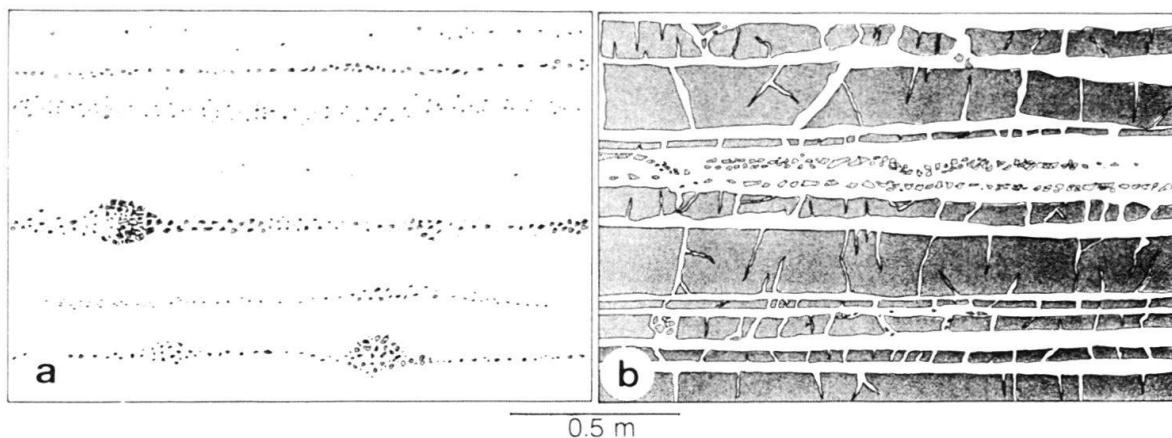


Fig. 1. Die beiden Endglieder von evaporitischen Ausgangsgesteinen; weiss = Gips, grau = Dolomit. a) dolomithaltiger Gips, b) gipsführender Dolomit. Zwischen diesen Endgliedern existieren Übergänge mit unterschiedlichen Dolomit- und Gipsgehalten.

mationen, z.T. durch eine niedriggradige Metamorphose und durch die verwitterungsbedingte Vergipsung des Anhydrits überprägt worden. Vor allem letztere macht eine sedimentologische Interpretation der Evaporite schwierig oder unmöglich (Dronkert et al. 1990). Die einzigen Hinweise auf das Ablagerungsmilieu unserer Evaporitgesteine liefern deshalb deren unterschiedlichen Dolomit/Gips-Verhältnisse. Diese sprechen bei den dolomithaltenden Gipsgesteinen für eine subaquatische Ablagerung in hypersalinen Meeresbecken, bei den gipsführenden Dolomitgesteinen für eine Bildung in einem Sabkha-Milieu (Sabkha s.str.). Obwohl diese Interpretationen nur auf schwachen Indizien beruhen, beziehen wir uns im folgenden auf die Begriffe der Becken-Evaporite (dolomitführende Gipsgesteine, Fig. 1a) und der Sabkha-Evaporite (gipsführende Dolomitgesteine, Fig. 1b).

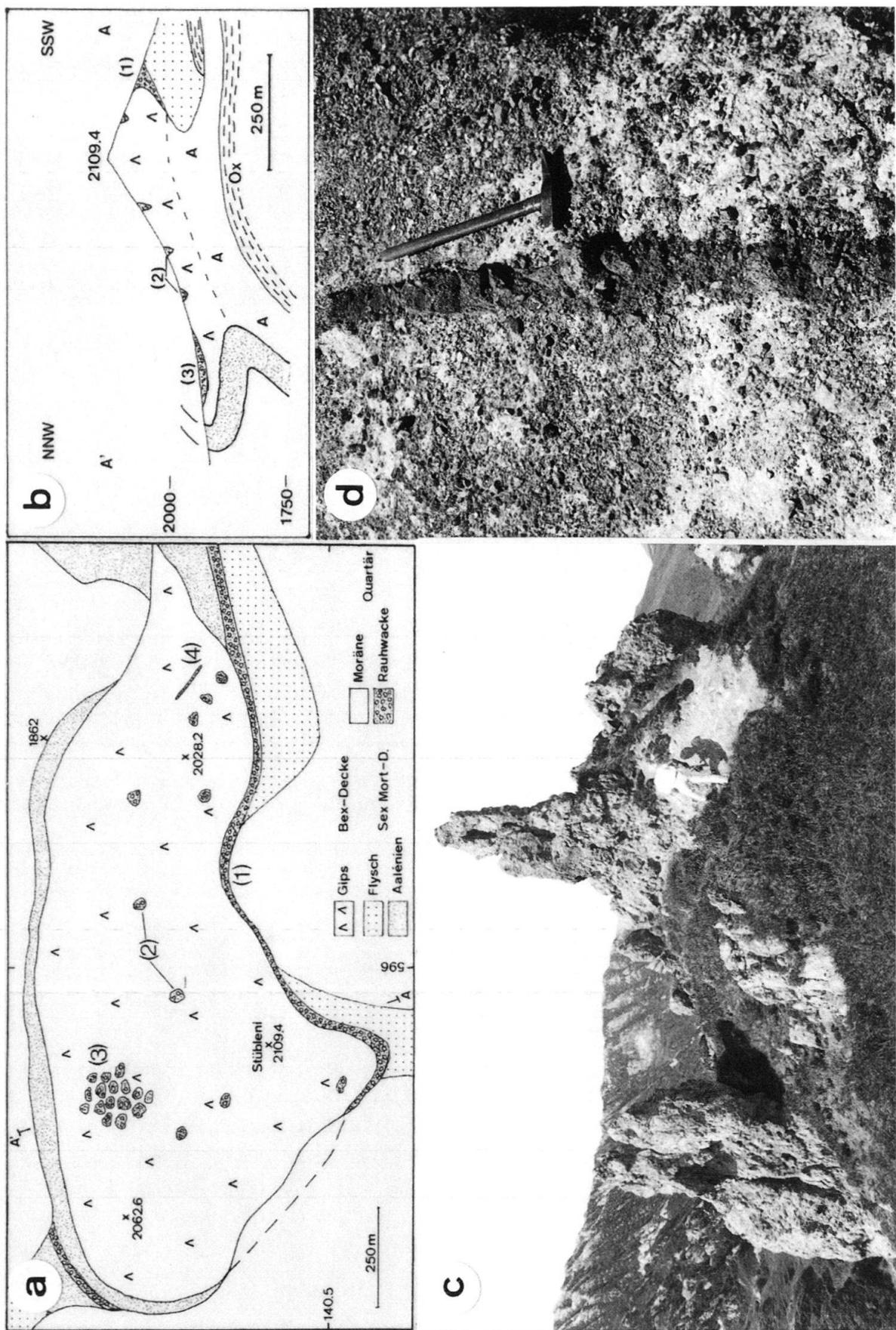
3. Beispiele von Gips- und Rauhwackevorkommen

3.1 Gips und Rauhwacken des Ultrahelvetikums am Stübleni, Lenk i.S.

Die mächtigen Gipsmassen des Stübleni, zwischen Lenk und dem Lauenensee (Berner Oberland), liegen an der Basis der ultrahelvetischen Bex-Decke, welche an dieser Stelle in die Sex Mort-Decke im Liegenden eingefaltet ist. Der Gips bildet eine nach Norden überkippte Antiklinale und wird von «Aalénienschiefern» und Flysch (Tonschiefer) der Sex Mort-Decke umhüllt (Fig. 2a, b; Badoux et al. 1962, Badoux & Lombard 1962). Aufgrund seines geringen Dolomitgehaltes gehört er nach unserer Einteilung zu den Becken-Evaporiten (Fig. 1a).

Bei den Rauhwacken am Stübleni können vier Arten von Vorkommen ausgeschieden werden (Fig. 2a, b):

- (1) ein lateral kontinuierlicher Rauhwackezug (fast ausschliesslich monomikt) an der Basis der Gipsmassen. Von den Aufschlüssen her könnte dieser Rauhwackezug den



Ausbiss einer stratiformen Rauhwackeschicht darstellen oder einen Ring um die Gipsmassen bilden, welcher keinen bedeutenden Tiefgang besitzt.

- (2) eine grosse Anzahl kleiner, manchmal länglich geformter und senkrecht orientierter Rauhwackekörper (mono- und polymikt), die in den Gips eingelagert sind und als Säulen aus diesem herausragen können (Fig. 2c),
- (3) flächendeckender Blockschutt aus Rauhwacke (mono- und polymikt) und
- (4) cm-mächtige, vertikal orientierte Gänge aus monomikter Rauhwacke (Fig. 2d).

Als Rauhwacken können nicht nur strukturlose Brekzien, sondern auch geschichtete, feinkörnige Sedimente der Silt- bis Grobsandfraktion ausgemacht werden. Grob- und feinkörnige Rauhwacken können Wechsellagerungen bilden oder als individuelle Ge steinskörper vorkommen.

Bemerkungen

- Die im Gips steckenden Rauhwackesäulen (Fig. 2c) können fast überall beobachtet werden, wo grössere Gipsmassen anstehend sind. Sie bilden wichtige Zeugen für die Rekonstruktion der Rauhwackengenese (Kap. 4).
- Ebenfalls sehr typisch für Rauhwacken sind ihre Vorkommen in Form von Block schutt. Der Blockschutt deckt den Gips in gewissen Fällen völlig zu und täuscht eine eigentliche Rauhwackeschicht vor. Die Herkunft der Blöcke ist in vielen Fällen fraglich, da in der näheren Umgebung keine anstehenden Rauhwacken vorkommen. Auch an anderen Stellen konnte beobachtet werden, dass Rauhwacken keine anste henden Felsen bilden, sondern ausschliesslich in Form von Blöcken vorkommen. Im Felde entstand jedenfalls der Eindruck, diese Blockschuttvorkommen seien ein direkt mit der Rauhwackengenese verknüpftes Phänomen.
- Im Gips des Stübleni und auch in den anderen untersuchten Gipsvorkommen kommen keine «Fremdkomponenten» vor. Als einzige Komponenten in den Gipsgesteinen konnten Dolomit- und Tonschieferfragmente beobachtet werden, welche als intraformationelle Komponenten zu betrachten sind. Die mit den Gipsgesteinen assoziierten Rauhwacken hingegen weisen häufig ein polymiktes Komponentenspektrum (Flysch gerölle) auf.

3.2 Die Rauhwacken der oberostalpinen Raibler Schichten in den Engadiner Dolomiten des Münstertals (Graubünden)

Die Gesteine des Münstertals gehören vorwiegend zu den triadischen Sedimenten der oberostalpinen Scarl-Decke und zu deren Grundgebirge, dem Sesvennakristallin (Trümpy 1980, Furrer 1985). Südlich und südöstlich von Santa Maria sind kristalline Gesteine

Fig. 2. Gips und Rauhwacken am Stübleni bei Lenk. a) Geologische Karte des Stübleni-Gebietes und b) geologisches Profil entlang der Spur A-A' (nach Badoux et al. 1962 und eigenen Aufnahmen). A = Anhydrit, Ox = «Oxfordien»-Schiefer. Die Lage der Anhydritfront (gestrichelt) ist geschätzt und durch keine Daten belegt. (1) Rauhwackezug an der Basis des Gips, (2) einzelne Rauhwackekörper innerhalb des Gips, (3) Rauhwackeblockschutt, (4) Gänge aus Rauhwacke. c) Senkrecht im Gips steckende Säule aus polymikter Rauhwacke. d) Kleiner, senkrecht im Gips stehender Gang aus monomikter Rauhwacke.

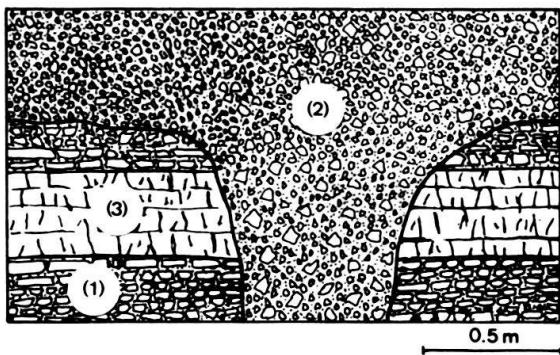


Fig. 3. Rauhwacken im Val Mora. Unstrukturierte Rauhwacken (2) wechsellagern mit veraderten Dolomiten (3) und Rauhwacken mit «Kästchenmuster» (1) oder schlagen quer durch diese hindurch (vgl. Fig. 8a).

der Ötztal-Decke auf die Scarl-Decke überschoben (Schmid 1973, Schmid & Haas 1989). In der Scarl-Decke können, getrennt durch die inkompetenten, evaporitisch ausgebildeten Raibler Schichten, zwei disharmonisch deformierte Stockwerke ausgeschieden werden: der Unterbau, welcher die untere und mittlere Trias umfasst, und der Oberbau, welcher vor allem aus dem Hauptdolomit besteht (Furrer 1985, Schmid & Haas 1989).

Die Variationen in der Ausbildung der Raibler Schichten und ihrer Rauhwacken wurden an folgenden Aufschlüssen untersucht:

- Ofenpassstrasse zwischen Passhöhe und Tschierv (820.0/168.825)
- Alp da Munt (3 km E Ofenpasshöhe; 821.250/169.500)
- Val Mora (südliches Paralleltal zum Münstertal)
- Val Schais (SE Santa Maria)

Ein Vergleich dieser Aufschlüsse hat gezeigt, dass die gipsführenden Partien der Raibler Schichten sowohl aus Sabkha-Evaporiten als auch aus Becken-Evaporiten oder einer Wechsellagerung der beiden bestehen können, dass die jeweilige Zusammensetzung aber von Ort zu Ort ändert. Gewisse Variationen im Dolomit-Gips-Verhältnis und im Gefüge der Gesteine scheinen eine direkte Folge der Deformation zu sein: im Vergleich zu den Faltenschenkeln ist der mobile Gips in den Faltenscharnieren oftmals angereichert, gleichzeitig sind die Dolomitschichten in den Faltenscharnieren viel stärker zerbrochen und zerkleinert als auf den Faltenschenkeln.

Alp da Munt:

Die Evaporite sind als fast reine Gipsgesteine ausgebildet, welche zu einer charakteristischen Dolinenlandschaft verwittern. Es sind nur sehr wenige, isolierte, kleine Rauhwackekörper zu beobachten, die häufig polymikt ausgebildet sind (Verrucano- und Kristallinkomponenten aus der überschobenen Ötztal-Decke [Schmid 1973] im Hangenden der Gipsmassen) und erosiv in den Gips eingelagert sind oder in Form von Blöcken auf diesem herumliegen.

Val Mora:

Im Val Mora sind neben den mächtigen Rauhwackeschichten keine Evaporite mehr auf-

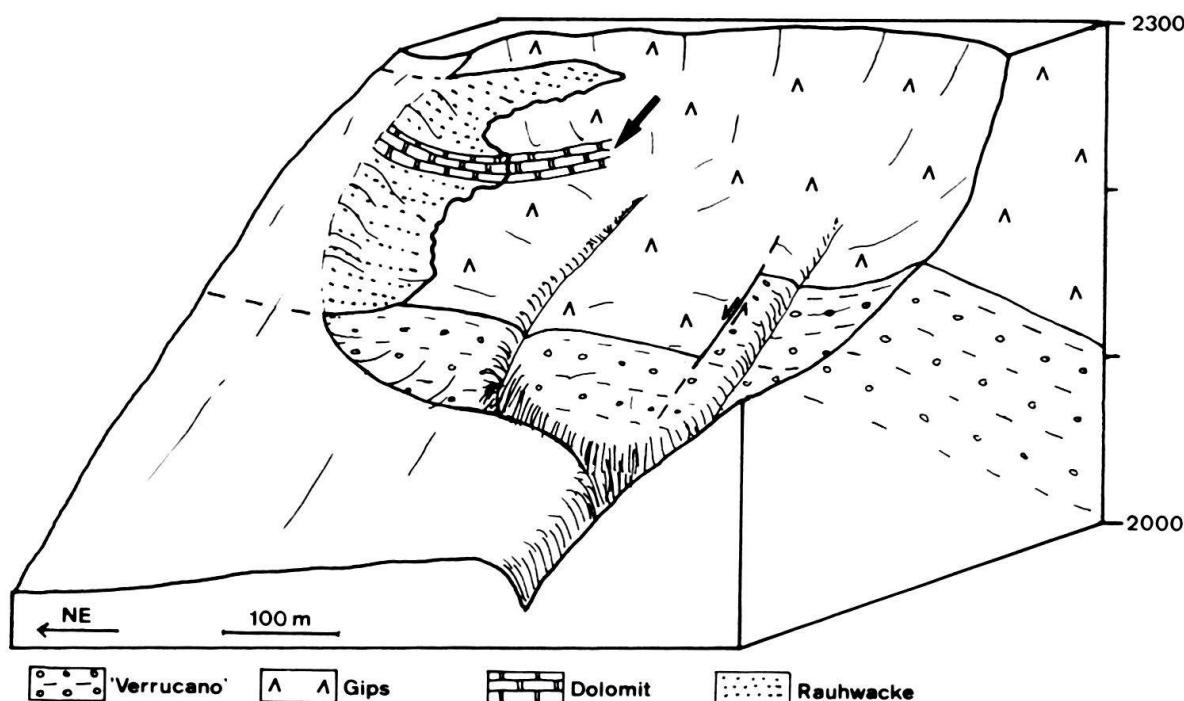


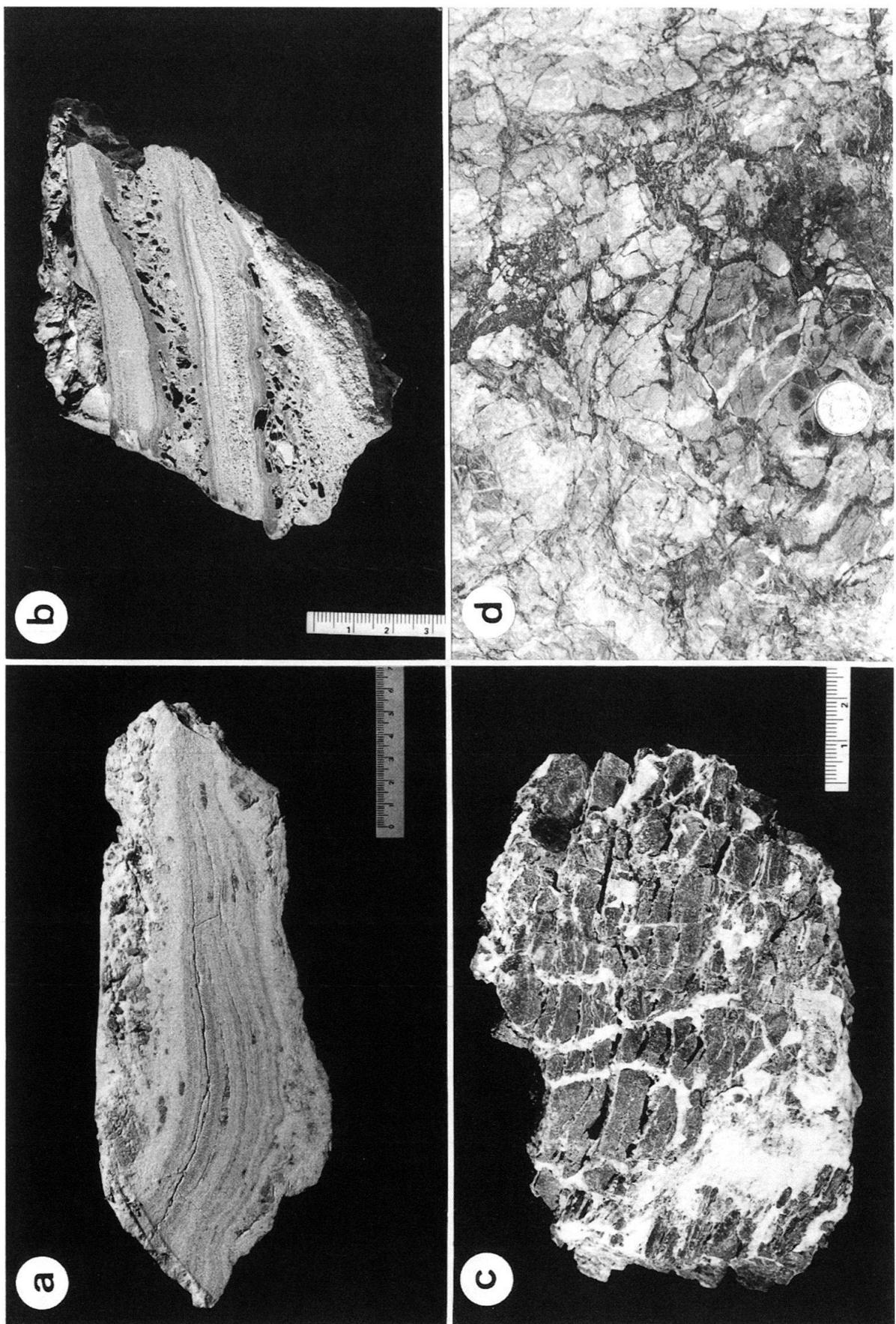
Fig. 4. Blockbild des Val Schais; die Rauhwacke kommt ausschliesslich auf der nordöstlichen Talflanke vor und erodiert durch den ganzen Gips auf den «Verrucano» hinunter. Der Pfeil markiert eine intakte Dolomitbank im Gips und in der Rauhwacke.

geschlossen. Gipsausblühungen auf den Rauhwacken sind aber ein Indiz für die ehemalige Präsenz der Evaporite. Zwei unterschiedliche Typen von Rauhwacken können im Val Mora ausgeschieden werden (Fig. 3):

- (1) Stratiforme, monomikte Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten («Kästchenmuster» nach Frank 1986; (1) in Fig. 3). Sie sind auf das engste mit zerbrochenen, mit Dolomitspat verheilten Dolomitschichten assoziiert [(3) in Fig. 3].
- (2) Strukturierte, z.T. polymikte Rauhwacken, welche eine Wechsellagerung mit den Rauhwacken von (1) bilden oder quer durch diese hindurchschlagen. Die Übergänge von konkordanter zu diskordanter Lagerung (Fig. 3) sind typisch für die beiden Rauhwackevarietäten und können auch an anderen Stellen beobachtet werden (Gipsgrat, Fig. 8a). Die Rauhwacken im Val Mora zeigen offene Falten im m- bis 10 m-Bereich, sind aber die einzigen von uns untersuchten Rauhwacken mit Deformationsstrukturen.

Val Schais:

Im Val Schais (Fig. 4) liegen die Raibler Schichten zwischen dem Münstertaler Verrucano im Liegenden und dem überschobenen Ötzalkristallin (Schmid 1973) im Hangenden. Die Raibler Schichten bestehen zu einem grossen Teil aus



- (1) Gips, welcher an dieser Stelle zu einer Mächtigkeit von mehreren 100 m angehäuft ist und nur einen geringen Dolomitgehalt aufweist (Fig. 5a). Nach unserer Einteilung gehört er zu den Becken-Evaporiten (Fig. 1a). In die Evaporite sind
- (2) einige mehrere m mächtige Dolomitschichten eingelagert, die kaum zerbrochen sind und nur vereinzelt von Gipsadern durchzogen werden. Im Liegenden und Hangenden dieser Dolomitschichten kommen
- (3) gipsführende Dolomitgesteine vor (Fig. 5c), welche das charakteristische Erscheinungsbild der Sabkha-Evaporite (Fig. 1b) aufweisen.

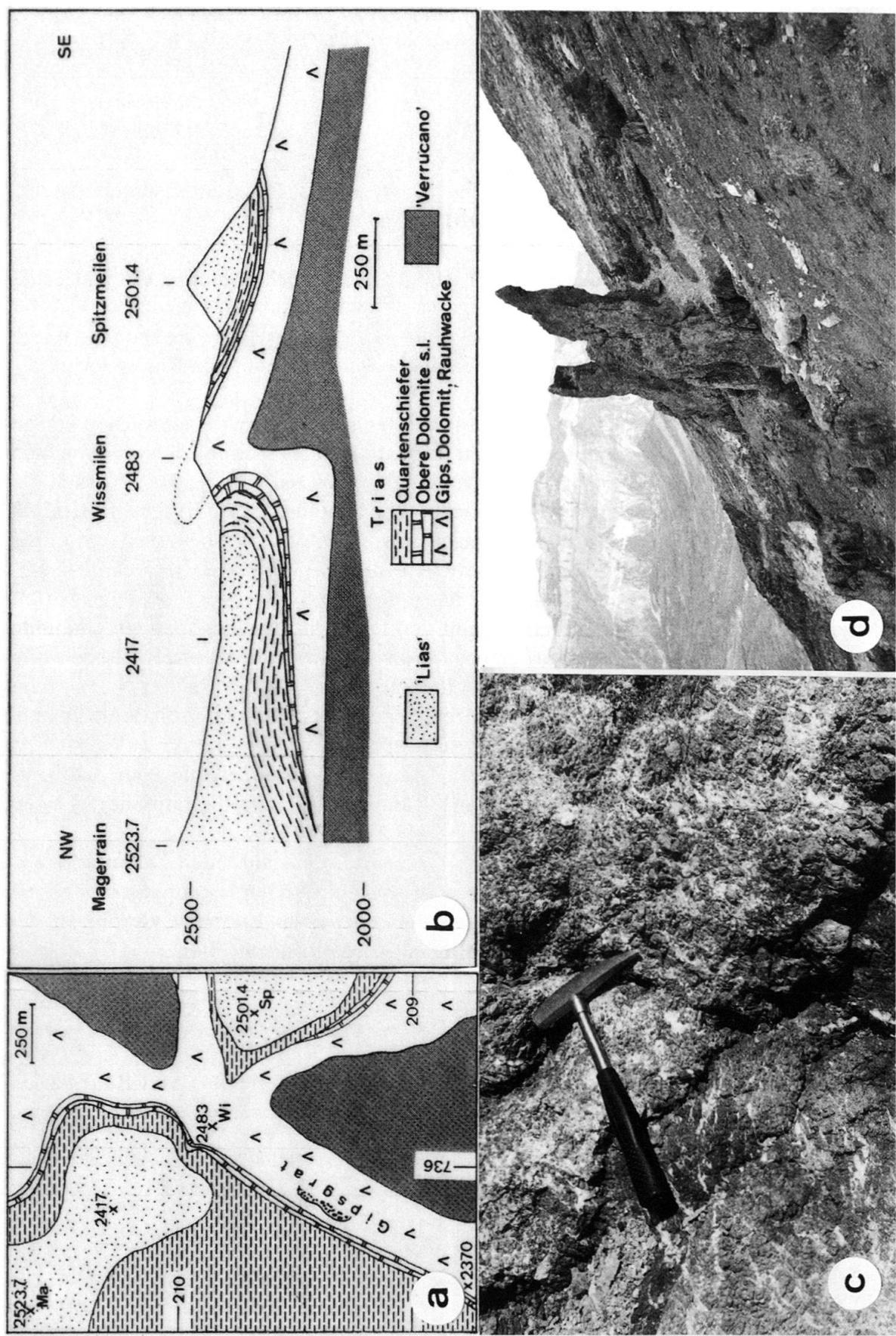
Die Rauhwacken kommen ausschliesslich auf der nordöstlichen Flanke des Val Schais vor, wo sie erosiv in die Evaporite eingelagert sind und bis auf den Verrucano hinuntergreifen (Fig. 4). Die Geometrie der Rauhwackevorkommen erlaubt eine seitliche Korrelation der evaporitischen Ausgangsgesteine mit den ihnen zugehörigen Rauhwacken:

- (1) Die dolomitarmen Gipsgesteine (Fig. 5a) werden seitlich durch Rauhwacken ersetzt, die aus (z.T. kreuz-)geschichteten, meist grobsandigen bis feinbrekziösen Sedimenten bestehen (Fig. 5b). Diese machen bei weitem den grössten Teil der Rauhwacken aus. In den obersten Partien dieser Rauhwacken kommen auch schlecht geschichtete und schlecht sortierte, matrixgestützte Brekzien vor. Das Komponentenspektrum der Rauhwacken wird von Dolomitfragmenten dominiert, ist aber durchwegs polymikt und enthält kristalline Gerölle aus der hangenden Ötztal-Decke. Das Herauswittern der dolomitischen Komponenten verleiht den feinkörnigen Gesteinen ein schaumigporöses, den grobbrekziösen Partien das für die Rauhwacken charakteristische löcherige Aussehen. Die Sedimentstrukturen in diesen Rauhwacken sind verwirrend kompliziert und durch unzählige Diskordanzen, Schichtverstellungen, Kollapsphänomene und synsedimentäre Deformationsstrukturen geprägt.
- (2) Die intakten Dolomitschichten erfahren beim seitlichen Übergang vom Ausgangsgestein in die Rauhwacke keine grosse Veränderung. Einzig die Gipsadern werden durch einen bräunlich gefärbten kalkigen Zement ersetzt.
- (3) Die mit den intakten Dolomitschichten assoziierten gipsführenden Dolomitgesteine (Fig. 5c) gehen in Rauhwacken mit zusammenpassenden Dolomitkomponenten (Fig. 5d) über. Häufig ist diese Art von Rauhwacke auch in Form von Geröllen in den grobklastischen Partien der geschichteten Sedimente (1) anzutreffen.

Bemerkungen

- In den oberostalpinen Raibler Schichten können zwei Varietäten von Rauhwacken ausgeschieden werden: (1) stratiforme, monomikte Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten, und (2) polymikte, häufig

Fig. 5. Die Rauhwacken und ihre evaporitischen Ausgangsgesteine im Val Schais. a) Dolomitführender Gips (Becken-Evaporit-Typ), b) geschichtete Rauhwacke, c) gipsführender Dolomit (Sabkha-Evaporit-Typ), d) Rauhwacke mit zusammenpassenden Dolomitfragmenten.



unstrukturierte und nicht stratiforme Rauhwacken. Bei feinkörniger Ausbildung zeigen letztere auch Sedimentstrukturen wie Schichtung, Lamination, Kreuzschichtung usw.

- Die Rauhwacken im Val Schais haben einen eher untypischen Charakter und scheinen mit fluviatilen Ablagerungen vermischt zu sein. Die geschichteten, konglomeratischen Sedimente und die matrixgestützten Brekzien beispielsweise sind eine typische Sedimentassoziation von alluvialen Schuttfächern. Ungewöhnlich für fluviatile Sedimente sind allerdings die zahlreichen Anzeichen für synsedimentäre Deformationen und die Kollapsstrukturen. Bemerkenswert ist auch die grosse Mächtigkeit, das durchwegs bunte Komponentenspektrum und das eng begrenzte Vorkommen der Rauhwacken im Val Schais.
- Die in Falten gelegten Rauhwacken des Val Mora sind die einzigen von uns untersuchten Rauhwacken, die Deformationsstrukturen aufweisen.

3.3 Gips und Rauhwacken in der helvetischen Glarner Decke am Wissmilen und Gipsgrat, Flumserberge

Der Gips und die Rauhwacken am Wissmilen und am Gipsgrat (Fig. 6a, b) gehören zur mesozoischen Bedeckung der vorwiegend aus Verrucano bestehenden helvetischen Glarner Decke. Nach Brunnschweiler (1948) stellen die Evaporite bzw. Rauhwacken das zeitliche Äquivalent der dolomitisch ausgebildeten Rötigruppe im nördlichen Faziesbereich (Infrahelvetikum) dar. Das Profil in Figur 6b zeigt den Faltenbau im Verrucano und in den mesozoischen Schichten am Wissmilen und Gipsgrat. Der Kern der abgebildeten Falte ist am Nordhang des Wissmilen aufgeschlossen und besteht aus Gips mit eingelagerten Dolomitbrekzien (Fig. 6c) und einigen wenigen Rauhwacken; der vom Wissmilen flach nach Süden ziehende Gipsgrat (Fig. 6a, 7, 8) ist aus dem Verkehrtschenkel der Falte aufgebaut und besteht – entgegen seinem Namen – aus Dolomit und Rauhwacke.

Die Aufschlüsse am Wissmilen und Gipsgrat liefern die folgenden für die Rauhwackengenese wichtigen Informationen:

- (1) Die am Wissmilen als Dolomit-Gips-Gesteine anstehenden mitteltriadischen Schichten werden am Gipsgrat durch Dolomit und Rauhwacken ersetzt.
- (2) Am Gipsgrat kommen Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten zusammen mit unstrukturierten, teilweise diskordant zur Schichtung verlaufenden Rauhwacken vor (Fig. 8a). Am Wissmilen hingegen kommen nur einige wenige unstrukturierte Rauhwacken in Form von senkrecht im Gips steckenden Säulen (Fig. 6d) oder in Form von Blockschutt vor (vgl. mit den Rauhwacken am Stübli, Kap. 3.1). Die Ausgangsgesteine der Rauhwacken bestehen am Wissmilen aus einer Wechsellagerung von Sabkha- und Becken-Evaporiten,

Fig. 6. Die geologische Situation am Wissmilen und am Gipsgrat a) im Kartenbild und b) im Profil. Sp = Spitzmeilen, Wi = Wissmilen, Ma = Magerrain. c) Dolomit-Gips-Brekzie am Wissmilen mit d) senkrecht darin steckenden Rauhwackesäulen. Höhe der Säulen ca. 3 m.

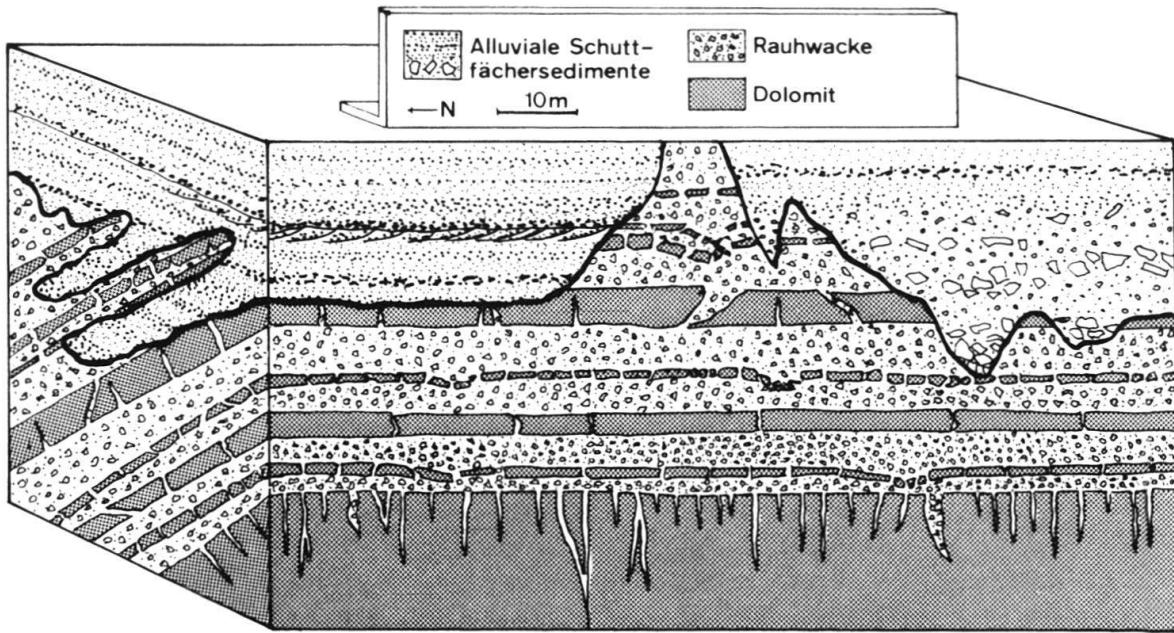
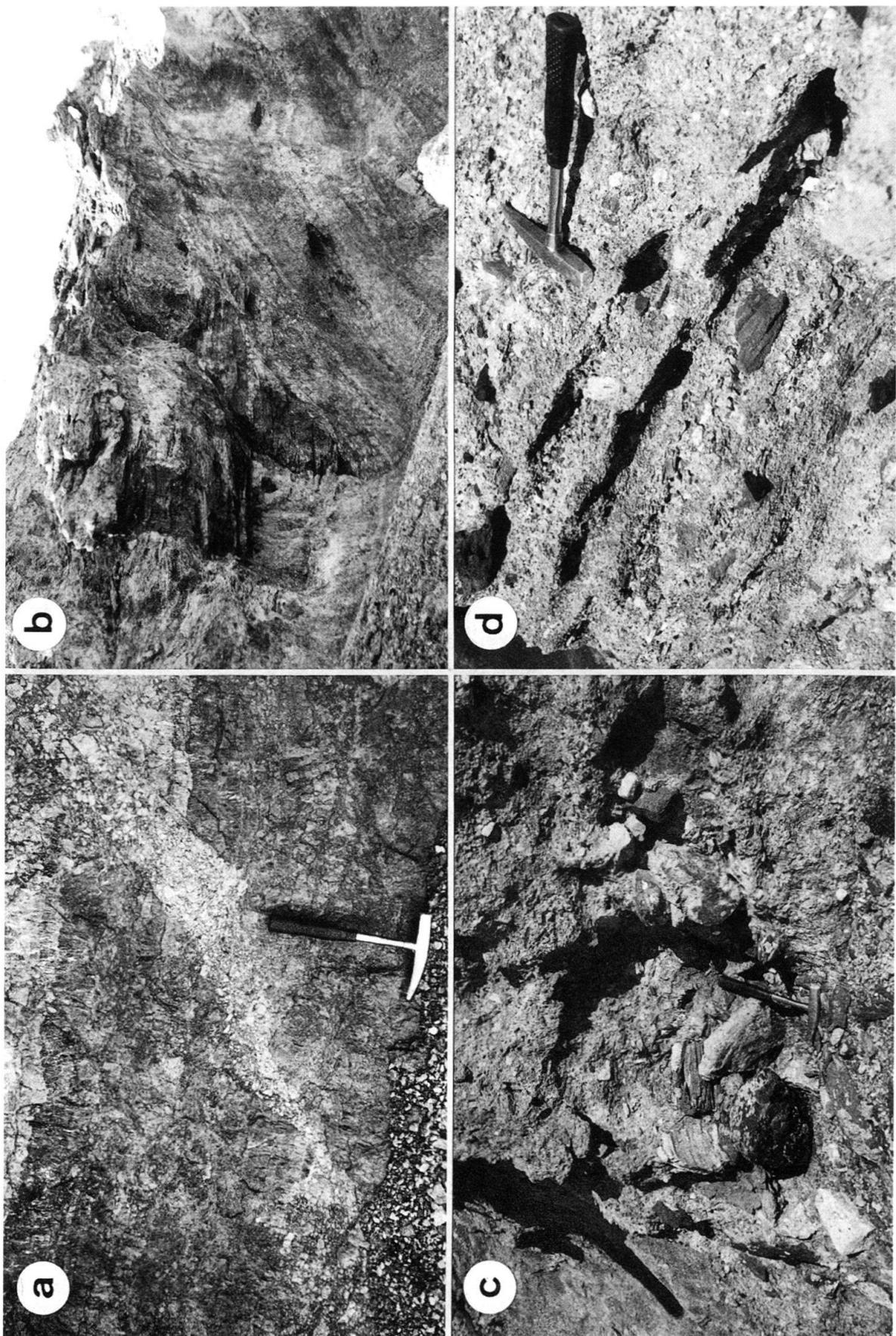


Fig. 7. Schematisches Blockbild der geologischen Situation am Gipsgrat. Die nach Osten geneigten Dolomit- und Rauhwackeschichten liegen überkippt und bilden den Verkehrsschenkel der in Abbildung 6b dargestellten Falte. Dolomit und Rauhwacke werden, getrennt durch eine Winkel- und Erosionsdiskordanz, von horizontal geschichteten alluvialen Sedimenten überlagert.

die dolomitarmen Gipsgesteine dominieren aber deutlich. Die Dolomitlagen sind sehr stark zerbrochen (Fig. 6c), die Fragmente häufig auch rotiert und verstellt worden, die schichtförmige Anordnung ist aber noch deutlich erkennbar.

- (3) Die Rauhwacken am Gipsgrat werden z.T. von alluvialen Schuttfächersedimenten überlagert (Fig. 7, 8). Diese bestehen aus komponentengestützten, polymikten Brekzien, welche als Schlammstromablagerungen gedeutet werden können (Fig. 8c), und aus horizontal- und schräggeschichteten Konglomeraten, die als fluviatile Rinnensedimente angesprochen werden können (Fig. 8d). Die steil nach Osten geneigten Triassschichten im Liegenden sind durch eine ausgeprägte Erosions- und Winkeldiskordanz von den horizontal gelagerten Schuttfächersedimenten im Hangenden getrennt (Fig. 8b). Diese Winkeldiskordanz zeigt, dass der Schuttfächer nach den alpinen Deformationen gebildet wurde, möglicherweise im Zusammenhang mit fluvioglazialen Prozessen. Die Höhe von 2400 m.ü.M., die exponierte Lage und das bunte Komponentenspektrum der Sedimente deuten jedoch darauf hin, dass das Relief des Wissmilengebietes bei der Ablagerung noch nicht seine heutige Form hatte. Mögli-

Fig. 8. Rauhwacken und alluviale Sedimente am Gipsgrat. a) Geschichtete Rauhwacke und veraderter Dolomit (dunkel) werden von unstrukturierten Rauhwacken (hell) durchschlagen. Die Rauhwacken sind relativ wenig löcherig und porös, da sich der Aufschluss an einer verwitterungsgeschützten Stelle befindet. b) Die Winkeldiskordanz zwischen den Triassschichten im Liegenden und den alluvialen Sedimenten im Hangenden. Höhe der Abbildung ca. 5 m. c) Schlammstromablagerungen und d) geschichtete Rinnenablagerungen in den alluvialen Schuttfächersedimenten.



cherweise muss für die Schuttfächersedimente ein frühquartäres oder sogar pliozänes Alter in Betracht gezogen werden.

Bemerkungen

- Am Wissmilen und Gipsgrat kommen dieselben beiden Rauhwackevaritäten vor, die auch in den oberostalpinen Raibler Schichten ausgeschieden werden konnten (Kap. 3.2): einerseits strukturlose Rauhwacken, andererseits Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten.
- Wie die Rauhwacken im Val Schais (Kap. 3.2) sind auch die Rauhwacken am Gipsgrat mit alluvialen Sedimenten verknüpft; möglicherweise besteht also ein Zusammenhang zwischen fluviatilen Prozessen und der Entstehung von Rauhwacken.
- Die Gips- und Dolomitgesteine am Wissmilen weisen keinerlei Anzeichen einer Calcitisierung auf. Auch der bei der Verwitterung gebildete Dolomitdetritus zeigt in keinem Fall eine Verkittung. Offensichtlich findet an der Oberfläche keine allmähliche Umwandlung der Dolomit-Gips-Brekzien zu Rauhwacken statt. Diese Feststellung gilt auch für alle anderen untersuchten Gipsvorkommen.

3.4 Die wichtigsten Punkte der Feldbeobachtungen

- Zwei Varietäten von Rauhwacken können ausgeschieden werden: (1) unstrukturierte, häufig polymikte und nicht stratiforme Rauhwacken, und (2) stratiforme, monomikte Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten.
- Zu den Rauhwacken gehören nicht nur strukturlose Brekzien, sondern auch feinkörnige, geschichtete Sedimente.
- Die Entstehung von Rauhwacken scheint in gewissen Fällen mit fluviatilen Prozessen verknüpft zu sein.
- Rauhwacken kommen häufig (nur) in Form von Blockschutt vor.
- Rauhwacken können als senkrecht im Gips steckende Säulen vorkommen.
- In keinem Fall konnten im Gips Fremdkomponenten beobachtet werden. Trotzdem sind die mit diesen Gipsgesteinen vorkommenden Rauhwacken häufig polymikt.
- An der Erdoberfläche zeigen weder die anstehenden Evaporite noch die darin eingeschlossenen Dolomitfragmente Anzeichen einer Calcitisierung. Es gibt kein Übergangsstadium zwischen gipsführenden Gesteinen und Rauhwacken.
- Die Struktur der Rauhwacken (meist komponentengestützte Dolomitbrekzien) ist in vielen Fällen völlig verschieden von derjenigen der evaporitischen Ausgangsgesteine (meist matrixgestützte Dolomitbrekzien).

4. Die Entstehung von Rauhwacken: das Modell

Die Beobachtungen im Feld haben gezeigt, dass an einer genetischen Verknüpfung von Rauhwacken mit Evaporiten nicht gezweifelt werden kann. Die Geometrie der Rauhwackevorkommen und ihre Verteilung bezüglich der Evaporite hat nun auch Hinweise auf den Prozess der Rauhwackengenese geliefert. Die Entstehung von Rauhwacken wird nicht durch die *in situ*-Umwandlung und Calcitisierung von evaporitischen

Ausgangsgesteine (Metasomatose), sondern durch deren Lösung und Verkarstung gesteuert. Die Struktur der evaporitführenden Ausgangsgesteine nimmt dabei direkten Einfluss auf die Geometrie und Internstruktur der Rauhwackekörper.

4.1 Die Verkarstung der Becken-Evaporite: Bildung von Karstsedimenten

Bei der Oberflächenverwitterung von mächtigen Gipslagen und dolomitführenden Gipsgesteinen (Fig. 1a und 10a) entstehen die charakteristischen, bizar geformten Dolinenlandschaften mit den unzähligen Lösungstrichtern (Col de la Croix, Alp Nova nördlich von St. Moritz, Alp da Munt östlich des Ofenpasses, Stüblen südwestlich von Lenk). Die Dolinen dürften als Mündungen eines Systems von Karsthöhlen angesprochen werden, durch welches die Gipsgesteine in den Untergrund entwässert werden (Fig. 9a und b). Der Schwerkraft gehorchend besteht dieses Entwässerungssystem innerhalb des Gips aus einer Vielzahl von vertikal ausgerichteten, linearen Karsthohlräumen (solution pipes). An wasserstauenden Schichten werden die Karstwässer und -höhlen gestoppt oder umgelenkt und in einen schichtparallelen Verlauf gezwungen; als wasserstauende Schichten spielen der Anhydrit, welcher den Gips in einer Tiefe von einigen 10 m ersetzt, und andere wasserundurchlässige Schichten (Tonschiefer, Mergel usw.) im Liegenden des Gips eine wichtige Rolle. In den Karsthohlräumen werden einerseits Dolomitfragmente aus den gelösten Gipspartien, andererseits via die Dolinen hereingebrachter Detritus von der Erdoberfläche zusammengeschwemmt. Bei ausreichender CO₂-Zufuhr wird dieses Material durch die perkolierenden Ca-reichen Karstwässer mit Calcit zementiert und verkittet: die Karstsedimente werden zur Rauhwacke.

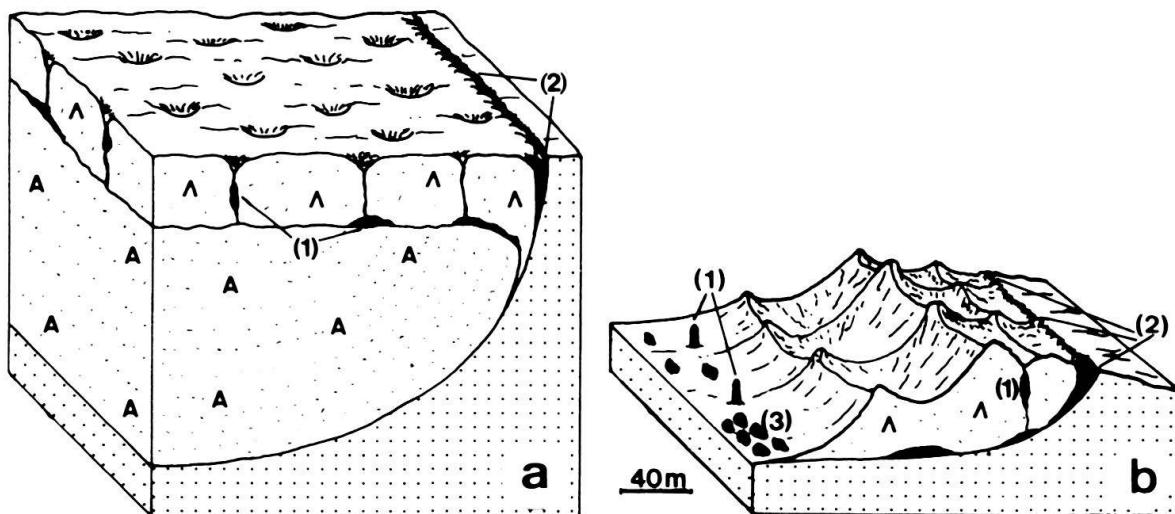
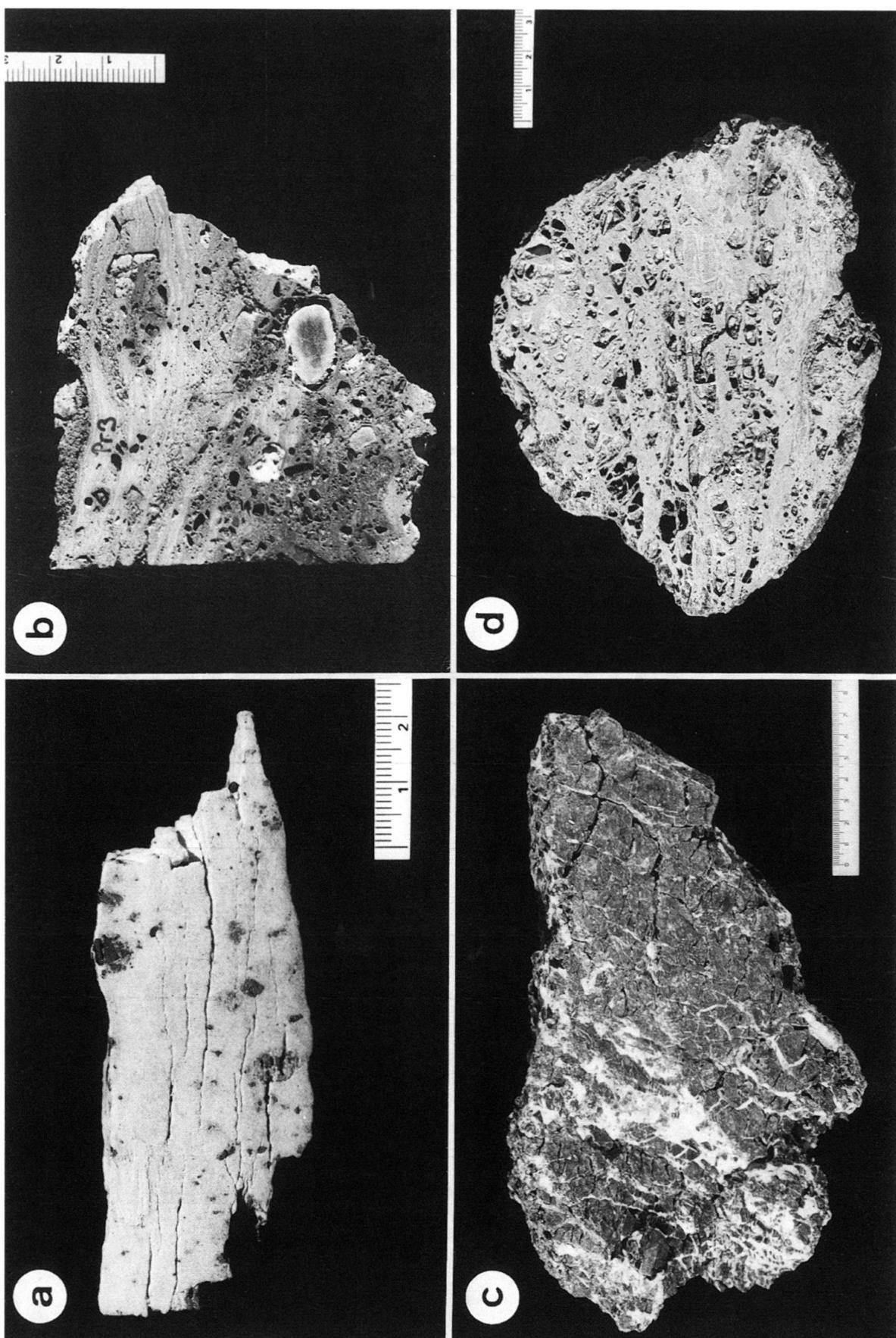


Fig. 9. Die Verkarstung dolomitführender Gipsgesteine (^) in einem frühen (a) und in einem fortgeschrittenen Stadium (b). Das Liegende des Gips bildet eine wasserstauende Schicht (weites Punktraster). A = Anhydrit. Die gebildeten Rauhwacken (dichtes Punktraster) widerspiegeln die Formen der Karsthohlräume: (1) Länglich geformte Rauhwackekörper als Füllungen der Karströhren innerhalb des Gips. Bei fortgeschrittener Gipserosion können diese Rauhwacken als Säulen aus dem Gips herausragen. (2) Ein durchgehender Rauhwackezug widerspiegelt die intensive Verkarstung im Hangenden der wasserstauenden Schichten und bildet einen Kragen um den Gips. (3) Rauhwackeblockschutt markiert ein fortgeschrittenes Stadium der Gipserosion.



Zwei Arten von Rauhwackevorkommen werden bei der Verkarstung gröserer Gipsmassen gebildet:

- (1) In den röhrenförmigen Karsthöhlen innerhalb des Gips entstehen eindimensionale, bevorzugt länglich geformte und senkrecht orientierte Rauhwackekörper (Fig. 9). Die Karstsedimente dürften vor allem an der (ehemaligen) Anhydritfront, zum Teil aber auch in Engpässen in den Karsthohlräumen gestaut und zusammengeschwemmt werden. Bei fortschreitender Lösung und Erosion des sie umgebenden Gips können die in den Karsthöhlen gebildeten, relativ verwitterungsresistenten Rauhwackekörper in Form von Säulen freigelegt werden; bei vollständiger Lösung der sie umgebenden Evaporite schliesslich bleiben diese Rauhwackekörper als unlöslicher Rückstand in Form von Blockschutt zurück (Fig. 9).
- (2) Im Falle von geneigten Schichten kommt es am Rand der Gipsmassen zu besonders intensiven Verkarstungsprozessen, vor allem wenn die Schichten im Liegenden der Evaporite Wasserstauer sind. Dadurch entsteht am Rande des Gips, d.h. zwischen den Gipsschichten im Hangenden und den wasserstauenden Schichten im Liegenden, eine relativ mächtige, lateral kontinuierliche Rauhwacke. Im Kartenbild erscheint dieser Rauhwackezug als stratiformer Horizont zwischen dem Gips im Hangenden und der wasserstauenden Schicht im Liegenden. In Wirklichkeit dürfte dieser Horizont aber einen begrenzten Tiefgang besitzen und nur über eine kurze Strecke unter den Gips hineinziehen. Er bildet einen Ring beziehungsweise einen «Kragen» um die Gipsmassen herum.

Das Material in den Karstsedimenten bzw. Rauhwacken besteht vor allem aus Dolomitkomponenten aus den gelösten Gipspartien. Durch das von der Erdoberfläche eingeschwemmte detritische Material können aber auch polymikte Rauhwacken entstehen, die aus allerlei in der weiteren Umgebung des Gips anstehenden Gesteinsbruchstücken bestehen (Jeanbourquin 1986, 1988). Die Karstsedimente sind meist nicht als Bodenfracht in fliessendem Wasser transportiert worden, sondern bestehen aus willkürliche hingefallenem Material (senkrecht orientierte Karsthöhlen), das nach der Sedimentation keine Umlagerung und Sortierung erfährt und deshalb auch nur selten Sedimentstrukturen erhält. Davon ausgenommen kann die feinkörnige Fracht der Karstwässer sein, welche entweder als Matrix zwischen den grobkörnigen Fragmenten abgelagert wird oder aber – zum Teil als Suspensionsfracht – auch dort weitertransportiert wird, wo das grobklastische Material bereits zur Ablagerung gelangt ist. Die Feinfracht wird schliesslich erst in niedrigenergetischen Milieus abgelagert, sei es in stehendem Wasser, sei es in langsam fliessendem Wasser in horizontal verlaufenden Karsthohlräumen. In jedem Fall wird das feinkörnige Material eine Tendenz zu horizontaler Lagerung haben, mit Sedimentstrukturen, welche die Transport- und Ablagerungsmechanismen der Boden- bzw. Suspensionsfracht in fliessendem oder stehendem Wasser wider spiegeln.

Fig. 10. Die evaporitischen Ausgangsgesteine und ihre Rauhwacken. Im a) dolomiführenden Gips werden b) Rauhwacken mit grobkörnig-ungeordneter bis feinkörnig-laminierter Struktur gebildet. Aus c) gipsführendem Dolomit entstehen d) Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten («Kästchenmuster»).

Die bei der Verkarstung von Becken-Evaporiten gebildeten Rauhwacken bestehen also nicht nur aus strukturlosen Brekzien, sondern auch aus feinkörnigen, geschichteten und laminierten Gesteinen. Die beiden sind genetisch identische Bildungen, widerspiegeln aber unterschiedliche Ablagerungsmechanismen. Die Assoziation von Rauhwacken und feinkörnigen Sedimenten wurde bereits von Jeanbourquin (1986, 1988) beschrieben, sie wurde aber als Ausdruck von Verkarstungsprozessen in bereits bestehenden Rauhwacken gedeutet.

Bei der Verkarstung der Beckenevaporite entstehen aus den matrixgestützten Dolomit-Gips-Brekzien komponentengestützte Dolomitbrekzien (mit allfälligen Fremdkomponenten). Auch bei vollständiger Lösung von relativ mächtigen Gipsmassen entsteht meist nur eine bescheidene Menge an Rauhwacke (ausser es werden grosse Mengen an Fremdmaterial eingeschwemmt).

4.2 Die Verkarstung der Sabkha-Evaporite: Bildung von Kollapsbrekzien

Auch die Verkarstung der Sabkha-Evaporite (Fig. 1b, 10c) wird durch die Lösung von Gips gesteuert. Anders als bei den Becken-Evaporiten entstehen in den dolomitreichen Gesteinen jedoch keine grossen Hohlräume, was einerseits bedeutende Kollapsprozesse, andererseits einen Transport der Dolomitfragmente verhindert. Dadurch bleibt die Struktur der evaporitführenden Ausgangsgesteine weitgehend erhalten und wird durch die Zementation mit Calcit auf die Rauhwacken vererbt. Die entsprechenden Rauhwacken zeigen wie ihre evaporithaltigen Vorgänger (Fig. 1b, 10c) in Schichten angeordnete Dolomitfragmente mit korrespondierenden Trümmergrenzen (Fig. 10d) und können als Kollapsbrekzien im engeren Sinne angesprochen werden. Auch allfällige Deformationsstrukturen in den Ausgangsgesteinen (Falten) können von den Rauhwacken übernommen werden. Im Gegensatz zur Situation bei den Becken-Evaporiten ist das Mengenverhältnis von evaporitischem Ausgangsgestein zu Rauhwacke ungefähr ausgeglichen.

Die Zufuhr von Fremdkomponenten von der Erdoberfläche durch die kleinen Hohlräume zwischen den Dolomitfragmenten ist stark eingeschränkt. Deshalb sind die aus den Sabkha-Evaporiten entstandenen Rauhwacken meist dolomitisch-monomikt.

In die Sabkha-Evaporite sind stets auch dolomitarme Gipsschichten eingelagert, die bei der Verkarstung dieselbe Art von Rauhwacke wie bei der Verkarstung der Becken-Evaporite liefern (Kap. 4.1). Deshalb sind in die geschichteten Rauhwacken mit den zusammenpassenden Dolomitfragmenten der Sabkha-Evaporite jeweils auch unstrukturierte, komponentengestützte und teilweise polymikte Rauhwacken eingelagert (Fig. 3, 8a).

Da die Strukturen der Sabkha-Evaporite und die Strukturen der mit ihnen assoziierten Rauhwacken miteinander übereinstimmen, könnte die Rauhwackisierung auch mit metasomatischen Prozessen, mit der Umwandlung von Gips in Calcit erklärt werden. Wir glauben allerdings nicht, dass die Rauhwacken der Becken-Evaporite und diejenigen der Sabkha-Evaporite auf grundsätzlich verschiedene Prozesse zurückzuführen sind, sondern dass bei beiden die Lösung von Gips die zentrale Rolle spielt. Die allgegenwärtigen Kollapsphänomene in den Rauhwacken der Sabkha-Evaporite (Fig. 3, 8a) belegen das Wirken von Lösungsprozessen bei der Rauhwackengenese. Gegen eine Umwandlung von Gips in Calcit spricht außerdem, dass es keine Rauhwacken ohne Komponenten gibt.

Gips allein kann nicht zu Calcit umgewandelt werden. Eine Rauhwackenbildung findet erst statt, wenn ein Sediment vorhanden ist, das zementiert werden kann. Umwandlungsprozesse würden zudem Übergangszonen zwischen Gips und Rauhwacke produzieren, was im Felde jedoch in keinem Fall beobachtet werden konnte.

Während die Komponenten in den Rauhwacken der Becken-Evaporite vor ihrer Zementation transportiert und umgelagert worden sind (und deshalb als Karstsedimente s.str. betrachtet werden können), sind die Dolomitfragmente der Sabkha-Evaporite nach der Lösung des Gips nur geringfügig kollabiert und an Ort und Stelle wieder zementiert worden (Kollapsbrekzien). Dieser Unterschied in der Entstehung wird aber ausschliesslich durch die unterschiedlichen Strukturen der jeweiligen Ausgangsgesteine gesteuert. Middleton (1961) beschreibt Evaporit-Lösungsbrekzien in unterkarbonen, evaporithaltigen Karbonatgesteinen, die gut mit den Karstsedimenten und Kollapsbrekzien in unserem Verkarstungsmodell verglichen werden können.

4.3 Diskussion des Verkarstungsmodells

- Das oben vorgestellte Verkarstungsmodell bietet eine gute Erklärung für die Geometrien der Rauhwackevorkommen und die Strukturen der Rauhwacken. Die Geometrien der Rauhwackevorkommen widerspiegeln nicht etwa tektonische Strukturen, sondern die (ehemaligen) Wasserwege im relativ gut löslichen und verkarstungsfähigen Gips (tektonische Strukturen und Wasserwege können natürlich miteinander übereinstimmen; zur tektonischen Bedeutung der Evaporite siehe Kap. 5.3). Die Internstrukturen der Rauhwacken ihrerseits werden durch die Strukturen der Ausgangsgesteine und durch die speziellen Sedimentationsbedingungen in den Karsthohlräumen bestimmt. Letztere sind beispielsweise dafür verantwortlich, dass die Rauhwacken der Becken-Evaporite in den senkrecht orientierten bis stark geneigten Karsthohlräumen willkürlich hinfallen und danach häufig keine Umlagerung erfahren und deshalb nur selten Sedimentstrukturen aufweisen.
- Das Verkarstungsmodell zeigt eine fast perfekte Übereinstimmung mit den Rauhwackevorkommen am Stübleni. Der Rauhwackezug am Kontakt des Stübleni-Gips zu den liegenden Tonschiefern, welcher den tektonischen Kontakt zwischen der Sex Mort-Decke und der Bex-Decke markiert, hat nichts mit der Abscherte tektonik und den Deckenbewegungen zu tun, sondern ist ein Produkt der wasserstauenden Wirkung der Flysch-Tonschiefer im Liegenden des Gips. Die Karstwässer wurden an diesem Horizont gesammelt und in einen schichtparallelen Verlauf gezwungen, was zu einer intensiven Verkarstung entlang des Deckenkontakts und zur Bildung einer scheinbar stratiformen Rauhwacke geführt hat. Diese Rauhwacke dürfte allerdings keinen bedeutenden Tiefgang aufweisen und nicht eine durchgehende Schicht an der Basis des Gips darstellen. Sie bildet vielmehr einen Kragen um den Gips (der Schwerkraft gehorchend allerdings nur im Liegenden des Gips, im Kontakt zu den wasserstauenden Tonschiefern).
- Die im Gips steckenden Säulen aus Rauhwacke (Stübleni, Fig. 2c; Wissmilen, Fig. 6d) sind Bildungen aus den senkrecht orientierten Karsthohlräumen innerhalb des Gips, welche durch die fortschreitende Erosion des Gips als verwitterungsresistente Relikte freigelegt worden sind. Die Sedimente wurden in Engpässen der Karströhren oder an der Anhydritfront gestaut.

- Der am Stübleni und anderen Orten beobachtete Rauhwackeblockschutt – ohne dass in der Umgebung anstehende Rauhwacken vorkommen – ist direkt auf die Verkarstungsprozesse im Gips zurückzuführen. Die Rauhwackeblöcke wurden schon a priori als individuelle kleine Körper innerhalb der Karsthohlräume gebildet und durch die fortschreitende Lösung und Erosion des Gips freigelegt. Wo der Gips auf ein tiefes Niveau hinuntererodiert ist, wird er schliesslich von einem «Rückstand» aus Rauhwackeblöcken bedeckt. Am Col de la Croix oder am Stübleni hat dieser Prozess zur scheinbar widersprüchlichen Situation geführt, dass die verwitterungsresistenten Rauhwacken bevorzugt in morphologischen Depressionen im Gips angereichert sind, während der umgebende Gips im Gelände als Härtling hervortritt.
- Die kleinen Rauhwackegänge im Gips des Stübleni (Fig. 2d) sind auf Lösungs- und Kollapsprozesse in offenen Spalten zurückzuführen.
- Die Vorkommen von polymikter Rauhwacke mit «exotischen» Komponenten aus fremden tektonischen Einheiten und stratigraphisch höheren Schichten passen zwanglos in ein Verkarstungsmodell und müssen nicht mit komplizierten, mehrphasigen tektonischen Prozessen in Zusammenhang gebracht werden. Dieselbe Idee wurde bereits von Jeanbourquin (1986, 1988) formuliert.
- Die Rauhwacken im Val Schais (Fig. 4) und am Gipsgrat (Fig. 7, 8) sind gute Beispiele für einen Zusammenhang zwischen fluviatilen, möglicherweise fluvioglazialen Prozessen an der Erdoberfläche und der Verkarstung der darunterliegenden Gesteine. Besonders im Val Schais dürfte der Übergang zwischen den Karstsedimenten s.str. (in Hohlräumen unter der Erdoberfläche gebildet) und den alluvialen Ablagerungen fliessend sein. Hinweise auf Sedimentation in echten Karsthohlräumen liefern die zahlreichen Phänomene synsedimentärer Deformation in der Rauhwacke, die auf eine Lösung von noch vorhandenem Gips unter und zwischen den vorher gefüllten Karsthohlräumen deuten. Die Schlammstromablagerungen und ein Teil der geschichteten Rauhwacken hingegen dürften an der Erdoberfläche geschüttet worden sein. Weitere Hinweise auf die Verknüpfung der Verkarstung mit fluviatilen Prozessen liefern die grosse Mächtigkeit, das Komponentenspektrum und die Lage des Rauhwackevorkommens im Val Schais: die Lösung und der Kollaps des sehr dolomitarmen Gips produziert normalerweise nur eine bescheidene Menge Rauhwacke. Im Val Schais muss deshalb eine beträchtliche Menge «fremder» Detritus herangeführt worden sein, was wiederum durch das bunte Komponentenspektrum der Rauhwacke bestätigt wird. Das eng begrenzte Rauhwackevorkommen auf der Talflanke des Val Schais deutet zudem darauf hin, dass die Verkarstung der Evaporite durch die Lage des oberflächlichen Entwässerungssystems bestimmt wurde.

Völlig anders sieht die Situation beispielsweise auf der Alp da Munt aus, wo zwar dieselbe Art von dolomitführendem Gipsgestein wie im Val Schais aufgeschlossen ist, wo aber nur ganz geringe Mengen an Rauhwacken und keine alluvialen Sedimente anstehen. Der Gips wurde offensichtlich nur in geringem Ausmass verkarstet, was auf das Fehlen von fluviatilen Prozessen an der Erdoberfläche zurückzuführen sein dürfte. Andererseits liefern die fast reinen Gipsgesteine nur wenig Dolomitmaterial zur Bildung von Rauhwacken.

- Die Assoziation von fluviatilen bzw. fluvioglazialen Prozessen mit der Verkarstung des Gips bietet weiter wichtige Hinweise auf die zeitliche Einstufung der Rauhwackengenese (Kap. 5.1).

- Die Rauhwacken der oberostalpinen Raibler Schichten und diejenigen am Wissmilen und Gipsgrat widerspiegeln den Einfluss der Struktur der evaporitführenden Ausgangsgesteine auf die Struktur der Rauhwacken. Bei beiden bestehen die Ausgangsgesteine aus einer Wechsellagerung von Sabkha- und Becken-Evaporiten. Dementsprechend kommen die damit assoziierten Rauhwacken entweder in Form von monomikten Kollapsbrekzien mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten (Gipsgrat; Val Mora, z.T. Val Schais) oder in Form von polymikten, strukturlosen (grobkörnig) bis geschichteten (feinkörnig) Karstsedimenten mit den charakteristischen Formen (Säulen, Blockschutt) vor (Wissmilen; Alp da Munt, Val Schais).
- Weil die Rauhwacken des Val Mora z.T. aus dolomitreichen Ausgangsgesteinen entstanden (Sabkha-Evaporite, Fig. 1b, 10c) sind, haben sie die Deformationsstrukturen derselben übernehmen können. Die Falten in den stratiformen Rauhwacken des Val Mora sind ererbte Strukturen, die bei der Deformation der evaporitführenden Ausgangsgesteine der Rauhwacken angelegt wurden. Die Rauhwacken selber haben keine Faltung erlebt.

5. Einige allgemeine Bemerkungen zu Rauhwacken

5.1 Datierung der Rauhwacken

Die Entstehung von Rauhwacken ist bisher weder mit Fossilien noch mit absoluten Altersbestimmungen datiert worden. Auch unsere Untersuchungen haben keine absoluten Alter der Rauhwacken geliefert. Allerdings gibt es einige Indizien, die eine relative zeitliche Einstufung dieser Gesteine erlauben:

- Die Zemente in den von uns untersuchten Rauhwacken sind durchwegs unmetamorph und undeforiniert.
- Die Sedimentstrukturen in den feinkörnigen Rauhwacken sind häufig auf die heutige horizontale Orientierung ausgerichtet, die Geometrie der säulenförmigen Rauhwacken aus den Karsthohlräumen auf die heutige vertikale Orientierung. Die Gesteine sind also nach ihrer Bildung nicht mehr verstellt worden.
- In gewissen Fällen dürfte die Verkarstung der Evaporite auf postorogene, fluviatile bzw. fluvioglaziale Prozesse an der Erdoberfläche zurückzuführen sein (Gipsgrat, Val Schais).
- Jeanbourquin (1986, 1988) fand in polymikten Rauhwacken Gerölle mit Gletscherstriemung sowie aufgearbeitetes Moränenmaterial.

Alle diese Indizien deuten darauf hin, dass die von uns untersuchten Rauhwacken nach der alpinen Deformation und Metamorphose entstanden sind und wahrscheinlich als quartäre Bildungen einzustufen sind (Gipsgrat: Pliozän? Kap. 3.3). Möglicherweise ist die Verkarstung der Evaporite und die Entstehung von Rauhwacken durch verstärkte fluvi(oglazi)ale Aktivität begünstigt worden.

In den Alpen der Westschweiz scheint es auch Rauhwacken zu geben, die deformiert und metamorph überprägt sind (pers. Mitt. H. Masson, Lausanne; Kap. 5.3). Es ist klar, dass für diese Gesteine ein entsprechend höheres Alter angenommen werden muss und

dass diese nach der Rauhwackisierung mindestens eine Deformationsphase erlebt haben müssen. Allerdings ist die Bezeichnung dieser Gesteine als Rauhwacken z.T. etwas problematisch und häufig eine Frage der Interpretation. Auch die Entstehung dieser Rauhwacken stimmt möglicherweise nicht mit dem hier vorgestellten Modell der Evaporitverkarstung überein. Mit diesem Hinweis soll betont werden, dass keinerlei Angaben über Entstehung und Alter von Rauhwackevorkommen verallgemeinert werden dürfen und dass jedes Rauhwackevorkommen bezüglich seiner Genese und seines Alters individuell beurteilt werden muss.

5.2 Tiefgang der Evaporitverkarstung

Wegen der grosszügigen Verwendung des Begriffs Rauhwacke ist es schwierig, Rauhwackevorkommen miteinander zu vergleichen und aus der Literatur verlässliche Angaben über den Tiefgang der Evaporitverkarstung zu erhalten. Bachmann & Müller (1981) berichten von einem Rauhwackevorkommen, das in der Bohrung Vorderriss 1 in einer Tiefe von 1647–1678 m ab Oberfläche angetroffen wurde und eine Porosität von 13% aufweist. Die beiden Autoren deuten die Rauhwacke als Auslaugungsprodukt einer Anhydrit-Dolomit-Wechselfolge in den oberostalpinen Raibler Schichten. Das Wasser war durch den zerklüfteten Hauptdolomit im Hangenden der Raibler Schichten zugeführt worden. Die Verkarstung von Evaporitgesteinen scheint also unmittelbar nach dem Zutritt von meteorischem Wasser einzusetzen und dürfte durch poröse Nebengesteine und wasserleitende Schichten innerhalb der Evaporite begünstigt werden. Ebenfalls wichtige Rollen spielen die Lage der Evaporitvorkommen und die Zeit; je mehr Zeit der Verkarstung zur Verfügung steht, desto grössere Tiefen wird diese erreichen. Evaporitgesteine, die von zerklüfteten und porösen Gesteinen umgeben sind und deshalb bereits in relativ grosser Tiefe mit Grundwasser in Berührung kommen, werden deshalb intensiver und tiefgreifender verkarstet sein als Evaporite, die beispielsweise von wasserundurchlässigen Tongesteinen umhüllt werden. Von grosser Bedeutung ist auch, dass die Verkarstung von Gips nicht stratiform verlaufen muss, sondern bevorzugt senkrechte, eng begrenzte Hohlräume produziert. Die seitliche Extrapolation von Bohrdaten aus scheinbar dichten, «gesunden» Gipsgesteinen muss deshalb mit grosser Vorsicht vorgenommen werden.

5.3 Die tektonische Komponente in den Rauhwacken

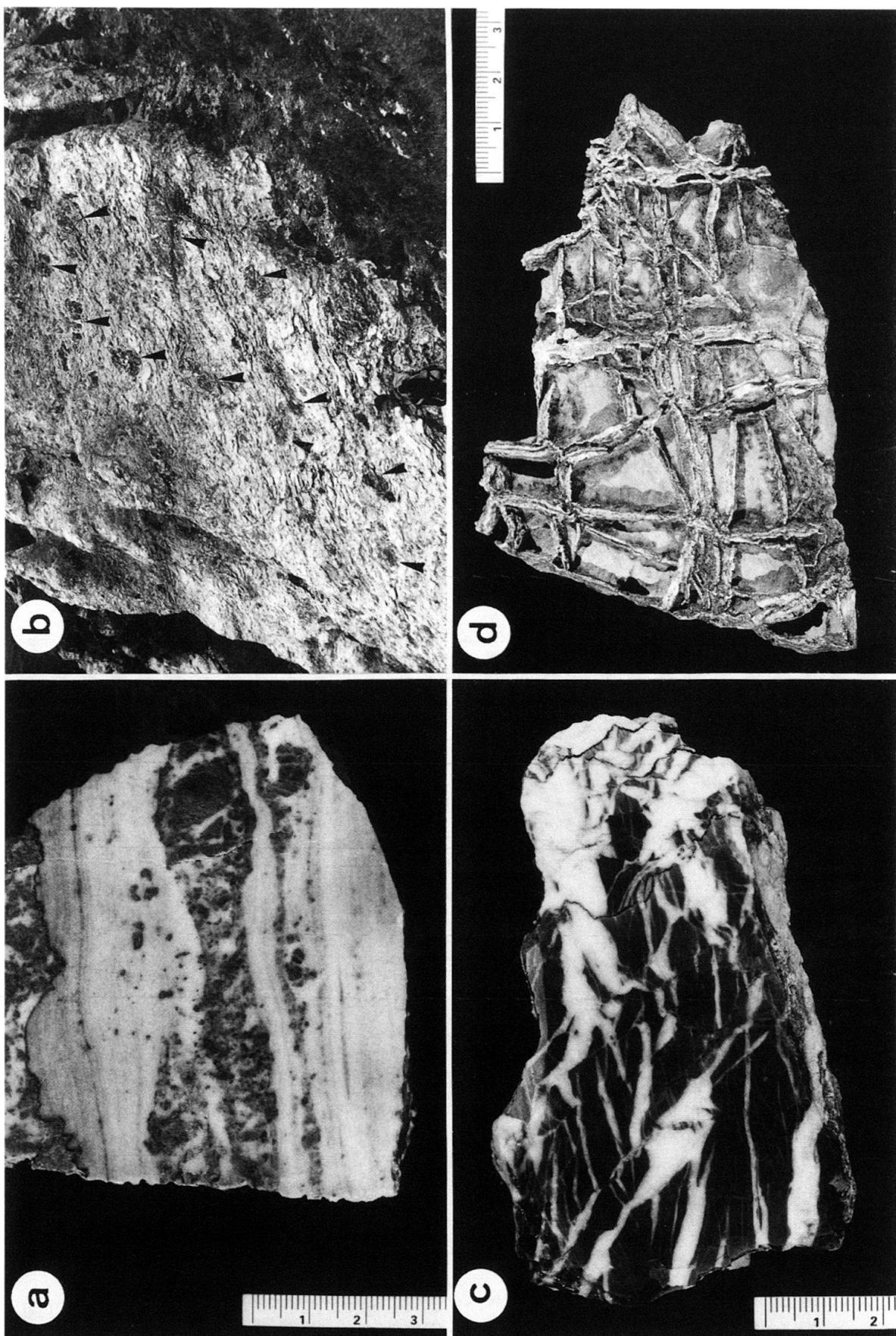
Die unmittelbare Verknüpfung von Rauhwacken mit tektonischen Kontakten – beispielsweise an der Basis von Decken – hat diesen Gesteinen einen fast legendären Ruf als Abscherhorizont eingetragen. Die Brekziierung des Dolomits und der Einbau von «exotischen» Komponenten aus stratigraphisch höheren Schichten oder fremden tektonischen Einheiten wurde meist auf die Deckenbewegungen während den alpinen Deformationen zurückgeführt (Cornelius 1935, Jäckli 1941). Während Masson (1972) die Brekziierung der Dolomitgesteine mit hydraulischer Bruchbildung erklärte und die Rauhwacken während den Deckenbewegungen als «unter hohem Druck stehenden Brei» deutete, schrieb Müller (1982) die tektonisch massgebende Rolle den Evaporiten zu und griff die von Brückner (1941) formulierte Theorie auf, dass die Rauhwacken aus Dolomit-Anhydrit-Brekzien entstehen.

Die von uns untersuchten Rauhwacken dürften nach den alpinen Deformationen entstanden und meist quartären Alters sein (Kap. 5.1). Diese Rauhwacken können deshalb nichts mit der Abschertektonik zu tun haben. Eine wichtige Rolle bei den Deckenbewegungen haben aber offensichtlich die evaporitischen Ausgangsgesteine der Rauhwacken gespielt. Als bereits bei relativ niedrigen Temperaturen fliessfähige und mobile Gesteine (Jordan et al. 1990, Jordan 1994) waren sie die bevorzugten Abscherhorizonte bei Deckenbewegungen oder die inkompetenten Schichten bei Faltung. Die Deformation der Evaporite und der eingelagerten Dolomitschichten geschah nach dem Modell von Müller (1982; dieselbe Idee wurde bereits von Warrak [1974] formuliert); die spröden Dolomitgesteine waren nicht in der Lage, die oft intensive Faltung und Fältelung des Gips bzw. Anhydrit mitzumachen. Dies führte zu einem Zerbrechen der Dolomitschichten in den Faltenscharnieren. Auch Scherbewegungen – einfache und/oder reine Scherung – führten zur Kataklasierung von ursprünglich intakten Dolomitschichten. Pinch and swell-Strukturen in den brekzierten Dolomitschichten zeigen, dass das Zerbrechen derselben zumindest teilweise auf Boudinierung zurückzuführen ist (Fig. 11a, b). Hinweise auf hydraulische Bruchbildung (Mason 1972) können in den Evaporit-Dolomit-Gesteinen nicht ausgemacht werden.

Die intensive Deformation in den Evaporiten führte jeweils auch zu einer starken Zerklüftung und Veraderung der Gesteine (meist Dolomit) im Liegenden und Hangenden derselben. Die Adern bestehen aus Dolomitspat, Quarz und Kalkspat. Deshalb sind die Rauhwacken häufig mit stark zerbrochenen und veraderten Dolomitgesteinen assoziiert, welche bei der Verwitterung wie die Rauhwacken ein löcheriges Aussehen erhalten können (Fig. 11c, d). Auch innerhalb der evaporitführenden Gesteine, namentlich der Sabkha-Evaporite, kommen solche veraderten Dolomitgesteine vor (Fig. 3, 8a). Die Kataklase dieser rein dolomitischen Gesteine, die zum Teil auf hydraulische Bruchbildung zurückzuführen sein könnte (Masson 1972, Jeanbourquin 1986), ist alintektonischen Ursprungs und hat gleichzeitig mit der Brekziierung der Dolomit-Gips-Gesteine, aber vor der Entstehung der Rauhwacken stattgefunden. Stark zerbrochene und veraderte Dolomite können ein Hinweis auf die unmittelbare Nähe eines (evaporitischen) Abscherhorizontes sein; sie haben aber kaum selber die Rolle eines solchen gespielt. Tabelle 1 gibt einige Hinweise, wie zerbrochene und kataklasierte Dolomitgesteine von den bei der Verkarstung von Evaporiten gebildeten Rauhwacken unterschieden werden können.

Dolomit-Gips-Brekzien als Ausgangsgesteine der Rauhwacken werden nicht nur in stark deformierten Abscherhorizonten gebildet. Schon die Verfaltung einer Dolomit-Gips-Wechsllagerung reicht aus, um den spröden Dolomit in der evaporitischen Grundmasse zum Zerbrechen zu bringen (Val Mora, Wissmilen und Gipsgrat). Deshalb ist es auch falsch, Rauhwacken a priori mit tektonischen Kontakten und Abscherhorizonten in Verbindung zu bringen, was bereits Jeanbourquin (1986, 1988) und Frank (1986) betont haben.

Bei der Datierung der Rauhwacken (Kap. 5.1) wurde erwähnt, dass in den helvetischen und penninischen Decken der Westschweiz deformierte und metamorphe Rauhwacken gefunden werden können. Obwohl die meisten dieser Gesteine Abscherhorizonte markieren, ist der Grad ihrer Deformation und Metamorphose sehr unterschiedlich und nimmt von den externen (Préalpes) zu den internen (penninische Decken) Bereichen der Alpen zu (pers. Mitt. H. Masson, Lausanne). Abgesehen davon, dass die Entstehung dieser Rauhwacken – die sich rein äußerlich sehr stark von den von uns unter-



Tab. 1. Kriterien zur Unterscheidung von Rauhwacken und kataklasierten Dolomitgesteinen.

	Rauhwacken der Sabkha-Evaporite	Rauhwacken der Beckenevaporite	Zerbrochener, veraderter Dolomit	Stark tektonisierter Dolomit
Struktur	schichtförmig angeordnete Komponenten	keine Struktur	häufig regelmässiges Zellenmuster	z.T. Foliation und Fliessgefüge
Komponenten-spektrum	monomikt	monomikt und polymikt	monomikt	monomikt
Fitting der Komp.	gut bis sehr gut	keines	sehr gut	schlecht oder keines
Form der Komp.	eckig	eckig bis gerundet	eckig	gerundet
Zement	Sparit, Mikrosparit	Sparit, Mikrosparit	Dolomitspat, Quarz, Sparit, poikilitische Kalkspat	
Gerüst	komponenten-gestützt*	komponenten-gestützt	matrixgestützt*	matrixgestützt
Diagnostisches Merkmal	Sedimentstrukturen	Sedimentstrukturen		
Bemerkungen	Assoziation mit Evaporiten	Assoziation mit Evaporiten		

* im Handstück oft schwierig zu erkennen

suchten Rauhwacken unterscheiden – unklar ist, wirft der unterschiedliche Grad der Überprägung einige Fragen bezüglich Alter und tektonischer Bedeutung dieser Gesteine auf. Es gibt drei Möglichkeiten, die Befunde zu deuten: entweder sind die Gesteine genetisch verschieden und sollen nicht miteinander verglichen werden. Der unterschiedliche Grad der Überprägung wäre in diesem Falle belanglos. Oder die Gesteine sind genetisch tatsächlich miteinander vergleichbar; in diesem Falle sind die Rauhwacken in den internen Alpen älter als diejenigen in den externen Bereichen und deshalb durch Deformationen und Metamorphose überprägt worden, während letztere erst nach den Deformationen entstanden sind. Eine dritte Möglichkeit besteht darin, dass die Rauhwacken in den Préalpes durch den Deckentransport den späteren Deformationen und der Metamorphose in den internen Alpen entkommen sind. Dies würde bedeuten, dass die Deformationsstrukturen in den Rauhwacken erst nach den Deckenbewegungen angelegt wurden und auf späte Deformationsphasen in den internen Bereichen der Alpen zurückzuführen

Fig. 11. Pinch and swell in den brekzierten Dolomitschichten als Phänomen von Boudinierungsprozessen a) im Handstückbereich und b) im Aufschluss. Die linsenförmigen Dolomitboudins (Pfeile) stellen Relikte von ursprünglich zusammenhängenden Schichten dar. c) Zerbrochener und mit Dolomitspat verheilter Dolomit als Ausgangsgestein von d) rauhwackähnlichem, löcherig verwitterndem Gestein.

sind. Die Deckenbewegungen selber produzierten in diesem Fall also keine deformierten Rauhwacken.

5.4 Zementation und Verwitterung der Rauhwacken

Die von uns untersuchten Rauhwacken bestehen aus verkittetem, in Karsthohlräumen von Evaporitgesteinen zusammengeschwemmtem Material bzw. aus Kollapsbrekzien. Die Verkarstung der Evaporite ist häufig quartären Alters (Kap. 5.1) und auf den Einfluss von meteorischem Wasser von der Erdoberfläche zurückzuführen. Deshalb sind die kalkigen Bindemittel in den entsprechenden Gesteinen als meteorische Zemente anzusprechen, gebildet in phreatischen oder vadosen Milieus. Erfahrungen aus Untertagebau ten in evaporitführenden Gesteinen zeigen, dass das Lockermaterial aus den Karsthohlräumen sehr rasch zu einem harten, kompakten Gestein verfestigt werden kann (Gignoux & Barbier 1955, p. 258–259, Winterhalter 1957). Auf die Petrographie und Geochemie der Zemente soll hier nicht im Detail eingegangen und auf die Arbeiten von Warrak (1974) und Amieux & Jeanbourquin (1989) verwiesen werden. Im allgemeinen bestehen die Zemente aus blockigem, durchscheinendem Mikrosparit bis Sparit, wobei die Grösse der einzelnen Calcitkristalle mit der Grösse der gefüllten Porenräume zunimmt. In grobkörnigen Rauhwacken, die zwischen den Fragmenten keine oder nur wenig feinkörnige Grundmasse aufweisen, entstehen relativ grobblockige Calcitzemente, die mit idiomorphen Kristallen in die Hohlräume hinein wachsen können. In den feinkörnigen Partien der Rauhwacken, wo nur kleine intergranulare Poren mit Calcit gefüllt werden, entstehen sehr feinkörnige mikrosparitische Zemente. Da auch die grobkörnigen Rauhwacken meistens eine feinkörnige Matrix aufweisen (Dolomit-Einzelkristalle als feinkörnige Anteile aus den Dolomitbrekzien und eingeschwemmer Detritus), sind die Gesteine auch bei vollständiger Zementation relativ weich und mürbe. Andererseits können grobkörnige, gut sortierte Rauhwacken ausserordentlich gut zementiert und hart sein.

Dünnenschliffuntersuchungen haben gezeigt, dass die Dedolomitisierung bei der Zementation der Karstsedimente und Kollapsbrekzien nur eine untergeordnete Rolle zu spielen scheint. Es sind vielmehr Lösungsprozesse, von denen die Dolomitkomponenten vor, während und nach der Zementation betroffen werden. Bei dieser Lösung werden einerseits die detritischen Dolomitkörper in den feinkörnigen Partien der Rauhwacken korrodiert, andererseits finden intergranulare Lösungsvorgänge zwischen den Körnern der grösseren Dolomitfragmente statt. Dadurch können – vor allem bei grobkristallinen, rekristallisierten Dolomitgesteinen – die Kornverbände der Fragmente aufgelockert werden. Dies dürfte ein Grund für das Herauswaschen der Dolomitfragmente in den an der Oberfläche anstehenden Rauhwacken sein. Ein bedeutender Teil der Lösungsprozesse scheint aber schon unter dem Einfluss der zirkulierenden Karstwässer stattgefunden zu haben und nicht ein Produkt der Verwitterung der Rauhwacken zu sein. An der Oberfläche werden lediglich die bereits mürben und aufgelockerten Dolomitfragmente ausgeschwemmt.

Bei der Entstehung der Rauhwacken müssen also zwei wichtige Prozesse voneinander getrennt werden: einerseits die Verkarstung der Evaporite, die zur Bildung der verkitteten Karstsedimente und zur teilweisen Entfestigung der Dolomitfragmente führt, andererseits die Verwitterung dieser Sedimente, welche für das charakteristische löcherige Aussehen der schliesslich als Rauhwacken angesprochenen Gesteine verantwortlich ist.

Bei der grossen Vielfalt der als Rauhwacken bezeichneten Gesteine ist es eigentlich dieses löcherige Aussehen, welches das diagnostische Merkmal dieser Gesteine darstellt. Überspitzt formuliert bezeichnet also der Begriff Rauhwacke ein Verwitterungsphänomen. Diese Betrachtungsweise mag verdeutlichen, wie heikel es ist, Rauhwacken miteinander zu vergleichen und über ihre Entstehung zu diskutieren, wenn ihr gemeinsamer Name ausschliesslich auf der Art ihrer Verwitterung beruht.

5.5 Einige Gedanken zum «Rauhwackeproblem»

Bereits Brückner (1941) hat empfohlen, «andere dolomitische brecciöse und löcherige Bildungen, die gelegentlich als ‹Rauhwacken› oder ‹tektonische Rauhwacken› bezeichnet wurden, . . . tunlichst anders zu benennen» und den Begriff Rauhwacke für die umgewandelten Dolomit-Gips-Gesteine zu reservieren. Leider verhallte dieser Aufruf ungehört, so dass nun eine ganze Reihe von unterschiedlich entstandenen Gesteinen aufgrund ihres Aussehens unter dem Begriff Rauhwacke gehandelt werden. Bei der Erforschung der Rauhwacken ging die Entwicklung gerade in die umgekehrte Richtung: im Sammelsurium der als Rauhwacken bezeichneten Gesteine wurde DIE Genese gesucht. Diese unglückliche Ausgangslage hat dazu geführt, dass aus der Rauhwackengenese ein Rauhwackeproblem und schliesslich fast ein Glaubenskrieg geworden ist.

Die Situation ist nun tatsächlich nicht einfach zu überblicken: die unterschiedlichen als Rauhwacke bezeichneten Gesteine erfordern jedes für sich eine individuelle Deutung bezüglich Entstehung und Alter. Andererseits kann jede Theorie zur Entstehung von Rauhwacken nur auf gewisse Vorkommen dieser Gesteine angewandt werden. Erschwendend kommt hinzu, dass der Begriff Rauhwacke selber bereits mit genetischem Ballast beladen ist und keineswegs rein deskriptiv verwendet wird. Quelltuffe oder alluviale Sedimente, von ihrem Aussehen her nicht selten ein rauhwackähnliches – d.h. brekziöses, strukturloses und löcheriges – Aussehen aufweisend, werden üblicherweise nicht als Rauhwacken angesprochen. Andererseits spielen häufig andere, z.T. subjektive und nicht-beschreibende Kriterien eine wichtige Rolle, um ein Gestein als Rauhwacke auszuscheiden: Assoziation mit triadischen Gesteinen, Assoziation mit Evaporiten, bizarre Verwitterungsformen, allgemeiner Feldaspekt, persönliche Vorstellung von Rauhwacken.

Alles in allem kann festgestellt werden, dass einerseits der Begriff Rauhwacke genetisch unterwandert ist und genetische Assoziationen hervorruft, dass andererseits die «historische Entwicklung» der Rauhwackenforschung und die lose Nomenklatur der entsprechenden Gesteine einen idealen Nährboden für Missverständnisse und Konfusionen bereitet haben. Bei der Diskussion um die Entstehung der als Rauhwacke bezeichneten Gesteine ist es kaum möglich, Gleiche mit Gleichen zu vergleichen. Deshalb ist das Rauhwackeproblem nicht einfach zu lösen, auch wenn (oder besser: gerade weil) es wohl mehr ein Problem der Nomenklatur als der Entstehung dieser Gesteine ist. Auf jeden Fall müssen bei der Verwendung des Begriffs Rauhwacke vorläufig Hinweise auf dessen Entstehung mitgeliefert werden. Nicht um der Genese dieser Gesteine willen, sondern um allfällige falsche Assoziationen, die mit diesem Namen verbunden sein können, zu vermeiden.

6. Schlussfolgerungen

Die Entstehung der von uns untersuchten Rauhwacken ist auf die Lösung und Verkarstung von Evaporiten zurückzuführen. Eine Rauhwackengenese durch die verwitterungsbedingte Umwandlung (Metasomatose) derselben scheint nicht stattgefunden zu haben. Die Struktur und Geometrie der Rauhwackekörper ist abhängig vom Gefüge der Ausgangsgesteine.

In den Hohlräumen von verkarsteten dolomitarmen Gipsgesteinen (Becken-Evaporite) werden komponentengestützte, häufig strukturlose Brekzien oder feinkörnige, geschichtete und laminierte Sedimente abgelagert, die durch die zirkulierenden Karstwasser zu Rauhwacken verkittet werden. Die Formen der Rauhwackekörper widerspiegeln die Geometrien der Karsthohlräume: es können kleine, bevorzugt länglich geformte und senkrecht orientierte Rauhwackekörper, kontinuierliche Rauhwackezüge (nicht gleichzusetzen mit Rauhwackeschichten) und Rauhwackeblockschutt gebildet werden. Diese Rauhwacken sind als Karstsedimente im engeren Sinne anzusprechen.

Bei der Verkarstung von gipsführenden Dolomitgesteinen (Sabkha-Evaporite), wo die Dolomitfragmente nach der Lösung des Gips nicht transportiert, sondern an Ort und Stelle zementiert werden, werden sowohl die sedimentären Gefüge als auch die Deformationsstrukturen der Ausgangsgesteine auf die Rauhwacken vererbt. Es entstehen mehr oder weniger stratiforme Rauhwacken mit schichtförmig angeordneten, zusammenpassenden Dolomitfragmenten, welche als Kollapsbrekzien im engeren Sinne gedeutet werden können.

Auf die Datierung der Evaporitverkarstung und Rauhwackengenese gibt es in den von uns untersuchten Gesteinen bisher nur indirekte Hinweise: die Ausrichtung der Sedimentstrukturen in den feinkörnigen Partien der Rauhwacken, die Geometrien der Rauhwackekörper, das Komponentenspektrum in den polymikten Rauhwacken und die Assoziation mit möglicherweise fluvioglazialen Ablagerungen sprechen in allen Beispielen für eine Entstehung der Rauhwacken nach den alpinen Deformationen, wahrscheinlich sogar erst im Quartär. Wo die Verkarstung der Evaporite mit oberflächlichen Entwässerungssystemen assoziiert ist (z.B. Val Schais, Gipsgrat) und die Rauhwacken direkt von alluvialen Sedimenten überlagert werden, kann die Unterscheidung der Rauhwacken (in Karsthohlräumen abgelagert) und der alluvialen Sedimente (an der Oberfläche geschüttet) schwierig und der Übergang zwischen den beiden fliessend sein.

Die Assoziation von fluviatilen Prozessen an der Erdoberfläche mit der Verkarstung von Evaporiten im Untergrund scheint für die Rauhwackengenese eine wichtige Rolle gespielt zu haben.

Die Verknüpfung der Rauhwacken mit tektonischen Kontakten und Abscherhorizonten ist auf die rheologischen Eigenschaften der evaporitischen Ausgangsgesteine der Rauhwacken zurückzuführen. Diese sind bereits bei niedrigen Temperaturen sehr fliessfähig, was sie als Abscherhorizonte bei Deckenbewegungen oder als inkompetente Schichten bei Faltung gegenüber anderen Gesteinen bevorzugt. Die von uns untersuchten Rauhwacken haben aber nicht selber als Abscherhorizonte gedient, sondern sind als Folge der Karstprozesse sekundär mit den Abscherhorizonten bzw. Evaporiten verknüpft. Die Brekziierung der Dolomitschichten in den evaporitischen Ausgangsgesteinen ist eine Folge des grossen Kompetenzkontrastes zwischen dem spröden Dolomit und den fliessfähigen Evaporiten. Obwohl die Rauhwacken also zu einem grossen Teil aus tekto-

nisch brekziertem Material bestehen, sind sie nicht als tektonische Brekzien, sondern als Sedimentgesteine anzusprechen.

Der Begriff Rauhwacke ist sehr lose definiert und kann für eine ganze Reihe von unterschiedlich entstandenen, löcherig-porösen Gesteinen angewandt werden. Unser Verkarstungsmodell darf deshalb nicht auf alle als Rauhwacken bezeichneten Gesteine angewandt werden. Es zeigt aber den Prozess der Rauhwackisierung von Evaporiten, den Einfluss der unterschiedlich aufgebauten Ausgangsgesteine auf die Strukturen der Rauhwacken und liefert einige Kriterien für die relative zeitliche Einstufung der entsprechenden Rauhwacken. Jedes einzelne Rauhwackevorkommen muss schliesslich individuell nach seiner Entstehung und seinem Alter beurteilt werden, und ob es auf Verkarstungsvorgänge in Evaporiten oder auf andere Ausgangsgesteine und Prozesse zurückzuführen ist.

Verdankungen

Adrian Pfiffner hat diese Arbeit angeregt und betreut. Für seine Ratschläge und die zahlreichen Diskussionen danke ich ihm herzlich. Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Universität Bern und dem Schweizerischen Nationalfonds. Die konstruktive Kritik von Marco Herwegh, Luzi Hitz und der Reviewer H. Masson und W. Müller hat zur Verbesserung früherer Versionen des Manuskripts beigetragen. Auch ihnen danke ich herzlich.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMIEUX, P. & JEANBOURQUIN, P. 1989: Cathodoluminescence et origine diagénétique tardive des cargneules du massif des Aiguilles Rouges (Valais, Suisse). *Bull. Soc. géol. France* 8, 123–132.
- BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. 1981: Geologie der Tiefbohrung Vorderriss 1 (Kalkalpen, Bayern). *Geologica bavar.* 81, 17–53.
- BADOUX, H., GAGNEBIN, E., LOMBARD, A., McCONNELL, R.B., DE RAAF, M., SCHAUB, H.P. & VISCHER, A. 1962: Feuille Lenk. *Atlas géol. Suisse 1:25 000. Comm. géol. Suisse.*
- BADOUX, H. & LOMBARD, A. 1962: Notice explicative de la feuille Lenk. *Atlas géol. Suisse 1:25 000. Comm. géol. Suisse.*
- BRÜCKNER, W. 1941: Über die Entstehung der Rauhwacken und Zellendolomite. *Eclogae geol. Helv.* 34, 117–134.
- BRUNNSCHWEILER, R.O. 1948: Beiträge zur Kenntnis der Helvetischen Trias östlich des Klausenpasses. *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich, Serie C*, Nr. 33.
- CORNELIUS, H.P. 1935: Geologie der Err-Julier-Gruppe. *Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F.70 I.*
- DRONKERT, H., BLÄSI, H.-R. & MATTER, A. 1990: Facies and origin of triassic evaporites from the NAGRA boreholes, Northern Switzerland. *Geologische Berichte Nr. 12. Landeshydrologie und -geologie, Bern.*
- FRANK, S.M. 1986: Die Raibl-Gruppe und ihr Liegendes im Oberostalpin Graubündens. *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich, N.F. 269.*
- FURRER, H. (Ed.) 1985: Field workshop on triassic and jurassic sediments in the Eastern Alps of Switzerland. *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich, N.F. 248.*
- GIGNOUX, M. & BARBIER, R. 1955: Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson et Cie, Paris.
- JÄCKLI, H. 1941: Geologische Untersuchungen im nördlichen Westschams (Graubünden). *Eclogae geol. Helv.* 34, 17–105.
- JEANBOURQUIN, P. 1986: Les cornieules polymictes des Préalpes internes et de l'Autochthon helvétique en Suisse romande. *Thèse Univ. Lausanne.*
- 1988: Nouvelles observations sur les cornieules en Suisse occidentale. *Eclogae geol. Helv.* 81, 511–538.
- JORDAN, P. 1994: Evaporite als Abscherhorizonte. Eine gefügekundlich-strukturgeologische Untersuchung am Beispiel der Nordschweizer Trias. *Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F. 164.*
- JORDAN, P., NOACK, T. & WIDMER, T. 1990: The evaporite shear zone of the Jura boundary thrust – new evidence from Wisen well (Switzerland). *Eclogae geol. Helv.* 83, 525–542.

- KRAUTER, E. 1971: Zur Genese rauhwackiger Breccien der alpinen Trias an Beispielen aus der Schweiz und Österreich. Geol. paläont. Mitt. Innsbruck 1, 1–12.
- LEINE, L. 1971: Rauhwacken und ihre Entstehung. Geol. Rdsch. 60, 488–524.
- MASSON, H. 1972: Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique. Eclogae geol. Helv. 65, 27–41.
- MIDDLETON, G.V. 1961: Evaporite solution breccias from the Mississippian of southeast Montana. J. sediment. Petrol. 31, 189–195.
- MÜLLER, W.H. 1982: Zur Entstehung der Rauhwacke. Eclogae geol. Helv. 75, 481–494.
- OBERHOLZER, J. (Bearb.) 1942: Geologische Karte des Kantons Glarus, 1:50 000. Schweiz. geol. Komm.
- RICHTER, D.K. & FÜCHTBAUER, H. 1981: Merkmale und Genese von Breccien und ihre Bedeutung im Mesozoi-kum von Hydra (Griechenland). Z. dtsh. geol. Ges. 132, 451–501.
- RIEDMÜLLER, G. 1977: Genese und Charakteristik der Rauhwacken im Pittental (Niederösterreich). Geol. Rdsch. 65, 290–332.
- SCHMID, S. 1973: Geologie des Umbrailgebiets. Eclogae geol. Helv. 66, 101–210.
- SCHMID, S.M. & HAAS, R. 1989: Transition from near-surface thrusting to intrabasement decollement, Schlinig thrust, Eastern Alps. Tectonics 8, 697–718.
- SCHREIBER, B.C. 1986: Arid Shorelines and Evaporites. In: Sedimentary Environments and Facies. (Ed. by READING, H.G.). Blackwell Sci. Publ., London, Oxford, 189–228.
- SHINN, E.A. 1983: Tidal flat environment. In: Carbonate depositional environments. (Ed. by SCHOLLE, P.A., BEBOUT, D.G. & MOORE, C.H.). Mem. amer. Assoc. Petroleum. Geol. 33, 173–210.
- TRÜMPY, R. 1980: Geology of Switzerland, a guide book (Part A). Wepf & Co., Basel.
- VEARNCOMBE, J.R. 1982: The tectonic significance of Triassic dolomite and cagneule in the Gran Paradiso region, Western Alps. Geol. Mag. 119, 301–308.
- WARRAK, M. 1974: The petrology and origin of dedolomitised, veined or brecciated carbonate rocks, the «cornieules» in the Fréjus Region, French Alps. Quart. J. geol. Soc. London 130, 229–247.
- WINTERHALTER, R.U. 1957: Schweizerische Bundesbahnen, Kraftwerk Ritom/Zuleitung der Garegna. Geologi-scher Schlussbericht Nr. 109o.

Manuskript eingegangen 18. März 1994

Revidierte Fassung angenommen 25. November 1994