Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 77 (1984)

Heft: 3

Artikel: Geologische Untersuchungen an Evaporiten der Mittleren Trias in der Nordschweiz am Beispiel des Bergwerks Felsenau

Autor: Baumann, Werner / Stucky, Klaus

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-165520

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: 17.07.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 77	Nr. 3	Seiten 511–540	Basel, Dezember 1984

Geologische Untersuchungen an Evaporiten der Mittleren Trias in der Nordschweiz am Beispiel des Bergwerks Felsenau

Von WERNER BAUMANN[1]) und KLAUS STUCKY[2])

ZUSAMMENFASSUNG

Die im Bergwerk Felsenau (Nordschweiz) auftretenden Gesteine werden beschrieben. Bei den untersuchten Gesteinen handelt es sich um evaporitische Schichten aus Sulfaten (Gips und Anhydrit) und Tonen. Das Bergwerk wird in zwei Bereiche eingeteilt: einen undeformierten und einen deformierten.

Im undeformierten Bereich liegen die Sulfate vorwiegend als Gips vor. Ausgenommen ist eine etwa 3 m mächtige Anhydrit-Schicht. Die Gips–Ton-Schichten zeigen aufgrund von palynologischen Untersuchungen kontinentales Bildungsmilieu. In den Gips–Ton-Schichten konnten Erosionserscheinungen beobachtet werden, die als mögliche triadische Entwässerungsphänomene interpretiert wurden.

Auf stratigraphisch gleicher Höhe treten im deformierten Bereich Faltenstrukturen in den Sulfat-Schichten auf. Die Schichten liegen heute vorwiegend als Anhydrit-Schichten vor. Die Bildung der Anhydrit-Schichten wird auf das rheologische Verhalten von Gips zurückgeführt. Die Deformation dieser Schichten wird der Mettauer Überschiebung zugeschrieben, wobei die Hauptdeformation dieser Überschiebung von den evaporitischen Schichten aufgefangen worden ist.

ABSTRACT

The rocks from the mine of Felsenau (northern part of Switzerland) are discussed. They consist mainly of evaporitic rocks (such as gypsum and anhydrite) and clay. The whole area of the mine can be divided into two parts: an undeformed and a deformed region.

In the undeformed part the sulfates are predominantly gypsum, except an anhydrite layer of about 3 m thickness. Palynological investigations of the gypsum–clay layers indicate a continental environment of sedimentation. In one part of the undeformed region a drainage system (of triassic age?) was found which has previously not been described in the evaporites of the middle Triassic in the northern part of Switzerland.

In the deformed part of the mine folded anhydrite layers were found on the same stratigraphic level like the gypsum–clay layers of the undeformed part. The formation of these anhydrite layers is due to the rheological behaviour of gypsum. The youngest deformation phase of the Felsenau area is connected to the Mettauer thrust zone.

1. Einleitung und Problemstellung

Das Bergwerk Felsenau ist eines der ganz wenigen noch in Betrieb stehenden Bergwerke der Schweiz (Besitzerin: Gips-Union AG in Zürich). Heute wird im Bergwerk nur noch unter Tage abgebaut. Es werden dabei Gips und Anhydrit als Zuschlagstoff

[1]) Geologisches Institut, ETH-Zentrum, CH–8092 Zürich.
[2]) Gips-Union AG, CH–8001 Zürich.

für die Zementindustrie gewonnen. Einige Stollen des Bergwerks sind wegen Einsturzgefahr und Wassereinbrüchen nicht mehr zugänglich. In einem weiteren Teil wird eine Champignonzucht betrieben.

Die gesamte Stollenlänge beträgt über 15 km. Das Bergwerk Felsenau bietet die Möglichkeit, Gips und Anhydrit nebeneinander zu studieren. Verschiedene Arbeiten wurden bereits durch das EIR, die NOK und die Nagra durchgeführt, dies vor allem im Hinblick auf eine mögliche Lagerung radioaktiver Abfälle in Anhydritgesteinen. Einige Zwischenresultate sind durch WILDI (1972) beschrieben worden.

Durch das Entgegenkommen der Gips-Union AG wurde es möglich, die «Felsenau» zu untersuchen. Die Abbaustollen geben einen recht guten Einblick in den zwei- und, eingeschränkt, in den dreidimensionalen Aufbau der Evaporite des mittleren Muschelkalkes. Neben tektonischen und stratigraphischen Fragen werden auch sedimentologische Aspekte diskutiert. Die Hauptarbeit bestand in einer detaillierten Aufnahme von rund 1,5 km Stollenprofilen (Tafeln).

2. Geographische Lage und geologischer Rahmen

Das Bergwerk Felsenau befindet sich unter dem Plateau von Reuenthal (Kt. Aargau) westlich des Zusammenflusses von Aare und Rhein (Landeskarte Blatt Zurzach, 1050; Koordinaten: 273.550/657.550, Fig. 1).

Der Abbau erfolgt entlang der sogenannten Sulfatserie (-zone) des mittleren Muschelkalks. In der konstruktiven Verlängerung der Mettauer Überschiebungszone liegt das Bergwerk Felsenau. Diese Störungszone macht sich im Bergwerk bemerkbar. Das Bergwerk kann in zwei verschiedene Bereiche unterteilt werden: In einen deformierten, mit der Mettauer Störungszone, und einen undeformierten Bereich.

2.1 Die Schichtfolge in der Umgebung des Bergwerkes (Fig. 2)

— *Buntsandstein:* Der Buntsandstein liegt dem «Permo-Karbon» oder direkt der Einebnungsfläche des Kristallins auf. Das Profil des oberen Buntsandsteins ist im Gebiet der Felsenau durch Bohrungen der NOK bekanntgeworden (Sondierbohrungen C1 und C2; vgl. Fig. 3). Diese dringen bis maximal 8 m Tiefe in den Buntsandstein ein. Es handelt sich hauptsächlich um Sandsteine, die im obersten Teil in sandige Tonschiefer übergehen. Im tiefsten erbohrten Teil finden sich noch vereinzelte Karneoleinlagen. Der mittlere und der untere Buntsandstein sind nicht erbohrt worden (Atomkraftwerke Beznau, 1972).

— *Wellengebirge (unterer Muschelkalk):* Das Wellengebirge erreicht in den beiden Bohrungen (C1 und C2) eine Mächtigkeit von 48 m. Der untere Teil des Wellengebirges, der Wellendolomit, besteht vorwiegend aus grauen bis dunkelgrauen, tonigen Mergeln. Im mittleren Teil treten Dolomitlagen auf. Gegen oben werden die Gesteine kalkiger. In den mergeligen Partien treten vereinzelt mehrere Zentimeter mächtige spätige Kalkschichten auf. Etwa 6 m über der Grenze Buntsandstein–Muschelkalk findet sich ein dichter Kalk mit Galenitkörnern (Bleiglanz). Dieser Horizont wurde in beiden Sondierbohrungen erfasst. Die Untergrenze des oberen Wellengebirges wird durch das Auftreten von tonhaltigem Gips definiert (WILDI 1972).

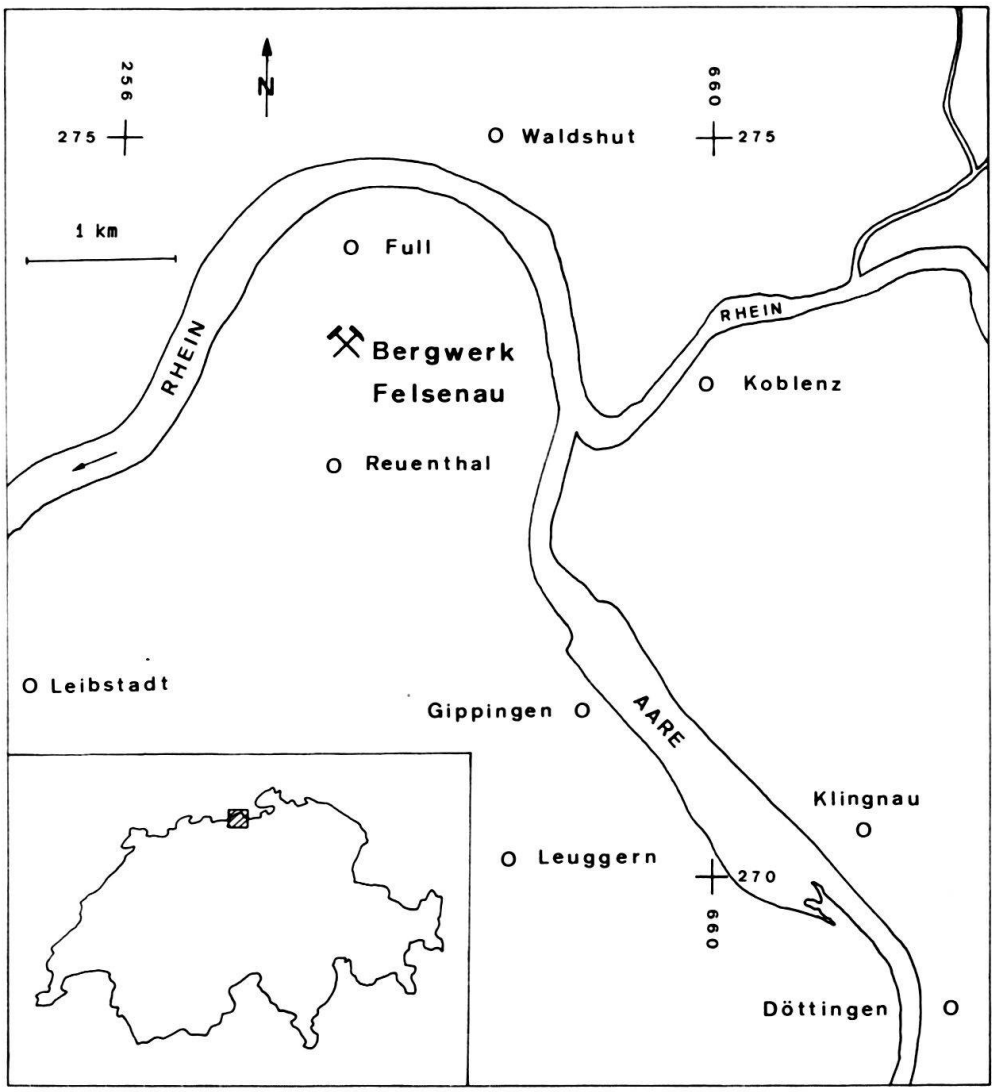


Fig. 1. Geographische Lage des Bergwerks Felsenau.

Diese Schichten bestehen vorwiegend aus tonigem Dolomit in welliger Lagerung und kleineren Gipslagen. Damit erreicht die Mächtigkeit des oberen Wellengebirges 6–8 m.

— *Anhydritgruppe (mittlerer Muschelkalk):* Die Mächtigkeit der Anhydritgruppe beträgt in der Felsenau rund 50 m. MERKI (1961) gliedert die Anhydritgruppe in den Anhydritdolomit und den Hauptanhydrit (hier Sulfatserie genannt). In ungefähr gleicher stratigraphischer Stellung – wo in benachbarten Gebieten (Rheinfelden, Zurzach, Böttstein) Salzlager gefunden werden können (HAUBER 1971; MÜHLBERG 1906; Nagra-Bohrung Böttstein) – treten im Bergwerk Felsenau zwei sogenannte «Gipsbrekzien» (WILDI 1975) auf. Sie sind durch eine etwa 6–8 m mächtige Sulfat-Schicht getrennt. Eine eingehende Beschreibung dieser in der Felsenau auftretenden Gesteine sowie die Diskussion über den Begriff «Gipsbrekzie» finden sich in Kapitel 3.

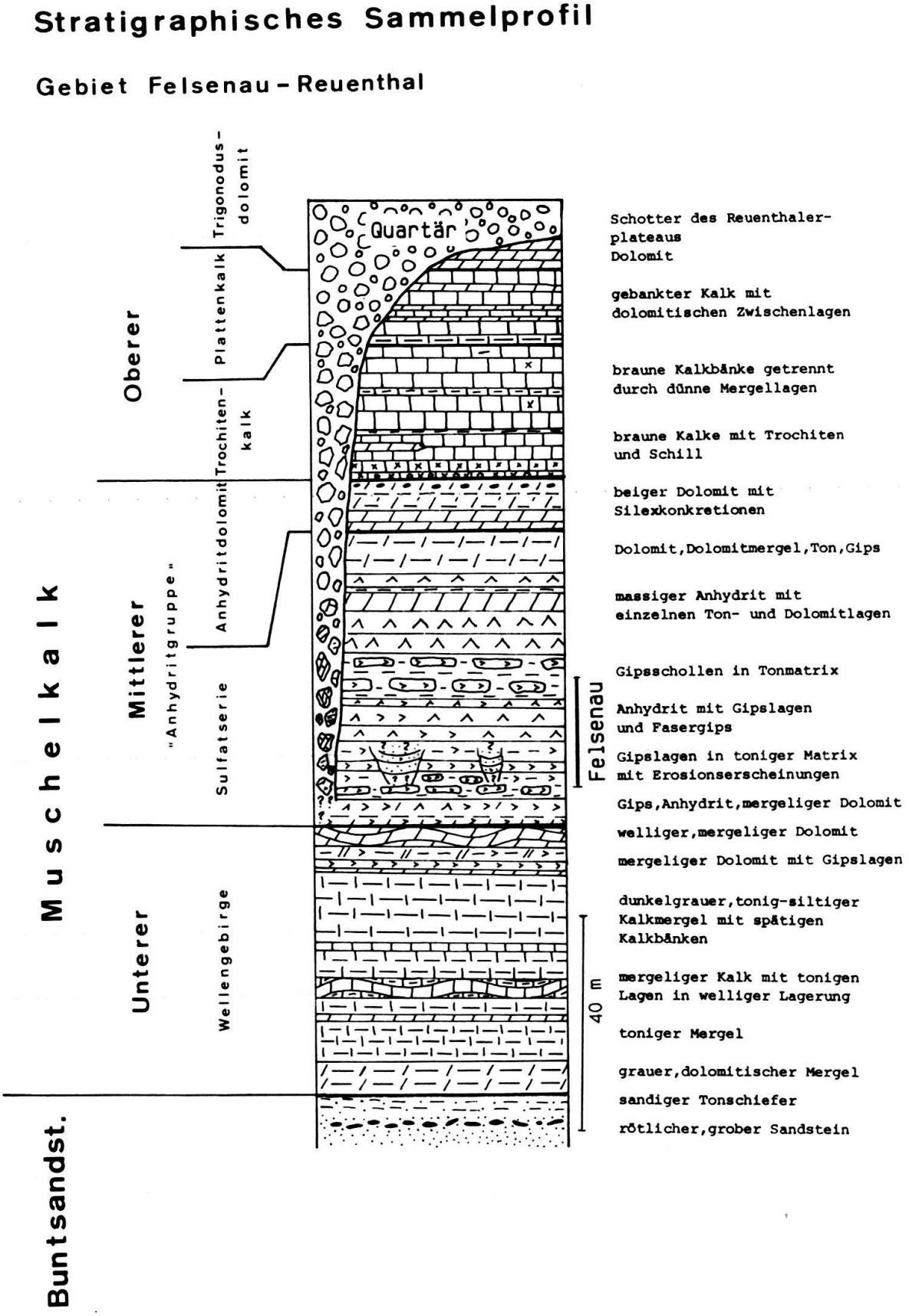


Fig. 2. Stratigraphisches Sammelprofil durch das Gebiet Felsenau–Reuenthal (nach MERKI 1961, Bohrungen der Gips-Union AG und der NOK sowie eigenen Aufnahmen).

— *Hauptmuschelkalk (oberer Muschelkalk):* Über der Anhydritgruppe befinden sich, vom Liegenden zum Hangenden, Trochitenkalk, Plattenkalk und Trigonodusdolomit (MERKI 1961). Der Trochitenkalk, Mächtigkeit rund 25 m, ist durch eine basale oolithische Schicht (dolomitischer Kalk) charakterisiert. In der Umgebung der Felsenau treten die Oolithe nicht in Form einer durchgehenden Schicht auf, sondern in einzelnen Nestern. Die Basis des Plattenkalkes wird von MERKI (1961) in das Liegende eines charakteristischen Mergelbandes gelegt. Die Mächtigkeit des Plattenkalkes beträgt rund 17 m. Der obere Plattenkalk ist in der eigentlichen Plattenkalk-Fazies ausgebildet. Der untere Teil des Plattenkalkes besteht aus einer Glaukonit führenden Wechsellagerung von Bruchschill- und Encrinitenkalken, dolomitischen Kalken und kalkigen Dolomiten. Der Trigonodusdolomit ist nur noch an der nördlichen Stirn des Reuenthaler Plateaus mit wenigen Metern Mächtigkeit aufgeschlossen. Aufgrund einer auf dem Plateau angesetzten Bohrung (34F) der Gips-Union AG muss angenommen werden, dass der Trigonodusdolomit und teilweise auch der Plattenkalk wegerodiert sind.

— *Quartär:* Auf dem Reuenthaler Plateau liegen bis 50 mächtige Deckenschotter und Moränen der Riss-Eiszeit (HANTKE 1967).
Im Bergwerk greifen über 100 m tiefe Karsterscheinungen (Dolinen) bis in den unteren Bereich des mittleren Muschelkalkes hinunter.

3. Stratigraphie der Sulfatserie im Bergwerk Felsenau

Das Bergwerk befindet sich in der Sulfatserie des mittleren Muschelkalkes (Fig. 3 und 4).

Im folgenden wird eine neue Nomenklatur für die stratigraphische Gliederung der Sulfatserie verwendet, die sich nur auf das Gebiet des Bergwerkes Felsenau, mit fehlender Salzschicht, anwenden lässt (ältere Namen in Klammer, nach WILDI 1975):

— Mergel und Tone der Sulfatserie (-zone) (der Anhydritgruppe)
— obere Sulfat-Schichten (-zone)
— obere Gips-Schichten (obere Gipsbrekzie)
— mittlere Sulfat-Schichten (-zone)
— untere Gips-Schichten (untere Gipsbrekzie)
— untere Sulfat-Schichten (-zone)

Sulfatzone wird in Sulfat-Schichten umbenannt, da der Begriff «Zone» nach der Empfehlung der Arbeitsgruppe für stratigraphische Terminologie (1973) nicht in der Lithostratigraphie verwendet werden soll. In unserem Fall liegt ein Gemisch von Gips und Anhydrit vor, weshalb die Bezeichnung «Sulfat-» beibehalten wird.

Der nicht ganz klare Begriff der «Gipsbrekzie» wird durch den neutraleren Begriff «Gips-Schichten» ersetzt. Es wird also keine neue Definition der Schichten vorgenommen, sondern nur eine Umbenennung der alten Begriffe, da diese nur bedingt richtig und haltbar sind.

Das Bergwerk Felsenau schliesst folgende Schichten auf (Fig. 4):
— obere Gips-Schichten (etwa 5 m aufgeschlossen)

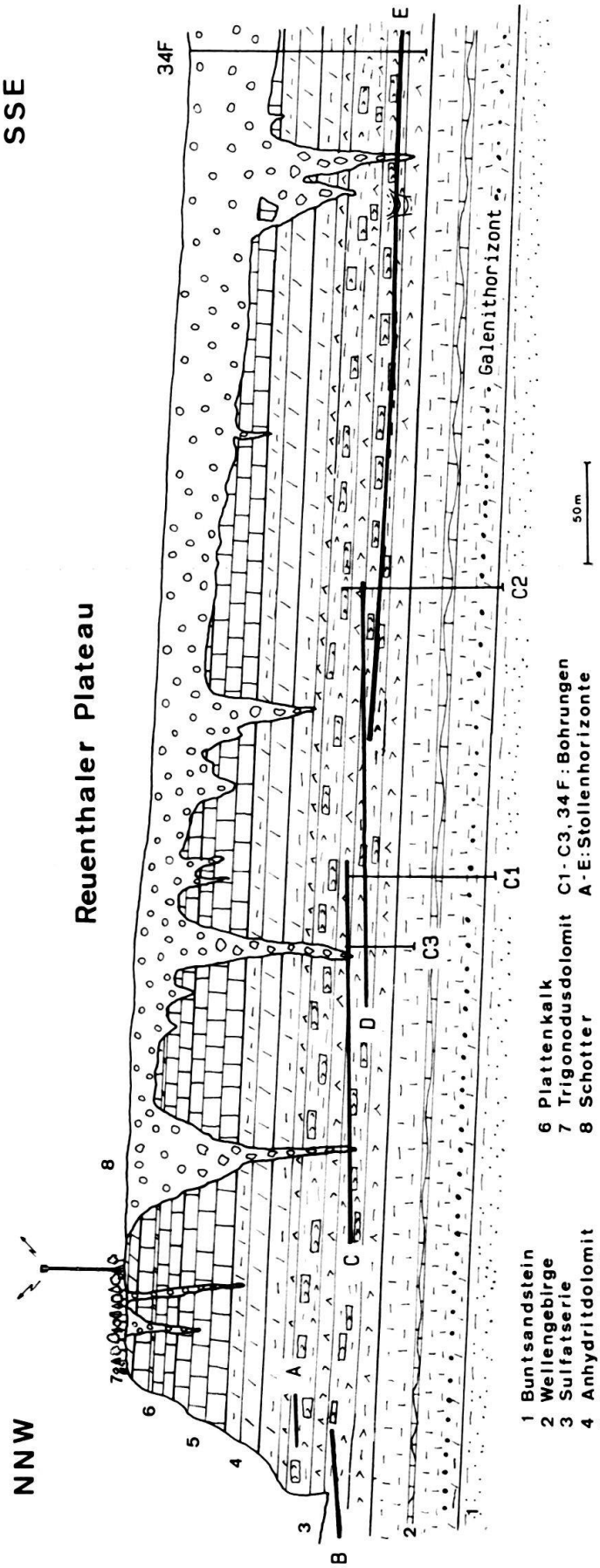


Fig. 3. Querprofil durch das Reuenthaler Plateau (nach Gips-Union AG sowie eigenen Aufnahmen).

Stratigraphisches Profil durch das Bergwerk Felsenau

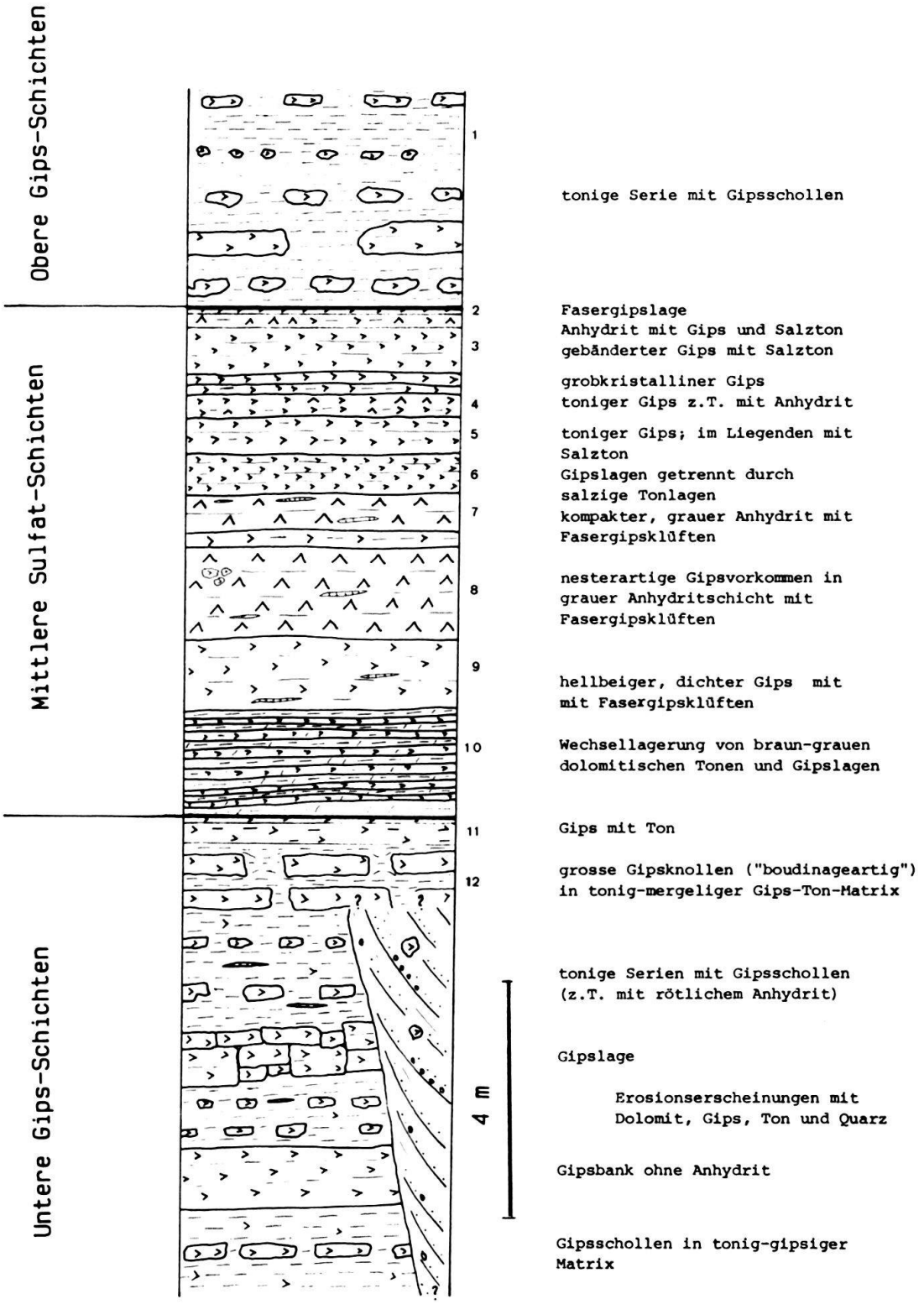


Fig. 4. Stratigraphisches Profil durch das Bergwerk Felsenau. Die Nummern beziehen sich auf die chemischen Analysen in Figur 5.

— mittlere Sulfat-Schichten (8–8,5 m mächtig)
— untere Gips-Schichten (etwa 8 m aufgeschlossen)

Die beiden Gips-Schichten sind also nicht restlos aufgeschlossen.

3.1 Obere und untere Gips-Schichten (Gipsbrekzie)

Im folgenden werden die beiden Gips-Schichten (obere und untere) zusammen besprochen, da das lithologische und das strukturelle Bild der beiden Schichten, soweit aufgeschlossen, über weite Bereiche identisch sind. Ferner kommt hinzu, dass die oberen Gips-Schichten nur noch an wenigen Stellen gefahrlos studiert werden können. Die Ausführungen stützen sich deshalb vor allem auf die unteren Gips-Schichten.

Die Aufnahme der Stollen wurde durch die Tatsache erschwert, dass es immer schwierig war, das Gips-Ton-Verhältnis abzuschätzen. Die Signatur bzw. der Begriff «Ton» impliziert also nicht automatisch, dass es sich dabei um einen reinen Ton handelt, sondern um ein Gemisch von Ton und Gips. Hingegen beschreibt die Signatur «Gips» einen fast reinen Gips mit wenig Ton. Der durchschnittliche Gipsgehalt im E-Stollen-Boden beträgt etwa 65% (Durchschnittswert beim Abbau der Gesteine). Die Mächtigkeit der beiden Gips-Schichten beträgt je rund 10 m. Das Gefüge im Grossbereich der unteren Gips-Schichten ist in Profil E/L5 (Tafel) sowie in Figur 7 dargestellt.

Es kann immer wieder beobachtet werden, wie sich einzelne «Gipsknollen» (zentimeter- bis dezimetergross) zu einer Gipslage «zusammenschliessen», um dann für eine grössere Distanz (Dekameter) eine massive Gipsbank zu bilden, die sich anschliessend wieder «auflöst». Es gibt nur wenige durchgehende Gipshorizonte in den unteren Gips-Schichten. In diesen massigeren Abschnitten lässt sich oft eine Laminierung feststellen. Kleinere Brüche können die Lagen im Zentimeterbereich versetzen. Häufig lassen sich auch in den massigeren Gipsbereichen einzelne Gipsknollen feststellen, die durch Tonhäutchen getrennt sind. In den tonigen Partien der unteren Gips-Schichten treten oft eckige Gipsknollen auf; gerundete sind von untergeordneter Bedeutung. Diese Knollen können einzeln, aber auch in Nestern oder Lagen auftreten. In und um die einzelnen Knollen kann keine abnormale Deformation des Gipses oder der Tone beobachtet werden. Man kann also ein sedimentäres oder diagenetisches Gefüge nicht ausschliessen.

Der mineralogische Aufbau lässt sich vor allem in den Gips-Schichten studieren. Die mehr tonigen Partien lassen sich kaum für Dünnschliffe präparieren. Es treten folgende Mineralien auf (Durchschnittsgehalt; Extremwerte variieren zwischen reinem Gips und reinem Ton):
— Gips (etwa 65%)
— Ton (etwa 25%, davon über 90% Illit)
— Karbonate (Calcit, Dolomit), wenige Prozente
— Anhydrit, Quarz (beide akzessorisch)
Genaue Gehaltsangaben sind problematisch, da die Gehalte an Gips und Ton stark variieren.

Gips zeigt bei allen Korngrössen (Millimeter bis etwa 0,01 mm) fast immer undulöses Auslöschen, häufig schachbrettartig. Sehr deutlich kommt dieses Phänomen bei den grösseren Körnern zum Ausdruck. Die kleinen Körner bilden sich vor allem durch

Probennummer (vergl. Fig. 4.)	Gehalt (%)		
	Gips	Anhydrit	Nichtsulfat
1	40.	0.	60.
2	19.	69.	12.
3	80.	0.	20.
4	73.	20.	7.
5	87.	0.5	12.
6	85.	0.	15.
7	5.	93.	2.
8	22.	71.	7.
9	91.	0.5	8.5
10	19. - 85.	0. - 5.	81. - 10.
11	90.	0.	10.
12	65.	2.	33.

Fig. 5. Chemische Analyse einiger Gesteinsproben des Bergwerks Felsenau (vgl. Fig. 4).

Korngrenzwandern (dynamische Rekristallisation) aus den grössern Kristallen. Aus diesem Grund muss angenommen werden, dass die grösseren Kristalle älter sind als die kleineren. Ob es sich bei den älteren, grösseren Kristallen um Primärstrukturen handelt oder nicht, ist nicht sicher zu beantworten, da keine eindeutig primären Sedimentstrukturen gefunden werden konnten. Aus diesem Grunde wird hier auch nicht von einer 1. oder 2. Generation gesprochen, sondern nur von einer älteren und jüngeren. Kataklase von grossen Gipskörnern kann nur an ganz wenigen Stellen festgestellt werden. Die zerbrochenen Kristalle sind mit nicht undulös auslöschenden Gipskristallen wieder verheilt. Ebenfalls Mühe bereitet die Beantwortung der Frage, ob es sich beim Gips der älteren Generation um hydratisierten Anhydrit handelt oder nicht. Typische Anhydritstrukturen, wie Pseudomorphosen von Gips nach Anhydrit, konnten nicht festgestellt werden. Anhydrit tritt nur vereinzelt in Form von max. 1 mm langen leistenförmigen Kristallen auf. Diese Anhydritkristalle könnten allenfalls als korrodierte Überreste von grösseren Anhydritkristallen angesehen werden, was aber nicht zwangsläufig bedeutet, dass dieser Anhydrit dann primär gebildet worden wäre. Auch KOSMAHL (1969) und LANGBEIN et al. (1982) weisen darauf hin, dass die Unterscheidung von primären und sekundären Gefügen in Sulfatgesteinen oft schwierig oder gar unmöglich ist.

Dolomit tritt in feinsten Körnern auf. Oft sind diese unregelmässig verteilt; sie können aber auch nesterartig auftreten. Im Gegensatz dazu erscheint Calcit nur in grösseren Körnern (etwa 0,1 mm), die zum Teil idiomorph ausgebildet sind. Es könnte sich dabei um Bruchstücke grösserer Calcitkristalle handeln.

In den Gipsknollen sind die Tonmineralien allgemein fein verteilt. An den Rändern von Knollen treten sie gehäuft auf und bilden dadurch einen natürlichen Abschluss der Knollen.

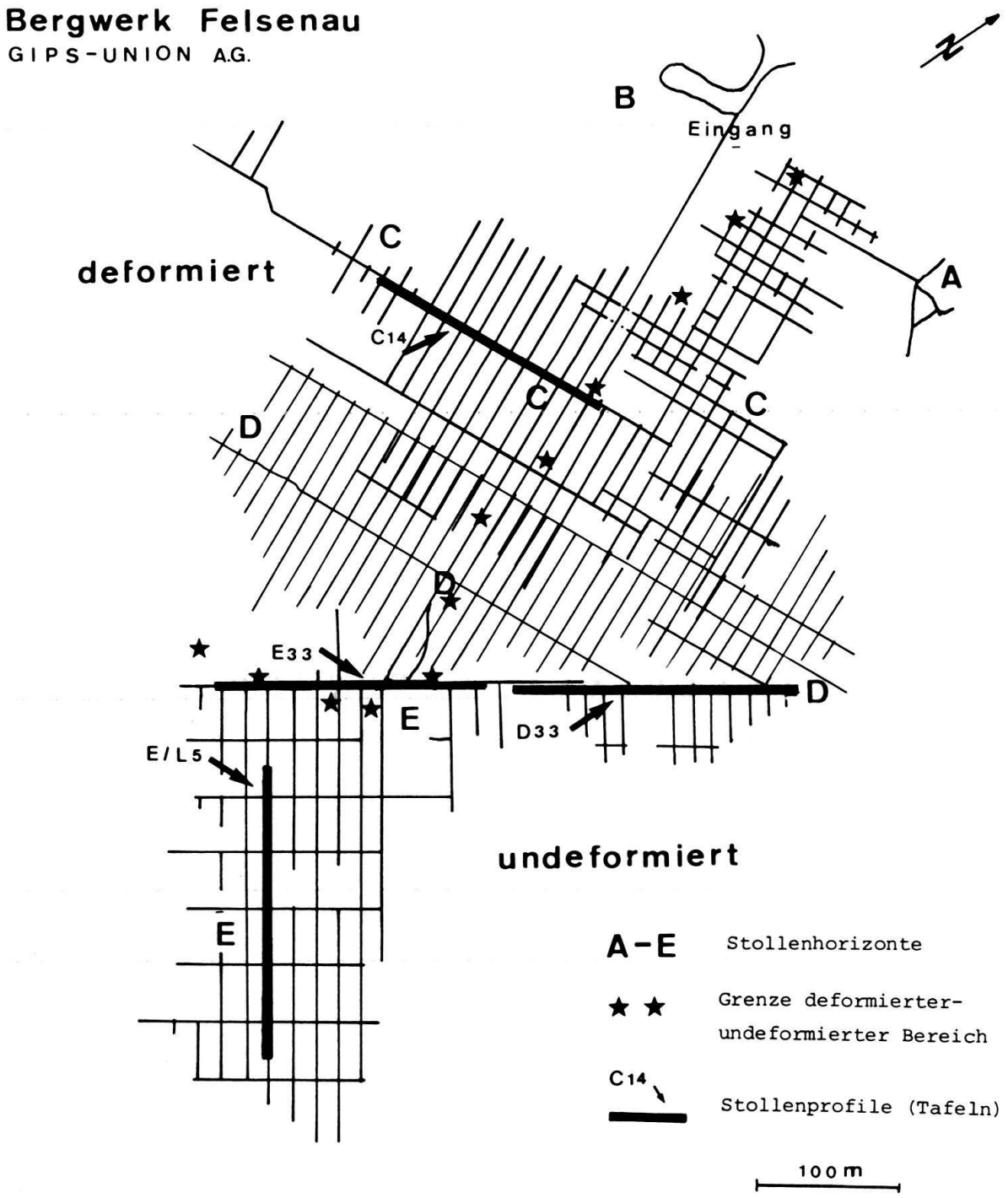


Fig. 6. Stollenplan des Bergwerks Felsenau mit Profilspuren (Tafeln) und der Grenze zwischen undeformiertem und deformiertem Bereich.

3.1.1 Erosionserscheinungen in den unteren Gips-Schichten

Beim bergmännischen Abbau fiel den Mitarbeitern der «Felsenau» immer wieder auf, dass gewisse kurze Strecken sehr problematisch abzubauen waren; dies vor allem im Hinblick auf die Sicherung des Stollens. Es musste nämlich festgestellt werden, dass einige Zeit, nachdem die Sicherungsarbeiten durchgeführt worden waren, bis zu kubikmetergrosse Stücke von den Seitenwänden und der Decke herunterfielen. Die Länge dieser gefährlichen Abschnitte beträgt bis über 20 m.

Im Stollenprofil E/L5 (Tafel) wurde eine solche kritische Stollenstrecke aufgenommen. Dabei zeigte sich, dass das nachfallende Material nicht aus dem normalen Schichtverband stammt, sondern dass es sich um tonig-«arenitisches», dünngeschichtetes Gestein handelt, das ehemalige Erosionsrinnen oder Karsthöhlen füllt. Es konnte ein deutlicher lithologischer und struktureller Unterschied zwischen Nebengestein und Erosionsphänomenen festgestellt werden (Fig. 7–9). Die Grenzen der Füllungen bilden klare Diskordanzen zum Nebengestein. Der Übergang zwischen den Erosionserscheinungen und dem Nebengestein ist sehr scharf und zeigt keinerlei Anzeichen einer mechanischen Beeinflussung. Ob es sich beim umgebenden Gestein um mehr tonige oder mehr gipshaltige Partien handelt, hat keinerlei Einfluss auf die Füllung. Die Füllung weist eine primäre Struktur auf, die makroskopisch keinerlei Deformationen zeigt. Die makroskopische Schichtung ist auch heute noch deutlich zu erkennen. Gegen den Rand hin steigen die Schichten an und schmiegen sich an die Grenze zum Nebengestein

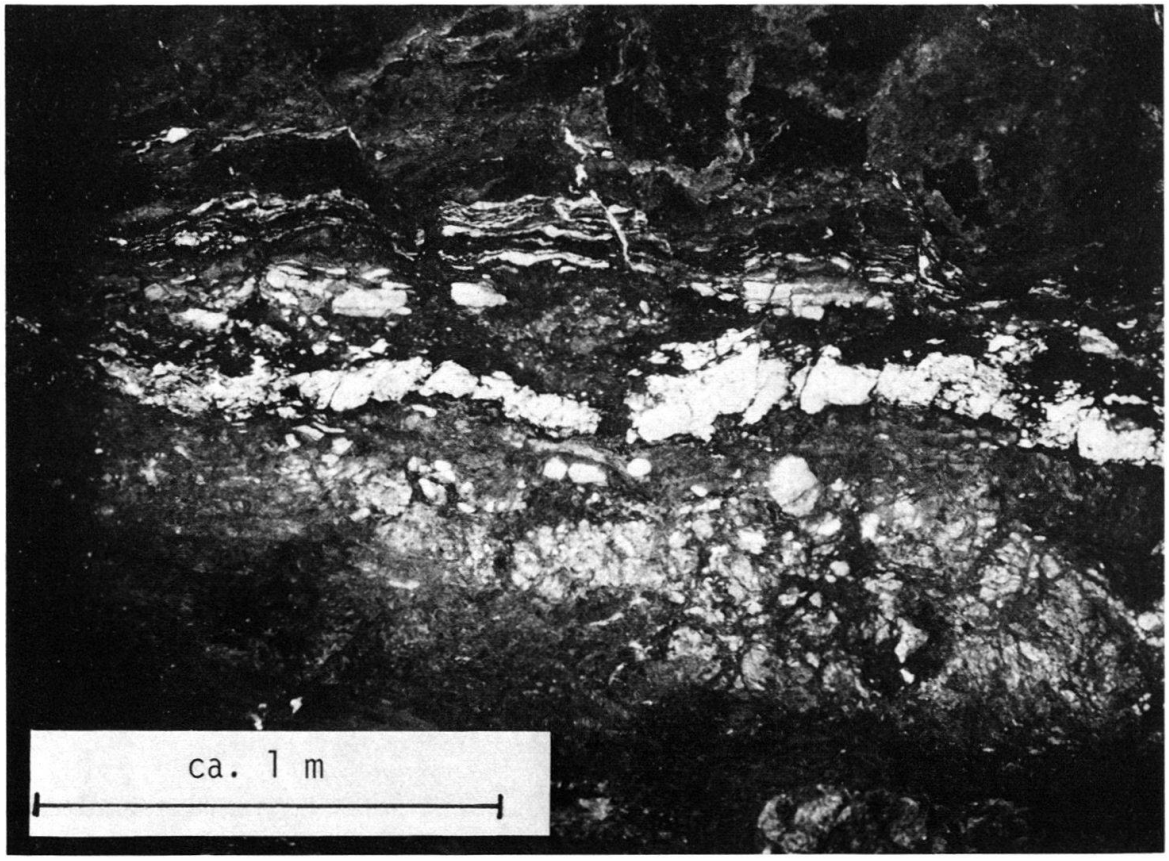


Fig. 7. Typische Ausbildung der unteren Gips-Schichten im undeformierten Bereich.

an. Vereinzelt finden sich in den Erosionsfüllungen Gipsbrocken (bis 10 cm gross), nicht aber solche aus Dolomit oder Kalk. Einer dieser Gipsbrocken erzeugte im weichen Untergrund schöne Gleiterscheinungen. Daraus kann geschlossen werden, dass einzelne Stücke in die Mulden hineinglitten, als diese noch mit Wasser gefüllt waren.

Im makroskopischen Bereich handelt es sich um feingeschichtete Lagen, die keinerlei Gradierung erkennen lassen. Dazwischen wurden aber auch einzelne Lagen von wenigen Zentimetern Mächtigkeit beobachtet, die als Konglomerat bezeichnet werden können. Die Ausrichtung der tonigen Fetzen ist teils schichtparallel, zum Teil stehen sie auch senkrecht (Fig. 10 und 11).

Die Füllungen zeigen folgenden Mineralinhalt:

— Gips (etwa 45–55%)
— Dolomit (etwa 45–55%)
— Quarz
— Ton (Illit)
— Anhydrit (akzessorisch)

} zusammen etwa 5%

Die Gipskristalle können mehrere Millimeter gross werden und sind zum Teil idiomorph (Rhomboeder) ausgebildet. Im Dünnschliff können zwei Typen von Gipskristallen unterschieden werden, und zwar solche mit und solche ohne undulöses Auslöschen. Die idiomorph ausgebildeten Körner zeigen oft kein undulöses Auslöschen,

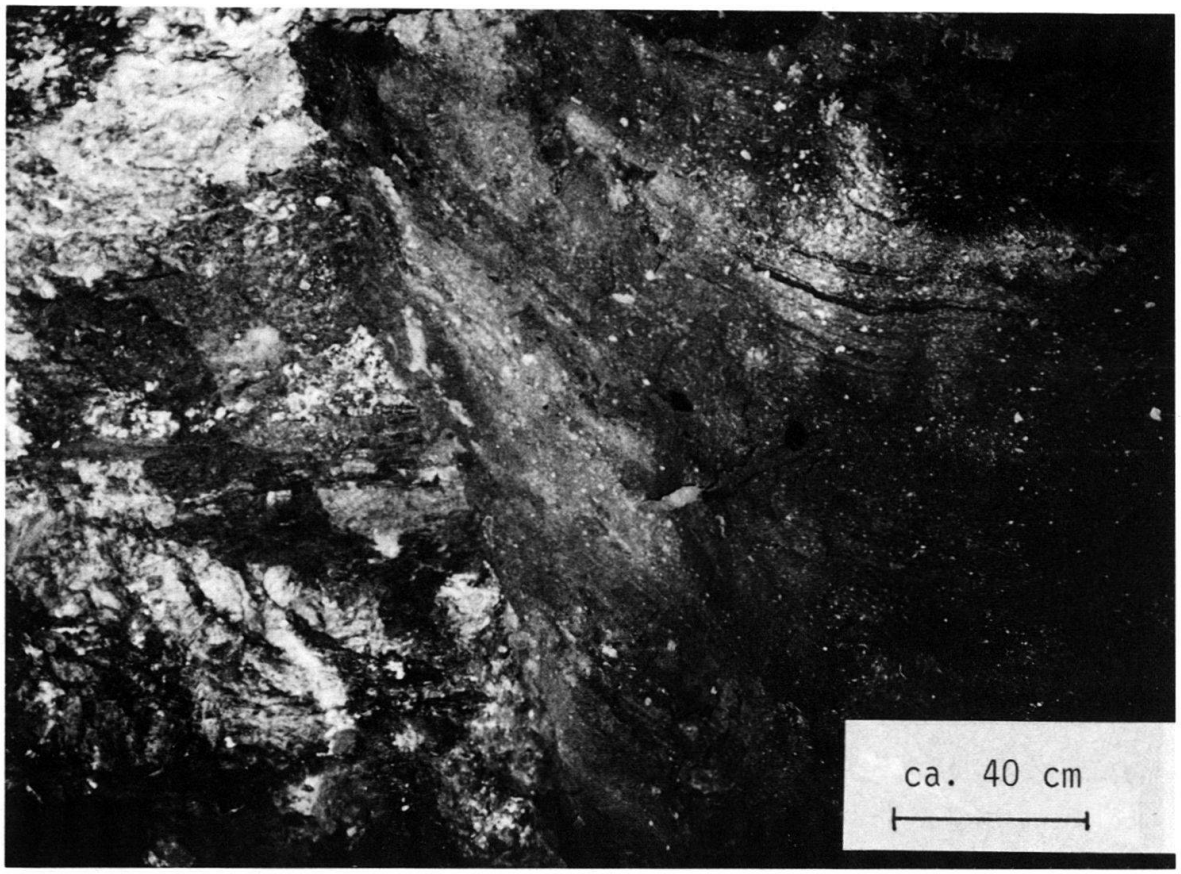


Fig. 8. Kontakt zwischen Gipslagen der unteren Gips-Schichten (links) und einer Erosionserscheinung. Man beachte die ansteigenden Schichten in der Füllung.

während fast alle andern (gerundeten) deutlich schachbrettartiges Auslöschen, ähnlich der Mehrzahl der Gipskristalle in den umgebenden Gipslagen, zeigen. Die idiomorph gebildeten Gipskristalle sind authigen gebildet worden, während die gerundeten Körner in die Mulden hineintransportiert wurden. Als Einschlüsse in den Gipskristallen können vereinzelt Anhydrit- und Dolomitkörner festgestellt werden.

Die Gipskristalle liegen in einer feinen, bräunlichen Matrix aus Dolomit. Die Grösse der Dolomitkörner liegt unter 0,1 mm. Warum die Füllungen einen deutlich höheren Dolomitgehalt als das Nebengestein aufweisen, ist unbekannt. Der Quarz kann sowohl idiomorph (authigen) als auch gerundet (detritisch) in der Matrix auftreten. Die authigenen Quarzkristalle können mehrere Millimeter gross werden.

Stellenweise machen die Füllungen den Eindruck, nicht verhärtet zu sein. Dieses Erscheinungsbild (nicht konsolidiert) ist unserer Meinung nach nicht primär, sondern auf die hohe Luftfeuchtigkeit (> 80%) im Bergwerk und die damit verbundene Auflockerung des Materials zurückzuführen.

Das Gestein kann mit einem «Wackestone», der grösstenteils schlammgestützt («mud supported») ist, verglichen werden, wobei die Komponenten nicht aus Karbonaten bestehen. Innerhalb der Schliffgrösse konnte keine deutliche Gradierung bemerkt werden.

Wie weit sich die Erosionserscheinungen vertikal nach oben und unten erstrecken, kann leider aufgrund der vorhandenen Aufschlüsse nicht abschliessend beantwortet

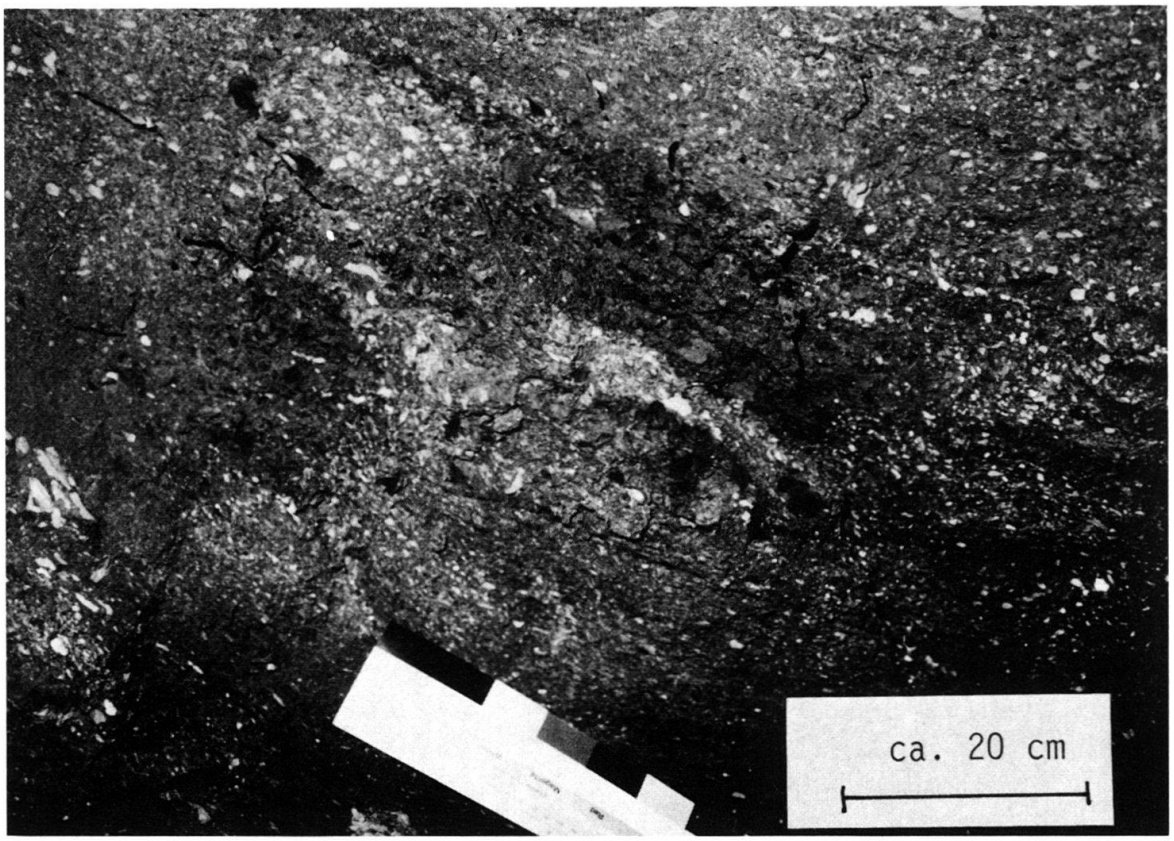


Fig. 9. Die Füllungen zeigen kaum Einschlüsse von darüberliegenden Gesteinsschichten. Links im Bild sind Einschlüsse zu beobachten, die direkt aus dem benachbarten Material der unteren Gips-Schichten stammen müssen.

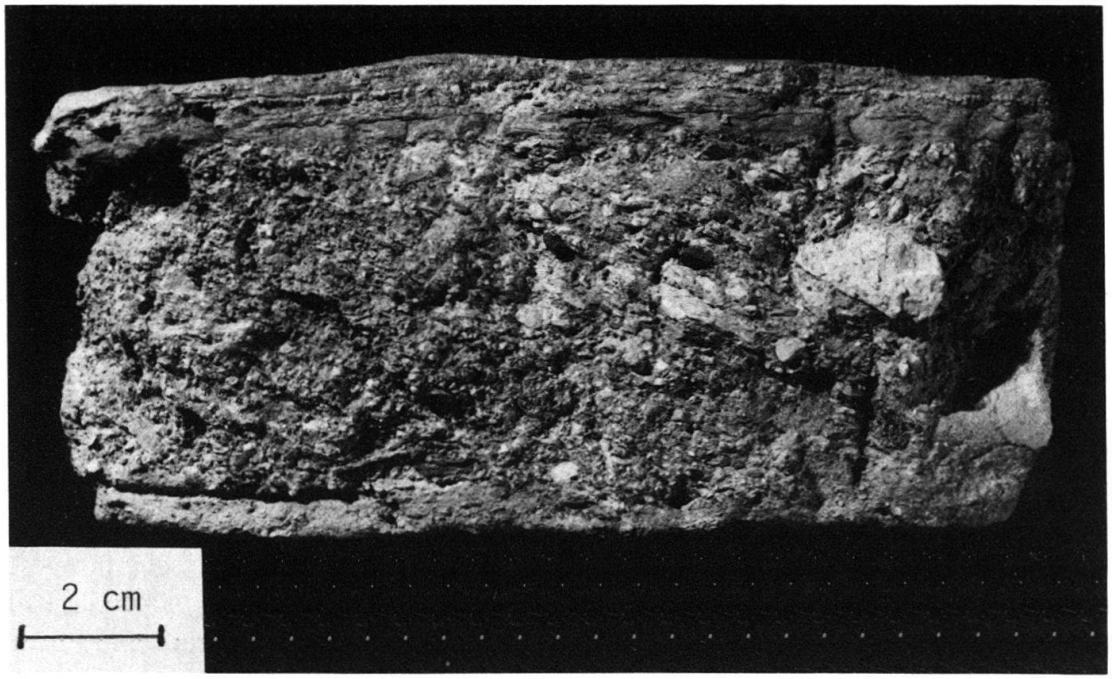


Fig. 10. Konglomeratische Lage aus den Erosionserscheinungen. Die Lage zeigt keine Gradierung.

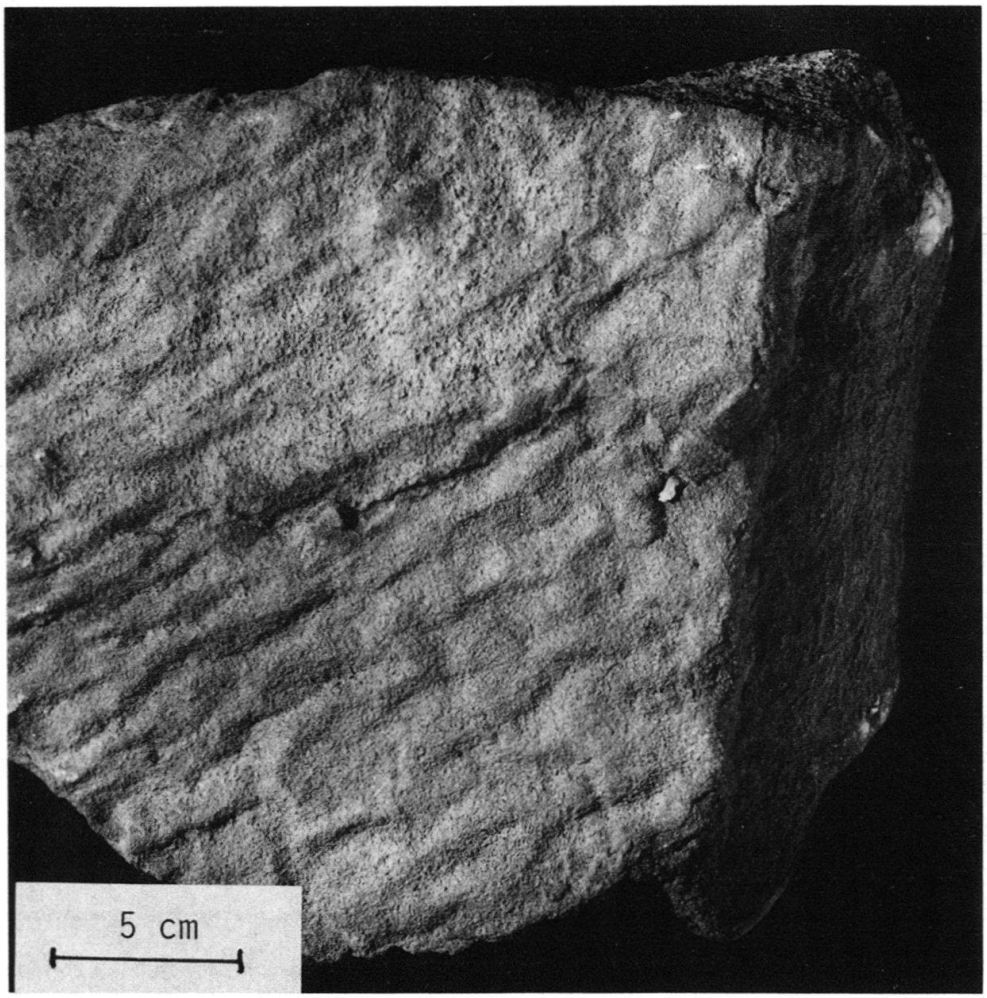


Fig. 11. Rippelstrukturen auf einer Schichtfläche eines Handstücks aus einer Erosionserscheinung.

werden. Da keine Dolomit-, Kalk- und Anhydritblöcke gefunden wurden, ist anzunehmen, dass sie nicht in den Anhydritdolomit oder gar Muschelkalk reichen.

Die oben besprochenen Erosionserscheinungen können in den unteren Gips-Schichten, vor allem im E-Stollen-Boden, gefunden werden. In den oberen Gips-Schichten und den mittleren Sulfat-Schichten sind bis heute entsprechende Erscheinungen nicht beobachtet worden. Es muss allerdings offengelassen werden, ob sie aufgrund der Aufschlussverhältnisse nicht gefunden wurden oder ob sie überhaupt nicht existieren. Heute sind die schönsten Aufschlüsse nicht mehr zugänglich, da sie sich im gefluteten Bereich des E-Stollen-Bodens befinden.

3.1.2 Palynologische Untersuchungen

Es wurden palynologische Untersuchungen verschiedener Muldenfüllungen und des Nebengesteins durchgeführt. Die untersuchten Proben sind in der Zusammensetzung des organischen Materials recht homogen. Pollen und Sporen sind recht häufig und gut erhalten. Der Rest des organischen Rückstandes besteht grösstenteils aus stark oxidierten Partikeln (Fusinit, z.T. mit erkennbarer Holzstruktur). Als einzige Palynomorphen-Gruppe aquatischer Herkunft konnte *Botryococcus* (Grünalgen-Kolonie) nachgewiesen werden. Palynomorphen mariner Herkunft (Acritarchen) fehlen vollständig. Im Gegensatz dazu sind Acritarchen in der Anhydrit-Gruppe aus Bohrungen der Saline Riburg durchgehend belegt (BROSIUS & BITTERLI 1961).

Die stratigraphische Interpretation der Sporomorphen-Assoziation beruht auf dem Vergleich mit der palynostratigraphischen Gliederung der alpinen Trias (VISSCHER & BRUGMANN 1981). Aufgrund des Nachweises von *Kuglerina meieri* SCHEURING 1979, *Ovalipollis pseudoalatus* (TIERGART) SCHUURMANN 1976 (diese Form tritt nur vereinzelt auf), *Paracirculina tenebrosa* SCHEURING 1970 (= *Partitisporites* sp. [sensu VISSCHER & BRUGMANN 1981]), *Infernopollentis* ssp., *Duplicisporites* sp. (*D. granulatus* LESCHIK 1956a) und des Fehlens der typischen Formen des Karnian wie *Vallasporites iggnacii* LESCHIK 1956a, *Patinassporites densus* LESCHIK 1956a, *Enzonalasporites* ssp. (sensu VISSCHER & BRUGMANN 1981) sowie *Paracirculina quadruplicis* SCHEURING 1970 und *P. maljavkinae* KLAUS 1960 können die Sporomorphen-Assoziationen dem Ladinian zugeordnet werden. Als häufigste Pollen-Form können verschiedene Arten der Gattungen *Triadospora* und *Protodiploxipinus* nachgewiesen werden. Auffällig ist, dass in den Proben der Füllungen keine Palynomorphen aus jüngeren Schichten vorkommen. Es konnte auch kein Unterschied zwischen den Füllungen der Erosionserscheinungen im deformierten und undeformierten Bereich einerseits und dem Nebengestein anderseits gemacht werden.

3.2 Mittlere Sulfat-Schichten

Die ersten 1,7 m der mittleren Sulfat-Schichten bestehen aus einer Wechsellagerung von braungrauen dolomitischen Ton- und Gipslagen. Die Wechsellagerung umfasst 8–10 dolomitische Tonschichten und ebensoviele Gipslagen. Sehr häufig sind die Schichten gewellt und von Rissen durchzogen, deren Versetzungsbetrag bei etwa 5 cm liegt. Diese kleinen Brüche gehen nicht in die darüberliegenden, rund 1,2 m mächtigen Gipslagen über. Im hellbeigegrauen Gips, der dicht ausgebildet ist, treten vereinzelt Fasergipsklüfte auf. Diese können geschlossen oder offen sein. Auf die Problematik der

Klüfte wird in Kapitel 5 näher eingegangen. Gegen die Basis hin erscheint der Gips ein wenig grobkörniger.

Die darüberliegende Anhydritlage hat eine Mächtigkeit von rund 3,5 m. Unterteilt wird diese Lage durch eine 10–20 cm mächtige Gipslage mit Tonen. Die Anhydritlage wird oft von Gipsklüften, offen oder verschlossen, aber auch von kleinen Brüchen durchzogen. Ansonsten ist diese Schicht relativ monoton und homogen. Die Grösse der Anhydritkristalle liegt meistens unter 0,1 mm; vereinzelt lassen sich nesterartige Anreicherungen von über 0,1 mm grossen Kristallen beobachten. Der Kristallhabitus, sofern bestimmbar, ist stengelig und zum Teil idiomorph. Die Anhydritkristalle sind nur zum Teil deutlich eingeregelt. Oft lässt sich eine bevorzugte Einregelung noch schwach erkennen. Diese «Schichten» werden durch kleinste Tonanreicherungen betont. Der Gehalt an Tonmineralien liegt in diesem Bereich des Anhydritgesteins bei wenigen Prozenten. Nach der Nomenklatur von MAIKLEM et al. (1969) gehören die Anhydritgesteine des Bergwerkes Felsenau in die Klasse matrixfrei, ungestört, geschichtet, mosaikförmig bis massiv.

An wenigen Stellen konnten in der Anhydrit-Schicht idiomorphe bis mehrere Millimeter grosse Quarzkristalle gefunden werden. Aufgrund der ausgeprägt idiomorphen Gestalt kann angenommen werden, dass es sich dabei um authigene Bildungen handelt.

Im oberen Teil der mittleren Sulfat-Schichten (Mächtigkeit rund 3 m) tritt der Anhydrit merklich zurück. Er wird durch Gips abgelöst, der sehr häufig mit salzigen Tonen zusammen auftritt. Ein geringer Salzgehalt (etwa 0,5%) lässt sich bereits mit der Zunge feststellen. Richtige Salzlagen konnten aber nirgends festgestellt werden. Abgeschlossen werden die mittleren Sulfat-Schichten durch eine etwa 0,5 cm dicke Fasergipslage. Die Trennung zwischen dieser Lage und den sie umgebenden Gesteinen ist sehr scharf.

3.2.1 Sauerstoffisotopenuntersuchungen an Gips der mittleren Sulfat-Schichten

Es ist von Interesse zu wissen, ob sich der vorliegende Gips und/oder Anhydrit primär gebildet haben oder nicht. BAERTSCHI et al. (1978) haben einige Gesteine der Felsenau auf das O^{18}/O^{16}-Isotopen-Verhältnis des als Kristallwasser gebundenen H_2O untersucht (vgl. Fig. 12). Als Folge des Isotopie-Effektes bei der Verdampfung von Meerwasser ist das O^{18}/O^{16}-Verhältnis im Kristallwasser von Gips hoch. Entsteht Gips dagegen durch nachträgliche Hydratisation von Anhydrit durch Grund- oder Oberflächenwasser, so ist keine signifikante O^{18}-Anreicherung mehr gegen Süsswasser (Grund- und Oberflächenwasser) festzustellen. Das gleiche gilt natürlich auch, sofern Gips primär im Grundwassereinfluss gebildet wird (HOEFS 1980).

Die Proben wurden gegen den internationalen Standard SMOW (Standard Mean Ocean Water) gemessen. Bestimmt wurde der relative Unterschied δ(‰) des O^{18}/O^{16}-Verhältnisses der Proben (R_p) im Vergleich zu demjenigen im Standard (R_s), also der Ausdruck

$$\delta = \frac{R_p - R_s}{R_s} \cdot 1000.$$

Für unter marinem Einfluss gebildeten Gips ergeben sich typische δ-Werte, die zwischen +1‰ und 8‰ (gegen SMOW) liegen. Aufgrund dieser Resultate kann mit

Probe	Gipsgehalt (Gew.-%)	δ‰
Gesteine		
GF:	80%	- 9.1
AFN:	0.5%	- 5.9
Wasser		
TWV:		- 9.3
TWH:		- 10.0

GF: Gips-Felsenau (Entnahmeort unbekannt; vermutlich Mittlere Sulfatserie)

AFN: Anhydrit-Felsenau; Nagra-Stollen

TWV: Tropfwasser Felsenau; Nagra-Stollen (fast reines Wasser)

TWH: Tropfwasser Felsenau; Nagra-Stollen (enthält viel NaCl)

Fig. 12. Sauerstoffisotopenanalysen an Material aus dem Bergwerk Felsenau. Beim «Nagra-Stollen» handelt es sich um einen kleinen Stollen in der mittleren Sulfat-Schicht (nach BAERTSCHI et al. 1978).

Sicherheit gesagt werden, dass sich kein mariner Einfluss bei der Bildung des heute vorliegenden Gipses bemerkbar gemacht hat. Ob Grund- oder Oberflächenwasser entscheidend für die Gipsbildung waren und Gips primär oder sekundär gebildet wurde, kann aufgrund der vorgefundenen δ-Verhältnisse nicht gesagt werden (vgl. Kap. 6).

4. Tektonik des Bergwerks Felsenau

Im Bergwerk Felsenau fallen die Schichten allgemein mit ungefähr 4–6 Grad gegen ESE ein. Das stimmt mit den Werten überein, die man in der Umgebung der Felsenau auch im oberen Muschelkalk messen kann. In den östlichen und südlichen Abbaugebieten der Felsenau lagern die verschiedenen Schichten ziemlich konstant, wie aus den Profilen D33 und E/L5 deutlich ersichtlich ist (Tafeln). Im nordwestlichen Teil ändert sich das Bild drastisch, indem hier stark gefaltete Schichten anzutreffen sind. In diesem Bereich (im folgenden «deformierter Bereich» genannt) sind die unteren Gips-Schichten aufgeschlossen.

Die Schnittlage zwischen den Falten und den Stollenwänden ist oft sehr ungünstig (schleifender Schnitt), und die Wände sind relativ glatt. Es konnten darum nur wenige Faltenachsen und Achsenebenen eingemessen werden. Nur sehr selten konnten die Erscheinungen auf beiden Stollenseiten miteinander verbunden werden; ein Strukturwechsel innerhalb von wenigen Metern ist im deformierten Bereich normal.

In Profil C14 (Tafel) ist ein Ost–West-Schnitt dargestellt. Daraus geht deutlich hervor, dass im östlichen Teil des Stollenareals die Schichten noch relativ ruhig und ungestört liegen. An der Decke kann zum Teil die Basis der mittleren Sulfat-Schichten beobachtet werden. Im Bereich des Werkplatzes steigen die Schichten an (Fig. 13). In

Fig. 13. Beginn des deformierten Bereichs. Die tonigen Partien, die hier einen leicht erhöhten Karbonatgehalt aufweisen, sind spröd zerbrochen, während der Gips (Lage unterhalb der Batterie) duktil verformt wurde.

den unteren Gips-Schichten treten nun Falten auf, deren Vergenz gegen Nordwesten gerichtet ist. Gegen Westen sind die Schichten immer intensiver gefaltet, geschiefert und steilgestellt. Ungefähr auf der Höhe des Stollens L11 erreichen die Verfaltungen ihren Höhepunkt (Fig. 14 und 15). Die Vergenz der Falten wechselt von Nordwesten auf Südosten. In diesem Gebiet sind die mittleren Sulfat-Schichten nirgends aufgeschlossen. Bei Horizontalbohrungen in der westlichen Verlängerung der Stollen C14 bzw. C13 konnten die mittleren Sulfat-Schichten allerdings wieder nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass der Verlauf der mittleren Sulfat-Schichten eine Hochstruktur beschreibt, deren Höhe auf ungefähr 10–20 m geschätzt werden kann. Die darunterliegenden unteren Gips-Schichten sind im deformierten Bereich zum Teil isoklinal verfaltet und im westlichen Teil des Hochs steiler gestellt als im östlichen Teil. Der Verlauf der Grenze zwischen deformiertem und undeformiertem Bereich ist in Figur 6 dargestellt.

Der deformierte Bereich unterscheidet sich aber nicht nur strukturell von den undeformierten Gebieten, sondern auch mineralogisch. Während in den unteren Gips-Schichten des undeformierten Bereiches Sulfat fast nur als Gips auftritt, bestehen die in den Falten vorliegenden Sulfatlagen des deformierten Bereiches aus bis über 60% Anhydrit, 30% Gips sowie aus Ton und Quarz. Im tonigen Nebengestein geht der Sulfat-

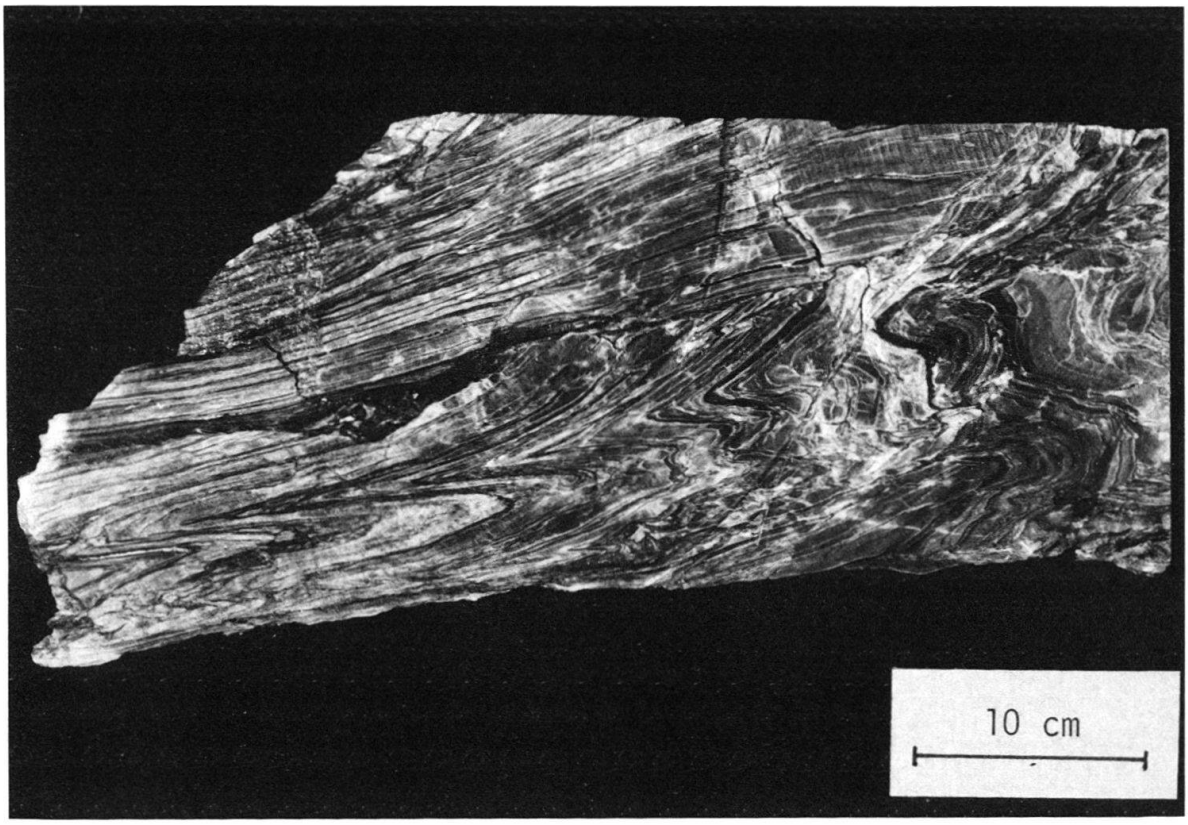


Fig. 14. Die Deformation kann im deformierten Bereich so gross werden, dass sich kleinere Überschiebungen bilden konnten. Das Gestein bricht auf diesen Flächen leicht auseinander.

gehalt auf zum Teil unter 35% zurück. Im undeformierten Bereich liegt der Sulfatanteil (Gips) in den tonigen Partien ebenfalls etwa gleich hoch. Wesentlich erscheint uns, dass wir im deformierten Bereich einen erhöhten Halitgehalt feststellen konnten, der durchschnittlich 2% beträgt, während im ungestörten Teil der entsprechenden Schichten der Halitgehalt um 0,5% liegt.

Die darüberliegenden massigen Anhydrite der mittleren Sulfat-Schichten sind, soweit feststellbar, nicht von der Faltung betroffen. Beim Stolleneingang ist das ganze Profil bis in den oberen Muschelkalk hinauf relativ gut aufgeschlossen. Die unteren Gips-Schichten sind sehr steil gestellt, während dies bei den darüberliegenden mittleren Sulfat-Schichten kaum der Fall ist. Die oberen Gips-Schichten ihrerseits sind intensiv verfaltet und wiederum steilgestellt. Die oberen Sulfat-Schichten sind ebenfalls leicht deformiert. Der oberste Teil der Sulfat-Serie sowie der darüber liegende Anhydritdolomit sind deutlich weniger beansprucht worden. Der obere Muschelkalk scheint von dieser Deformation nicht beeinflusst worden zu sein. Ausgeprägte Sprödbrucherscheinungen sind jedenfalls nicht zu finden. Dass Anhydritlagen rheologisch ein anderes Verhalten zeigen als entsprechende Lagen aus Gips, konnte mit rheologischen Untersuchungen (BAUMANN 1984a, 1984b) deutlich gezeigt werden. Vom rheologischen Verhalten des Anhydrits ausgehend, wird die Interpretation der Falten problematisch sein (MÜLLER et al. 1980).

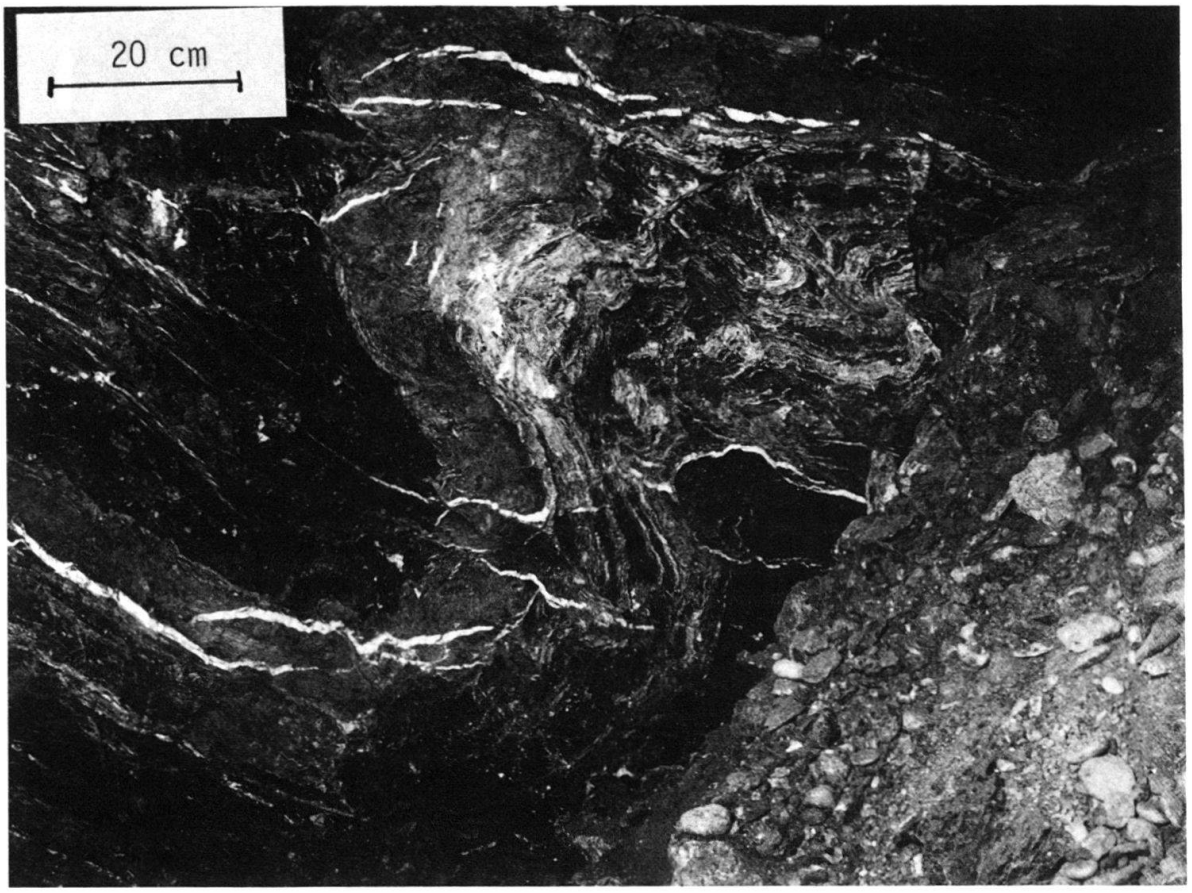


Fig. 15. Faltenstrukturen im deformierten Bereich. Die Anhydritlagen bestehen aus rund 65% Anhydrit, 25% Gips und rund 10% Verunreinigungen. Im Nebengestein sinkt der Sulfatgehalt auf 35%.

Es zeigt sich, dass die ausserhalb des deformierten Bereichs gefundenen Falten nur beschränkt mit denjenigen innerhalb des deformierten Bereichs identisch sind. Die wenigen Falten ausserhalb des deformierten Bereichs zeigen keine systematische Verteilung oder gar regelmässige Ausrichtung der Faltenachsen. Sie können nicht mit Sicherheit mit den Falten im deformierten Bereich in Verbindung gebracht werden.

Zusammenfassend lässt sich der deformierte Bereich im Bergwerk Felsenau wie folgt charakterisieren:

— beschränkte Ausdehnung (laterale Ausdehnung?),
— unterschiedlich starke Beanspruchung der einzelnen Schichten,
— veränderte mineralogische Zusammensetzung, d. h. die Änderung des Gips-Anhydrit-Verhältnisses in Abhängigkeit der strukturellen Beanspruchung.

5. Klüfte

Immer wieder wird in der Literatur der Selbstheilungsprozess von Klüften in Anhydrit erwähnt. Im Bergwerk Felsenau können Klüfte in Evaporiten gut studiert werden, allerdings ist deren Häufigkeit nicht so gross, wie man aufgrund von Bohrungen (z. B.

Beznau; JÄCKLI & RISSI 1982) erwarten könnte. Im folgenden sollen die im Bergwerk gewonnenen Beobachtungen wiedergegeben werden; dabei sind die Aussagen sehr allgemein gehalten und qualitativer Natur. Der Grund liegt in der Unmöglichkeit, die Erscheinungen quantitativ zu erfassen. In BAUMANN (1984a) sind entsprechende Grundlagenversuche im Hinblick auf eine Kluftverheilung wiedergegeben.

In den unteren Gips-Schichten treten die Klüfte hauptsächlich im deformierten Bereich auf. Ausserhalb dieses Bereiches sind Klüfte, ob offen oder verschlossen, kaum zu finden. In den mittleren Sulfat-Schichten treten sie in allen Bereichen des Bergwerkareals auf.

Im Bergwerk Felsenau sind kaum Klüfte zu finden, die über grössere Distanzen vollständig verheilt sind. Dies hat sich vor allem deutlich in Horizontalbohrkernen gezeigt (Fig. 16).

Es lassen sich makroskopisch zwei Typen von Klüften bzw. Kluftfüllungen unterscheiden, die an verschiedene Umgebungsgesteine gebunden sind; im Gebiet der mittleren Sulfat-Schichten sind die Kluftmineralien viel kleiner ausgebildet als im strukturell beanspruchten Teil der unteren Gips-Schichten. Im ersten Fall sind die Kristalle im Millimeterbereich, während sie im zweiten Fall zentimetergross werden können. Dieses Erscheinungsbild hängt nicht in erster Linie von der Chemie der Kluftwässer (Tabelle 1) ab, sondern ist von der mineralogischen Zusammensetzung des Umgebungsgesteines (Gips-Anhydrit-Ton-Verhältnis) abhängig (BAUMANN 1984a). Der Wachstumsmechanismus ist in beiden Fällen der gleiche. Es konnten nirgends Kriterien gefunden werden, die uns ermöglicht hätten, von verschiedenen Generationen zu sprechen.

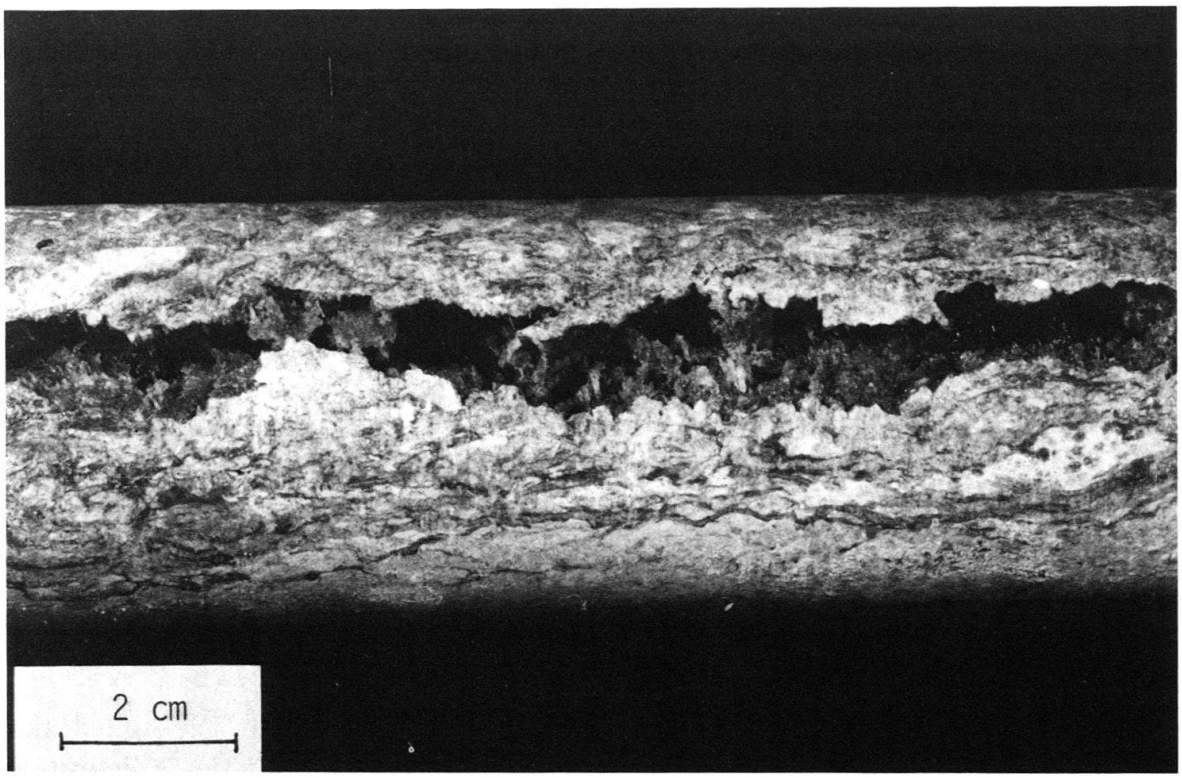


Fig. 16. Kluft aus den mittleren Sulfat-Schichten. Da in dieser Kluft Halit auftritt, sind die Kluftmineralien klein ausgebildet.

Tabelle: *Analysen von zwei Tropfwasserproben aus dem Bergwerk Felsenau. Das unterschiedliche Verhältnis von K^+ zu Mg^{2+} in den beiden Wasserproben lässt den Schluss zu, dass ihre Herkunft verschieden sein muss. Kalium- und Magnesiumsalze sind sehr gut löslich, und eine Sättigung wird in keinem Fall erreicht. Quantitative Bestimmung nur der aufgeführten Ionen (nach* LASKE *1977).*

1. Tropfwasser (Deckenbohrung E 2 im 1. Messquerschnitt)

$Na^{\cdot}$	0.088	g/l
$K^{\cdot}$	0.10	g/l
$Mg^{\cdot\cdot}$	0.0002	g/l
$Ca^{\cdot\cdot}$	0.78	g/l
Cl'	0.015	g/l
SO_4''	1.58	g/l

2. Tropfwasser (im hinteren "salzigen" Teil des Stollens)

$Na^{\cdot}$	82.6	g/l
$K^{\cdot}$	0.25	g/l
$Mg^{\cdot\cdot}$	1.87	g/l
$Ca^{\cdot\cdot}$	0.60	g/l
Cl'	118	g/l
SO_4''	7.52	g/l

Das Auftreten von Halit konnte immer wieder beobachtet werden, und zwar unabhängig vom Nebengestein. Der Halit füllt in diesen Fällen die Kluft grösstenteils auf. Dass sich Halit so nahe an der Oberfläche erhalten konnte, deutet auf eine geringe Permeabilität der Anhydrit- und Gips-Schichten hin, was mit der allgemeinen Auffassung über die Permeabilität der Sulfatgesteine übereinstimmt. Um rezente Bildungen, im Sinne einer Zuführung von Halit von aussen, handelt es sich kaum, da von der Morphologie und der Stratigraphie her ein Liefergebiet oder -horizont nicht vorhanden ist. Aus diesem Grunde scheint der Klufthalit alt zu sein. Ein Teil des Bergwerks liegt heute unter dem heutigen Grundwasserniveau. Die offenen Klüfte wären sicher prädestiniert, allfälliges Wasser (Grund- oder Oberflächenwasser) zu kanalisieren und die Halitlagen auszulaugen. In den mittleren Sulfat-Schichten sind fast alle Klüfte stratiform ausgebildet, während dies im deformierten Bereich der unteren Gips-Schichten nur zum Teil der Fall ist; es handelt sich mehr um ein eigentliches Netzwerk von Klüften.

Die Fasergipskristalle der Klüfte stehen selten genau senkrecht auf den Kluftwänden. Bei geschlossener Kluft treten im Zentrum derselben oft Tonmineralanreicherungen auf. Die Gipskristallgrösse ist in diesen Bereichen relativ klein. Kleinere Kristalle lassen sich auch am Rand der Kluft feststellen, sofern auch hier Tonanreicherungen vorhanden sind. Es kommt natürlich auch vor, dass die ganze Kluft mit grossen Fasergipskristallen zugewachsen ist. Alle Kristalle zeigen undulöses Auslöschen.

Sofern das Nebengestein der Kluft aus Anhydrit besteht, kann immer wieder beobachtet werden, wie sich, von der Kluft ausgehend, der feinkörnige Anhydrit in Gips umwandelt. Die neu gebildeten Kristalle sind oft ohne Deformation. Die Anhydritkristalle werden von den Gipskristallen assimiliert. Die Hydratisation des Anhydrits ist also mit einer Vergröberung der Struktur verbunden, die eine Tiefe von 1 bis 2 cm erreicht.

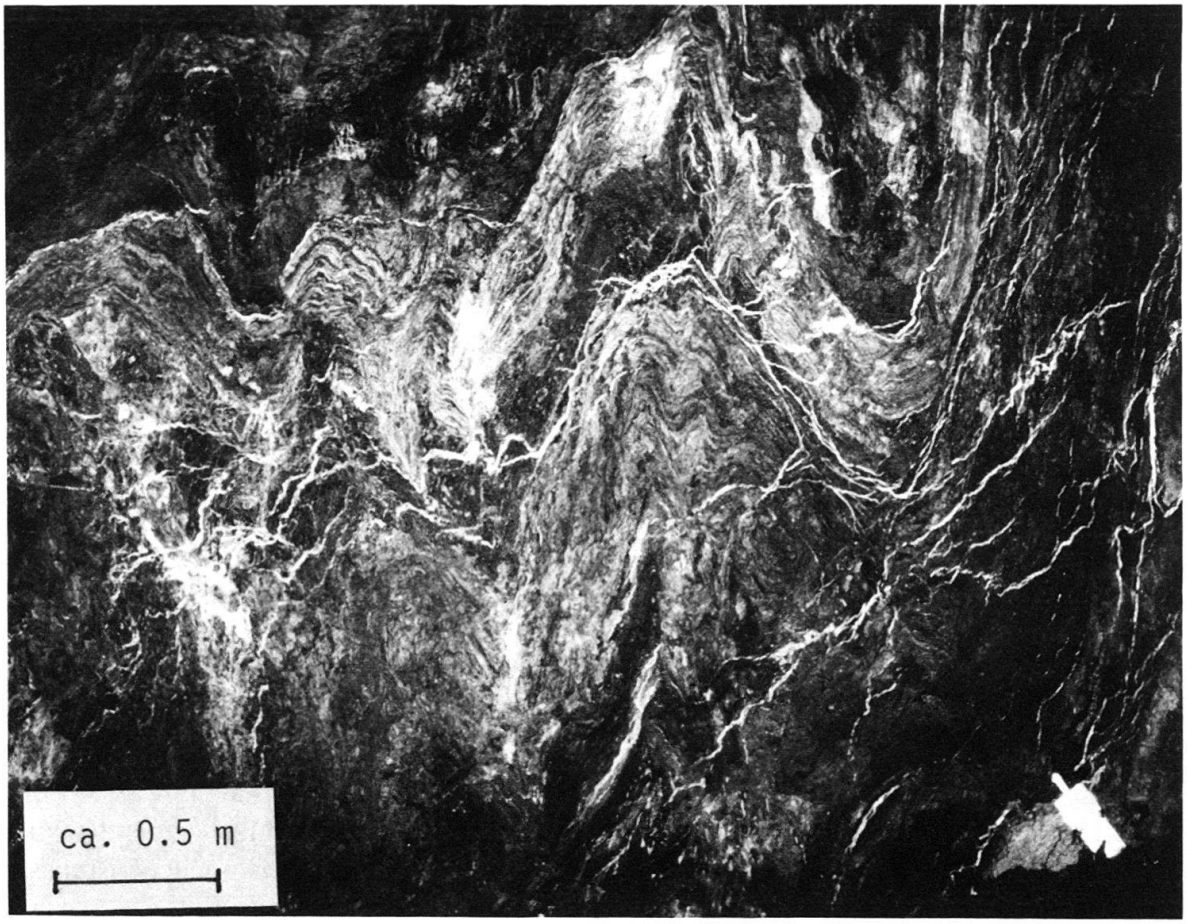


Fig. 17. Anhydrit-Schichten (hell) sind im deformierten Bereich intensiv verfaltet. Die Amplitude der beobachteten Falten kann maximal 3 m gross werden. Man beachte das Netzwerk von Klüften.

Die Neubildungen deuten auf eine spät- oder posttektonische Umkristallisation (Vergröberung) hin. Es ist zu vermuten, dass diese weitergeht, sofern genügend freies Wasser vorhanden ist. Der Mechanismus des Wassertransports an die Hydratisationsfront ist noch nicht geklärt. Eventuell könnte das Wasser entlang von Korngrenzen oder sogar durch Diffusionsprozesse an die Front gelangen. Sicher ist nur, dass es sich kaum auf kleinen Rissen nach vorne bewegt, da solche nirgends festgestellt werden konnten.

Ob die Kluftkristalle bei den geschlossenen Klüften syntaxial oder antitaxial gewachsen sind, kann nicht beantwortet werden, da die mikroskopischen Beobachtungen beide Interpretationsmöglichkeiten zulassen. Bei den offenen Klüften scheinen sie syntaxial gewachsen zu sein.

6. Interpretation und Diskussion

6.1 Ablagerungsmilieu der Sulfat-Serie (eine Arbeitshypothese)

Im folgenden Kapitel soll versucht werden, die im undeformierten Bereich des Bergwerks Felsenau gewonnenen Beobachtungen in einen geologischen Rahmen zu stellen.

Wir sind uns im klaren, dass ein Grundproblem in der Unmöglichkeit, die Erscheinungen (Klüfte, Brekziierung, Erosionserscheinungen usw.) zu datieren, liegt und damit die ganzen Ausführungen sehr vage sind. Auf die allgemeine Theorie der Entstehung von Evaporiten wird hier nicht eingegangen, da entsprechende Literatur in sehr grossem Umfang vorhanden ist (DEAN & SCHREIBER 1978, HANDFORD et al. 1982). Für die nachfolgende Diskussion erscheint es uns aber wesentlich, darauf hinzuweisen, dass aufgrund neuerer Erkenntnisse Gips und Anhydrit auch in nichtmarinem Milieu entstehen können, wobei Gips als primäre Hauptbildung anzusehen ist (LANGBEIN 1983). In sogenannten Sebkha-Gebieten können die beiden Sulfatmineralien direkt aus dem Grundwasser gebildet werden.

Vom Kontinent zufliessendes Grundwasser weist eine andere Sauerstoff- bzw. Schwefelisotopen-Zusammensetzung auf als das durch marine Einflüsse gebildete Grundwasser oder gar rein marines Wasser. Sofern nun Gips im Bereich von Oberflächen- oder Grundwasser mit nichtmariner Wasserchemie gebildet worden ist, wird das O^{18}/O^{16}-Isotopen-Verhältnis vom im marinen Milieu gebildeten Gips verschieden sein.

Es ist nicht klar, welche der Phasen – Gips oder Anhydrit – unter den chemischen und physikalischen Bedingungen, die in der Tiefe des Grundwassers geherrscht haben, stabil war. Vermutlich konnten bei der Bildung beide Mineralphasen nebeneinander existieren, je nachdem wie gross die Wasseraktivität des Grundwassers und die Bodentemperatur waren (BAUMANN 1984a). Eine allfällige spätere Anhydritumwandlung fand dann im Bereich des Grundwasserspiegels durch einsickerndes Oberflächenwasser oder durch das in den tonigen Partien durch Diagenese und Kompaktion freiwerdende Wasser statt, ohne dass sich eine grosse Volumenveränderung bemerkbar machen musste (LANGBEIN 1983).

Der triadische Gips ist sicher nicht marin gebildet worden. Ob er eventuell durch eine spätere Hydratisation aus Anhydrit gebildet worden ist, lässt sich nicht sicher beantworten. Entsprechende klare strukturelle Hinweise einer Hydratisation fehlen. Deshalb erscheint es wahrscheinlich, dass sich der Gips primär gebildet hat oder aber doch bereits bei der Sedimentation oder bei der Diagenese aus Anhydrit gebildet wurde. Auf einen fehlenden marinen Einfluss deuten auch die palynologischen Analysen hin. Bei allfälligen Niederschlägen oder Sturmfluten versumpfte das Gelände wieder, und die unter den Gips-Schichten liegenden Tone weichten auf. Bei der Entwässerung der Tonschichten kam es vor, dass die Gipslagen in situ zerbrachen und leicht brekziös erschienen.

Der Anhydrit der mittleren Sulfat-Schichten könnte ebenfalls im Bereich des nichtmarinen Grundwassers entstanden sein. Dies würde bedeuten, dass sich das Meer über eine längere Zeit aus dem Gebiet der Felsenau zurückgezogen hätte (während der Bildung der unteren und der oberen Gips-Schichten, evtl. sogar während der Bildung der mittleren Sulfat-Schichten). Vereinzelte kleinere Transgressionen könnten zu geringmächtigen oder in Salzpfannen gebildeten Salzvorkommen geführt haben.

Im nichtdeformierten Bereich können in den unteren Gips-Schichten sedimentäre oder syndiagenetische Faltenstrukturen beobachtet werden. Die Gipskristalle in diesem Bereich zeigen undulöses Auslöschen, was auf eine leichte Deformation hindeutet. In rezenten kontinentalen Sebkhas konnten ähnliche Erscheinungen, wie sie heute in der Felsenau vorliegen, in kleinerem Maßstab beobachtet werden (BAUMANN 1984a). Die Bildung solcher Faltenstrukturen kann man unter dem Begriff der sedimentären

«soft»-Deformation zusammenfassen. Ob sich Isoklinalfalten mit einer Amplitude von 2 bis 3 m und kleine Überschiebungen aufgrund der «soft»-Deformation bilden können oder nicht, muss von Fall zu Fall abgeklärt werden. Das rheologische Verhalten von Gips (BAUMANN 1984a, 1984b) schliesst die Möglichkeit einer «soft»-Deformation nicht aus. Vielmehr ist der Gips bei genügend hohen Temperaturen (etwa 40–50 °C) sehr mobil. Die Fliessfestigkeit von Gips kann mit derjenigen von leicht wasserhaltigem Bentonit verglichen werden (BAUMANN et al. 1985).

In benachbarten Gegenden wie Zurzach und Rheinfelden finden sich in entsprechender stratigraphischer Stellung ausgedehnte Salzvorkommen. Die Salzschichten fehlen im Bereich des Bergwerks Felsenau und in der Bohrung Weiach (Nagra 1984). Südlich der Felsenau tritt Salz wieder auf (Bohrung Böttstein, Nagra 1984). Aufgrund unserer Untersuchungen kann postuliert werden, dass im Gebiet der Felsenau nie grössere Salzlager (mit einer Mächtigkeit von einigen Metern wie in Böttstein) existiert haben. Die diagenetische bzw. die nach der Verfestigung erfolgte Auslaugung grösserer Salzlager müsste sich in irgendeiner Form bemerkbar machen (Einstürze, grössere Versackungen usw.). Solche Bewegungen hätten aber bei grösseren Salzlagern grössere Ausmasse annehmen sollen, als wir sie heute in der Felsenau beobachten können. Dies schliesst nicht aus, dass das Auslaugen von Salzlagen, vor allem während der Sedimentation und der Diagenese, zu Einbrüchen geführt haben könnte. Es ist anzunehmen, dass im Gebiet der Felsenau zeitweise eine kleine Hochstruktur in der Grössenordnung von einigen Metern Höhe bestanden hat. Möglicherweise wurde das Gebiet durch die von uns entdeckten Erosionserscheinungen oberflächlich entwässert; in diesem Fall würden die Erosionserscheinungen ein Entwässerungssystem (Qued) oder Versickerungstrichter darstellen. Durch gelegentlichen Niederschlag oder eventuell durch Flutwellen wäre das System mit Wasser gefüllt worden. Nach dem Wasserabfluss blieben Wasserlöcher zurück, in denen das restliche Wasser allmählich verdunstete. Die tiefsten Stellen der Mulden könnten eventuell sogar im Bereich des Grundwasserspiegels gelegen haben. Das Vorland des Vindelizischen Landes (ZIEGLER 1982) hat sich während der Bildungszeit der Erosionserscheinungen gegen Norden vorgeschoben.

Man muss sich aber nicht vorstellen, dass zu jener Zeit (Ladinian) permanente Wasserläufe existiert hätten. Vielmehr waren diese während längerer Zeit, vielleicht während Jahren, trockengelegt. Durch den Einfluss von Wind und von vereinzelten Niederschlägen wurde aus dem umliegenden Gebiet, vor allem von Süden und Osten, erodiertes Material der umliegenden Sulfat- und Tonschichten in die Vertiefungen verfrachtet. Dabei handelte es sich vorwiegend um Gips mit schachbrettartigem Auslöschen, Ton, Anhydrit und Dolomit(?).

Die Erosionserscheinungen zeigen auch heute noch ihre primären Strukturen. In der Bohrung Weiach (Nagra 1983) wurde in entsprechender stratigraphischer Stellung (Tiefe etwa 950 m) wiederum kein Salz gefunden, dafür aber eine ähnliche Füllung, wie wir sie in unseren Erosionserscheinungen erkennen konnten (eigene Beobachtungen).

Aus diesen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass zwischen der Felsenau und der Gegend von Weiach eine Depression unbekannter Grösse existiert haben könnte. Diese Zurzach-Depression scheint sich gegen Südwesten hin weitergezogen zu haben. Ob eine direkte Verbindung zur Schupfart-Depression (südwestlich des Bergwerks Felsenau) bestanden hat, kann aufgrund der uns zugänglichen Daten nicht beantwortet werden. Es wäre aber durchaus vorstellbar, dass sich zwischen Felsenau und dem Ge-

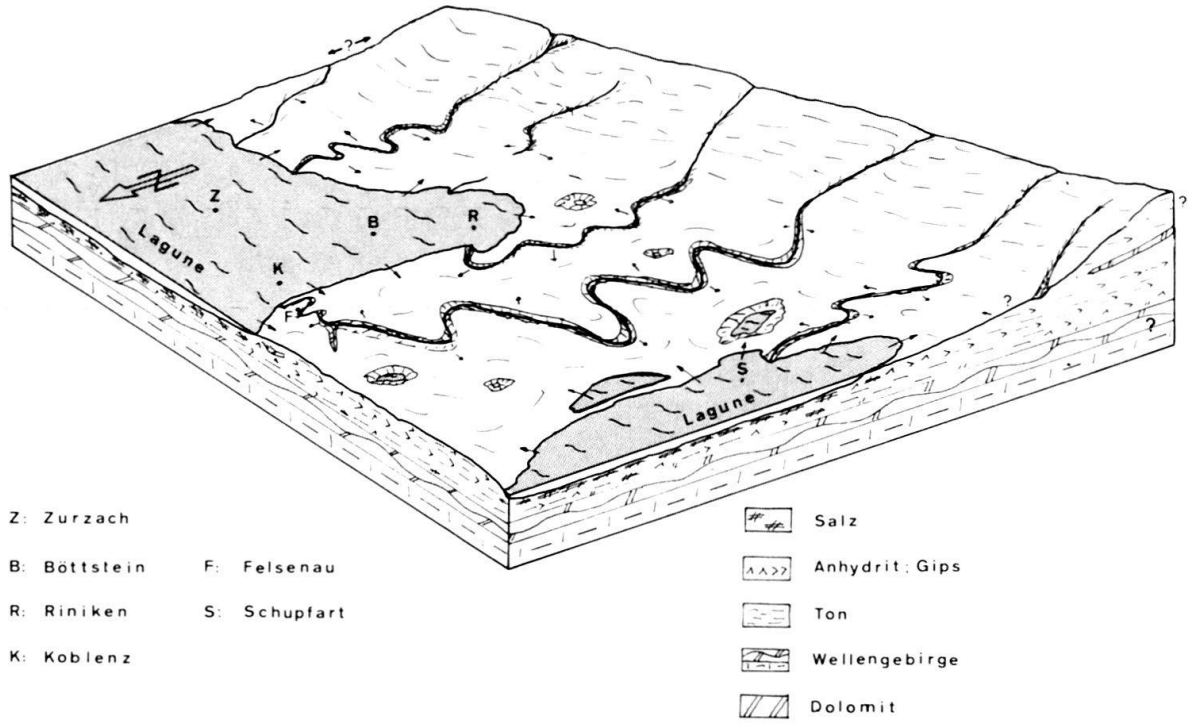


Fig. 18. Versuch einer Darstellung des Ablagerungsmilieus der unteren Gips-Schichten (Ladinian). Vgl. Text.

biet von Rheinfelden weitere Hochstrukturen gebildet haben, die sich zeitweise zu einer zusammenhängenden Landfläche entwickelt haben (Fig. 18).

Grundwasserströme («Süsswasser») verändern die Wasseraktivität im Grundwasser des küstennahen Bereiches. Deshalb kann die Gips-Anhydrit-Bildungsgrenze ihre Lage verändern. Daneben kann sich die Grenze aber auch lokal durch Verdunstungseffekte verschieben. Die unteren Gips-Schichten müssen unter diesem Gesichtspunkt als Ergebnis von verstärktem Süsswassereinfluss verstanden werden, was zu einer Auslaugung allfälliger kleinerer Salzlager geführt haben könnte. In den mittleren Sulfat-Schichten haben sich die marinen Einflüsse dahin verstärkt, dass sich die Wasseraktivität des Grundwassers in das Stabilitätsfeld von Anhydrit verschoben hat. Das heisst aber nicht, dass es sich dabei unbedingt um eine Transgression gehandelt haben muss. Die Wanderung der Gips-Anhydrit-Grenze kann auch durch abgeschwächte Süsswasserströme (im Grundwasser) hervorgerufen worden sein. Die oberen Gips-Schichten könnten dann wieder auf einen verstärkten Einfluss der kontinentalen Grundwasserströme hindeuten. Mit diesen Ausführungen wird nichts über den Küstenverlauf ausgesagt.

6.2 Die Mettauer Überschiebungszone

Die Mettauer Störung macht sich vor allem in den beiden Gips-Schichten in Form einer Deformation bemerkbar. Die mittleren Sulfat-Schichten sind hingegen kaum davon betroffen. Beim Stolleneingang des Bergwerkes ist deutlich zu erkennen, dass sich die Verformung nicht nur auf die Sulfatserie beschränkt, sondern ebenfalls den Anhydritdolomit leicht erfasst hat. Die Sedimente des oberen Muschelkalkes zeigen minimale oder keine Deformationen.

Der deformierte Bereich in der Felsenau zeigt ähnliche Deformationserscheinungen, wie sie WILDI (1972) in seiner Arbeit von der Wandfluh beschreibt. WILDI ordnet die Deformationen alleine der Mettauer Störungszone zu.

Auf den ersten Blick ist es erstaunlich, dass wir im deformierten Bereich intensiv verfalteten, gipsführenden Anhydrit feststellen konnten und – keine 40 m davon entfernt – im gleichen stratigraphischen Horizont reinen Gips. Untersuchungen (BAUMANN 1984a, 1984b) über das rheologische Verhalten von Gips geben uns nun eine Möglichkeit, dieses Phänomen zu erklären. Die jetzt verfalteten Anhydritlagen des deformierten Bereiches lagen vor der Faltung als Gips (eventuell als Gips-Anhydrit-Gemisch), mit erhöhtem Halitgehalt in den tonigen Partien, vor. Bei der Deformation, auch bei tieferen Temperaturen, verhielt sich der Gips lokal duktil. Bei der beginnenden Dehydratisation von Gips vergrösserte sich seine Mobilität noch erheblich. Als aber das Wasser die Gipslagen zu verlassen begann (nicht nur die Gipskristalle), stieg die Festigkeit des Materials rapid an. Das heisst, dass das Fliessen des Gesteins gebremst wurde, sofern die verformende Kraft diese Vergrösserung des Fliesswiderstandes nicht überwinden konnte. Durch die Umwandlung von Gips in Anhydrit wird die Rheologie des Anhydrits massgebender. Die Veränderung des felsmechanischen Verhaltens des Gesteins brachte die Bewegung und damit auch die Phasenumwandlung zum Stillstand. Aus diesem Grunde liegt heute nicht aller Gips als Anhydrit vor. Beim Gips handelt es sich vor allem um Rekristallisationen bzw. Neubildungen in der Umgebung von tonigen Partien. Durch die restlichen (oder ausklingenden) Bewegungen brachen die Anhydritschichten spröd. Die mittleren Sulfat-Schichten wurden von diesen Brüchen ebenfalls leicht betroffen. Es bildeten sich Klüfte und kleinere Versetzungen. Die Dehydration des Gipses und die damit verbundene Änderung des rheologischen Verhaltens des Gesteins schützen in einem gewissen Sinn die südlich davon gelegenen Schichten vor einer deformierenden Kraft aus Norden.

Das bei der Dehydration des Gipses freiwerdende Wasser wanderte in die tonigen Partien ab, ohne das Gesamtsystem zu verlassen. Nachdem die Dehydration gestoppt wurde und die ausklingende Deformation Klüfte erzeugte, wurde das Wasser aus den tonigen Partien remobilisiert. Die im Entstehen begriffenen Klüfte waren für das freie Wasser ein idealer Aufenthaltsraum. Da die Kluftbildung vor allem im Bereich des neugebildeten Anhydrits stattfand, bildeten sich in dessen Umgebung Klüfte, die mit Fasergips gefüllt wurden. Der in den tonigen Partien auftretende Halit wurde durch das wandernde Wasser teilweise gelöst. Als Folge des «Wasserverbrauchs» bei der Hydratisation von Anhydrit bzw. der Bildung von Fasergips wurde das restliche Wasser an NaCl übersättigt. Aus diesem Grunde finden wir heute in den noch offenen Klüften Halit neben Fasergips vor. Durch die chemischen Veränderungen wird auch die Morphologie der Kristalle während des Wachstums verändert. Sofern wir das ganze System als geschlossen betrachten, d.h. das freiwerdende Wasser nicht abführen, fallen die entsprechenden Volumenveränderungen kaum in Betracht.

Der deformierte Bereich im Bergwerk Felsenau kann als östliche Fortsetzung der von WILDI (1975) in der Wandfluh beschriebenen nordfallenden Mettauer Störungszone angesehen werden. HEIM (1919) vertrat die Meinung, dass die Mettauer Überschiebung während der Jurafaltung durch einen Schub aus südlicher Richtung erfolgt war, also gewissermassen eine Unterschiebung einer Tafel des Tafeljura in den Schwarzwaldfuss. Die Mettauer Störungszone wurde vor der südfallenden Mandacher

Störung gebildet, da sie von jener deformiert wird (WILDI 1972). Die Mandacher Störung ihrerseits wurde während der pliozänen Jurafaltung gebildet. Über den Ursprung der Mettauer Störungszone hat WILDI (1972) das Modell einer Schweregleitung vom Schwarzwald entwickelt. WILDIS Modell basiert auf sprödem Bruchverhalten. Damit nun sein Modell überhaupt funktioniert, muss er einen extrem hohen Porendruckquotienten von 0,8 bis 0,9 annehmen.

Dieses Problem kann mit einer andern Modellvorstellung umgangen werden (HSÜ 1969a, 1969b; LAUBSCHER 1961, 1982; MÜLLER & HSÜ 1980; SCHMID 1975). Dieses Modell arbeitet mit einem duktilen Verhalten inkompetenter Schichten. Auch dieses Modell operiert wie dasjenige von WILDI mit gravitativem Abgleiten der Sedimentdekken vom Schwarzwald, möglicherweise fast gleichzeitig mit seiner Hebung.

Unsere Untersuchungen zeigen keinerlei Indizien für ein sprödes Bruchverhalten im Bergwerk Felsenau mit einem hohen Porendruck als Abscherungsmechanismus. Vielmehr scheinen die beobachteten Indizien darauf hinzuweisen, dass die Verformung durch den extrem duktilen Gips der triadischen Serien aufgenommen wurde. Dies schliesst nicht aus, dass sprödes Bruchverhalten die dolomitischen und kalkigen Schichten des Hauptmuschelkalkes bei starker Verformung (z. B. Wandfluh, WILDI 1975) erfasst hat. Die Überlast im Bereich des Bergwerks Felsenau betrug Ende Pliozän (Abschluss der Mandacher Störung) etwa 700 m (über 180 bar). In dieser Tiefe betrug die Temperatur etwa 40 °C. Die rheologischen Untersuchungen zeigen, dass bereits bei dieser geringen Überlast eine leichte Neigung von wenigen Grad (um 5 °C) ausreichen kann, um Gleitbewegungen in Gipslagen auszulösen (WILDI 1972; BAUMANN 1984a).

Allerdings scheint die Deformation in der Felsenau nicht die Ausmasse anzunehmen wie westlich davon (z. B. an der Wandfluh, WILDI 1975). Dies geht auch aus der geringen Verformung der darüberliegenden Kalk- und Dolomitschichten hervor. LAUBSCHER (1982) glaubt, dass bei einer Überlast von einigen hundert Metern die Bedingungen erfüllt wären, um die karbonatischen Teile der Gesteinsserie spröd zu verformen, falls der Fliesswiderstand der tonigen und evaporitischen Schichten vernachlässigt werden kann.

Die Mettauer Störungszone verliert gegen Osten an Intensität. Diese Abnahme der Deformation kann als Rotation des abgleitenden Sedimentpaketes angesehen werden, wobei der Rotationspunkt nordöstlich der Felsenau liegt. Die Rotation fand also im Gegenuhrzeigersinn statt.

Eine eventuelle Zweistufigkeit der Überschiebung (vor der Jurafaltung angelegt und während der Jurafaltung reaktiviert), dürfte die Aussagen über den deformierten Bereich (d. h. Mettauer Überschiebung) nicht allzu stark beeinflussen, da vermutlich alle älteren Strukturen verwischt und zerstört worden sind. Im undeformierten Bereich wird dann allerdings eine Trennung der verschiedenen leichten Deformationsphasen (Sedimentation, Diagenese, Anlegung der Mettauer Überschiebung) kaum mehr möglich sein.

7. Schlussfolgerungen

Die Salzlager der Mittleren Trias (Ladinian) in der Nordschweiz sind nicht in einem grossen, zusammenhängenden Becken gebildet worden, sondern in einzelnen, kleineren und grösseren Becken. Dazwischen lagen Hochstrukturen, die sich einige Meter über

den Meeresspiegel erhoben. Das Meer hatte sich während längerer Zeit aus dem Gebiet der Felsenau zurückgezogen (untere und obere Gips-Schichten). Bei der Bildung der Gips-Schichten lässt sich kein mariner Einfluss feststellen. Entwässert wurden die Hochstrukturen vermutlich durch die gefundenen Erosionserscheinungen. Durch die Entwässerung der Tone und die Auslaugung allfälliger kleinerer Salzlager zerbrachen die Gipslagen und nahmen dabei ein brekziöses Erscheinungsbild an.

Das Bildungsalter und die Ursache der Mettauer Störungszone können nicht genauer bestimmt werden; eventuell muss eine Zweistufigkeit dieser Überschiebung postuliert werden. Die Hauptverformung wurde durch duktiles Verhalten der evaporitischen Lagen, im speziellen durch die Gips-Ton-Lagen, aufgenommen. Einerseits wurden durch das freiwerdende Wasser die tonigen Partien noch mobiler, anderseits erhöhte der neugebildete Anhydrit die Fliessfestigkeit des Materials, so dass die Bewegungen zum Stillstand kamen, als die deformierende Kraft nicht mehr ausreichte. Die Lagen der mittleren Sulfat-Schichten, die hauptsächlich aus Anhydritlagen bestehen, wurden von der Deformation kaum betroffen. In ihnen finden sich nur kleinere Klüfte.

Verdankungen

Ermöglicht wurde die Arbeit durch das Entgegenkommen der Gips-Union AG in Zürich und die tatkräftige Unterstützung der Mannschaft (Herr Schiess) des Bergwerks Felsenau. Die vorliegende Arbeit wurde von Prof. K.J. Hsü (Zürich) und Dr. W.H. Müller (Nagra) begleitet. Dr. P. Hochulli (Zürich) führte die palynologischen Untersuchungen durch. Die Herren Dr. W. Wildi (Freiburg), Dr. H.P. Funk und Dr. H. Furrer (beide Zürich) hatten die Freundlichkeit, das Manuskript kritisch durchzusehen. Die oben genannten Herren sowie Herr H. Naef (Zürich) haben die Arbeit durch Hinweise erleichtert. U. Gerber (Zürich) fertigte die Photographien an. Die Arbeit wurde durch das EIR (Dr. Flury) im Rahmen des EIR-Entsorgungsprojekts finanziell ermöglicht.

LITERATURVERZEICHNIS

Arbeitsgruppe für stratigraphische Terminologie (1973): Empfehlungen zur Handhabung der stratigraphischen, insbesondere lithostratigraphischen Nomenklatur. – Eclogae geol. Helv. *66*/2, 479–492.

Atomkraftwerke Beznau, NOK (1972): Einlagerung von radioaktiven Rückständen im Gipswerk Felsenau. – 1. Ergänzungsbericht (unveröff.).

BAERTSCHI, P., & JAKOB, K. (1978): O^{18}-Gehalt des gebundenen Wassers in Anhydrit- und Gipsgesteinen. – EIR-Ber., TM-CH-193 (unveröff.).

BAUMANN, W. (1984a): Stratigraphische und rheologische Untersuchungen sowie Kluftstudien an Evaporiten der Mittleren Trias in der Nordschweiz (Bergwerk Felsenau). – Diss. ETH Zürich.

— (1984b): Rheologische Untersuchungen an Gips. – Eclogae geol. Helv. *77*/2, 81–105.

BAUMANN, W., KAHR, G., BRIEGEL, U., & BUCHER, F. (1985): Rheologische Untersuchungen an Bentonit. – Techn. Ber. Nagra (im Druck).

BROSIUS, M., & BITTERLI, P. (1961): Middle Triassic hystrichosphaerids from the salt-wells Riburg-15 and -17, Switzerland. – Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. *28* (74), 33–49.

DEAN, W.E., & SCHNEIDER, CH. (Ed.) (1978): Marine Evaporites. – SEPM short course No. 4, Oklahoma City.

HANDFORD, R.C., LOUCKS, R.G., & DAVIES, G.R. (1982): Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites. – SEPM Core Workshop No. 3, Calgary.

HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. – Vjschr. natf. Ges. Zürich *112*/2, 91–122.

HAUBER, L. (1971): Zur Geologie des Salzfeldes Schweizerhalle–Zinggibrunn (Kt. Baselland). – Eclogae geol. Helv. *64*/1.

HEIM, A. (1919): Geologie der Schweiz, Bd. 1: Molasse und Juragebirge. – Tauchnitz, Leipzig.

HOEFS, J. (1980): Stable Isotope Geochemistry. – Springer, Berlin.

HSÜ, K.J. (1969a): Role of cohesive strength in the mechanics of overthrust faulting and of landsliding. – Bull. geol. Soc. Amer. *80*, 927–952.

— (1969b): Role of cohesive strength in the mechanics of overthrust faulting and the landsliding: Reply. – Bull. geol. Soc. Amer. *80*, 955–960.

JÄCKLI, H., & RISSI, A. (1981): Die Kernbohrung Beznau – Vorläufige geologische Resultate. – Eclogae geol. Helv. *74*/1, 285–290.

KOSMAHL, W. (1969): Zur Stratigraphie, Petrographie und Mineralogie des gebänderten Anhydrits, Grauen Salztones und Hauptanhydrits in Nordwestdeutschland. – Beih. geol. Jb. *71*.

LANGBEIN, R. (1983): Über diagenetisch entstandene Gefüge in Gips- und Anhydritgesteinen. – Z. geol. Wiss. *12*.

LANGBEIN, R., PETER, H., & SCHWAHN, H.-J. (1982): Karbonat- und Sulfatgesteine, Kalkstein–Dolomit–Magnesit–Gips–Anhydrit. – Leipzig.

LASKE, D. (1977): Analyse von zwei verschiedenen Tropfwasserproben aus dem Anhydrit-Stollen Felsenau. – EIR (unveröff.).

LAUBSCHER, H.P. (1961): Die Fernschubhypothese der Jurafaltung. – Eclogae geol. Helv. *54*, 221–282.

— (1982): Die Südostecke des Rheintalgrabens – ein kinematisches Problem. – Eclogae geol. Helv. *75*/1, 101–116.

MAIKLEM, W.R., BEBOUT, D.G., & GLAISTER, R.P. (1969): Classification of anhydrite – a practical approach. – Bull. canad. Petroleum Geol. *17*/2, 194–233.

MERKI, P. (1961): Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. – Eclogae geol. Helv. *54*/1, 137–226.

MÜHLBERG, F. (1906): Einige Ergebnisse der staatlichen Kontrollbohrung auf Steinsalz bei Koblenz im Jahre 1903. – Eclogae geol. Helv. *9*/1.

MÜLLER, W.H., & HSÜ, K.J. (1980): Stress distribution in overthrusting slaps and mechanics of Jura deformation. – Rock Mech., Suppl. 9.

MÜLLER, W.H., BRIEGEL, U., & BAUMANN, W. (1980): Anhydrit als mögliches Wirtgestein für die Lagerung radioaktiver Abfälle. – EIR-Ber. *409* (Eidg. Inst. Reaktorforsch. Würenlingen).

Nagra (1984): Neue Erkenntnisse über die Geologie der Nordschweiz. – Nagra Aktuell *4*/2.

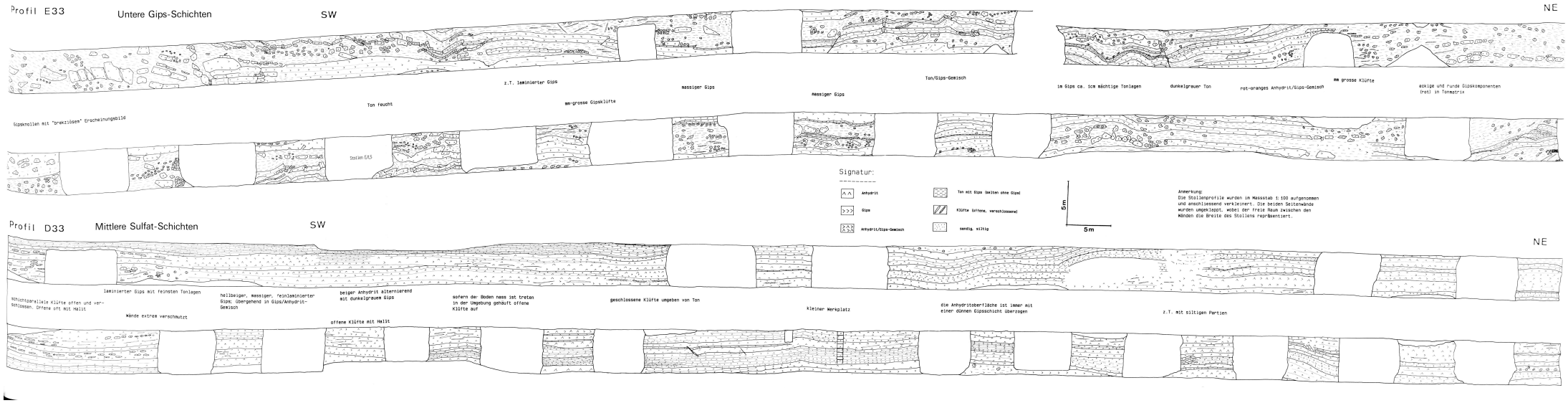
SCHMID, S.M. (1975): The Glarus overthrust: Field evidence and mechanical model. – Eclogae geol. Helv. *68*, 251–284.

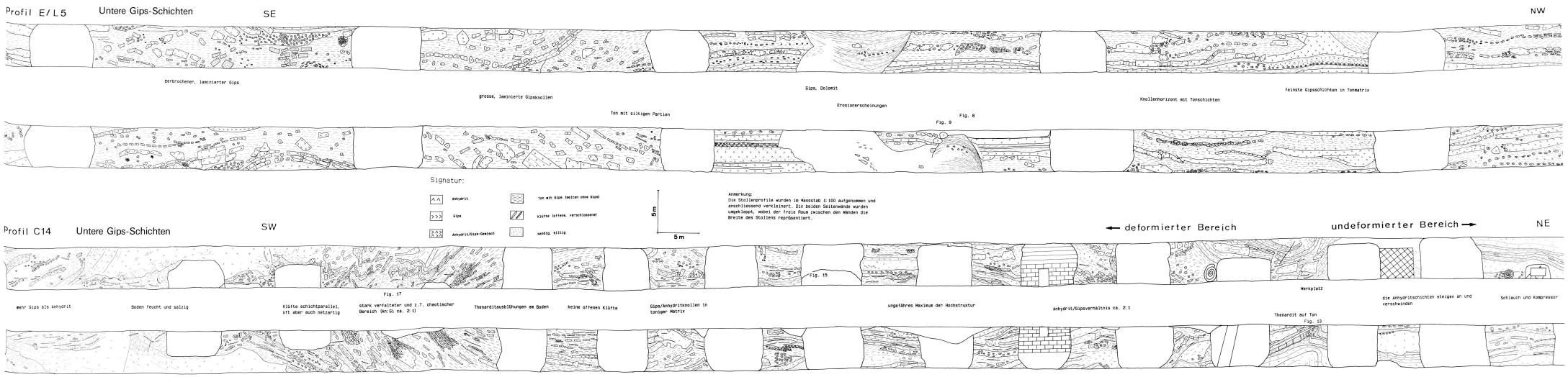
VISSCHER, H., & BRUGMANN, W.A. (1981): Ranges of selected palynomorphs in the Alpine triassic of Europe. – Rev. Palaeobot. Palynol. *34*, 115–128.

WILDI, W. (1972): Die Geologie der «Mettauer Überschiebung» im Aargauischen Tafeljura. – Unveröff. Diplomarb. ETH Zürich.

— (1975): Die Mettauerüberschiebung im Aargauischen Tafeljura (Nordschweiz). – Eclogae geol. Helv. *68*/3, 483–489.

ZIEGLER, P.A. (1982): Geological Atlas of Western and Central Europe. – Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.


Profil E33
Untere Gips-Schichten
SW
NE
z.T. laminierter Gips
massiger Gips
Ton/Gips-Gemisch
Ton feucht
mm-grosse Gipsklüfte
massiger Gips
im Gips ca. 1cm mächtige Tonlagen
dunkelgrauer Ton
rot-oranges Anhydrit/Gips-Gemisch
mm grosse Klüfte
eckige und runde Gipskomponenten (rst) in Tonmatrix
Gipsknollen mit "brekziösem" Erscheinungsbild
Stollen E/5
Signatur:
Anhydrit
Gips
Anhydrit/Gips-Gemisch
Ton mit Gips (selten ohne Gips)
Klüfte (offene, verschlossene)
sandig, siltig
5m
5m
Anmerkung:
Die Stollenprofile wurden im Massstab 1:100 aufgenommen und anschliessend verkleinert. Die beiden Seitenwände wurden umgeklappt, wobei der freie Raum zwischen den Wänden die Breite des Stollens repräsentiert.
Profil D33
Mittlere Sulfat-Schichten
SW
NE
laminierter Gips mit feinsten Tonlagen
schichtparallele Klüfte offen und verschlossen. Offene oft mit Halit
Wände extrem verschmutzt
hellbeiger, massiger, feinlaminierter Gips; übergehend in Gips/Anhydrit-Gemisch
beiger Anhydrit alternierend mit dunkelgrauen Gips
offene Klüfte mit Halit
sofern der Boden nass ist treten in der Umgebung gehäuft offene Klüfte auf
geschlossene Klüfte umgeben von Ton
kleiner Werkplatz
die Anhydritoberfläche ist immer mit einer dünnen Gipsschicht überzogen
z.T. mit siltigen Partien


Profil E/L5
Untere Gips-Schichten
SE
NW
zerbrochener, laminierter Gips
grosse, laminierte Gipsknollen
Ton mit siltigen Partien
Gips, Dolomit
Erosionserscheinungen
Fig. 8
Fig. 9
Knollenhorizont mit Tonschichten
feinste Gipsschichten in Tonmatrix
Signatur:
Anhydrit
Gips
Anhydrit/Gips-Gemisch
Ton mit Gips (meist ohne Gips)
Klüfte (offene, verschlossene)
sandig, siltig
5 m
5 m
Anmerkung:
Die Stollenprofile wurden im Massstab 1:100 aufgenommen und anschliessend verkleinert. Die beiden Seitenwände wurden umgeklappt, wobei der freie Raum zwischen den Wänden die Breite des Stollens repräsentiert.
Profil C14
Untere Gips-Schichten
SW
deformierter Bereich
undeformierter Bereich
NE
Fig. 17
Fig. 15
Werkplatz
mehr Gips als Anhydrit
Boden feucht und salzig
Klüfte schichtparallel, oft aber auch netzartig
stark verfalteter und z.T. chaotischer Bereich (An:Gi ca. 2:1)
Thenarditausblühungen am Boden
keine offenen Klüfte
Gips/Anhydritknollen in toniger Matrix
ungefähres Maximum der Hochstruktur
Anhydrit/Gipsverhältnis ca. 2:1
Thenardit auf Ton
Fig. 13
die Anhydritschichten steigen an und verschwinden
Schlauch und Kompressor