

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 3 (1998)
Heft: 2

Artikel: Geologische Resultate der NEAT Sondierbohrung SB3 - Tujetsch
(Sedrun/GR)
Autor: Wyder, R.F. / Mullis, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-220737>

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: 15.07.2025

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

Geologische Resultate der NEAT Sondierbohrung SB3 - Tujetsch (Sedrun / GR)

mit 9 Figuren und 2 Tabellen

R. F. WYDER¹⁾ & J. MULLIS²⁾

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem geplanten NEAT Gotthard Basistunnel durchgeführte Kernbohrungen in Sedrun ermöglichten erstmals, unverwitterte Kakirite (Verwerfungsbrekzien, Verwerfungsletten) des Tavetscher Zwischenmassivs eingehend zu untersuchen. Geophysikalische und hydrologische Messmethoden sowie Laborversuche (Bohrloch-Logs, Packer-Tests, Triaxialtests und Porositätsbestimmungen) gewährten einerseits einen Einblick in die strukturelle Position von Kakiriten im Tavetscher Gebirge, in ihre Festigkeit und in ihre Elastizität. Andererseits konnten bautechnisch relevante hydrogeologische Erkenntnisse wie Porosität, Permeabilität, Transmissivität und Durchlässigkeitsbeiwerte gewonnen werden. Mikrostrukturelle und petrographische (mikrothermometrische) Untersuchungen erlaubten die Rekonstruktion der Kakiritisierung im P - T - Raum. Vergleiche mit bereits existierenden P - T - t (pressure-temperature-time)-Daten aus den Zentralalpen führten zu einem tektonischen Modell, in dem die Kakiritisierung und der zeitliche Ablauf der Exhumationsgeschichte des Tavetscher Zwischenmassivs rekonstruiert werden konnten.

Riassunto

Il foraggio di Sedrun, effettuato nel quadro dei lavori preliminari per la costruzione del tunnel di base del Gottardo (NEAT), ha permesso per la prima volta lo studio accurato delle cachirite (breccie di faglia, argille di faglia) non alterate del massiccio del Tavetsch. Grazie a misurazioni geofisiche e idrogeologiche in situ ed a esperimenti di laboratorio (test triassiali e misure della porosità) è stato possibile definire la posizione strutturale delle cachirite all'interno del massiccio del Tavetsch e la loro solidità ed elasticità. D'altra parte queste analisi hanno permesso di stabilire parametri idrogeologici importanti quali porosità, permeabilità, trassmissività e condittività idraulica. L'analisi microstrutturale e petrografica (microtermometria delle inclusioni fluide) hanno permesso la caratterizzazione delle cachirite nello spazio P - T. Il confronto di questi dati con quelli già esistenti nelle alpi centrali ha permesso di costruire un modello tettonico della cachiritizzazione e l'evoluzione temporale dell'esumazione del massiccio del Tavetsch.

Abstract

Sondation work (core drilling) for the NEAT Gotthard base tunnel enabled detailed investigations on unweathered Tavetsch kakirites (fault breccias and fault gouge). Geophysical and hydrological methods as well as laboratory work (borehole logs, packer tests, triaxial tests and porosity determination) lead to the knowledge about the structural position of kakirites as well as to results concerning rock mechanics (strength, elasticity) and hydrogeological properties such as porosity, permeability, transmissivity and

1) Fernfachhochschule Schweiz, Postfach, 3900 Brig. E-mail: rwyder@fernfachhochschule.ch

2) Mineralogisch-Petrographisches Institut, Bernoullistrasse 30, 4056 Basel.
E-mail: mullis@ubaclu.unibas.ch

hydraulic conductivity. Microstructural and petrographic (microthermometric) investigations yielded a reconstruction of kakiritisation within the P - T -space with respect to quartz. The correlation with existing regional P - T - t data lead to a tectonic model, an age correlation and a suggestion for the exhumation history of the Tavetsch massif. These results explain the kakiritisation within a tectonic, petrographic and time related context.

1. Einführung, geologischer Überblick

1.1 Die NEAT: Ein Jahrhundertprojekt

Im Jahre 1992 hat das Schweizervolk die NEAT Vorlage des Parlaments angenommen und damit unter anderem das Kernstück des Jahrhundertprojektes, den Bau der beiden Basistunnel Lötschberg und Gotthard, gutgeheissen. Es stellte sich bald heraus, dass der Bau, insbesondere des Gotthard Basistunnels, mit bisher einzigartigen bautechnischen Problemen verknüpft ist. Es müssen, unter hoher Überlagerung, viele verschiedene Gesteinsformationen mit ebenso verschiedenen Lagerungsformen durchfahren werden. Im besonderen betrifft dies von Nord nach Süd die Querung des Tavetscher Zwischenmassivs und der Piora Zone. Beide geologisch-tektonischen Einheiten sind von grossen kristallinen Blöcken (Aar- und Gotthardmassiv, bzw. Gotthardmassiv und Lucomagno Decke) überschoben und der ganze Komplex später steilgestellt worden. Beide Einheiten enthalten grosse Anteile von kohäsionslosen (lockergesteins-ähnlichen), durch spröde Deformation entstandene Gesteine, sogenannte Kakirite oder Verwerfungsbrekzien (Gneise, Schiefer und Phyllite im Tavetsch und zuckerkörniger Dolomit im oberen Teil der Piora Zone). Für Tunnelbauer bedeutet das Vorhandensein von langen kohäsionslosen Strecken im Zusammenhang mit hoher Gebirgsüberlagerung eine grosse technische Herausforderung und während des Vortriebes eine immer währende Gefahr.

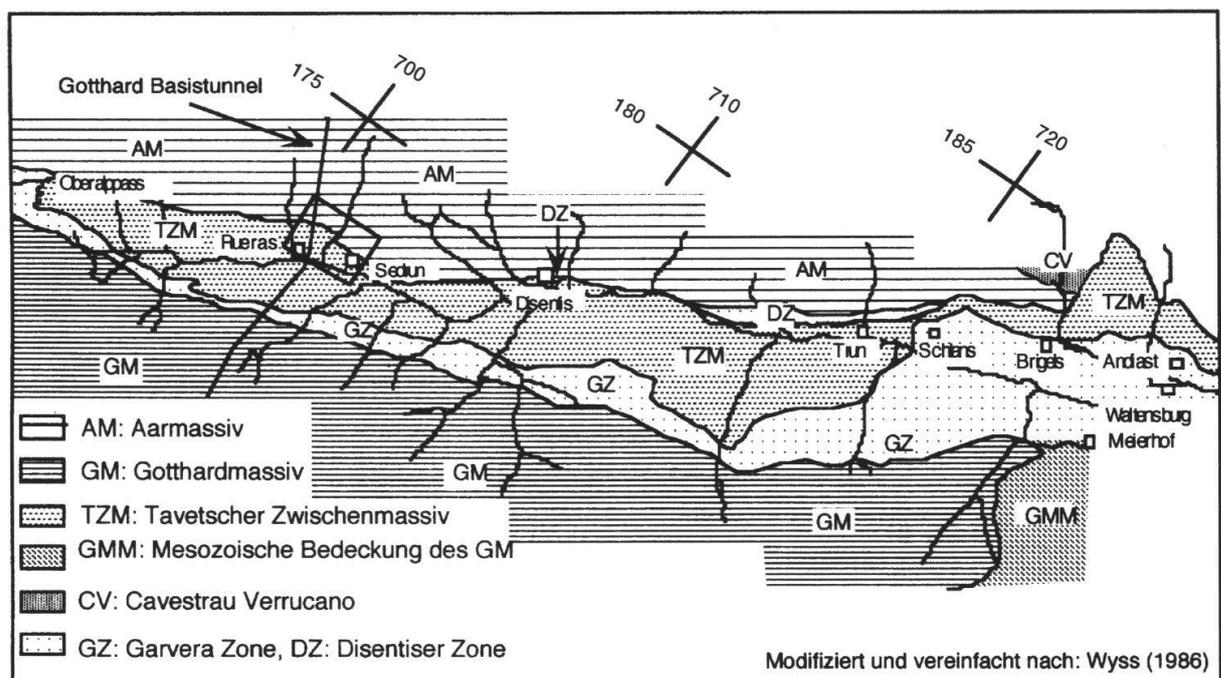


Fig. 1: Geologische Karte des Tavetscher Zwischenmassivs und Lage des Arbeitsgebietes (Rechteck).

In den Jahren 1991 - 1996 wurden im Rahmen von NEAT Sondierungen im Raum Sedrun vier etwa 45° geneigte Schrägbohrungen, SB1 - Nord, SB2 - Süd, SB3 - Tujetsch und SB4.1, ins nördliche bis mittlere Tavetscher Zwischenmassiv abgeteuft, um geologische Erkenntnisse von den schlecht aufgeschlossenen Tavetscher Gesteinen zu gewinnen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Kakiriten des Tavetscher Zwischenmassivs aus der Bohrung SB3 - Tujetsch im Abschnitt Sedrun des geplanten Gotthard Basistunnels. Sie soll ein mineralogisches, tektonisches und zeitliches Bild von der Entstehung dieser Gesteine entwerfen.

1.2 Geologischer Überblick

Das Tavetscher Zwischenmassiv ist eine lange, schmale und subvertikal gelagerte geologisch - tektonische Einheit zwischen Aar- und Gotthardmassiv, welche dem allgemeinen regional überwiegenden WSW - ENE Streichen folgt (Figur 1). Mit einer mittleren Breite von 2.5 km und einer maximalen Breite von 5 km erstreckt es sich östlich von Andermatt (Oberalppass, Pazzola Bach) bis östlich von Schlans. Die metasedimentäre Garvera Zone im Süden trennt das Tavetscher Zwischenmassiv vom Gotthardmassiv. Am Nordrand ist die Trennung zum Aarmassiv vom Tavetscher Zwischenmassiv bis im östlichen Teil Disentis durch die metasedimentäre Disentiser Zone gegeben. Westlich davon, im Raum Sedrun ist die Tren-

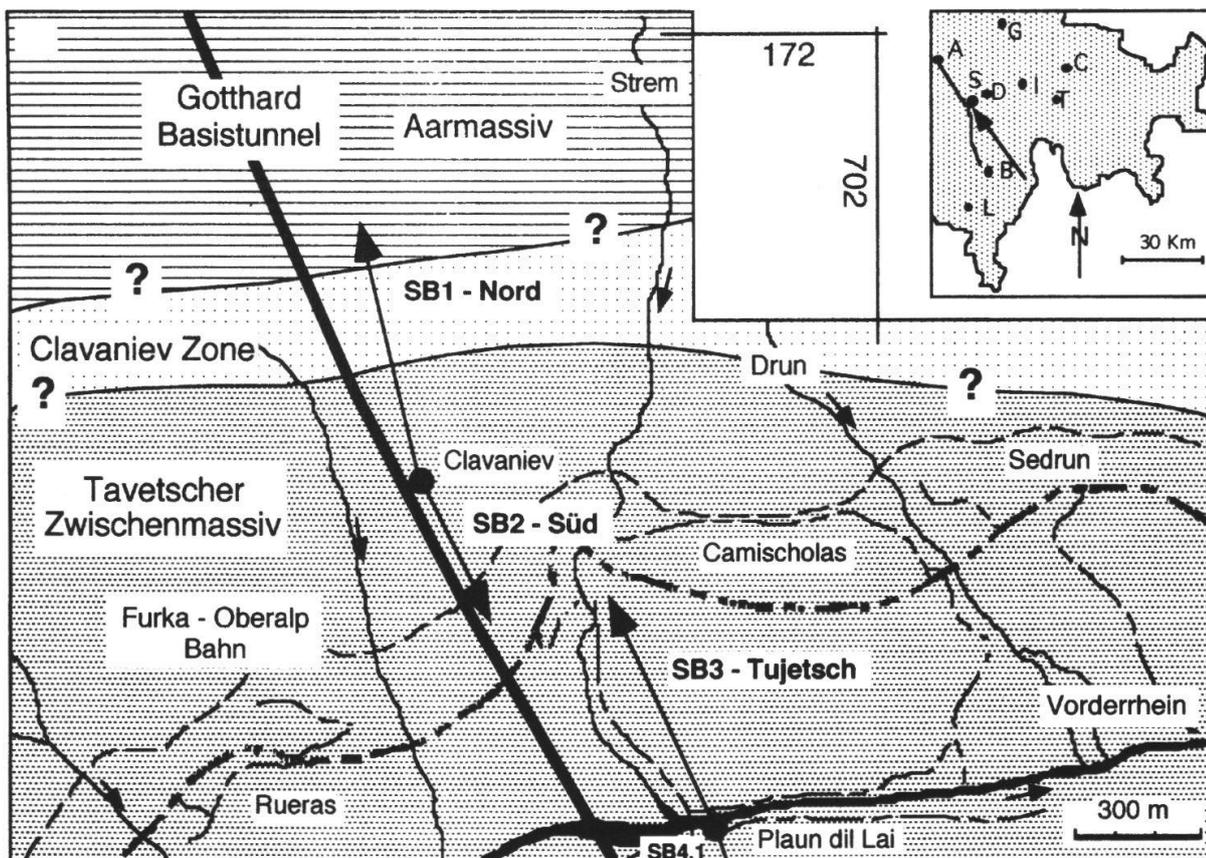


Fig. 2: Arbeitsgebiet mit den Spuren der Sondierbohrungen SB1 - Nord, SB2 - Süd, SB3 - Tujetsch und SB4.1. Die Koordinaten in Figuren 1 und 2 entsprechen den Koordinaten der Schweizerischen Landeskarte. A = Altdorf, B = Biasca, C = Chur, D = Disentis, G = Glarus, I = Ilanz, L = Locarno, S = Sedrun, T = Thusis.

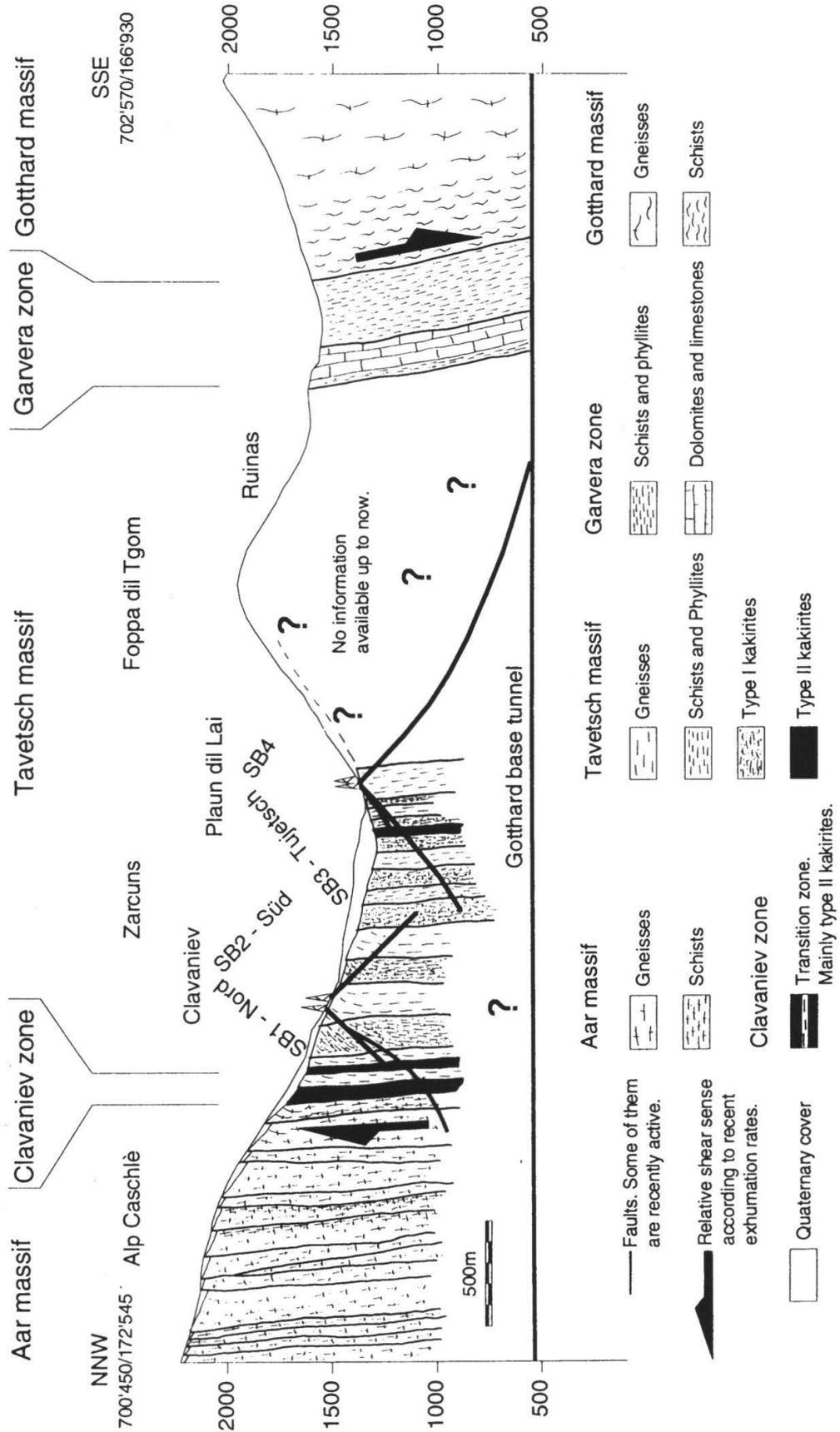


Fig 3: Strukturelles Profil entlang des geplanten Gotthard Basistunnels. Zusammengestellt nach Niggli (1944), Eckhardt (1957), Wyss (1986), Schneider (1992, 1994) und eigenen Resultaten.

nung nicht mehr eindeutig. Es gibt keine sicheren sedimentären Aufschlüsse mehr. Es müssen deshalb petrographische und strukturelle Kriterien zur Grenzbestimmung herangezogen werden. Dies sind beispielsweise die generelle Abnahme des Biotitgehaltes, die allgemeine Korngrößenreduktion, die stärker ausgebildete Foliation und die Kohäsionsabnahme in Tavetscher Gesteinen gegenüber den Gesteinen im Aarmassiv. Zusätzlich sind der Südrand des Aarmassivs und der Nordrand des Tavetscher Zwischenmassivs von breiten kakiritischen Störzonen mit Mächtigkeiten von zehn- bis zwanzig Meter durchsetzt, welche Gesteine beider Massive enthalten. In Anlehnung an den Standort Clavaniev der Bohrungen SB1 - Nord und SB2 - Süd werden diese Störzonen als 'Clavaniev - Zone' zusammengefasst (Schneider 1992; Figuren 2 und 3).

Die Gesteine des Tavetscher Zwischenmassivs wurden von Niggli (1944) in sieben Gruppen eingeteilt: a) Paragneise (einschliesslich Hornfelse), b) Paraschiefer und Quarzite, c) Injektions- und Mischgneise, d) Amphibolite und Grünschiefer, e) Ultrabasite, f) Quarzporphyre (inklusive felsische, Turmalin führende Varietäten), g) Pegmatitgänge und (manchmal Erz führende) Quarzgänge.

Die erbohrten Gesteine aus SB3 - Tujetsch entsprechen vor allem den Typen a) und b) mit Einschaltungen von c) und d). Zusätzlich durchörterte die Bohrung aplitische Formationen, welche an der Oberfläche nirgends aufgeschlossen sind.

Das Tavetscher Zwischenmassiv bildet den östlichen Teil der Rhein - Rhone - Linie und wurde mehrmals duktil und sprödetektonisch intensiv überprägt. Der Kohäsionsabfall bezüglich Aar- und Gotthardmassiv ist beträchtlich. Kohäsionslose Kakirite sind sehr häufig und wurden erstmals von Niggli (1944) beschrieben. Durch die mächtige quartäre Bedeckung sind Kakiritaufschlüsse, im Tavetsch eher selten. Die leicht zerbrechlichen Gesteine sind äusserst anfällig auf Oberflächenprozesse wie Verwitterung, Erosion und Hakenwurf.

2. Die Bohrung SB3 - Tujetsch

2.1 Ablauf der Bohrarbeiten

Vom Standort Plaun dil Lai (Figur 2) aus, nahe dem Eingang zum Kraftwerkstollen (Koordinaten 700: 900 / 170: 925), wurde durch die Firma FORALITH AG / Gossau (SG) die Bohrung SB3 - Tujetsch mit einer mittleren Neigung von 50° zur Vertikalen und einem mittleren Azimut von 338° 780 m abgeteuft. Die Bohrung erreichte eine Tiefe von 480 m unterhalb OKT (Oberkante Terrain). Bis zu Tiefe 26.40 m wurde mit dem destruktiven 'Tubex' Verfahren, ab da mit Seilkernverfahren (Doppelkernrohr) gebohrt. Die Bohrarbeiten begannen am 10. 08. 1993 und endeten am 30. 11. 1993.

SB3 Tujetsch besteht, ähnlich wie SB1 - Nord, aus zwei Bohrungen (Bohrlöcher A und B, Figur 4): Da sich der Bohstrang bis zur Tiefe 296.30 m auf 23.5° Neigung zur Horizontalen aufrichtete, ergaben sich Probleme beim Wiedereinbringen des evakuierten Innenkernrohres und das Bohrloch A musste aufgegeben und bis zu Tiefe 59.50 m mit Zement verfüllt werden. Ab da wurde mit dem destruktiven 'Rotary Spülverfahren' eine Abweichungsbohrung mit einem Winkel von 50° zur Vertikalen bis 300 m abgeteuft. Von 300 m bis zur Endtiefe 780 m (Bohrloch B) wurde wieder mit dem Seilkernverfahren gearbeitet (Tabelle 1).

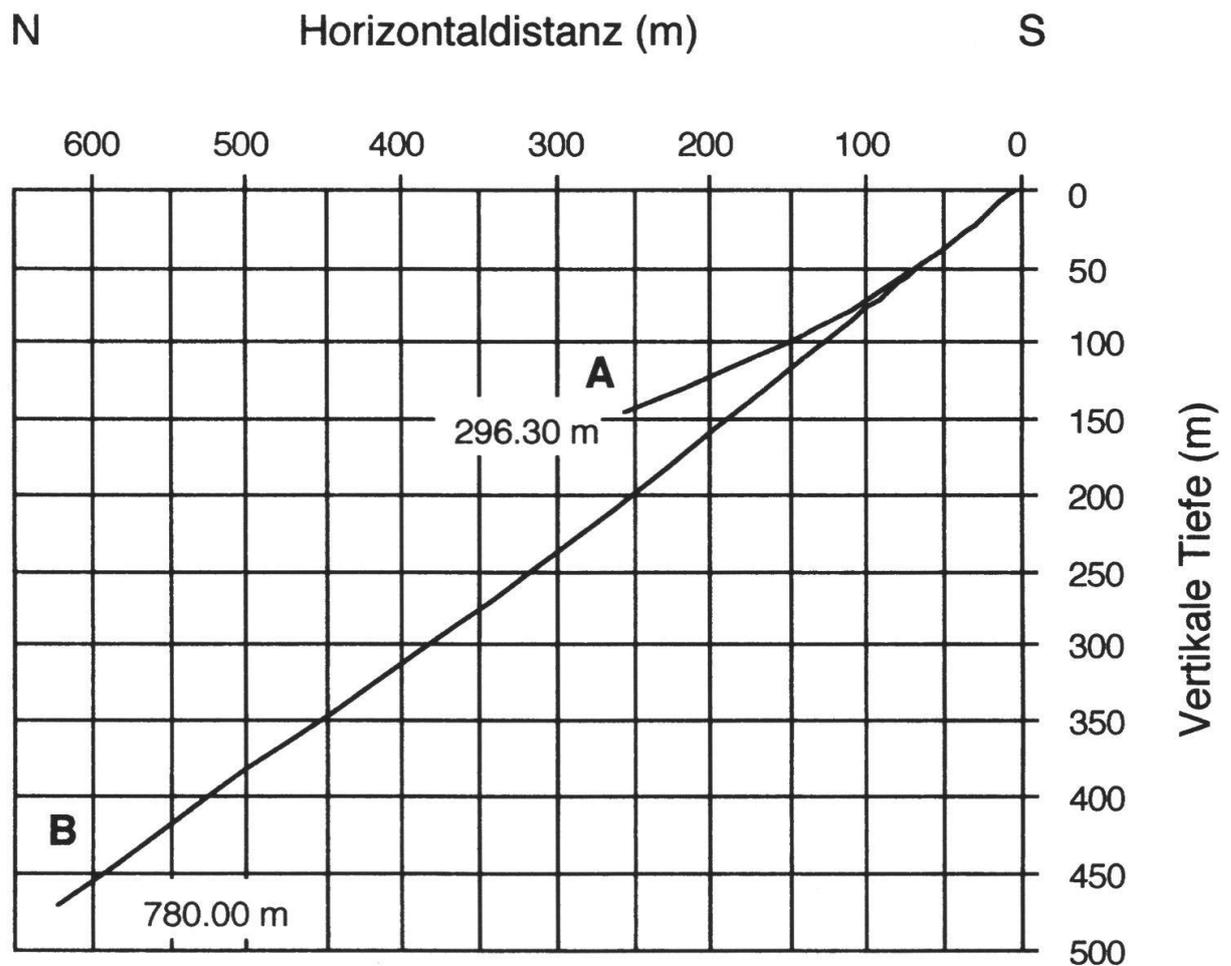


Fig. 4: Neigungsverlauf von SB3 - Tujetsch (mittleres Azimut = 338°).

Bohrloch A	Tubex Hammerbohrung Kernbohrung Gekernte Strecke	0 - 26.40 m 26.40 - 296.30 m 269.90 m
Bohrloch B	Rotary Spülbohrung Differenz zu Bohrloch A Kernbohrung Gekernte Strecke	59.50 - 300.00 m 3.70 m 300.00 - 780.00 m 480.00 m
Total	Gekernte Strecke	749.90 m

Tab. 1: Bohrverlauf von SB3 - Tujetsch

2.2 Bohrresultate

Das wichtigste Resultat dieser Bohrung ist die Tatsache, dass 31.94 % oder 239.49 m des durchteuften gekernten Profils aus kohäsionslosen kakiritisch überprägten Gesteinen besteht. Den Rest teilen sich mürbe, spröde, in den seltensten Fällen feste und harte Gesteine. In diesen Zahlen ist der Kernverlust von 3.53 % oder 26.48 m mitenthalten (Kernverlust wird als Kakirit interpretiert), jedoch nicht die ersten 26.40 m der 'Tubex' Hammerbohrung. Tabelle 2 zeigt die Verteilung von

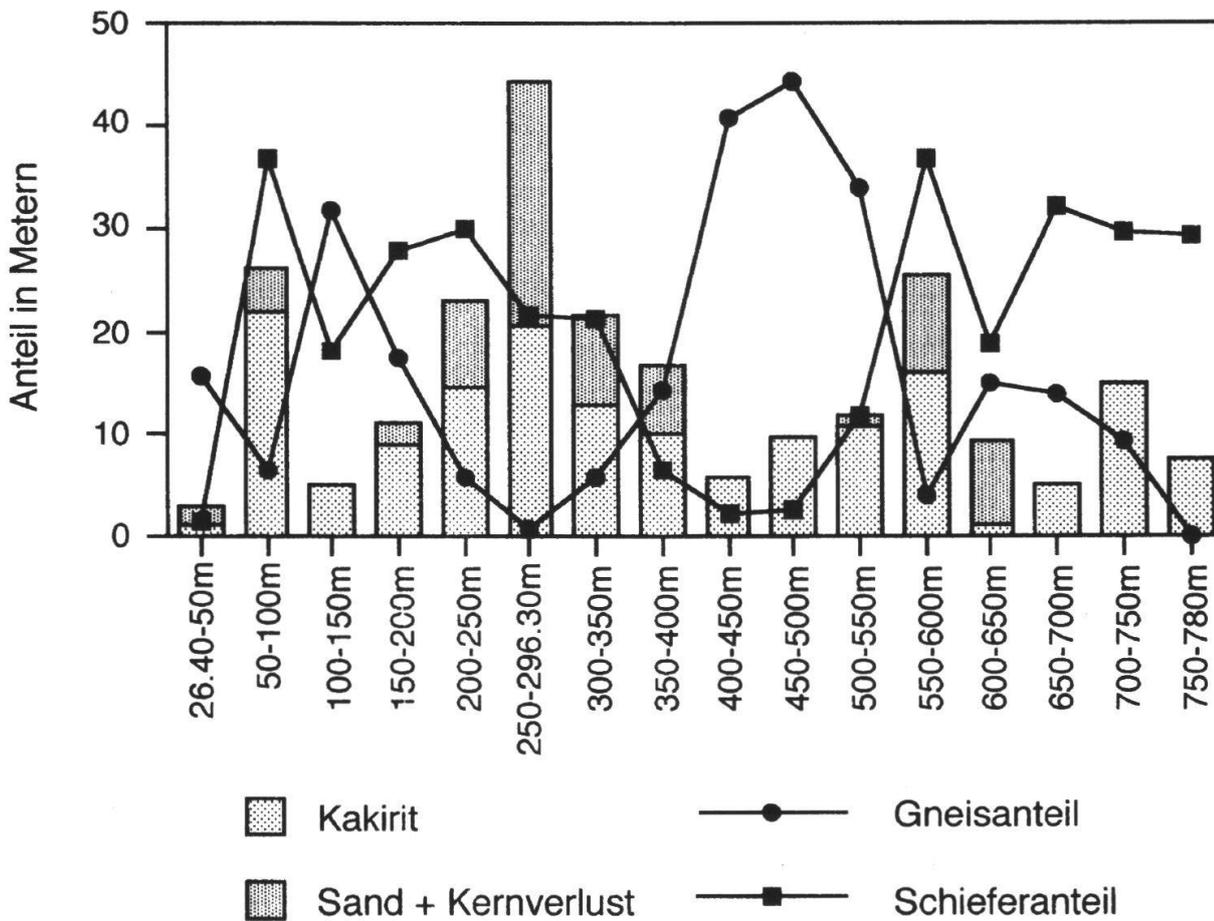


Fig. 5: Vergleich Kakirithäufigkeit - Gneis- bzw. Schieferanteil in 50m Intervallen; Bohrung SB3 - Tujetsch. Eine auffällige Tendenz in der Bohrung SB3 - Tujetsch ist die zunehmende Häufigkeit von Kakiriten bei zunehmendem Schieferanteil im Gestein.

Kakiriten innerhalb der ausgeschiedenen Texturtypen (Sand = zerbohrte, aber dennoch geförderte Kakirite). Es zeigte sich, dass Kakirite am meisten innerhalb von Schieferformationen, am wenigsten in Gneisformationen angetroffen wurden. Figur 5 verdeutlicht diesen Trend über 50 m Intervalle.

Texturtyp	Anteil (m)	Anteil (Längen%)	Kakiritanteil (m)	Kakiritanteil (Längen%)	Kakiritisierungsgrad Texturtyp (Längen%)
Gneis	258.74	34.50	24.91	3.32	9.63
Gneis bis Schiefer	35.99	4.80	10.62	1.42	29.51
Schiefer	326.64	43.56	119.63	15.95	36.62
Phyllit	54.46	7.26	10.26	1.37	18.84
Sand	47.59	6.35	47.59	6.35	100.00
Kernverlust	26.48	3.53	26.48	3.53	100.00
Total	749.90	100.00	239.49	31.94	

Tab. 2: Texturtypen in SB3 - Tujetsch. Als 'Sand' werden zerbohrte aber dennoch geförderte Kakirite bezeichnet.

2.3 Geophysikalische Messungen und Hydrotests

Am 24. / 25. 10. 1993 sowie am 1. / 2. 12. 1993 führte die Firma SCHLUMBERGER (Hannover / D) geophysikalische Logging Kampagnen im Tiefenbereich 299 - 780 m durch. Folgende Logs wurden gefahren:

- *FMS*, inklusive *CAL* und *SGR* (Formation Microscanner, Caliber und Spectral-Gamma Ray Sum Curve): Messungen von Gesteinsstrukturen und Bohrlochneigung (*FMS*), -durchmesser und -form (Querschnitt, *CAL*) sowie Tiefenreferenz (*SGR*).
- *DLL* inklusive *SP* (Dual - Laterolog und Spontaneous Potential): Messungen elektrischer Gesteinswiderstände. Indikator für Porosität und Lithologie. Die Messungen von Spontanpotentialen (*SP*) konnten aufgrund von zu starken Interferenzen mit dem nahegelegenen Kraftwerk nicht weiter verwendet werden (Korrektur der Werte und Ermittlung der Wassersättigung im Gestein nicht möglich).
- *NGT* (Natural Gamma Ray Spectrometry): Indikator für mineralogische Zusammensetzung. Messung des Thorium -, Uran - und (radiogenen) Kaligehaltes im Gestein.
- *AS*, inklusive *SGR* (Array Sonic): Messung von p - und s - Wellengeschwindigkeiten. Indikator für dynamische Elastizitätsmoduli (gesteinsmechanische Eigenschaften).
- *HLDL* (High Resolution Litho - Density - Log): Messung des photoelektrischen Faktors (*PEF*) und Ermittlung der Gesteinsdichte. Indikator für Lithologie und Porosität.
- *TEMP*: Messung der Bohrlochtemperatur auf Sohle (Bottom Hole Temperature, *BHT*) während allen Runs.

Zusätzlich wurden am 30./31. 10. 1993 und am 3./4. 12. 1993 von der Firma SOLEXPERTS AG / Schwerzenbach (ZH) zwei Packertests in den kakiritisch überprägten Tiefenintervallen 537.80 - 552.00 m bzw. 760.00 - 780.00 m durchgeführt. Die beiden Testintervalle weisen einen Kakiritisierungsgrad von ca. 30 bzw. ca. 40 % auf.

3. Kakirite

3.1 Klassifikation

Da in der Praxis keinerlei Übereinstimmung über die Nomenklatur von spröde deformierten Gesteinen besteht, ist es angebracht, die Verwendung des Begriffs 'Kakirit' in dieser Arbeit zu präzisieren.

Nach Heitzmann (1985) wurden bis etwa 1971 sämtliche Korngrößen reduzierende Vorgänge in Gesteinen spröden Deformationsereignissen zugeordnet. Tatsächlich sind die Tavetscher Kakirite mehrphasig spröde überprägt (Wyder & Mullis, im Druck). Trotzdem ist strukturell nachgewiesen, dass sie ehemals Mylonite und Phyllonite waren und demzufolge während früherer Deformationsphasen durch überwiegend nicht - kataklastische Prozesse (Schmid & Handy 1991) gebildet wurden.

Frühe Theorien über die Bildung von Myloniten beruhten auf der Annahme, dass Korngrößenreduktionen durch Brechen und Zermahlen von Gesteins- und Mineralkörnern entstehen, gefolgt von einer späteren Ausfällung eines Zementes (Lapworth 1885). Später konnten Bell & Etheridge (1973) zeigen, dass kristallplastische

Deformation kombiniert mit dynamischer Rekristallisation ebenfalls zu einer Korngrößenreduktion führen kann. Damit war die 'Klassifikationsverwirrung' perfekt. Zusätzlich werden Begriffe wie 'Kataklasit' (= kohäsives, hauptsächlich spröde deformiertes Gestein), 'Kakirit' (= kohäsionsloses, spröde deformiertes Gestein), 'Verwerfungsbrekzie' oder 'Verwerfungsletten' (engl. 'fault breccia' und 'fault gouge') von unterschiedlichen Autoren uneinheitlich verwendet (z. B. Heitzmann 1985; Schmid & Handy 1991). Es ist deshalb notwendig, für diese Arbeit die Definitionen der Begriffe 'Kakirit', 'Kataklasit' und 'Mylonit' anzugeben. Es hat sich gezeigt, dass die Definitionen von Heitzmann (1985) für die Tavetscher Kakirite sowohl im meso- als auch im mikroskopischen Bereich am eindeutigsten sind:

Kakirit: Ausschliesslich spröde deformiertes kohäsionsloses Gestein. Mit steigendem Matrixanteil zwischen zerbrochenen Gesteins- und Mineralklasten kann zwischen tektonischen Brekzien (≤ 10 Vol% Matrix), Verwerfungsbrekzien (10 - 30 Vol% Matrix) und Verwerfungsletten (fault gouge, > 50 Vol% Matrix) unterschieden werden. Kakirite können die verlorengegangene Kohäsion durch posttektonische Prozesse wie z. B. Mineralneubildungen zurückgewinnen (Schmid & Handy 1991). Gemäss Heitzmann (1985) müssen rekonsolidierte Kakirite als Kataklasite klassiert werden. Die Tavetscher Kakirite sind jedoch weitgehend kohäsionslos geblieben. Kakirite können foliiert sein.

Kataklasit: Kohäsives, hauptsächlich spröde deformiertes Gestein mit untergeordnetem Anteil von kristallplastischer Deformation oder Drucklösungsphänomenen. Zum Beispiel kann in einem Gestein Quarz plastisch verformen, während Feldspäte und Glimmer bereits brechen. Dieser Deformationsmechanismus wird als kataklastisch bezeichnet. Kataklasite können foliiert sein (Chester et al. 1985).

Mylonit: Gestein, welches fast ausschliesslich durch nicht kataklastische Prozesse gebildet wurde (Versetzungsgleiten kombiniert mit dynamischer Rekristallisation, korngrößenabhängiges Fliessen). Mylonite sind penetrativ foliiert und weisen in der Regel ein Streckungslinear auf. Während des gesamten Deformationsereignisses bleiben Mylonite kohäsiv. Der äquivalente Term für mylonitisierte Phyllite lautet 'Phyllonit'.

3.2 Zwei Typen von Kakiriten

Sämtliches Kernmaterial aus der Bohrung SB3 - Tujetsch, welches ohne mechanische Hilfsmittel von Hand unterhalb einer Korngrösse von 1 cm zerrieben oder zerdrückt werden konnte, wurde als kohäsionslos angesprochen und das Gestein als Kakirit klassiert.

Die Orientierung von Kakiritzonen folgt in den meisten Fällen dem regionalen WSW - ENE Streichen. Diskordante Kakirite sind selten und definieren das jüngste spröde Ereignis. Kerninspektionen führten zur mesoskopischen Einteilung der Kakirite in zwei Typen:

Typ I Kakirit: Obwohl kohäsionslos, zeigt dieser Typ ältere mylonitische, phyllonitische oder kataklastische Strukturen. Das Gestein ist von einem dichten Rissnetzwerk parallel und quer zur Hauptschieferung durchzogen. Durch kleine Versetzungsbeträge (mm bis cm-Bereich) wurden Gefügedomänen aus ihrer originalen

strukturellen Position herausrotiert oder verschoben. Die Risse sind mit einem feinkörnigen tonigen Brei (Verwerfungsletten, fault gouge) verfüllt. Im Extremfall sind sämtliche Trennflächen und Mineralien im Gestein durch Risse voneinander getrennt. Trotzdem ist das alte planare Gefüge noch klar erkennbar. Im wassergesättigten Zustand sind Typ I Kakirite oftmals in einem kleinen Winkel biegsam ('Gummikerne'). Obwohl die Versetzungsbeträge entlang von Rissen sehr klein sind, können sich diese regional zu grösseren Beträgen (m - Bereich) aufsummieren. Durch den eindimensionalen Charakter des Bohrloches und durch die konkordante Raumlage von Kakiriten sind Versätze jedoch nicht quantifizierbar.

Der Übergang vom Ausgangsgestein (nicht kakiritisierter Anteil im Gestein) in Kakiritzonen erfolgt immer über sehr kurze Distanzen (< 1m) als räumliche Verdichtung des obengenannten Rissnetzwerks. Die Mächtigkeiten von Typ I Kakiritzonen in SB3 schwanken zwischen einigen Zentimetern bis zu fünfzig Metern. Schwache, nicht vollständig kakiritisierte Gesteine (Rissnetzwerk weitständiger) tendieren dazu, entlang der Hauptschieferung in cm dicke Scheiben zu zerfallen ('Scheiblettentoast'). Dieses Phänomen führte während der Bohrarbeiten zum sogenannten 'core dinking' und wurde sehr häufig in SB4.1 beobachtet.

Typ II Kakirite sind durch die völlige Zerstörung des älteren Planargefüges charakterisiert. Durch grössere Versetzungsbeträge entlang von Brüchen (cm - Bereich) wurden Gesteins- und Mineralfragmente aus dem strukturellen Verband gerissen, gerollt, abradiert und weiter zerbrochen. Dieses Zermahlen des Gesteins führte zu einer Korngrößenreduktion. Das Endprodukt ist eine Verwerfungsbrekzie, bestehend aus einer feinkörnigen tonigen Matrix, (Verwerfungsletten), in welcher Gesteins- und Mineralfragmente 'schwimmen'. Typ II Kakirite sind relativ selten und können auch diskordant vorkommen. In SB3 - Tujetsch kommen sie nur als schmale Zonen mit einer maximalen Mächtigkeit von 1.20 m vor. Im nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv nimmt ihre Häufigkeit und Mächtigkeit jedoch stark zu. Spektakuläre Beispiele wurden aus der Clavianev Zone gefördert (SB1 - Nord). Die Zunahme von Kakiritzonen (vor allem vom Typ II) nach Norden deckt sich mit der Beobachtung von Eckardt et al. (1983) wonach die Häufigkeit von (zum Teil rezent aktiven) Verwerfungen am Aarmassiv Südrand viel grösser ist wie am Gotthardmassiv Nordrand.

3.3 Eigenschaften von Kakiriten

Nebst ihrer Kohäsionslosigkeit besitzen die Tavetscher Kakirite weitere bemerkenswerte Eigenschaften:

Mechanische Eigenschaften: Felsmechanische Versuche (Triaxial Tests) bestätigten das bereits während der Bohrarbeiten erkannte plastische Verhalten der Gesteine bei mechanischer Belastung. Jeder Unterbruch der Bohrarbeiten (Evakuierung des Innenkernrohrs) wurde von der Angst begleitet, dass sich der Bohrlochquerschnitt verformen und das Gestänge verklemmen könnte. In den erwähnten felsmechanischen Versuchen konnten bei entsprechender Versuchsanordnung bergfeuchte Bohrkerne bis zu 30 % ihrer Ausgangslänge verkürzt werden, ohne dass ein Bruch eingetreten wäre (Schneider 1994). Sind die Kerne erst einmal ausgetrocknet, reagieren sie bei der geringsten mechanischen Belastung spröde und zerfallen zu mittel - bis feinkörnigem Sand.

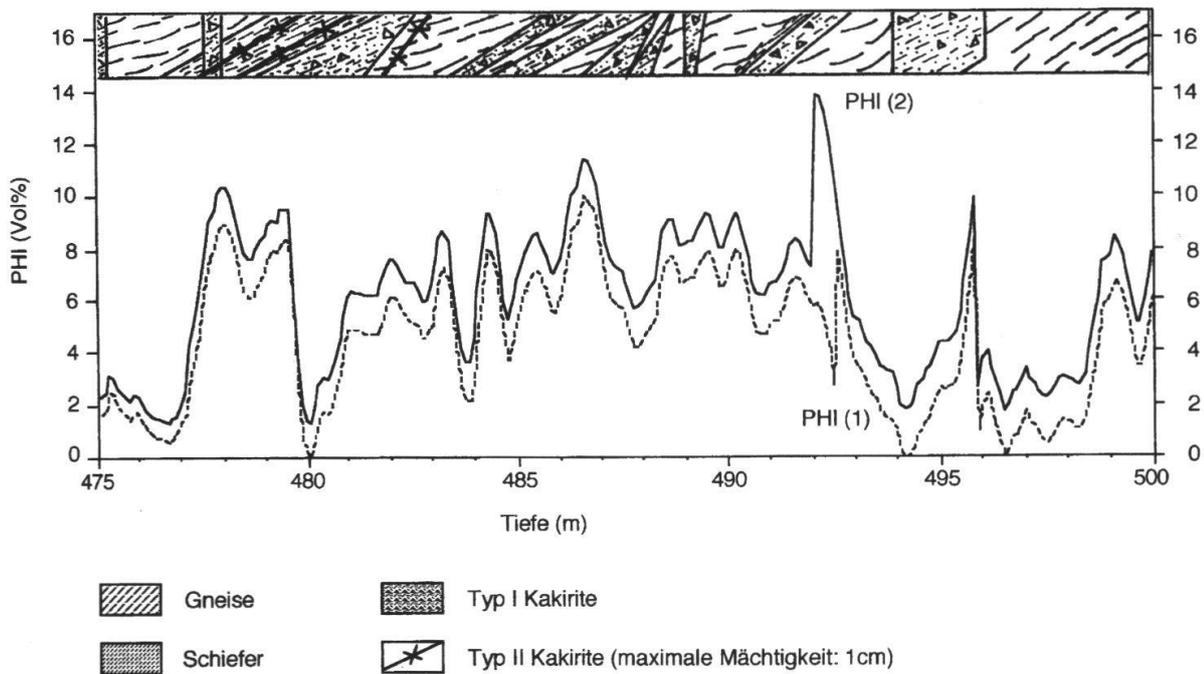


Fig. 6: Korrelation der totalen Gesteinsporosität mit dem geologischen Profil aus SB3 - Tujetsch. Die Kurve PHI (1) wurde mit empirischen Schätzwerten der Korndichten und Gesteinsdichtemessungen aus Dichte - Logs konstruiert. Die Kurve PHI (2) beinhaltet Porositätswerte, welche aus pyknometrischen Korndichtemessungen sowie den Dichte - Log Daten berechnet wurden. Die punktuell gemessenen Korndichten wurden als Schätzwerte über das geologische Profil verteilt (Wyder & Rybach 1996).

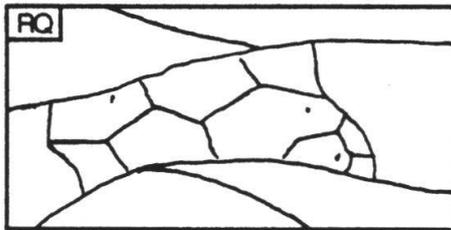
Hydrogeologische Eigenschaften: Die in SB3 - Tujetsch durchgeführten Packer Tests ergaben sehr geringe Transmissivitätswerte (T) zwischen 1 bis $7.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ und sehr geringe Durchlässigkeitsbeiwerte (k) zwischen $9.1 \cdot 10^{-10}$ und $5.4 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ (Schneider 1994). Gleichzeitig ist die totale Gesteinsporosität sehr hoch. Anhand von gerechneten Porositätsprofilen konnten Wyder & Rybach (1996) zeigen, dass sie im Mittel $7 \text{ Vol}\%$ mit Spitzenwerten bis zu $20 \text{ Vol}\%$ beträgt (Figur 6). Aus den Profilen geht weiter hervor, dass es mit zunehmender Tiefe keine systematische Porositätsabnahme gibt. Die Porosität als solche wurde im mesoskopischen Bereich als Bruchporosität, im mikroskopischen Bereich als interkristalline Mikroporosität (Serra 1984) erkannt. Der Raum zwischen gerissenen und rotierten Gesteinskompartimenten ist von schichtsilikatreichem Verwerfungsletten (fault gouge) verfüllt. Innerhalb dieser Füllung sind die plattigen Schichtsilikate häufig statistisch orientiert. Daneben existieren unvollständig verfüllte und nicht kommunizierende (räumlich abgeschlossene) Kluft Hohlräume. Diese Strukturen sind verantwortlich für die hohe totale Porosität bei gleichzeitig geringer Permeabilität.

3.4 Deformationsphasen und Quarz Mikrostrukturen

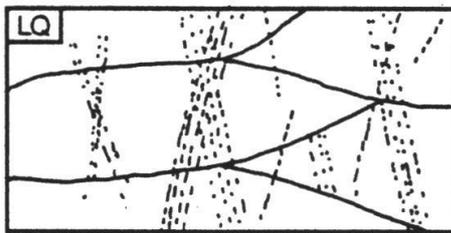
Mikrostrukturelle Untersuchungen an Quarz (Wyder & Mullis, im Druck) ermöglichten es, sechs (I bis VI) verschiedene Deformationsphasen in den Tavetscher Gesteinen zu unterscheiden und den Ablauf der Kakiritisation zu rekonstruieren. Figur 7 zeigt schematisch die Gefügeentwicklung der Tavetscher Kakirite.

Prä- und frühalpine Strukturen (Deformationsphase I):

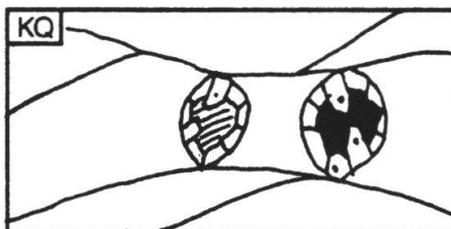
Phase I: Die penetrative Hauptschieferung wurde während mehreren prä - alpinen tektonometamorphen Ereignissen gebildet und überprägt. Die Mylonitisation unter grünschieferfaziellen Bedingungen kann frühalpinen Ereignissen zugeordnet werden. Im Sinne einer gegebenen Ausgangssituation für die später erfolgte Kakiritisierung werden diese Deformationsphasen als Phase I zusammengefasst und nicht weiter erörtert. Detaillierte Diskussionen über die prä - alpine Geschichte des



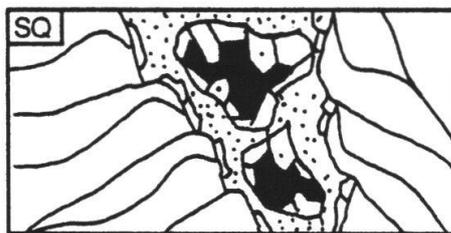
a) RQ, Phase II: Partielle statische und dynamische Rekristallisation von Quarz.



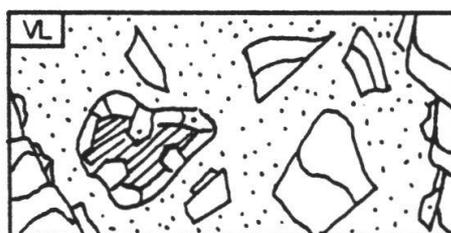
b) LQ, Phase III: Brechen und Verheilen von Quarz quer zur Hauptschieferung. Bildung von linear angeordneten Einschlussbahnen.



c) KQ, Phase IV: Öffnen von Extensionsklüften und Wachstum von Kluffquarz, -calcit und Chlorit. Ansteigende totale Porosität.



d) SQ, Phase V: Ausbruch von Gefügedomänen und Verbindung von Porenräumen. Fluiddruck sinkt ab von litho- zu hydrostatischen Bedingungen. Wachstum von Schwammquarz und Calcit. Das Gefüge kollabiert, die Kohäsion geht verloren.



e) VL, Phase VI: Bildung von Verwerfungsletten durch anhaltendes Brechen und Abrasion von Gefügedomänen. Ausfällung von Smectit und Opakmineralien. Permeabilitätsschwund.

Fig 7: Schematisch dargestellte Gefügeentwicklung der Tavetscher Kakirite.

Tavetscher Zwischenmassivs finden sich zum Beispiel in Abrecht (1994), Abrecht & Biino (1994), Ambühl (1930), Biino (1994), Biino & Meisel (1994), Huber (1943), Kvale (1966), Mercolli et al. (1994 a, b), Niggli (1944) und in von Raumer & Neubauer (1993).

Alpine Strukturen (Deformationsphasen II bis VI):

Phase II (entspricht RQ: rekristallisierter Quarz): Unter maximalen und beginnenden retrograden Bedingungen der alpinen grünschieferfaziellen Metamorphose wurden Muskovit und Biotit partiell bis vollständig durch Chlorit und Plagioklas durch Albit, Serizit und Calcit ersetzt. Das Wachstum dieser Mineralien wurde von einer Reaktivierung der Foliation durch Scherbewegungen begleitet. Diese Deformationsphase fand bezüglich des Gesamtgesteins im Grenzbereich duktil / spröd statt und muss als kataklastisch angesehen werden. Quarz reagierte noch immer plastisch und rekristallisierte partiell statisch und dynamisch (Kvale 1966), während andere Mineralien wie Feldspäte, Muskovit, Biotit, Chlorit, Apatit und Turmalin bereits spröd zerbrachen. Alte Porphyroblasten wurden zu Porphyroklasten. Risse in den spröd deformierten Mineralien wurden mit den bereits oben erwähnten neugewachsenen Phasen zementiert. Da die Rekristallisation von Quarz ältere und prograd bei tieferen Temperaturen entstandene prismatische Subkörner überprägt, wird angenommen, dass die Quarzrekristallisation approximativ den maximalen Druck - Temperatur-Bedingungen der alpinen Metamorphose entspricht. Ähnliche Strukturen findet man auch in Gesteinen des südlichen Aarmassivs. Durch den signifikanten Volumanteil an Quarz und die vollständige Zementierung spröd zerbrochener Mineralien haben diese Gesteine ihre Kohäsion während Phase II nie verloren.

Phase III (entspricht LQ: Lagenquarz): Deformationen während sinkender Temperaturen unter spröden Bedingungen bezüglich Quarz führten zu intensivem Brechen und Verheilen der Quarzlagen quer zur Foliation. Im Quarz sind diese Strukturen als lineare Einschlussbahnen erhalten und bilden ehemalige und unvollständig verheilte Risse ab. Zum Teil treten solche Quarzstrukturen auf kleinstem Raum sehr gehäuft auf. Diese Deformationsphase entspricht bezüglich Quarz einer Kataklaste, die partielle bis vollständige Verheilung von Rissen verhinderte auch hier noch den Kohäsionsverlust.

Phase IV (entspricht KQ: Kluftquarz): Bei noch tieferen Temperaturen und anhaltender Spröddeformation öffneten sich Extensionsklüfte. Dies ermöglichte das Wachstum einer idiomorphen Kluftquarzgeneration. Deformationsphase IV entspricht der in den Zentralalpen weitverbreiteten Phase von Kluftöffnungen (Mullis et al. 1994). Das Quarzwachstum wurde von Chlorit und Calcit ausfällungen begleitet. Da die Mineralisationen die Klüfte nur partiell verfüllten, ist Phase IV verantwortlich für eine erste Zunahme der totalen Gesteinsporosität (Wyder & Rybach 1996) und damit des Gesteinsvolumens. Diese Volumenzunahme (Dilatanz) wurde von einer kontinuierlichen Kohäsionsabnahme und damit von einer mechanischen Schwächung des Gesteins begleitet.

Phase V (entspricht SQ: Schwammquarz): Intensives und raumgreifendes Zerbrechen des bereits geschwächten Gesteins leitet die Kakiritisation ein. Risse und

Klüfte begannen sich zu verbinden. Eine dramatische Porositäts- und Permeabilitätszunahme war die Folge und in freien Räumen der Bruchbrekzie wuchs eine zweite idiomorphe bis hypidiomorphe Quarzgeneration heran. Das resultierende, hochporöse Quarzgefüge gleicht im Aussehen einem Tafelschwamm, daher der Name 'Schwammquarz'. Durch die Permeabilitätszunahme nahm der Fluiddruck im Gestein von lithostatischen in Richtung hydrostatische Bedingungen ab. Unter diesen Bedingungen wurde sogar Calcit spröde deformiert. Die Gesteinskohäsion ging partiell bis vollständig verloren. Spätes, unvollständiges Calcit- und Opakwachstum konnte den Gefügekollaps nicht mehr verhindern.

Phase VI (entspricht VL: Verwerfungsletten): Anhaltende Bewegungen im Gestein führten zu Abrasion und Zermahlung von Gesteins- und Mineralklasten. Das Resultat bildet der feinkörnige, tonige Verwerfungsletten, welcher nunmehr praktisch sämtliche Risse im Gestein verstopft und die vormals grosse Permeabilität auf vernachlässigbar kleine Werte schrumpfen liess. Die Kluft- und Bruchporosität wurde zum grössten Teil in eine interkristalline Mikroporosität umgewandelt. Dieser finale Prozess wurde von Smectitbildung innerhalb des Verwerfungsletten begleitet. Die Porosität pendelte sich bei ± 7 Vol% ein (Wyder & Rybach 1996).

4. Die Bildungsbedingungen der Tavetscher Kakirite

Die nachfolgende Beschreibung der Bildungsbedingungen von Tavetscher Kakiriten stellt eine Zusammenfassung der in Wyder & Mullis (im Druck) enthaltenen Ergebnisse dar, welche aus mikrothermometrischen Analysen an Fluid - Einschlüssen in Quarz hervorgingen (vgl. Abschnitt 3.4). Die gefundenen Einschlusspopulationen deuten auf das an Salz und Gas untersättigte $H_2O - CO_2 - NaCl$ -System mit sehr geringen Gehalten an NaCl Äquivalenten und gelösten Gasen, höchstwahrscheinlich CO_2 , hin. Durch die Ermittlung der approximativen Zusammensetzungen sowie der Gesamtdichten der Einschlüsse und die Anwendung der extrapolierten Zustandsgleichung für das System $H_2O - CO_2 - NaCl$ (Bowers & Helgeson 1983) wurden die Isochoren für alle vier Quarzgenerationen konstruiert. Da keine Entmischung der Gesteinsfluide in gas- und wasserreiche Phasen stattfand, konnten nur die Isochoren für die wasserreichen Fluidpopulationen konstruiert werden. Weil die Bildungstemperaturen und -drucke gewöhnlich von der Intersektion der wasser- und gasreichen Fluideinschlüssen abgeleitet werden, wurden in der vorliegenden Arbeit externe Kriterien beigezogen. Dabei wurde für jede Fluidpopulation (und Deformationsphase) ein geothermischer Gradient gewählt und mit der entsprechenden Isochore zur Intersektion gebracht.

Schneidet man die Isochoren bei einer Gesteinsdichte von 2.7 g/cm^3 mit geothermischen Gradienten von 25 und $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$, so können die approximativen Bildungsbedingungen der einzelnen Fluidpopulationen im P - T - Raum hergeleitet werden. Durch das Verbinden der Schnittpunkte aller Fluidpopulationen erhält man einen approximativen P - T - Pfad der Fluidentwicklung anlässlich der Quarzrekristallisation (RQ) über die kataklastische Quarzdeformation (LQ) bis hin zur Quarz Kristallisation (KQ und SQ, Figur 8).

Die Wahl geothermischer Gradienten von $30^\circ / \text{km}$ basiert auf Erfahrungswerten in den Zentralalpen eruiert durch Purdy & Jäger (1976) und Wagner et al. (1977). Demgegenüber erfordern die P - T - Bedingungen während der prograden alpinen

Metamorphose einen etwas tieferen Gradienten von $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Oxburgh & Turcotte 1976, siehe Abschnitt 5). Die Gesteinsdichte von $2.7\text{ g}/\text{cm}^3$ ergab sich aufgrund der Auswertung von vorhandenen Dichte Logs in SB3 - Tujetsch (Wyder & Rybach 1996). Der Einfluss der Gesteinsdichte äussert sich in der Steigung der Gradienten, wobei hohe Dichten eine grössere Steigung bewirken und damit zu höheren P - T - Werten führen. Zusätzlich nehmen geothermische Gradienten mit zunehmender Tiefe ab. Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten P - T - Werte müssen deshalb als Minimalwerte interpretiert werden.

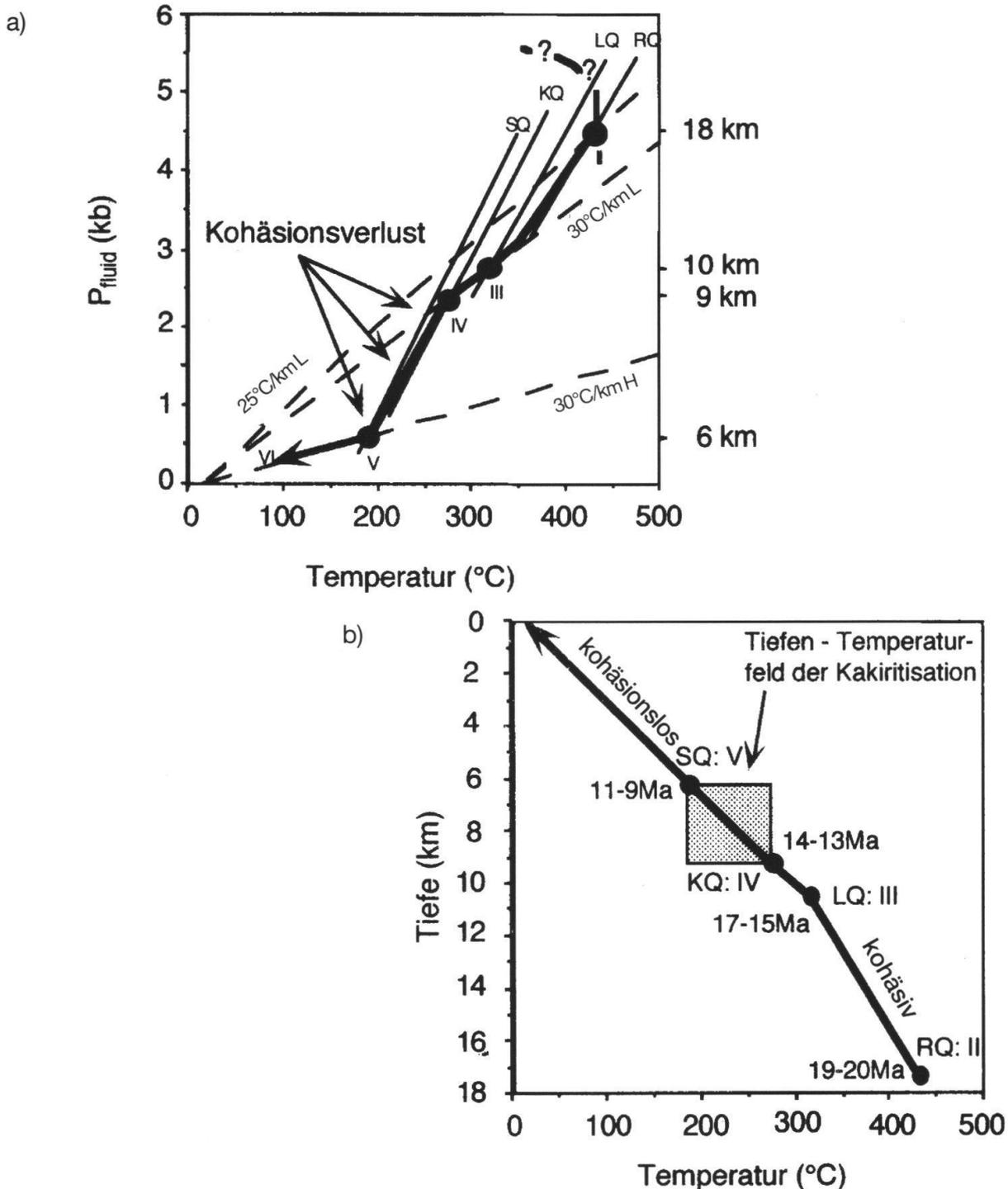


Fig 8: Kompilierter P-T Pfad der Kakiritisierung mit Tiefenkorrelation (a) und entsprechender Tiefen-Temperatur Pfad mit Alterskorrelation (b) aus Wyder und Mullis (1998, im Druck). L = lithostatisch, H = hydrostatisch; weitere Abkürzungen siehe Text.

4.1 Herkunft und Entwicklung der fluiden Phasen

Gemäss Mullis (1979 und 1983) befindet sich das Tavetscher Zwischenmassiv in der Wasser - Zone. Innerhalb dieser Zone bestehen die fluiden Phasen aus wässrigen Lösungen mit $< 1 \text{ mol\% CH}_4$ und $< 10 \text{ mol\% CO}_2$. Die Fluidzusammensetzungen, welche in Kakiriten gefunden wurden, entsprechen diesen Zusammensetzungen und zeigen einen retrograden Trend zu tieferen Salinitäten.

Strukturelle Befunde deuten darauf hin, dass die fluide Phase im rekristallisierten Quarz (RQ) während Deformationsphase II nahe am Temperaturmaximum eingeschlossen wurde. Die Dominanz des Wasseranteils erklärt sich durch gleichzeitig zur Rekristallisation ablaufende Dehydrationsreaktionen in tiefer gelegenen Metasedimenten während der prograden Phase der alpinen Metamorphose. Die Vermutung dass auch CO_2 und CH_4 vorhanden sein können, wird durch die häufige Anwesenheit von Calcit in der jüngeren Mineralparagenese gestützt. Beide volatilen Phasen deuten auf organische Herkunft und Redox Reaktionen in graphitischem Material metasedimentärer Herkunft hin. Anzeichen dafür finden sich auch in Graphithaltigen prä - herzynischen metasedimentären Gesteinen beim Rossbodenstock südlich des Oberalppasses (Mullis et al. 1994), in denen die Fluideinschlüsse neben einer wässrigen Lösung auch geringe Mengen an CO_2 und CH_4 enthalten.

In der Kluftquarz- (KQ) und Schwammquarzgeneration (SQ) der Deformationsphasen IV und V zeigt sich ein retrograder Trend zu tieferen Salinitäten, analog zu einem von Mullis et al. (1994) untersuchten Profil ca. 20 km westlich von Sedrun durch die Zentralalpen. Dies wird durch strukturelle Evidenzen (hohe Porosität und ehemals hohe Permeabilität) einer Verdünnung durch meteorische Wässer zugeschrieben.

Nach Schmid et al. (1996) erstreckt sich das Tavetscher Zwischenmassiv südfallend unter das Gotthardmassiv. Die mesozoische Bedeckung von Aarmassiv, Tavetscher Zwischenmassiv und die sedimentäre Garvera Zone wurden vom Gotthardmassiv nordwärts überschoben. Analog zur Kontinent - Kontinent Kollision zwischen Indien und Asien, welche das Himalaya Gebirge entstehen liess, bewirkte ein heisses Grundgebirge, welches kühlere Sedimente überschiebt, einen inversen Temperaturgradienten, was zur Dehydration der tektonisch tieferliegenden Sedimente (Le Fort 1986) führte. In ähnlicher Weise bewegten sich heisse Lösungen in das höher liegende Tavetscher Zwischenmassiv und wurden dort als Fluideinschlüsse gefangen. Mit anderen Worten: das Tavetscher Zwischenmassiv wurde während der prograden Phase der alpinen Metamorphose rehydriert. Während der retrograden Phase infiltrierten sehr wahrscheinlich meteorische Wässer ins Tavetscher Zwischenmassiv und bewirkten eine Verdünnung des dort vorhandenen Fluids. Aus diesem retrograden Fluid kristallisierten während der Exhumation und Abkühlung schliesslich Mineralien in Klüften und später in Hohlräumen von Kakiriten.

4.2 P - T - Tiefen-Entwicklung

Aus Figur 8 wird ersichtlich, dass die Quarzrekristallisation (Deformationsphase II) bei approximativ $435 \text{ }^\circ\text{C}$ und 4.5 kb in einer Tiefe von 18 km und einem lithostatischen geothermischen Gradienten von $25 \text{ }^\circ\text{C/km}$ abgelaufen ist. Sinkende Temperatur - Druck Verhältnisse und ein Ansteigen des lithostatischen geothermischen

Gradienten auf 30 °C/km bewirkten einen Wechsel des Deformationsmechanismus von mylonitisch zu kataklastisch. Bei ca. 310 °C und 2.7 kb begann in einer Tiefe von 10 km der Quarz erstmals zu brechen (Deformationsphase III). Das Öffnen von Klüftchen und das Wachstum von Kluftquarz (KQ) während Deformationsphase IV dokumentieren die nunmehr vollständig spröde Natur des Deformationsmechanismus bei 275 °C und 2.3 kb in einer Tiefe von 9 km. Weiteres Brechen bewirkte einen Abfall des Fluiddruckes, sowie die Ausbildung und Verbindung von Hohlräumen, weiteren Klüften und Rissen und führte durch die zunehmende Wasserzirkulation zu einer kontinuierlichen Verflachung des geothermischen Gradienten. Bei ca. 190 °C und 0.6 kb erreichte letzterer in 6 km Tiefe hydrostatische Bedingungen. Die zirkulierende Lösung wurde an Quarz und Calcit übersättigt und das Schwammquarzwachstum setzte ein (Deformationsphase V).

5. Tektonisches Modell, Alterskorrelation und Exhumation

Aufgrund der in Wyder & Mullis (im Druck) enthaltenen Ergebnisse kann die Entstehung der Kakirite im Rahmen der Exhumationsgeschichte des Tavetscher Zwischenmassivs in einem tektonischen Modell wie folgt zusammengefasst werden.

5.1 Tektonisches Modell

Deformationsphase II; Rekristallisierter Quarz RQ: Quarz rekristallisierte partiell im Bereich des P - T - Maximums der alpinen Metamorphose. Gleichzeitig wurde metamorphes Fluid durch Dehydrationsreaktionen in grösseren Tiefen freigesetzt. Es fand eine grünschieferfazielle Überprägung statt. Nach Schmid et al. (1996) war die Überschiebung des Gotthardmassivs auf das Tavetscher Zwischenmassiv und das Aarmassiv sowie deren Sedimente vor 19 Ma noch immer im Gang und wurde von einer beginnenden Steilstellung der Überschiebungsfläche begleitet. Die Rekonstruktion der Tiefenpositionen von Aar- und Gotthardmassiv zu dieser Zeit (Schmid et al. 1996) stimmen einerseits sehr gut mit den P - T - t Werten des Wachstums alpiner Kluftmineralien beider Massive überein (Mullis et al. 1994), andererseits decken sie sich mit den entsprechenden P - T - Werten aus dem Tavetscher Zwischenmassiv (Wyder & Mullis, im Druck). Folglich gehört das Quarzrekristallisationsereignis während Deformationsphase II zur finalen Phase der Überschiebung des Gotthardmassivs auf das Tavetscher Zwischenmassiv und das Aarmassiv. Die Krustenverdickung, welche durch die Überschiebung erfolgte, erforderte demgemäss einen reduzierten geothermischen Gradienten (Oxburgh & Turcotte 1976).

Deformationsphase III; Lagenquarz LQ: Die fortschreitende Steilstellung der Überschiebungsfläche führte zu veränderten Spannungsverhältnissen im Tavetscher Zwischenmassiv. Die Hauptschieferung wurde in eine nahezu senkrechte Position zur Hauptspannung rotiert. Erstes Brechen und Verheilen von Quarz quer zur Hauptschieferung war die Folge. Ab da liefen alle weiteren Deformationsereignisse spröde ab. Das gleichzeitige kontinuierliche Absinken von Temperatur und Druck führte zu einer Übersättigung der zirkulierenden Fluide an Quarz und bewirkte das Verheilen von gebrochenem Quarz sowie die Einschlussbildung.

Während dieser Deformationsphase propagierte die Überschiebungsbewegung nach Norden ('Grindelwald Phase', SCHMID et al. 1996; Figur 9). Die beginnende Subduktion der Adriatischen Platte unter den europäischen Kontinent führte alsbald zur schnellen Exhumation des Gebirgskörpers (siehe Abschnitt 5.3).

Deformationsphase IV; Kluftquarz KQ: Die durch die Exhumation verursachte Senkung von Temperatur und Druck war noch im Gang, das Stressfeld noch immer in der gleichen Konfiguration. Dadurch öffneten sich Extensionsklüfte, die Porosität stieg an und das Wachstum von Kluftquarz und -calcit setzte ein.

Deformationsphase V; Schwammquarz SQ: Durch den anhaltend nordwärts gerichteten Schub der adriatischen Platte unter den europäischen Kontinent ergaben sich unterschiedliche Exhumationsraten zwischen Aarmassiv und Gotthardmassiv (wobei letzteres möglicherweise schneller exhumierte, siehe Abschnitt 5.3). Die bereits spröde geschwächten Tavetscher Gesteine wurden weiter zerbrochen und zermahlen. Ansteigende Porositäts- und Permeabilitätswerte führten zu einem Abfall des Fluidrucks von lithostatischen zu hydrostatischen Bedingungen und die Gesteine verloren nach und nach ihre Kohäsion. Wahrscheinliche meteorische Verdünnung der zirkulierenden Fluide reduzierte deren Salinität. Mit zunehmend hydrostatischen Bedingungen erfolgte eine Übersättigung bezüglich der gelösten Mineralien: Schwammquarz, Calcit und Opakmineralien wurden ausgefällt. Die Mineralisation konnte mit der Deformation jedoch nicht schritthalten und blieb unvollständig. Damit ist diese Deformationsphase verantwortlich für den totalen Kohäsionsverlust und die Kakiritisation der Tavetscher Gesteine.

Deformationsphase VI; Smectitbildung SM: Weiter voranschreitende differentielle Bewegungen zwischen Aar- und Gotthardmassiv führten im finalen Kakiritstadium zur Bildung von Verwerfungsletten ('fault gouge'), welcher heute die meisten Gesteinsrisse und -höhlräume verstopft und die ehemals grosse Permeabilität auf vernachlässigbar kleine Werte schrumpfen liess. Dieser Vorgang wurde von der Ausfällung von Smectit aus hydrothermalen Lösungen begleitet. Inzwischen erreichten die Kakirite ihre heutige Position im Tavetscher Zwischenmassiv.

5.2 Alterskorrelation

Das tektonische Modell zeigt, dass die Kakiritisation der Tavetscher Gesteine bei retrograden und spröden Bedingungen stattfand und von der Ausfällung von Quarz, Calcit, Opakmineralien und Smectit begleitet wurde. Durch den Vergleich mit der Temperatur / Alterskorrelation für die Kluftquarzbildung im Aar- und Gotthardmassiv (Mullis 1996) kann für die jüngere Geschichte des Tavetscher Zwischenmassivs folgender Alterstrend abgeleitet werden: Die Quarzrekristallisation fand vor ca 20 Ma in 18 km Tiefe statt. Spröde Bedingungen bezüglich Quarz wurden zwischen 17 und 15 Ma vor unserer Zeit in 10 km Tiefe erreicht. Deformationsphase IV, als vorbereitendes Ereignis für die Kakiritisation, fand zwischen 14 und 13 Ma in 9 km Tiefe statt. Deformationsphase V, die eigentliche Ursache des Kohäsionsverlustes, war vor 11 - 9 Ma in einer Tiefe von ca. 6 km aktiv. Dies macht deutlich, dass die Entstehung der Kakirite im Tavetscher Zwischenmassiv ein spätalpin retrogrades tektonisches Ereignis war.

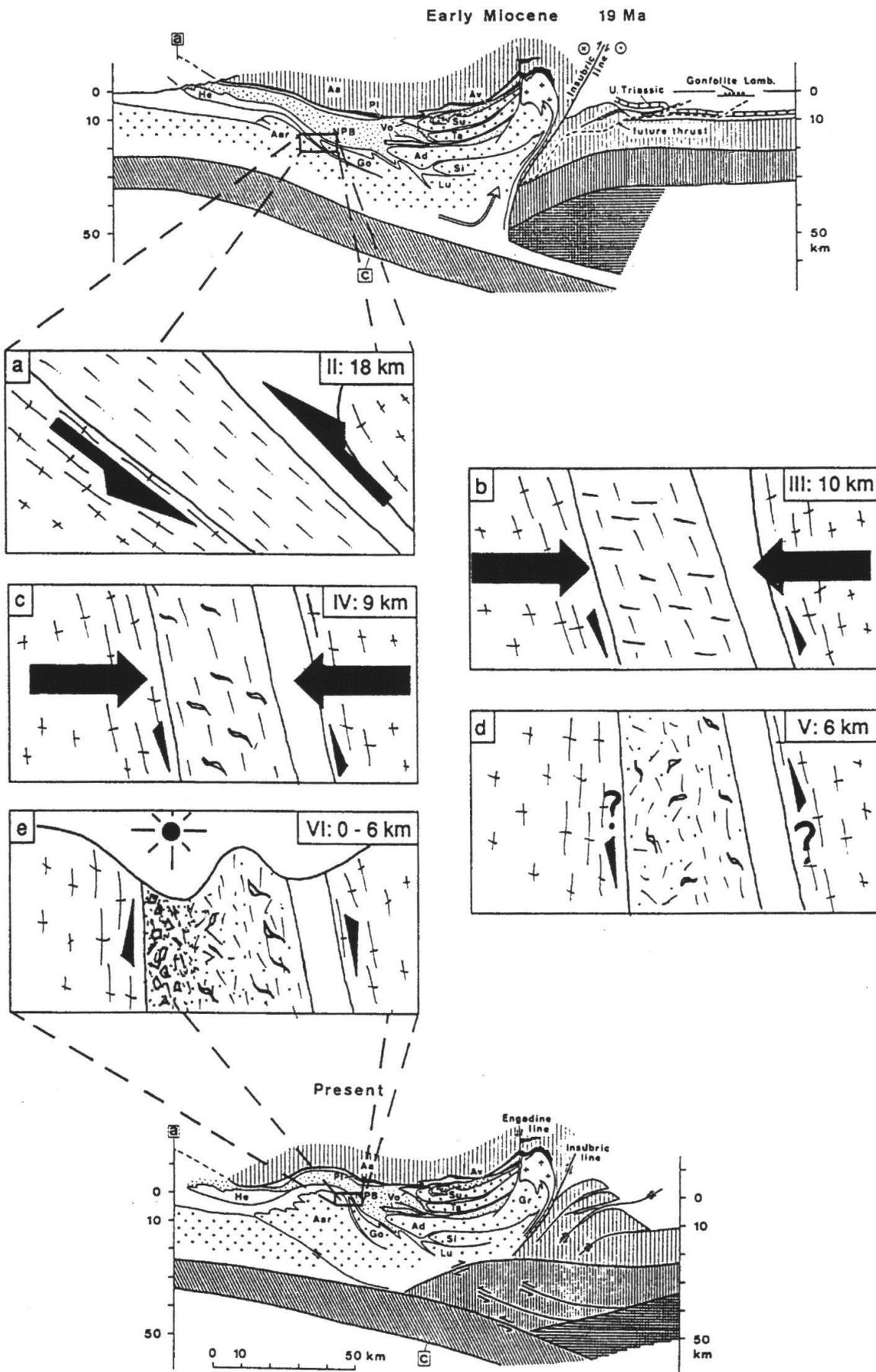


Fig 9: Tektonisches Modell für die Entstehung der Tavetscher Kakirite. Erklärungen siehe Text.

5.3 Exhumation

Zeitlicher Ablauf und Tiefenlagen der einzelnen Deformationsereignisse erlauben eine approximative Herleitung der Exhumationsgeschichte des Tavetscher Zwischenmassivs: Zwischen Deformationsphasen II und III, vor 20 - 15 Ma betrug die Exhumationsrate 1.6 bis 2.7 mm pro Jahr, ein sehr hoher Wert, der in Zusammenhang mit der Steilstellung der Überschiebungsfläche gebracht werden kann. Vor 15 - 14 Ma, zwischen Deformationsphasen III und IV war die Exhumation mit Werten zwischen 0.25 und 1 mm pro Jahr eher gering. Die nahezu orthogonale Kompression des Tavetscher Zwischenmassivs war nur von minimalen vertikalen Bewegungen begleitet. Die Deformation wirkte im Bereich von 'pure shear' Bedingungen. Dies führte bei fehlender Permeabilität zu Fluidüberdruck und 'hydraulic fracturing'. Seit dem Beginn von Deformationsphase IV, d. h., seit 14 Ma blieb die Exhumation mit Werten zwischen 0.6 bis 1.5 mm pro Jahr konstant. Diese Werte decken sich mit bereits früher publizierten, aus Spaltspuren gewonnenen Daten (Michalski & Soom 1990, Schaer et al. 1975).

Man weiss heute, dass die Exhumationsraten zwischen Aar- und Gotthardmassiv leicht verschieden sind, wobei letzteres langsamer exhumiert (Gubler et al. 1981, Kobold 1977 und Rybach et al. 1980). Betrachtet man die Zunahme der Kakirithäufigkeit im Tavetscher Zwischenmassiv nach Norden und setzt man voraus, dass der Hauptanteil von Verwerfungsletten während Deformationsphase VI entstand, dann müsste der heutige Schersinn zwischen den Massiven seit 9 - 11 Ma aktiv sein. Im tektonischen Modell (Figur 9) wird angenommen, dass sich der Schersinn zwischen Deformationsphasen V und VI geändert hat. Da die Orientierung noch immer kontrovers diskutiert wird, wurde der Schersinn in Figur 9 mit Fragezeichen markiert. Trotzdem kann folgende Überlegung angestellt werden: Durch die Bewegung der adriatischen Platte nach Norden könnte man erwarten, dass die Exhumation des Gotthardmassivs rascher vonstatten ging, solange sich die Platte noch unter den penninischen Decken befand. Als Folge der anhaltenden, nordwärtsgerichteten Bewegung dürfte die Hebungsrate des Aarmassivs diejenige des Gotthardmassivs in der Zwischenzeit jedoch übertroffen haben. Sollte der sinistrale Schersinn während der Deformationsphase V stimmen, dann können die Unterschiede in den Exhumationsraten nicht älter als 9 - 11 Ma sein. War der Schersinn aber dextral, so wie heute, dann wären die Unterschiede bereits 11 - 14 Ma alt. Leider kann beim heutigen Kenntnisstand noch keiner der beiden Möglichkeiten eindeutig der Vorzug gegeben werden.

6. Schlussfolgerungen

1) Die Sondierbohrungen im nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv bei Sedrun erbrachten den eindeutigen Beweis für die seit langem vermutete Präsenz und Häufigkeit von Kakiritzonen. In SB3 - Tujetsch beträgt der Anteil von kohäsionslosen Gesteinen 31.94 % oder 239.49 m. Aus SB1 - Nord und SB2 - Süd existieren keine entsprechenden Statistiken. Die Häufigkeit von Kakiritzonen, insbesondere vom Typ II, nimmt nach Norden zu.

2) Bei den Tavetscher Kakiriten handelt es sich um kohäsionsloses Material, welches im bergfeuchten Zustand auf mechanische Belastungen plastisch, im trockenen Zustand spröde reagiert.

3) Die Tavetscher Kakirite sind bei vernachlässigbarer Permeabilität hochporös. Für die totale Gesteinsporosität wurden Mittelwerte um 7 Vol% mit Spitzenwerten bis zu 20 Vol% ermittelt.

4) Das Tavetscher Zwischenmassiv wurde von fünf alpinen Deformationsphasen überprägt (Deformationsphasen II bis VI). Bezüglich Quarz spielte sich Deformationsphase II unter kristallplastischen Bedingungen ab und widerspiegelt die maximalen Temperatur - Druck Bedingungen der alpinen Metamorphose. Bezüglich des Gesamtgesteins verlief die Deformation jedoch kataklastisch. Der Prozess wurde von einer grünschieferfaziellen Mineralisation überprägt. Deformationsphase III kann bezüglich Quarz ebenfalls als kataklastisch interpretiert werden. Deformationsphasen IV bis VI ereigneten sich vollständig unter spröden Bedingungen. Die begleitende Mineralisation von Quarz (IV und V), Chlorit (IV), Calcit (IV, V und VI) und Smectit (VI) blieb unvollständig und konnte den fortschreitenden Kohäsionsverlust im Gegensatz zu den Deformationsphasen II und III nicht mehr verhindern.

5) Deformationsphase II kann mit der finalen Phase der Überschiebung des Gotthardmassivs auf das Tavetscher Zwischenmassiv und das Aarmassiv in Einklang gebracht werden. Das Brechen und Verheilen von Quarz (III) sowie die Öffnung von Extensionsklüften (IV) sind Ausdruck des nordwärts gerichteten Schubs der adriatischen Platte unter den europäischen Kontinent. Deformationsphasen V und VI dokumentieren die Kakiritisation der Gesteine (V) und die Bildung von Verwerfungsletten (VI) durch Exhumationsunterschiede zwischen Aar- und Gotthardmassiv. Deformationsphase VI ist durch die Bildung von Verwerfungsletten und die Ausfällung von Smectit verantwortlich für die Reduktion der Permeabilität auf vernachlässigbar kleine Werte.

6) Das zirkulierende und mineralisierende Fluid im Tavetscher Zwischenmassiv war metamorphen Ursprungs, solange sich die Gesteine in grösseren Tiefen befanden. Die Herkunft dieser Fluide wird in tiefliegenden, vom Gotthardmassiv und Tavetscher Zwischenmassiv überschobenen und zerscherten mesozoischen Sedimenten vermutet. In späteren Stadien führte die fortschreitende Spröddeformation zu hydraulischen Verbindungen bis zur Erdoberfläche und bewirkte ein Absinken des Fluiddrucks von lithostatischen zu hydrostatischen Bedingungen. Dabei sickerte wahrscheinlich meteorisches Wasser ein und verdünnte das ursprüngliche metamorphe Fluid.

7) Das tektonische Modell lässt für die jüngere Geschichte des Tavetscher Zwischenmassiv folgende Eckdaten zu:

Vor ca. 20 Ma, in einer Tiefe von 18 km rekristallisierte Quarz bei Temperatur - Druck Bedingungen von 435 °C und 4.6 kb partiell (Deformationsphase II). Erstes Brechen und Verheilen quer zur Hauptschieferung ereignete sich vor ca. 17 bis 15 Ma in einer Tiefe von 10 km unter Temperatur - Druck Bedingungen von 310 °C und 2.6 kb (Deformationsphase III). Die Bildung von Extensionsklüften als vorbereitendes Ereignis der Kakiritisation fand vor 14 - 13 Ma in einer Tiefe von 9 km unter Temperatur - Druckbedingungen von 275 °C und 2.4 kb statt (Deformationsphase IV). Der totale Kohäsionsverlust als Folge von Deformationsphase V ist 9 - 11 Ma alt und fand in Tiefen zwischen 9 - 6 km unter Temperatur - Druck Bedingungen von 190 °C und 0.6 kb statt. Als finales Ereignis datiert die Entstehung des Verwerfungsletten (Deformationsphase VI) 9 - 0 Ma vor unserer Zeit und ist verantwortlich für den Permeabilitätsschwund.

8) Die Häufigkeitszunahme von Kakiritzonen nach Norden deckt sich mit der analogen Häufung von (z. T. rezent aktiven) Verwerfungszonen und den unterschiedlichen Exhumationsraten zwischen Aar- und Gotthardmassiv.

Verdankungen

Caro Ivan, ti ringrazio molto per la traduzione del riassunto (RW).

Literaturverzeichnis

- ABRECHT, J. 1994: Geologic units of the Aar massif and their pre-Alpine rock associations: a critical review. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 5-28.
- ABRECHT, J., & BIINO, G. G. 1994: The metagabbros of the Kastelhorn area (Gotthard massif, Switzerland): their metamorphic history inferred from mineralogy and texture. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 53-68.
- AMBÜHL, E. 1930: Petrographie und Geologie des zentralen Gotthardmassivs südlich Andermatt. Diss ETH Zürich.
- BELL, T. H. & ETHERIDGE, M. A. 1973: Microstructure of mylonites and their descriptive terminology. *Lithos* 6, p. 337-348.
- BIINO, G. G. 1994: The pre Late Ordovician metamorphic evolution of the Gotthard - Tavetsch massifs (Central Alps): from lawsonit to kyanit eclogites to granulite retrogression. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 87-104.
- BIINO, G. G. & MEISEL, TH. 1994: Major, trace, noble and rare element distribution in polymetamorphic ultramafic rocks (Aar massif, Central Alps, Switzerland). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 69-86.
- BOWERS, T. S. & HELGESON, H. C. 1983: Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of non ideal mixing in the System $H_2O - CO_2 - NaCl$ on phase relations in geologic systems. Equation of state for $H_2O - CO_2 - NaCl$ fluids at high pressures and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 47, p. 1247-1275.
- CHESTER, F. M., FRIEDMAN, M. & LOGAN, J. M. 1985: Foliated cataclasites. *Tectonophysics* 111, p. 139-146.
- ECKARDT, P., FUNK, H. & LABHART, T. 1983: Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein - Rhone Linie. Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule und der Universität Zürich, Neue Folge 239. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Separata Nr. 45.
- GUBLER, E., KAHLE, H. - G., KLINGELE, E., MÜLLER S. & OLIVIER R. 1981: Recent crustal movements in Switzerland and their geophysical interpretation. *Tectonophysics* 71, p. 25-152.
- HEITZMANN, P. 1985: Kakirite, Kataklasite, Mylonite - Zur Nomenklatur der Metamorphite mit Verformungsgefügen. *Eclogae geol. Helv.* 78, p. 273-286.
- HUBER, H. M. 1943: Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthardmassiv. Diss ETH Zürich.

- KOBOLD, F. 1977: Die Hebung der Alpen aus dem Vergleich des 'Nivellement de Précision' der Schweizerischen Geodätischen Kommission mit den Landesnivellementen der Eidgenössischen Landestopographie. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 75, p. 129-137.
- KVALE, A. 1966: Gefügestudien im Gotthardmassiv und den angrenzenden Gebieten. Sonderveröffentlichung der Schweizerischen Geotechnischen und der Schweizerischen Geologischen Kommission. Kümmerly und Frey, Bern, 86p.
- LAPWORTH, CH. 1885: The Highland controversy in British geology: its causes, course, and consequences. *Nature* 35, May - October 1885, p. 558-559
- LE FORT, P. 1986: Metamorphism and magmatism during the Himalayan collision. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 19, p. 159-172.
- MERCOLLI, I., ABRECHT, J. & BIINO, G. G. 1994a: The pre Alpine crustal evolution of the Aar -, Gotthard - and Tavetsch massifs. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 3-4.
- MERCOLLI, I., BIINO, G. G. & ABRECHT, J. 1994b: The lithostratigraphy of the pre - Mesozoic basement of the Gotthard massif: a review. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74, p. 29-40.
- MICHALSKI, I., & SOOM, M. 1990: The Alpine thermo - tectonic evolution of the Aar and Gotthard massifs, Central Switzerland: Fission track ages on zircon and apatite and K - Ar mica ages. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 70, p. 373-387.
- MULLIS, J. 1979: The system methane - water as a geologic thermometer and barometer from the external part of the Central Alps. *Bull. Minéral.* 102, p. 526-536.
- MULLIS, J. 1983: Einschlüsse in Quarzkristallen der Schweizer Alpen und ihre mineralogisch-geologische Bedeutung. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 72, p. 5-19.
- MULLIS, J., DUBESSY, J., POTY, B. & O'NEIL, J. 1994: Fluid regimes during late stages of a continental collision: Physical, chemical, and stable isotope measurements of fluid inclusions in fissure quartz from a geotraverse through the Central Alps, Switzerland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, p. 2239-2267.
- NIGGLI, E. 1944: Das westliche Tavetscher Zwischenmassiv und der angrenzende Nordrand des Gotthardmassivs. *Petrographisch - geologische Untersuchungen*. Diss. Universität Zürich.
- OXBURGH, E. R. & TURCOTTE, D. L. 1976: The physico - chemical behaviour of the descending lithosphere. *Tectonophysics* 32, p. 107-128.
- PURDY, J. W. & JÄGER, E. 1976: K - Ar ages on rock forming minerals from the Central Alps. *Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova* 30, 32p.
- RAUMER von J. F. & NEUBAUER, F. 1993: Pre - Mesozoic geology in the Alps. In: *History of geological investigations in the Pre - Triassic basement of the Alps*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, p. 55-63.
- RYBACH, L., MÜLLER, S., MILNES, A. G., ANSORGE, J., BERNOULLI, D. & FREY, M. 1980: The Swiss Geotraverse Basel - Chiasso: A review. *Eclogae geol. Helv.* 73, p. 437-462.
- SCHAER, J. P., REIMER, G. M. & WAGNER, G. A. 1975: Actual and ancient uplift rate in the Gotthard region, Swiss Alps: A comparison between precise levelling and fission - track apatite age. *Tectonophysics* 29, p. 293-300
- SCHMID, S. M. & HANDY, M. 1991: Towards a genetic classification of fault rocks: Geological usage and tectonophysical implications. In: *Controversies in modern Geology*, Academic Press, 1991 (O. W. Müller et al., eds.), p. 339-361.
- SCHMID, S. M., PFIFFNER, O. A., FROITZHEIM, N., SCHÖNBORN, G. & KISSLING, E. 1996: Geophysical - geological transect and tectonic evolution of the Swiss - Italian Alps. *Tectonics* 15, p. 1036-1064.

- SCHNEIDER, T. R. 1992: Auswertung der Sondierungen Tujetsch 1991, Schlussbericht. Alp Transit, Achse Gotthard, Bericht Nr. 425 ah.
- SCHNEIDER, T. R. 1994: Auswertung der Sondierung Tujetsch 1993, SB3. Alp Transit, Achse Gotthard, Bericht Nr. 425bj.
- SERRA, O. 1984: Fundamentals of well - log interpretation. Vol. 1: The acquisition of logging data. Elsevier Science Publishers. Developments in Petroleum Science 15A, Amsterdam, 423 p.
- WAGNER, G. A., REIMER, G. M. & JÄGER, E. 1977: Cooling ages derived by apatite fission - track, mica Rb - Sr and K - Ar dating: The uplift and cooling history of the Central Alps. Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova 30, 27p.
- WYDER, R. F. & MULLIS, J. in press: Fluid impregnation and development of fault breccias in Tavetsch basement rocks (Sedrun / GR, Central Swiss Alps). Tectonophysics.
- WYDER, R. F. & RYBACH, L. 1996: Determination of total rock porosities from litho - density log data (example from the NEAT borehole SB3 - Tujetsch). Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 76, p. 275-294.
- WYSS, R. 1986: Die Urseren - Zone - Lithostratigraphie und Tektonik. Eclogae geol. Helv., 79, p. 731-767.