

Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 80 (1987)
Heft: 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"

Artikel: Diagenese permischer Schuttfächer-Sandsteine der Nordschweiz
Autor: Blüm, Werner
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-166001>

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: 27.04.2026

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

Diagenese permischer Schuttfächer-Sandsteine der Nordschweiz

Von WERNER BLÜM¹⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Die Feinsandsteine der permischen Schuttfächer-Ablagerungen der drei Nagra-Bohrungen Weiach, Riniken und Kaisten, sowie der bereits 1939 abgeteuften Bohrung Wintersingen sind mässig sortierte, korngestützte Feldspat-Grauwacken mit einem Tonmatrix-Gehalt von 2 bis 20%.

Petrographische Untersuchungen haben ergeben, dass die tonige Matrix postsedimentär infiltriert wurde. Diese mechanische Infiltration von Feinmaterial und die Rotfärbung der Sedimente durch Eisenoxide widerspiegeln frühe diagenetische Prozesse. Eine erste Generation von faserigem Illit und die Bildung von knolligen Calcit-Konkretionen kann ebenfalls dieser eogenetischen Phase zugeordnet werden.

Ein weitgehendes Fehlen eogenetischer, gerüststabilisierender Zemente führte zu Beginn der Mesogenese zu einer starken Kompaktion. Im weiteren Verlauf der Versenkung entstand durch partielle Lösung des frühen Calcits sekundäre Porosität. Gleichzeitig wurde eine erste Generation von syntaxialem Quarzzement, gefolgt von faserigem Illit, ausgeschieden. Die Lösung von detritischem Kalifeldspat, die nach der Kompaktion anzusetzen ist, wurde in allen vier Bohrungen nachgewiesen. Im Anschluss daran sind regional unterschiedliche Diagenese-Entwicklungen zu beobachten. In Weiach und Wintersingen bilden sich nacheinander Kaolinit, Illit, prismatischer Quarz und Ankerit/Siderit, in Riniken entstehen Kalifeldspat-Anwachsrränder, Illit, prismatischer Quarz und Dolomit, wogegen in Kaisten Kalifeldspat- und mikrokristalliner Quarzzement ausgeschieden werden. Diese Unterschiede reflektieren voneinander abweichenden Chemismus, pH und Ionenstärken der Porenwässer.

Als letztes wurden die mehrheitlich senkrecht zur Schichtung verlaufenden Klüfte mit zunächst Dolomit/Ankerit, dann eisenreichem und schliesslich eisenarmem Calcit verschlossen.

ABSTRACT

Fine-grained sandstones of Permian alluvial fan deposits from three Nagra boreholes (Weiach, Riniken, Kaisten) and an exploration well, drilled at Wintersingen are clast supported, moderately sorted arkosic greywackes containing typically 2–20% clayey matrix.

Petrographic studies indicate that the origin of this clayey matrix is postdepositional. Mechanical infiltration of fines and diagenetic reddening of detrital and authigenic iron oxides are the earliest recorded events. Additionally, nodular calcites of calcrete origin and fibrous illitic clays are also ascribed to the eogenetic environment.

The present strong compaction fabric results from general lack of eogenetic framework supporting cements. During mesogenesis, secondary porosity was generated through partial removal of early calcite. At the same time, a first generation of syntaxial quartz cementation and a subsequent fibrous illite authigenesis took place.

Leaching of detrital K-feldspars post-dating compaction is recorded throughout the studied boreholes. The following burial diagenetic events differ between the various boreholes: in Weiach and Wintersingen kaolinite, illite, prismatic quartz and ankerite/siderite are recorded; in Riniken K-feldspar, illite, prismatic quartz and dolomite developed; whilst in Kaisten K-feldspar and microcrystalline quartz-cement dominate. These differences reflect the chemistry, pH and ionic strength of the pore fluids.

Filling of veins by dolomite/ankerite, iron-rich and subsequent iron-poor calcite is the latest recorded event.

¹⁾ Geologisches Institut der Universität Bern, Baltzerstrasse 1, CH-3012 Bern.

Einleitung

Während in den letzten Jahren Diagenese-Studien an Rotliegend-Ablagerungen des nordeuropäischen Festlandes und der Nordsee für die Erdöl- und Erdgasexploration von grossem wirtschaftlichem Interesse waren (z. B. GLENNIE et al. 1978), fehlen vergleichbare Untersuchungen an permischen Sedimenten der Nordschweiz. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher eine Rekonstruktion der Diagenese-Abfolge permischer Schuttfächer-Sandsteine im Nordschweizer Permokarbon-Trog. Solche Studien bilden für das Verständnis der Transportwege fluider Phasen eine wichtige Grundlage.

Für diese Diagenese-Untersuchungen stand sehr gutes Kernmaterial, das in den Nagra-Bohrungen Weiach, Riniken und Kaisten, sowie in der bereits 1939 abgeteufte Bohrung Wintersingen zutage gefördert wurde, zur Verfügung.

Im Nordschweizer Permokarbon-Trog findet im Unterrotliegenden ein Wechsel von dunkelgrauen, limnisch-fluviatilen Klastika, zu grauen bis rötlichbraunen Sandsteinen und Brekzien progradierender Schuttfächer (alluvial fans) statt (Fig. 1). In Anlehnung an die Lithostratigraphie des Perms in Deutschland (FALKE 1976) werden die grauen Ablagerungen des unteren Schuttfächers dem Unterrotliegenden zugeordnet, während das Oberrotliegende mit dem Einsetzen von rotbraunen Sandsteinen beginnt (MATTER 1987). Diese Schuttfächer dokumentieren die Abtragung des Grundgebirges an den Rändern des sich absenkenden Grabens. Im Oberrotliegenden folgt eine lange, tektonisch ruhige Periode, in der das Relief des Grabens weitgehend aufgefüllt wird und ausgedehnte Schwemmlandebenen (playas) entstehen.

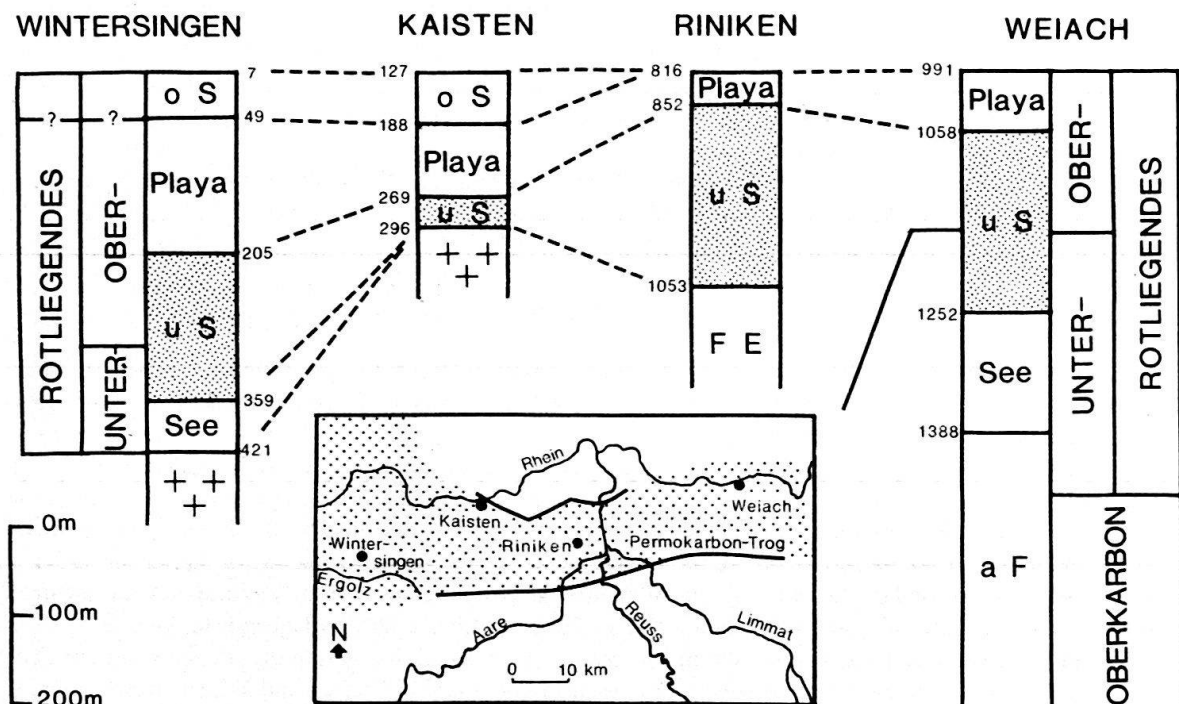


Fig. 1. Lithologische Korrelationen im Rotliegenden des Nordschweizer Permokarbon-Trogs, vereinfacht nach MATTER (1987). Die Altersstellung der Ablagerungen des oberen Schuttfächers ist noch nicht geklärt. SCHMASSMANN & BAYRAMGIL (1946) nehmen für diese Ablagerungen von Wintersingen ein Zechstein- bis Buntsandstein-Alter an. oS = oberer Schuttfächer; uS = unterer Schuttfächer; See = See-Ablagerungen; FE = Flussebene; aF = anastomosierendes Flußsystem; Kreuze = Kristallines Grundgebirge. Die Zahlen entsprechen Teufenangaben.

Methoden

Vor der Dünnschliffherstellung sind alle Proben mit blaugefärbtem Plastik, der unter Druck in die Gesteinsporen eingepresst wird, imprägniert worden. Nach der von DICKSON (1966) beschriebenen Methode wurden die Dünnschliffe zur Identifikation der Karbonate angefärbt.

Die quantitative Erfassung der detritischen Komponenten, authigenen Mineralphasen, sowie der unterschiedlichen Porositätstypen erfolgte an Kathodenlumineszenz-Aufnahmen von Sandsteinen ähnlicher Korngrösse (0.06–0.25 mm). Diese Beschränkung auf Feinsandsteine erlaubte es, Unterschiede in der detritischen Zusammensetzung auf Änderungen im Liefergebiet zurückzuführen. Die Kathodenlumineszenz-Aufnahmen wurden mit Hilfe eines Tischprojektors und einem über die Projektionswand gelegten Raster von 216 Punkten ausgezählt. Das Kathodenlumineszenz-Mikroskop erweist sich gegenüber dem Polarisations-Mikroskop als vorteilhafter, da auch noch Komponenten der Silt-Fraktion anhand der Lumineszenzfarben und -Intensitäten unterschieden werden können (RAMSEYER 1983, MATTER & RAMSEYER 1985).

Detailliertere Kenntnisse über authigene Mineralphasen und deren relative zeitliche Abfolge lieferten REM-Aufnahmen aus Mittel- bis Grobsandsteinen mit mindestens 8% Porosität.

Die chemische Zusammensetzung des Feldspatzements der Bohrung Kaisten wurde mit Hilfe der Elektronenmikrosonde bestimmt.

Lithologie und Petrographie der Schutfächer-Ablagerungen

Wie aus den lithologischen Profilen der vier hier zur Diskussion stehenden Bohrungen zu entnehmen ist (Fig. 1), treten sowohl im Hangenden wie auch im Liegenden der Playa-Ablagerungen von Wintersingen und Kaisten Schutfächer-Sedimente permischen Alters auf. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird der Schutfächer im Liegenden der Playa-Serie als «unterer Schutfächer», derjenige im Hangenden als «oberer Schutfächer» bezeichnet (MATTER 1987).

Wenn in der vorliegenden Arbeit von Schutfächer-Ablagerungen die Rede ist, so sind damit immer Gesteine des «unteren Schutfächers» gemeint.

Nach MATTER et al. (1987a) setzen sich die Ablagerungen des unteren Schutfächers aus einer Folge zahlreicher «thinning and fining upward-Zyklen» zusammen und weisen Mächtigkeiten von 27 m in Kaisten bis 201 m in Riniken (Fig. 1) auf. In Weiach konnten dank des guten Bohrkernmaterials und des Gamma-Logs Grosszyklen von etwa 15 m Mächtigkeit ausgeschieden werden. Diese Grosszyklen bauen sich wiederum aus 3–5 m mächtigen, zum Hangenden im allgemeinen geringmächtiger und feinkörniger werdenden Zyklen 2. Ordnung auf. Die kleinste Einheit schliesslich, ein einziger «fining upward-Zyklus» (Zyklus 1. Ordnung) kann sich von wenigen Dezimetern bis über 1 m erstrecken.

Generell beginnt ein Zyklus 1. Ordnung erosiv mit einer meist gradierten und schräggeschichteten Fein- bis Mittelbrekzie; darüber folgt ein Fein- bis Grobsandstein, der häufig gradiert und schräggeschichtet ist und im feinkörnigen Bereich auch Kletterrippeln aufweisen kann. Die oberste Einheit eines solchen Zyklus 1. Ordnung bildet ein oft laminiertes oder feingeschichteter Ton bis Siltstein. Trockenrisse, Bioturbation und knollige Calcit-Konkretionen sind in diesem tong-siltigen Anteil recht häufig.

Die meist korngestützten (grain-supported) Feinsandsteine haben Porositäten um 5%. Die Permeabilität ist wegen den, die Porenräume verschliessenden authigenen Tonmineralien Illit und Kaolonit sehr gering; meist ist sie unter der messbaren Grenze von 0.05 mDarcy. Die Feinsandsteine zeichnen sich in allen vier Bohrungen durch eine geringe Rundung der Komponenten (eckig bis kantengerundet) und mässige (moderately) Sortierung (PETTIJOHN et al. 1972) aus.

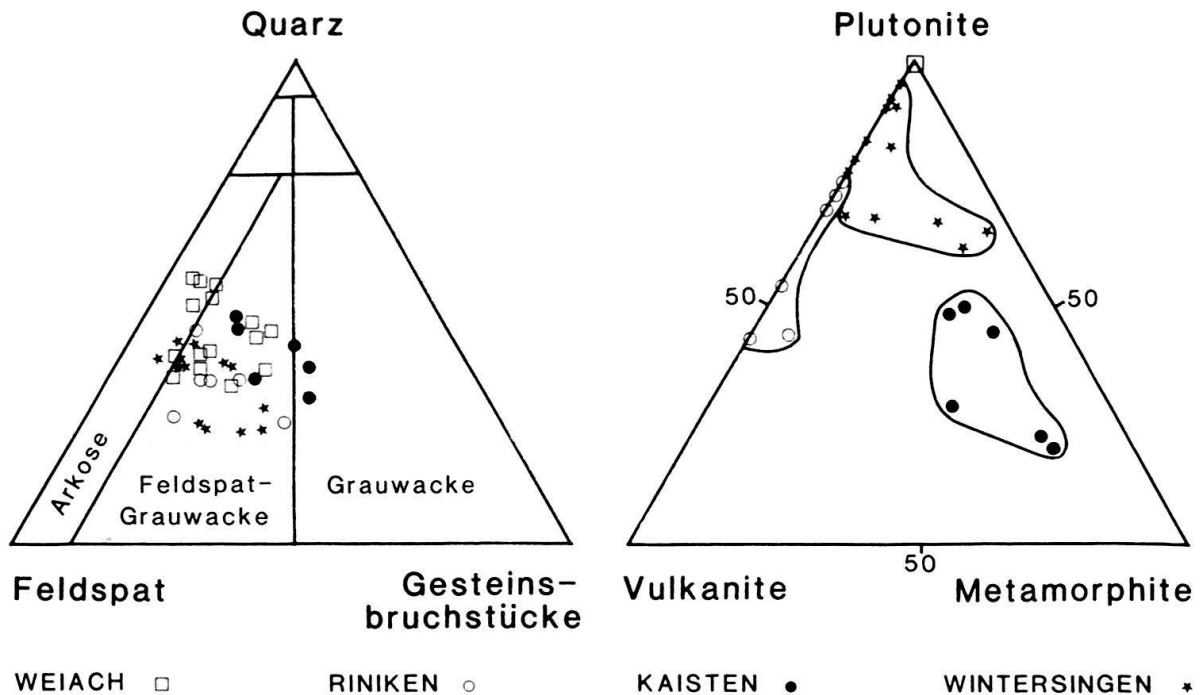


Fig. 2. Detritische Zusammensetzung (links) und Gesteinsbruchstück-Spektren (rechts) von feinkörnigen, permischen Sandsteinen aus dem unteren Schuttfächer der Nagra-Bohrungen Weiach, Riniken und Kaisten sowie der Bohrung Wintersingen. Klassifikation nach FÜCHTBAUER (1959). Quantifizierung mit Hilfe des Kathodenlumineszenz-Mikroskops.

Nach der Nomenklatur von FÜCHTBAUER (1959) sind die Feinsandsteine überwiegend als Feldspat-Grauwacken zu bezeichnen (Fig. 2).

Die Feinsandsteine von Weiach und Wintersingen weisen einen hohen Glimmer-Gehalt (Tab. 1) und überwiegend plutonische Gesteinsbruchstücke (Fig. 2) auf. In Riniken dagegen enthalten die Feinsandsteine bis zu 55% Gesteinsbruchstücke vulkanischer Herkunft (kalifeldspatreiche Rhyolithe) und nur 2% Glimmer. Die Ablagerungen von Kaisten nehmen hier eine Sonderstellung ein. Obschon glimmerreiche Metapelite und metablastische Gneise (PETERS et al. 1987a) das Geröllspektrum dominieren, sind die Feinsandsteine sehr glimmerarm (1–2%). Ferner wird eine deutlich bessere Rundung und Sortierung der Feinsandsteine als in den übrigen drei Bohrungen beobachtet.

Die unterschiedlichen Glimmer-Gehalte (davon über 75% Biotit) sowie die abweichenden Gesteinsbruchstück-Spektren (Korngrösse < 0,25 mm) der vier Bohrungen weisen auf verschiedene Liefergebiete hin (Fig. 2). So widerspiegeln die hohen Glimmer-

Tabelle 1: Mittlere detritische Zusammensetzung von Feinsandsteinen des unteren Schuttfächers der Bohrungen Weiach, Riniken, Kaisten und Wintersingen. Unter Tonmatrix wird hier die Summe des intergranularen Illits und der Illit/Smektit-Wechsellagerungsminerale verstanden. Die Quantifizierung erfolgte mit Hilfe des Kathodenlumineszenz-Mikroskops.

	Anzahl Proben	Quarz	Feldspat	Gesteins-Bruchst.	Glimmer	Tonmatrix
Weiach	15	19 ± 6	19 ± 3	6 ± 3	20 ± 6	9 ± 5
Riniken	6	21 ± 4	30 ± 3	12 ± 7	2 ± 1	6 ± 2
Kaisten	6	21 ± 3	19 ± 3	17 ± 3	2 ± 1	6 ± 1
Wintersingen	13	18 ± 4	20 ± 6	11 ± 6	7 ± 4	5 ± 2

gehalte und plutonischen Gesteinsbruchstücke in Weiach und Wintersingen die Dominanz eines granitischen Liefergebietes, wogegen die geringen Glimmergehalte und rhyolithischen bis lamprophyrischen Gesteinsbruchstücke auf ein vulkanisches Liefergebiet im zentralen Einzugsgebiet von Riniken und Kaisten hinweisen. Dies spiegelt sich auch in den Geröll-Spektren der Schuttfächer-Brekzien (> 6 mm) der drei Nagra-Bohrungen (MATTER 1987) sowie der Bohrung Wintersingen wieder. Der gute Rundungs- und Sortierungsgrad der detritischen Komponenten sowie das weitgehende Fehlen der Glimmer in den Feinsandsteinen von Kaisten weisen auf eine Aufarbeitung älterer Sedimente oder grössere Transportdistanz vom Liefergebiet hin.

Neubildungen, Verdrängungen und Lösung von Mineralien

Quarz

Sowohl undulös wie auch gerade auslöschende detritische Quarzkörner lassen Drucklösung an Kornkontakten erkennen. Häufig sind Quarzkörner auch durch Karbonatzement randlich verdrängt und weisen eine korrodierte Oberfläche auf. Quarzzement kristallisiert entweder direkt auf der Kornoberfläche oder durch ein dünnes Tonhäutchen getrennt als syntaxialer Anwachsrand aus. Ausserdem verheilt dieser syntaxiale Quarzzement Kompaktionsbrüche in detritischen Körnern. In Weiach und Wintersingen zeigen REM-Aufnahmen einen weiteren, authigenen Illit und Kaolinit verdrängenden Quarzzement von prismatischem Habitus (Tf. 1e). In Kaisten wird dagegen intragranularer, mikrokristalliner Quarzzement, der auf Kristallisationskeimen zu wachsen beginnt, beobachtet (Tf. 1c). Dieser mikrokristalline Quarzzement verschliesst im Gegensatz zum Quarz mit prismatischem Habitus fast vollständig den restlichen Porenraum.

In Kathodenlumineszenz-Aufnahmen sind diese tiefblau luminiszierenden Zemente nicht zoniert; es lassen sich somit keine Wachstumsphasen erkennen.

Feldspat

Feldspatkörner zeigen sehr unterschiedliche Erhaltungszustände: von unbeschädigten fast idiomorphen Kristallen kommen alle Stufen bis zu vollständig durch Illit, Kaolinit oder Quarz verdrängten Individuen vor. Neben der Verdrängung durch Illit sind Kalifeldspäte häufig partiell angelöst. Plagioklase sind dagegen eher mehrfach zerbrochen. Zwischen den Zwillingslamellen oder in Spaltrissen kristallisierte in diesen deformierten Plagioklas-Körnern Illit, Quarz oder Hämatit.

In den Sandsteinen von Riniken und Kaisten sind häufig idiomorphe Kalifeldspat-Neubildungen als Anwachsäume oder innerhalb gelöster Kalifeldspat-Körner zu erkennen. Es handelt sich dabei um einen Kalifeldspat mit Adular-Habitus (Tf. 1b).

Karbonat

Neben wenigen cm mächtigen, limnischen Karbonaten in Wintersingen (SCHMASSMANN & BAYRAMGIL 1946) treten in den untersuchten Schuttfächer-Ablagerungen Karbonate nur als diagenetische Neubildungen auf. Die Caliche-Konkretionen in den Bohrungen Weiach, Riniken und Wintersingen bestehen aus krypto- bis makrokristallinem

Calcit. Dieser Calcit zement verdrängte während des Wachstums Tonmatrix und detritische Komponenten oder drückte die Komponenten beim Wachsen auseinander. Dolomit (Riniken) und Ankerit (Weiach, Wintersingen) haben einen rhomboedrischen Habitus. Beide Karbonate verdrängen nicht nur den detritischen Anteil der Sandsteine, sondern auch syntaxialen Quarzzement, Kalifeldspatzement sowie auch authigenen Illit und Kaolinit (Tf. 1f). In den Sandsteinen von Wintersingen tritt zusätzlich mikrokristalliner Siderit auf. Die Ausscheidung von Dolomit respektive Ankerit erfolgte nicht nur im intergranularen Porenraum, sondern auch in Klüften. Diese mehrheitlich senkrecht zur Schichtung laufenden Klüfte werden in allen drei Bohrungen von einem eisenreichen, dann eisenarmen Calcit verschlossen.

Illit und Illit/Smektit-Wechselagerungsmineralien

Faseriger Illit und Illit/Smektit-Wechselagerungsmineralien wachsen auf detritischen Körnern, Quarzzement und Kaolinit. In gelösten Feldspäten besitzt authigener Illit neben faserigem auch boxwork (Kartenhaus) Habitus. In syenitischen Gesteinsbruchstücken der Bohrung Riniken (961.31 m) bildet Illit Pseudomorphosen nach Hornblende.

Kaolinit

Kaolinit ist im unteren Schuttfächer der Bohrungen Riniken und Kaisten nur röntgenographisch nachgewiesen. In Weiach und Wintersingen kommt dieses Tonmineral in blättrigem, pseudo-hexagonalem Habitus intergranular sehr häufig vor. Kaolinit kann aber auch in gelösten, detritischen Kalifeldspat- oder Plagioklaskörnern wachsen.

Hämatit

Feinstkörniger Hämatit ($< 2 \mu\text{m}$) findet sich sowohl zusammen mit Illit im Porenraum, als auch in Feldspat-Spaltrissen und zwischen Biotit-Plättchen. Selten sind pseudorhombische Kriställchen von $5 \mu\text{m}$ Grösse (Weiach 1043.67 m) unter dem Mikroskop innerhalb der Tonmatrix erkennbar. Dieses Mineral verursacht die Rotfärbung der Sandsteine.

Relative zeitliche Abfolge der diagenetischen Veränderungen (Fig. 3)

Faseriger Illit, der sich tangential um detritische Körner legt, sowie feinstkörniger Hämatit, der dieses Tonmineral rötlich erscheinen lässt, zählen zu den ersten Mineralneubildungen. Konkretionärer Calcit (Caliche) umschliesst oder drängt diesen rotgefärbten Ton zur Seite. Korrodierte Kornoberflächen von Quarzen zeigen, dass gleichzeitig mit der Calcit-Bildung eine Lösung von Silikatmineralien stattgefunden haben muss.

In nicht durch Calcit zementierten Bereichen wird der primäre Porenraum durch Kompaktion der detritischen Komponenten stark reduziert. In den Sandsteinen von Kaisten fehlt Calcit zement; korrodierte Quarzkörner deuten jedoch auf einen frühen Karbonatzement, der weg gelöst worden ist. Im Anschluss an die Kompaktion wurde dann syntaxialer Quarzzement, welcher Kompaktionsbrüche verheilt, ausgeschieden. Flüssigkeits-Einschlüsse in diesem Quarzzement besitzen Homogenisations-Temperaturen von 28°C (Weiach 1120.30 m; MATTER et al. 1987b).

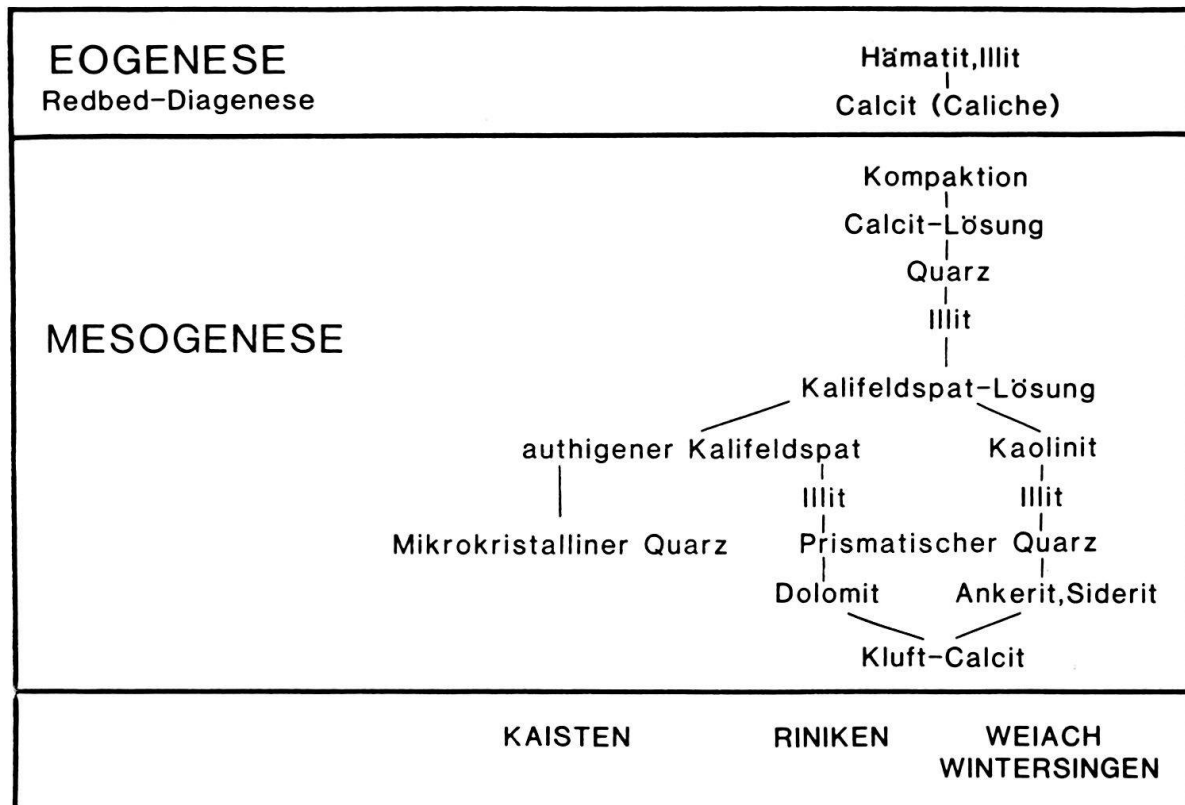


Fig. 3. Schematische Diagenese-Abfolge in permischen Sandsteinen aus dem unteren Schuttfächer der Nagra-Bohrungen Weiach, Riniken und Kaisten sowie der Bohrung Wintersingen.

Auf diesem Quarzzement bildet sich nur ein zweiter faseriger, tangentialer Illit.

Die Lösung der Kalifeldspäte fand nach der Kompaktionsphase statt, da die durch Lösung entstandenen Poren keinerlei Kompaktionsspuren aufweisen.

Auf Kosten des gelösten Kalifeldspats wächst nun in Weiach und Wintersingen blättriger, pseudohexagonaler Kaolinit im Restporenraum oder auch innerhalb eines gelösten Feldspatkorns. REM-Aufnahmen zeigen, dass dieser Kaolinit von faserigem Illit umhüllt und beide Minerale von prismatischem Quarz überwachsen werden (Tf. 1d, e). In den Sandsteinen von Riniken und Kaisten kristallisiert statt Kaolinit Kalifeldspat. Diese authigene Phase bildet sowohl Anwachsstände um detritische Kalifeldspatkörner (Tf. 1b, c) wie auch Neubildungen innerhalb gelöster Körner (Tf. 1a). Prismatischer und mikrokristalliner Quarzzement von Riniken respektive Kaisten sind jünger als der authigene Kalifeldspat (Fig. 3).

Als nächstes werden in Riniken Dolomit, in Weiach und Wintersingen Ankerit respektive Siderit ausgeschieden. Wie auf Tafel 1f erkennbar, verdrängt poikilitischer Ankerit den zuletzt gebildeten prismatischen Quarzzement.

Gleichzeitig mit dieser Karbonatausscheidung begann eine Zerklüftung des Gesteins. Die Klüfte sind anfangs mit Dolomit oder Ankerit, dann mit eisenreichem und zuletzt mit eisenarmem Calcit verheilt.

Flüssigkeits-Einschlüsse in Kluft-Calcit (Riniken 1018.89 m und 1045.45 m) besitzen Homogenisations-Temperaturen einer älteren Population von 112 °C und einer jüngeren Population von 86 °C (MATTER et al. 1987b).

Die Salinität (NaCl aeq%) dieser Einschlüsse ist nach MATTER et al. (1987b) geringer als diejenige der frühesten Einschlüsse in Quarz (Weiach 1120.30 m; 23.3%) und beträgt ca. 9%.

Interpretation der Diagenese-Abfolge

Der nach der Ablagerung zunächst fast tonfreie Sand wird von versickernden Oberflächenwässern durchflossen. Dabei werden Tonpartikel infiltriert; es entstehen Tonhäutchen um detritische Körner. Da wegen des geringen Pflanzenbewuchses nur wenig Sauerstoff für die Verwesung organischer Substanz verbraucht wird, sind die Grundwässer sehr sauerstoffreich (WALKER 1976). Als erste detritische Mineralien werden die Fe-Mg-Silikate Hornblende, Pyroxen und Biotit instabil und geben ihr Eisen, Magnesium, Aluminium und SiO_2 an das Porenwasser ab (WALKER 1976; WALKER et al. 1978). Dies führt zur Bildung von faserigem Illit und Hämatit. Schliesslich werden auch Ca-Plagioklase zersetzt und reichern das Porenwasser zusätzlich mit Ca-Ionen an. Das für die Caliche-Bildung notwendige CO_2 ist wohl hauptsächlich ein Produkt des Pflanzenstoffwechsels in den oberen Bodenschichten, da Calichebildungen in den Schuttfächer-Sedimenten häufig mit Wurzelböden assoziiert sind. Diese im Zusammenhang mit dem Ablagerungsmilieu ablaufenden Prozesse werden dem Stadium der Eogenese (SCHMIDT & McDONALD 1979) zugeordnet. Nach WALKER (1976) kann dieses auch Redbed-Diagenese genannte Stadium (Fig. 3) mehrere Millionen Jahre andauern.

Mit zunehmendem Überlagerungsdruck kommt es dann zur Kompaktion der Schuttfächer-Sandsteine, da das Korngefüge stützender Zement weitgehend fehlt. Durch Zufuhr CO_2 -haltiger, saurer Lösungen aus den unterlagernden Gesteinsserien, wurde lokal auch Calcit gelöst. Gerade in Weiach und Wintersingen, wo die Schuttfächer-Sandsteine durch See-Ablagerungen, die reich an organischem Material sind, unterlagert werden, ist Calcit nur in quantitativ unbedeutenden Mengen vorhanden, wogegen syntaxialer Quarzzement häufig ist. Homogenisations-Temperaturen von Flüssigkeits-Einschlüssen (20°C und 26°C) in diesem syntaxialen Quarzzement, welche nach MULLIS (1987) als minimale Bildungstemperaturen betrachtet werden können, weisen ebenfalls auf eine frühe Bildung bei geringer Überlagerung hin. Dies würde aber bedeuten, dass dieser Quarzzement ein permisches Alter hat.

Nach partieller Lösung des detritischen Kalifeldspats werden die Porenlösungen an K^+ , Al^{3+} , und SiO_2aq angereichert. In der Folge kommt es in den Sandsteinen von Weiach und Wintersingen zur Kaolinit-Bildung, während in Riniken und Kaisten authigener Kalifeldspat auskristallisiert.

In den Ablagerungen von Weiach und Wintersingen könnte die Kaolinit-Bildung – wie bereits für den syntaxialen Quarzzement beschrieben – durch eine Zufuhr saurer Lösungen aus den im Liegenden anstehenden, an organischer Substanz reichen See-Sedimenten (C_{org} -Gehalt bis 10%) verursacht sein. Figur 4 zeigt ein Stabilitäts-Diagramm für die Mineralien Kaolinit, Muskovit (Illit) und Kalifeldspat (25°C , 1 bar), entnommen aus BOWERS et al. (1984). Man erkennt, dass bei Erniedrigung des $a_{\text{K}}/a_{\text{H}}$ -Verhältnisses durch Zufuhr CO_2 -haltiger Wässer der Kalifeldspat instabil und Kaolinit gebildet wird.

Da bei der Umwandlung von Kalifeldspat in Kaolinit H^+ -Ionen verbraucht und K^+ -Ionen freigesetzt werden, nimmt das $a_{\text{K}}/a_{\text{H}}$ -Verhältnis wiederum zu. Man gelangt schliesslich in das Stabilitätsfeld von Muskovit (Illit).

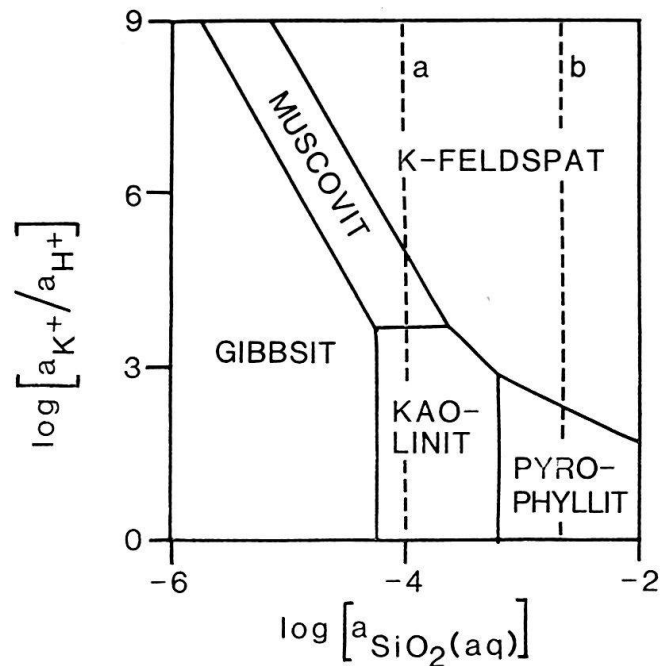


Fig. 4. Stabilitäts-Diagramm für das System $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ bei $25^\circ C$ und 1 bar, ausgedrückt in Funktionen der Aktivität a_{K^+} , a_{H^+} und a_{SiO_2} (aus: BOWERS et al. 1984). Die gestrichelten Linien bezeichnen die Sättigung für Quarz (a) und für amorphes SiO_2 (b).

Sobald auch die K^+ -Ionen für die Illit-Entstehung verbraucht sind, bleibt nur noch gelöstes SiO_2 im Porenwasser übrig.

In Riniken und Kaisten wird jedoch nach Lösung der detritischen Kalifeldspat-Körner authigener Kalifeldspat und nicht Kaolinit gebildet. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass bei der Kalifeldspatlösung in Riniken und Kaisten das a_{K^+}/a_{H^+} -Verhältnis sich nicht wesentlich verändert hat.

Der Einfluss von kalifeldspatreichen, vulkanischen Gesteinsbruchstücken auf die Kalifeldspat-Authigenese kann für die Sandsteine des Schuttfächers ausgeschlossen werden; in Riniken sind zwar kalifeldspatreiche, rhyolithische Gesteinsbruchstücke häufig (MATTER et al. 1987b), aus den Sandsteinen von Kaisten dagegen, wo quantitativ der meiste Kalifeldspat-Zement gebildet wurde, werden ausschliesslich mafische Lamprophyre (PETERS et al. 1987a) beschrieben.

Nach dieser Kalifeldspat-, beziehungsweise Kaolinit/Illit-Authigenese waren die Porenwässer in allen vier Bohrungen an gelöstem SiO_2 übersättigt. In Kaisten dürften die Porenwässer nach der Kalifeldspat-Authigenese sogar stark an SiO_2 übersättigt und zahlreiche Kristallisationskeime vorhanden gewesen sein, da nur unter solchen Bedingungen mikrokristalliner Quarz gebildet werden kann (SIEVER 1962; HATHAWAY et al. 1970).

Zur Altersfrage dieser Diagenese-Phasen (Feldspat-Lösung, Kaolinit/Kalifeldspat, Illit, Quarz) liegt eine interessante Studie von KEMPTER (1987) vor. Nach KEMPTER besass die organische Substanz in der See- und Kohle-Serie von Weiach schon am Ende des Unterrotliegenden (Autunien) den heute gemessenen Maturitätsgrad. Da Feldspat-Lösung und Kaolinit-Wachstum auch in den jüngsten Perm-Ablagerungen (oberer Schuttfächer und Playa) anzutreffen ist, dürfte diese Migration CO_2 -haltiger Porenwässer mindestens bis zum Ende des Perms angedauert haben.

Nach dieser Authigenese von siliziklastischen Mineralien folgte eine Phase der Karbonatzementation, die offensichtlich in engem Zusammenhang mit einer Kluftbildung steht. Diese Änderung von Quarz- zu Karbonatausscheidung kann entweder durch eine Temperaturzunahme oder einen Wechsel zu alkalischem pH verursacht worden sein.

Homogenisations-Temperaturen von Flüssigkeits-Einschlüssen in Kluft-Calciten der Bohrung Riniken dokumentieren für diese Zementart minimale Bildungstemperaturen von 112°C bis 86°C respektive 140°C (1620.93 m; MATTER et al. 1987b). Diese in Oberrotliegend-Sedimenten ausgeschiedenen Kluftkarbonate bildeten sich nach dem von KEMPTER (1987) geforderten thermischen Ereignis. Überträgt man den für das Mesozoikum von Weiach postulierten Thermogradienten von 48°C/km (KEMPTER 1987) auf die Abfolge von Riniken, so wäre der Kluft-Calcit bei einer Überdeckung von etwa 2 km gebildet worden. Dies würde eine Erosion von ca. 1000 m bedingen, die am ehesten ins Tertiär zu stellen ist und mit der Reaktivierung der Grabenränder (DIEBOLD & MÜLLER 1985) im Zusammenhang stehen dürfte. Die Kluft-Calcite dürften somit, falls keine hydrothermalen Ereignisse während des Mesozoikums und Tertiärs erfolgten, während dieser Reaktivierung der Grabenränder (Jurafaltung?) entstanden sein.

Schlussfolgerungen

Die Diagenese-Abfolge in den permischen Sandsteinen des unteren Schuttfächers kann in zwei Abschnitte unterteilt werden:

Zu Beginn, während der Eogenese, widerspiegelt die Diagenese-Abfolge den Einfluss des ariden Ablagerungsmilieus. Im Anschluss, während dem Mesogenese-Stadium erfolgte Veränderungen, können auf Unterschiede im Porenwasser-Chemismus und der Mineralstabilitäten zurückgeführt werden.

Eine erste authigene Quarz-Phase, die nach Messungen an Flüssigkeits-Einschlüssen dem Perm zugeordnet werden kann, zeigt, dass das Eogenese-Stadium nur einige Millionen Jahre dauerte.

Die Kaolinit-Bildung ist in den untersuchten Rotliegend-Ablagerungen abhängig von unterlagernden See-Sedimenten, aus denen CO₂-haltige Wässer in die jüngeren Serien aufsteigen.

Der Kluft-Calcit ist erst nach dem von KEMPTER (1987) postulierten thermischen Ereignis, aber bei höheren Temperaturen als heute, gebildet worden. Messungen an Flüssigkeits-Einschlüssen (MATTER et al. 1987b) weisen auf eine Entstehung dieses Kluft-Calcits bei mindestens 2 km Sediment-Überdeckung hin. Es wird daher angenommen, dass dieses Kluft-Mineral während der Reaktivierung der Grabenränder im Tertiär gebildet wurde.

Verdankungen

Die vorliegende Studie ist ein Teil meiner Dissertation, die von Prof. Dr. A. Matter betreut und finanziert wird. Mein Dank gilt besonders der Nagra sowie dem Amt für Museen und Archäologie des Kantons Baselland für die zur Verfügungstellung des Bohrkern-Materials.

Ganz besonders danken möchte ich den Herren A. Matter, K. Ramseyer, S. Burley und B. Diem für die vielen wertvollen Diskussionen, von welchen die vorliegende Arbeit wesentlich profitierte. Ferner danken möchte ich Herrn F. Zweili für REM-Untersuchungen, Herrn A. Werthemann für photographische Arbeiten, Frau H. Haas für die Porositäts-, Permeabilitäts- und C_{org}-Bestimmungen der Bohrung Wintersingen, Frau H. Haas und Frau L. Vogt-Fonatsch für das Tippen diverser Manuskripte und Textfassungen.

LITERATURVERZEICHNIS

- BOWERS, T. S., JACKSON, K. J., & HELGESON, H. C. (1984): Equilibrium activity diagrams for coexisting minerals and aqueous solutions at pressures and temperatures to 5 kb and 600 °C. – Springer, Berlin.
- DICKSON, J. A. D. (1966): Carbonate identification and genesis as revealed by staining. – *J. sediment. Petrol.* 36, 491–505.
- DIEBOLD, P., & MÜLLER, W. H. (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz – Nagra, Technischer Bericht, NTB 84-26, Nagra, Baden.
- FALKE, H. (1976): Problems of the continental Permian in the Federal Republic of Germany. In: FALKE, H. (Ed.): *The Continental Permian in Central, West and South Europe.* – NATO ASI Series C.: Mathematical and Physical Sciences 22, 38–52. D. Reidel Publ. Comp.
- FÜCHTBAUER, H. (1959): Zur Nomenklatur der Sedimentgesteine. – *Erdöl u. Kohle* 12, 605–613.
- GLENNE, K. W., MUDD, G. C., & NAGTEGAAL, P. J. C. (1978): Depositional environment and diagenesis of Permian Rotliegendes sandstones in Lemn Bank and Sole Pit areas of the U.K. – *J. geol. Soc. London* 135, 25–34.
- HATHAWAY, J. C., MCFARLIN, P. F., & ROSS, D. A. (1970): Mineralogy and origin of sediments from drill holes on the continental margin off Florida. – Prof. Pap. U.S. geol. Surv., Washington 581-E.
- KEMPTER, E. (1987): Fossile Maturität, Paläothermogradienten und Schichtlücken in der Bohrung Weiach im Lichte von Modellberechnungen der thermischen Maturität. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2.
- MATTER, A. (1987): Faciesanalyse und Ablagerungsmilieus des Permokarbons im Nordschweizer Trog. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2.
- MATTER, A., & RAMSEYER, K. (1985): Cathodoluminescence Microscopy as a Tool for Provenance Studies of Sandstones. In: ZUFFA, G. G. (Ed.): *Provenance of Arenites (191–211).* – NATO ASI Series C.: Mathematical and Physical Sciences. D. Reidel Publ. Comp.
- MATTER, A., PETERS, T. J., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-01, Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- MATTER, A., PETERS, T. J., ISENSCHMID, CHR., BLÄSI, H.-R., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Riniken – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-02, Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- MULLIS, J. (1987): Ergebnisse der Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2.
- PETERS, T. J., MATTER, A., ISENSCHMID, CHR., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ZIEGLER, H.-J. (1987a): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-04, Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- PETTJOHN, F. J., POTTER, P. E., & SIEVER, R. (1972): *Sand and sandstone.* – Springer, New York.
- RAMSEYER, K. (1983): Bau eines Kathodenlumineszenz-Mikroskopes und Diagenese-Untersuchungen an permischen Sedimenten aus Oman. – Diss. Univ. Bern.
- SCHMASSMANN, H. J., & BAYRAMGIL, O. (1946): Stratigraphie, Petrographie und Paläogeographie der Perm-Formation im schweizerischen Tafeljura und die Steinkohlefrage der Nordschweiz. – *Tätber. Natf. Ges. Basell.* 15, 17–117.
- SCHMIDT, V., & McDONALD, D. A. (1979): The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. In: SCHOLLE, P. A., & SCHLUGER, P. R.: *Aspects of diagenesis.* – Spec. Publ. Soc. econ. Paleont. Mineral. 26, 175–207.
- SIEVER, R. (1962): Silica solubility, 0°–200°C, and the diagenesis of siliceous sediments. – *J. Geol.* 70, 127–150.
- WALKER, T. R. (1976): Diagenetic origin of continental red beds. In: FALKE, H. (Ed.): *The Continental Permian in Central, West and South Europe.* – NATO ASI Series C.: Mathematical and Physical Sciences 22, 240–282. D. Reidel Publ. Comp.
- WALKER, T. R., WAUGH, B., & CRONE, A. J. (1978): Diagenesis in first cycle desert alluvium of Cenozoic age, southwestern United States and northwestern Mexico. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 89, 19–32.

Manuskript eingegangen am 5. Februar 1987

Revision angenommen am 27. April 1987

Tafel 1

- a: Authigener Kalifeldspat (AF) in sekundärem intragranularem Porenraum. Bohrung Riniken (Teufe 997.94 m). Planpolarisiertes Licht, Balkenlänge = 100 μm .
- b: Authigener Kalifeldspat in Adular-Habitus. Bohrung Kaisten (Teufe 279.43 m). REM-Aufnahme, Balkenlänge = 2 μm .
- c: Authigener Kalifeldspat (AF) wächst um detritischen Kalifeldspat (KF). Im Porenraum mikrokristalliner Quarzzement (MQ). Bohrung Kaisten (Teufe 285.87 m). Gekreuzte Polarisatoren, Balkenlänge 100 μm .
- d: Prismatischer Quarz überwächst authigenen, faserigen Illit. Bohrung Riniken (Teufe 1030.07 m). REM-Aufnahme, Balkenlänge = 2 μm .
- e: Prismatischer Quarz (Q) überwächst blättrigen, pseudohexagonalen Kaolonit (K). Bohrung Wintersingen (Teufe 324.00 m). REM-Aufnahme, Balkenlänge = 2 μm .
- f: Poikilitischer Ankerit (A), detritische Körner, Kaolinit (K) und Quarzzement (QZ) verdrängend. Bohrung Weiach (Teufe 1024.47 m). Planpolarisiertes Licht, Balkenlänge = 200 μm .

