

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

Artikel: Diagenese des Buntsandsteins und ihre Beziehung zur tektonischen Entwicklung der Nordschweiz
Autor: Ramseyer, Karl
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-166002>

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 des Buntsandsteins und ihre Beziehung zur tektonischen Entwicklung der Nordschweiz

Von KARL RAMSEYER¹⁾

ZUSAMMENFASSUNG

Die Profile der sechs Nagra-Tiefbohrungen sowie der Erdölbohrung Pfaffnau 1 zeigen, dass lithologisch äquivalente Einheiten des süddeutschen Buntsandsteins bis weit unter das Mittelland reichen.

Die unter semiariden Klimaverhältnissen gebildeten siliziklastischen Sedimente wurden unmittelbar nach ihrer Ablagerung durch Bodenbildungsprozesse stark verändert. Neben Karneol-, Caliche- und Anhydrit-Ausscheidungen wurde der Porenraum auch durch Infiltration von tonigem Material zerstört. Die gleichzeitige Neubildung von Hämatit führte zur charakteristischen Rotfärbung der Buntsandstein-Ablagerungen.

Während der anschließenden Versenkung erfolgte die Auskristallisation von Quarz, Karbonat und Sulfat. Epirogenetische und tektonische Vorgänge bewirkten, durch infiltrierende Wässer aus den unterlagernden bituminösen und kohligem Serien des Permokarbons, eine Änderung der Porenwasserchemie in den Buntsandstein-Ablagerungen. Dies führte neben der Auflösung von Anhydrit und Kalifeldspat zur Ausscheidung von Kaolinit, Quarz und Erzminerale. In der Folge wurden dann Fe-Calcit, Dolomit und Anhydrit im mehrheitlich sekundären Porenraum ausgeschieden. Eine weitere Lösungsphase führte zur Korrosion von Fe-Calcit und möglicherweise von Kalifeldspat. Als jüngste, auf Klüfte beschränkte Mineralphasen treten noch Quarz bzw. Chalcedon und Calcit auf. Im Anschluss an diese im Zusammenhang mit der Jura-faltung auskristallisierten Phasen folgte eine Lösung von Calcit und Anhydrit durch niedrigsaline Wässer.

ABSTRACT

In northern Switzerland a large southward extension of Buntsandstein sediments below the Jura mountains is recorded from six Nagra boreholes and the Pfaffnau 1 oil exploration well. Most of the sediments comprise reworked quartz rich sandstones deposited in a fluvial environment.

During eogenesis pedogenic processes modified the sediments under semiarid conditions with the localised displacive growth of nodular carbonate, sulphate and chalcedony. Clay introduced by mechanical infiltration was penecontemporaneously reddened.

Two cycles of precipitation dissolution took place during mesogenesis. Both cycles include precipitation of quartz, carbonate and sulphate, and additionally, in the second cycle, kaolinite and locally a variety of ore minerals. During formation of secondary porosity both potassium feldspar and authigenic cements were partially dissolved. Late tectonic fractures are now cemented with quartz, chalcedony and calcite. Fluids responsible for the formation of secondary porosity are inferred to have migrated along fractures from the underlying organic rich Permo-Carboniferous sediments during stages of maximum burial and inversion. Following inversion, a final generation of secondary porosity developed throughout the Buntsandstein by dissolution of calcite and anhydrite. This dissolution is related to an influx of low salinity waters.

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

Einleitung

Diagenetische Prozesse, welche allgemein als chemische Reaktionen des Sediment-Wasser-Systems auf Veränderungen der physikochemischen Parameter Temperatur, Druck, Fluidzusammensetzung und chemischer Stabilität der Komponenten zu betrachten sind, können Lockersedimente und Gesteine sehr stark umwandeln. Neben der Ausscheidung von Mineralphasen aus übersättigten Lösungen werden unter bestimmten Bedingungen (z. B. Infiltration meteorischer Wässer, Maturation des organischen Materials) sowohl detritische Komponenten wie auch Zemente gelöst.

Speziell die Effekte von Untergrund, Epirogenese und tektonischer Bewegungen auf den Diagenese-Ablauf sind bis heute nur bruchstückhaft bekannt, da oftmals nur Mate-

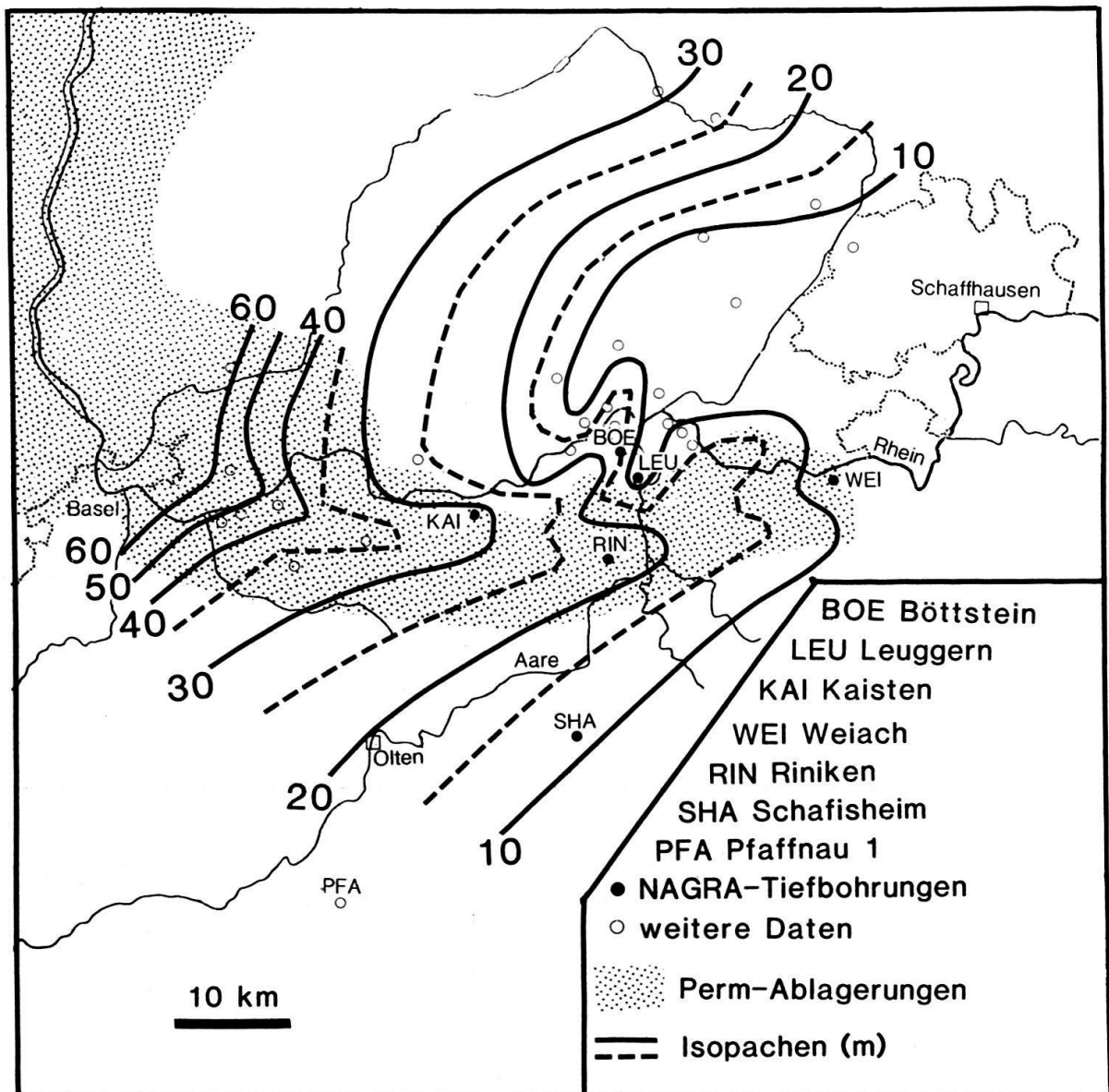


Fig. 1. Isopachenkarte des mittleren und oberen Buntsandsteins im Bereich südlichster Schwarzwald-Nordschweiz. Neben den sechs Nagra-Tiefbohrungen wurden Werte aus der Literatur (vgl. Text) und unpublizierte Daten von Dr. H. Schmassmann verwendet.

rial, welches der Oberflächenverwitterung ausgesetzt war, oder Einzelproben aus Bohrungen zur Verfügung stehen.

Dank der Bohrtätigkeit der Nagra im Raum der Nordschweiz stand nun erstmals Probenmaterial zur Verfügung, welches ideal geeignet war, die obenerwähnten Einflüsse auf den Diagenese-Ablauf in siliziklastischen Sedimenten zu untersuchen. Besonders die umfassende Kenntnis der wichtigen Parameter Temperatur, chemische Zusammensetzung der Porenwässer sowie der Versenkungsgeschichte der Sedimente war ausschlaggebend, um eine Korrelation der Diagenesephasen zu epirogenetischen und tektonischen Vorgängen herstellen zu können.

Probenmaterial, Untersuchungsmethoden

Als Grundlage für diese Arbeit dienten das Kernmaterial und die entsprechenden Kapitel der NTB-Berichte (Nagra Technische Berichte) der sechs durch die Nagra abgeteuften Bohrungen von Kaisten, Leuggern, Böttstein, Weiach, Riniken und Schafisheim (Fig. 1). Zusätzlich wurde auch das von der SEAG freundlicherweise zur Verfügung gestellte Material der Bohrung Pfaffnau 1 in die Untersuchung integriert.

Detaillierte petrographische Dünnschliff-Untersuchungen erlaubten es, die einzelnen Zement- und Lösungsphasen in einen relativen Zeitrahmen zu stellen. Alle Dünnschliffe wurden zur Unterscheidung von Calcit, Fe-Calcit, Dolomit und Fe-Dolomit mit der von DICKSON (1966) beschriebenen Färbmethode behandelt. Für quantitative Angaben über die Häufigkeit wichtiger authigener Phasen wie Quarz, Karbonate und Anhydrit wurde auch die Kathodenlumineszenz-Mikroskopie (MATTER & RAMSEYER 1985) verwendet.

Zusätzlich wurde durch J. Mullis (Univ. Basel) an Flüssigkeitseinschlüssen in authigem Quarz- und Calcitcement die Homogenisations- und Schmelztemperatur bestimmt, um Angaben über die Bildungsbedingungen der Mineralphasen zu erhalten.

Verbreitung der Buntsandstein-Ablagerungen

Im zentralen Bereich der Nordschweiz und im angrenzenden süddeutschen Raum (Dinkelberg–Weitenauer Vorberge–Wutach) sind Buntsandstein-Ablagerungen in Oberflächenaufschlüssen schon seit langem bekannt (STELLRECHT 1963, WILSER 1913, ORTLAM 1970). Zusätzliche Angaben über Lithologie und Mächtigkeit des Buntsandsteins lieferten auch die auf Kohle, Steinsalz oder Wasser abgeteuften grenznahen Sondierbohrungen von Grenzach, Kaiseraugst, Weiherfeld, Rheinfeld, Zuzgen, Auinsel, Koblenz, Zurzach, Schleithem und Tegerfelden (CADISCH 1956, HOFMANN 1981, ORTLAM 1970, RYF 1984, SCHMASSMANN & BAYRAMGIL 1946, SCHMASSMANN 1974, H. Schmassmann, mündl. Mitt.).

Ausser den tonig-siltigen Röt-Ablagerungen, welche in Weiach und möglicherweise in Riniken sowie Pfaffnau fehlen, wurden in allen sechs Nagra-Bohrungen sowie der Erdölbohrung bei Pfaffnau vom Hangenden zum Liegenden Plattensandstein, Karneolhorizont und Diagonalschichtiger Sandstein (inkl. Hauptkonglomerat) nachgewiesen (vgl. MATTER et al. 1987a, 1987b, 1987c; PETERS et al. 1987a, 1987b, 1987c; ORTLAM 1974). Nach ORTLAM (1970) entsprechen diese vier fossilereen Einheiten chronostratigraphisch dem oberen und mittleren Buntsandstein.

Im Bereich der sechs Nagra-Tiefbohrungen lagert diese terrestrische Buntsandsteinsequenz, entsprechend den Verhältnissen im Schwarzwald (MADER 1982, ORTLAM 1970),

teils auf Sedimenten des Perm, teils jedoch direkt auf Kristallin auf. Die regionale Verteilung der im allgemeinen geringmächtigen (< 100 m) Sequenz zeigt im weiteren auffällig die auch in ORTLAM (1974, Texttafel 1) feststellbare Koinzidenz zwischen erhöhter Buntsandstein-Mächtigkeit und dem Vorhandensein von Permokarbon-Trögen (Fig. 1).

Petrographie der Sandsteine

Die detritischen Komponenten der Sandsteine bestehen (Fig. 2) vorwiegend aus gut gerundeten Quarz sowie untergeordnet Kalifeldspat und quarzitisches-granitischen Gesteinsbruchstücken. Instabilere Minerale wie Plagioklas, welcher noch in den liegenden Permablagerungen nachweisbar ist (MATTER et al. 1987a, 1987b; PETERS et al. 1987b), fehlen fast vollständig in diesen Sedimenten des mittleren und oberen Buntsandsteins.

In den siltig-tonigen Ablagerungen des Röts und des hangenden Wellendolomits kann röntgenographisch Plagioklas wiederum nachgewiesen werden. Nach Kathodenlumineszenz-Untersuchungen (Weiach, 975.15 m) handelt es sich dabei um detritischen Plagioklas.

Akzessorisch treten noch die Schwerminerale Apatit, Zirkon, Turmalin, Granat, Rutil und Anatas auf, wobei Apatit nur im Diagonalschichtigen Sandstein und sporadisch auch im Karneolhorizont anzutreffen ist.

Die im Vergleich zu den Perm-Sedimenten stabilere detritische Zusammensetzung und die gute Rundung der Sandfraktion des Buntsandsteins erhärten die Vermutung, dass diese Sandsteine durch Aufarbeitung im aeolisch-fluviatilen Bereich an mechanisch

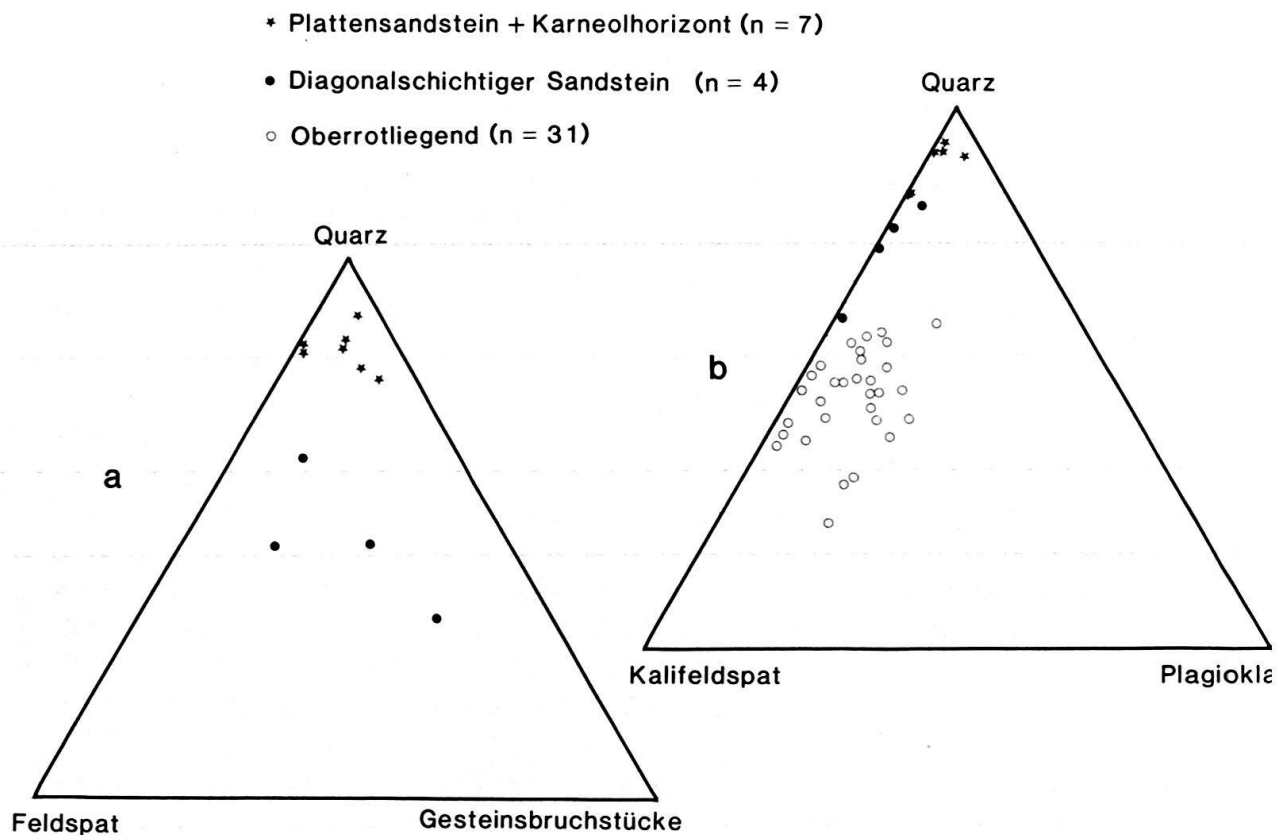


Fig. 2. Detritische Zusammensetzung von Sandsteinen aus dem Buntsandstein und dem liegenden Perm (mündl. Mitt. W. Blüm, Univ. Bern) der vier Nagra-Tiefbohrungen Böttstein, Kaisten, Riniken und Weiach.

instabilen Mineralien verarmten. Dieser Trend zu einer stabileren Komponentenzusammensetzung ist nach Figur 2b auf ein nahezu vollständiges Fehlen der Plagioklase und auf eine Verringerung des Kalifeldspat-Gehaltes zurückzuführen. Innerhalb der Buntsandstein-Einheiten zeichnet sich auch eine Abnahme der Gesteinsbruchstücke vom liegenden Diagonalschichtigen Sandstein zum hangenden Karneolhorizont und Plattensandstein ab (Fig. 2a). Die Verarmung an Kalifeldspat und das Fehlen von Apatit im Plattensandstein ist wohl bedingt durch die an der Wende mittlerer–oberer Buntsandstein (ORTLAM 1970) wirkenden pedogenen Prozesse, welche durch Huminsäurebildung eine chemische Lösung von Apatit und Kalifeldspat bewirkten.

Das Wiederauftreten von Plagioklas in feinsandigen Wellendolomit-Lagen kann entweder auf eine Änderung der Detritusherkunft oder der Transport- und Verwitterungsvorgänge zurückgeführt werden.

Die während des Buntsandsteins zur Ablagerung gelangten Sande sind, da zu mehr als 70% aus Quarz bzw. Quarzit-Bruchstücken (Fig. 2a) bestehend, chemisch sehr stabil. Von den detritischen Komponenten kann somit einzig der teils hohe Kalifeldspat-Anteil des Diagonalschichtigen Sandsteines während der folgenden diagenetischen Umwandlungen aufgelöst werden.

Diagenetische Umwandlungen

In den sechs untersuchten Nagra-Tiefbohrungen und der Erdölbohrung Pfaffnau 1 wurden folgenden Minerale als Neubildungen erkannt (Fig. 3, Tf. 1):

Silikate:	Chalcedon, Quarz, Feldspat, Illit, Kaolinit
Karbonate:	Calcit, Fe-Calcit, Dolomit, Fe-Dolomit (Ankerit)
Sulfate:	Gips, Anhydrit, Baryt, Cölestin
Opake Minerale:	Hämatit, Erze (HOFMANN 1985)

Neben Neubildungen sind auch eine ganze Anzahl unterschiedlichster Verdrängungen nachweisbar. Besonders häufig tritt in den pedogenen Horizonten die pseudomorphe Verdrängung von Karbonat durch mehrphasigen Chalcedon (Tf. 1b) auf. In speziellen Fällen kann Calcit auch alle anderen authigenen Karbonate, Anhydrit, Quarz oder Kalifeldspat verdrängen.

Chemische Lösung von Mineralphasen ist in den Buntsandstein-Sedimenten eine häufige Erscheinung (Fig. 3), obwohl die detritische Zusammensetzung (Fig. 2) recht stabil ist. Praktisch jeder detritische Kalifeldspat ist partiell oder total gelöst worden, wie dies Tafel 1c deutlich erkennen lässt. Die Lösung von Anhydritknollen und in geringerem Masse von Calcitzement (Pfaffnau) führte zur Bildung sekundärer Porosität mit Porengrößen bis zu einigen Millimetern Durchmesser (Tf. 1f).

Diagenese-Sequenz

Nach Ablagerung des siliziklastischen Materials in unterschiedlichen terrestrischen Ablagerungsbereichen (fluviatil, aeolisch) wurden die Sedimente des Buntsandsteins eogenetisch, d. h. noch unter Einfluss des Ablagerungsmilieus, verändert (Fig. 3, Tf. 1a, b). Als erste Neubildungen treten besonders im Karneolhorizont und im Diagonalschichtigen Sandstein Calcit-, Sulfat- und Chalcedon-Konkretionen auf, welche das Sediment fast vollständig verdrängten (Tf. 1a). Eine weitere, wichtige Neubildungsphase, welche

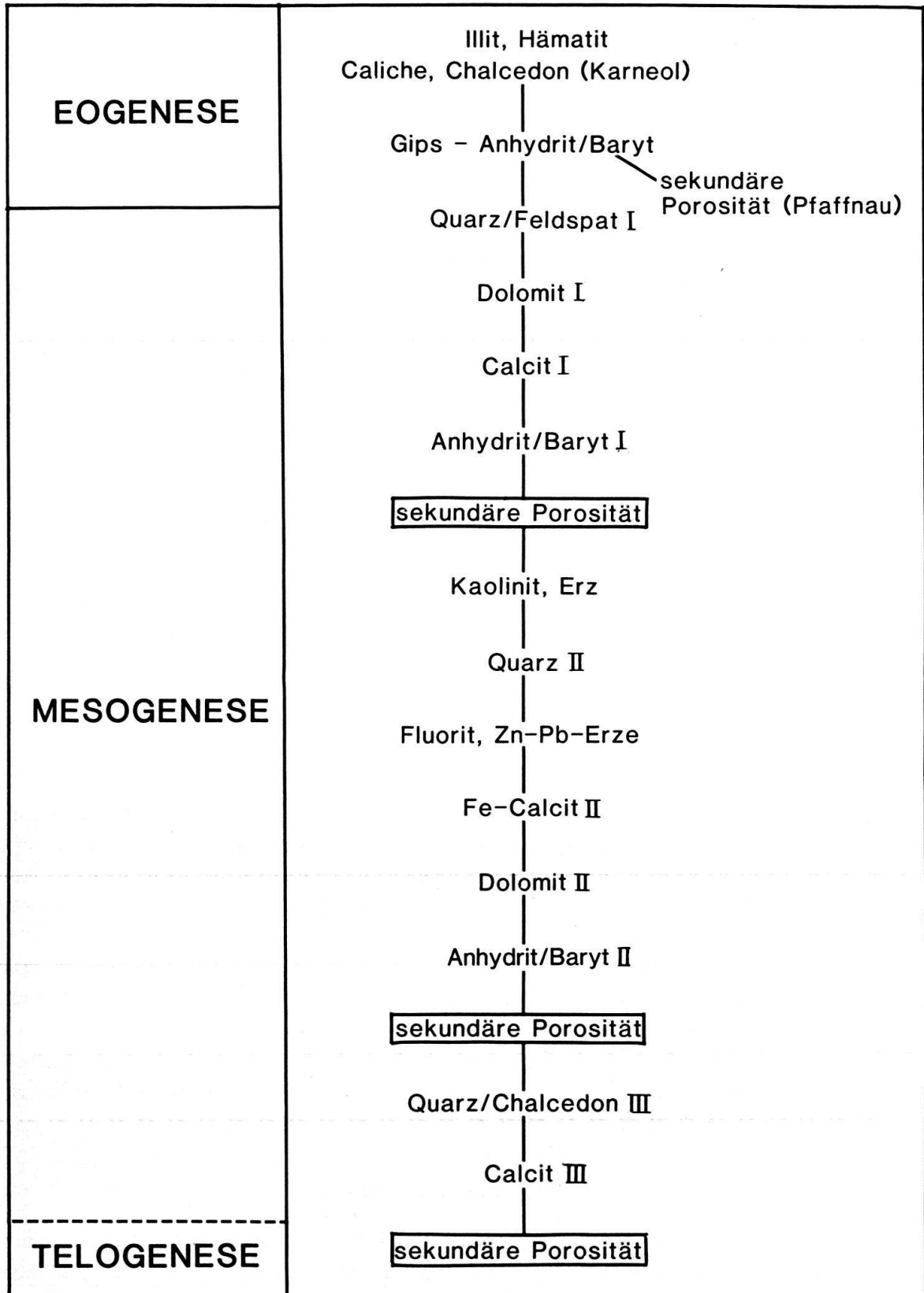


Fig. 3. Genereller Diagenese-Ablauf im Buntsandstein der Nordschweiz, basierend auf sechs Nagra-Tiefbohrungen sowie der Erdölbohrung Pfaffnau 1.

dem Gestein die charakteristische rötliche Farbe verleiht, ist der Hämatit (WALKER 1967). Seine Kristalle sind sehr klein (bis einige μm) und häufig als eine Art Pigment in infiltrierter Tonmatrix oder Chalcedon-Konkretionen anzutreffen (Tf. 1b). Die Ausscheidungen von Chalcedon beschränken sich jedoch nicht nur auf primäre Hohlräume im Sediment (z. B. Wurzelröhren), sondern treten sehr häufig auch in sekundären Lösungsformen (z. B. nach Dolomit-Rhomboedern, Tf. 1b) auf.

Die Abfolge der oftmals zonar ausgeschiedenen Mineralphasen sowie ihre gegenseitige Verdrängung variieren im Schlibbereich derart stark, dass für diese eogenetischen Phasen keine generelle Sequenz bestimmbar ist.

Eine erste, während der Versenkung dem Mesogenese-Bereich zuzuordnende, porenfüllende Ausscheidungssequenz setzt mit authigenem homoaxialem Quarz I (Feldspat) ein und führt über Dolomit I-(Calcit I-) zu Anhydrit I-(Baryt-)Zement (Fig. 3, Tf. 1c). Diese Mineralneubildungen, welche nur in Pfaffnau auf eine Phase sekundärer Porosität folgen, bilden den Hauptteil des heute noch vorhandenen Zementes. Dank der frühen Quarzausscheidung wurde das detritische Korngerüst derart stabilisiert, dass spätere Lösungsphasen zu keinerlei nachweisbaren Kompaktionsstrukturen im Gestein führten. Homogenisationstemperaturen von primären Flüssigkeitseinschlüssen in dieser authigenen Quarzphase ergaben 28°C bzw. 40°C (Weiach 981.84 m, Böttstein 309.87 m, MULLIS 1987). Während einer anschliessenden Lösungsphase wurden dann die detritischen Kalifeldspäte und der Karbonat-Zement (Tf. 1c) teilweise weggelöst. Als erste Neubildung in Kluft-, sekundärer intergranularer- sowie primärer Restporosität tritt Kaolinit auf, gefolgt von Quarz II, Fe-Calcit II, Dolomit II und Anhydrit II (Tf. 1d). Gleichzeitig oder alternierend mit den Silikatphasen Kaolinit und Quarz wurden die von HOFMANN (1985) eingehend untersuchten Erzminerale ausgeschieden. Im Anschluss an diese zweite Zementationssequenz wurden dann der Fe-Calcit und möglicherweise auch noch der detritische Kalifeldspat partiell korrodiert.

Als jüngste diagenetische Neubildungen sind die ausschliesslich in sekundärer Kluftporosität ausgeschiedenen Phasen Quarz III (Chalcedon) und Calcit III (Fig. 3) zu erwähnen. Beide Mineralphasen konnten bis jetzt nur eindeutig in Pfaffnau und Schafisheim nachgewiesen werden. Homogenisationstemperaturen von sekundären Flüssigkeitseinschlüssen in diesen Kluftquarzen (Pfaffnau 1814.10 m, Kaisten 114.13 m) und Calcitadern (Kaisten 114.13 m, Schafisheim 1484.36 und 1485.75 m) ergaben Werte zwischen 90°C und 105°C (MULLIS 1987). Nach Kathodenlumineszenz-Untersuchungen (Schafisheim 1484.36 m, Tf. 1f) handelt es sich dabei um Flüssigkeitseinschlüsse, welche nach einer Spröddeformation entlang von Rissen gebildet wurden.

Als Abschluss der diagenetischen Umwandlungsprozesse löste sich Anhydrit durch Zufuhr niedrigsaliner Wässer auf. In Böttstein wurde dabei aller Anhydrit weggelöst, was zu kugelig ausgebildeten, bis 1 cm grossen Lösungsformen (Tf. 1f) führte.

Datierung der diagenetischen Phasen

Eine direkte Bestimmung des Bildungszeitpunktes der einzelnen Zementphasen ist in den Buntsandstein-Sedimenten nicht möglich, da ausser Illit keine der vorhandenen authigenen Mineralphasen mit Hilfe der Isotopengeologie datiert werden kann. Ein minimales Bildungsalter authigener Phasen kann jedoch aus den Homogenisationstemperaturen primärer Flüssigkeitseinschlüsse bestimmt werden, falls ein geothermischer

Gradient angenommen und ferner postuliert wird, dass die Homogenisationstemperatur die minimale Bildungstemperatur darstellt (MULLIS 1987).

Ein weiteres Verfahren, welches gewisse Aussagen über den Bildungszeitpunkt der ersten korngerüststabilisierenden Zementation ermöglicht, ist der Vergleich der Minus-Zement-Porosität von Sand- und Tonsteinen (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977) mit bekannten Kompaktionskurven (RIEKE & CHILINGARIAN 1974). In ähnlicher Weise kann auch die durch rechnerische Dekompaktion von Reduktionshöfen ermittelte Porosität benutzt werden, um diese Reduktionsphänomene, welche mit Erzneubildungen gekoppelt sein können, in einen Zeitrahmen zu stellen (MATTER et al. 1987a).

Eine Bestimmung des Bildungszeitpunktes aufgrund der aus $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von Mineralphasen ermittelten Kristallisationstemperatur ist in den Buntsandstein-Ablagerungen nicht möglich, da die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der entsprechenden fossilen Porenwässer nicht bekannt sind.

Zu Beginn der Mesogenese wurde, wie im vorausgegangenen Kapitel erwähnt, als erste Zementphase homoaxialer Quarz ausgeschieden (Tf. 1c), wobei sich fluide Einschlüsse an der Grenze detritisches Korn/authigener Quarzzement bildeten. Die in diesen Flüssigkeitseinschlüssen gemessene tiefe Homogenisationstemperatur von 28 °C (Weiach), welche als minimale Bildungstemperatur des authigenen Quarzes betrachtet werden kann, bestätigt, dass die Quarzzementation in einem frühen Stadium der Versenkung stattfand. Bei Annahme einer mittleren Oberflächentemperatur von 20 °C (heutiger Wert für semiaride Gebiete) sowie eines geothermischen Gradienten von 48 °C/km (KEMPTER 1987) ergäbe dies eine Tiefe von etwa 150–200 m oder oberen Muschelkalk. Etwas höhere Homogenisationstemperaturen von 40 °C lieferten primäre Flüssigkeitseinschlüsse in derselben Quarzphase in Böttstein. Eine Abschätzung führt hier zu einer Bildungstiefe von etwa 400 m oder Dogger. Dieser letztere Wert stimmt nun recht gut mit der von HOFMANN (1985) ermittelten Bildungstiefe des Quarzzementes von etwa 500 m Tiefe überein. HOFMANN (1985) benutzte dabei die Minus-Zement-Porosität eines gut sortieren mittelkörnigen Sandsteins von Weiach (982.84 m).

Sowohl die aus den Homogenisationstemperaturen der Flüssigkeitseinschlüsse wie auch aus der Minus-Zement-Porosität ermittelten Versenkungstiefen bzw. Bildungsalter bestätigen somit die aus den petrographischen Beobachtungen gezogene Schlussfolgerung einer frühen Bildung.

Für die späten Zement- und Lösungsphasen sind Datierungsversuche dagegen viel schwieriger und meistens nur durch Vergleich ähnlicher Prozesse im Hangenden bzw. Liegenden der Buntsandstein-Sequenz möglich.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Reduktionshöfe in den tonigen Röt-Sedimenten mit denjenigen der liegenden permischen Playa-Ablagerungen kann nach MATTER et al. (1987a) und HOFMANN (1986) geschlossen werden, dass die im Zentrum der Reduktionshöfe ausgeschiedenen Erze sicher eine späte, mesogenetsiche Bildung darstellen. Nach Berechnungen von MATTER et al. (1987a) dürften diese Erze (bzw. Reduktionshöfe) bei einer Überlagerung von etwa 1000 m Sediment entstanden sein, was etwa dem obersten Jura entsprechen würde.

Epirogenetische Bewegungen, welche in den überlagernden, mesozoischen Sedimenten wegen der Differenzierung des Ablagerungsraumes (GYGI 1969, BUSER 1952) nachgewiesen werden können, bewirkten möglicherweise in den zementierten Partien der Buntsandstein-Sedimente die Entstehung von Klüften. Dieser Vorgang der Klüftbildung

dauerte sicher auch während der zur Kreidezeit wirkenden Hebung des Schwarzwaldes und der Region der Nordschweiz an.

Durch diese Kluftbildung konnten erstmals Porenwässer aus den liegenden und hangenden Formationen in die Buntsandstein-Sedimente eindringen, vorhandene Mineralphasen teils auflösen und den neuen chemischen Verhältnissen entsprechende Phasen ausscheiden. Wie schon HOFMANN (1986) für die Bildung der Reduktionshöfe im liegenden Perm eine externe Herkunft der reduzierenden Porenlösung postuliert, weisen auch die in den Buntsandstein-Ablagerungen beobachteten Ereignisse im Zusammenhang mit der Erz- bzw. Reduktionshof-Bildung in dieselbe Richtung. Methanhaltige, CO₂-reiche Porenlösungen aus den liegenden Kohlen und bituminösen Seeablagerungen des Permokarbons begannen, wohl durch tektonische Bewegungen aktiviert, entlang von Störungszonen in die hangenden Sequenzen des Buntsandsteins zu migrieren.

Die in den jüngsten Mineralphasen Quarz III und Calcit III aus sekundären Flüssigkeitseinschlüssen ermittelte minimale Bildungstemperatur während der Spröddeformation, welche zwischen 90°C und 110°C liegt, kann nicht eindeutig datiert werden, da die heute messbaren Bohrlochtemperaturen im Buntsandstein nicht mehr als 71°C betragen (Schafisheim, 1490 m). Bei Verwendung der für die erste Quarzgeneration benutzten Werte (20°C Oberflächentemperatur, 48°C/km Gradient) würde die Spröddeformation in einem minimalen Tiefenbereich von 1450 m bis 1900 m entstanden sein; eine Versenkungstiefe, welche heute in Pfaffnau und Schafisheim erreicht wird. Diese minimale Versenkungstiefe bedeutet aber für die nördlichen Standorte wie Kaisten eine über 1000 m betragende Erosion. Mittels der Kathodenlumineszenz-Mikroskopie kann im Falle der Flüssigkeitseinschlüsse in der Probe aus Schafisheim (1484.36 m, Tf. 1e) aufge-

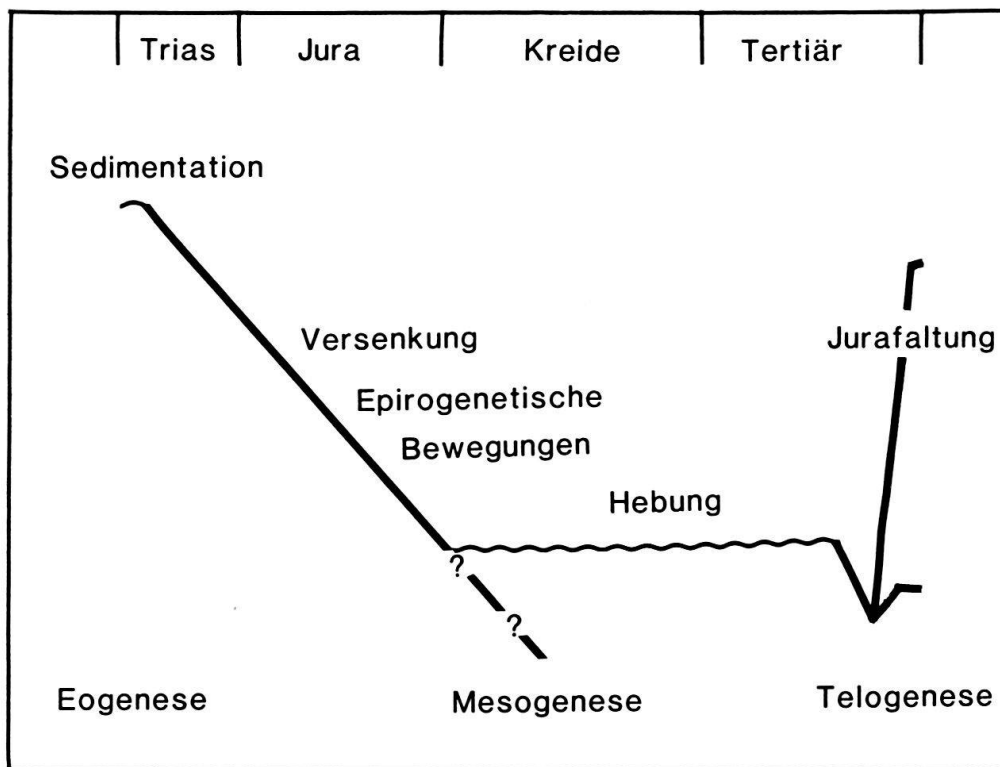


Fig. 4. Schematisches Absenkdigramm der Buntsandstein-Sedimente im Raum der Nordschweiz (nach DIEBOLD & MÜLLER 1985).

zeigt werden, dass diese Einschlüsse das Resultat einer subvertikal zur Schichtung angelegten spröden Deformation einer Kluft sind, welche sehr wahrscheinlich während der Jurafaltung den Buntsandstein überprägte. Eine frühere Bildung dieser Einschlüsse, etwa während der kretazischen Hebungsphase (Fig. 4), würde entweder einen erhöhten geothermischen Gradienten ($\geq 70^\circ\text{C}/\text{km}$) oder eine mächtige Kreideabfolge ($> 600\text{ m}$) bedingen.

Einfluss von epirogenetischen und tektonischen Bewegungen auf den Diageneseverlauf

Nach der Absenkung des Buntsandsteins während der Trias- und Jurazeit bis in Tiefen von etwa 1000 m erfolgte zur Kreidezeit eine Phase von Hebung und Erosion, welche bis ins Eozän andauerte (Fig. 4). Oligozän-miozäne Molasseablagerungen belegen eine weitere Phase der Absenkung. Während der anschliessenden Jurafaltung erfolgte wiederum eine lokal unterschiedliche Hebung und Erosion der Sedimente (MÜLLER et al. 1984). Diese epirogenetischen und tektonischen Vorgänge führten zur Bildung von Klüften und ermöglichten die Zufuhr von Porenwässern aus den liegenden und hangenden Einheiten in die Buntsandstein-Ablagerungen. Als Folge dieser Zufuhr reagierten einzelne Mineralphasen mit dem veränderten Porenwasser, was zur Bildung von sekundärer Lösungsporosität führte. In den Klüften kristallisierten sodann Silikate, Karbonate und Sulfate aus.

Die Bildung sekundärer Lösungsporosität ist somit eine direkte Antwort auf die durch epirogenetische und tektonische Bewegungen verursachten Veränderungen in der Porenwasserchemie.

Verdankungen

Für die Freigabe des Datenmaterials und der Einsicht in die Geologieberichte der einzelnen Tiefbohrungen möchte ich der Nagra herzlich danken. Herrn Dr. U. P. Büchi (Benglen) und der SEAG gilt mein Dank für die Erlaubnis, Probenmaterial der Erdölbohrung Pfaffnau 1 zu verwenden. Herrn Dr. H. Schmassmann (Liestal) bin ich für die Überlassung unpublizierter Mächtigkeitsangaben des Buntsandsteins im Untersuchungsgebiet zu Dank verpflichtet. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die anregenden Diskussionen danke ich den Herren Prof. Dr. A. Matter, Dr. H.-R. Bläsi, Dr. J. Walzebuck und S. Burley. Mein Dank geht auch an Frau L. Vogt-Fonatsch für die Schreibearbeit und Frau H. Haas für das Anfertigen der Figuren.

LITERATURVERZEICHNIS

- BUSER, H. (1952): Beiträge zur Geologie vom Blatt Bözen (Nr. 33) im schweizerischen Tafeljura. – Diss. Univ. Zürich.
- CADISCH, J. (1956): Über die Wiedererbohrung der Therme von Zurzach. – *Eclogae geol. Helv.* 49/2, 313–316.
- 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.
- FÜCHTBAUER, H., & MÜLLER, G. (1977): *Sediment-Petrologie, Teil II: Sedimente und Sediment-Gesteine* (3. Aufl.). – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GYGI, R. A. (1969): Zur Stratigraphie der Oxford-Stufe (oberes Jura-System) der Nordschweiz und des süddeutschen Grenzgebietes. – *Beitr. geol. Karte Schweiz* 136.
- HOFMANN, B. (1985): Mineralisation von Pb, Zn, Cu und As in der Trias des südöstlichen Schwarzwaldrandes. Das Kristallin an der oberen Wutach als Beispiel eines möglichen Liefergebietes von Sedimentmaterial und erzbildenden Elementen. – Unpubl. Lizentiatsarb. Univ. Bern.

- (1986): Small-scale multi-element accumulations in Permian red-beds of the Northern Switzerland. – *N. Jb. Mineral. [Mh.]* 8, 367–375.
- HOFMANN, F. (1981): Erläuterungen zum Bl. Nr. 74 Neunkirch des Geol. Atlas der Schweiz 1:25000. – Schweiz. geol. Komm.
- KEMPTER, E. H. K. (1987): Fossile Maturität, Paläothermogradienten und Schichtlücken in der Bohrung Weiach im Lichte von Modellberechnungen der thermischen Maturität. – *Ecolgae geol. Helv.* 80/2, 543–552.
- MADER, D. (1982): Genese des mitteleuropäischen Buntsandsteins. – *Naturwissenschaften* 69, 311–325.
- MATTER, A., & RAMSEYER, K. (1985): Cathodoluminescence Microscopy as a Tool for Provenance Studies of Sandstones. In: ZUFFA, G. G. (Ed.): *Provenance of Arenites* (S. 191–211). – NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences. D. Reidel Publishing Company.
- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 86-01 (im Druck).
- MATTER, A., PETERS, Tj., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Riniken – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 86-02 (im Druck).
- MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F., & WEISS, H.-P. (1987c): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 86-03 (im Druck).
- MÜLLER, W. H., HUBER, M., ISLER, A., & KLEBOTH, P. (1984): Erläuterung zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000. – Nagra, Technischer Bericht NTB 84-25.
- MULLIS, J. (1987): Ergebnisse der Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz. – *Ecolgae geol. Helv.* 80/2, 553–568.
- ORTLAM, D. (1970): Die Randfazies des germanischen Buntsandsteins im südlichen Schwarzwald. – *Geol. Jb.* 89, 136–164.
- (1974): Inhalt und Bedeutung fossiler Bodenkomplexe in Perm und Trias von Mitteleuropa. – *Geol. Rdsch.* 63, 850–884.
- PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H.-R., & GAUTSCHI, A. (1987a): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 85-02.
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 86-04 (im Druck).
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & MEYER, Chr. (1987c): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. – Nagra, Technischer Bericht NTB 86-05 (im Druck).
- RIEKE, H. H., & CHILINGARIAN, G. V. (1974): Compaction of argillaceous sediments. – *Dev. Sedimentol.* 16.
- RYF, W. (1984): Thermalwasserbohrung 1983 Engerfeld, Rheinfelden. – *Rheinf. Njbl.*, S. 35–52.
- SCHMASSMANN, H. J., & BAYRAMGIL, O. (1946): Stratigraphie, Petrographie, Paläogeographie der Perm-Formation im schweizerischen Tafeljura und die Steinkohlefrage der Nordschweiz. – *Tätber. natf. Ges. Basell.* 15, 17–117.
- SCHMASSMANN, H. J. (1974): Bericht an die Gemeinde von Kaiseraugst vom 25.10.1974.
- STELLRECHT, R. (1963): Über das Oberrotliegende im Gebiet der Schopfheimer Bucht. – *Jber. Mitt. oberrh. geol. Ver.* 45, 1–11.
- WALKER, T. R. (1967): Formation of Red Beds in Modern and Ancient Deserts. – *Bull. geol. Soc. Amer.* 78, 353–368.
- WILSER, J. (1913): Die Perm-Triasgrenze im Südwestlichen Baden. – *Ber. natf. Ges. Freiburg i. Br.* 20/1, 59–80.

Manuskript eingegangen am 5. Februar 1987

Revision angenommen am 3. März 1987

Tafel 1**Dünnschliffaufnahmen, Buntsandstein, Nordschweiz**

- a: Konkretionäre Caliche. K: Detritische Körner, Weiach, Diagonalschichtiger Sandstein (986.95 m), gekreuzte Polarisatoren, Balkenlänge 1 mm.
- b: Typisches Schliffbild von Karneol. Konkretionär (K), teils pseudomorph nach Dolomit (D) ausgebildeter, mehrphasiger, oft rötlich (R) verfärbter Chalcedon. Schafisheim, Karneolhorizont (1484.66 m), Balkenlänge 500 µm.
- c: Mesogenetische Kristallisations- und Lösungsabfolge, beginnend mit homoaxialem Quarz (Q), gefolgt von einer Lösungsporosität (P) in Kalifeldspatkörnern (F). Nach der Bildung sekundärer Porosität wurden noch Kaolinit (K) und Fe-Calcit (C) ausgeschieden. Kaisten, Diagonalschichtiger Sandstein (122.25 m), Balkenlänge 100 µm.
- d: Mesogenetisch auskristallisierte Zementphasen im Anschluss an die erste Lösungsphase. Sequenz: sekundäre Porosität–Kaolinit (K)–Quarz (Q)–Fe-Calcit (C)–Anhydrit (A). Pfaffnau, Diagonalschichtiger Sandstein (1821.60 m), gekreuzte Polarisatoren, Balkenlänge 100 µm.
- e: Subvertikal deformierte Calcitkluft. Hellere Farbtöne: Calcit, welcher nach der Spröddeformation auskristallisierte. Schafisheim, Diagonalschichtiger Sandstein (1485.75 m), Kathodolumineszenz-Aufnahme, Balkenlänge 250 µm.
- f: Grosse Lösungspore in Sandstein. Böttstein (311.78 m), Plattensandstein, Anschliff des Bohrkerns, Balkenlänge 2 mm.

