

**Zeitschrift:** Eclogae Geologicae Helvetiae  
**Herausgeber:** Schweizerische Geologische Gesellschaft  
**Band:** 80 (1987)  
**Heft:** 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"  
  
**Artikel:** Das Kristallin der Nordschweiz : Petrographie und hydrothermale Umwandlungen  
**Autor:** Peters, Tjerk  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-165997>

#### 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:** 24.01.2026

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

# Das Kristallin der Nordschweiz: Petrographie und hydrothermale Umwandlungen

Von TIERK PETERS<sup>1)</sup>

## ABSTRACT

The petrography of the crystalline basement of Northern Switzerland, which is overlain by a sedimentary cover, was studied from cores of deep drillings. The gneisses encountered mainly consist of metapelites, originating from illitic clays and biotite-plagioclase gneisses of dolomitic marl composition. They are interbedded with pyroxene-bearing lime silicate rocks and amphibolites interlain with aplitic gneisses, the latter being interpreted as bimodal volcanic tuffs. These gneisses, together with coarse-grained orthogneisses, were metamorphosed in upper amphibolitic facies up to anatexis. The gneisses are intruded by Variscan granites and a basic suite of diorites, monzonites and syenites. Several types of granites could be discriminated which are related to granites in the southern Black Forest. The slightly older basic rocks must have originated from an alkali basalt magma strongly enriched in K, P, Ba and Sr, to which, apart from mantle material, either the lower crust or a subduction component contributed.

Emphasis was laid on the study of the hydrothermal alterations which had affected the crystalline. Four stages could be recognised: 1. A pegmatitic-pneumatolytic phase characterised by the growth of muscovite at the expense of K-spar and biotite and by the occurrence of tourmaline. 2. A hot-hydrothermal stage, where the anorthite-rich cores of plagioclase were transformed into sericite, calcite and albite, and biotite transformed into chlorite, K-spar, a Ti-phase and fluorite. 3. The main hydrothermal stage, where plagioclase was argillised into illite/smectite interstratifications and illite or was albitised. 4. Calcite and quartz veins with clay minerals and associated fissures with siderite, celestite, baryte, sphalerite, galenite.

The two first phases are homogeneously distributed over the intrusive rocks, but vein-like in the gneisses, and are related to the cooling of the intrusions, as was confirmed by the radiometric ages of around 320 M. a. Mass balance calculations show the possibility that the fluids of these stages were rest fluids, trapped after cooling of the granitic melts. The main hydrothermal stage is restricted to cataclastic deformation zones in the gneisses as well as in the intrusives and are mainly Permian in age. The fluids show a development from medium salinity (5 weight % NaCl aeq.) at 300°C down to very low salinity at 100°C. With the low water/rock ratio, the mass balance and solubility calculations necessitate multiple circulations of the fluid from the fissures into the rock and vice versa. The calcite-quartz veins are the youngest phenomenon and were derived from highly saline NaCl- and CaCl<sub>2</sub>-rich solutions at temperatures of about 100°C.

## Einleitung

Der von der Nagra erbohrte kristalline Untergrund der Nordschweiz liegt in der Fortsetzung des südlichen Schwarzwaldes (Fig. 1), so dass ähnliche ältere Gneise und variszische Granite zu erwarten waren. Dies hat sich, ähnlich wie bei den älteren Bohrungen nach Kohle, Thermalwasser und Erdöl, weitgehend bestätigt. Es wurden allerdings auch Gesteinstypen angetroffen wie die Syenite und Monzonite, die im südlichen Schwarzwald nicht bekannt sind. Zu neuen Erkenntnissen ist man vor allem über die

<sup>1)</sup>Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität, CH-3012 Bern.

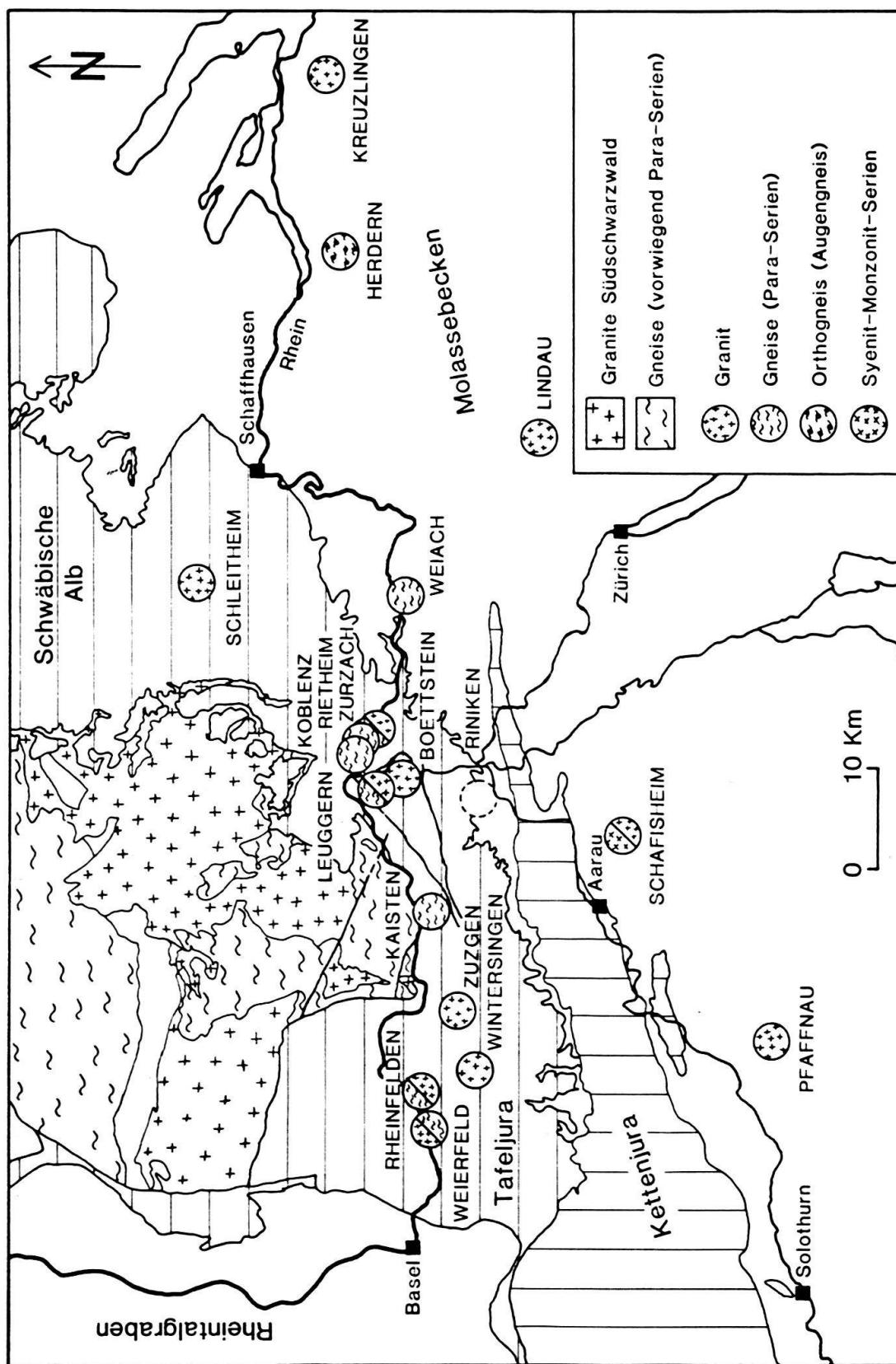


Fig. 1. Geologische Kartenskizze der Nordschweiz und des Schwarzwaldes mit den Lokalitäten der Tiefbohrungen, wo Kristallin erreicht wurde.

Umwandlungen gelangt, welche die metamorphen sowie die magmatischen Gesteine nach ihrer Erstarrung erlitten haben. Bis vor kurzem waren lediglich vage Vorstellungen über die früh- bis prätriadische Verwitterungsfläche auf dem Kristallin vorhanden. Die Untersuchungen an den Nagra-Tiefbohrungen (PETERS et al. 1987; PETERS et al. 1987a, b; MATTER et al. 1987a, c), auf denen diese Arbeit beruht, haben gezeigt, dass die alte Verwitterung das Kristallin nur wenige Meter tief erfasst hat. Dagegen sind die kristallinen Gesteine stellenweise stark von hydrothermalen Prozessen, über die bezüglich Art und Verbreitung bisher wenig bekannt war, beeinflusst worden. Die hydrothermalen Prozesse sind vor allem im Zusammenhang mit vulkanischer Tätigkeit, Erzlagerstätten, aber auch für die physikalischen Eigenschaften der Gesteine von Interesse. Durch die Möglichkeit, die verschiedensten Untersuchungsmethoden anzuwenden, hat man heute ein recht gutes Bild über diese hydrothermalen Umwandlungen.

## Petrographie

### Gneise

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Gneistypen aus den Bohrungen zusammengestellt. Vergleicht man diese Gneistypen mit den lithologischen Assoziationen im Schwarzwald (WIMMENAUER 1980), so ist vor allem die metapelitische Serie von Murgtal mit den kalksilikatischen Einlagerungen stark vertreten. Die Wechsellagerung von hellen aplithischen Gneisen mit Amphiboliten ist ein Kennzeichen der Serien von Peterstal und Zindelstein (mittlerer Schwarzwald). Für die in der Bohrung Weiach angetroffene monotonie Serie von fein- bis mittelkörnigen, z. T. Hornblende führenden Biotit-Plagioklas-gneisen gibt es kein Äquivalent im Südschwarzwald, aber im Mittelschwarzwald und in der Bohrung Urach III. Der starke Wechsel der Lithologien und die kalksilikatischen Einlagerungen deuten stark auf ursprünglich sedimentäre Serien hin. Eine sehr grosse Zahl von Haupt- und Spurenelementanalysen erlaubt es, die Ausgangsmaterialien näher zu charakterisieren. Das  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}$ -Diagramm von GARRELS & MACKENZIE (1971) erwies sich hierbei als sehr geeignet. In Figur 2 sind die

Tabelle 1: *Gneistypen in der Nordschweiz mit Angaben, in welchen Bohrungen sie angetroffen wurden.*

- 
- 1) Metapelite (Kaisten, Leuggern und Zurzach)
    - a) Sillimanit-Biotit-Gneise
    - b) Sillimanit-Cordierit-Gneise und migmatische Sillimanit-Cordierit-Biotit-Gneise
    - c) Cordierit-führende tonalitische Leukosome
  - 2) Biotit-Plagioklas-Gneise, z. T. Hornblende-führend  
(Weiach, Kaisten und Leuggern)
  - 3) Gebänderte, Hornblende-führende Serie (Kaisten und Leuggern)
    - a) Hornblende-Biotit-Plagioklas-Gneise
    - b) Amphibolite
    - c) helle aplithische Gneise
  - 4) Kalksilikatische Gesteine (Kaisten und Leuggern)
    - a) Klinopyroxen-Plagioklas-Felse
    - b) Kalksilikatfelse s. str.
    - c) Granat-Klinopyroxen-Plagioklas-Quarzite
  - 5) Orthogneise (Herdern)
-

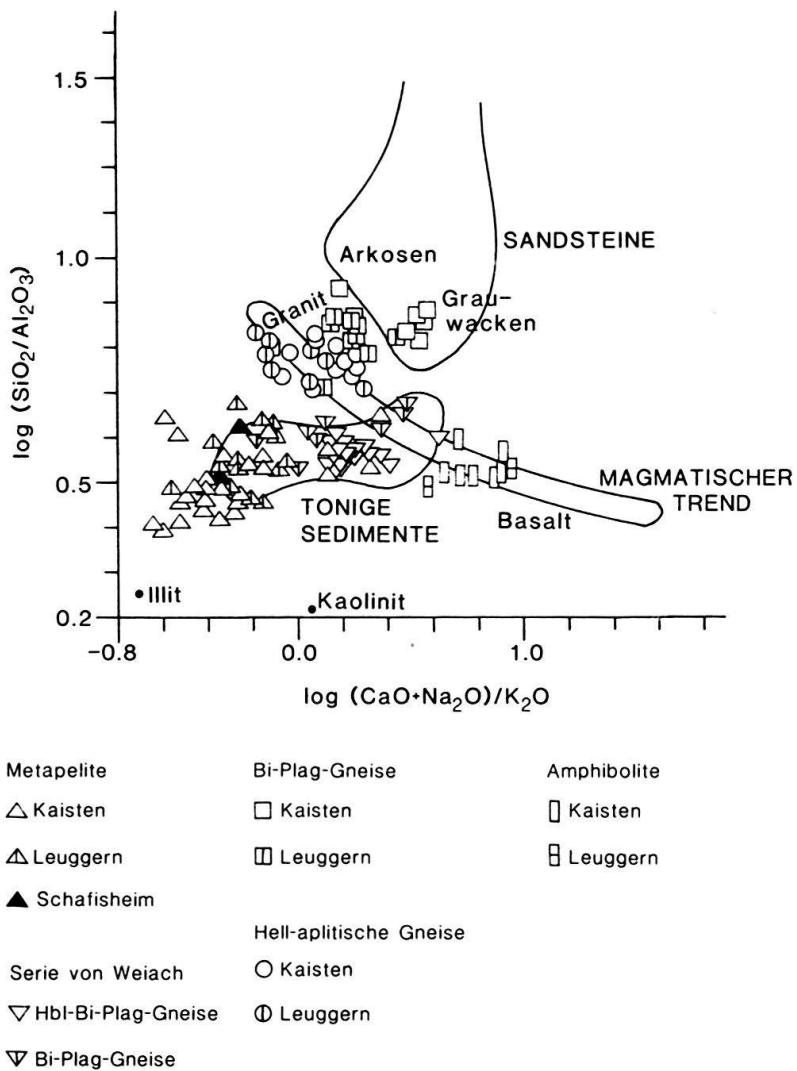


Fig. 2. Das  $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $\log(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}$ -Diskriminierungsdiagramm von GARRELS und MACKENZIE (1971) mit den analysierten Gneisen aus den Nagra-Bohrungen.

analysierten Gneise der Nordschweiz in diesem Diagramm dargestellt. Die Metapelite, die Biotit-Plagioklas- und Hornblende-Biotit-Plagioklas-Gneise von Weiach fallen in den Bereich der tonigen Sedimente. Die Metapelite sind extrem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{K}_2\text{O}$ -reich und dürften ursprünglich stark illitische Tone gewesen sein. Die Gneise von Weiach entsprechen im Chemismus marin Tonsteinen. (In Fig. 2 kommen ihre relativ hohen Mg-Gehalte nicht zum Ausdruck; diese dürften einerseits einen Hinweis auf Dolomit als ursprünglich karbonatische Komponente sein, andererseits könnten sie auch aus basischen Vulkaniten zugeführt worden sein, worauf auch die erhöhten Cr-, V- und Ni-Gehalte hindeuten.) Die Biotit-Plagioklas-Gneise in den Bohrungen Leuggern und Kaisten entsprechen mehr oder weniger tonigen Grauwacken. Die in 2–10 cm dicken Bändern wechseltlagernden Amphibolite und hellen aplitischen Gneise liegen in Figur 2 im Band der magmatischen Gesteine im Bereich andesitischer resp. rhyolithischer Gesteine. Es dürfte sich hier demnach um tuffogene Ablagerungen eines bimodalen Vulkanismus handeln. Alle diese Befunde werden durch weitere Haupt- und Spurenelement-Diskriminierungen bestätigt.

Die nicht in Figur 2 dargestellten sogenannten Orthogneise aus der Bohrung Herdern sind Kalifeldspat-Grobaugengneise von sehr homogenem Charakter und granitischem Chemismus. Sie lassen sich mit den Augengneisen im mittleren Schwarzwald vergleichen, die als Intrusionen von porphyrischen Granit-Intrusionen die gleiche amphibolitfazielle Metamorphose und Deformation erlitten haben wie die oben beschriebenen «Para»-Gneise.

Die amphibolitfazielle Metamorphose war zunächst druckbetont (Disthen-Relikte!), um anschliessend in ein höheres Temperaturregime zu gelangen, wo es bei 650–700 °C und 4 kb zu lokaler Migmatitbildung mit Bildung von Cordierit führenden Leukosomen kam (MAZUREK 1987). Zeugen einer richtigen Hochdruckmetamorphose, wie die Eklogite im mittleren Schwarzwald (KLEIN & WIMMENAUER 1984) sind bisher nicht gefunden worden. Die druckbetonte und temperaturbetonte Metamorphose ebenso wie die anschliessenden retrograden Umwandlungen können aufgrund unserer Untersuchungen als einzelner Zyklus und nicht als gesonderte (einzelne) Metamorphosen betrachtet werden.

### Granite

Wie in Figur 1 veranschaulicht, wurden in mehreren Bohrungen Granite angetroffen. Die in den Bohrungen Böttstein und Leuggern vorhandenen Biotit-Granite mit Kalifeldspat-Grosskristallen nehmen im Quarz-Alkalifeldspat-Plagioklas-Diagramm (Fig. 3) ein gleiches diskretes Feld ein, wogegen die mehr gleichkörnigen Hornblende führenden Granite der Bohrung Schafisheim sich davon deutlich abheben. Keiner dieser Granite

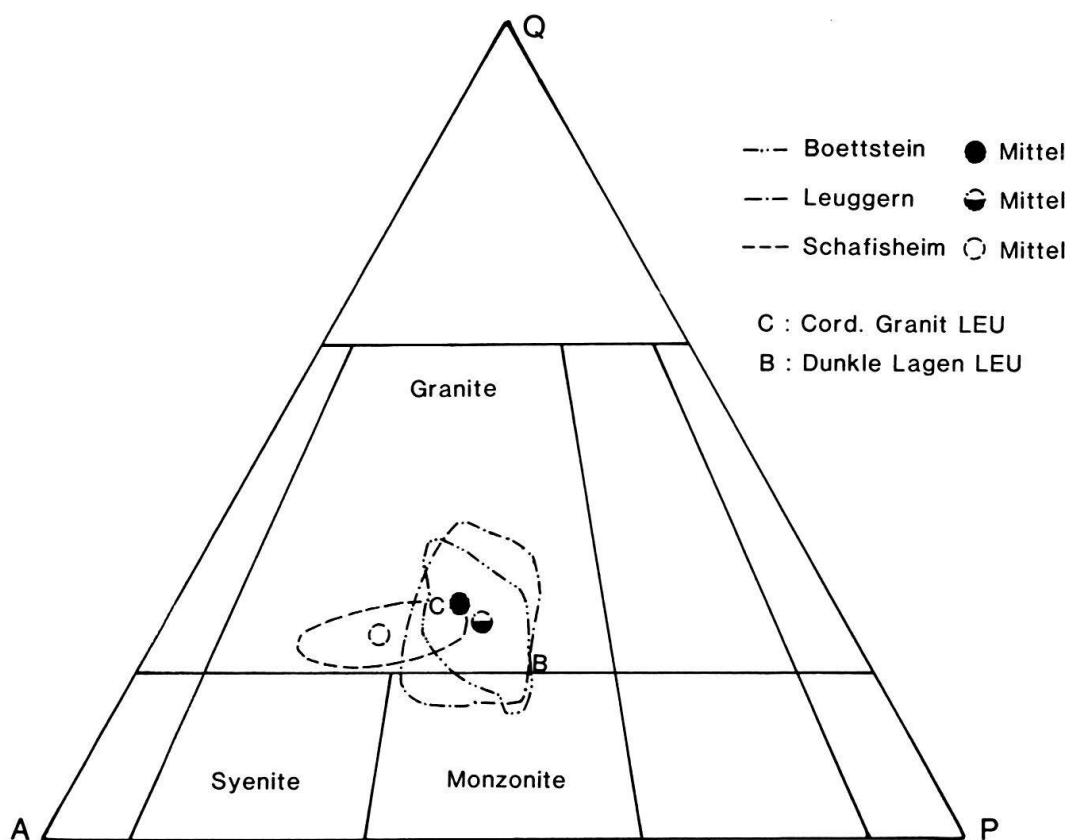


Fig. 3. Q (Quarz)-A (Alkalifeldspat)-P (Plagioklas)-Dreieck mit den Modalanalysen der Granite aus den Nagra-Bohrungen.

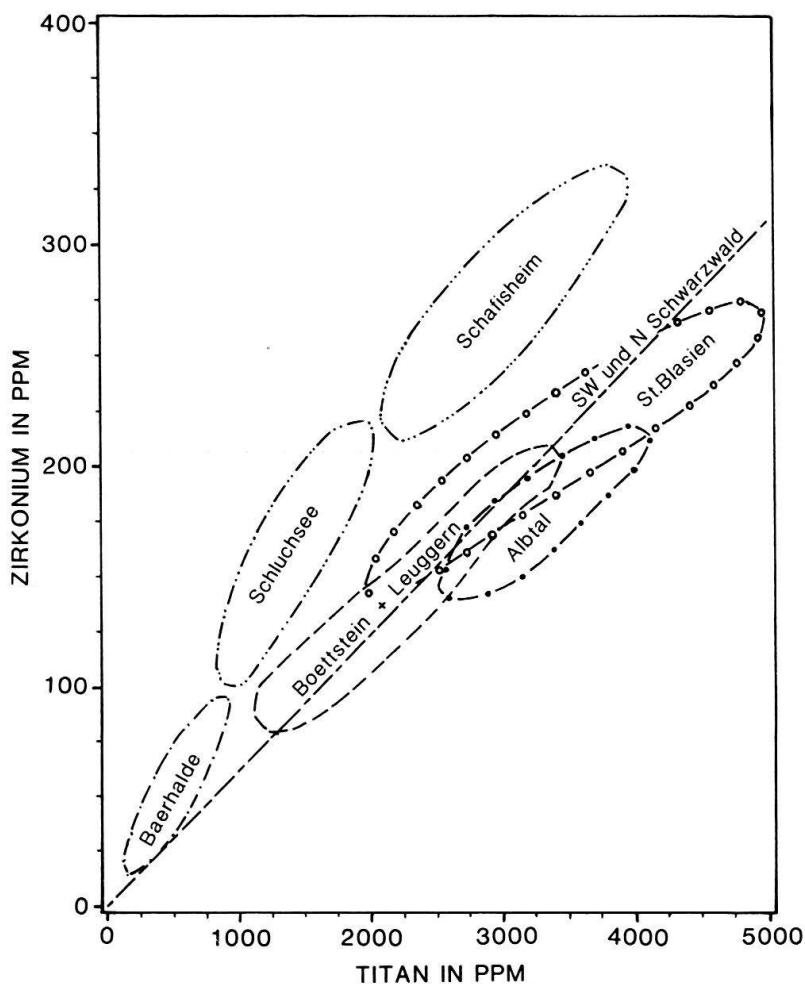


Fig. 4. Ti-Zr-Diagramm der analysierten Granite aus den Nagra-Tiefbohrungen. Zum Vergleich die Granite aus dem Schwarzwald.

kann direkt mit einem der Südschwarzwälder Granite verglichen werden. Das Ti-Zr-Diagramm hat sich im Schwarzwald (EMMERMANN 1972, 1977) bewährt zur Diskriminierung verschiedener Granite und Entwicklungstrends. Wie aus Figur 4 ersichtlich ist, liegen die Böttstein- und Leuggern-Granite im Trend der Granite von St. Blasien und Albthal und dürften eine Weiterentwicklung eines grösseren Batholiths darstellen. In diesem Diagramm heben sich die Granite von Schafisheim wieder deutlich ab.

Mit Ausnahme von Schafisheim führen die in der N-Schweiz erbohrten Granite immer geringere Mengen an Cordierit, was mit dem generellen Fehlen von primärem Muskovit auf ein niedriges Intrusionsniveau hindeutet. Das Intrusionsalter des Böttstein-Granites kann aufgrund der radiometrischen Altersbestimmungen (HUNZIKER et al. 1987) mit etwa 320 M. a. als mittleres Karbon angegeben werden.

#### Syenite-Monzonite-Diorite

In der Bohrung Schafisheim wurde eine petrographisch interessante Serie von Syeniten, Monzoniten und Dioriten erbohrt. Ähnliche Gesteine treten im nördlichen Schwarzwald (MOCHE 1979) und in den Vogesen (FLUCK 1980) unter dem Namen Durbachite auf.

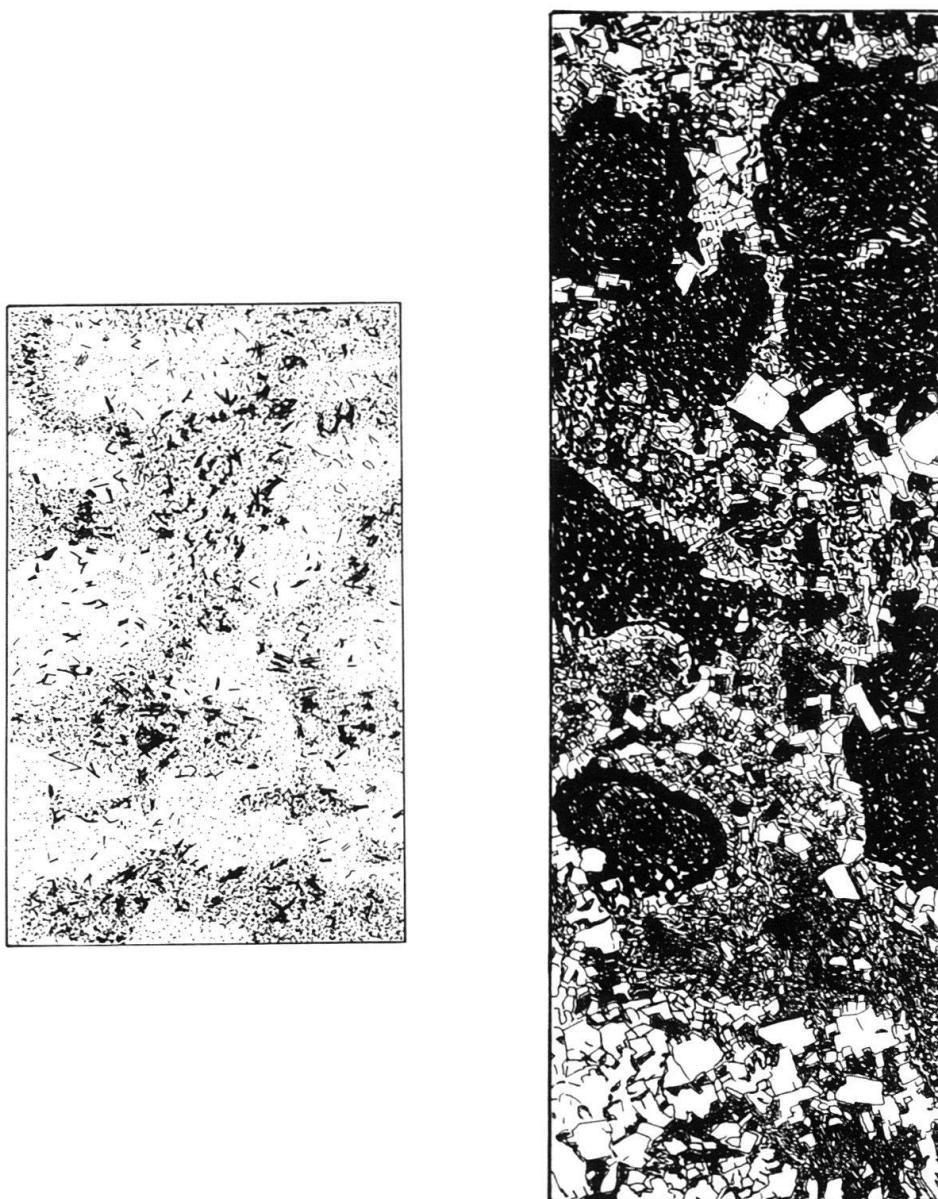


Fig. 5. a) Hornblende-Biotit-Syenit der Bohrung Schafisheim mit schlierigen Anreicherungen von Biotit und Hornblende (beide schwarz) und kalifeldspatreiche Partien (hell).  
 b) Klinopyroxen-Biotit-Diorit (dunkel) mit syenitischen Schlieren (helle Kalifeldspäte).

Makroskopisch fallen die Syenite und Monzonite durch ihre schlierigen Anreicherungen von Hornblenden und Biotiten (Fig. 5a) und durch wolkige Kalifeldspatkonzentrate auf. Die Diorite sind meist durch kalifeldspatreiche syenitische Schlieren und Schollen zerlegt (Fig. 5b). Aufgrund der mikroskopischen Beobachtungen ergibt sich folgende Ausscheidungsfolge der Mineralien: Zuerst Klinopyroxen (Px1 in Fig. 6a), dann eine erste Generation Biotit, der sich meist als kleine Einschlüsse in Klinopyroxen (2 in Fig. 6a) manifestiert. Es kann sich noch ein weiterer Klinopyroxen-Anwachssaum (3 in Fig. 6a) bilden. Eine zweite Generation Biotit mit vielen Apatit- und Zirkon-Einschlüssen bildet sich gleichzeitig mit Plagioklas und einer ersten Generation von Hornblende, die einen Teil des Klinopyroxens (1, 2 und 3) verdrängt. Die zweite Generation aktinolithischer Hornblende ist meist idiomorph ausgebildet und wird in einem Mosaik von Kalifeldspat

eingebettet (Fig. 6b). Quarz ist nur in ganz wenigen Proben vorhanden. Da die verschiedenen Generationen von Klinopyroxen (fast reiner Diopsid), Hornblende (Aktinolith bis aktinolithische Hornblende) und Biotit unter sich keine mineralchemischen Unterschiede zeigen, müssen sie bei der Erstarrung unter Bedingungen nahe dem Solidus einheitlich equilibriert worden sein. Der unterschiedliche Modalbestand bei sehr ähnlichem Gesamtgesteinschemismus der Syenite, Monzonite und Diorite könnte auf die H<sub>2</sub>O-konservierende Reaktion:

Biotit + 2 Diopsid + 4 SiO<sub>2</sub> = 1 Tremolit + 1 Kalifeldspat  
zurückzuführen sein. Das nötige SiO<sub>2</sub> würde in unserem Fall nicht aus Quarz, sondern aus der Restschmelze stammen.

Die chemischen Zusammensetzungen der Syenite, Monzonite und Diorite (Tabelle 2) sind charakterisiert durch gleichzeitig hohe MgO- und K<sub>2</sub>O-Gehalte bei niedriger SiO<sub>2</sub>-Konzentration. Bei den Spurenelementen sind die grossen Mengen an P, Ba und Sr

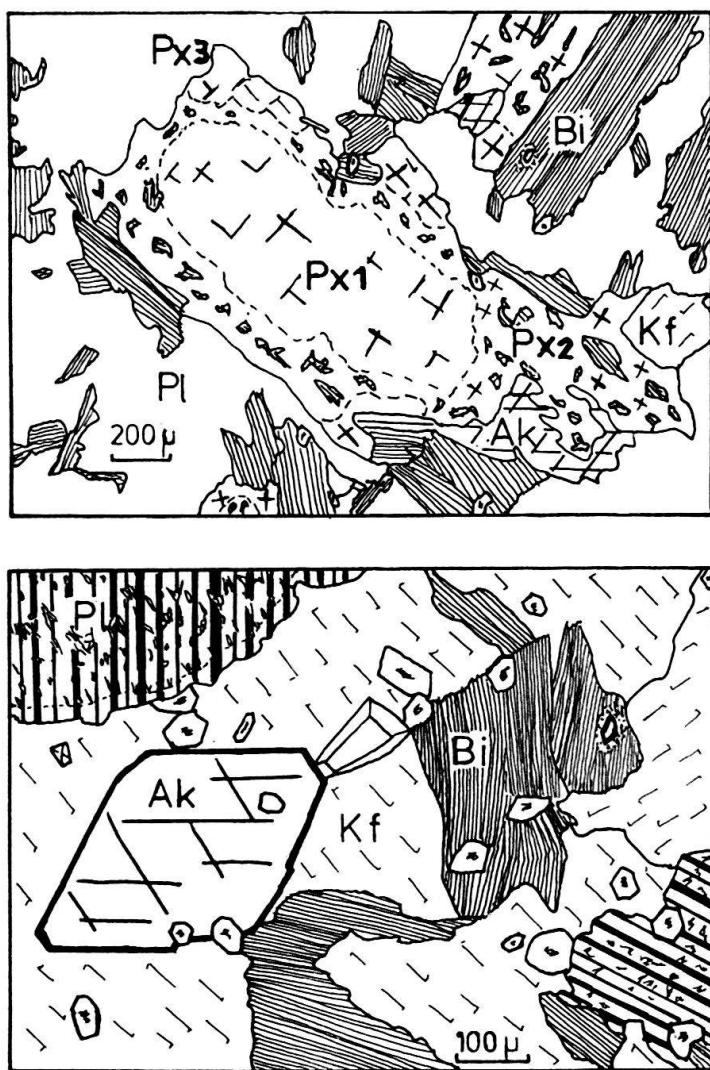


Fig. 6. a) Monzodiorit mit drei Generationen von Klinopyroxen (Px1, 2, 3) und zwei Generationen von Biotit (Bi) (feinkörnige Einschlüsse in Klinopyroxen und hypidiomorphe Kristalle in Plagioklas- (Pl) und Kalifeldspat- (Kf) Matrix. Eine erste Generation aktinolithische Hornblende (Ak) verdrängt Klinopyroxen.  
b) Monzonit. Eine zweite Generation idiomorph ausgebildete aktinolithische Hornblende neben Plagioklas, Kalifeldspat, Biotit. Reich an Apatit in idiomorpher Ausbildung.

Tabelle 2: *Geochemie der Diorite, Monzodiorite, Monzonite und Syenite. Durchschnittswerte der Haupt- und Spurenelementanalysen.*

| Anzahl Analysen                | Diorit<br>3 | Monzodiorit<br>5 | Monzonit<br>8 | Syenit<br>19 |
|--------------------------------|-------------|------------------|---------------|--------------|
| Gew. %                         |             |                  |               |              |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.3        | 49.1             | 50.1          | 49.3         |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.5         | 1.5              | 1.5           | 1.5          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.1        | 14.8             | 14.3          | 12.5         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.2         | 2.0              | 1.8           | 1.8          |
| FeO                            | 6.5         | 6.3              | 5.9           | 5.9          |
| MnO                            | 0.15        | 0.14             | 0.14          | 0.14         |
| MgO                            | 8.2         | 7.9              | 7.7           | 10.1         |
| CaO                            | 6.2         | 5.5              | 5.7           | 6.1          |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.2         | 3.3              | 2.7           | 1.5          |
| K <sub>2</sub> O               | 4.4         | 4.8              | 5.1           | 6.2          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1.5         | 1.5              | 1.5           | 1.6          |
| H <sub>2</sub> O               | 2.2         | 2.0              | 2.0           | 1.8          |
| CO <sub>2</sub>                | 0.0         | 0.4              | 0.4           | 0.5          |
| ppm                            |             |                  |               |              |
| Nb                             | 30          | 28               | 24            | 27           |
| Zr                             | 454         | 491              | 465           | 437          |
| Y                              | 47          | 44               | 41            | 46           |
| Sr                             | 1350        | 1334             | 1427          | 1023         |
| U                              | 12          | 11               | 14            | 13           |
| Rb                             | 244         | 246              | 259           | 280          |
| Th                             | 22          | 28               | 26            | 24           |
| Pb                             | 23          | 28               | 31            | 30           |
| Ga                             | 20          | 21               | 20            | 20           |
| Zn                             | 132         | 132              | 114           | 122          |
| Cu                             | 34          | 33               | 32            | 25           |
| Ni                             | 148         | 131              | 138           | 256          |
| Co                             | 46          | 45               | 45            | 50           |
| Cr                             | 320         | 280              | 298           | 550          |
| V                              | 272         | 247              | 255           | 276          |
| Ce                             | 205         | 194              | 189           | 208          |
| Nd                             | 132         | 139              | 121           | 126          |
| Ba                             | 3732        | 4197             | 3763          | 4333         |
| La                             | 145         | 141              | 140           | 150          |
| Sc                             | 35          | 34               | 37            | 37           |

auffallend. Es handelt sich um shoshonitische, alkalibasaltische Zusammensetzungen, die vielen lamprophyrischen Magmen ähnlich sind. Das «Spider»-Diagramm (Fig. 7), interpretiert nach PEARCE (1983), ergibt für die Ausgangsschmelze der Syenite, Monzonite und Diorite, nebst einer partiellen Schmelzkomponente aus dem Mantel, noch einen grossen Anteil, den PEARCE als Subduktions-Komponente beschreibt. Es fragt sich, ob diese typischen Krustenelemente nur mit einer tiefen Subduktion und Infiltration des überliegenden Mantels mit Elementen wie K, P, Ba und P oder auch auf andere Art in die Magmen gelangen konnten; man findet diese K-betonten Alkalimagmen doch vor allem in Riftgebieten in kontinentalen Platten. Dass an den ursprünglichen Magmen Mantel- und Krustenmaterial beteiligt war, wird durch das <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-Verhältnis von 0,708 (HUNZIKER & PETERS 1987b) gestützt (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-Mantel: < 0,705, Kruste > 0,710).

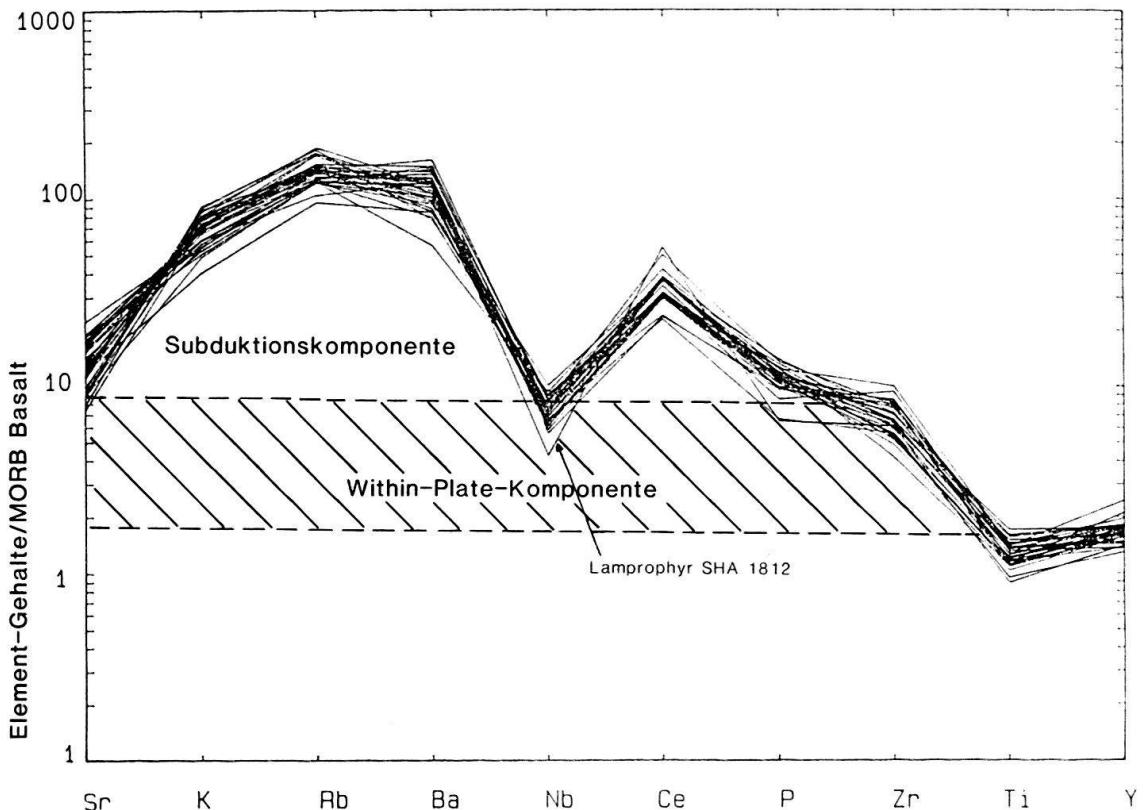


Fig. 7. «Spider-Diagramm» (nach PEARCE 1983) der Syenite, Monzonite und Diorite der Bohrung Schafisheim, zeigt den Anteil der partiellen Schmelze aus dem Mantel (within-plate-Komponente) und Subduktionskomponente. Die Gehalte der einzelnen Elemente werden durch die entsprechenden Gehalte eines Standardbasaltes (MORB) geteilt und die Quotienten als Abszisse dargestellt.

Diese Serie ist nach den radiometrischen Altersbestimmungen (HUNZIKER & PETERS 1987b) rund 320 M. a. alt und muss somit kurz vor dem Granit, der nach den Verbandsverhältnissen jünger ist, intrudiert sein.

### Hydrothermale Umwandlungen

Die Vertonung der Plagioklase, die Vergrünung der Biotite und die Rotfärbung der Feldspäte sind wohl die am ehesten ins Auge fallenden Erscheinungen der hydrothermalen Umwandlungen. Die detaillierte optische und chemische Untersuchung hat aber eine ganze Abfolge von Umwandlungsstadien erkennen lassen. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Stadien zusammengestellt, wobei angegeben wird, ob das Gestein als Ganzes erfasst wurde oder ob die Umwandlungen an kataklastische Störungszonen und Klüfte gebunden sind.

Tabelle 3: Stadien der hydrothermalen Umwandlung (mit den wichtigsten Mineralien).

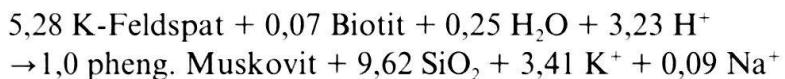
|  | in den Graniten  | in den Gneisen    |
|--|------------------|-------------------|
| 1) Pegmatitisch-pneumatolytische Phase; Muskovit-Turmalin-Bildung      | homogen          | an Störungszonen- |
| 2) Heiss-hydrothermale Phase; Chlorit-, Serizit-, Kalifeldspat-Bildung | verteilt         | und Klüfte        |
| 3) Hydrothermale Phase; Illit/Smektit-Wechsellagerungen, Albitisierung | an Störungszonen | gebunden          |
| 4) Calcit-Quarz-Klüfte   | und Klüfte       | gebunden          |

### *Pegmatitisch-pneumatolytische Phasen*

Es können zwei zeitlich und örtlich verschiedene pegmatitisch-pneumatolytische Phasen unterschieden werden. Die erste ist der retrograde Ausläufer der prävariszischen Regionalmetamorphose und nur in den Gneisen erkennbar. Bei der zweiten handelt es sich um eine Spätphase der Granit-Intrusionen, die vor allem in den Graniten ausgebildet ist.

Die erste, pegmatitisch-pneumatolytische Phase hat sich vor allem in einer Muskovitisierung der Kalifeldspäte und Cordierite in den pelitischen Gneisen ausgewirkt (vgl. MAZUREK 1987). Die turmalinreichen Quarzadern gehören ebenfalls zu dieser Phase, ebenso die Imprägnation mit Arsenkies und, etwas untergeordnet, Pyrrhotin. Vor allem in den Amphiboliten bildeten sich Scheelitlagen.

Bei der zweiten pegmatitisch-pneumatolytischen Phase bildete sich in den Graniten sowohl phengitischer Muskovit auf Kosten von Kalifeldspat als auch, in geringeren Mengen, auf Kosten von Biotit. Diese Umwandlung ist homogen durch den Granit verteilt, nur die gleichzeitig entstandenen Muskovit und Turmalin führenden Pegmatite treten als diskrete, planare Elemente oder als unregelmäßige, schlierige Gebilde auf. In den Gneisen ist die Beeinflussung durch diese Phase schwierig nachweisbar, da sie ähnlich ist wie diejenige der ersten pegmatitisch-pneumatolytischen Phase. Mit Hilfe der mit der Röntgenmikrosonde bestimmten Zusammensetzungen der Ausgangsmineralien und sekundären Mineralien lässt sich, bei Annahme von Al-Konstanz (mit Volumen-Konstanz erhält man praktisch die gleichen Resultate), folgende gekoppelte Reaktion aufstellen:



Hierbei werden 95 % des vorhandenen Muskovits auf Kosten von Kalifeldspat gebildet und ein geringer Teil nach Biotit. Für die im Gestein vorhandenen 1–2 % Muskovit werden bei 3 kb und 450 °C nur 0,4–0,8 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O auf 1000 cm<sup>3</sup> Gestein benötigt. Diese Menge ist nur ein Teil des bei der Kristallisation einer mit H<sub>2</sub>O gesättigten Granitschmelze freiwerdenden Wassers und könnte bei der Erstarrung noch auf den Intergranularen und in den Poren zur Verfügung stehen. Wegen der geringen Löslichkeit der Elemente ist ein zyklischer Prozess notwendig, wobei das gleiche Fluid mehrmals zwischen den gleichen Mineralkörnern zirkuliert. Als Temperaturbereich kann für dieses Stadium die Solidustemperatur des Granits hinunter bis zu 400 °C (aus dem Feldspatthermometer nach FERRY (1978)) angegeben werden. Aus den fluiden Einschlüssen sind wenig Angaben über dieses Stadium vorhanden (MULLIS 1987); durch Extrapolation der verfügbaren Daten (Fig. 8) kann auf Salzgehalte von rund 8 Gew. % NaCl Äquivalent geschlossen werden.

### *Heiss-hydrothermale Phase*

Die heiss-hydrothermale Phase macht sich makroskopisch durch die Vergrünung der Biotite und durch eine blassgrüne Färbung der Plagioklasse bemerkbar. Hierbei wird der Biotit chloritiert, wobei sich teilweise Kalifeldspat, entweder als Linsen zwischen Biotit/Chlorit-Paketen oder in der unmittelbaren Umgebung, sowie Titanit oder Anatas und Fluorit ausscheiden. Die Plagioklase werden teilweise serizitisiert, was von Calcit- oder Prehnit-Ausscheidungen und Albit-Bildung begleitet wird und in den zonar gebau-

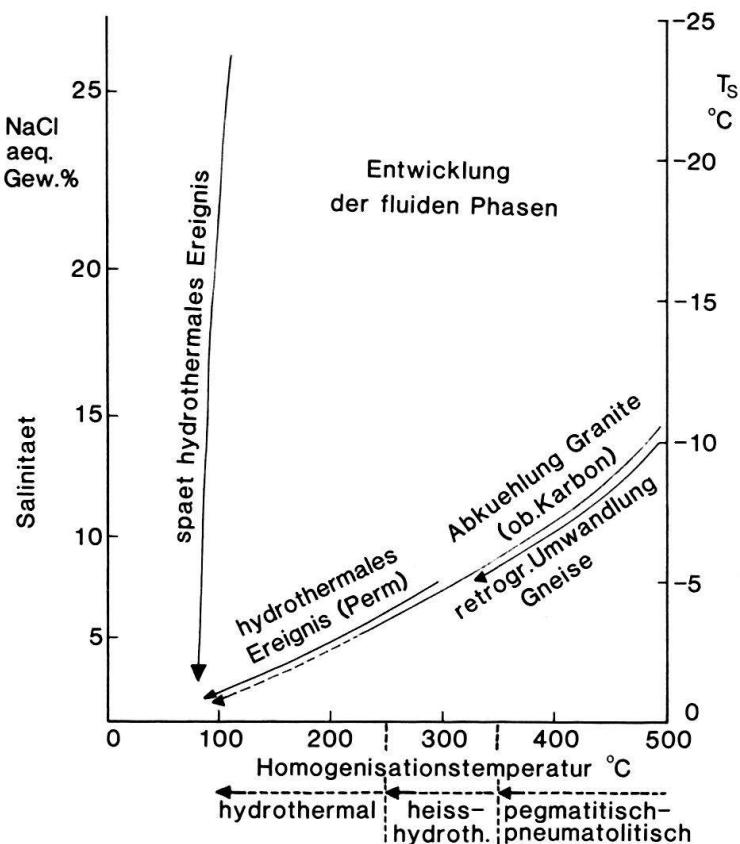
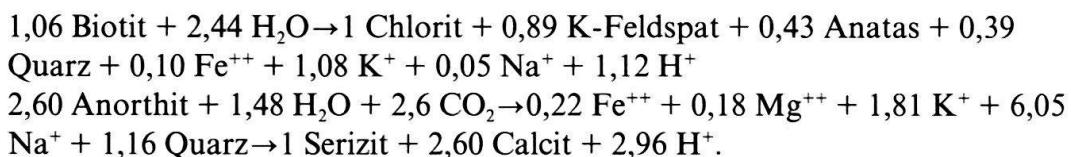


Fig. 8. Schematische Darstellung der Entwicklung der fluiden Phasen aufgrund der fluiden Einschlüsse nach MULLIS (1987) und die petrogenetische Interpretation.

ten Plagioklasen der Granite vor allem auf den Kern konzentriert ist. Vielfach bildet sich in Plagioklas fleckenweise Kalifeldspat, und der Serizit wird begleitet von kleinen Mengen Chlorit. Die Kalksilikatfelsen sind sehr empfindlich auf die Umwandlungen, und es bilden sich auf Kosten von Klinopyroxen Chlorit, Titanit und z. T. Calcit, auf Kosten von Hornblende Chlorit, Titanit und Calcit, zudem bilden sich Prehnit und Hornblende sowie etwas Epidot und Klinozoisit. In den Gneisen von Weiach ist die Bildung von Prehnit ( $\pm$ Pumpellyit) sehr ausgeprägt.

Cordierit und Sillimanit werden serizitiert und vielfach werden Arsenkies und Pyrohotin durch Pyrit verdrängt.

In den Graniten von Böttstein und Leuggern sind der Grad der Chloritisierung der Biotite und der Grad der Serizitisierung der Plagioklase stark miteinander verknüpft. Stellt man mit Hilfe der Zusammensetzung der beteiligten Edukte und Produkte Reaktionsgleichungen auf, wie nachstehend für die Mineralien im Granit von Böttstein, so würden die modalen Mengen Serizit und Calcit gut übereinstimmen:



Koppelt man beide Reaktionen, so müsste mehr Biotit chloritiert sein (56–75%) als meistens modal bestimmt (20–30%). Es muss also noch ein Teil des Kaliums für die

Serizitisierung aus einer andern Quelle stammen, wie z. B. aus einer Austauschreaktion von Na-haltigen Fluids mit  $KAlSi_3O_8$ . In den Biotit-Gneisen und auch in den biotitreichen Syeniten ergibt sich dieses Problem nicht, und es stünde sogar noch  $K^+$  für eine Kalifeldspatisierung der Plagioklase zur Verfügung.

Der Zeitpunkt dieses Stadiums ist gegeben durch die radiometrischen K/Ar-Datierungen an verschiedenen stark chloritisierten Biotiten, in den Graniten von Böttstein, die die gleichen Alter von 300 bis 330 M. a. ergaben. Somit muss die Chloritisierung vor dem Abkühlen unter der «Blocking»-Temperatur von Biotit stattgefunden haben. Dieses Stadium der Umwandlung hat somit beim Abkühlen der Granite kurz nach deren Intrusion stattgefunden. In den Gneisen von Weiach (HUNZIKER & MEYER 1986) sind diese Biotit/Chlorit-Alter gleich, so dass die Chloritisierung der Biotite in den Granitkörpern und in den sie umhüllenden Gneisen gleichzeitig stattgefunden hat. Eine petrographische Evidenz für dieses Verhalten ist die starke Chloritisierung in Gneisen unmittelbar neben Aplitgängen, die aus den Graniten stammen dürften. Mit dieser «Blocking»-Temperatur hat man gleichzeitig eine untere Temperaturlimite dieses Stadiums von 300 °C. Die fluiden Einschlüsse mit Homogenisationstemperaturen in diesem Bereich ergeben Gesamt-Salzgehalte von etwa 6,5 Gew. % NaCl aeq. (Fig. 8).

Aus den obigen Gleichungen berechnete, für die Reaktionen notwendige Mengen  $H_2O$  von 10 bis 20 cm<sup>3</sup> pro 1000 cm<sup>3</sup> Gestein könnten bei der Abkühlung in den Graniten durchaus noch vorhanden sein. Das gleiche  $H_2O$  müsste allerdings mehrmals zwischen den Mineralkörnern zirkulieren, um bei den niedrigen Löslichkeiten die nötigen Ionen von Reaktionsort zu Reaktionsort zu transportieren. Dies ist für dieses Stadium in Figur 9 schematisch illustriert. Für die Gneise muss eine andere  $H_2O$ -Quelle existiert haben. Wahrscheinlich handelte es sich um Tiefengrundwässer, die in den Gneisen zirkulierten. Damit wäre auch erklärt, weshalb die Umwandlungen dieser Phase in den Gneisen an Störungszonen gebunden sind und sie die Granite homogen erfassten.

#### *Vertonungsphase (Illitierung/Albitisierung)*

Die Vertonungsphase ist sowohl in den Graniten wie auch in den Gneisen an kataklastische Störungszonen und Klüfte gebunden. Ihr makroskopisch auffallendes Merkmal

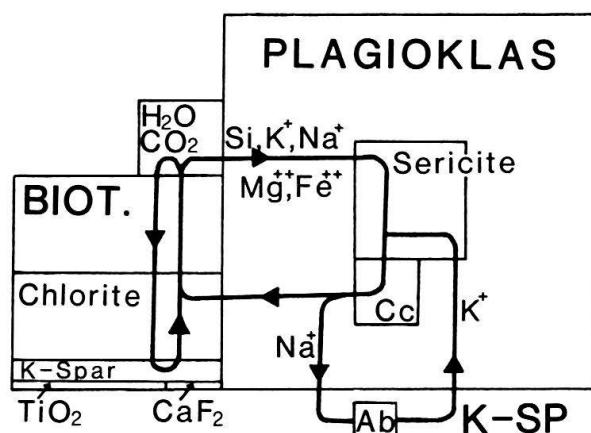


Fig. 9. Schematische Darstellung der Ionenbewegungen während der heißen hydrothermalen Phase. Die Grösse der Felder ist proportional zu den modalen Mengen. Die primären Minerale sind mit Großschrift und die sekundären mit Kleinschrift bezeichnet. Die Linien mit Pfeilen bezeichnen ein zirkulierendes Fluidsystem.

ist in den Gneisen und den meisten Graniten die Vertonung der Plagioklase oder die auf einzelne Granite oder Gesteinspartien beschränkte komplette Albitisierung der Plagioklase. In den zonaren Plagioklasen der Granite beschränkt sich die Vertonung häufig auf die anorthitreiche Kernpartie, und der Albitrand bleibt erhalten.

Die bei der Vertonung gebildeten Tonminerale sind verschiedener Natur, aber es überwiegen Illit und regelmässige Illit/Smektit-Wechsllagerungen. In unmittelbarer Umgebung der Klüfte kann sich eine Zone mit dioktaedrischem Chlorit oder Kaolinit bilden (PETERS & HOFMANN 1984). Ganz anderer Art ist die Umwandlung z. B. in den Graniten der Bohrung Schafisheim, wo die Plagioklase einheitlich in Albit umgewandelt sind. Eine solche Albitisierung tritt in den andern erbohrten Graniten und Gneisen nur an einzelnen Klüften auf. Der Granit von Triberg im mittleren Schwarzwald zeigt nach eigenen Beobachtungen über grosse Gebiete eine ähnliche Albitisierung ohne starke Vertonung.

Im unmittelbaren Einflussbereich der Klüfte und Störungszonen sind die Biotite entweder illitisiert oder in regelmässige Chlorit/Smektit-Wechsllagerungen umgewandelt. Die Hornblenden und Klinopyroxene werden bei der Vertonung in Calcit, Chlorit und Illit umgewandelt. Cordierit wird vor allem durch Illit und Chlorit in wurmartigen Gebilden verdrängt. In den Metapeliten wird Sillimanit illitisiert. Ein Teil der Hämatit-Bildung dürfte auch zur Vertonungsphase gehören; sie ist allerdings eher auf die obersten paar hundert Meter des Kristallins beschränkt, was vor allem in der Bohrung Böttstein (PETERS et al. 1985) im  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ -Verhältnis des Gesamtgesteins gut zum Ausdruck kommt. Die Ausbildung der Hämatite variiert stark: von einer feinen Bestäubung der Feldspäte über schlierige Anreicherungen in kataklastischen Störungszonen zu rundlichen Aggregaten (pseudomorph nach Pyrit?), als derbe Massen in Klüften oder freiwachsend in Drusen (evtl. späteres Stadium). Die Vertonungsphase ist begleitet von Kluftfüllungen, wobei Illit und Quarz dominieren, aber auch Calcit und andere Tonminerale oder Akzessorien beteiligt sein können. Hierzu gehören vor allem das Ce-La-Al-Phosphat/Arsenat Florencit und Siderit sowie auch die von HOFMANN (1985) beschriebenen Paragenesen mit u. a. ged. Arsen, ged. Wismut, Fahlerze, Safflorit, Löllingit, Brannerit und Pechblende.

Die in der Bohrung Böttstein festgestellte tonmineralogische Zonierung in den umgewandelten Plagioklasen und um die Klüfte (PETERS & HOFMANN 1984) ist in den andern Bohrungen weniger einheitlich ausgeprägt; so wurden in Leuggern verschiedenartige Zonierungen um Klüfte beobachtet. Es ist anzunehmen, dass sich mehrere Phasen der Vertonung überlagerten, was auf die längere Dauer dieses Prozesses als z. B. der pneumatolytischen Phase bei der Abkühlung der Granite zurückzuführen ist. So ist die Bildung von Kaolinit in den Klüften der Bohrung Kaisten jünger als die der Illite.

Der statistische Vergleich zwischen einer grossen Zahl von Haupt- und Spurenelementanalysen von frischen und von der Vertonungsphase beeinflussten Gesteinen ergab folgende Veränderungen: In den hydrothermal umgewandelten Graniten wird  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Sr, Ba und im oxidierten Teil U abgereichert. Lokal ist eine Anreichung von Co und Ni, aber vor allem von As feststellbar. In den Gneisen sind die hydrothermalen Veränderungen wegen ihrer grösseren primären Unterschiede viel schwieriger erkennbar; signifikante Abnahmen zeigen  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ , Sr und teilweise Ba, Zunahmen stellt man bei  $\text{K}_2\text{O}$  und Rb fest.

Die Temperaturen, geschätzt aus den Tonmineralparagenesen, Erzmineralien und Fluideinschlüssen (MULLIS 1987), ergeben einen Bereich von 250 bis 150 °C. Nach der

Liquidustemperatur der fluiden Einschlüsse betrug die Salinität bei 250 °C 3,5 Gew. % NaCl aeq. und bei 100 °C noch 1,0 Gew. % NaCl aeq., mit einer Häufung bei 200 °C mit 2,5 Gew. % NaCl aeq. Ausgehend von dieser totalen Molarität (etwa 0,5 n) lässt sich mit Hilfe des Programmes PATH (PERKINS 1980) die Zusammensetzung der Fluids, die in den Klüften zirkulieren, berechnen. Hierzu müssen die Phasen bekannt sein, die mit diesem Fluid im Gleichgewicht waren. Neben Quarz, Albit, Kalifeldspat, Calcit, Chlorit, Fluorit und Baryt wurde mit Illit, mit der Zusammensetzung K(7)Mg(2)Al(19)Si(27)O(96)H(16) gerechnet. Die notwendigen thermodynamischen Daten wurden mit einem idealen Mischungsmodell aus den Komponenten Muskovit, Celadonit und Pyrophyllit gerechnet. Das Resultat ist in Tabelle 4 aufgeführt. Die Sauerstoffisotopen-Untersuchungen von HAMMERSCHMIDT (1985) ergaben niedrige Wasser/Gesteinsverhältnisse für die Phase im Granit der Bohrung Böttstein. Um die nötigen Ionen von den Klüften ins Gestein und umgekehrt transportieren zu können, müsste das gleiche Fluid mehrmals zwischen den Klüften und dem Gestein zirkuliert haben. Mit K/Ar- und Rb/Sr-Bestimmungen wurde ein permisches Alter für die Vertonungsphase gefunden (HUNZIKER et al. 1985). Der Bereich der K/Ar-Alterswerte von Illit von 270–230 M. a. zeigt, dass die Vertonungsphase über eine recht grosse Zeitspanne angedauert hat.

Tabelle 4: Mit dem Programm PATH berechnete Fluid-Zusammensetzung während der Vertonungsphase.

| Spezies                                      | Molarität     | Log. Mol. | Aktivität     | Randbedingungen |                  |           |
|--|---------------|-----------|---------------|-----------------|------------------|-----------|
| Al <sup>+++</sup>                            | 0.68153D - 14 | - 14.167  | 0.19795D - 15 | Temperatur      | 200 °C           |           |
| K <sup>+</sup>                               | 0.25113D - 01 | - 1.600   | 0.12524D - 01 |                 |                  |           |
| Na <sup>+</sup>                              | 0.48496D + 00 | - 0.314   | 0.26629D + 00 | Lösungsmittel   | H <sub>2</sub> O |           |
| Ca <sup>++</sup>                             | 0.10774D - 02 | - 2.968   | 0.14140D - 03 |                 |                  |           |
| Mg <sup>++</sup>                             | 0.15466D - 04 | - 4.811   | 0.28907D - 05 | Elektrische     |                  |           |
| F <sup>-</sup>                               | 0.55589D - 03 | - 3.255   | 0.30524D - 03 | Neutralität mit | Cl <sup>-</sup>  |           |
| Ba <sup>++</sup>                             | 0.23579D - 05 | - 5.627   | 0.18130D - 06 |                 |                  |           |
| H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>              | 0.39939D - 02 | - 2.399   | 0.39939D - 02 | Molarität       | Cl               | 0.5 mol   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                | 0.27172D - 02 | - 2.566   | 0.20893D - 03 | Molarität       | Ca               | 0.015 mol |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                | 0.11437D - 06 | - 6.942   | 0.10297D - 07 | Molarität       | SO <sub>4</sub>  | 0.005 mol |
| Cl <sup>-</sup>                              | 0.50021D + 00 | - 0.301   | 0.24945D + 00 |                 |                  |           |
| OH <sup>-</sup>                              | 0.36717D - 05 | - 5.435   | 0.19277D - 05 | pH              |                  | 5.7       |
| H <sup>+</sup>                               | 0.28133D - 05 | - 5.551   | 0.19953D - 05 |                 |                  |           |
| H <sub>2</sub> O                             | 0.55508D + 02 | 1.744     | 0.97834D + 00 |                 |                  |           |
| Al(OH) <sup>++</sup>                         | 0.51478D - 09 | - 9.288   | 0.67563D - 10 | Phasen          |                  |           |
| Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>             | 0.18731D - 05 | - 5.727   | 0.10285D - 05 |                 |                  |           |
| KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>                | 0.12530D - 02 | - 2.902   | 0.65785D - 03 | alpha-Quarz     |                  |           |
| NaCl   | 0.29113D - 01 | - 1.536   | 0.32569D - 01 | Tief-Albit      |                  |           |
| CaCO <sub>3</sub>                            | 0.43344D - 06 | - 6.363   | 0.48489D - 06 | K-Feldspat      |                  |           |
| CaSO <sub>4</sub>                            | 0.42221D - 03 | - 3.374   | 0.47232D - 03 | Chlorit         |                  |           |
| MgSO <sub>4</sub>                            | 0.52066D - 03 | - 3.283   | 0.58246D - 03 | Illit           |                  |           |
| H <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | 0.49731D - 07 | - 7.303   | 0.27308D - 07 | Barit           |                  |           |
| HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>                | 0.86913D - 04 | - 4.061   | 0.47725D - 04 | Fluorit         |                  |           |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | 0.47198D - 02 | - 2.326   | 0.26960D - 02 |                 |                  |           |
| H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>               | 0.16053D + 00 | - 0.794   | 0.17959D + 00 |                 |                  |           |
| HCl  | 0.10365D - 06 | - 6.984   | 0.11595D - 06 |                 |                  |           |
| Mg(OH) <sup>+</sup>                          | 0.82328D - 06 | - 6.084   | 0.45207D - 06 |                 |                  |           |
| HF   | 0.20341D - 06 | - 6.692   | 0.20341D - 06 |                 |                  |           |
| HF <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | 0.10082D - 08 | - 8.996   | 0.57204D - 09 |                 |                  |           |
| SiF <sub>6</sub> <sup>2-</sup>               | 0.11435D - 20 | - 20.942  | 0.87920D - 22 |                 |                  |           |

### *Calcit/Quarz-Klüfte*

Eindeutig jünger als die Vertonungsphase sind die mit Calcit und untergeordnet Calcit und Tonmineralien gefüllten Klüfte. Sie treten als eigenständige Strukturen oder als spätere Infiltrationen von alten Illit-Quarz-Klüften oder älteren kataklastischen Störungszonen auf. Ebenfalls eindeutig jünger als die Vertonungsphase sind die in Rissen und Lösungslöchern gewachsenen, mehr oder weniger idiomorphen Mineralneubildungen wie Siderit, Coelestin, Baryt, Fluorit und die seltenen Erze Zinkblende, Bleiglanz und Kupferkies. Kaolinit und Smektit treten z. B. in den Gneisen von Kaisten als Kluftbeläge und als Verdrängung von Plagioklas auf. Ob sich diese Mineralien aus den niedertemperierte (T um 100 °C), salzreichen NaCl-CaCl<sub>2</sub>-betonten Lösungen bildeten, die in vielen sekundären Einschlüssen (MULLIS 1987) festgestellt wurden, muss noch im Detail abgeklärt werden. Auch über die Zeit der Bildung dieser Klüfte liegen nur wenige Ergebnisse vor, wie z. B. die K/Ar-Alter um 140 M. a. einiger Kluftillite der Bohrungen Kaisten und Böttstein oder die mit der Jurafaltung in Verbindung gebrachten Kluftmineralien in der Bohrung Schafisheim (MATTER et al. 1987).

### **Petrogenese**

Aus den breit angelegten Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen kann für das Kristallin der Nordschweiz folgende petrogenetische Entwicklung abgeleitet werden:

Vor der kaledonischen Metamorphose (und Faltung) drangen granitoide Magmen (Orthogneis von Herdern) in eine möglicherweise präkambrische (Meta-)Sedimentserie ein. Beide wurden während der kaledonischen Orogenese zusammen verfaltet und in der obersten Amphibolithfazies metamorphosiert, wobei einer ersten, druckbetonten Phase eine zweite, temperaturbetonte Phase mit beginnender Anatexis folgte.

Im mittleren Karbon drangen kaliumbetonte basische Magmen (Bohrung Schafisheim) und anschliessend aluminiumreiche Granitmagmen anatektischen Ursprungs in relativ seichtem Krustenniveau (max. 15 km) ein. Das aus den erstarrenden Schmelzen entmischte und auf den Korngrenzen und in den Poren gefangene wässrige Fluid führte zu pegmatitisch-pneumatolytischen bis heiss-hydrothermalen Umwandlungen in den Graniten. In den Rahmengesteinen erfolgte gleichzeitig eine im Zusammenhang mit den Intrusionen stehende tektono-hydrothermale Überprägung mit zum Teil intensiver Kataklase (vgl. MEYER 1987).

Noch im Westphalien müssen starke differenzielle Vertikalbewegungen eingesetzt haben, da die Gneise von Weiach zu Beginn des Stephanien, vor der Ablagerung der fluviatil-tropischen Kohleserie (MATTER 1987) an der Erdoberfläche lagen und sich mit beginnendem Einbruch des Nordschweizer Permokarbontrages wieder absenkten. Andere Bereiche, wie etwa Böttstein-Leuggern, wurden bis ins Perm weitergehoben, wobei sich auch in den Graniten kataklastische Störungszonen ausbilden konnten. Im Perm erfolgte eine weitere Hauptphase der hydrothermalen Umwandlung mit ausgeprägten Vertonungen, wohl als Resultat von vorwiegend dilativer Tektonik und konvektiven Fluidzirkulationen, die entweder durch die noch warmen, gehobenen Granitkörper oder Wärme von jüngeren aufsteigenden Magmen (permische Vulkanite im Schwarzwald, LIPPOLT et al. 1986) erzeugt wurden. Die geothermischen Gradienten müssen stellenweise über 150 °C/km betragen haben.

Nach dem Perm hat sich das geotektonische und geothermische Regime geändert, und nach Einebnung des Reliefs kam es zur Muschelkalktransgression. Während der Diagenese der überlagernden Sedimente müssen salzreiche Lösungen im Kristallin zirkuliert haben, wobei es lokal zur Ausscheidung von Kluftfüllungen kam. Es ist wahrscheinlich, dass in der Folge zu Zeiten bedeutender tektonischer Ereignisse wie der Öffnung der Tethys oder des Rheingrabens oder bei der Jurafaltung eine erneute Zerklüftung des Kristallins und eine erhöhte Fluidzirkulation stattfand.

### Verdankungen

Der Nagra, insbesondere Herrn Dr. M. Thury, sei für ihre Unterstützung gedankt sowie für die Erlaubnis, die Ergebnisse der Untersuchungen an den Tiefbohrungen zu veröffentlichen. Dank geht auch an die Herren Dres. A. Gautschi und J. Meyer für anregende Diskussionen, die gute Zusammenarbeit und konstruktive Kritik am Manuscript sowie an die Herren Dr. I. Mercalli, Dr. R. Oberhänsli, Dr. J.C. Hunziker, D. Vuichard und Dr. U. Raz für ihre Hilfe.

### LITERATURVERZEICHNIS

- EMMERMANN, R. (1972): Die Südschwarzwälder Granite. – *Fortschr. Mineral.* 50/2, 1–13.
- (1977): A petrogenetic model for the origin and evolution of the hercynian granite series of the Schwarzwald. – *N. Jb. Mineral. [Abh.]* 128, 219–253.
- FERRY, J. M. (1978): Fluid interaction between granite and sediment during metamorphism, south-central Maine. – *Amer. J. Sci.* 278, 1025–1056.
- FLUCK, P. (1980): Métamorphisme et magmatisme dans les Vosges moyennes d'Alsace. Contribution à l'histoire de la chaîne varistique. – *Sci. géol. (Strasbourg) Mém.* 62, 1–248.
- GARRELS, R. M., & MACKENZIE, F. T. (1971): Evolution of sedimentary Rocks. – Norton, New York.
- GEHLEN, K. von, KLEINSCHMIDT, G., STENGER, R., WILHELM, H., & WIMMENAUER, W. (1986): Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald. – 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald 1986.
- HAMMERSCHMIDT, K. (1987): Stabile Isotopen, Sondierbohrung Böttstein. In: PETERS, T.J., MATTER, A., BLÄSI, H. R., & GAUTSCHI, A. (1987): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. Nagra, Baden.
- HOFMANN, B. (1987): Erzminerale, Sondierbohrung Böttstein. In: PETERS, T.J., MATTER, A., BLÄSI, H. R., & GAUTSCHI, A. (1987): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. Nagra, Baden.
- HUNZIKER, J. C., STEINER, H. R., & HURFORD, A. (1987): Absolute Altersbestimmungen, Sondierbohrung Böttstein. In: PETERS, T.J., MATTER, A., BLÄSI, H. R., & GAUTSCHI, A. (1987): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. Nagra, Baden.
- HUNZIKER, J. C., & MEYER, J. (1987): K/Ar-Altersbestimmungen, Sondierbohrung Weiach. In: MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H. R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-01. Nagra, Baden, im Druck.
- HUNZIKER, J. C., & PETERS, T.J. (1987): Radiometrische Altersbestimmungen, Bohrung Schafisheim. In: MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H. R., SCHENKER, F., & WEISS, H. P. (1987c): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-03. Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- KLEIN, H., & WIMMENAUER, W. (1984): Eclogites and their retrograde transformation in the Schwarzwald (Fed. Rep. Germany). – *N. Jb. Mineral. [Mh.]* 1, 25–38.
- MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H. R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-01. Nagra, Baden, im Druck.
- MATTER, A., PETERS, T.J., BLÄSI, H. R., SCHENKER, F., & WEISS, H. P. (1987): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-03. Nagra, Baden, in Vorbereitung.
- MAZUREK, M. (1987): Migmatitgenese in metapelitischen Gesteinen aus Bohrungen der Nordschweiz: Vorläufige Resultate. – *Eclogae geol. Helv.* 80/2.

- MEYER, J. (1987): Die Kataklyse im kristallinen Untergrund der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. 80/2.
- MORCHE, W. (1979): Petrographische und geochemische Untersuchungen am Durbachit des Schwarzwaldes. – Unveröff. Diplomarbeit Univ. München.
- MULLIS, J. (1987): Ergebnisse der Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. 80/2.
- PEARCE, J. A. (1983): Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: HAWKESWORTH, C. J., & NORRY, M. J. (eds.): Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva Publishing.
- PERKINS, E. H. (1980): A Reinvestigation of the theoretical basis for the calculation of isothermal-isobaric mass transfer in geochemical systems involving an aqueous phase. M. Sc. Thesis, Univ. British Columbia, 149 p.
- PETERS, Tj., & HOFMANN, B. (1984): Hydrothermal Clay Formation in a Biotite Granite in Northern Switzerland. – Clay Miner. 19, 579–590.
- PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H. R., & GAUTSCHI, A. (1987): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. Nagra, Baden.
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, C., BLÄSI, H. R., MEYER, J., & ZIEGLER, H. J. (1987a): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-04. Nagra, Baden, im Druck.
- PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, C., BLÄSI, H. R., MEYER, J., & MEYER, C. (1987b): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. – Nagra Technischer Bericht NTB 86-05. Nagra, Baden, im Druck.
- WONES, D. R., & DODGE, F. C. W. (1977): The stability of phlogopite in the presence of quartz and diopside. In: FRASER, D. G. (ed.): Thermodynamics and Geology (S. 229–247). – Reidel, Dordrecht.

Manuskript eingegangen am 16. Februar 1987

Revision angenommen am 24. April 1987