

Petrographie des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz und Systematik der herzynischen Granite = Petrography of the crystalline basement in Northern Switzerland and systematics of Hercynian granites

Autor(en): **Mazurek, Martin / Peters, Tjerk**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **72 (1992)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-54893>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Petrographie des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz und Systematik der herzynischen Granite*

Petrography of the crystalline basement in Northern Switzerland and systematics of Hercynian granites

von *Martin Mazurek*¹ und *Tjerk Peters*¹

Abstract

The North Swiss crystalline basement is hidden beneath a sedimentary cover of variable thickness. It has been penetrated by several exploration drillholes aimed at coal, oil, gas, salt or thermal water. In recent years, 6 deep drillholes supplying long basement profiles were conducted by NAGRA. Similar to the outcrops in the Southern Black Forest, the North Swiss crystalline basement consists of Pre-Hercynian high-grade gneisses which were intruded by Hercynian plutons. The gneiss series is dominated by paragneisses (6 boreholes; mainly metapelites and meta-graywackes), and minor orthogneisses (1) and banded, amphibolite-rich series (2) were encountered. The Hercynian plutons comprise mainly granites (15) whereas K-rich basic intrusives were recovered from one single site.

The granites are dominantly Al-rich S-types produced by crustal melting of sediments. All granites recovered N of the North-Swiss Permo-Carboniferous trough belong to this group and are genetically related to the SE Black Forest granite series (granites of St. Blasien and Albtal). The highly differentiated members of this series constitute a characteristic group of andalusite-bearing two mica-granites. Geochemically different intrusives are encountered south of the Permo-Carboniferous trough: in the Eastern part between Zurich and Lake Constance, two inhomogeneous, virtually undifferentiated cordierite-biotite melagranites are found that do not show close genetic relationships to the SE Black Forest granite series (Lindau, Kreuzlingen). Contrasting magmatites have been recovered in the SW part (Schafisheim, Pfaffnau), where K-rich I-type granites and related basic rocks following an alkaline differentiation trend have been identified.

Keywords: Crystalline basement, granite, Hercynian, geochemistry, Black Forest, Northern Switzerland.

Zusammenfassung

Das unter einer Sedimentdecke stark variabler Mächtigkeit liegende Grundgebirge der Nordschweiz wurde von Explorationsbohrungen auf der Suche nach Kohle, Erdöl, Erdgas, Salz und Thermalwasser zahlreiche Male durchteuft. In den letzten Jahren sind 6 Tiefbohrungen der NAGRA hinzugekommen, welche lange Kernprofile geliefert haben. Analog den Kristallin-Aufschlüssen des südlichen Schwarzwalds besteht das Nordschweizer Grundgebirge aus präherzynischen, hochmetamorphen Gneisen, welche von herzynischen Plutoniten intrudiert wurden. Die Gneisserie wird von Paragneisen dominiert (6 Bohrungen; vorwiegend Metapelite, Metagrauwacken), untergeordnet kommen Orthogneise (1) und gebänderte, Amphibolit-führende Serien vor (2). Die herzynischen Plutonite umfassen hauptsächlich Granite (15), in einem einzigen Fall wurden K-reiche Basica angetroffen.

Bei den Graniten handelt es sich überwiegend um Al-reiche S-Typen, welche durch krustale Anatexis von Sedimenten entstanden sind. Sämtliche Intrusiva nördlich des Nordschweizer Permokarbon-Trogs sind solche S-Typ-Granite und gehören zum magmatischen Zyklus der Südostschwarzwälder Granitserie (Granite von St. Blasien

* Erscheint gleichzeitig in der Reihe «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilungen Nr. 92» der Schweiz. Geotechnischen Kommission, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

¹ Mineralogisch-Petrographisches Institut, Baltzerstrasse 1, CH-3012 Bern.

und Albtal). Die höherdifferenzierten Plutone dieser Serie bilden eine charakteristische Gruppe von Andalusit-führenden Zweiglimmer-Graniten. Südlich des Permokarbon-Trogs befinden sich im östlichen Teil zwischen Zürich und Bodensee 2 inhomogene, wenig differenzierte Cordierit-Biotit-Melagranite (Lindau, Kreuzlingen), die keine direkte Verwandtschaft mit der Südostschwarzwälder Granitserie aufweisen. Wesentlich verschiedene Magmatite finden sich im südwestlichen Teil (Schafisheim, Pfaffnau), wo K-reiche I-Typ-Granite und basische Gesteine, welche einem alkalischen Differentiationstrend folgen, anzutreffen sind.

1. Einleitung

Das präalpine Grundgebirge der Nordschweiz, welches unter einer mehr oder minder mächtigen Sedimentdecke liegt, hat in jüngster Zeit im Zusammenhang mit der Problematik der Entsorgung radioaktiver Abfälle viel Beachtung erhalten (6 Kristallin-Tiefbohrungen). Schon vor der Bohrkampagne der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) wurde das Nordschweizer Kristallin zahlreiche Male durchteuft, nach unserem Kenntnisstand 16mal. Es handelte sich hierbei um Explorationsbohrungen auf der Suche nach Kohle, Erdöl, Erdgas, Salz oder Thermalwasser. Das kommerzielle Interesse konzentrierte sich naturgemäss auf die Sedimente, und viele der Bohrungen wurden nach Erreichen des Grundgebirges abgebrochen. Die Verfügbarkeit des Bohrgutes wie auch dessen Qualität (Kerne – Bohrklein) variieren sehr stark und verunmöglichen teilweise eine Untersuchung. Für die vorliegende Arbeit stand uns Material der Bohrungen Herdern, Kreuzlingen 1, Lindau 1, Pfaffnau 1, Rheinfeld-Weierfeld, Wintersingen, Zurzach T1 und T3 sowie Zuzgen 1 zur Verfügung. Zusätzlich wurden die Granite von Säkingen und Hauenstein, welche am südlichsten Schwarzwald-Zipfel aufgeschlossen sind, berücksichtigt. Dies einerseits wegen der geographischen Nähe zum Untersuchungsgebiet, andererseits wegen der Armut an detaillierten petrographischen und petrologischen Arbeiten zu diesen Graniten. Die vorliegende Arbeit verfolgt zwei Ziele:

1. Die älteren, bisher nicht dokumentierten Bohrungen sollen petrographisch charakterisiert werden.
2. Mit Hilfe von Daten aus den älteren, hier beschriebenen Bohrungen und den NAGRA-Tiefbohrungen in der Nordschweiz sowie den Verhältnissen im Südschwarzwald soll eine regionale Systematik des herzynischen, vorwiegend granitischen Magmatismus erstellt werden.

Der regionale Rahmen der Nordschweiz ist in MÜLLER et al. (1984), PETERS (1987) und MEYER (1987) eingehend beschrieben, das Grundgebirge des Schwarzwalds ist in WIMMENAUER (1984) zu-

sammenfassend behandelt. Das Modell des sanft vom Schwarzwald gegen die Alpen hin einfallenden Grundgebirges musste in den letzten Jahren insofern revidiert werden, als dieses im Gebiet der Nordschweiz (wie auch in anderen Regionen) durch z.T. km-tiefe permokarbonische Tröge gestört ist (LAUBSCHER, 1986; DIEBOLD, 1986; KETTEL und HERZOG, 1988). In Abbildung 1 sind sämtliche Kristallinbohrungen in einer geologisch-tektonischen Skizze dargestellt. Es ist ein erstaunlicher Zufall, dass keine einzige der älteren Bohrungen im Bereich der permokarbonischen Trogsysteme liegt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten zu allen Bohrungen zusammengefasst.

2. Petrographie der älteren Bohrungen

Das Nordschweizer Kristallin, wie es in den älteren Bohrungen zutage gefördert wurde, beinhaltet wie im benachbarten Schwarzwald hochmetamorphe Gneise, welche von herzynischen Granitoiden intrudiert worden sind (s. Abb. 1). Der Erhaltungszustand primärer Texturen in den Bohrungen ist sehr variabel; es sind oft eine mehrphasige tektono-hydrothermale Überprägung sowie z.T. eine Oberflächenverwitterung festzustellen. Mittlere primäre Modalbestände der erbohrten Gesteine sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Der im folgenden häufig verwendete Begriff «*retrograd*» bezieht sich auf Umwandlungen, welche im Fall der Gneise auf dem absteigenden Ast des Metamorphosepfades stattgefunden haben bzw. im Fall der Granite mit deren beginnender Abkühlung in Zusammenhang stehen. «*Retrograde*» Umwandlungen sind penetrativ und nicht an Sprödstrukturen gebunden, dies im Gegensatz zu den tiefertemperierten «*hydrothermalen*» Umwandlungen. Letztere hängen meist mit einer kataklastischen Deformation zusammen und sind mehrheitlich von den primären gesteinsbildenden Prozessen unabhängig.

2.1. BOHRUNG KREUZLINGEN 1

In 2533.60 m Tiefe ab OK Terrain wurde unter Buntsandstein das Kristallin erreicht, von wel-

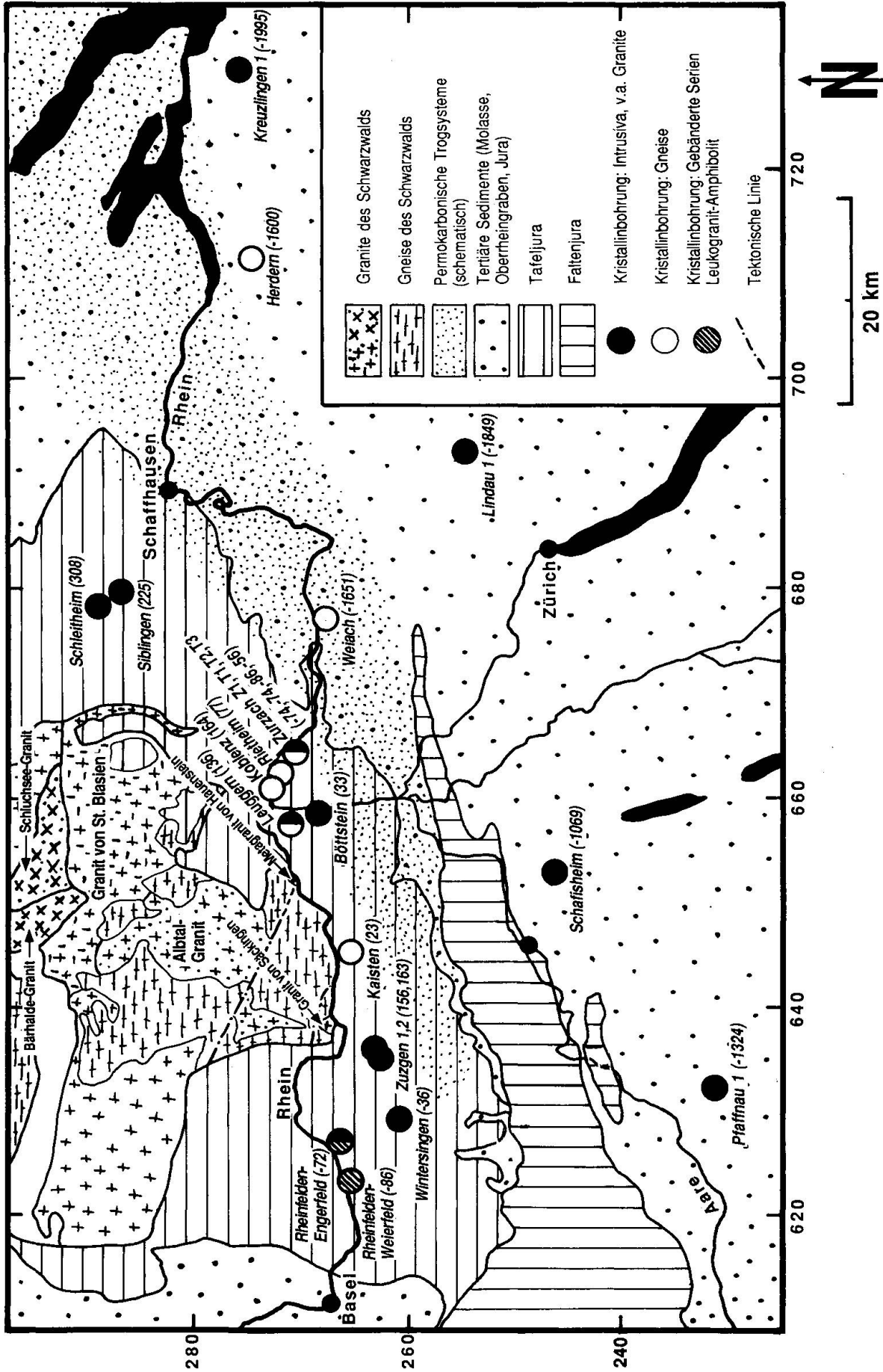


Abb. 1 Vereinfachte geologisch-tektonische Skizze der Nordschweiz und des Südschwarzwalds mit der geographischen Verteilung von Bohrungen, welche das Kristallin erreicht haben. Die Zahlen hinter den Bohrungsnamen geben das Top-Kristallin in Metern über Meer an. Die Kartierung permokarbonischer Trogsysteme unter Molasse und Tafeljura beruht auf Bohrungen und seismischen Daten und ist daher nur schematisch. LAUBSCHER (1986) und DIEBOLD und NÄF (1990) postulieren im Gebiet S Aarau weitere permokarbonische Tröge, obschon weder die Bohrung Schafisheim noch die Bohrung Pfaffnau 1 Permokarbon aufweisen.

Tab. 1 Übersicht über alle bisher abgeteufte Kristallinbohrungen der Nordschweiz. In der vorliegenden Arbeit konnten nicht alle dieser Bohrungen bearbeitet werden, weil das Bohrgut nur teilweise erhalten ist. Die Bezeichnung der Lithologie stützt sich teilweise auf alte Beschreibungen und ist dementsprechend ungenau. Die Kolonne «Grad der tektono-hydrothermalen Umwandlung» soll eine Idee von der Stärke der hydrothermalen Umwandlung bzw. Kataklyse geben, soweit eine Beurteilung möglich war. 0 = frisches Gestein, 1 / 2 / 3 = leicht / stark / extrem stark umgewandeltes und/oder spröde deformiertes Gestein.

Bohrung und Code	Koordinaten	Zweck	Jahr	Top Kristallin		Profillänge Kristallin	Erbohrtes Gestein im Kristallin	Ueberlagernde Sedimente	Grad der tektono-hydroth. Umw. (0-3)
				unter OK Terrain	über Meer				
Böttstein (BOE)	659341/268556	Rad. Abfälle	1982/83	315 m	33 m	1186 m	Biotit-Granit	Buntsandstein	1
Herdern (HER)	711308/274597	Erdöl/Erdgas	1981/82	2127 m	- 1600 m	27 m	Biotit-Streifengneis	Buntsandstein	1
Kalsten (KAJ)	644641/265624	Rad. Abfälle	1984	297 m	23 m	1009 m	Vorw. metapelitischer Gneis	Rotliegendes	2
Koblenz	661759/273936	Salz	1954	157 m	164 m	4 m	Biotit-Gneis	Buntsandstein	?
Kreuzlingen 1 (KRE)	729201/276169	Erdöl/Erdgas	1962	2534 m	- 1995 m	10 m	Cordierit-Biotit-Melagranit	Buntsandstein	2
Leuggern (LEU)	657664/271208	Rad. Abfälle	1984/85	223 m	136 m	1466 m	Vorw. metapelitischer Gneis über Biotit-Granit	Buntsandstein	2
Lindau 1 (LIN)	692815/255098	Erdöl/Erdgas	1964	2365 m	- 1849 m	12 m	Cordierit-Biotit-Melagranit	Buntsandstein	0
Pfaffnau 1 (PFA)	632708/231789	Erdöl/Erdgas	1963	1824 m	- 1324 m	19 m	Biotit-Granit	Buntsandstein	3
Rheinfelden-Weierfeld (WEF)	623993/266209	Kohle	1875	367 m	- 86 m	66 m	Gebänderte Abfolge Leukogranit-Amphibolit	Rotliegendes	2
Rheinfelden-Engerfeld	627650/266680	Thermalwasser	1983	372 m	- 72 m	229 m	Gebänderte Abfolge Leukogranit-Amphibolit über Granit	Rotliegendes	?
Rietheim	662460/272834	Salz	1969/70	319 m	+ 77 m	4 m	Biotit-Gneis	Buntsandstein	?
Schafisheim (SHA)	653620/246760	Rad. Abfälle	1983/84	1490 m	- 1069 m	516 m	Granit, Syenit, Monzonit, Diorit	Buntsandstein	3
Schleitheim	678160/288980	Salz	1823/24	154 m	308 m	4 m	Granit	Buntsandstein	?
Sibingen (SIB)	680090/286693	Rad. Abfälle	1988/89	349 m	225 m	1173 m	Cordierit-Biotit-Granit, Andalusit-Cordierit-führender Zweiglimmer-Granit	Buntsandstein	2
Weiach (WEI)	676744/268618	Rad. Abfälle	1983	2020 m	- 1651 m	462 m	Vorw. Biotit-Plagioklas-Gneis mit sauren Gängen	Stephanien	2
Wintersingen (WIN)	629106/261606	Kohle	1939	421 m	- 36 m	19 m	Andalusit-Cordierit-führender Zweiglimmer-Granit	Rotliegendes	1
Zurzach Z1	663952/271229	Salz	1913/14	415 m	- 74 m	1 m	Granit	Buntsandstein	?
Zurzach T1 (ZUR)	663972/271224	Thermalwasser	1955	415 m	- 74 m	16 m	Andalusit-Cordierit-führender Zweiglimmer-Granit	Buntsandstein	2
Zurzach T2	664020/271325	Thermalwasser	1965	425 m	- 86 m	45 m	Granit	Buntsandstein	?
Zurzach T3 (ZUR)	663742/271482	Thermalwasser	1979/80	402 m	- 56 m	299 m	Cordierit-Biotit-Plagioklas-Gneis über Cordierit-führendem Biotit-Granit bis Andalusit-Cordierit-führendem Zweiglimmer-Granit	Buntsandstein	2
Zuzgen 1 (ZUZ)	635030/263400	Kohle	1939/40	256 m	+ 156 m	148 m	Andalusit-Cordierit-führender Zweiglimmer-Granit	Rotliegendes	1
Zuzgen 2	635410/263470	Kohle	1940	243 m	+ 163 m	16 m	Granit	Rotliegendes	?

chem noch 10 m Kerne gezogen wurden. Es handelt sich um einen Cordierit-Biotit-Melagranit, welcher reichlich bis dm-grosse Gneisschollen oder cm-grosse, monomineralische Biotit-Aggregate enthält. Der Granit ist mittel- und gleichkörnig; einzig Kalifeldspat und seltener auch Cordierit können Einsprenglinge bilden. Wegen der Hämatit-Imprägnation von (retrograd oder hydrothermal stets umgewandeltem) Cordierit erhält das Gestein mesoskopisch ein stark fleckiges

Aussehen. Mit ca. 15 Vol.% Biotit und 10 Vol.% Cordierit handelt es sich um einen echten Melagranit.

Biotit bildet dicke Platten und ist mehrheitlich isometrisch und xenomorph. Er zeigt Resorptionerscheinungen zugunsten von Kalifeldspat und Cordierit, in denen er auch als Einschluss vorkommt. Häufig bildet er nahezu monomineralische Aggregate, welche bis ca. 1 cm gross sein können. Cordierit bildet entweder isometrische,

Tab. 2 Primäre Modalbestände der Kristallingesteine, welche in den untersuchten Nordschweizer Bohrungen angetroffen worden sind (Vol.%). Muskovit als retrograde Phase (entstanden auf Kosten von Kalifeldspat und Cordierit) geht hierbei nicht in die Summe der primären Mineralien ein. «+» = Akzessorium. Mittelwerte aus den NAGRA-Bohrungen nach PETERS et al. (1986, 1989a), MATTER et al. (1988) und MAZUREK (1989). Abkürzungen s. Tab. 1.

Angaben in Vol%	HAU Granit	PFA Granit	SHA Granit	KRE Granit	LIN Granit	BOE Granit	LEU Granit	SAE Granit	ZUZ Granit	WIN Granit	SIB Granit	ZUR Granit	ZUR Gneis	WEF "Granit"	WEF Amph.	HER Gneis
Quarz	34-38	29-31	22	23-27	26-31	27	25	26-30	30-34	25-29	31	33-37	39-33	32-36	-	21-25
Kalifeldspat	29-33	27-31	42	18-28	25-29	38	36	27-31	27-29	28-32	29	26-31	+	30-32	-	18-24
Plagioklas	24-26	31-33	24	23-29	19-26	28	29	26-28	23-25	25-27	29	25-30	40-46	30-33	43-47	41-45
Biotit	3-5	9-11	10	13-19	12-16	8	10	5-7	5-8	7-9	7	14-9	8-22	3-5	25-30	11-13
Muskovit	0-2	-	-	-	-	-	-	7-11	6-8	5-9	1	0-7	-	-	-	-
Cordierit	3-5	-	-	9-13	7-11	+	+	0-3	0-3	0-5	3	+	0-10	-	-	-
Hornblende	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25-30	-
Andalusit	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-
Zirkon	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Apatit	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Turmalin	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-
Granat	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
Opake	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+
Titant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Dumortierit	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
retrograder Muskovit	+	-	-	+	1-5	+	+	+	+	2	3	+	+	-	-	-

hypidiomorphe Körner oder bis ca. 5 mm grosse Skelette, welche zu ca. 50 Vol.% aus Quarz-Einschlüssen bestehen. Er enthält reichlich resorbierte, rundliche Biotit-Einschlüsse. Er ist nie frisch erhalten; seine Masse besteht aus charakteristischen Pseudomorphosen, welche retrograd und vor allem hydrothermal gebildete Schichtsilikate enthalten. Ansonsten sind die retrograden Effekte äusserst bescheiden. Nur vereinzelt wird auf Kosten von Kalifeldspat und Cordierit etwas Muskovit gebildet, welcher feinkörnig und modal unbedeutend ist. Quarz ist als einziges Mineral duktil deformiert und weist eine starke Subkornbildung und undulöse Auslöschung auf, ohne allerdings zu rekristallisieren. Eine bedeutende hydrothermale Umwandlung hat das gesamte verfügbare Profil stark beeinflusst. Plagioklas ist mehrheitlich zu Tonmineral-Pseudomorphosen umgewandelt und mit Calcit-Schuppen belegt, ebenso Cordierit. Durch Hämatit ist das Gestein rostrot verfärbt.

2.2. BOHRUNG HERDERN

Im Liegenden eines hellen Grobsandsteins mit Geröllen trifft man bei 2127.35 m unter OK Terrain auf kristallines Grundgebirge. Von den total 26.5 erbohrten Metern steht heute noch ein 8.5 m mächtiges Profil in zwei Abschnitten zur Verfügung (oberer Abschnitt: 2127.35–2134.00 m; unterer Abschnitt: 2152.10–2154.00 m). Es handelt sich um einen Biotit-Streifengneis, dessen Planartextur durch abwechselnde Biotit-reiche Streifen

(Länge bis 10 cm, Breite 0.1–1 cm) und leukokratische Lagen/Streifen (Länge 5–20 cm, Breite 2–10 mm) definiert wird. Trotz dieser weitständigen räumlichen Ordnung ist das Gestein feinkörnig, d.h. alle Domänen bestehen aus polykristallinen Aggregaten der betreffenden Minerale (Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat Biotit).

Mikroskopisch lassen sich drei Domäentypen unterscheiden:

1. Die Kalifeldspat-Domänen sind bis auf geringe Mengen Plagioklas und Quarz monomineralisch. Sie bilden ein mosaikartiges, feinkörniges Gleichgewichtsgefüge, welches vermutlich die deformierten Relikte von Kalifeldspat-Grosskristallen darstellt. Ihre finite Deformation erreicht Werte von 1:10–1:20.
2. Die Plagioklas-Quarz-Domänen bestehen etwa zu gleichen Teilen aus diesen beiden Mineralien. Auch hier dominiert ein gleichkörniges, rekristallisiertes Gleichgewichtsgefüge. Plagioklas ist undeformiert, während Quarz durch jüngere Deformationen undulös und oft in Subkörner zerteilt ist.
3. Die Biotit-Domänen bestehen etwa zur Hälfte aus Biotit, den Rest bilden Plagioklas ± Quarz und Kalifeldspat. Während diese Domänen als ganzes die Planartextur definieren, sind die einzelnen Biotit-Körner weitgehend unorientiert. Die Biotite sind xenomorph und häufig in Plagioklas eingeschlossen.

Als Akzessorien kommen Zirkon, Apatit, Ilmenit und Granat vor. Erstere drei sind häufig in Kornkontakt mit Biotit oder in diesem eingeschlossen. Zirkon ist meist rundlich; seltener fin-

det man nadelige Zirkone, welche in Biotit eingeschlossen sind und parallel zu dessen Lamellen wachsen. Ilmenit ist nur teilweise frisch erhalten, mehrheitlich ist er nur noch in Leukoxen-Pseudomorphosen (feinkörniger Titanit?) erhalten. Granat ist sehr selten und bildet gepanzerte Relikte in Plagioklas.

Mit Ausnahme der jüngeren Subkornbildung in Quarz hat das Gestein ein getempertes, statisch rekristallisiertes Gefüge. Die Planartextur und Stoffbänderung werden stellenweise von einer isoklinalen Faltung im cm-Bereich transponiert. Der Deformationsstil deutet auf amphibolitfaziale Bedingungen. Die Planartextur hat ein sehr steiles bis senkrecht einfallendes Gefüge.

Die Mikrostrukturen zeigen, dass der Streifenfels als postdeformatives Rekristallinat eines sehr stark gescherten granitoiden Gesteins zu interpretieren ist. Textuell analoge Gesteine sind im Südschwarzwald nicht bekannt, wohl aber im Mittel- und Nordschwarzwald (MEHNERT, 1953; WIMMENAUER, 1984) sowie im Gotthard-Massiv der Alpen (HUBER, 1943). Die grossen textuellen Parallelen zu den Orthogneisen des mittleren Schwarzwalds werden auch durch geochemische Ähnlichkeiten bestätigt, so z.B. im K_2O-Na_2O-CaO -Dreieck (vgl. WIMMENAUER, 1984). Die chemische Gesteinszusammensetzung (s. Anhang) lässt auf ein wenig differenziertes granitoides Ausgangsgestein schliessen. Das Intrusionsalter der Orthogneise des Mittelschwarzwalds haben TODT und BÜSCH (1981) auf 520 ± 20 Ma bestimmt (U/Pb an Zirkon, unterer Schnittpunkt).

2.3. BOHRUNG LINDAU 1

Bei ca. 2365 m unter OK Terrain wurde mittels Meisselbohrung das Kristallin erreicht. Zwischen 2367.90 und 2375.70 m wurden Bohrkerne gezogen. Das erbohrte Gestein ist wie in Kreuzlingen ein Cordierit-Biotit-Melagranit mit ebenfalls ca. 15 Vol.% Biotit und 10 Vol.% Cordierit. Aus petrographischer Sicht bestehen grosse Ähnlichkeiten zum Granit von Kreuzlingen. Das Ausmass postmagmatischer Umwandlungen ist in Lindau hingegen sehr gering. Im Handstückbereich ist der Granit recht inhomogen und weist Kalifeldspat-reiche und -arme Schlieren auf. Zur Inhomogenität des Gesteins tragen ausserdem zahlreiche metapelitische Gneisschollen (Grösse ca. 1–5 cm) mit Biotit und z.T. verfaltetem Sillimanit bei.

Ähnlich wie in Kreuzlingen hat Biotit dickplattige, xenomorphe Kornformen. Er wird von Cordierit, Kalifeldspat und Plagioklas resorbiert und ist oft in diesen eingeschlossen. Cordierit

bildet (analog zu Kreuzlingen) unverwechselbare Pseudomorphosen retrograden und/oder hydrothermalen Ursprungs. Er kommt in runden, ca. 1–3 cm grossen Flecken vor, die zu gleichen Teilen aus Cordierit und Quarz bestehen. Die Gehalte retrograd auf Kosten von Cordierit und Kalifeldspat gewachsenen Muskowits liegen zwischen 1–5 Vol.%. Bei den Akzessorien ist insbesondere der Reichtum an Zirkon zu erwähnen. Die Gneisschollen bestehen aus eingeregelter Biotit, Sillimanit und etwas Plagioklas, sind aber immer Quarz-frei. Zuweilen sind sie von einem Cordierit-Saum umgeben. Das Korngrössenspektrum ist in Lindau grösser als in Kreuzlingen, Kalifeldspat kann porphyrisch sein. Bei den primären Texturen fällt die ausgesprochen geringe Quarz-Deformation auf, welche sich auf eine schwache undulose Auslöschung beschränkt.

Als retrograde Bildungen anzusprechen sind 0.5–2 cm dicke, geradlinig verlaufende Turmalin-Adern, wie sie schon aus metapelitischen Gneisen und Granit der NAGRA-Bohrungen Kaisten und Leuggern beschrieben worden sind (PETERS et al., 1989 a, b). Die Adern bestehen aus monomineralem, feinkörnigem, zoniertem Turmalin (Kern: hellblau, Saum: honigbraun), welcher aber bis ca. 1 cm Distanz von der Ader auch im Nebengestein kristallisiert. Diese Randzone ist Biotit-frei und stark an Kalifeldspat verarmt. Die der Ader benachbarten Biotite können chloritisiert sein. MEYER (1985) hält diese Aderbildung für ein noch recht hochtemperiertes Ereignis, das bei ca. 500 °C abgelaufen ist.

2.4. BOHRUNG PFAFFNAU 1

Unter Buntsandstein wurde bei 1823.5 m Bohrtiefe das Kristallin erreicht. Bis 1843.0 m wurden Kerne gezogen. Das erbohrte Kristallin umfasst einen kataklastisch deformierten und hydrothermal sehr stark umgewandelten, fein- bis mittelkörnigen Biotit-Granit. Das ganze Profil ist durch Hämatit-Imprägnation rostrot gefärbt. Besonders in den feinkörnigen Abschnitten ist ansatzweise eine Schieferung erkennbar, definiert durch eine beschränkte Biotit-Einregelung. Im Dünnschliff äussert sich diese plastische Deformation durch eine sehr intensive Subkornbildung von Quarz, ohne dass es zur Rekristallisation kommt. Diese Deformation ist metamorphen Ursprungs und klar unterscheidbar von den Effekten der jüngeren Kataklyse. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Graniten fehlen jegliche Affinitäten zu Metapeliten (Gneisschollen, Cordierit-Führung).

2.5. BOHRUNGEN ZURZACH T1 UND T3

Bohrung T1 erreichte in 414.50 m Tiefe das Kristallin, von welchem 16 m Bohrkerne gezogen wurden (CADISCH, 1956) und einen *Zweiglimmergranit* geliefert haben. Das Profil der Bohrung T3 (350 m von T1 entfernt), umfasst 299 m gemeinseltes Kristallin (402–701 m ab OK Terrain), womit nur Cuttings untersucht werden konnten (WAGNER, 1981). Der Profilabschnitt 402–538 m beinhaltet eine Serie hochmetamorpher Biotit-Plagioklas-Gneise mit feinkörnigen, leukogranitischen Einschaltungen (wahrscheinlich Aplite). Im Abschnitt 538–701 m wurden 2 Granittypen erbohrt:

1. Cordierit-führender Biotit-Granit
2. Andalusit- und Cordierit-führender Zweiglimmer-Granit (identisch mit demjenigen der Bohrung T1).

Gneise wie Granite sind von zahlreichen Aplitgängen durchschlagen.

Biotit-Plagioklas-Gneise (Bohrung T3): Diese von WAGNER (1981) als «anatektisch» bezeichneten Gneise weisen kaum mehr eine deutliche Planartextur auf; Biotit wird hauptsächlich von Plagioklas entregelt, z.T. überwachsen und resorbiert. Die etwa 5 Vol.% Cordierit sind ebenfalls auf Kosten von Biotit entstanden. Kalifeldspat bildet polygonale Kornaggregate, wahrscheinlich Rekristallisate deformierter Körner. Die retrograden Effekte beschränken sich auf eine geringe Muskowit-Bildung in Cordierit, der aber hydrothermal völlig umgewandelt wird.

Granite (Bohrungen T1, T3): Beide Granittypen sind mittel- und gleichkörnig und recht homogen, Xenolithe fehlen. Kalifeldspat weist ein grosses Korngrößen-Spektrum auf und bildet zuweilen Einsprenglinge. In bescheidenem Ausmass ist er retrograd zu Muskowit umgewandelt. Plagioklas ist deutlich zoniert; Albit-reiche Ränder sind möglicherweise ein Produkt der retrograden Kalifeldspat-Umwandlung. Cordierit wächst auf Kosten von Biotit, wird aber retrograd und hydrothermal vollständig umgewandelt. Muskowit zeigt eine Reaktionsbeziehung zu Kalifeldspat, Biotit und Cordierit. Ausschliesslich als Einschlüsse in grösseren Muskowit-Leisten des Zweiglimmer-Granits kommen Tonmineral-Pseudomorphosen nach Andalusit vor, welche z.T. noch die rautenförmigen ursprünglichen Kornformen erkennen lassen. Identische Andalusit-Texturen findet man im Granit der Bohrungen Zuzgen und Wintersingen (s.u.; vgl. Abb. 2a).

Aplite (Bohrung T3): Einschaltungen heller, feinkörniger Magmatite kommen sowohl in der Gneisserie wie auch im Granit vor. Sie bestehen zu mehr als 90–95 % aus Quarz und Feldspäten;

daneben kommen Biotit, Muskowit und umgewandelter Cordierit vor.

2.6. BOHRUNGEN ZUZGEN 1, WINTERSINGEN UND OBERFLÄCHENAUFSCHLÜSSE DES GRANITS VON SÄCKINGEN

In den beiden benachbarten Bohrungen Zuzgen und Wintersingen wurden 150 m (Tiefe: 256.35–404.40 m) bzw. 20 m (421.00–440.25 m) Kristallinkerne gezogen, welche aus einem Andalusit- und Cordierit-führenden Zweiglimmer-Granit bestehen. Aufgrund petrographischer und auch geochemischer Kriterien (s.u.) ist es sehr wahrscheinlich, dass der Granit der beiden Bohrungen zum selben Pluton gehört wie der Granit von Säckingen im südlichsten Schwarzwald, dessen nächster Aufschluss nur 5.5 km NE von Zuzgen liegt (s. Abb. 1). Allen drei Vorkommen ist das akzessorische Vorkommen von Cordierit und Andalusit mit sehr ähnlichen Texturen gemeinsam. Der Granit ist sehr homogen und enthält wenige, max. 2 cm grosse Xenolithe metapelitischer Gneise. Die Körnigkeit des Granits variiert von fein- bis mittelkörnig (Säckingen) über mittelkörnig (Zuzgen) zu der fast grobkörnigen Varietät von Wintersingen.

Auch die Mikrotexturen aller drei Lokalitäten sind sehr ähnlich und zudem mit denjenigen des Zweiglimmer-Granits von Zurzach vergleichbar. Die einzige grössere Variabilität besteht in der duktilen Deformation von Quarz: Dieser ist in allen Oberflächenaufschlüssen bei Säckingen nahezu undeformiert. In Zuzgen ist er stark undulös und bildet beschränkt auch Subkörner, in Wintersingen ist er völlig zu fleckig auslöschenden Aggregaten aufgelöst, ohne aber zu rekristallisieren; im Handstück ist teilweise eine sehr schwache Biotit-Einregelung feststellbar. Plagioklas ist wie in Zurzach deutlich zoniert. Kalifeldspat kann bis 3 cm grosse Einsprenglinge bilden und zeigt reichlich flammenperthitische Entmischungen sowie Einschlüsse von Plagioklas. Biotit zeigt im Gegensatz zu den meisten der bisher besprochenen Graniten keine Reaktionsbeziehung zu Kalifeldspat und ist in Feldspäten auch nicht eingeschlossen. Cordierit bildet rundliche Körner und ist vollständig zu einem relativ groben Gemenge aus Muskowit und grünem Biotit umgewandelt. Andalusit ist sehr feinkörnig und stets in grösseren retrograden Muskowit-Leisten eingeschlossen (s. Abb. 2a). Die Texturen deuten darauf hin, dass Muskowit auf Kosten von Andalusit gewachsen ist und diesen zu reliktschen Schollen zerlegt hat. Mehrheitlich rundliche Körner bildend, kann Andalusit auch quadratische oder rhombenfö-

mige Querschnitte zeigen. Ob es sich bei Andalusit um eine primär-magmatische Phase handelt, welche mit einer Schmelze koexistiert hat, kann texturell kaum beurteilt werden.

Schollen teilweise assimilierter metapelitischer Gneise im Granit von Säckingen bestehen hauptsächlich aus Biotit und Sillimanit und Plagioklas. Insbesondere grössere Schollen können aber auch ein sehr weites Mineralspektrum enthalten: Biotit (ca. 50 Vol.%), Muskowit (10–20 Vol.%), Sillimanit (5–10 Vol.%), Cordierit (vollständig pinitisiert, ursprünglich ca. 10–15 Vol.%) sowie akzessorisch Spinell, Korund, Andalusit, Quarz, Zirkon, Rutil und Titanit. Bemerkenswert ist das Auftreten von Korund und Quarz im Abstand weniger mm. Es sind reichlich Reaktions- und Einschlusstexturen erkennbar (s. auch Abb. 2b).

2.7. BOHRUNG RHEINFELDEN-WEIERFELD

Diese 1875 abgeteufte Kohlebohrung hat 66 m Kristallin zutage gefördert (367–443 m ab OK Terrain). Leider wurde das Bohrgut in zahlreiche Sammlungen zerstreut, so dass heute nur schlecht dokumentierte Einzelproben zur Verfügung stehen. Laut MÜLLER (1876) handelt es sich um eine Serie aus «Diorit» (Anteil am gesamten Profil ca. 76%), welcher stark durchsetzt ist von Gängen und Adern aus «Granit» (11%). Ausserdem wird eine Zone mit «zersetztem Glimmerschiefer» (13%) im obersten Teil beschrieben. Mit modernen Namen versehen, liegt eine Abfolge von Amphibolit und leukogranitischen Partien (möglicherweise Aplit-Gänge oder hochmetamorphe, entregelte Gneise) vor, wobei aufgrund des vorhandenen Kernmaterials keine Aussage über die Kontaktverhältnisse gemacht werden kann. Beim «Glimmerschiefer» handelt es sich wahrscheinlich um einen hydrothermal stark umgewandelten Lamprophyr-Gang. Eine analoge Gesteinsabfolge beschreibt RYF (1984) in der benachbarten Bohrung Rheinfelden-Engerfeld (dort aber nur Cuttings). Die Wechsellagerung von Amphibolit und sauren Magmatiten erinnert an die präherzynische hochmetamorphe Serie, welche (BÜCHI et al., 1984) in Laufenburg (20 km östlich) beschrieben haben.

Die leukogranitischen Partien enthalten nur 4 Vol.% Biotit. Sie sind mittelkörnig, nur Kalifeldspat kann Einsprenglinge bilden. Es bestehen keine texturellen Ähnlichkeiten zu den Graniten von Zurzach, Zuzgen, Wintersingen und Säckingen. Der Amphibolit enthält je ca. 25–30 Vol.% blaugrüne Hornblende und Biotit und 45% Plagioklas. Er ist sehr feinkörnig, daher ist mesoskopisch eine Planartextur nur schlecht erkennbar.

Im Mikroskop hingegen definieren Biotit und Hornblende deutlich eine Schieferung.

2.8. OBERFLÄCHENAUFSCHLÜSSE DES METAGRANITS VON HAUENSTEIN

Nach METZ (1980) bildet dieser Pluton zahlreiche kleine Körper oder Gänge in hochmetamorphen Gneisen am südlichsten Schwarzwaldzipfel zwischen Murg und Albrück (s. Abb. 1). Er bedeckt total eine Fläche von ca. 2–3 km². Wegen der schlechten Aufschlussverhältnisse lässt sich über die Geometrie und die Kontakte zum Nebengestein kaum eine Aussage machen. Die folgende Beschreibung bezieht sich allein auf die Typlokalität bei Albrück. Dort handelt es sich um einen sehr leukokraten Andalusit-führenden Cordierit-Biotit-Metagranit. Das mittel- und gleichkörnige Gefüge weist mesoskopisch eine engständige Planartextur auf. Die Anwesenheit beträchtlicher Mengen Turmalin sowie von Dumortierit deutet auf beträchtliche B-Gehalte der Schmelze hin. Die dadurch verursachte Erniedrigung der Solidus-Temperatur (MANNING und PICHAVANT, 1983; PICHAVANT und MANNING, 1984) könnte die Anwesenheit idiomorphen Andalusits erklären, dessen Texturen eine primär-magmatische Entstehung vermuten lassen (s. Abb. 2c).

Die duktile Deformation des Gesteins wurde fast ausschliesslich durch Quarz aufgenommen, während sich Feldspäte völlig spröde verhalten haben; dies ist typisch für grünschieferfazielle Bedingungen. Quarz ist extrem stark zu fleckig auslöschenden Aggregaten zerlegt, welche stark gelängt sind und um die Feldspäte ausbiegen. Es ist auch beginnende dynamische Rekristallisation zu beobachten. Biotit bildet schlecht eingeregelt xenomorphe Körner und wird von Cordierit und Muskowit resorbiert. Andalusit bildet hypidiomorphe bis idiomorphe Stengel von max. 5 mm Grösse (s. Abb. 2c). Im Gegensatz zu den Graniten von Zurzach, Zuzgen, Wintersingen und Säckingen wird er nicht von grossen Muskowit-Leisten überwachsen und eingeschlossen. Cordierit kann retrograd zu Muskowit und blassgrünem Biotit umgewandelt werden; seine Hauptumwandlung zu Serizit ist aber hydrothermal. Turmalin mit einem intensiv honigbraunen Pleochroismus ist nicht wie in den bisher beschriebenen Graniten zwickelfüllend oder skelettartig, sondern bildet idiomorphe Körner oder Kornaggregate. Dumortierit als seltenes Akzessorium bildet hypidiomorphe Stengel und ist am sehr starken violetten Pleochroismus zu erkennen. Die retrograde Bildung von Muskowit auf Kosten von Kalifeldspat, Cordierit und Biotit ist nur sehr be-

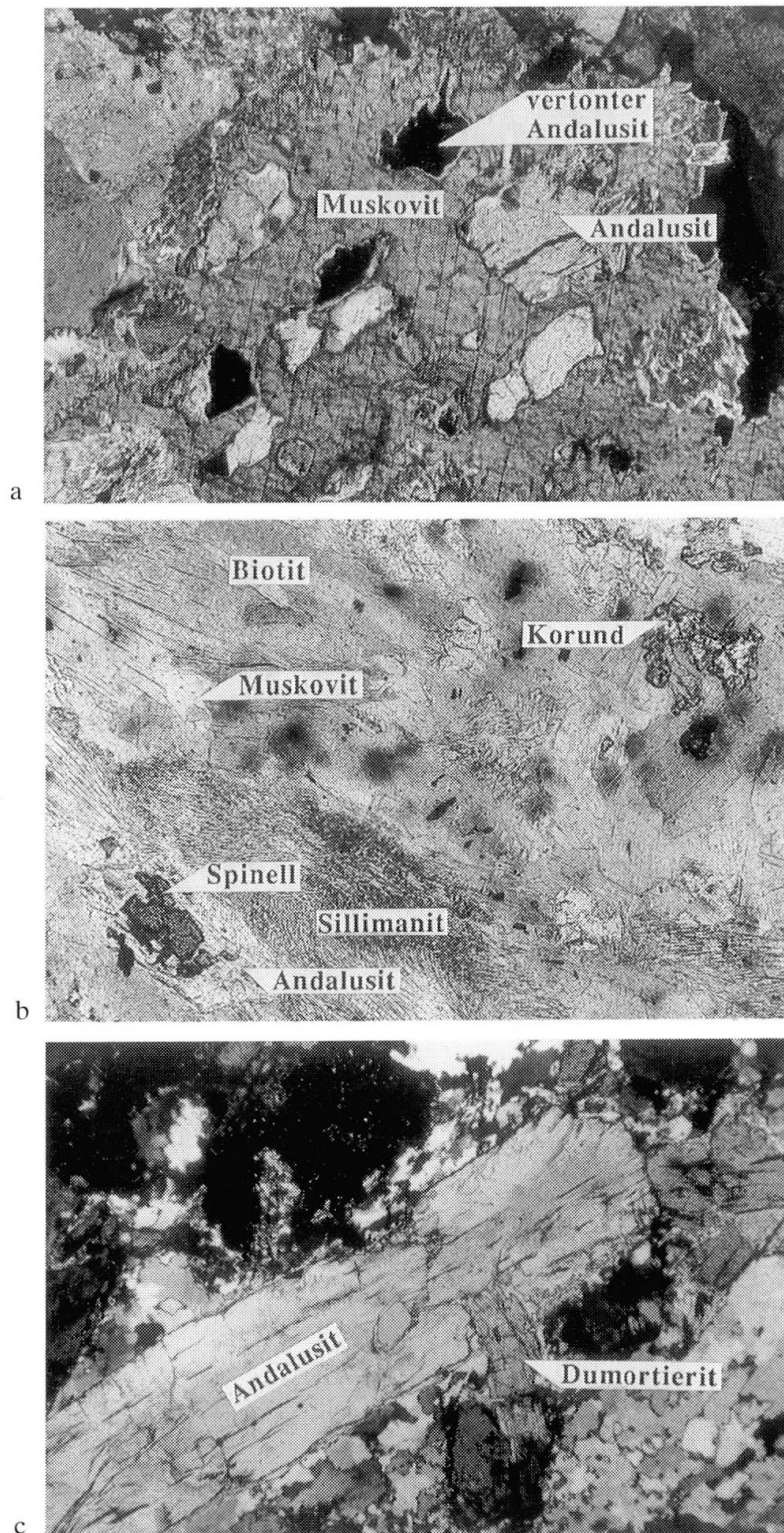


Abb. 2 Dünnschliff-Bilder zur mineralogischen Entwicklung der Südschwarzwälder/Nordschweizer Andalusit-Zweiglieder-Granite.

a. Andalusit-Relikte im Granit von Zuzgen, eingeschlossen in einer retrograden Muskovit-Leiste. Andalusit ist teilweise erhalten (hochbrechende Körner), teilweise vertont (schwarze Flecken). Probe ZUZ 296.00, Bildhöhe 0.7 mm, gekreuzte Polarisatoren.

b. Metapelitische Scholle im Granit von Säckingen mit Biotit, Muskovit und Relikten von Sillimanit, Korund und Spinell. Andalusit wächst auf Kosten von Spinell und Sillimanit. Probe SAE 25, Bildhöhe 0.7 mm, parallele Polarisatoren.

c. Grosser idiomorpher Andalusit im Metagranit von Hauenstein, verwachsen mit Dumortierit. Probe H1, Bildhöhe 2 mm, gekreuzte Polarisatoren.

schränkt. Auch Muskowit ist, wie Biotit, während der Deformation häufig verbogen worden und daher prädeformativ entstanden.

3. Petrographie von Plutoniten aus den NAGRA-Tiefbohrungen

Die NAGRA hat seit 1982 sieben Tiefbohrungen im Nordschweizer Tafeljura und Molassebecken abgeteuft. Vier dieser Bohrungen haben herzynische Plutonite geliefert, von welchen jeweils viele hundert Meter gekerntes Probenmaterial zur Verfügung stehen. Für die Diskussion der magmatischen Entwicklung des Herzynikums weiter unten werden hier die relevanten Ergebnisse (die ansonsten nur in Form von Berichten vorliegen) kurz zusammengefasst.

3.1. BOHRUNGEN BÖTTSTEIN UND LEUGGERN

In diesen nur wenige km voneinander entfernten Bohrungen (s. Abb. 1) wurde ein *Biotit-Granit* erbohrt. Wegen der grossen petrographischen und geochemischen Ähnlichkeiten handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit um ein und denselben Pluton (PETERS et al., 1986, 1989a). Der Granit ist grobkörnig und führt bis 5 cm grosse Kalifeldspat-Einsprenglinge. In beiden Bohrungen kommen untergeordnet Partien eines helleren, Cordierit-führenden Biotit-Granits vor. Es besteht keine direkte Analogie des Böttstein-Leuggern-Granits zu einem der Südschwarzwälder Plutone. Das Alter des Böttstein-Granits wurde auf 314–334 Ma bestimmt (K/Ar an Muskowit und Biotit, PETERS et al., 1986), womit dieser zu den älteren herzynischen Plutoniten gehört.

3.2. BOHRUNG SIBLINGEN

In Siblingen wurden ein Cordierit-Biotit-Granit (Typ 1) und ein etwas hellerer Andalusit-führender Cordierit-Zweiglimmer-Granit (Typ 2) erbohrt, beides Al-reiche Granittypen (MAZUREK, 1989). Typ 1 führt teilweise cm-grosse Kalifeldspat-Einsprenglinge. Typ 2 ist petrographisch sehr ähnlich den Plutoniten von Zurzach und Zuzgen/Wintersingen/Säckingen und führt ebenfalls Andalusit als Akzessorium. Typ 2 enthält ausserdem wenige Prozente Muskowit.

3.3. BOHRUNG SCHAFISHEIM

In dieser Bohrung (MATTER et al., 1988) wurde eine Sequenz saurer bis basischer, K-reicher Plu-

tonite erbohrt (Granite, Syenite, Monzonite, Diorite). Geochemische Argumente zeigen, dass es sich um eine kogenetische Differentiationsreihe von Dioriten über Monzonite zu Syeniten und Graniten handelt. Der Granit ist hierbei das jüngste Glied und intrudiert die basischeren Gesteine, die er allesamt auch als Xenolithe enthält. Der Biotit-Granit enthält akzessorisch etwas Hornblende und ist petrographisch mit keinem anderen Pluton der Region korrelierbar, weist jedoch auffällige geochemische Ähnlichkeiten zum Granit von Pfaffnau auf (s.u.). Die Diorite, Monzonite und Syenite sind in der Nordschweiz einmalig; sie sind SiO₂-gesättigt, teilweise führen sie wenige Prozente Quarz. Die mittleren Feldspat-Gehalte betragen je 40–50 Vol.%, diejenigen der mafischen Minerale schwanken im Mittel im Bereich 40–55% (Biotit 20–40%, Hornblende 3–25%, Klinopyroxen 0–12%). MATTER et al. (1988) haben an einem Syenit absolute Altersbestimmungen durchgeführt: Eine Rb/Sr-Mineralisochrone hat 316 Ma geliefert, ebenso eine K/Ar-Bestimmung an Biotit.

4. Systematik der Nordschweizer und Südschwarzwälder Granite

Von den in Tabelle 1 eingetragenen 22 Kristallin-Bohrungen der Nordschweiz haben 17 (zumindest teilweise) granitische Gesteine geliefert. Im folgenden Abschnitt sollen die Granite aus den oben beschriebenen Bohrungen in einen regionalen genetischen Rahmen gestellt und aufgrund mineralogischer und geochemischer Parameter ein regionales Bild entworfen werden. Die Diskussion muss sich aus folgenden Gründen mehrheitlich auf «Fingerprinting» und Analogieschlüsse zum Schwarzwald beschränken:

- Mit Ausnahme der Bohrung Schafisheim sind in der Nordschweiz keine basischen Plutonite bekannt, welche genetische Interpretationen (z.B. über Differentiationstrends) ermöglichen würden.
- Wegen der Kürze der Kernstrecken in vielen der Bohrungen bleiben geochemische und mineralogische Trends innerhalb desselben Plutons mehrheitlich unentdeckt.

4.1. GRANIT-TYPEN UND ALLGEMEINE ASPEKTE DER GRANITGENESE

Seit den Arbeiten von READ (1957) und TUTTLE und BOWEN (1958) ist die «Granit-Kontroverse» entschieden – Granite kristallisieren aus einer Schmelze. In den darauffolgenden Jahrzehnten

standen (und stehen) neben experimentellen Arbeiten Fragen bezüglich der Herkunft granitischer Magmen (z.B. Krustenaufschmelzung, Mantel-Differentiation), Differentiationsprozessen (z.B. fraktionierte Kristallisation) und der geotektonischen Stellung verschiedener Granit-Typen im Vordergrund (z.B. *ATHERTON* und *TARNEY*, 1979; *ATHERTON* und *GRIBBLE*, 1983; *PEARCE* et al., 1984; *CHAPPELL* und *WHITE*, 1974; *WHITE* und *CHAPPELL*, 1977, 1983; *PITCHER*, 1982, 1987).

CHAPPELL und *WHITE* (1974) haben die Unterteilung von Graniten in S- und I-Typen eingeführt: S-Granite sind durch partielle Anatexis von mehrheitlich metasedimentärem Krustengestein entstanden, während I-Granite beträchtliche Beiträge aus der Unterkruste oder dem Mantel (Differentiation und mehrfache Aufschmelzung basaltischer Magmen) aufweisen. Es hat sich gezeigt, dass dieses im australischen Lachlan-Belt angewandte Konzept allgemein anwendbar ist. Die wichtigsten Unterscheidungskriterien zwischen S- und I-Graniten sind Mineralogie (z.B. Muskowit- oder Hornblende-Führung, Erz-Paragenesen), chemische Zusammensetzung (bes. Al_2O_3 - und Na_2O -Gehalte) sowie O- und Sr-Isotope.

LOISELLE und *WONES* (1979), *COLLINS* et al. (1982), *WHITE* und *CHAPPELL* (1983) und *WHALEN* et al. (1987) haben mit dem A-Granit einen weiteren Typ charakterisiert, der eine alkalireiche Zusammensetzung aufweist und als anorogenes oder spätorogenes Aufschmelzungsprodukt einer verarmten Unterkruste verstanden wird (*WHALEN* et al., 1987; *PITCHER*, 1982). Dies ist der einzige Granit-Typ, welcher nicht an Plattengrenzen gebunden ist. Die am stärksten kalkalibetonen, meist nur kleinen Granite, welche als direkte Manteldifferentiate unter Inselbögen interpretiert werden, bilden einen eigenen Typ und werden als M-Granite bezeichnet (*PITCHER*, 1982).

Die meisten Granite sind an kontinentale Kruste und dort an Plattengrenzen gebunden. *PEARCE* et al. (1984) haben eine Korrelation zwischen Gehalten an inkompatiblen Spurenelementen und geotektonischem Milieu von Graniten zu erstellen versucht. Ihre Einteilung lässt sich teilweise mit derjenigen von *CHAPPELL* und *WHITE* (1974) korrelieren. *PEARCE* et al. (1984) stellen fest, dass im Fall der Granite, die nach einer Kontinent-Kontinent-Kollision (durch Aufschmelzung einer überdickten Kruste oder durch Aufstieg von Mantelmaterial) entstanden sind, ihre empirischen Unterscheidungskriterien versagen. Post-Kollisions-Granite können durch verschiedene Prozesse generiert werden, so dass ihre chemische Zusammensetzung nicht mehr diagnostisch ist.

4.2. MAGMATISMUS IM HERZYNIKUM WESTEUROPAS

Das herzynische Westeuropa wird klassischerweise in drei strukturelle Einheiten gegliedert (*KOSSMAT*, 1927): Das Rhenoherynikum im Norden (Harz, Rheinisches Schiefergebirge), das zentrale Saxothuringikum (Odenwald-Spessart, Teil des Böhmisches Massivs) und das Moldanubikum im Süden (Teil des Böhmisches Massivs, Schwarzwald/Vogesen, Massif Central). Alle drei tektonischen Einheiten enthalten herzynische Granitoide. Eine geodynamische Rekonstruktion ist bis heute nicht eindeutig möglich (z.B. fehlen Ophiolithe); sowohl die Zahl wie auch die Polarität von herzynischen Subduktionszonen ist Gegenstand von Diskussionen (Übersicht in *BEHR* et al., 1984).

Das gesamte Herzynikum Westeuropas ist reich an syn- und postkinematischen Granitoiden, welche hochmetamorphe Gneise intrudieren (Schwarzwald: *EMMERMANN*, 1977; Vogesen: *FLUCK*, 1981; Zentralalpen: *EGGENBERGER* et al., 1991; Spessart: *OKRUSCH*, 1983; Armorica: *BERNARD-GRIFFITHS* et al., 1985; Massif Central: *AUTRAN* und *PETERLONGO*, 1980; Böhmisches Massiv: *FINGER* und *HOCK*, 1985). Die zahlreich vorhandenen Datierungen zeigen einen Schwerpunkt im Bereich 290–330 Ma, was karbonischen Intrusionsaltern entspricht. Aufgrund von Mineralogie und Geochemie (u.a. Nd- und Sr-Isotopen) stellen *LIEW* und *HOFMANN* (1988) Unterschiede zwischen saxothuringischen Intrusiva aus dem Odenwald/Spessart und den moldanubischen Graniten von Schwarzwald und Vogesen fest: Erstere zeigen Signaturen von I-Typ-Graniten und werden als Mischungen von Mantel- und Krustenkomponenten betrachtet, während die letzteren S-Typ-Granite mit hohem Sr-Initial und negativem ϵNd darstellen.

4.3. HERZYNISCHE INTRUSIVA DES SÜDSCHWARZWALDS

Schwarzwald und Vogesen gehören zur moldanubischen Zone, d.h. zum internen Bereich des herzynischen Gebirges, und wurden durch das tertiäre Rifting im Rheingraben getrennt. Herzynische Granite sind in beiden Gebieten sehr verbreitet und bedecken etwa die Hälfte der Fläche, während basischere Magmatite nur untergeordnet vorkommen. Der Schwarzwald besteht aus einer Serie hochmetamorpher, präherzynischer Gneise, welche von herzynischen Granitoiden intrudiert werden. Während der zentrale Bereich aus Gneisen besteht (Zentralschwarzwälder Gneismasse), kommen Granite insbesondere am Süd-, Ost- und Nordrand des aufgeschlossenen

Gebietes vor. Die magmatische Aktivität lässt sich in eine heute vergneiste, ältere Serie und eine duktil undeformierte, jüngere Serie unterteilen (EMMERMANN, 1977), wobei letztere mengenmäßig dominiert.

EMMERMANN (1977) hat drei Granit-Suiten im südlichen und im nördlichen Schwarzwald geochemisch untersucht. Wegen ihrer geographischen Nähe zum Untersuchungsgebiet Nordschweiz ist für die vorliegende Arbeit die Südostschwarzwälder Granitserie von besonderer Bedeutung. Sie beinhaltet die Biotit-Granite von St. Blasien und Albtal sowie die höher differenzierten, Muskowit-führenden Granite von Schluchsee und Bärhalde (s. Abb. 1), welche als Glieder einer kogenetischen Serie interpretiert werden und alle duktil undeformiert sind. Die Serie wird allgemein als Produkt krustaler Anatexis interpretiert, was für die moldanubischen Plutone generell typisch ist.

Der *Biotit-Granit von St. Blasien* ist ein mittel- und gleichkörniger Pluton, welcher vom geochemisch sehr ähnlichen, aber stark porphyrischen *Albtal-Granit* intrudiert wird. Beide Granite sind vor 325–330 Ma, d.h. im Unterkarbon intrudiert (Übersicht über alle Isotopendaten und Referenzen s. Tab. 3). In den meisten Variationsdiagrammen zeigen beide Plutone stark überlappende Felder und gemeinsame Differentiationstrends (EMMERMANN, 1977; SIMON, 1990). Schluchsee- und Bärhalde-Granit sind kleinere, hochdifferenzierte Körper, die nördlich des St.-Blasien-Granits intrudiert sind (Abb. 1). Der Schluchsee-Granit führt neben Biotit akzessorisch Muskowit, der Bärhalde-Granit ist ein Zweiglimmer-Granit mit akzessorischem Cordierit (Tab. 2). Die Anorthit-Gehalte in Plagioklas sind mit 15 bzw. 5% tief. Das Alter des Schluchsee-Granits liegt bei 316–321 Ma (Tab. 3), der Bärhalde-Granit ist mit 307–316 Ma etwas jünger. Damit sind diese Plutone oberkarbonisch und, übereinstimmend mit dem Feldbefund, jünger als die Granite von St. Blasien und Albtal. In Variationsdiagrammen liegen diese beiden Plutone auf gemeinsamen Trendlinien, wobei der Bärhalde-Granit höher differenziert ist. Hingegen stellt EMMERMANN (1977) unterschiedliche Trendlinien für die jüngeren (Schluchsee, Bärhalde) und die älteren (St. Blasien, Albtal) Granite fest (z.B. im TiO_2 -Zr-Diagramm, s. Abb. 5d). Er erklärt dies mit einem «Hiatus», in welchem nach Intrusion des Albtal-Granits dem Magma durch Anatexis von Metasedimenten weiteres krustales Material zugeführt wird, bevor die jüngeren Granite intrudieren und durch erneute fraktionierte Kristallisation differenzieren. SIMON (1990) versucht, die verschiedenen Trends der beiden Gruppen in Va-

riationsdiagrammen durch selektive hydrothermale Umwandlung zu erklären. Dies halten wir für wenig wahrscheinlich: Nach unserer Erfahrung aus der Nordschweiz lässt sich auch in den stärksten umgewandelten Gesteinstypen keinerlei Mobilisierung z.B. von Ti und Zr aufzeigen, welche die stark verschiedenen Steigungen der älteren und jüngeren Plutonen im TiO_2 -Zr-Diagramm erklären könnte (Abb. 5d).

Unmittelbar nach Abschluss der magmatischen Vorgänge setzt eine mehrphasige tektonohydrothermale Aktivität ein, welche das gesamte Kristallin des Schwarzwalds wie auch der Nordschweiz mehr oder minder intensiv erfasst (SIMON, 1990; PETERS et al., 1986, 1989a; MATTER et al., 1988; MAZUREK, 1991). Frühe Sprödstrukturen und hydrothermale Umwandlungen hängen mit der Platznahme und Abkühlung der Plutone zusammen, während eine jüngere Phase mit ausgeprägter Spröddeformation und tieftemperierter Umwandlung mit Bewegungen in den permokarbonischen Trögen Westeuropas (z.B. in der Nordschweiz) zusammenhängen. Nach einer Ruhephase im Mesozoikum werden Bewegungen und hydrothermale Zirkulation in Zusammenhang mit der Jurafaltung vor ca. 10 Ma vermutet.

4.4. GRANITTYPEN IM SÜDSCHWARZWALD UND IN DER NORDSCHWEIZ

Die Mineralogie der Nordschweizer Granite aus sämtlichen verfügbaren Kristallin-Bohrungen ist in Tabelle 2 tabelliert. Entsprechende Daten der Südostschwarzwälder Granitserie sind EMMERMANN (1977) und SIMON (1990) zu entnehmen. In der QAP-Darstellung (Abb. 3) streuen die Mittelwerte sämtlicher Granite der Nordschweiz und des Südschwarzwalds wenig und fallen allesamt ins Zentrum des Dreiecks, sind also Granite im engeren Sinn. In der QFM-Darstellung (Abb. 3) fallen insbesondere die grossen Anteile mafischer Gemengteile in den Melagraniten von Lindau und Kreuzlingen auf. Ansonsten lassen die Darstellungen in Abbildung 3 keine weiteren Unterteilungen und Korrelationen zu.

CHAPPELL und WHITE (1974), WHITE und CHAPPELL (1977, 1983) und PITCHER (1982) haben eine Reihe von Kriterien aufgestellt, welche zur Unterscheidung verschiedener Granit-Typen (insbesondere der S- und I-Granite) verwendet werden können. Hierzu zählen Mineralogie, Gefüge, Art von Einschlüssen, normativer Mineralbestand sowie verschiedene geochemische Parameter. Diagnostisch können ausserdem die isotopischen Zusammensetzungen von O und Sr sein (SHEPPARD, 1977; O'NEIL und CHAPPELL, 1977).

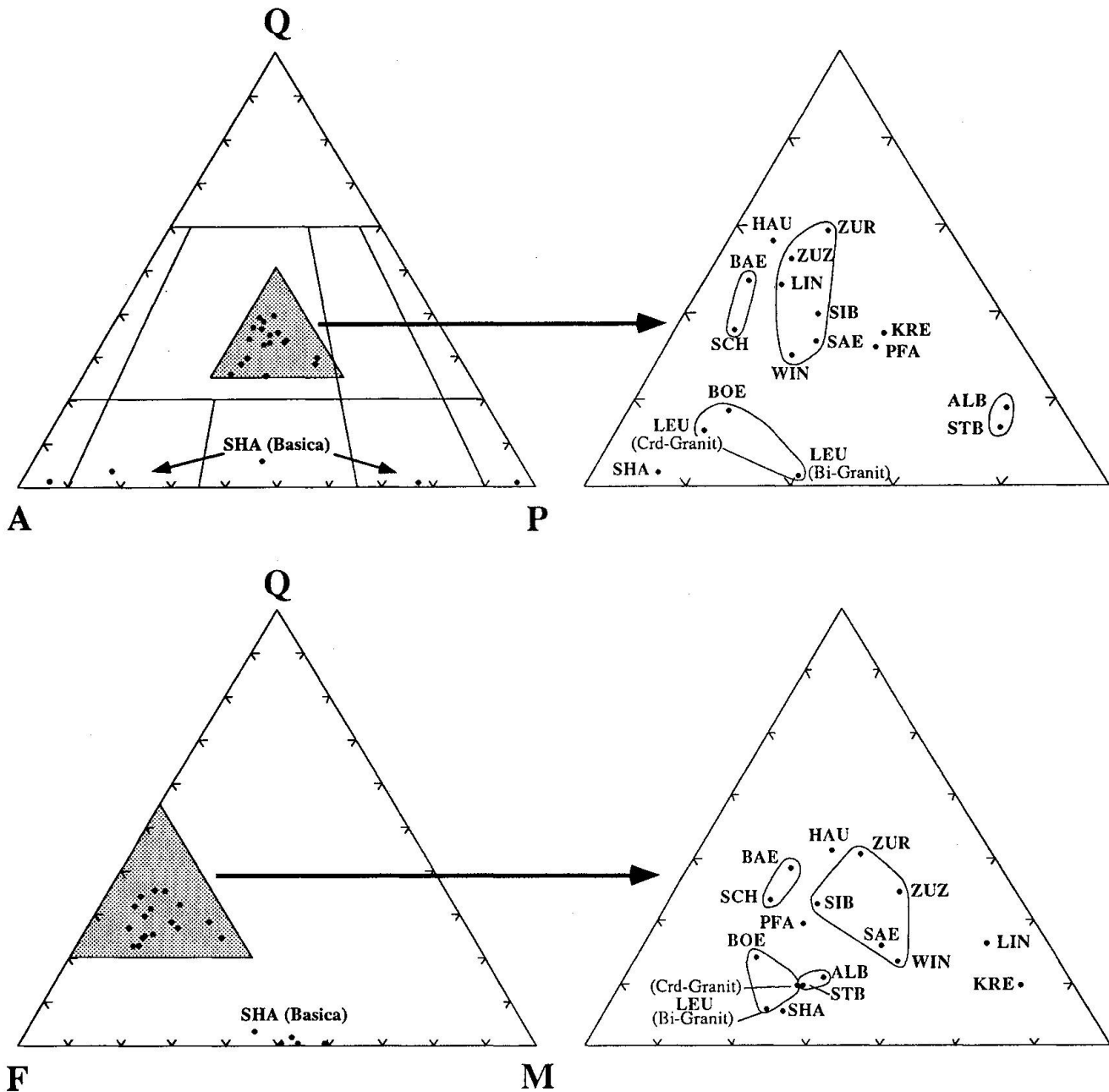


Abb. 3 Graphische Darstellungen der Modalbestände plutonischer Gesteine der Nordschweiz und des Südschwarzwalds. Q = Quarz, A = Alkalifeldspat, P = Plagioklas, M = mafische Komponenten, F = A + P. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte. STB = St. Blasien, ALB = Albtal, SCH = Schluchsee, BAE = Bärhalde; weitere Abkürzungen s. Tab. 1.

Typisch für S-Typ-Granite sind u.a. die Al-reichen Phasen (z.B. Muskowit, Cordierit, Alumosilikate) und der Reichtum an Gneis-Xenolithen und Vorkommen retrograder Turmalin-Adern. Si-Gehalte sind stets hoch, kogenetische basischere Gesteine fehlen. Der normative Mineralbestand enthält > 1% Korund. Na_2O -Gehalte liegen unter 3,2 Gew.%, während das molare Verhältnis $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca}) > 1.05$ ist. Das initiale $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ist hoch (> 0.708), ebenso $\delta^{18}\text{O}$ (> 10‰). Demgegenüber ist für I-Typ-Granite die Führung von Horn-

blende sowie Xenolithen basischer Magmatite charakteristisch. Si-Gehalte sind variabel, oft sind kontinuierliche Evolutionstrends zu verwandten Basica vorhanden. Normativer Korund ist < 1%, oft sind I-Typen auch Diopsid-normativ. I-Typen sind zudem Na_2O -reich (> 3.2 Gew.%) und Al-arm ($\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca}) < 1.05$).

Die verfügbaren Parameter aller Granite der Region sind in Tabellen 3–4 zusammengestellt. Insbesondere für die Südoschwärzwälder Granite bestehen zahlreiche Isotopendaten (Tab. 3):

Tab. 3 Verfügbare Isotopen-Daten aus Südschwarzwälder und Nordschweizer Graniten. STB = St. Blasien, ALB = Albtal, SCH = Schluchsee, BAE = Bärhalde; weitere Abkürzungen s. Tab. 1.

	HAU	SHA	BOE	LEU	SAE	STB	ALB	SCH	BAE
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-	-	10 ^{1,3)}	10 ^{1,4)}	-	8.5 - 10 ^{2,6,7)}	9 - 10.5 ^{2,6,7)}	9.5 - 11.5 ^{6,7)}	10-11 ^{2,6,7)}
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$	0.7089 ¹⁶⁾	0.7087 ⁵⁾ (Syenit)	-	-	-	0.7094 ⁸⁾	0.7088 ¹¹⁾ , 0.7090 ⁸⁾	0.7121 ¹⁴⁾ , 0.7159 ¹⁵⁾	0.7174 ¹³⁾ , 0.7159 ¹⁵⁾
Alter (Ma)	Rb/Sr-Iso- chrone ¹⁶⁾ : 337 ± 11, 341 ± 5	K/Ar ⁵⁾ an -Hbl: 299 ± 3.2 -Alb: 300 ± 3.2 -Kfs: 300 ± 5 -Bi: 316 ± 3.3 Rb/Sr-Iso- chrone ⁵⁾ : 315.5 ± 1 (alle Daten aus Syeniten)	K/Ar an Bi: ³⁾ - 314 ± 6 322 ± 3 334 ± 3	-	Rb/Sr- Modellalter: 325 ± 5 ⁹⁾ K/Ar an Bi: 332 ± 2 ⁹⁾	Rb/Sr- Modellalter an Bi: 329 ± 4 ⁹⁾	Rb/Sr- Isochrone 10,11): 326 ± 1, 325 ± 4%	Rb/Sr- Isochrone: 321 ± 10 ¹⁴⁾ , 316 ± 4 ¹⁵⁾	Rb/Sr- Isochrone: 307 ± 4 ¹³⁾ , 316 ± 4 ¹⁵⁾
							K/Ar an Bi, Kfs ¹²⁾ : 339 ± 4%		

1) Berechnet aus $\delta^{18}\text{O}_{\text{Quarz}}$ unter der Annahme einer Fraktionierung $\Delta_{\text{Quarz-Gesamtgestein}} = 1\%$

2) Tiefere Werte wurden ebenfalls gemessen, sie werden als Produkte hydrothermalen Umwandlung interpretiert, weil $\delta^{18}\text{O}_{\text{Quarz}}$ auch bei erniedrigten $\delta^{18}\text{O}_{\text{Gestein}}$ hoch bleibt (STB: 10–12.5. BAE: 11–12).

3–16) Referenzen: ³⁾ PETERS et al. (1986), ⁴⁾ PETERS et al. (1989a), ⁵⁾ MATTER et al. (1988), ⁶⁾ HOEFS und EMMERMANN (1983), ⁷⁾ SIMON (1990), ⁸⁾ LIEW und HOFMANN (1988), ⁹⁾ DRACH (1978), ¹⁰⁾ VENZLAFF (1971), ¹¹⁾ SCHULER und STEIGER (1978), ¹²⁾ BIERWIRTH und ACKERMANN (1974), ¹³⁾ WENDT et al. (1974), ¹⁴⁾ LEUTWEIN und SONET (1974), ¹⁵⁾ MÜLLER-SOHNUS et al. (1976), ¹⁶⁾ BREWER und LIPPOLT (1972, 1974).

Das initiale $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ der Granite von St. Blasien und Albtal liegt bei 0.709, und $\delta^{18}\text{O}$ übersteigt oft 10‰. Beide Plutone sind Korund-normativ. Diese Daten, zusammen mit den Nd-Isotopendaten von LIEW und HOFMANN (1988), lassen auf einen bedeutenden Beitrag von Sediment-Aufschmelzung bei der Magmenbildung schliessen; die meisten Autoren interpretieren beide Plutone als S-Typ-Granite (HOEFS und EMMERMANN, 1983; LIEW und HOFMANN, 1988; SIMON, 1990). Die Granite von Schluchsee und Bärhalde zeigen noch in viel stärkerem Masse als diese S-Typ-Charakteristika: Sie sind beide deutlich Korund-normativ, das initiale $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ist mit 0.712–0.717 sehr hoch, ebenso ist $\delta^{18}\text{O}$ meist höher als 10‰ (s. Tab. 3).

Bei den Nordschweizer Graniten, wo die Isotopendaten spärlich sind, können die petrographischen, mineralogischen und geochemischen Parameter (Tab. 4) zur Unterscheidung verwendet werden. Die meisten Nordschweizer Plutone sind Al-reich, Korund-normativ, führen Al-reiche, für S-Typen diagnostische Mineralien und Xenolithe von teilweise resorbierten metapelitischen Gneisen. Ausnahmen sind Schafisheim (Hornblende-führend, mehrheitlich Diopsid-normativ, ausschliesslich basische Xenolithe) und Pfaffnau. Auffallend ist – wiederum mit der Aus-

nahme Schafisheim – das Fehlen basischer Plutone, die als Muttergesteine der Granite interpretiert werden könnten. Wie Abbildung 4 zeigt, sind alle Granite der Region mit der Ausnahme von Schafisheim stark peraluminös, wenn auch die Na_2O -Gehalte teilweise 3.2 Gew.% übersteigen. Der Granit von Schafisheim fällt als einziger Pluton deutlich ins Feld der I-Typ-Granite. Die Granite von Kreuzlingen und Pfaffnau sind wegen ihrer starken hydrothemalen Umwandlung (z.B. enormer Na-Verlust) in Abbildung 4 nicht darstellbar. Während der Granit von Kreuzlingen gemäss den Kriterien von Tabelle 5 klar ein S-Typ ist, bestehen auffallende geochemische Ähnlichkeiten zwischen den Graniten von Pfaffnau und Schafisheim (s.u.).

Somit können die meisten Granite der Nordschweiz und alle Granite der Südostschwarzwälder Serie von EMMERMANN (1977) als Produkte krustaler Anatexis, mehrheitlich von metapelitischen Gesteinen, interpretiert werden und stellen somit S-Typen dar. Eine Ausnahme ist hier der Granit von Schafisheim, der zusammen mit der basischen Suite kalkalkalische bis alkalische Trends widerspiegelt und Unterkrusten- oder Mantelsignaturen aufweist. Auch im Granit von Pfaffnau fehlen jegliche S-Typ-Affinitäten.

4.5. GEOCHEMISCHE CHARAKTERISTIKA DER SÜDSCHWARZWÄLDER UND NORDSCHWEIZER GRANITE

Die Mittelwerte der primären Zusammensetzungen der Nordschweizer Granite sind in Tabelle 5 zusammengestellt; Daten für die Südschwarzwälder Granite sind EMMERMANN (1977) und SIMON (1990) zu entnehmen. Im Anhang finden sich alle Einzelanalysen der älteren Nordschweizer Bohrungen, diejenigen der NAGRA-Bohrungen sind in PETERS et al. (1986, 1989a), MATTER et al. (1988) und MAZUREK (1989) tabelliert.

Die in Tabelle 5 und im Anhang dargestellten Analysen beziehen sich auf die frischestmöglichen, d.h. hydrothermal wenig veränderten Proben, welche die primäre Zusammensetzung widerspiegeln. Einige der älteren Bohrungen haben allerdings nur mehr oder weniger stark hydrothermal beeinflusstes Material geliefert, was genetische Aussagen schmälert. Diagnostisch für postmagmatische Alteration sind insbesondere die Auslaugung von Na_2O und CaO (Plagioklas-Umwandlung, Calcit-Imprägnation) sowie eine Zunahme von $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ durch Oxidation. Ebenso deuten erhöhte H_2O - und CO_2 -Gehalte auf hydrothermale Effekte (Bildung von Tonmineralien und Calcit). Gemäss diesen Kriterien sind, in Übereinstimmung mit der petrographischen Evidenz, hauptsächlich die Granite von Kreuzlingen und Pfaffnau hydrothermal stark beeinflusst.

Wie die Mittelwerte der chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Granite (Tab. 5) zeigen, besteht in den Graniten der Nordschweiz ein weites Spektrum von Zusammensetzungen und Differentiationsgraden; besonders ist hier die Abfolge der S-Typen von Melagraniten (Kreuzlingen, Lindau) über Biotit-Granite (Böttstein, Leuggern) zu den Andalusit-Zweiglimmer-Graniten (Zuzgen, Wintersingen, Säckingen, Zurzach, Siblingen) zu erwähnen. In den folgenden Abschnitten wird versucht, die Granite der Nordschweiz und des Südschwarzwalds aufgrund geochemischer und petrographischer Argumente zu korrelieren und zu unterteilen. Hierzu sind in Abbildung 5 ausgewählte Variationsdiagramme dargestellt.

4.5.1. Inhomogene Melagranite

Die beiden Melagranite von Lindau und Kreuzlingen sind mineralogisch wie auch chemisch sehr ähnlich und höchstwahrscheinlich eng verwandt. Zu den Gemeinsamkeiten zählen der Reichtum an metapelitischen Xenolithen, der Cordierit-

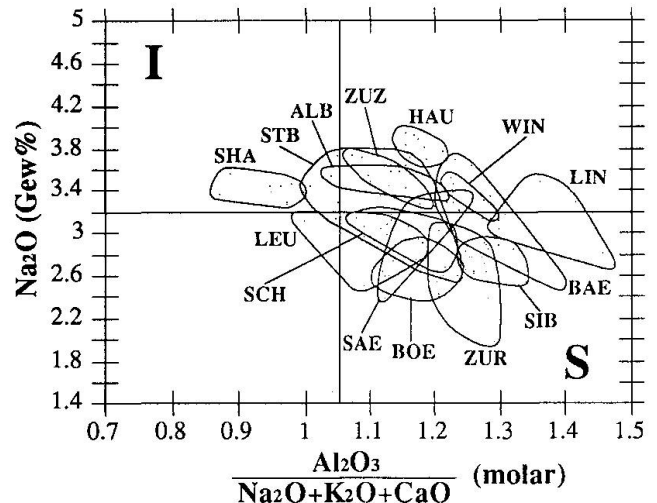


Abb. 4 Diagramm zur Unterscheidung von I- und S-Typ-Graniten nach den Kriterien von CHAPPELL und WHITE (1974) und PITCHER (1982). Die Daten der Bohrungen Kreuzlingen und Pfaffnau sind wegen zu starker hydrothermalen Umwandlung nicht darstellbar. Daten der Schwarzwald-Granite aus SIMON (1990), diejenigen der NAGRA-Bohrungen aus PETERS et al. (1986, 1989a), MATTER et al. (1988) und MAZUREK (1989). STB = St. Blasien, ALB = Albtal, SCH = Schluchsee, BAE = Bärhalde; weitere Abkürzungen s. Tab. 1.

Reichtum, die chemische Inhomogenität und der geringe Differentiationsgrad. Dies zeigen die tiefen Si-Gehalte und die hohen Gehalte an Al, Fe, Mg und Spurenmetallen. Unterschiede zwischen den beiden Graniten in den Gehalten von Alkalien, H_2O und CO_2 (und möglicherweise weiteren Komponenten) sind hauptsächlich auf die bedeutende hydrothermale Umwandlung des Granits von Kreuzlingen zurückzuführen und sind nicht primärer Natur.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Graniten liegen in Lindau und wenigstens teilweise auch in Kreuzlingen die darstellenden Punkte in Variationsdiagrammen (s. Abb. 5) nicht auf Geraden, welche Differentiationstrends abbilden. Jede Art von linearer Beziehung, welche auf fraktionierte Kristallisation deuten würde, fehlt insbesondere in Lindau völlig. Vielmehr ist die Streubreite der Zusammensetzungen sehr breit und kann möglicherweise als Resultat verschiedener Grade der Aufschmelzung (v.a. von Biotit) des metapelitischen Protoliths interpretiert werden. Die im Schwarzwald wohlbekannt lineare Beziehung zwischen TiO_2 - und Zr-Gehalten (EMMERMANN, 1977) besteht nicht, vielmehr variieren bei annähernd konstanten Zr-Gehalten die Gehalte an TiO_2 wie auch von $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO})$ sehr stark (s. Abb. 5). Dies deutet auf lokal stark variable Biotit-Gehalte bei kon-

Tab. 5 Chemische Zusammensetzungen (Röntgenfluoreszenz-Analysen) möglichst frischer Gesteine aus dem Nordschweizer Kristallin (Mittelwerte $\pm 1 \sigma$). Hydrothermale Effekte konnten nicht überall vermieden werden (bes. Kreuzlingen, Pfäffau). Angaben in Gew.% für Hauptelemente, in ppm für Spuren. «n.a.» = nicht analysiert. Daten aus den NAGRA-Bohrungen nach Peters et al. (1986, 1989a), MATTER et al. (1988) und MAZUREK (1989). Abkürzungen s. Tab. 1.

Gesteinstyp	HAU	PFA	SHA	KRE	LIN	BOE	LEU	SAE	ZUZ	WIN	SIB	ZUR
	Zweiglimmergranit	Bi-Granit	Bi-Granit	Crd-Bi-Melagranit	Crd-Bi-Melagranit	Bi-Granit \pm Crd-Bi-Granit	Bi-Granit \pm Crd-Bi-Granit	Zweiglimmergranit	Zweiglimmergranit	Zweiglimmergranit	Crd-Bi-Granit \pm Crd-Zweiglimmergranit	Zweiglimmergranit
Anzahl	7	4	10	7	7	13	11	9	9	5	13	6
SiO ₂	74.64 \pm 0.86	66.33 \pm 0.56	68.66 \pm 1.24	65.41 \pm 2.92	67.45 \pm 1.14	71.73 \pm 0.96	69.77 \pm 2.22	74.21 \pm 1.17	71.56 \pm 0.25	72.11 \pm 0.97	73.72 \pm 1.36	71.34 \pm 1.30
TiO ₂	0.07 \pm 0.00	0.54 \pm 0.11	0.47 \pm 0.06	0.52 \pm 0.23	0.63 \pm 0.12	0.38 \pm 0.05	0.42 \pm 0.13	0.15 \pm 0.09	0.21 \pm 0.01	0.21 \pm 0.01	0.24 \pm 0.05	0.29 \pm 0.10
Al ₂ O ₃	13.89 \pm 0.25	15.42 \pm 0.86	13.86 \pm 0.22	15.33 \pm 0.95	15.31 \pm 0.52	14.33 \pm 0.33	14.44 \pm 0.95	14.20 \pm 0.47	14.02 \pm 0.17	14.34 \pm 0.10	14.52 \pm 0.40	14.41 \pm 0.30
Fe ₂ O ₃	0.59 \pm 0.11	2.49 \pm 0.97	1.10 \pm 0.83	1.89 \pm 0.47	0.93 \pm 0.33	0.50 \pm 0.14	0.41 \pm 0.11	0.85 \pm 0.15	0.65 \pm 0.11	0.62 \pm 0.25	0.71 \pm 0.19	0.83 \pm 0.22
FeO	0.16 \pm 0.06	0.51 \pm 0.09	0.83 \pm 0.28	1.84 \pm 0.90	3.32 \pm 0.35	1.59 \pm 0.25	2.02 \pm 0.55	0.23 \pm 0.30	0.76 \pm 0.13	0.50 \pm 0.10	0.84 \pm 0.21	1.26 \pm 0.48
MnO	0.04 \pm 0.01	0.05 \pm 0.01	0.04 \pm 0.01	0.08 \pm 0.03	0.06 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01	0.02 \pm 0.01	0.04 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01	0.05 \pm 0.01	0.04 \pm 0.01
MgO	0.13 \pm 0.02	0.69 \pm 0.21	1.19 \pm 0.19	1.13 \pm 0.43	1.52 \pm 0.29	0.86 \pm 0.13	1.14 \pm 0.38	0.23 \pm 0.08	0.31 \pm 0.02	0.21 \pm 0.05	0.54 \pm 0.15	0.67 \pm 0.27
CaO	0.46 \pm 0.05	2.22 \pm 0.54	1.72 \pm 0.51	2.82 \pm 0.62	1.36 \pm 0.39	1.39 \pm 0.25	1.44 \pm 0.40	0.54 \pm 0.24	0.71 \pm 0.15	0.60 \pm 0.04	0.91 \pm 0.20	0.75 \pm 0.28
Na ₂ O	3.84 \pm 0.09	1.49 \pm 1.29	3.10 \pm 0.93	0.21 \pm 0.04	3.11 \pm 0.29	2.65 \pm 0.12	2.99 \pm 0.08	3.04 \pm 0.43	3.55 \pm 0.15	3.33 \pm 0.18	2.75 \pm 0.12	2.55 \pm 0.37
K ₂ O	4.31 \pm 0.11	5.08 \pm 0.42	5.76 \pm 0.41	5.05 \pm 0.22	3.58 \pm 0.12	4.93 \pm 0.25	5.02 \pm 0.36	5.09 \pm 0.34	4.91 \pm 0.11	4.53 \pm 0.13	4.81 \pm 0.19	5.46 \pm 0.33
P ₂ O ₅	0.27 \pm 0.01	0.20 \pm 0.05	0.28 \pm 0.04	0.27 \pm 0.08	0.21 \pm 0.04	0.18 \pm 0.02	0.21 \pm 0.05	0.33 \pm 0.15	0.29 \pm 0.01	0.29 \pm 0.01	0.25 \pm 0.02	0.20 \pm 0.03
H ₂ O	0.87 \pm 0.22	2.71 \pm 0.75	0.80 \pm 0.43	3.09 \pm 0.24	1.77 \pm 0.23	0.90 \pm 0.12	0.81 \pm 0.32	1.06 \pm 0.35	1.39 \pm 0.15	1.76 \pm 0.13	0.77 \pm 0.75	1.07 \pm 0.17
CO ₂	0.10 \pm 0.15	2.35 \pm 0.86	1.16 \pm 0.83	2.75 \pm 0.61	0.94 \pm 0.99	0.38 \pm 0.20	0.59 \pm 0.37	0.07 \pm 0.09	0.26 \pm 0.24	0.38 \pm 0.08	0.39 \pm 0.18	0.32 \pm 0.27
Summe	99.51	100.08	98.97	100.38	100.18	99.88	99.32	100.13	98.66	98.93	100.48	99.20
Nb	6 \pm 4	<5	20 \pm 2	8 \pm 15	7 \pm 4	13 \pm 2	21 \pm 2	11 \pm 3	12 \pm 1	9 \pm 2	19 \pm 2	n.a.
Zr	29 \pm 5	219 \pm 29	268 \pm 23	158 \pm 10	180 \pm 23	145 \pm 22	165 \pm 39	54 \pm 21	97 \pm 5	90 \pm 5	114 \pm 22	n.a.
Y	11 \pm 3	15 \pm 3	24 \pm 1	42 \pm 20	41 \pm 34	30 \pm 9	36 \pm 5	14 \pm 4	21 \pm 1	19 \pm 2	30 \pm 2	n.a.
Sr	58 \pm 10	452 \pm 76	535 \pm 130	108 \pm 55	141 \pm 21	154 \pm 55	170 \pm 59	74 \pm 29	77 \pm 4	88 \pm 14	101 \pm 32	n.a.
U	<3	<3	15 \pm 6	73 \pm 102	77 \pm 190	<3	<3	8 \pm 0	10 \pm 4	4 \pm 4	<31	n.a.
Rb	220 \pm 17	143 \pm 19	297 \pm 27	238 \pm 38	126 \pm 18	267 \pm 19	257 \pm 27	330 \pm 16	299 \pm 8	252 \pm 13	296 \pm 40	n.a.
Th	6 \pm 7	51 \pm 3	44 \pm 24	46 \pm 18	21 \pm 2	24 \pm 7	31 \pm 6	13 \pm 7	24 \pm 2	18 \pm 4	29 \pm 3	n.a.
Pb	25 \pm 6	61 \pm 6	55 \pm 9	47 \pm 27	36 \pm 2	36 \pm 6	47 \pm 12	23 \pm 6	33 \pm 2	69 \pm 16	33 \pm 5	n.a.
Ga	15 \pm 2	24 \pm 2	n.a.	20 \pm 7	24 \pm 7	18 \pm 3	17 \pm 1	19 \pm 2	23 \pm 1	21 \pm 2	23 \pm 1	n.a.
Zn	19 \pm 6	30 \pm 3	46 \pm 8	76 \pm 47	82 \pm 21	47 \pm 5	54 \pm 19	25 \pm 8	50 \pm 4	39 \pm 16	50 \pm 6	n.a.
Cu	10 \pm 1	39 \pm 25	<9	195 \pm 229	27 \pm 23	<9	<9	12 \pm 3	11 \pm 1	<9	<9	n.a.
Ni	8 \pm 1	34 \pm 20	33 \pm 5	34 \pm 18	30 \pm 9	3 \pm 5	13 \pm 2	9 \pm 3	13 \pm 2	10 \pm 1	<12	n.a.
Co	12 \pm 5	9 \pm 4	17 \pm 2	13 \pm 6	15 \pm 1	<5	<5	15 \pm 8	14 \pm 1	15 \pm 1	20 \pm 2	n.a.
Cr	7 \pm 7	<4	83 \pm 16	39 \pm 31	51 \pm 16	28 \pm 5	24 \pm 13	9 \pm 8	<4	<4	<12	n.a.
V	<5	63 \pm 24	74 \pm 26	104 \pm 59	100 \pm 28	27 \pm 14	35 \pm 14	10 \pm 3	15 \pm 3	13 \pm 3	18 \pm 8	n.a.
Ce	n.a.	77 \pm 21	25 \pm 14	20 \pm 9	21 \pm 0	82 \pm 44	34 \pm 29	n.a.	n.a.	24 \pm 21	<16	n.a.
Nd	n.a.	16 \pm 18	1709 \pm 184	n.a.	n.a.	15 \pm 18	<10	n.a.	n.a.	n.a.	<18	n.a.
Ba	198 \pm 42	3450 \pm 214	1709 \pm 184	710 \pm 249	728 \pm 43	515 \pm 158	602 \pm 307	281 \pm 99	338 \pm 11	518 \pm 269	363 \pm 145	n.a.
La	n.a.	73 \pm 9	68 \pm 8	39 \pm 16	33 \pm 7	32 \pm 16	26 \pm 14	<10	<10	<10	31 \pm 10	n.a.
Sc	4 \pm 1	6 \pm 1	12 \pm 2	13 \pm 7	17 \pm 5	8 \pm 1	10 \pm 4	4 \pm 0	5 \pm 0	5 \pm 0	6 \pm 1	n.a.

stantem Zirkon-Gehalt. Bei den Graniten von Kreuzlingen und Lindau handelt es sich offenbar um undifferenzierte, nicht homogenisierte SiO_2 -arme Magmen, deren Zusammensetzungen durch variable Grade krustaler Anatexis metapelitischer Gneise bestimmt werden. Es ist möglich, dass derartige Magmen das undifferenzierte Stamm-Magma der meisten anderen Plutone der Nordschweiz darstellen.

4.5.2. Südostschwarzwälder/ Nordschweizer Granitserie

Die «Südostschwarzwälder Granitserie» wurde von EMMERMANN (1977) definiert. Sie beinhaltet die älteren Granite von St. Blasien und Albatal sowie die jüngeren Plutone von Schluchsee und Bärhalde. Die älteren und die jüngeren Plutone liegen auf verschiedenen Trendgeraden in Variationsdiagrammen (s. z.B. Abb. 5), was EMMERMANN (1977) als zeitlichen «Hiatus» zwischen den beiden Gruppen interpretiert, in dessen Verlauf dem Magma durch progressive Anatexis weiteres Material zugeführt worden ist.

In den Variationsdiagrammen (Abb. 5) sind die Nordschweizer Granite zusammen mit Mittelwerten aus dem Schwarzwald dargestellt. Es fallen folgende Punkte auf:

1. Die meisten Nordschweizer S-Typ-Granite (Böttstein/Leuggern, Säckingen/Zuzgen/Wintersingen, Siblingen, Zurzach) liegen auf Trendlinien, welche durch die ältere Gruppe der Südostschwarzwälder Granitserie (St. Blasien, Albatal) definiert werden, oder auf deren linearer Extrapolation. Dies ist insbesondere in den Diagrammen Sr-Rb, TiO_2 -Zr und $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO}$ -Zr deutlich (Abb. 5).
2. Die Zusammensetzung des Biotit-Granits von Böttstein/Leuggern überlappt mehrheitlich mit derjenigen der Granite von St. Blasien und Albatal; es besteht vermutlich eine enge Verwandtschaft. Die im Mittel höheren Si- und Rb-Gehalte und etwas tieferen Gehalte an Fe, Mg, Ti, Zr, Sr und Ba in Böttstein/Leuggern lassen auf eine etwas stärkere Differentiation eines gemeinsamen Stamm-Magmas schliessen. Dies ist konsistent mit Altersbestimmungen, welche innerhalb der Streubreite dieselben Alter für die Granite von St. Blasien, Albatal und Böttstein/Leuggern ergeben (s. Tab. 3).
3. Die Andalusit- und Muskowit-führenden, petrographisch ähnlichen Granite von Säckingen/Zuzgen/Wintersingen, Siblingen und Zurzach haben ebenso ähnliche Zusammensetzungen sowohl der Haupt- wie der Spurenelemente. Charakteristisch sind die hohen Si- und Rb-

Gehalte, während die Gehalte an Fe, Mg, Ti, Ca, Zr, Sr und metallischen Spurenelementen sehr tief sind. In Variationsdiagrammen liegen diese Granite auf der Verlängerung der Trendlinien der Granite von St. Blasien, Albatal, Böttstein und Leuggern und können als deren hochdifferenzierte Glieder interpretiert werden (z.B. TiO_2 -Zr, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO}$ -Zr, s. Abb. 5). Hingegen besteht keine Korrelation mit den Muskowit-führenden Graniten von Schluchsee und Bärhalde im Süd-schwarzwald (Abb. 5), welche somit in der Nordschweiz keine Analoga haben.

Nach den geochemischen Daten kann ein grosser Teil der S-Typ-Granite der Nordschweiz (Böttstein/Leuggern, Säckingen/Zuzgen/Wintersingen, Siblingen, Zurzach) zum gleichen magmatischen Zyklus zugerechnet werden wie die älteren Plutone der Südostschwarzwälder Granitserie Emmermanns (St. Blasien, Albatal). Gemäss den vorhandenen Altersbestimmungen (Tab. 3) umfasst die Intrusion dieser Granite etwa den Zeitraum vor 315–330 Ma.

Die grosse petrographische und mineralogische Ähnlichkeit der Granite von Säckingen/Zuzgen/Wintersingen, Siblingen und Zurzach wird durch geochemische Daten bestätigt; all diese Plutone sind hochdifferenziert, deutlich peraluminös (Abb. 4) und führen akzessorischen Andalusit. Es ist anzunehmen, dass es sich um eine Serie von etwa zeitgleichen Intrusionen handelt. Als einziger Pluton dieser Gruppe ist der Granit von Säckingen auf 325–332 Ma datiert (DRACH 1978; s. Tab. 3). Wir definieren diese Gruppe von Plutonen als Serie hochdifferenzierter Andalusit-Zweiglimmer-Granite der Nordschweiz.

Die jüngeren Granite der Südostschwarzwälder Granitserie haben in der Nordschweiz keine Äquivalente und liegen in Variationsdiagrammen auf Linien, welche von den anderen Graniten deutlich verschieden sind.

4.5.3. Granite von Schafisheim und Pfaffnau

Wie oben aufgezeigt, unterscheiden sich die in der Bohrung Schafisheim (MATTER et al., 1988) erbohrten Plutonite grundsätzlich von den bisher besprochenen S-Typ-Graniten aus Nordschweizer Bohrungen und Oberflächenaufschlüssen des Südschwarzwalds. Im Granit von Schafisheim fehlen jegliche Anzeichen für Sedimentaufschmelzung, vielmehr besteht eine genetische Verwandtschaft mit K-reichen Basica (Diorite, Monzonite, Syenite). Der Granit ist charakterisiert durch hohe K-, Ba-, Sr-, Zr- und seltene Erden-Gehalte und liegt in Variationsdiagram-

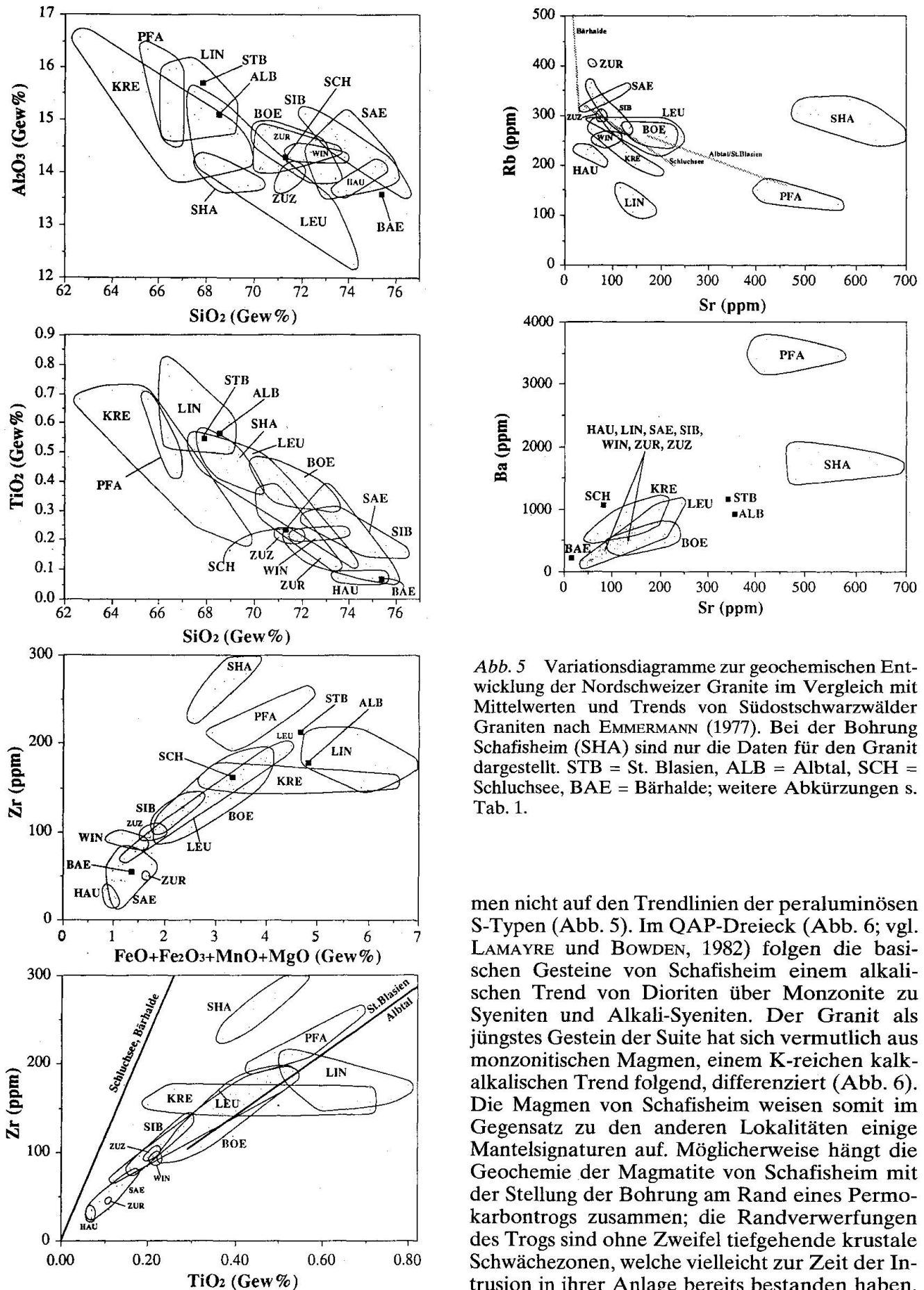


Abb. 5 Variationsdiagramme zur geochemischen Entwicklung der Nordschweizer Granite im Vergleich mit Mittelwerten und Trends von Südoschwarzwälder Graniten nach EMMERMANN (1977). Bei der Bohrung Schafisheim (SHA) sind nur die Daten für den Granit dargestellt. STB = St. Blasien, ALB = Albtal, SCH = Schluchsee, BAE = Bärhalde; weitere Abkürzungen s. Tab. 1.

men nicht auf den Trendlinien der peraluminösen S-Typen (Abb. 5). Im QAP-Dreieck (Abb. 6; vgl. LAMAYRE und BOWDEN, 1982) folgen die basischen Gesteine von Schafisheim einem alkalischen Trend von Dioriten über Monzonite zu Syeniten und Alkali-Syeniten. Der Granit als jüngstes Gestein der Suite hat sich vermutlich aus monzonitischen Magmen, einem K-reichen kalkalkalischen Trend folgend, differenziert (Abb. 6). Die Magmen von Schafisheim weisen somit im Gegensatz zu den anderen Lokalitäten einige Mantelsignaturen auf. Möglicherweise hängt die Geochemie der Magmatite von Schafisheim mit der Stellung der Bohrung am Rand eines Permo-karbondrogs zusammen; die Randverwerfungen des Trogs sind ohne Zweifel tiefgehende krustale Schwächezonen, welche vielleicht zur Zeit der Intrusion in ihrer Anlage bereits bestanden haben.

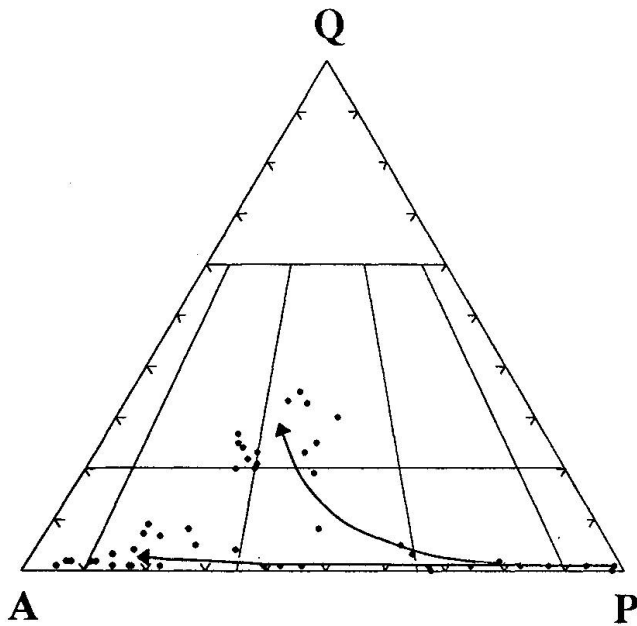


Abb. 6 Streckeisen-QAP-Diagramm für die plutonischen Gesteine der Bohrung Schafisheim. Jeder Punkt entspricht einer Analyse.

Die S-Typ-Granite der Nordschweiz sind ihrerseits alle nördlich des Trogs zu finden.

Zeitlich besteht kein signifikanter Unterschied zwischen der Intrusion der S-Typ-Granite und der Magmatite von Schafisheim. MATTER et al. (1988) haben an Syeniten ein Intrusionsalter von 315–316 Ma gemessen (Rb/Sr, K/Ar an Bi, Details s. Tab. 3), während sie die jüngeren K/Ar-Alter an Hornblende, Albit und Kalifeldspat um 300 Ma als Alter einer ersten hydrothermalen Phase interpretieren.

Der unweit entfernte, duktil schwach deformierte Granit von Pfaffnau nimmt eine analoge tektonische Stellung am Rand eines Trogs ein und zeigt auch petrographische und geochemische Ähnlichkeiten. Auch hier fehlen jegliche Anzeichen für Sediment-Aufschmelzung (z.B. Schollen von Gneisen, Führung Al-reicher Minerale wie Muskowit, Andalusit, Cordierit). Wegen der starken hydrothermalen Umwandlung sind die geochemischen Daten mit Vorsicht zu behandeln; immerhin fallen die hohen Ba-, Sr- und Zr-Gehalte auf, was an den Granit von Schafisheim erinnert (Abb. 5).

K-betonte basische Gesteine und Syenite sind vereinzelt auch aus dem Nordschwarzwälder Durbachtal bekannt, wo sie von SAUER (1893) als Durbachite definiert worden sind. Größere Vorkommen K-reicher Magmatite, welche denjenigen der Bohrung Schafisheim ähneln, hat FLUCK (1981) aus den zentralen Vogesen beschrieben.

Er konnte eine kogenetische Abfolge basischer (durbachtischer) Gesteine bis zum Hornblende-führenden «granite des Crêtes» dokumentieren. Im Ballon-Massiv der Vogesen sind weitere Monzonite und K-reiche Granite bekannt, welche einem K-reichen kalkalkalischen Differentiationstrend folgen (PAGEL und LETERRIER, 1980; LAMAYRE und BOWDEN, 1982).

4.5.4. Metagranit von Hauenstein

Der Metagranit von Hauenstein ist chemisch der hochdifferenzierten Serie sehr ähnlich; im Sr-Rb-Diagramm (Abb. 5e) liegt er allerdings nicht auf deren Trendlinie. Sowohl die vorhandene Planartextur wie auch absolute Altersbestimmungen zeigen, dass dieser Pluton prä- oder synkinematisch und älter als alle bisher diskutierte Plutone ist. Rb/Sr-Alter liefern 337–341 Ma (BREWER und LIPPOLT, 1972, 1974; s. Tab. 3); damit ist dieser Pluton der älteste datierte Intrusivkörper der Region.

4.6. ZUSAMMENFASSUNG: DIE NORDSCHWEIZER UND SÜDSCHWARZWÄLDER GRANITE

Aufgrund der oben diskutierten petrographischen und geochemischen Evidenz sowie der bestehenden Datierungen lassen sich die Granite der Nordschweiz und des Südschwarzwalds in folgende Gruppen zusammenfassen:

1. *Prä- oder synkinematische S-Typ-Granite: Hauenstein.* Deformationszustand und absolute Altersbestimmung zeigen, dass dies mit ca. 340 Ma der älteste Granit der Region ist.
2. *Inhomogene S-Typ-Melagranite: Kreuzlingen, Lindau.*
3. *Ältere S-Typ-Plutone der Südoschwarzwälder/Nordschweizer Granitserie:* Die Intrusionsalter dieser Gruppe liegen im Intervall 315–330 Ma.
 - a. *Biotit-Granite: St. Blasien, Albtal, Böttstein/Leuggern.* Der Böttstein/Leuggern-Granit ist wahrscheinlich eine etwas stärker differenzierte Varietät desselben Stamm-Magmas.
 - b. *Hochdifferenzierte Andalusit-Zweiglimmer-Granite der Nordschweiz: Säkingen/Zuzgen/Wintersingen, Zurzach, Siblingen.* Diese Granite liegen in Variationsdiagrammen auf Trendgeraden (oder deren Verlängerungen) der obigen Biotit-Granite und sind mit diesen eng verwandt.
4. *Jüngere Plutone der Südoschwarzwälder Granitserie: Schluchsee, Bärhalde.* Diese Plutone

sind mit Altersbestimmungen im Intervall 307–321 Ma jünger als die Andalusit-Zweiglimmer-Granite und haben in der Nordschweiz keine Analoga.

5. *Alkali-betonte I-Typ-Granite und verwandte basische Gesteine: Schafisheim, Pfaffnau.* Diese Plutone befinden sich auf der südlichen Schulter des Nordschweizer Permokarbon-Trogs. Das Intrusionsalter des Syenits von Schafisheim beträgt 316 Ma und ist somit zeitgleich mit den jüngeren Plutonen der Südostschwarzwälder Granitserie.

Verdankungen

Für die Überlassung des Kernmaterials aus den älteren Kristallinbohrungen möchten wir an folgende Stellen unseren Dank richten: Swisspetrol Holding AG (Dres Büchi und Iseli; Bohrungen Kreuzlingen 1, Lindau 1, Pfaffnau 1, Herdern), Naturhistorisches Museum Basel (Dr. P. Jung, Bohrung Zuzgen 1), Amt für Museen und Archäologie Baselland (Dr. Ewald, Bohrung Wintersingen), Sekundarschule Rheinfelden (Hr. Burkhardt, Bohrung Rheinfelden-Weierfeld), Thermalquelle Zurzach AG und Prof. Dr. E. Niggli (Bohrungen Zurzach). Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts sind wir Dr. J. Meyer, Dr. A. Stahel und einem anonymen Gutachter zu Dank verpflichtet.

Literaturverzeichnis

- ATHERTON, M.P. und TARNEY, J. (1979): Origin of granite batholiths. Shiva Publishing, Kent, England.
- ATHERTON, M.P. und GRIBBLE, C.D. (1983): Migmatites, melting and metamorphism. Shiva Publishing, Kent, England.
- AUTRAN, A. und PETERLONGO, J.M. (1980): Massif Central. In: LORENZ, C.: Géologie des pays européens, France, Belgique, Luxembourg, 26^e Congrès Géologique International, Paris.
- BEHR, H.J., ENGEL, W., FRANKE, W., GIESE, P. und WEBER, K. (1984): The Variscan belt in central Europe: Main structures, geodynamic implications, open questions. *Tectonophysics* 109, 15–40.
- BERNARD-GRIFFITHS, J., PEUCAT, J.J., SHEPPART, S. und VIDAL, P. (1985): Petrogenesis of Hercynian leucogranites from the southern Armorican Massif: Contribution of REE and isotopic (Sr, Nd, Pb and O) geochemical data to the study of source rock characteristics and ages. *Earth Planet. Sci. Lett.* 74, 235–250.
- BIERWIRTH, G. und ACKERMANN, W. (1974): Initial-Argon-Diagramme einiger Granite des bayerischen Grenzgebirges und des Schwarzwaldes unter Verwendung des Minerals Quarz. *N. Jb. Mineral. Mh.* 1974, 49–62.
- BREWER, M.S. und LIPPOLT, H.J. (1972): Rubidium-Strontium-Altersbeziehungen variszischer Granite des südlichen Schwarzwaldes. *Fortschr. Mineral.* 50, Bh. 3, 5.
- BREWER, M.S. und LIPPOLT, H.J. (1974): Rb-Sr age determinations of pre-tectonic granites from the Southern Schwarzwald, SW Germany. *N. Jb. Mineral. Mh.* 1974, 28–41.
- BÜCHI, E., BULETTI, M. und NIGGLI, E. (1984): Neue Aufschlüsse im schweizerischen Anteil des Schwarzwälder Grundgebirges. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 64, 49–65.
- CADISCH, J. (1956): Über die Wiedererbohrung der Therme von Zurzach (Kt. Aargau). *Eclogae geol. Helv.* 49, 313–316.
- CHAPPELL, B.W. und WHITE, A.J.R. (1974): Two contrasting granite types. *Pacific Geol.* 8, 173–174.
- COLLINS, W.J., BEAMS, S.D., WHITE, A.J.R. und CHAPPELL, B.W. (1982): Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 80, 189–200.
- DIEBOLD, P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwasser. *Mitt. Aarg. Naturf. Ges.* 31, 11–52.
- DIEBOLD, P. und NÄF, H. (1990): Der Nordschweizer Permokarbontrug. *Nagra informiert* 12/2, 29–36.
- DRACH, V.V. (1978): Mineral-Alter im Schwarzwald. Unpubl. Diss. Univ. Heidelberg, 245 pp.
- EGGENBERGER, U., GRAF, K., MERCOLLI, I., OBERHÄNSLI, R. und SCHALTEGGER, U. (1991): Late Variscan magmatism in the central part of the Alps: Aar Massif, lower and upper Eastern Alpine of Switzerland and Lugano area of the Southern Alps. In Vorb.
- EMMERMANN, R. (1977): A petrogenetic model for the origin and evolution of the Hercynian granite series of the Schwarzwald. *N. Jb. Mineral. Abh.* 128, 219–253.
- FINGER, F. und HÖCK, V. (1985): Zur Geochemie von S-Typ-Granitoiden aus dem westlichen oberösterreichischen Moldanubikum. *Fortschr. Mineral.* 63, 280.
- FLUCK, P. (1981): Métamorphisme et magmatisme dans les Vosges moyennes d'Alsace. Contribution à l'histoire de la chaîne Varisque. *Univ. Strasbourg Sci. Géol. Mém.* 62, 248 pp.
- HOEFS, J. und EMMERMANN, R. (1983): The oxygen isotope composition of Hercynian granites and Pre-Hercynian gneisses from the Schwarzwald, SW Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.* 83, 320–329.
- HUBER, H.M. (1943): Physiographie und Genesis der Gesteine im südöstlichen Gotthardmassiv. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 23, 72–260.
- KETTEL, D. und HERZOG, M. (1988): Das Permokarbon der süddeutschen Westmolasse – ein Muttergestein für Öl- und Gaslagerstätten? *Erdöl Erdgas Kohle* 104, 154–157.
- KOSSMAT, F. (1927): Gliederung des variszischen Gebirgsbaues. *Abh. Sächs. Geol. Landesamt* 1, 39 pp.
- LAMAYRE, J. und BOWDEN, P. (1982): Plutonic rock types series: Discrimination of various granitoid series and related rocks. *J. Volc. Geoth. Res.* 14, 169–186.
- LAUBSCHER, H.P. (1986): Struktur des Grundgebirges und des Paläozoikums in der Nordschweiz. Expertenbericht zum Projekt Gewähr. Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK), Würenlingen.
- LEUTWEIN, F. und SONET, J. (1974): Geochronologische Untersuchungen im Südschwarzwald. *N. Jb. Mineral. Abh.* 121, 252–271.
- LIEW, T.C. und HOFMANN, A.W. (1988): Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian fold belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study. *Contrib. Mineral. Petrol.* 98:129–138.

- LOISELLE, M.C. und WONES, D.R. (1979): Characteristics and origin of anorogenic granites. *Abstr. 92nd Geol. Soc. Amer. Meet.* 11, 468.
- MANNING, D. und PICHAVANT, M. (1983): The role of fluorine and boron in the generation of granitic melts. In: *ATHERTON, M.P. und GRIBBLE, C.D.: Migmatites, melting and metamorphism.* Shiva publishing Ltd., Nantwich, pp. 94–109.
- MATTER, A., PETERS, T., BLÄSI H.R., WEISS, H.P. und SCHENKER, F. (1988): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. *Nagra Technischer Bericht NTB 86-03.*
- MAZUREK, M. (1989): Siblingen – Petrographie des Kristallins. *Nagra Interner Bericht NIB 89-31.*
- MAZUREK, M. (1991): Phase equilibria and oxygen isotopes in the evolution of metapelitic migmatites: A case study from the Pre-Alpine basement of Northern Switzerland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, in press.
- MEHNERT, K.R. (1953): Petrographie und Abfolge der Granitisation im Schwarzwald I. *N. Jb. Mineral. Abh.* 85, 59–140.
- METZ, R. (1980): Geologische Landeskunde des Hotzenwaldes. *Moritz Schauenburg Verlag, Lahr/Schwarzwald.*
- MEYER, J. (1985): Hydrothermale Umwandlungen und postmetamorphe Deformationen im Kristallin der Nagra-Bohrung Kaisten. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 65, 363–364.
- MEYER, J. (1987): Die Kataklase im kristallinen Untergrund der Nordschweiz. *Eclogae geol. Helv.* 80, 323–334.
- MÜLLER-SOHNUS, D., PROPACH, G. und KÖHLER, H. (1974): Rubidium-Strontium-Altersbestimmungen an Graniten des Nordschwarzwaldes. *N. Jb. Mineral. Abh.* 123, 38–62.
- MÜLLER, A. (1876): Gedenkblatt der Bohrung auf dem Weyerfeld bei Rheinfelden 1875, geologische Aufnahme. In: *Bericht des Verwaltungsrates der Schweizerischen Steinkohlenbohrergesellschaft an die Generalversammlung der Aktionäre.* Sauerländer, Aarau.
- MÜLLER, W.H., HUBER, M., ISLER, A. und KLEBOTH, P. (1984): Erläuterungen zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000. *Nagra Technischer Bericht NTB 84-25.*
- OKRUSCH, M. (1983): The Spessart crystalline complex, northwest Bavaria (excursion guide). *Fortschr. Mineral. Bh.* 61, 135–169.
- O'NEIL, J.R. und CHAPPELL, B.W. (1977): Oxygen and hydrogen isotope relations in the Berridale batholith. *J. geol. Soc. London* 133, 559–571.
- PAGEL, M. und LETERRIER, J. (1980): The subalkaline potassic magmatism of the Ballons Massif (Southern Vosges, France): shoshonitic affinity. *Lithos* 13, 1–10.
- PEARCE, J.A., HARRIS, N.B.W. und TINDLE, A.G. (1984): Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* 25, 956–983.
- PETERS, T. (1987): Das Kristallin der Nordschweiz: Petrographie und hydrothermale Umwandlungen. *Eclogae geol. Helv.* 80, 305–322.
- PETERS, T., MATTER, A., BLÄSI, H.R. und GAUTSCHI, A. (1986): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. *Nagra Technischer Bericht NTB 85-02.*
- PETERS, T., MATTER, A., BLÄSI, H.R., ISENSCHMID, C., KLEBOTH, P., MEYER, C. und MEYER, J. (1989a): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. *Nagra Technischer Bericht NTB 86-05.*
- PETERS, T., MATTER, A., MEYER, J., ISENSCHMID, C. und ZIEGLER, H.J. (1989b): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. *Nagra Technischer Bericht NTB 86-04.*
- PICHAVANT, M. und MANNING, D. (1984): Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites; the contribution of experimental data. *Phys. Earth Planet. Inter.* 35, 31–50.
- PITCHER, W.S. (1982): Granite type and tectonic environment. In: *Hsü, K.J.: Mountain building processes.* Academic Press, London, 19–40.
- PITCHER, W.S. (1987): Granites and yet more granites forty years on. – *Geol. Rdsch.* 76, 51–79.
- READ, H.H. (1957): *The granite controversy.* Murby, London.
- RYF, W. (1984): Thermalwasserbohrung 1983 Engerfeld, Rheinfelden. *Rheinfelder Neujahrblätter* 1984, 43–52.
- SAUER, A. (1893): Der Granit von Durbach im nördlichen Schwarzwald und seine Grenzfacies von Glimmersyenit (Durbachit). *Mitt. bad. geol. Landesanstalt* 2, 231–275.
- SCHULER, C. und STEIGER, R.H. (1978): On the genesis of feldspar megacrysts in granites: An Rb-Sr study. In: *Geol. Surv. open file rep. 78-701: Short papers 4th Int. Conf. Geochron. Cosmochron. Isotope Geology (ZARTMAN, R.E. ed.),* 386–387.
- SHEPPARD, S.M.F. (1977): The Cornubian Batholith, SW England: D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ studies of kaolinite and other alteration minerals. *J. Geol. Soc. London* 133, 573–591.
- SIMON, K. (1990): Hydrothermal alteration of Variscan granites, southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.* 105, 177–196.
- TODT, W.A. und BÜSCH, W. (1981): U-Pb investigations on zircons from pre-Variscan gneisses – I. A study from the Schwarzwald, West Germany. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 1789–1801.
- TUTTLE, O.F. und BOWEN, N.L. (1958): Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Mem. Geol. Soc. Amer.* 74.
- VENZLAFF, V. (1971): Altersbestimmungen nach der Rb/Sr-Methode an Biotiten aus Gesteinen des Schwarzwaldes. *Z. Naturforsch.* 26a, 1372–1373.
- WAGNER, M. (1981): Beiträge zur Kenntnis von Grund- und Deckgebirge im nordöstliche Schweizer Tafeljura auf Grund der Ergebnisse der Bohrung Zurzach III. Unpubl. Diplomarbeit Univ. Heidelberg.
- WENDT, I., LENZ, H. und HÖHNDORF, A. (1974): Das Alter des Bärhalde-Granits (Schwarzwald) und der Uranlagerstätte Menzenschwand. *Geol. Jb. E2*, 131–143.
- WHALEN, J.B., CURRIE, K.L. und CHAPPELL, B.W. (1987): A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.* 95, 407–419.
- WHITE, A.J.R. und CHAPPELL, B.W. (1977): Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics* 43, 7–22.
- WHITE, A.J.R. und CHAPPELL, B.W. (1983): Granitoid types and their distribution in the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 159.
- WIMMENAUER, W. (1963): Einschlüsse im Albtalgranit (Südschwarzwald) und ihre Bedeutung für dessen Vorgeschichte. *N. Jb. Mineral. Mh.* 1963, 6–17.
- WIMMENAUER, W. (1984): Das prävariskische Kristallin im Schwarzwald. *Fortschr. Mineral.* 62, Bh. 2, 69–86.

Manuskript eingegangen 8. Oktober 1990; überarbeitetes Manuskript angenommen 1. Oktober 1991.

Anhang Röntgenfluoreszenz-Analysen möglichst frischer Gesteinstypen aus den älteren Bohrungen der Nordschweiz und ausgewählten Aufschlüssen des südlichsten Schwarzwalds. Angaben in Gew.% für Hauptelemente, in ppm für Spuren. Abkürzungen s. Tab. I.

Probe	HAU	HPA	HAU	HAU	HAU	HAU	HAU	HAU	HPA	HPA	HPA	HPA	HPA	HPA	KRE	KRE	KRE	KRE	KRE	KRE	KRE	KRE	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN
	1	2	3	21	22	23	24	1824	1828	1831	1834	2534	2535b	2536	2537	2539	2542	2543	2368	2369	2371						
SiO ₂	73.85	73.53	73.86	75.40	75.50	75.01	75.36	65.52	66.37	66.68	66.73	67.03	69.65	67.74	65.33	64.04	61.48	62.61	66.45	68.96	67.67						
TiO ₂	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.68	0.55	0.49	0.43	0.40	0.20	0.26	0.71	0.71	0.71	0.68	0.53	0.51	0.53						
Al ₂ O ₃	13.59	13.63	13.65	14.12	14.05	14.00	14.17	16.33	14.79	15.97	14.59	13.94	14.22	15.21	15.91	15.91	15.53	16.57	14.68	14.84	15.01						
Fe ₂ O ₃	0.51	0.46	0.49	0.67	0.76	0.57	0.66	3.67	2.89	1.77	1.64	1.84	1.44	1.48	2.71	2.32	1.77	1.65	1.37	0.65	0.49						
FeO	0.21	0.21	0.23	0.08	0.09	0.15	0.16	0.43	0.45	0.53	0.63	1.06	0.72	0.88	2.29	2.66	2.60	2.64	3.13	2.83	3.00						
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.09	0.12	0.12	0.05	0.05	0.05						
MgO	0.13	0.13	0.09	0.12	0.13	0.16	0.15	0.68	0.50	0.58	0.98	0.92	0.54	0.61	1.33	1.50	1.49	1.49	1.21	1.25	1.21						
CaO	0.42	0.41	0.41	0.46	0.53	0.54	0.46	1.50	2.78	2.19	2.41	2.77	2.89	2.82	1.76	2.47	3.72	3.30	2.10	1.48	1.55						
Na ₂ O	3.84	3.94	3.81	3.89	3.70	3.93	3.77	0.47	0.47	1.88	3.15	0.18	0.26	0.26	0.15	0.19	0.22	0.22	3.36	3.04	3.04						
K ₂ O	4.35	4.23	4.17	4.45	4.43	4.21	4.31	5.37	5.46	4.91	4.56	4.75	5.20	5.39	5.18	4.89	4.99	4.94	3.52	3.45	3.48						
P ₂ O ₅	0.27	0.26	0.27	0.30	0.27	0.26	0.27	0.27	0.21	0.18	0.15	0.24	0.28	0.43	0.23	0.16	0.24	0.29	0.19	0.24	0.29						
H ₂ O	0.99	1.15	1.16	0.64	0.65	0.74	0.79	3.49	2.87	2.79	1.69	3.07	2.71	2.99	2.89	3.26	3.40	3.29	1.46	1.54	2.19						
CO ₂	<0.1	<0.1	<0.1	0.10	0.40	0.20	<0.1	1.20	2.40	2.52	3.27	2.05	2.64	2.60	2.12	2.92	3.80	3.14	2.49	1.72	1.66						
Summe	96.27	96.06	98.25	100.34	100.64	99.89	100.21	99.66	99.78	100.53	100.29	98.30	100.81	100.73	100.66	101.12	100.07	100.94	100.54	100.56	100.17						
Nb	<5	<5	6	10	6	7	10	<5	<5	<5	<5	<5	41	<5	<5	8	<5	8	<5	7	7						
Zr	35	33	35	23	25	25	27	261	210	212	194	147	154	171	173	156	148	158	210	211	177						
Y	14	15	13	8	8	9	10	15	19	14	12	70	35	29	28	28	31	71	118	36	32						
Sr	60	53	56	47	79	57	51	422	401	419	564	146	205	127	69	55	64	89	183	142	142						
U	5	4	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	4	<3	39	<3	54	53	70	295	508	24	10						
Rb	225	236	236	232	197	200	214	166	151	131	123	203	181	227	288	272	245	251	113	108	108						
Th	13	14	14	<3	<3	<3	<3	54	49	48	53	39	25	77	44	61	48	27	20	23	20						
Pb	32	28	30	19	15	24	26	56	60	69	59	23	32	80	91	43	30	31	37	36	36						
Ga	17	18	17	14	13	13	14	26	26	24	21	15	12	15	23	33	22	21	19	20	20						
Zn	23	26	24	18	9	12	20	32	30	31	26	39	27	44	88	102	163	69	63	58	60						
Cu	10	9	10	9	9	11	10	75	33	32	17	<9	32	394	467	453	17	<9	71	16	13						
Ni	8	9	8	8	10	9	7	29	10	56	42	11	55	10	28	37	52	43	31	19	23						
Co	8	17	10					14	9	5	7	6	6	7	20	19	16	17	13	14	13						
Cr				17	4	7	<4	<4	<4	<4	<4	21	<4	<4	64	69	60	60	30	34	39						
V	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	94	69	40	47	50	26	49	146	162	149	147	57	80	82						
Ce								58	96	94	58	<20	23	23	22	23	23	23	21	21	21						
Nd	186	191	183	163	289	200	177	3731	3407	3211	3449	616	1157	957	603	505	502	632	762	722	712						
Ba								74	85	67	64	21	22	26	60	54	41	46	28	30	23						
La																											
Sc	3	4	4	4			7	7	7	6	5	8	4	6	20	19	17	17	13	12	13						

Probe	ZUZ	WIN	WIN	WIN	WIN	ZUR	ZUR	ZUR	ZUR	ZUR	ZUR	ZUR	ZUR	WEF	WEF	WEF	WEF	WEF	WEF	HER	HER	HER	HER	
	397.6	429.5	433.1	433.4	435.3	439.8	1	575	633	663	666	695	2	5	7	12	14	2152.14	2153.0a	2153.0b	HER	HER	HER	HER
SiO ₂	71.43	71.43	73.79	71.44	71.97	71.90	73.49	71.03	70.36	70.46	70.36	72.35	76.41	77.46	71.32	75.75	72.07	65.86	66.35	66.57				
TiO ₂	0.21	0.20	0.22	0.21	0.21	0.22	0.11	0.37	0.36	0.29	0.35	0.24	0.07	0.07	0.09	0.11	0.14	0.59	0.64	0.55				
Al ₂ O ₃	13.95	14.32	14.29	14.37	14.48	14.22	14.38	14.12	14.07	14.81	14.71	14.38	12.38	12.56	12.70	13.32	11.97	17.06	16.70	16.14				
Fe ₂ O ₃	0.54	0.66	0.93	0.79	0.32	0.42	0.88	0.99	0.86	0.63	1.09	0.52	0.18	0.22	0.49	0.28	0.56	0.57	0.79	0.76				
FeO	0.79	0.55	0.43	0.65	0.41	0.48	0.43	1.42	1.55	1.62	1.61	0.94	0.07	0.06	0.18	0.27	0.40	2.55	2.54	2.38				
MnO	0.04	0.06	0.06	0.07	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05				
MgO	0.33	0.18	0.25	0.27	0.14	0.22	0.31	1.01	0.94	0.70	0.63	0.45	0.13	0.10	0.31	0.19	0.16	1.04	1.11	1.10				
CaO	0.69	0.63	0.64	0.61	0.56	0.54	0.40	0.82	1.09	1.05	0.65	0.50	0.99	0.76	2.23	0.80	2.92	3.16	3.09	1.90				
Na ₂ O	3.42	3.46	4.48	3.38	3.52	3.12	2.86	1.98	2.42	3.03	2.39	2.64	3.73	4.07	3.94	3.99	3.51	3.41	3.49	3.45				
K ₂ O	4.82	4.48	4.37	4.67	4.65	4.47	5.35	5.72	5.29	4.98	5.89	5.53	5.57	4.71	4.45	4.81	4.23	3.94	3.37	4.47				
P ₂ O ₅	0.29	0.28	0.29	0.28	0.30	0.30	0.25	0.20	0.19	0.15	0.18	0.20	0.04	0.04	0.07	0.04	0.04	0.22	0.21	0.20				
H ₂ O	1.19	1.81	1.61	1.86	1.64	1.89	1.05	1.29	0.90	0.95	0.96	1.28	0.89	0.56	2.18	0.57	2.38	1.05	1.15	1.87				
CO ₂	<0.1	0.40	0.40	0.50	0.30	0.30	0.00	0.40	0.70	0.40	0.40	<0.1	0.50	0.20	1.30	0.30	1.50	0.93	0.93	1.20				
Summe	97.70	98.46	100.43	99.10	98.55	98.13	99.54	99.40	98.78	99.12	99.26	99.07	100.98	100.82	99.31	100.45	99.93	100.43	100.42	100.64				
Nb	11	8	12	8	8	11	15						<5	<5	<5	6	6	7	10	7				
Zr	98	83	88	91	91	98	50						16	16	44	35	63	192	199	183				
Y	19	19	15	18	21	21	17						13	11	27	25	48	31	36	26				
Sr	83	74	79	86	88	111	57						35	35	74	45	55	184	180	160				
U	8	<3	<3	7	5	9									27		16	33	103	0				
Rb	298	238	237	259	262	262	406						216	174	210	221	203	127	111	136				
Th	20	18	11	20	21	20	8						3	<3	23	11	29	30	33	44				
Pb	31	69	58	51	92	77	20						40	35	42	49	52	73	50	52				
Ga	23	20	19	21	23	23	18						13	14	20	16	19	22	23	21				
Zn	47	39	19	30	48	61	29						4	3	24	14	31	99	98	72				
Cu	12	9	<9	10	11	11	<9						9	9	23	28	14	9	9	10				
Ni	13	10	9	11	12	10	9						6	5	11	8	12	12	13	30				
Co	12	14		16	15	14									20	8	8	14	11	<5				
Cr	4	<4	13	4	<4	<4	9						13	5	<4	7	<4	21	15	<4				
V	14	10	11	12	15	16	7						13	14	18	17	18	68	76	<5				
Ce	63	<20	<20	<20	<20	<20									<20	<20	<20	59	94	22				
Nd	<10	<10	<10	<10	<10	<10									0	0	0	7	31	0				
Ba	326	383	278	321	880	727	187						194	209	272	205	179	1291	986	425				
La	<10	<10	<10	<10	<10	<10									5	5	0	52	56	16				
Sc	5	5	5	5	5	5									4	4	4	12	12	4				