

**AMPHIBOLITE ALS DOKUMENTE OROGENER  
PROZESSE – EINE FALLSTUDIE AUS DEM  
SCHWARZWALD (MITTELEUROPÄISCHE  
VARISZIDEN)**

**Inaugural-Dissertation**

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät

der

Ruprecht-Karls-Universität

Heidelberg

vorgelegt von

**Diplom-Geologe Stefan Hepp**

aus Biberach an der Riss

Heidelberg, November 2003

**AMPHIBOLITE ALS DOKUMENTE OROGENER  
PROZESSE – EINE FALLSTUDIE AUS DEM  
SCHWARZWALD (MITTELEUROPÄISCHE  
VARISZIDEN)**

Gutachter: Prof. Dr. Rainer Altherr  
Prof. Dr. Angelika Kalt

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2003

**Büchergelehrsamkeit vermehrt zwar die Kenntnisse,  
aber erweitert nicht den Begriff und die Einsicht,  
wenn nicht Vernunft hinzukommt.**

Immanuel Kant

---

# INHALTSVERZEICHNIS

**Abstract**

<b>KURZFASSUNG</b>	<b>Seite 1</b>
<b>1. EINFÜHRUNG</b>	<b>Seite 3</b>
<b>2. GEOLOGISCHER ÜBERBLICK</b>	<b>Seite 6</b>
2.1. Geologie der Europäischen Varisziden	Seite 6
2.2. Geologie des Rheingrabens und seiner Umgebung	Seite 6
2.3. Geologie des Schwarzwaldes	Seite 7
<b>3. PETROGRAPHIE</b>	<b>Seite 13</b>
3.1. Einleitung	Seite 13
3.2. Mineralbestand und Gefügemerkmale	Seite 14
3.2.1. Die polymetamorphen Metabasite der Einheit 1	Seite 14
3.2.2. Amphibolite der Einheit 2	Seite 21
<b>4. DIE CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER MINERALE</b>	<b>Seite 26</b>
4.1. Vorbemerkung	Seite 26
4.2. Clinopyroxen	Seite 26
4.3. Orthopyroxen	Seite 30
4.4. Granat	Seite 31
4.5. Titanate	Seite 33
4.6. Amphibol	Seite 35
4.7. Plagioklas	Seite 44
4.7.1. Die Zusammensetzung frischer Plagioklase	Seite 44
4.7.2. Die Serizitisierung der Plagioklase	Seite 45
4.8. Biotit	Seite 48
4.9. Chlorit	Seite 48
4.10. Prehnit	Seite 48



<b>5. GEOTHERMOBAROMETRIE</b>	<b>Seite 50</b>
5.1. Einleitung	Seite 50
5.2. Thermobarometrische Untersuchungen an ausgewählten Proben	Seite 50
<b>6. DIE VERTEILUNG DER SPURENELEMENTE</b>	<b>Seite 56</b>
6.1. Vorbemerkung	Seite 56
6.2. Die leichten Elemente Li, Be und B	Seite 56
6.2.1. Einführung	Seite 56
6.2.2. Die Systematik der leichten Elemente Li, Be und B	Seite 57
6.2.3. Die Elementverhältnisse B/Li, B/Be und Li/Be	Seite 60
6.2.4. Die Verteilung der leichten Elemente Li, Be und B	Seite 64
6.3. Die Verteilung anderer Spurenelemente	Seite 66
6.4. Kristallchemische Überlegungen zur internen Datenkonsistenz	Seite 70
6.5. Zusammenfassung und Diskussion	Seite 71
<b>7. DIE CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER METABASITE</b>	<b>Seite 74</b>
7.1. Verwendete analytische Methoden	Seite 74
7.2. Chemische Zusammensetzung der Gesteine	Seite 74
7.3. Vergleich der Metabasite aus den verschiedenen Einheiten	Seite 76
<b>8. SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>Seite 84</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>Seite 88</b>
<b>ANHANG</b>	<b>Seite 104</b>
<b>DANKSAGUNG</b>	
Eidesstattliche Erklärung	

---

## Abstract

The presented research, which studies the formation of amphibolites in the Schwarzwald region of the Variscan Orogen, was conducted within the context of an interdisciplinary graduate studies program funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG-Graduiertenkolleg 273, 'Fluid-Rock Interaction'). Within the past decade, three distinct tectonic units in the gneiss and migmatite areas of the Schwarzwald, all of which contain metabasites in the form of layers and lenses, have been distinguished based on their structural and petrological characteristics. It has been known for quite some time that some of these amphibolites were originally eclogites, which were overprinted in lower granulite facies conditions and eventually in amphibolite facies in the presence of a water-rich fluid. The aim of this study is to reconstruct the metamorphic history of these metabasites, which today exist almost exclusively as amphibolites. The study focuses not only on the characterisation of the pressure-temperature development, but also the chemical evolution, with special emphasis on element transfer during amphibolite facies and subsequent retrogression.

In agreement with the work of earlier authors, the metabasites are distinguishable based upon the minerals present and their three types of fabric. (1) Metabasite, which underwent an eclogite stage followed by low-temperature granulite facies conditions before it was overprinted by amphibolite facies within the presence of a H<sub>2</sub>O-rich fluid phase. (2) Metabasite, which is exposed in the area around the castle of Hohengeroldseck near the city of Lahr, which has a granulite facies composition (garnet + clinopyroxene + orthopyroxene + plagioclase), has only minor amounts of eclogite facies relicts ( kyanite, garnet, rutile) and shows only minor amphibolite facies overprinting. Assigning these metabasites into one of the three tectonic units is problematic. Because the granulite facies conditions for these metabasites suggest only low-temperature and not high-temperature granulite facies, they are categorized with unit 1 instead of unit 3, which contains high-temperature granulites facies. (3) Amphibolite, which contains no visible characteristic features of earlier metamorphic stages, however, does contain internal chemical evidence, which correspond to these earlier metamorphic stages.

The metabasites from all three tectonic units, together with their surrounding rocks, underwent an uniform amphibolite facies overprinting, which in many cases lead to an almost complete or complete recrystallization of the rock as well as to the formation of amphibole. Using geothermobarometric methods, the temperature of this event could be constrained to

ca. 730 to 850°C. During the amphibolite facies overprinting, significant material transfer occurred, adding both Lithium and Boron, while Beryllium remained almost completely immobile.

The distribution of trace elements between phases which formed during the amphibolite facies are essentially constant, which suggests that this distribution occurred under equilibrium conditions. However for several elements there is a clear dependency from the chemical composition of the amphibole and the whole rock composition. In well-equilibrated samples the distribution coefficients for Beryllium and Boron between amphibole and plagioclase display only minimal variation:  $D_{Be}=0.5$  to  $0.9$  and  $D_B=0.7-1.3$ . In comparison, the distribution coefficient of Lithium fluctuates greatly (ca. 1 to 185), which can be traced to secondary influences (sericitization).

Many of the metabasites experienced a (sub)greenschist facies hydrothermal overprinting, which also led to chemical changes in the amphibole composition. The distinctive alteration includes among others the sericitization of plagioclase and the formation of secondary titanite along cracks and crevices.

The whole rock chemistry of the metabasites suggests a calc-alkali nature for the magmatic protolith. Many of the analysed metabasites were formerly cumulates. Other samples, whose protoliths were clearly not magmatic cumulates, show trace element signatures, synonymous of continental magmatic arcs, demonstrated by those trace elements, which are alteration-resistant or are generally treated as immobile.

A few of the samples underwent extreme chemical changes during metamorphism that they can no longer contain any chemical signature of their former magmatic protoliths.

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Studie, die im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 273 „Einwirkung fluider Phasen auf Locker- und Festgesteine“ durchgeführt wurde, befasst sich mit der Entstehung von Amphiboliten des Schwarzwaldes, einem internen Bereich des variszischen Orogens. Auf Grund struktureller und petrologischer Kriterien werden in den Gneis- und Migmatitarenalen des Schwarzwaldes seit etlichen Jahren drei verschiedene tektonische Einheiten unterschieden, die alle Metabasite in Form von Lagen und Linsen enthalten. Seit langem ist bekannt, dass ein Teil dieser Amphibolite aus Eklogiten hervorgegangen ist, die zunächst bei Bedingungen der unteren Granulitfazies und danach unter Einwirkung wässriger Fluidphasen bei amphibolitfaziellen Bedingungen überprägt wurden. Ziel dieser Arbeit war es, die metamorphe Entwicklung der heute meist als Amphibolite vorliegenden Metabasite zu rekonstruieren. Dabei ging es nicht nur um die Charakterisierung der Druck-Temperatur-Entwicklung der Gesteine, sondern auch um ihre chemische Entwicklung, wobei mögliche Stoffverschiebungen während des amphibolitfaziellen Stadiums und der retrograden Überprägung im Mittelpunkt standen.

In Übereinstimmung mit früheren Autoren lassen sich mit Hilfe des Mineralbestandes und Gefüges drei Typen von Metabasiten unterscheiden: (1) Metabasite, die zunächst ein Eklogitstadium erlebten und danach Bedingungen der tieftemperierten Granulitfazies durchliefen, bevor sie unter dem Einfluss H<sub>2</sub>O-reicher Fluidphasen amphibolitfaziell überprägt wurden. Es kommen alle Übergangstadien von relativ schwach überprägten Eklogiten und Disthen-Eklogiten bis zu (fast) völlig reäquilibrierten Amphiboliten vor. Derartige Metabasite treten ausschließlich in der tektonischen Einheit 1 auf. (2) Metabasite, die in der Umgebung der Burg Hohengeroldseck bei Lahr auftreten, weisen einen granulitfaziellen Mineralbestand auf (Granat + Clinopyroxen + Orthopyroxen + Plagioklas), enthalten nur geringe Mengen an eklogitfaziellen Relikten (Disthen, Granat, Rutil) und sind nur schwach amphibolitfaziell überprägt. Die Zuordnung dieser Metabasite zu einer der drei tektonischen Einheiten ist problematisch. Da die granulitfaziellen Paragenesen nur Bedingungen der tief- und nicht der hochtemperierten Granulitfazies anzeigen, sind diese Gesteine eher der Einheit 1 als der Einheit 3, die hochtemperierte Granulite enthält, zuzuordnen. (3) Amphibolite, denen sichtbare Merkmale früherer Metamorphosestadien zwar fehlen, deren chemischer Internbau jedoch ebenfalls auf eine vorausgegangene Metamorphose schließen lässt.

Zusammen mit ihren jeweiligen Rahmengesteinen haben alle Metabasitkörper der drei Einheiten eine gemeinsame amphibolitfazielle Überprägung erfahren, die in vielen Fällen zu einer (fast) völligen Rekristallisation mit der Bildung von Amphiboliten führte. Mittels geothermobarometrischer Methoden konnten die Temperaturen dieses Ereignisses auf ca. 730 bis 850 °C eingegrenzt werden. Während der amphibolitfaziellen Überprägung fanden erhebliche Stoffverschiebungen statt. Dabei wurden die Elemente Lithium und Bor zugeführt, während sich Beryllium weitgehend immobil verhielt.

Die Verteilung von Spurenelementen zwischen den amphibolitfaziell gebildeten Mineralphasen ist im Wesentlichen konstant und lässt auf eine Gleichgewichtsverteilung schließen. Doch besteht für eine Reihe von Elementen eine deutliche Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Amphibole und der Pauschalzusammensetzung der Gesteine. Für gut äquilibrierte Proben variieren die Verteilungskoeffizienten für Beryllium und Bor zwischen Amphibol und Plagioklas nur wenig:  $D_{Be} = 0.5$  bis  $0.9$  und  $D_B = 0.7$  bis  $1.3$ . Dagegen schwankt der Verteilungskoeffizient für Li stark (ca. 1 bis 185), was auf bedeutende sekundäre Einflüsse (Serizitisierung) zurückgeführt werden muss.

Viele Metabasite erfuhren (sub)grünschieferfazielle hydrothermale Überprägungen, die ebenfalls von beträchtlichen chemischen Veränderungen der Amphibolite begleitet waren. Markante Alterationen sind u.a. die Serizitisierung von Plagioklas und die Bildung sekundärer Titanite entlang von Rissen und Klüften.

Der Gesamtgesteinschemismus der Metabasite weist auf eine kalkalkalische Natur ihrer magmatischen Edukte hin. Bei manchen untersuchten Metabasiten handelt es sich um ehemalige Kumulatgesteine. Bei anderen Proben, deren Edukte offensichtlich nicht durch eine magmatische Kristallakkumulation geprägt waren, weisen die als alterationsresistent oder immobil geltenden Spurenelemente auf Magmatite hin, die typischerweise in kontinentalen magmatischen Bögen entstehen. Einige wenige Proben wurden offensichtlich während der metamorphen Prozesse so stark chemisch verändert, dass sich keine Aussagen über den chemischen Charakter der magmatischen Edukte mehr treffen lassen.

---

# 1. Einführung

Für die Interpretation von Kollisionsorogenen spielen die in ihnen enthaltenen basischen Magmatite und ihre metamorphen Äquivalente (Metabasite) eine bedeutende Rolle. Einerseits liefern die chemischen und isotopischen Signaturen dieser Gesteine wichtige Hinweise auf ehemals vorhandene passive und aktive Plattenränder oder auf die Einbeziehung ehemaliger ozeanischer Kruste in das Orogen. Andererseits enthalten Metabasit-Körper wesentliche Informationen über die physikalisch-chemischen Bedingungen, denen sie vor, während und nach der Orogenese unterworfen waren. Aus den in diesen Gesteinen beobachteten „eingefrorenen“ Gleichgewichts- und Ungleichgewichtsparagenesen und dem chemischen Internbau einzelner Mineralkörner lassen sich die durchlaufenen Druck-Temperatur-Zeit-Pfade (P-T-t-Pfade) zumindest teilweise rekonstruieren. Außerdem können Änderungen in der chemischen Pauschalzusammensetzung (Metasomatose) durch Fluidzufuhr oder Fluidabfuhr detektiert und charakterisiert werden. Die petrologische Untersuchung von Metabasiten kann somit wesentlich zur qualitativen und quantitativen Spezifizierung orogener Prozesse beitragen.

Die durch Extension und Erosion unserer Beobachtung erschlossenen Internbereiche vieler älterer Kollisionsorogene bestehen aus verschiedenen, räumlich oft eng assoziierten, tektonischen Einheiten (Decken), die u.a. Metabasite unterschiedlicher Herkunft und Entwicklung enthalten können. Diese tektonischen Einheiten spiegeln oft relativ späte orogene Prozesse wider. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Gesteinskörper, die eine tektonische Einheit aufbauen, während der Orogenese nicht notwendigerweise eine kohärente physikalisch-chemische, d.h. metamorphe Evolution erfahren haben. Aus dem Blickwinkel der Thermodynamik betrachtet, stellen demnach die tektonischen Einheiten eines Kollisionsgürtels offene Systeme dar, deren jeweiliger Energie- und Stoffinhalt während der Orogenese mehrfachen, oft komplexen Änderungen unterworfen war. In der Sprache der Geschichtsforschung würde man den der Beobachtung zugänglichen Internbereich eines Orogens als komplexe Quelle bezeichnen, die mehrfach ergänzt, gekürzt und überschrieben wurde, und die daher schwer zu lesen und zu interpretieren ist.

Diese Dissertation, die im Rahmen des Graduiertenkollegs 273 „Einwirkung fluider Phasen auf Locker- und Festgesteine“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstand, befasst sich mit den Metabasiten des Schwarzwaldes, der ein Teilvolumen des Internbereiches der Varisziden, eines ca. 400 bis 315 Ma alten Kollisionsorogens, darstellt. Die hochgradig

metamorphen Bereiche des Schwarzwaldes wurden in den letzten Jahren in drei tektonische Einheiten gegliedert, die durch unterschiedliche metamorphe Entwicklungen charakterisiert sind (Wimmenauer 1980, 1984; Hanel *et al.* 1990; Kalt *et al.* 1999a, 2000b). Die in der Einheit 1 enthaltenen Metabasite wurden nach einem Eklogitstadium in unterschiedlichem Maß zumindest teilweise bei Bedingungen der unteren Granulitfazies und danach unter Fluidzufuhr bei Bedingungen der höheren Amphibolitfazies überprägt. Die Metabasite und andere Lithologien der Einheit 3 erfuhren zunächst eine hochgradige granulitfazielle und danach eine amphibolitfazielle Metamorphose (Marschall *et al.* 2003). Bei den Metabasiten der Einheit 2 handelt es sich dagegen um Amphibolite, die keinerlei Relikte einer früheren eklogit- oder granulitfaziellen Metamorphose aufweisen. Die allen Einheiten gemeinsame amphibolitfazielle Überprägung fand vor ca. 332 Ma statt (Kalt *et al.* 1994a; Lippolt *et al.* 1994a). Die Amphibolite bzw. die amphibolitisierten Granulite und Eklogite wurden dann später (eventuell mehrmals) in unterschiedlichem Ausmaß bei (sub)grünschieferfaziellen Bedingungen überprägt.

Die bereits vor Beginn dieses Dissertationsvorhabens in groben Zügen bekannte komplexe und vielfältige metamorphe Entwicklung der Metabasite des Schwarzwaldes bot gute Ansatzpunkte für detaillierte petrologisch-geochemische Untersuchungen zum Thema „Einwirkung fluidier Phasen auf Locker- und Festgesteine“, und es stand zu erwarten, dass die Resultate solcher Studien auch zu einem besseren Verständnis der Internzonen des variszischen Orogens beitragen werden. Zwar wurden einzelne Metabasit-Vorkommen des Schwarzwaldes bereits früher unter bestimmten Gesichtspunkten studiert (z.B. Eigenfeld-Mende 1948; Büsch *et al.* 1979; Klein & Wimmenauer 1984, Henken-Mellies 1987; Wimmenauer & Stenger 1989; Chen *et al.* 2003), aber es fehlte bislang eine umfassende und systematische Untersuchung nach petrologischen und geochemischen Gesichtspunkten, vor allem vor dem Hintergrund der oben skizzierten neuen tektonometamorphen Gliederung des Schwarzwaldes.

Dieses Dissertationsvorhaben hatte folgende konkrete Zielsetzungen:

- (1) Aus den Gefügen der Metabasite, also den in ihnen auftretenden Mineralen und ihren Verwachsungsbeziehungen ergeben sich Hinweise auf die metamorphe Entwicklung der Gesteine. Insbesondere lassen sich aufeinanderfolgende metamorphe Ereignisse, die unter kontrastierenden P-T-Bedingungen abgelaufen sind, oder stoffliche Veränderungen erkennen.
- (2) Der chemische Internbau der verschiedenen Mineralkörner (z.B. Amphibol und Plagioklas) liefert Hinweise auf die physikalisch-chemischen Bedingungen, bei denen sie

entstanden sind. Insbesondere können aus den chemischen Zonierungen der Körner zeitliche Änderungen der Zustandsvariablen qualitativ detektiert und teilweise auch quantifiziert werden. Hierfür muss bekannt sein, wie die Elementverteilung zwischen verschiedenen Phasen von Temperatur, Druck und der Zusammensetzung der jeweiligen Phasen abhängt und wie die Diffusivität der Atome mit den intensiven Zustandsvariablen variiert. Der chemische Internbau der Mineralkörner kann nur mit ortsauflösenden Analysemethoden, z.B. EMPA (**E**lectron **M**icroprobe **A**nalysis), SIMS (**S**econdary **I**on **M**ass **S**pectrometry) oder LA-ICP-MS (**L**aser **A**blation **I**nductively **C**oupled **M**ass **S**pectrometry) ermittelt werden.

- (3) Besonderer Wert sollte auf die Verteilung der leichten Elemente Li, Be und B zwischen und innerhalb der Mineralkörner gelegt werden. Nach bisherigem Kenntnisstand besitzen diese drei Elemente unterschiedliche Fluidmobilitäten ( $B > Li > Be$ ; Brenan *et al.* 1998a; Johnson & Plank 1999) und eignen sich daher in besonderer Weise, um fluidinduzierte stoffliche Änderungen zu detektieren. Es gibt zwar einige Studien, die sich mit dem geochemischen Verhalten und der Verteilung dieser Elemente in hochgradigen Gneisen, Migmatiten, Pegmatiten und Granuliten befassen (z.B. Shaw *et al.* 1988; Leeman *et al.* 1992; Kasemann *et al.* 2000; Acosta-Vigil *et al.* 2001; Evensen *et al.* 2002), aber deren Ergebnisse sind nicht immer konsistent und bislang fehlten systematische Studien an Metabasiten.
- (4) Die Ermittlung der chemischen Pauschalzusammensetzung der Metabasite (Haupt- und Spurenelemente) sollte Hinweise auf den Charakter der magmatischen Ausgangsgesteine und deren geodynamisches Bildungsmilieu (z.B. ozeanisches Spreizungszentrum, Intraplattenmagmatismus oder konvergente Plattengrenze) liefern. Die erforderlichen Daten wurden mittels Röntgenfluoreszenzspektrometrie und ICP-MS (**I**nductively **C**oupled **P**lasma **M**ass **S**pectrometry) an Lösungen ermittelt.



---

## 2. Geologischer Überblick

### 2.1. Geologie der Europäischen Varisziden

Die Europäischen Varisziden bilden ein komplexes Orogen, das sich über etwa 8000 km von Portugal bis nach Polen erstreckt (z.B. O'Brien 2000). Es entstand während des Devons und Karbons durch Kollision des Südkontinents Gondwana und einer Reihe vorgelagerter Mikrokontinente, z.B. Avalonia (Trench & Torsvik 1991) und Armorica (sensu Van der Voo 1979), mit den Nordkontinenten Baltica und Laurentia (z.B. Franke *et al.* 1989, 1989a, 2000; Tait *et al.* 1997, 2000; McKerrow *et al.* 2000; Stampfli *et al.* 2002). Bereits 1927 etablierte Kossmat seine noch heute benutzte Zonengliederung der mitteleuropäischen Varisziden, die im Wesentlichen auf dem Metamorphosegrad, dem Auftreten magmatischer Gürtel und der sedimentären Fazies beruht. Von NW nach SE wurden von ihm die Zonen Rhenohercynikum, Saxothuringikum und Moldanubikum eingeführt. Auch neuere Arbeiten (Matte 1986, Franke 1989, Matte *et al.* 1990, Franke *et al.* 1995) lassen keinen Zweifel daran, dass diese Zonen tektonischen Ursprungs sind und das Ergebnis mehrfacher Subduktions- und Kollisionsvorgänge sein müssen.

Über die paläogeographische Entwicklung der Varisziden besteht in Detailfragen bis heute kein Konsens (z.B. Schmidt *et al.* 1990; Bachdatse *et al.* 1991; Tait *et al.* 1997, 2000; McKerrow *et al.* 2000; Stampfli *et al.* 2002). Im Wesentlichen liegen die Gründe in den unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeitsmethoden, deren Interpretationen und Anwendungsmöglichkeiten. So führen paläobiogeographische (z.B. McKerrow *et al.* 2000) und paläomagnetische Ansätze (z.B. Tait *et al.* 1997, 2000) zu Diskrepanzen, denen erheblich unterschiedliche paläogeographische Interpretationen folgen. Zur detaillierten Beschreibung der paläogeographischen Entwicklung der Europäischen Varisziden sei der Leser auf die Arbeiten von Tait *et al.* (1994a, b, 1997, 2000), McKerrow *et al.* (1991, 2000), von Raumer (1998), Franke (2000) und Stampfli *et al.* (2002) verwiesen.

### 2.2. Geologie des Rheingrabens und seiner Umgebung

Der Rheingraben ist eine etwa 300 km lange, NNE-SSW streichende Struktur, die mit einer durchschnittlichen Breite von etwa 35-40 km von Frankfurt a. M. bis nach Basel reicht und Teil des mitteleuropäischen Riftsystems ist. Der Einbruch des Rheingrabens begann im späten Eozän an bereits paläozoisch angelegten Schwächezonen (Rüger 1930). Die

Einsenkung des Grabens verlief asymmetrisch: Die Zone stärkster Subsidenz verlagerte sich im Laufe des Tertiärs nach Norden. Die Grabenbildung dauerte bis ins Miozän an (z.B. Pflug 1982). Das im Bereich der Grabenschultern aufgeschlossene kristalline Basement besteht aus paläozoischen Metamorphiten und Magmatiten. Während die südlichen Bereiche des Schwarzwaldes und der Vogesen zum Moldanubikum (sensu Kossmat 1927) gehören (Abb. 2-01), ist das Saxothurinium (sensu Kossmat 1927) in den nördlichsten Bereichen der Vogesen und des Schwarzwaldes, hauptsächlich aber im Odenwald als Teil der Mitteldeutschen Kristallinschwelle, aufgeschlossen (z.B. Okrusch *et al.* 2000).

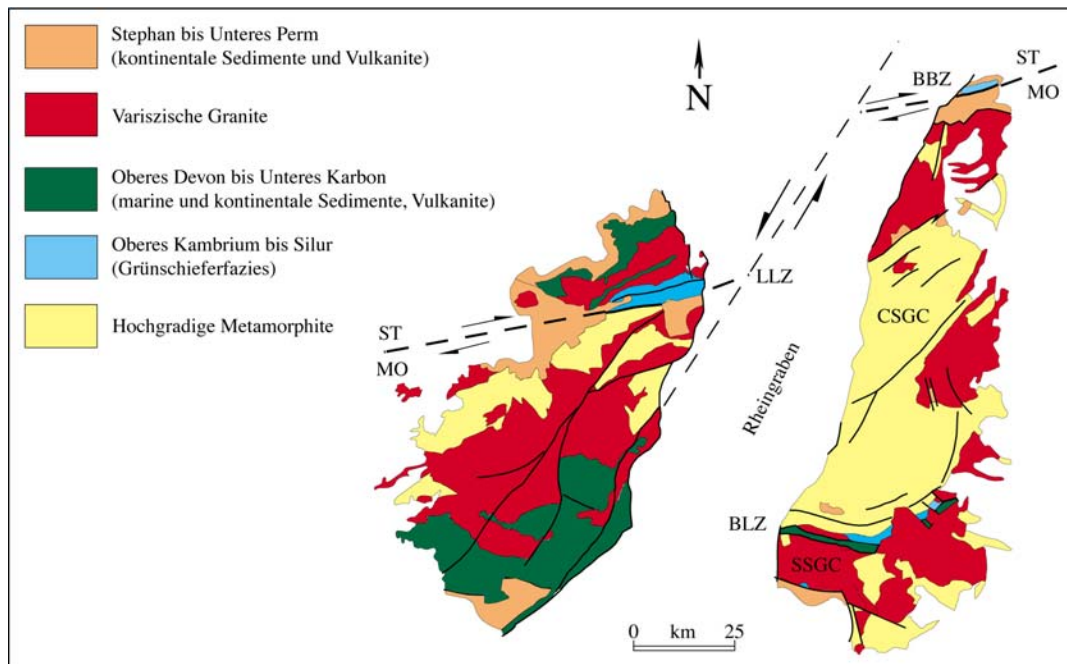
Das variszische Grundgebirge im Bereich des Rheingrabens wird von Klastika und Vulkaniten des Rotliegenden und im nördlichen Rheingraben außerdem von Abfolgen des Zechsteins überlagert (z.B. Boigk & Schöneich 1974). Die mesozoische Sedimentbedeckung besteht zunächst aus dem triassischen kontinentalen Buntsandstein, dem Muschelkalk und dem Keuper sowie aus den Tonen, Mergeln und Karbonaten des Jura (z.B. Boigk & Schöneich 1974). Die alttertiäre Sedimentbedeckung weist mehrere Fazieswechsel auf, z.B. limnisch (Ölschiefer von Messel; z.B. Matthess 1966) im unteren Eozän, marin-brackisch bis marin im jüngeren Eozän. Die oligozäne und neogene Sedimentation ist zunächst marin und endet mit fluviatilen Ablagerungen des Rheins (z.B. Pflug 1982).

Besonders interessant ist der mit der Bildung des Rheingrabens verknüpfte Vulkanismus. Die vulkanische Tätigkeit im nördlichen Rheingraben begann in der späten Kreidezeit (z.B. Trachyte des Spremlinger Horstes, 69-65 Ma; Lippolt *et al.* 1975, 1976) und setzte sich bis ins Eozän fort (Olivin-Nephelinite, Basanite und Alkali-Olivinbasalte des Katzenbuckels; 51-22 Ma; Wimmenauer 1970; Lippolt *et al.* 1975, 1976). Die Hauptphase der vulkanischen Aktivität des Kaiserstuhls im Bereich des mittleren Rheingrabens war im Miozän (18-13 Ma). Die Variationsbreite der gefördertten Magmen ist enorm (Basanite, Tephrite, Phonolithe, Olivin-Nephelinite und Olivin-Melilithite mit Mantelxenolithen, karbonatführende Melilithite sowie Karbonatite). Durch die Anwesenheit von Karbonatiten unterscheidet sich der Kaiserstuhl-Vulkanismus deutlich von dem des nördlichen Rheingrabens (z.B. Keller 1981; Schleicher *et al.* 1990; Sigmund *et al.* 1994; Keller *et al.* 1995).

### ***2.3. Geologie des Schwarzwaldes***

Der Schwarzwald als Teil des variszischen Grundgebirges wurde, ebenso wie die Vogesen, seit dem späten Eozän während der Bildung des Rheingraben-Riftsystems herausgehoben und durch Erosion freigelegt. Der Schwarzwald wird prinzipiell in vier unterschiedliche

tektonische Haupteinheiten gegliedert (Abb. 2-01). Von Norden nach Süden sind dies die Baden-Baden-Zone (BBZ), der Zentralschwarzwälder Gneiskomplex (CSGC), die Badenweiler-Lenzkirch-Zone (BLZ) und der Südschwarzwälder Gneiskomplex (SSGC). Im Westen ist der Schwarzwald durch den Rheingraben begrenzt, im Osten verschwindet er unter dem permo-triassischen Deckgebirge (Kalt *et al.* 2000b).



**Abb. 2-01.** Vereinfachte geologische Übersichtskarte des Schwarzwaldes und der Vogesen (modifiziert nach Echtler & Chauvet 1991/1992). ST: Saxothuringikum; MO: Moldanubikum; BBZ: Baden-Baden-Zone; BLZ: Badenweiler-Lenzkirch-Zone; CSGC: Zentralschwarzwälder Gneiskomplex; LLZ: Lalaye-Lubine-Zone; SSGC: Südschwarzwälder Gneiskomplex

Die *Baden-Baden-Zone* (BBZ) stellt eine große, nach Süden unter den CSGC einfallende Störungszone dar, die in ihren wesentlichen Bereichen von den jüngeren Sedimenten und Vulkaniten des Permokarbon-Trogs von Baden-Baden bedeckt ist (z.B. Hess *et al.* 1983; Fröhler *et al.* 1994). Nur an wenigen Stellen treten die variszischen Metamorphite und Magmatite unter der jüngeren Bedeckung hervor (Wickert *et al.* 1990). Für die überwiegend metapelitischen Gesteine der niedriggradig metamorphen Einheit C (Wickert *et al.* 1990) wurden spätkambrische bis frühordovizische Sedimentationsalter ermittelt (Montenari *et al.* 2000a, b). Darüber hinaus treten in der BBZ variszische Granite auf (Wickert *et al.* 1990; Altherr *et al.* 2000).

Der *Zentralschwarzwälder Gneiskomplex* (CSGC) besteht hauptsächlich aus Paragneisen und Migmatiten, untergeordnet auch Orthogneisen, in die Amphibolite, Eklogite, Peridotite und Granulite eingeschaltet sind (z.B. Klein & Wimmenauer 1984; Stenger *et al.* 1989;

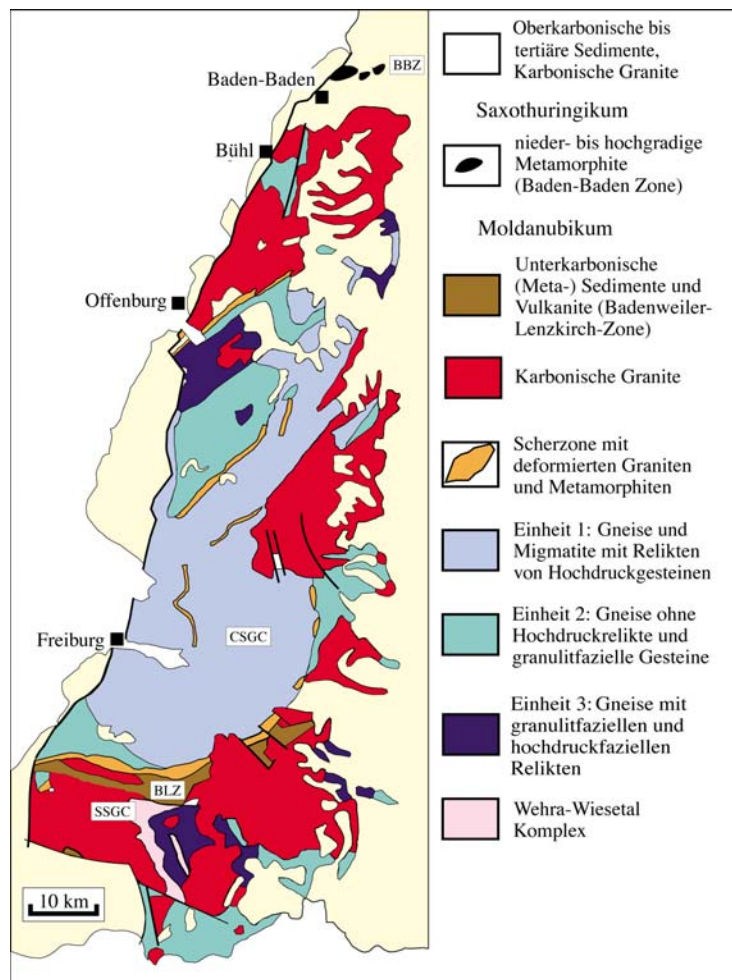
Wimmenauer *et al.* 1989; Hanel *et al.* 1993; Kalt *et al.* 1994b, 1995, 1996, 1997, 1999b, 2000a, b; Chen *et al.* 2000; Marschall *et al.* 2000, 2003). Der gesamte Komplex ist von zahlreichen spätunterkarbonischen Granitintrusionen durchzogen (z.B. Brewer *et al.* 1972; Todt 1976; von Drach 1978; Schleicher 1984, 1994; Büsch *et al.* 1995; Hess *et al.* 1995, 2000; Altherr *et al.* 1999a; Schaltegger 2000).

Der CSGC wird aufgrund detaillierter struktureller und petrologischer Kriterien in drei Einheiten gegliedert (Abb. 2-02; Wimmenauer 1980, 1984; Hanel *et al.* 1990; Kalt *et al.* 1999a, 2000b). Allen drei Einheiten gemeinsam ist eine durchgreifende Hochtemperatur-Niedrigdruck (HT-LP)-Metamorphose (730-780 °C und 0.40-0.45 GPa), die vor ca. 332 Ma stattfand (Kalt *et al.* 1994a, b, 2000a; Lippolt *et al.* 1994).

*Einheit 1* umfasst eine Abfolge aus hauptsächlich metapsammitischen und metapelitischen Gneisen mit neoproterozoischen bis spätpaläozoischen Sedimentationsaltern (z.B. Montenari 1996; Hanel *et al.* 1999a, b) sowie Migmatiten. Außerdem sind zahlreiche Linsen reliktscher, unterschiedlich stark amphibolitierter Eklogite aufgeschlossen, die teilweise granulitfaziell überprägt wurden. Die eklogitfazielle Metamorphose konnte mittels SHRIMP-Datierung an Zirkonen (**S**ensitive **H**igh **R**esolution **I**on **M**icroprobe) auf  $343 \pm 2$  Ma datiert werden (Kalt *et al.* 2000a). Dieses Alter steht im Einklang mit Sm-Nd-Altern (Granatfraktionen, Granat-Gesamtgestein), die allerdings mit wesentlich höheren Fehlern behaftet sind (Kalt 1994b). Die Abkühlung nach einer Überprägung bei niedrigen Drücken konnte mittels einer Rb-Sr-Isochrone (Biotit-Gesamtgestein) auf  $325 \pm 6$  Ma eingegrenzt werden (Kalt *et al.* 1994b). Neben Eklogiten treten in den Gneisen Relikte von Spinell- und Granat-Spinell-Peridotiten sowie von Granat-Websteriten auf, die zum Teil bei stark unterschiedlichen Bedingungen entstanden sind (Kalt *et al.* 1995, 1996).

Die *Einheit 2* besteht hauptsächlich aus Biotit-Plagioklas-Gneisen, graphitführenden Gneisen mit ordovizischen bis silurischen Sedimentationsaltern (415-455 Ma; Hanel *et al.* 1999a, b), Quarziten, Marmoren, Kalksilikatgneisen und Amphiboliten (Wimmenauer 1980, 1984; Wimmenauer *et al.* 1988). An Hand reliktsch erhaltener Staurolith-Granat-Disthen-Paragenesen konnte außerdem von Rehfeld (1983) eine Mitteldruck-Mitteltemperatur-(MP-MT)-Metamorphose nachgewiesen werden (550-650 °C und  $> 0.5$  GPa; nach neuen Berechnungen von Kalt *et al.* 2000a ergeben sich allerdings Bedingungen von 690-720 °C und 0.7-1.5 GPa), die dem HT-Ereignis vorausging. Aus den in Form von Linsen oder Lagen in den Gneisen auftretenden Amphiboliten dieser Einheit sind bislang keine Relikte einer Hochdruckmetamorphose bekannt.

Die *Einheit 3* besteht im Wesentlichen aus metapsammitischen und metapelitischen Gneisen. Lokal enthalten sie Relikte einer granulitfaziellen Metamorphose, die bei Bedingungen von 950-1000 °C und  $\geq 1.5$  GPa stattfand (Röhr 1990; Marschall *et al.* 2000; 2003). Kober *et al.* (2000a) konnten das granulitfazielle Ereignis auf 335-340 Ma datieren. Untergeordnet treten Peridotite und Metabasite auf.



**Abb. 2-02.** Vereinfachte Geologische Karte des Schwarzwaldes (modifiziert nach Hanel *et al.* 1999b). BBZ: Baden-Baden-Zone; BLZ: Badenweiler-Lenzkirch-Zone; CSGC: Zentralschwarzwälder Gneiskomplex; SSGC: Südschwarzwälder Gneiskomplex.

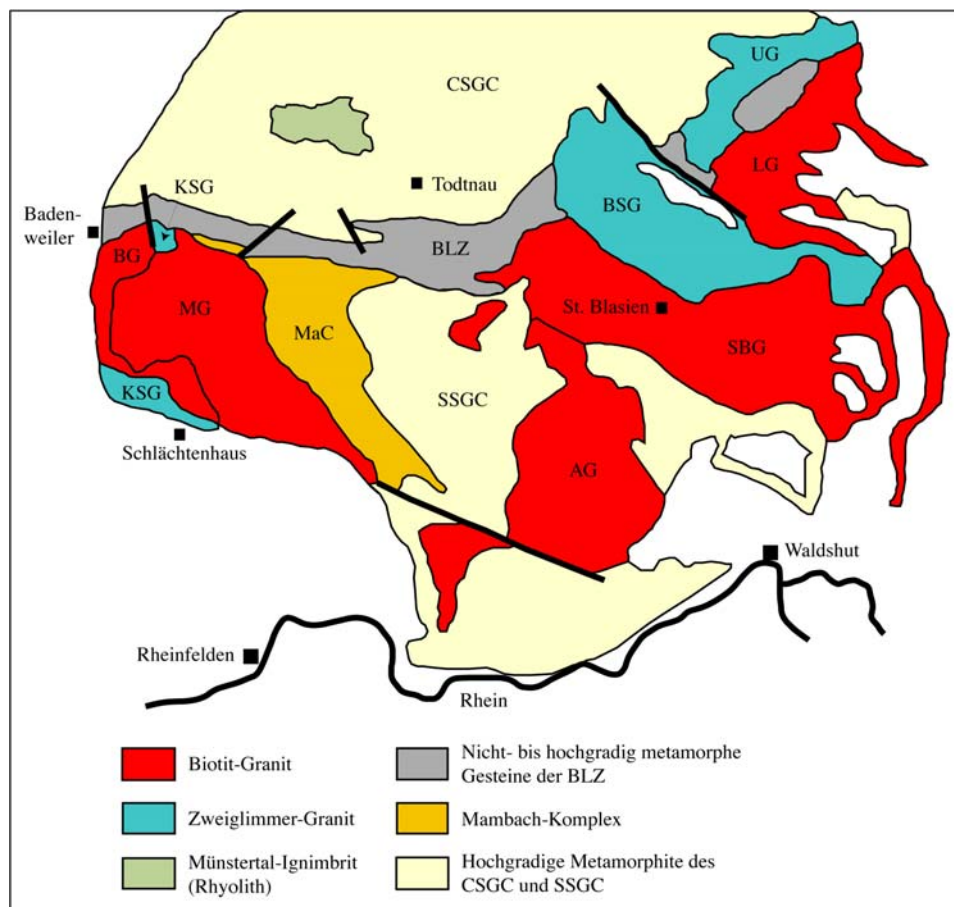
Nach Süden wird der Zentralschwarzwälder Gneiskomplex durch die *Badenweiler-Lenzkirch-Zone* (BLZ) begrenzt. Sie stellt wie die BBZ eine große, jedoch nach Norden unter den CSGC einfallende Störungszone dar und umfasst eine lithologisch heterogene Gesteinsabfolge, deren Metamorphosegrad von Norden (tektonisch hangend) nach Süden (tektonisch liegend) abnimmt. Die Sedimentationsalter der in den nördlichen, höher metamorphen Bereichen der BLZ aufgeschlossenen Schiefer sind obersilurisch bis mitteldevonisch (430 – 415 Ma; Montenari & Maass 1996). Darüber hinaus sind ordovizische Alter bekannt

(Montenari & Maass 1996; Montenari *et al.* 2000b). Die südlichen, nicht metamorphen oder anchimetamorphen Einheiten bestehen aus oberdevonischen bis unterkarbonischen fossilführenden Sedimenten sowie kalkalkalischen Vulkaniten (z.B. Burgath 1973; Altherr & Maass 1977; Werling & Altherr 1987; Maass *et al.* 1990; Güldenpfennig 1998). Ein weiteres Charakteristikum der BLZ ist das Auftreten penetrativ deformierter Granite.

Der *Südschwarzwälder Gneiskomplex* bildet den südlichsten Teil des Schwarzwaldes (Abb. 2-03). Er besteht zum größten Teil aus unterkarbonischen ( $328 \pm 6$  bis  $334 \pm 2$  Ma) Graniten (z.B. Todt 1976; Schaltegger 2000). Die metamorphen Gesteine des SSGC lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen gliedern: den Wehra-Wiesetal-Komplex (WWC) und eine Gneis-Leptinit-Assoziation (Wimmernauer 1984), innerhalb derer größere Areale saurer bis intermediärer granulitischer Gneise aufgeschlossen sind. Die Metamorphosebedingungen sind denen der Granulite im CSGC ähnlich ( $1000-1050$  °C bei 1.3-1.7 GPa; Kalt *et al.* 1999b; Marschall *et al.* 2003). Daneben treten auch Amphibolite auf. Sie zeigen keinerlei Relikte früherer Metamorphosestadien und lassen sich mit denen der Einheit 2 des CSGC vergleichen (Klein & Wimmernauer 1984; Kalt *et al.* 2000b). Die Peridotite des WWC ähneln denen des CSGC.

Während der postvariszischen Entwicklung des Schwarzwaldes fanden mehrere hydrothermale Ereignisse (Bildung von Erzlagerstätten und Gangmineralisationen, Serizitisierung der Plagioklase) statt (z.B. von Gehlen 1989; Simon 1990; Lippolt *et al.* 1994; Hagedorn & Lippolt 1994; Lüders 1994; Wernicke & Lippolt 1997; Markl 1999; Hautmann *et al.* 2000). Geochronologische Studien weisen unter anderem auf permische, triassische, kretazische und jungtertiäre, aber vor allem jurassische Alter dieser Prozesse hin (z. B. von Gehlen 1987; Mertz 1987, 1990, 1991; Simon 1990; Brockamp *et al.* 1994; Lippolt *et al.* 1994; Wernicke & Lippolt 1997; Meyer *et al.* 2000). Der Zeitpunkt der Serizitisierung wurde mittels K-Ar- und Rb-Sr-Datierungen an Serizitpräparaten untersucht (Lippolt *et al.* 1994). Als Ergebnis dieser Studie ergaben sich vor allem spätjurassische bis mittelkretazische Alter (150-110 Ma). Studien an Flüssigkeitseinschlüssen zeigen, dass im Grundgebirge der Varisziden mehrere Episoden von Fluidinfiltrationen unterschieden werden können (z. B. Behr & Gerler 1987; Behr *et al.* 1987; von Gehlen 1989). Neben spät- bis postmagmatischen K-reichen Fluiden, die mit der Intrusion variszischer Granite in Verbindung gebracht werden (Behr *et al.* 1987), sind vor allem K- und Na-reiche Fluide interessant (Simon & Hoefs 1987). Simon & Hoefs (1987) zeigen anhand einer Sauerstoffisotopie-Studie an Graniten, dass diese Fluide meteorischen Ursprungs sind und im Wesentlichen für die Serizitisierung von Plagioklas in Graniten verantwortlich sind. Die Alterationstemperatur wird auf 200–400 °C

eingegrenzt (Simon & Hoefs 1987). Darüber hinaus untersuchten Zuther & Brockamp (1988) hydrothermal überprägte Sedimente der Baden-Baden-Senke. In der neugebildeten Tonfraktion treten deutlich erhöhte B-Gehalte (75 bis 205 µg/g) auf. Die Alterations-temperatur wurde auf 240–290 °C eingegrenzt (Zuther & Brockamp 1988). Schlegel *et al.* (2002) untersuchten hydrothermal überprägte Sedimente in der Breisgau-Schramberger-Senke. Sie fanden neugebildete, lithiumhaltige Chlorite (Cookeit) mit Li<sub>2</sub>O-Gehalten bis 1.8 Gew.-%. Post-variszische saline Fluide mit erhöhten Gehalten an CaCl<sub>2</sub> und NaCl und Temperaturen von 150–180 °C wurden von Behr *et al.* (1987) und von Gehlen (1989) nachgewiesen. Außerdem wurden in Bereichen des östlichen Zentralschwarzwaldes und des Nordschwarzwaldes K-Mn-Oxide (Hollandit, Kryptomelan) beschrieben und auf miozänes bis pleistozänes Alter datiert (Hautmann *et al.* 2000).



**Abb. 2-03.** Vereinfachte geologische Karte des Südschwarzwaldes (modifiziert nach Metz 1971). CSGC: Zentralschwarzwälder Gneiskomplex; SSGC: Südschwarzwälder Gneiskomplex; BLZ: Badenweiler-Lenzkirch-Zone; KSG: Klemmbach-Schlächtenhaus-Granit; UG: Ursee-Granit; LG: Lenzkirch-Steina-Granit; BSG: Bärhalde-Schluchsee-Granit; SBG: St. Blasien-Granit; AG: Albtal-Granit; MaC: Mambach-Komplex; MG: Malsburg-Granit; BG: Blauen-Granit.

---

## 3. Petrographie

### 3.1. Einleitung

Hochmetamorphe Gesteine zeichnen sich oft durch eine mehrphasige metamorphe Entwicklung aus, die mit etwas Glück aus den Gefügen rekonstruiert werden kann. Auch in den meisten Metabasitkörpern des Schwarzwalds lassen sich mehrere metamorphe Stadien erkennen (Klein & Wimmenauer 1984; Hanel *et al.* 1993; Kalt *et al.* 1994b). Besonders interessant sind die in der Einheit 1 (sensu Kalt *et al.* 2000b) auftretenden Metabasite. Sie wurden nach einem Eklogitstadium (Stadium I: 670-750 °C /  $\geq 1.6$  GPa; Kalt *et al.* 1994b) zumindest teilweise granulitfaziell (Stadium II; Klein & Wimmenauer 1984) und danach unter amphibolitfaziellen Bedingungen (Stadium III: 730-780 °C / 0.40-0.45 GPa; Kalt *et al.* 1994b) überprägt. Das Ausmaß der amphibolitfaziellen Reäquilibration hing vor allem von der Deformation der Gesteine und der Verfügbarkeit von H<sub>2</sub>O ab. So zeigen größere, in Gneise und Migmatite eingeschaltete Metabasitkörper von innen nach außen oft Übergänge von isotropem, reliktschem Eklogit zu foliiertem, (nahezu) vollständig reäquilibriertem Amphibolit. Fast immer weisen diese Amphibolite aber noch reliktschen Rutil auf, der randlich in Titanit umgewandelt sein kann.

Im Unterschied zu den Metabasiten der Einheit 1 handelt es sich bei denen der Einheit 2 (sensu Kalt *et al.* 2000b) um Amphibolite, in denen keinerlei Relikte früherer metamorpher Stadien zu erkennen sind, d.h., diese Gesteine führen auch keinen reliktschen Rutil. Metabasite, die eindeutig der Einheit 3 zugehören, d.h., die nach einem granulitfaziellen Stadium (950-1010 °C / 1.4-1.8 GPa; Marschall *et al.* 2003) amphibolitfaziell überprägt wurden, sind bislang nicht bekannt. Problematisch ist die Stellung der Metabasite aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (Blatt Lahr/Ost), die nach Hanel *et al.* (1993) zunächst bei Bedingungen der unteren Granulitfazies (780-850 °C / 1.0-1.1 GPa) metamorphisiert und danach amphibolitfaziell überprägt wurden. Eigene Befunde machen es sehr wahrscheinlich, dass diese Gesteine vor dem Granulitstadium noch ein Eklogitstadium erlebt haben. Somit wären sie auch der Einheit 1 zurechenbar. Leider erlauben die Aufschlussverhältnisse im Bereich der Burg Hohengeroldseck keine weitergehenden Folgerungen (zur weiteren Diskussion sh. auch Kapitel 7). Allen Metabasiten gemeinsam ist eine mehr oder weniger starke Überprägung bei (sub)grünschieferfaziellen Bedingungen (Stadium IV).

Bei der Beschreibung der Metabasite werden die in ihnen enthaltenen Minerale und Reaktionszonen den einzelnen Entwicklungsstadien (I bis IV) zugeordnet. Demnach wird



beispielsweise ein während des Eklogitstadiums entstandener, reliktsch erhaltener Omphazit mit „Cpx I“ bezeichnet und ein mit Hornblende (Am III) und Plagioklas (Pl III) im textuellen Gleichgewicht stehender, während des amphibolitfaziellen Stadiums entstandener Diopsid mit „Cpx III“. Beim Stadium III werden noch die Substadien A und B unterschieden. Mineralphasen, die während des gleichen Metamorphosestadiums in textuell unterschiedlichen Domänen des Gesteins, d.h. in stofflich unterschiedlichen Subsystemen, entstanden sind, werden zusätzlich durch Anhängen eines Buchstabens, also z.B. "Pl IIa" und „Pl IIb“, gekennzeichnet. Alle späten, bei grünschieferfaziellen oder noch niedriggradigeren Bedingungen entstandenen Mineralphasen werden mit „IV“ bezeichnet, wobei auf das Ausgangsmineral oder die Gesteinsdomäne durch Anhängen der entsprechenden Abkürzung hingewiesen wird; „Chl IV/grt“ ist demnach ein aus Granat entstandener Chlorit.

### ***3.2. Mineralbestand und Gefügemerkmale***

#### ***3.2.1. Die polymetamorphen Metabasite der Einheit 1***

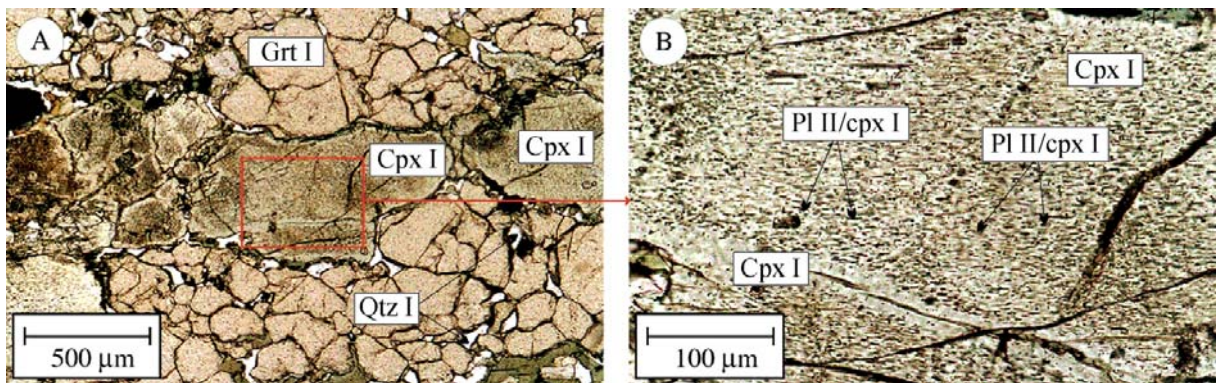
Die folgende Beschreibung der polymetamorphen Metabasite der Einheit 1 sowie der Gesteine aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck orientiert sich an der in Abschnitt 3.1 skizzierten metamorphen Entwicklung der Gesteine. Der Grad der granulitfaziellen und amphibolitfaziellen Überprägung kann von Probe zu Probe stark variieren.

Das **eklogitische Hochdruckstadium (I)** ist durch die Hauptphasen Omphazit (Cpx I), Granat (Grt I), Rutil (Rt I) und Disthen (Ky I) (nicht in allen Metabasiten vorhanden) gekennzeichnet. Akzessorisch kommen Zirkon (Zrn I), Apatit (Ap I) und Quarz (Qtz I) vor. Cpx I, der nur noch selten erhalten ist, weist rundliche bis ellipsoide Formen auf und ist blassgrün bis pastellfarben. Charakteristisch für alle untersuchten Omphazite des Schwarzwalds ist das Auftreten feinkörniger (meistens < 2 µm) stängeliger, subparallel orientierter Plagioklas-Einschlüsse (Abb. 3-01). Mikrosondenanalysen an den wenigen größeren Einschlüssen ergaben eine Na-reiche Zusammensetzung des Plagioklases (Albit; Pl II/cpx I). Weitere typische Einschlüsse in Cpx I sind Rt I und Grt I. Fluideinschlüsse sind selten. In den Eklogit-Relikten ist Grt I sehr viel häufiger erhalten als Cpx I. Einige reliktsche Eklogite bestehen nahezu vollständig aus Granat (z.B. „Granatfelse“ des Zastlertals; Kalt 1990/1991). Die im Dünnschliff farblosen bis schwach rosa gefärbten Granatkörner sind meist hypidiomorph, teilweise aber auch xenomorph ausgebildet. An Einschlüssen kommen Rt I, Cpx I, Zrn I, Ap I und teilweise auch Qtz I vor. Fluideinschlüsse sind selten. Rt I bildet die wichtigste Ti-Phase. Er ist immer xenomorph ausgebildet und tritt häufig als Einschluss in

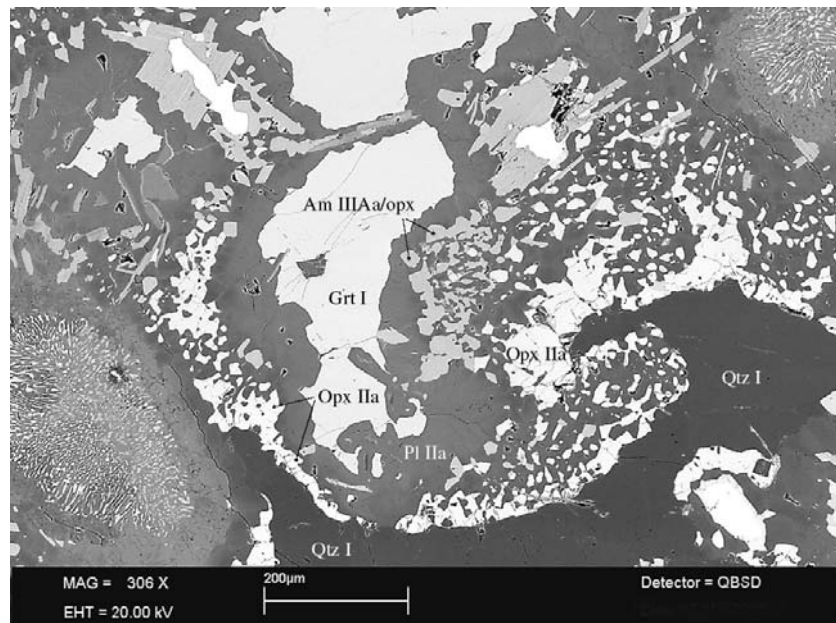
anderen Mineralen auf. Ky I ist nur selten erhalten (Eigenfeld-Mende 1948; Klein & Wimmenauer 1984; Kalt 1990/1991). In den hier untersuchten Proben tritt kein reliktscher Ky I auf.

Eine partielle Überprägung der Eklogite bei **granulitfaziellen Bedingungen (Stadium II)** wird im Wesentlichen durch drei unterschiedliche Reaktionsgefüge belegt:

- (a) Koronen aus Plagioklas (Pl IIa) und Orthopyroxen (Opx IIa) zwischen Grt I und Qtz I (Klein & Wimmenauer 1984; Kalt 1990/1991; Kalt *et al.* 1994b) (Abb. 3-02), wie sie auch von Eklogiten anderer Orogene bekannt sind (z.B. Harley 1989).

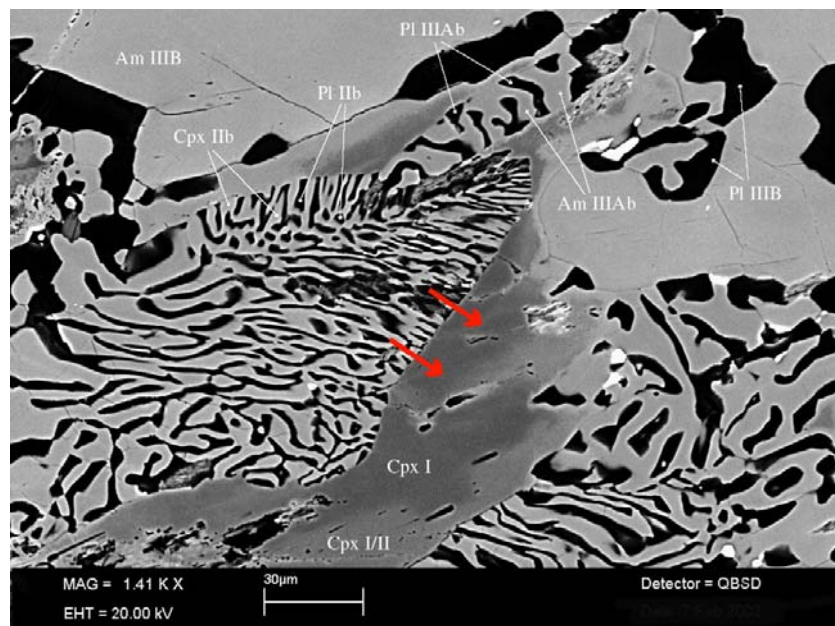


**Abb. 3-01.** Polarisationsmikroskopische Bilder (Hellfeld) eines gut erhaltenen reliktschen Eklogits (Probe LO-1, TK 1:25000, Blatt 8014 Hinterzarten). **A:** Grt I + Cpx I + Qtz I; **B:** Detailaufnahme von Cpx I mit stängeligen, subparallel angeordneten Albit-Einschlüssen (Pl II/cpx I).



**Abb. 3-02.** Rückstreuerelektronenbild zeigt die Bildung einer Korona aus Opx IIa + Pl IIa auf Kosten von Grt I + Qtz I in einem ehemaligen Eklogit. Während der späteren amphibolitfaziellen Überprägung wurde Opx IIa teilweise durch Amphibol (Am IIIAa/opx) ersetzt (Probe AW-20, TK 1:25000, Blatt 8014 Hinterzarten).

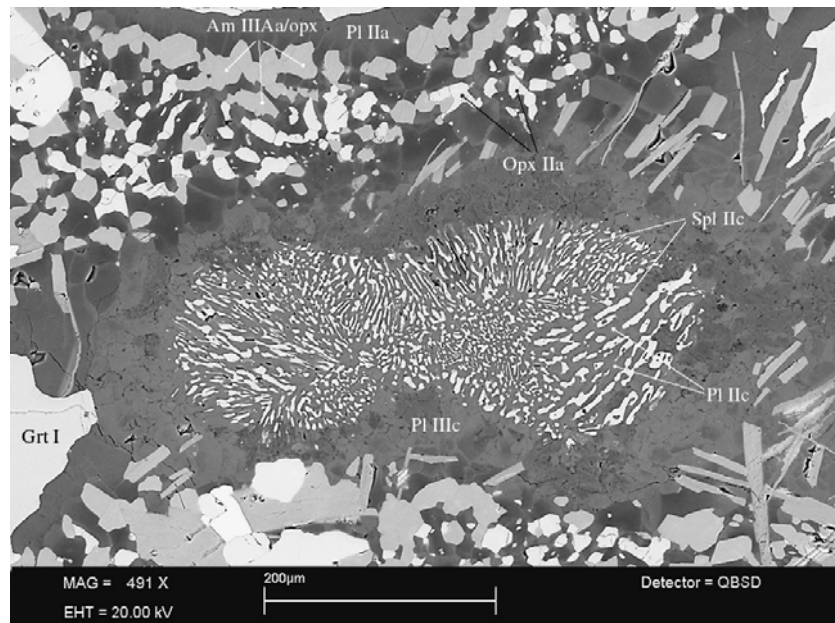
- (b) Symplektite aus Pl IIb und Cpx IIb, die durch Zerfall von omphazitischem Cpx I (Klein & Wimmenauer 1984; Kalt 1990/1991; Kalt *et al.* 1994b) über ein Na-reiches Zwischenstadium (Cpx I/II) entstanden sind. Die Abbaureaktion begann an Korngrenzen benachbarter Omphazitkörner und erfasste dann zunehmend das Korninnere (Abb. 3–03). Derartige Symplektite sind auch von zahlreichen anderen Eklogitvorkommen bekannt und werden meist auf eine schnelle Druckentlastung bei zunächst hohen Temperaturen mit anschließender rascher Abkühlung zurückgeführt (z.B. Messiga *et al.* 1990).
- (c) Pseudomorphosen nach Ky I (Eigenfeld-Mende 1948; Klein & Wimmenauer 1984). Der innere Bereich dieser Pseudomorphosen wird durch einen feinkörnigen ( $< 5 \mu\text{m}$ ) Symplektit aus Korund (Crn IIc), Spinell (Spl IIc), selten auch etwas Sapphirin (Sph IIc) (Kalt 1990/1991), und Plagioklas (Pl IIc) gebildet. Dieser Symplektit ist von einer Korona aus später gebildetem Plagioklas (Pl IIIc) umgeben (Abb. 3–04). Derartige Pseudomorphosen sind auch in retrograd überprägten Eklogiten anderer Orogene zu beobachten (z.B. Liati *et al.* 1996).



**Abb. 3-03.** Rückstreuelektronenbild zeigt die symplektitbildende Reaktion ( $\text{Cpx I} = \text{Cpx IIb} + \text{Pl IIb}$ ) in einem reliktschen Eklogit. Die roten Pfeile markieren die Richtung der fortschreitenden Reaktionsfront. An der fleckigen Farbverteilung ist deutlich die Umwandlung von primärem Cpx I zu Cpx IIb über Cpx I/II zu erkennen (Probe LO-1, Lochrütte bei Hinterzarten, TK 1:25000, Blatt 8014 Hinterzarten).

In den Metabasit-Proben, die aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (TK 1: 25000, Blatt 7613 Lahr/Ost) stammen, sind die oben beschriebenen „granulitbildenden“ Reaktionen sehr weit fortgeschritten. Es haben sich große Mengen an Opx II, Pl II und Cpx II gebildet,

und der primäre Granat ist teilweise rekristallisiert (Grt II). Auf das ehemalige Eklogitstadium weisen nur noch die Pseudomorphosen nach Disthen (Hanel *et al.* 1993) sowie reliktscher Rutil hin.



**Abb. 3-04.** Rückstreuungsbild einer Pseudomorphose nach Disthen (Ky I). Der innere Symplektit aus Spinell (Spl IIc) und Plagioklas (Pl IIc) ist von einem Saum aus später gebildetem, teilweise serizitisiertem Plagioklas (Pl IIIc) umgeben (Probe AW-20, TK 1:25000, Blatt 8014 Hinterzarten).

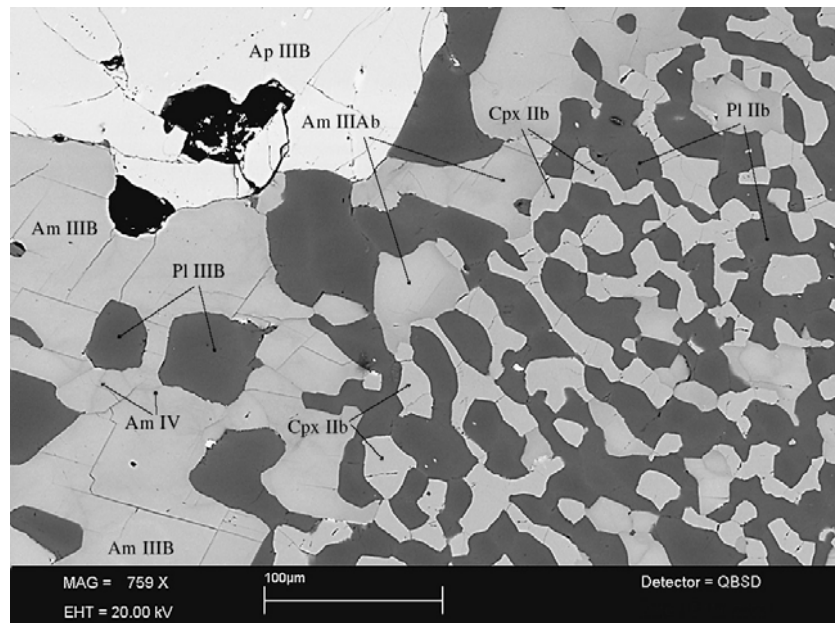
Die weitere retrograde Entwicklung der Metabasite der Einheit 1 erfolgte bei **amphibolitfaziellen Bedingungen (Stadium III)** unter Einwirkung einer zugeführten wässrigen Fluidphase. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dieses Stadium bei der folgenden Beschreibung in zwei Substadien IIIA (= beginnende Überprägung) und IIIB (= weitgehende oder vollständige Überprägung) untergliedert. Es lassen sich folgende Reaktionen beobachten:

- (a) Bildung von Amphibol (Am IIIAa/opx) aus granulitfaziell entstandenem Opx IIa (Abb. 3-02; Abb. 3-04).
- (b) In den durch Zerfall von Cpx I entstandenen Symplektiten aus Cpx IIb und Pl IIb bilden sich zunächst Symplektite aus Amphibol (Am IIIAb) und Plagioklas (Pl IIIAb) (Abb. 3-05). Diese Symplektite unterliegen dann mit fortschreitender amphibolitfazieller Überprägung einer Sammelkristallisation, wodurch Am IIIB und Pl IIIB entstehen (Abb. 3-06). Das frühe Stadium der Amphibol-Plagioklas-Sammelkristallisation ist durch einen hohen Anteil grobkörnigerer (30-100 µm) Symplektite aus Am IIIAb und Pl IIIAb gekennzeichnet (Abb. 3-06A). Derartige Symplektite können bereits mit einzelnen Am IIIB- und Pl IIIB-Körnern koexistieren. Abb. 3-06B verdeutlicht eine weitere Stufe



der Sammelkristallisation, bei der die vermikularen symplektitischen Verwachsungen nahezu verschwunden sind. Stattdessen hat sich eine für dieses Entwicklungsstadium typische Mosaikstruktur gebildet. Ein weitestgehend zusammenhängendes blastisches Gefüge aus Am IIIB und Pl IIIB ist bereits erkennbar. Abb. 3-06C zeigt das Endstadium der Sammelkristallisation mit Am IIIB-Körnern, die zwischen 200 und 2500  $\mu\text{m}$ , und Pl IIIB-Körnern, die bis 400  $\mu\text{m}$  groß sind. Typische Mineraleinschlüsse in Am IIIB sind Rt I, Ilm II, Ilm IIIB, Ttn IIIB und Pl IIIB sowie stellenweise Cpx IIb und Qtz IIIB. Einschlüsse in Pl IIIB sind Am IIIB, Ap IIIB, Ttn IIIB und Qtz IIIB. Seltener treten Rt I, Grt I und Bi IIIB auf. Flüssigkeitseinschlüsse sind selten.

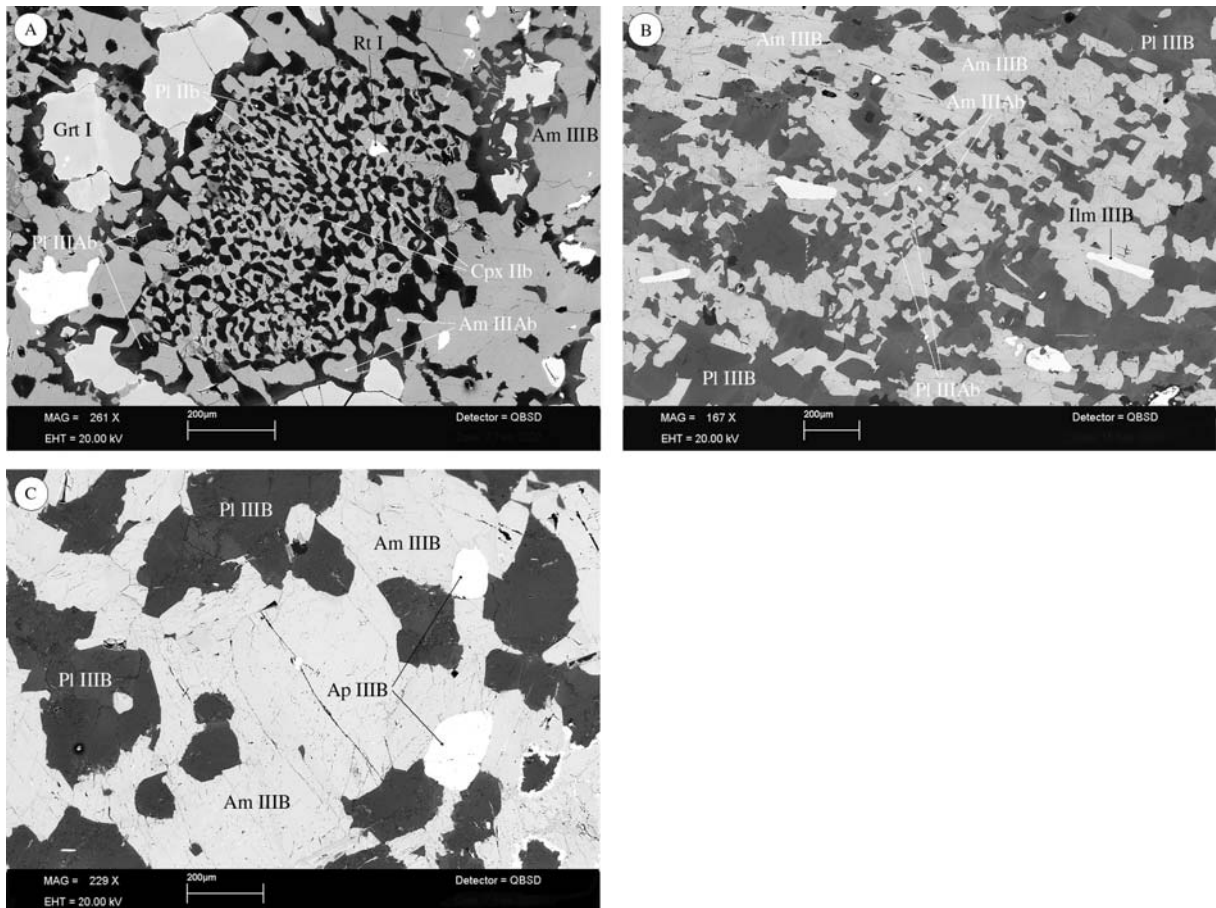
- (c) Der Abbau von reliktischem Grt I zu kelyphitischen bis symplektitischen Koronen aus Am IIIAd und Pl IIIAd (Abb. 3-07). Oft ist mit wachsender Entfernung von den Grt I-Relikten eine Kornvergrößerung zu beobachten. Mit fortschreitender amphibolitfazieller Überprägung unterliegen diese Reaktionsgefüge einer Sammelkristallisation zu Am IIIB und Pl IIIB (Abb. 3-07).



**Abb. 3-05.** Beginnende amphibolitfazielle Überprägung (Rückstreuelektronenbild). Unter Zufuhr einer wässrigen Fluidphase bildet sich aus Cpx IIb ein Amphibol (Am IIIAb). Entlang von Rissen und an Korngrenzen ist unter grünschieferfaziellen Bedingungen Aktinolith (Am IV) entstanden (Probe SP-56, TK 1:25000, Blatt 7914 St. Peter).

Der Abbau von Rt I erfolgt über Ilmenit (Ilm II) zu Titanit (Ttn IIIAd) (Klein & Wimmenauer 1984). In der Literatur wird diese Art der Panzerung von Rutil (in Ilm und/oder Ttn) häufig beschrieben. Wie experimentelle Befunde zeigen, ist Rutil in basischen Stoffbeständen nur bei Drücken oberhalb von etwa 1.3 GPa stabil (z.B. Hellman *et al.* 1979; Manning *et al.* 1991;

Rudnick *et al.* 1999). Bei ansonsten völlig reäquilierten Amphiboliten stellt reliktscher Rutil oft das einzige Indiz für eine Hochdruck-Vergangenheit dar. In machen Proben tritt neugebildeter, oft manganreicher Ilm IIIb auf, der symplektitisch mit Qtz IIIb, Pl IIIb, Ttn IIIb, Ap IIIb und Am IIIb verwachsen sein kann (Abb. 3-08). Darüber hinaus existieren neben Ttn IIIAd auch neugebildete Titanite (Ttn IIIb). Sie treten häufig als Einschlüsse in Am IIIb und Pl IIIb auf und sind hypidiomorph ausgebildet (Abb. 3-08).

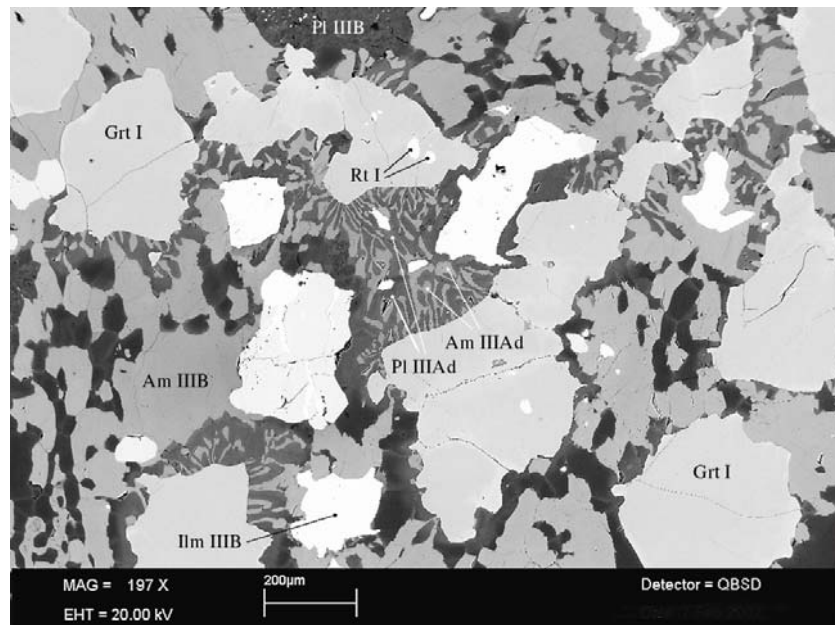


**Abb. 3-06. A-C:** Unterschiedliche Stadien der Amphibol-Plagioklas-Blastese im Rückstreuerelektronenbild (Proben: SP-54, TK 1:25000, Blatt 7914 Hinterzarten; SP-52, TK 1:25000, Blatt 7914 Hinterzarten; OP-2, TK 1:25000, Blatt 7515 Oppenau). Siehe Text zur Erläuterung.

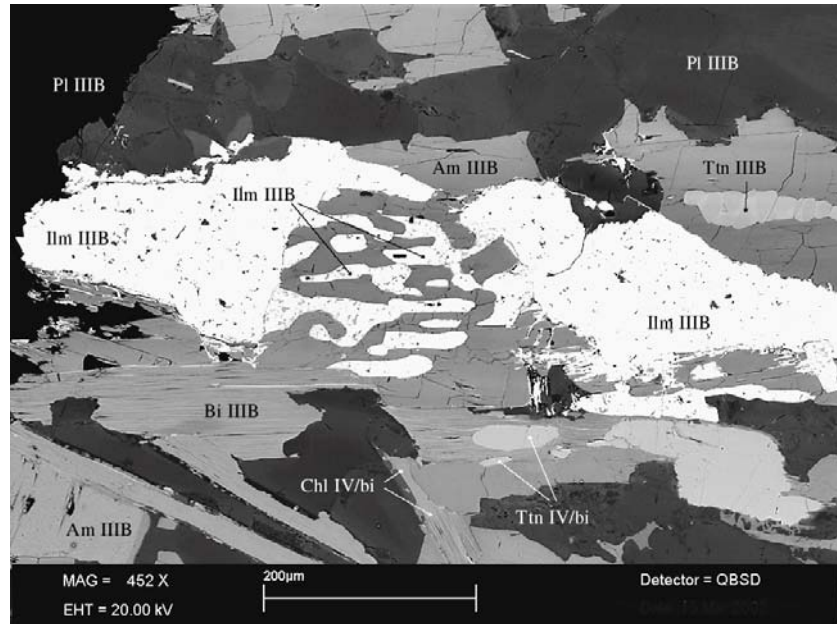
Zur amphibolitfaziellen Paragenese gehört in manchen Amphiboliten auch Biotit (Bi IIIb), der im textuellen Gleichgewicht mit Am IIIb, Pl IIIb und teilweise auch Qtz IIIb steht (Abb. 3-08). Offensichtlich wurde mit der wässrigen Fluidphase auch K zugeführt. Weiterhin kam es manchmal in den Außenzonen von Kelyphit- bzw. Symplektitkoronen um Granat zur Bildung von Ilmenit.

Fast alle Metabasite der Einheit 1 weisen Anzeichen einer **Überprägung bei grün-schieferfaziellen oder noch tieferen Temperaturen (Stadium IV)** auf. Dabei wurden eklogit-, granulit- und amphibolitfaziell entstandene Minerale teilweise abgebaut und es bildeten sich Chlorit IV, Serizit IV, Prehnit IV und Titanit IV. Unter anderem wurden die folgenden Umwandlungen bzw. Neubildungen beobachtet:

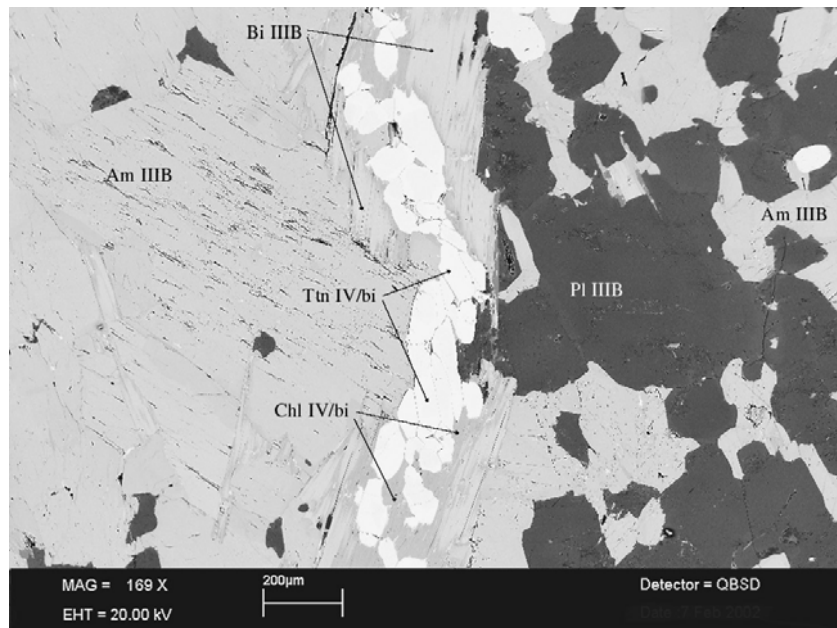
- Grt I und Grt II wurden, ausgehend von Rissen und Rändern, chloritisiert (Chl IV/grt);
- Granulitfaziell entstandener Opx IIa wurde chloritisiert (Chl IV/opx);
- Umwandlung von Bi IIIB in Chlorit (Chl IV/bi) und Titanit (Ttn IV/bi) (Abb. 3-09);
- Bildung von Prehnit (Prh IV/bi) in Biotit;
- Mehrphasige Serizitisierung von Plagioklas aller Bildungsstadien
- Abscheidung von Titanit und Chlorit entlang von Rissen und Klüften (Ttn IV/vein, Chl IV/vein), offensichtlich aus einer Fluidphase (Abb. 3-10).



**Abb. 3-07.** Amphibolitfazieller Abbau von relictischem Grt I zu kelyphitischen bis symplektitischen Verwachsungen aus Am IIIAd und Pl IIIAd (Rückstreuungsbild). Die wurmartigen Körner der Abbauprodukte sind mehr oder weniger senkrecht zur Grenzfläche der Granatrelikte gewachsen und werden mit zunehmender Entfernung vom Granat grobkörniger (Probe SP-54, TK 1:25000, Blatt 7914 St. Peter).



**Abb. 3-08.** Symplektitische Verwachsung aus Ilm III B, Am III B und Pl III B in einem stark überprägten Eklogit der Einheit 1 (Probe SP-52, TK 1:25000, Blatt 7914 St. Peter). Aus Bi III B sind während der grünschieferfaziellen Überprägung Chl IV/bi und Ttn IV/bi entstanden (Rückstreuungsbild).



**Abb. 3-09.** Umwandlung von Bi III B in Chl IV/bi und Ttn IV/bi (Rückstreuungsbild) (Probe OP-2, TK 1:25000, Blatt 7515 Oppenau).

#### 4.2.2. Amphibolite der Einheit 2

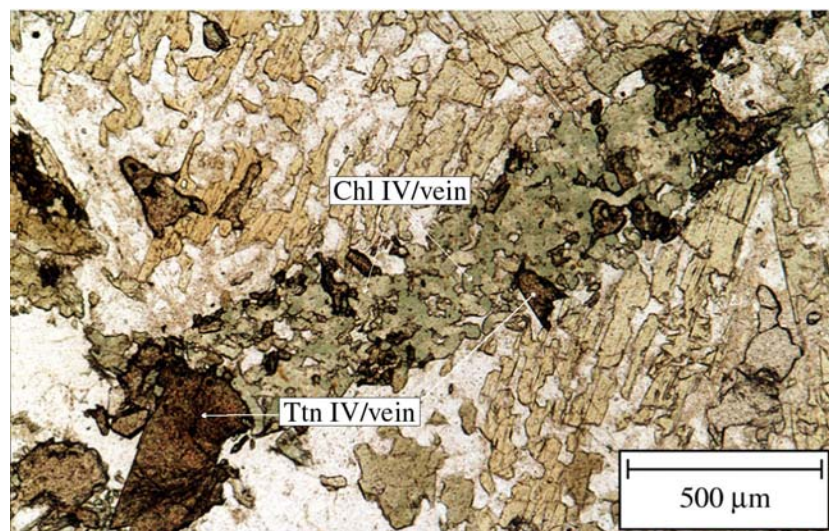
Diese Gesteine führen keinerlei Relikte, die auf ein früheres Metamorphosestadium hinweisen könnten, und unterscheiden sich hierdurch von den meisten anderen Metabasitkörpern der Einheit 1. Neben den Hauptphasen Amphibol (Am III) und Plagioklas (Pl III) treten in



manchen Proben untergeordnet Diopsid (Cpx III), Biotit (Bi III) und Quarz (Qtz III) sowie akzessorisch Titanit (Ttn III), Ilmenit (Ilm III), Apatit (Ap III) und Zirkon (Zrn III) auf. Die foliierten bis massigen Gesteine können teilweise relativ grobkörnig ( $> 800 \mu\text{m}$ ) sein.

Am III ist typischerweise xenomorph bis hypidiomorph ausgebildet und zeigt im Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop eine dunkelgrüne bis bräunliche Färbung. An Mineraleinschlüssen kommen Pl III, Cpx III, Bi III und Ttn III vor. Fluideinschlüsse sind häufig. In zwei Proben treten darüber hinaus unterschiedlich zusammengesetzte Amphibole nebeneinander auf:

- (1) In der Probe LA-1 (TK 1:25000, Blatt 7613 Lahr/Ost) ist eine Magnesiohornblende (Am IVa) fleckig und unregelmäßig mit Am III verwachsen (Abb. 3-11). Zusätzlich hat sich Aktinolith (Am IVb) als dünner Anwachssaum um Am III gebildet und zeigt teilweise eine konzentrische Zonierung (Abb. 3-11). Interessanterweise tritt in diesen Bereichen auch Prehnit (Prh IV) auf, der Pl III partiell oder vollständig ersetzt hat (Abb. 3-11 und 3-13). In Bereichen dieser Probe, in denen Pl III noch nicht umgewandelt ist, treten Am IVa und Am IVb nicht auf. In der Literatur wird oft auf die Koexistenz unterschiedlicher Ca-Amphibole hingewiesen (z.B. Grapes 1975; Tagiri 1977; Grapes *et al.* 1978; Ernst 1979; Oba *et al.* 1986; Smelik 1994; Klein *et al.* 1996, 1997), die Interpretation der Gefüge ist jedoch nicht immer eindeutig. Im vorliegenden Fall handelt es sich wohl kaum um koexistierende, sondern um nacheinander gebildete Amphibole.



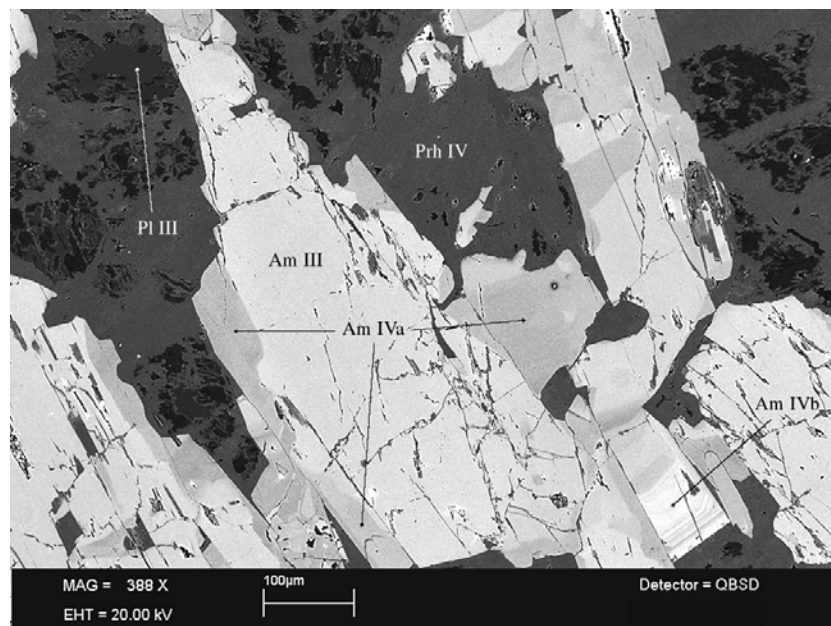
**Abb. 3-10.** Polarisationsmikroskopisches Bild (Hellfeld) von Titanit und Chlorit, die sich entlang einer Ader gebildet haben (Ttn IV/vein, Chl IV/vein). Offensichtlich sind diese Titanite durch Abscheidung aus einer Fluidphase entstanden (Probe ST-1, TK 1:25000, Blatt 8112 Staufen).

- (2) In der Probe GÖ-3 (TK 1:25000, Blatt 8314 Göhrwihl) ist Am III bereichsweise entmischt (Abb. 3-12). Die entmischten Lamellen bestehen aus Ca-armem Fe-Mg-Amphibol

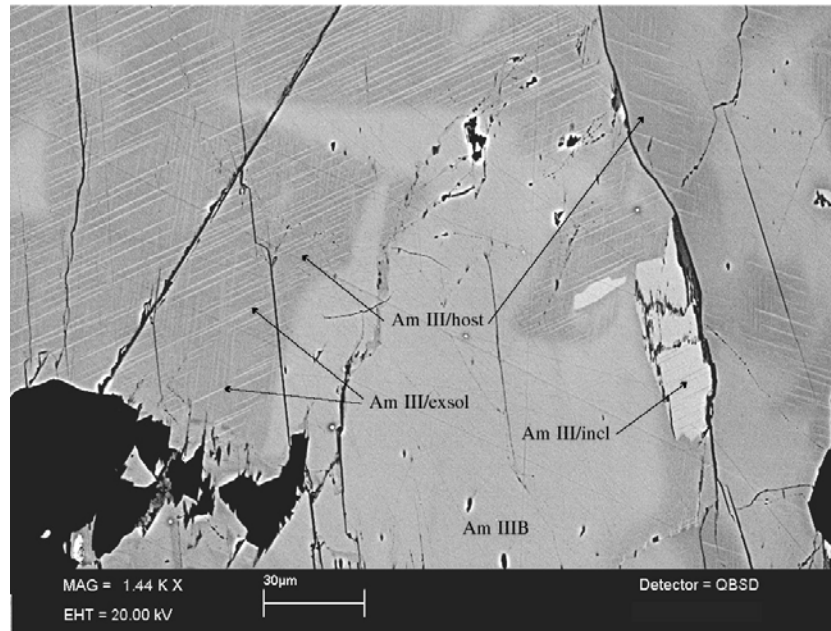
(Am III/exsol). Der Wirtsamphibol (Am III/host) ist relativ zum nicht entmischten Am III Ca-reicher geworden. Die Ca-armen, Fe-Mg-Amphibole treten auch als Einschluss in Am III auf (Am III/incl) (Abb. 3-12).

Plagioklas (Pl III) ist oft polysynthetisch verzwilligt. Mineraleinschlüsse sind Am III, Cpx III, Bi III, Ttn III und Qtz III. Fluideinschlüsse sind nicht selten; sie treten manchmal gehäuft entlang von Zonen auf. Diopsid (Cpx III) ist farblos bis blass grün und führt Einschlüsse von Am III und Pl III. Fluideinschlüsse sind selten zu beobachten. Bi III weist unterschiedliche Färbungen auf, von blassbraun bis dunkelrot. Ttn III ist oft hypidiomorph ausgebildet. Er tritt sowohl isoliert als auch sekundär in Aggregaten angehäuft oder entlang von Korngrenzen oder Spaltrissen der Hauptminerale perlschnurartig auf. Dieses Auftreten ist offensichtlich sekundär. Geochemische Indizien sprechen dafür, dass für die Bildung dieser Titanite fluidinduzierte Prozesse verantwortlich sind (Hepp *et al.* 2000).

Die grünschieferfazielle Überprägung der zur Einheit 2 gehörenden Amphibolite entspricht im Wesentlichen der Überprägung der Metabasite der Einheit 1 (Abschnitt 4.2.1).



**Abb. 3-11.** Verschiedene Amphibole in einem Amphibolit der Einheit 2 (Probe LA-1, TK 1:25000, Blatt 7613 Lahr/Ost). Am IVa verdrängt den älteren Am III oder wurde zusammen mit Prehnit (Prh IV) neu gebildet. Hypidiomorpher Am IVb hat sich zusammen mit Prh IV gebildet und zeigt teilweise eine konzentrische Zonierung (Rückstreuerelektronenbilder).

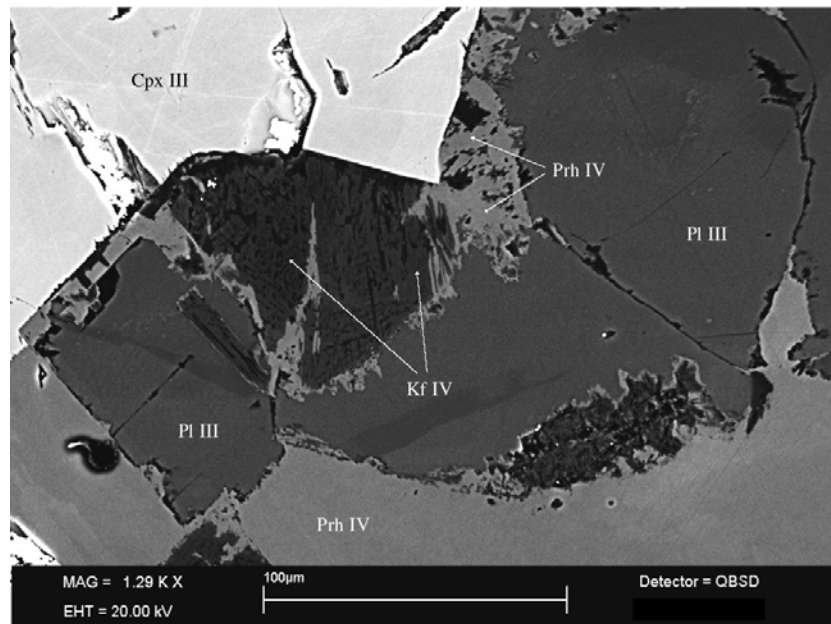


**Abb. 3-12.** Rückstreuungsbilder teilweise entmischter Amphibole (Am III). Das Bild zeigt deutlich sichtbare Entmischungslamellen aus Ca-armem Fe-Mg-Amphibol (Am III/exsol), einem Ca-reichen Wirtsamphibol (Am III/host), einem Einschluss eines Fe-Mg-Amphibols (Am III/incl) und Am III (Probe GÖ-3; TK 1:25000, Blatt 8314 Göhrwihl).

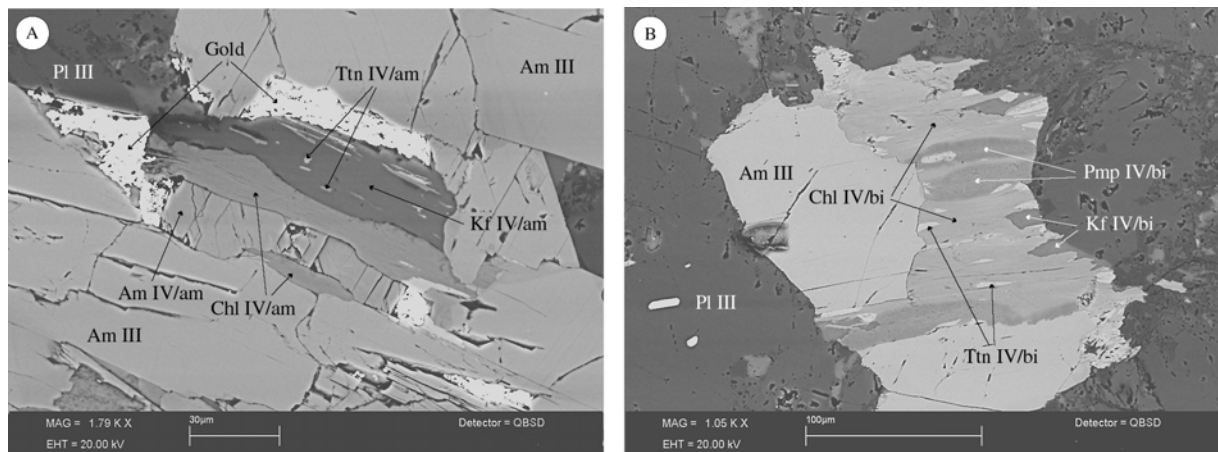
Neben den oben beschriebenen wurden noch folgende weiteren späten Umwandlungen bzw. Neubildungen beobachtet:

- Cpx III ist zum Teil vollständig chloritisiert (Chl IV/cpx);
- Cpx III und Am III sind in seltenen Fällen vollständig durch Calcit (Cc IV/cpx bzw. Cc IV/am) ersetzt;
- Bildung von Prehnit (Prh IV) aus Pl III (Abb. 3-11; Abb. 3-13);
- Umwandlung von Am III in Chlorit (Chl IV/am), teilweise auch in Kalifeldspat (Kf IV/am), Aktinolith (Am IV/am) und Titanit (Ttn IV/am) (Abb. 3-14 A);
- Abbau von Chl IV/am zu Pumpellyit (Pmp IV) (Abb. 3-14 B).

Außerdem ist für die Amphibolite der Einheit 2 das massenhafte Auftreten kleiner, mehrerer cm bis dm langer Adern typisch, die selten breiter als 300 µm sind. Sie sind mit Epidot (Ep IV/vein), Chlorit (Chl IV/vein), Kalifeldspat (Kf IV/vein) und Quarz (Qtz IV/vein), seltener auch mit symplektitischen Verwachsungen von Epidot (Ep IV/vein/sym), Chlorit (Chl IV/vein/sym), Titanit (Ttn IV/vein/sym), Albit (Ab IV/vein/sym) und Kalifeldspat (Kf IV/vein/sym) gefüllt.



**Abb. 3-13.** Rückstreuelektronenbild des Abbaus von Pl III zu Prehnit (Prh IV) und Kalifeldspat (Kf IV) (Probe LA-1, TK 1:25000, Blatt 7613 Lahr/Ost).



**Abb. 3-14.** Rückstreuelektronenbilder von typischen grünschieferfaziellen Reaktionsgefügen in Amphiboliten der Einheit 2. **A:** Bildung von Aktinolith (Am IV/am), Chlorit (Chl IV/am), Titanit (Ttn IV/am) und Kalifeldspat (Kf IV/am) aus oder randlich zu Am III (Probe SBL6A, TK 1:25000, Blatt 8214 St. Blasien); **B:** Bildung von Pumpellyit (Pmp IV/bi), Chlorit (Chl IV/bi), Titanit (Ttn IV/bi) und Kalifeldspat (Kf IV/bi) aus völlig umgewandeltem Bi III, der mit Am III koexistierte (Probe GÖ-9, TK 1:25000, Blatt 8314 Göhrwihl).

---

## 4. Die chemische Zusammensetzung der Minerale

### 4.1. Vorbemerkung

Die chemische Zusammensetzung der Minerale wird auf Grundlage der in Abschnitt 3.2 erläuterten Entwicklungsstadien und der tektonometamorphen Gliederung des Schwarzwaldes (Abschnitt 2.3) dargestellt. Repräsentative Analysen der Minerale werden vergleichend in den Tabellen A-4.01 bis A-4.07 (Anhang) zusammengestellt und diskutiert. Details über die angewandte Analytik und Berechnung der Mineralformeln befinden sich ebenfalls im Anhang. Die Analyse der Haupt- und Nebenelemente erfolgte mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS). Die Spurenelemente Li, Be und B wurden mittels SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), alle anderen Spurenelemente mittels LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) gemessen.

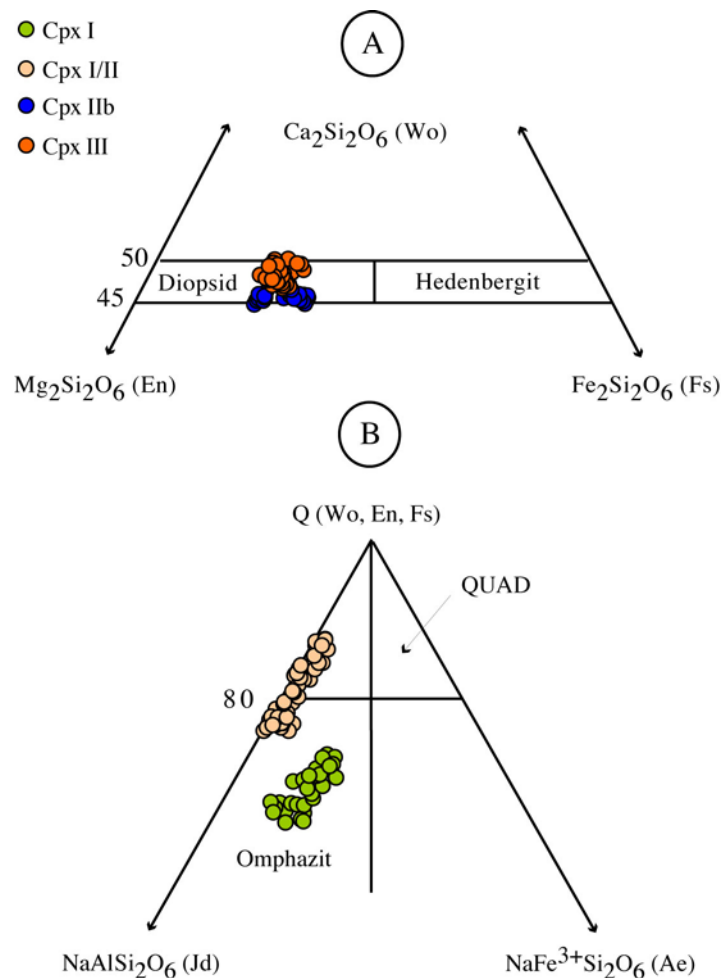
### 4.2. Clinopyroxen

Die chemische Zusammensetzung der in den Metabasiten auftretenden Clinopyroxen-Generationen ist in Tab. A-4.01 dargestellt. Gemäß der Pyroxen-Nomenklatur nach Morimoto (1988) handelt es sich bei Cpx I um Omphazit (Eklogitstadium), bei Cpx IIb (Granulitstadium) und Cpx III (Amphibolitstadium) dagegen um Diopsid (Abb. 4-01). Der nicht in allen Fällen auftretende Cpx I/II (Abb. 3-03) weist omphazitische bis diopsidische Zusammensetzung auf.

In Abb. 4-02 ist ein Zonierungsprofil über ein Cpx I-Korn der Probe LO-1 (Einheit 1) dargestellt. Der randliche Abbau von Omphazit (Cpx I) erfolgt bei diesem Korn zu Cpx IIb, wobei das Na-reiche Zwischenstadium (Cpx I/II) nicht deutlich ausgebildet ist. Der Abbau ist von einer Substitution der Elemente Na und Al durch Ca, Mg und Si begleitet. Auch Fe nimmt geringfügig ab.

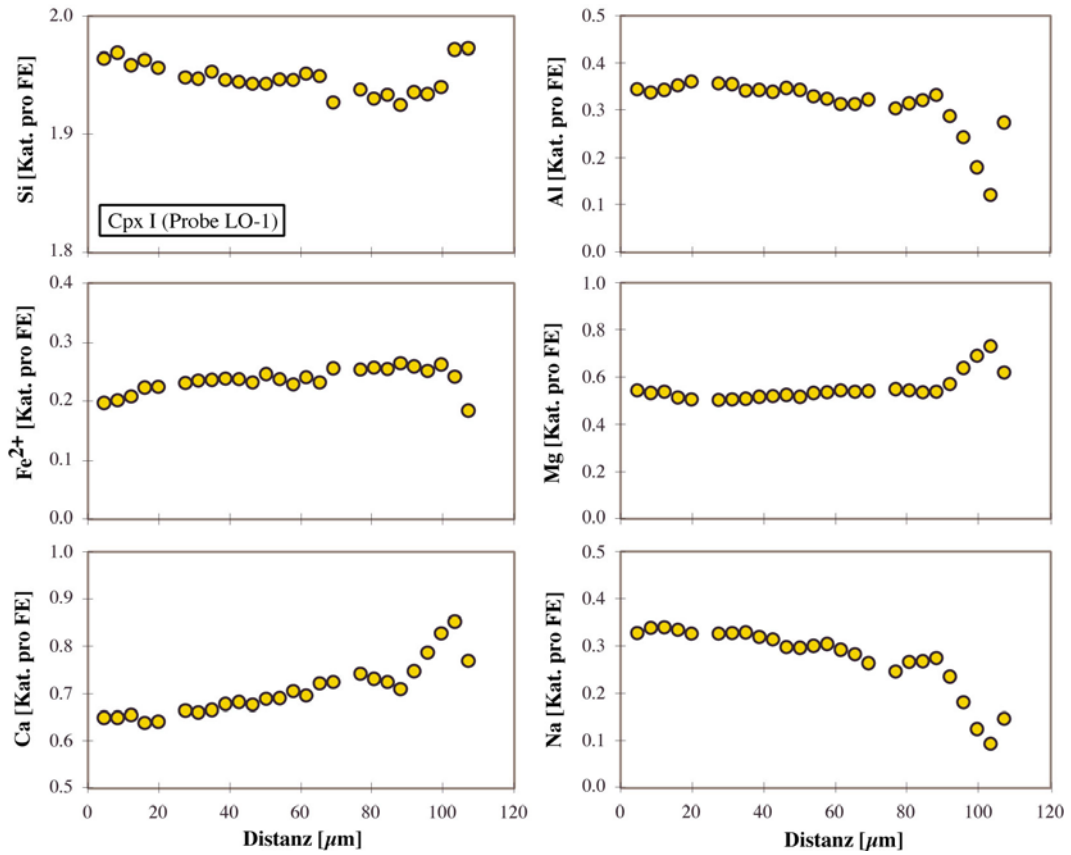
Der Übergang von Cpx I über Cpx I/II zu Cpx IIb wurde in den beiden Proben LO-1 (Einheit 1) und LA-41 (Burg Hohengeroldseck, fragliche Zuordnung zur Einheit 1 oder 3) näher untersucht. Besonders interessant ist die Variation der Na- und  $Al_{T_s}$ -Gehalte in den drei Cpx-Generationen (Abb. 4-03). In beiden Proben nimmt der Na-Gehalt von Cpx I über Cpx I/II nach Cpx IIb ab. Dagegen zeigt der  $Al_{T_s}$ -Gehalt in beiden Proben unterschiedliches Verhalten. Bei LO-1 sind die  $Al_{T_s}$ -Gehalte von Cpx I/II nicht wirklich höher als in Cpx I, und Cpx IIb besitzt sehr geringe  $Al_{T_s}$ -Gehalte. Bei der Probe LA-41 nehmen die  $Al_{T_s}$ -Gehalte von

Cpx I zu Cpx I/II deutlich zu und dann zu Cpx IIb wieder ab. Diese Unterschiede im  $Al_{TS}$ -Gehalt der entsprechenden Cpx-Generationen beider Proben beruhen möglicherweise auf unterschiedlichen Gesamtgesteinszusammensetzungen (leider gibt es von der Probe LO-1 keine Analyse) oder unterschiedlichen P-T-Pfaden. In diesem Zusammenhang sind die beobachteten Albit-Einschlüsse (Pl II/cpx I) in Cpx I der Probe LO-1 (s. Abschnitt 3.2.1) besonders interessant. Beim Abbau des Cpx I über ein Symplektitstadium muss dem System  $SiO_2$  zugeführt worden sein, so dass sich aus der Jd-Komponente des Cpx I und dem zugeführten  $SiO_2$  Albit bilden konnte.

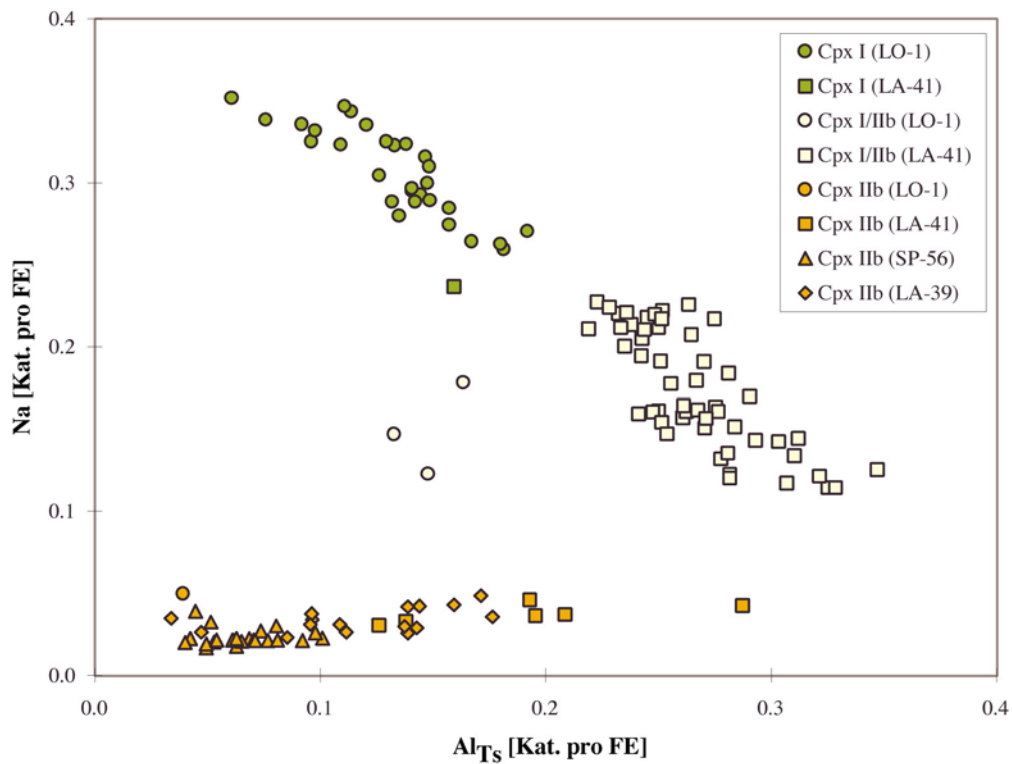


**Abb. 4-01.** Zusammensetzung der verschiedenen Cpx-Generationen in den Metabasiten des Schwarzwaldes, dargestellt in den Diagrammen nach Morimoto (1988).

Leider konnten wegen der z.T. zu kleinen Korngrößen nicht alle Cpx-Generationen der Proben LO-1 und LA-41 auf ihre Spurenelement-Gehalte mittels LA-ICP-MS untersucht werden. In Abb. 4-04 sind die Spurenelementgehalte von Cpx I der Probe LO-1 (Einheit 1), von Cpx I/II der Probe LA-41 (Burg Hohengeroldseck) und von Cpx IIb der Probe LA-39 (Burg Hohengeroldseck) im Vergleich dargestellt.



**Abb. 4-02.** Chemische Zonierung eines Cpx I-Korns der Probe LO-1 (Einheit 1). Die Umwandlung von Omphazit zu Cpx IIb (ohne Cpx I/II-Zwischenstadium) ist am rechten Rand des Profils deutlich sichtbar.



**Abb. 4-03.** Variation der Na- und Al<sub>Ts</sub>-Gehalte im Laufe der Retrogression von Cpx I über Cpx I/II zu Cpx IIb bei den Proben LA-41 (Burg Hohengeroldsee, fragliche Zuordnung zu Einheit 1 oder 3) und

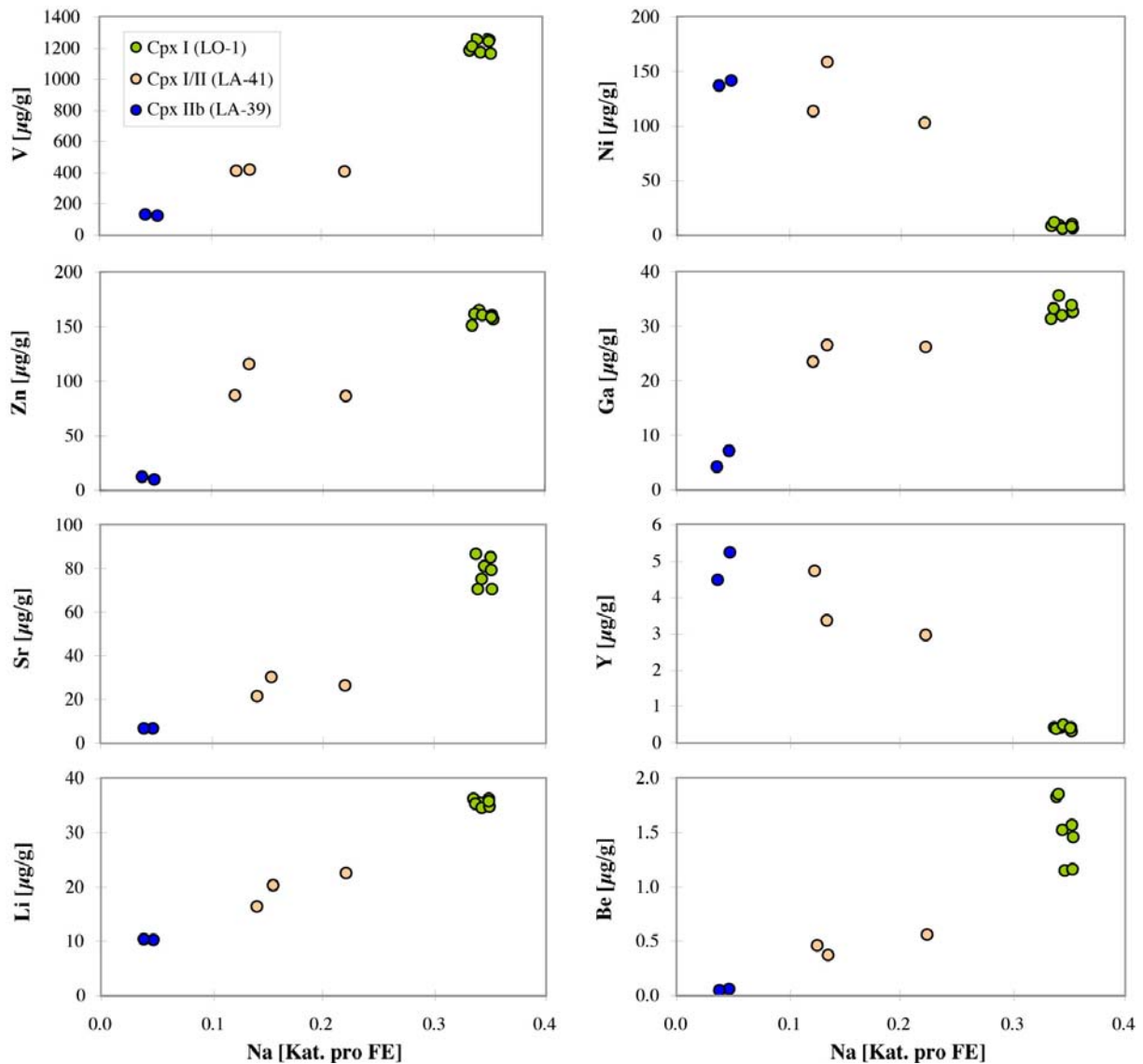


LO-1 (Einheit 1). Für Cpx Iib sind zusätzlich Datenpunkte der Proben SP-56B (Einheit 1) und LA-39 (Burg Hohengeroldseck) aufgeführt. Die unterschiedlich verlaufenden Trends der Proben LA-41 und LO-1 sind wahrscheinlich auf eine unterschiedliche chemische Pauschalzusammensetzung zurückzuführen, könnten jedoch auch durch unterschiedliche P-T-Bedingungen bei der granulitfaziellen Überprägung bedingt sein.  $Al_{Ts}$  wird nach Morimoto (1988) als  $Al_{Ts} = (Al^{IV} + Al^{VI}) - (Na-Cr-Fe^{3+} - 2*Ti)$  berechnet.

Dabei wurde der variable Na-Gehalt der verschiedenen Cpx-Generationen als Abszisse benutzt. Auffällig ist, dass die Gehalte vieler Spurenelemente mit dem Na-Gehalt korrelieren. Dies muss jedoch nicht kristallchemisch oder durch unterschiedliche P-T-Bildungsbedingungen verursacht sein, sondern könnte auch durch Unterschiede in den Gesamtgesteinszusammensetzungen bedingt sein. Ein Vergleich mit Tabelle A-7.01 zeigt, dass die Zusammenhänge nicht einfach sind. Es ist viel wahrscheinlicher, dass die Unterschiede in den Spurenelementgehalten zwischen den verschiedenen Cpx-Generationen dadurch bedingt sind, dass sich die Umwandlungen in chemischen Subsystemen vollzogen haben. Wie man aus Abb. 4-04 ersehen kann, sind V, Zn, Ga, Sr, Li und Be scheinbar positiv, Ni und Y dagegen negativ mit Na korreliert. Diese „Korrelationen“ sind auf stoffliche Umverteilungen während der verschiedenen metamorphen Reaktionen zurückzuführen. So führt der Abbau von Cpx I über Cpx I/II zu Cpx Iib (und Pl Iib) zur Anreicherung der Elemente Ni und Y in Cpx Iib, da Plagioklas diese Elemente nur in geringen Konzentrationen aufnehmen kann (s. auch Tab. A-4.05). Genau entgegengesetzt verhält es sich mit Elementen, die bevorzugt im Plagioklas eingebaut werden können (z.B. Sr, Ga und Be). Dort kommt es zur Abreicherung der Elemente im neu gebildeten Clinopyroxen. Da die retrograden Abbauprozesse nicht isochemisch verlaufen, kann der Spurenelementhaushalt im Clinopyroxen auch zusätzlich durch andere Abbaureaktionen bzw. Mineralneubildungen wie z.B. Amphibol und Biotit beeinflusst werden. Da diese Minerale die Elemente V, Zn und Li in hohen Konzentrationen aufnehmen können (s. auch Tab. A-4.04; Tab. A-4.06), könnte dies die Abreicherung dieser Elemente in Cpx Iib erklären. Relativ zu den späteren Cpx-Generationen weisen Cpx I erhöhte Pb- und Cpx I/II erhöhte Zr-Konzentrationen auf. Außerdem liegen bei Cpx I/II die leichten Seltenen Erden über denen von Cpx I und Cpx Iib (Tab. A-4.01). Dies zeigt sich auch in der ungewöhnlichen und starken Fraktionierung der leichten über die schweren Seltenen Erden mit  $(La/Yb)_{cn} = 4.3-22.0$  in dieser Cpx-Generation.

Der während des Stadiums III (s. Abschnitt 3.2) entstandene Cpx III zeigt keine Zonierungen. Durch Retrogression kann sich aus Cpx Iib sukzessive Amphibol (Am IIIAb) bilden. Der Abbau der Diopside verläuft dabei ohne die Bildung von Zwischenstufen.





**Abb. 4-04.** Variation einiger Spurenelemente mit Na in Clinopyroxenen unterschiedlicher Generationen. Die Elemente V, Zn, Ga, Sr, Li und Be zeigen mit Na eine positive, die Elemente Ni und Y eine negative Korrelation.

Das zeigt die homogene Zusammensetzung von Cpx IIb in den Symplektiten. So variieren zum Beispiel die  $X_{Mg}$ -Werte innerhalb der Probe SP-56B im engen Rahmen von 0.67–0.69 im Kontakt zu Amphibol, von 0.66–0.69 im Kontakt zu Plagioklas und von 0.67–0.69 im Kern der Minerale.

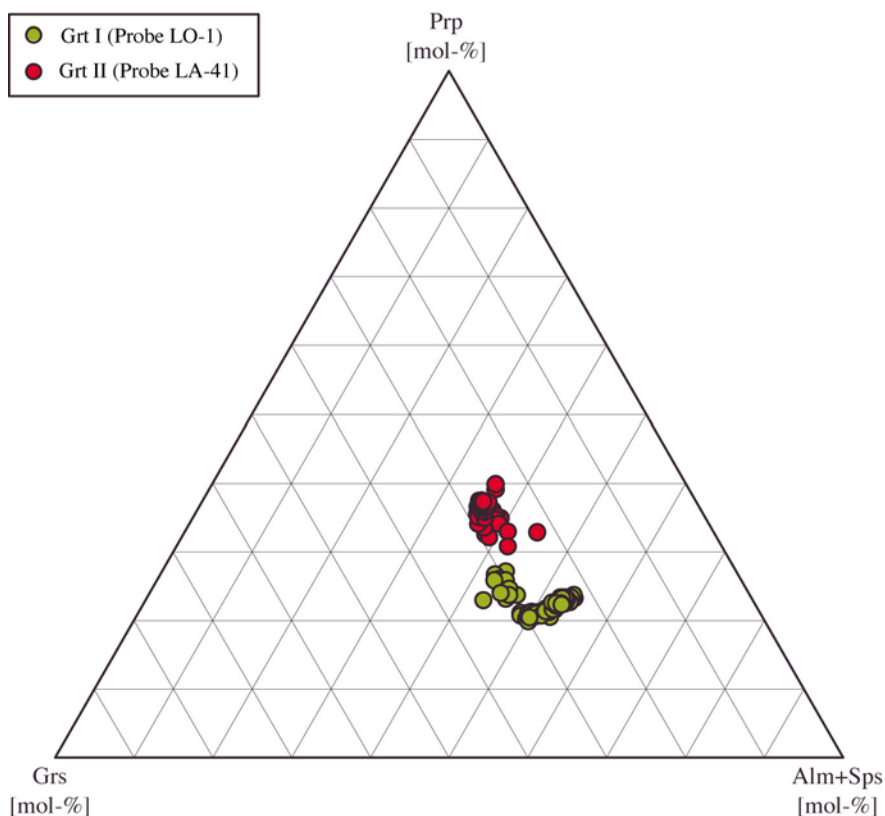
### 4.3. Orthopyroxen

Aufgrund der Feinkörnigkeit des granulitfaziell entstandenen Opx IIa (< 40 µm) konnten keine SIMS und LA-ICP-MS Analysen durchgeführt werden. Die Haupt- und Nebenelemente variieren zum Teil erheblich (Tab. A-4.01). So schwanken die  $X_{Mg}$ -Werte deutlich von 0.46

bis 0.76, was durch eine Pauschalzusammensetzungen der Gesteine bedingt ist. Die Orthopyroxene mit hohen  $X_{Mg}$ -Werten zeigen dabei auch erhöhte Al-Gehalte.

#### 4.4. Granat

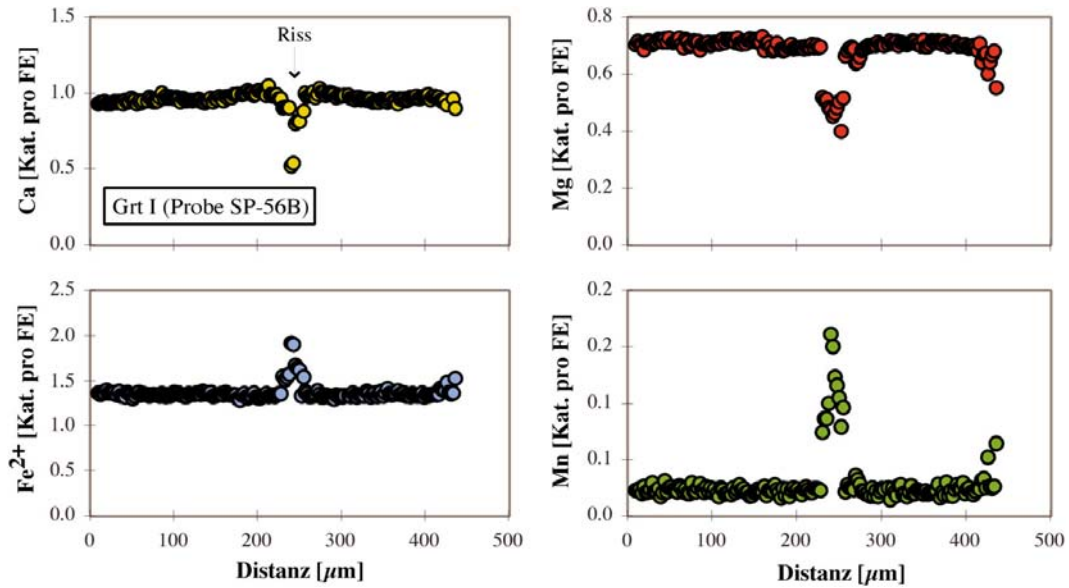
Die Zusammensetzung der eklogitfaziell gebildeten Granate (Grt I) liegt im Bereich  $Prp_{16.3-27.0}Alm_{41.9-51.6}Grs_{22.3-34.2}Sps_{0.5-3.6}$ , während die der granulitfaziell gebildeten Granate (Grt II) deutlich Mg-reicher sind und Zusammensetzungen haben, die in den Bereich  $Prp_{30.6-39.7}Alm_{34.2-43.0}Grs_{22.3-29.0}Sps_{0.6-1.8}$  fallen (Abb. 4-05; Tab. A-4.02). Allerdings können die zwischen Grt I und Grt II beobachteten Unterschiede im  $X_{Mg}$ -Wert (und in den Spurenelementgehalten, s. unten) auch durch unterschiedliche Gesamtgesteinszusammensetzungen bedingt sein. Repräsentative Zonierungsprofile der Hauptelemente von Grt I (Probe SP-56B) und Grt II (Probe LA-41) sind in Abb. 4-06 bzw. 4-07 dargestellt.



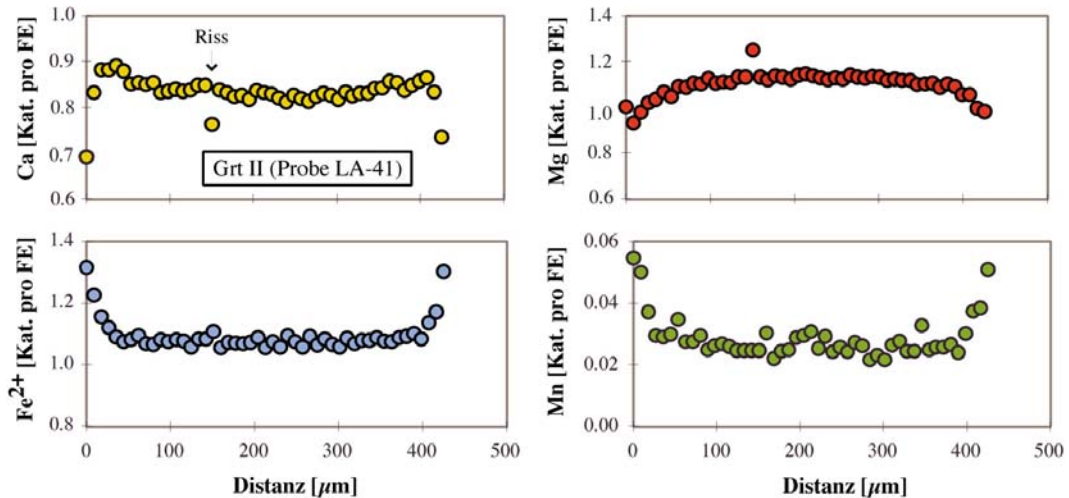
**Abb. 4-05.** Chemische Zusammensetzung von Grt I und Grt II. Grt II besitzt deutlich höhere Mg-Gehalte.

Die Granate zeigen in den Hauptelementen grundsätzlich ausgeglichene Profile, was auf weitgehende Äquilibrierung hinweist. Nur in den Randbereichen und entlang von Rissen treten, bedingt durch retrograde Einflüsse, erhöhte Mn-Gehalte und teilweise unsystematische

Schwankungen in den Gehalten von Mg, Fe und Ca auf.



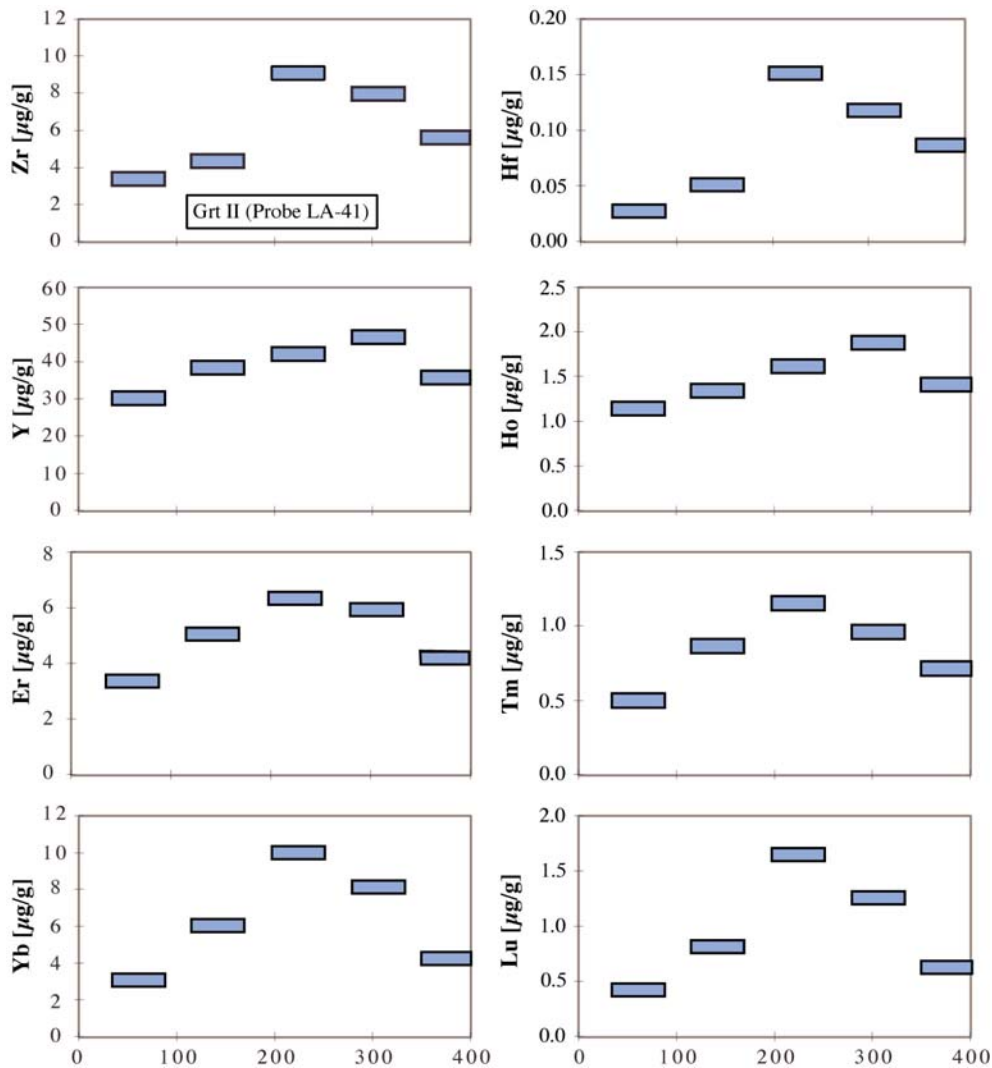
**Abb. 4-06.** Chemische Zonierung (Hauptelemente) eines Grt I-Korns der Probe SP-56B (Einheit 1). Retrograde Variationen (z.B. Zunahme von Mn) sind vor allem am Rand und im Bereich von Rissen zu erkennen.



**Abb. 4-07.** Chemische Zonierung der Haupt- und Spurenelemente eines Grt II-Korns der Probe LA-41 (Burg Hohengeroldseck). Retrograde Variationen (z.B. Zunahme von Mn) sind vor allem am Rand und im Bereich von Rissen zu erkennen. Fortsetzung auf der nächsten Seite.

In Abb. 4-07 sind Spurenelement-Zonierungsprofile durch ein Grt II-Korn (Probe LA-41, Burg Hohengeroldseck) dargestellt. Vor allem die schweren Seltenen Erden sowie Y, Zr und Hf zeigen deutliche Zonierungen mit vom Kern zum Rand abnehmenden Gehalten. Das Vorhandensein derartiger Spurenelement-Zonierungen bei fehlenden Zonierungen der Hauptelemente ist auf die bedeutend geringere Diffusionsgeschwindigkeit der Spurenelemente während der granulitfaziellen Reäquilibration oder des granulitfaziellen Wachs-

tums zurückzuführen.



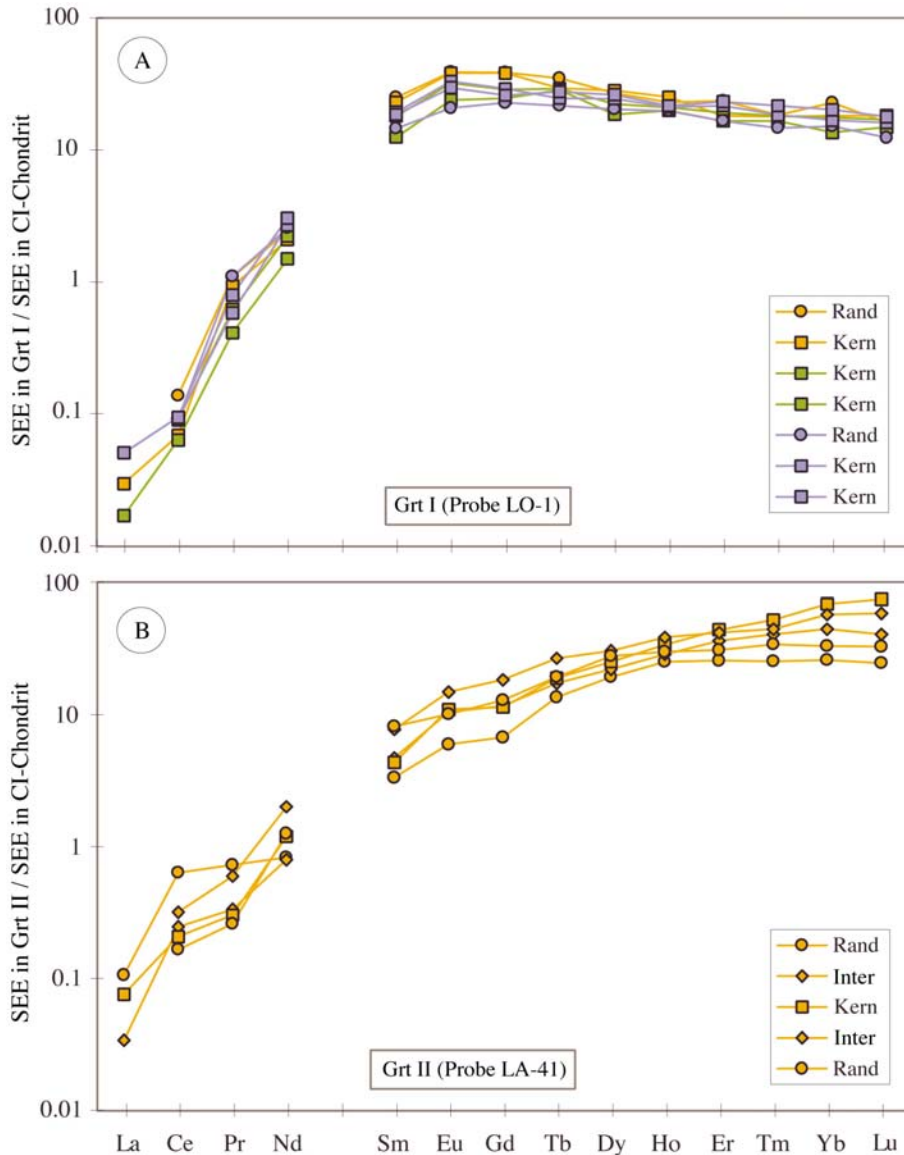
**Abb. 4-07. Fortsetzung.** Zonierung der Gehalte verschiedener Spurenelemente in einem Grt II-Korn der Probe LA-41 (Burg Hohengeroldseck). Alle dargestellten Elemente zeigen eine Konzentrationsabnahme vom Kern zum Rand des Kornes.

Die Grt I-Körner der Probe LO-1 weisen höhere Gehalte an Sc, V, Zn, Ga und B sowie geringere Gehalte an Ni, Y, Zr und Co als die Grt II-Körner der Probe LA-41 auf. Darüber hinaus unterscheiden sich beide Granat-Generationen in ihren chondrit-normierten Seltenen-Erden-Spektren (Abb. 4-08 und Tab. A-4.02).

#### 4.5. Titanate

Wegen der Feinkörnigkeit der Titanate konnten lediglich EMS-Analysen gewonnen werden, die in Tab. A-4.03 dargestellt sind. Der  $\text{TiO}_2$ -Gehalt von *Rutil* schwankt zwischen 96.9 und 99.6 Gew.-%. Diese Variation wird hauptsächlich durch  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  kompensiert, das Gehalte von

bis zu 1.4 Gew.-% erreichen kann. Die Eisenanreicherung tritt vor allem im Kontakt zu Ilm II auf, der während der Retrogression koronal um Rt I gewachsen ist. Im Kontakt zu Ttn IIIAd kann in manchen Fällen ein erhöhter Ca-Gehalt bis zu 0.9 Gew.-% gemessen werden (Tab. A-4.03). Diese Variationen könnten durch Sekundärfluoreszenz bedingt sein.

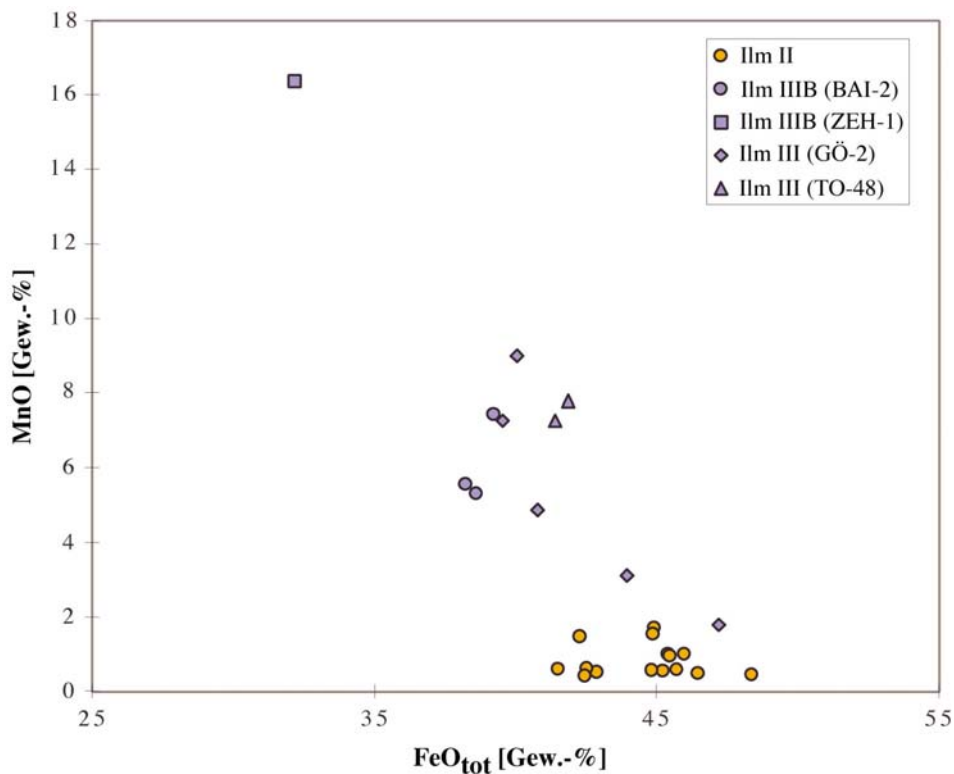


**Abb. 4-08.** Chondrit-normierte Seltenen-Erden-Muster von Granat. **A:** Grt I (Probe LO-1); **B:** Grt II (Probe LA-41).

Die Zusammensetzung von *Ilmenit* kann deutlich variieren (Tab. A-4.03). Ilm IIIB und Ilm III besitzen grundsätzlich höhere MnO-Gehalte, die im Einzelfall 16.4 Gew.-% erreichen können (Probe ZEH-1; Abb. 4-09). Kompensiert wird dies durch abnehmende  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ -Gehalte, was eine deutlich ausgeprägte Variationsbreite von  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  bei Ilm IIIB und Ilm III gegenüber Ilm II hervorruft (32.2–47.2 Gew.-% relativ zu 41.5–48.4 Gew.-%).

*Titanit* weist abhängig von der textuellen Position variable Zusammensetzungen auf

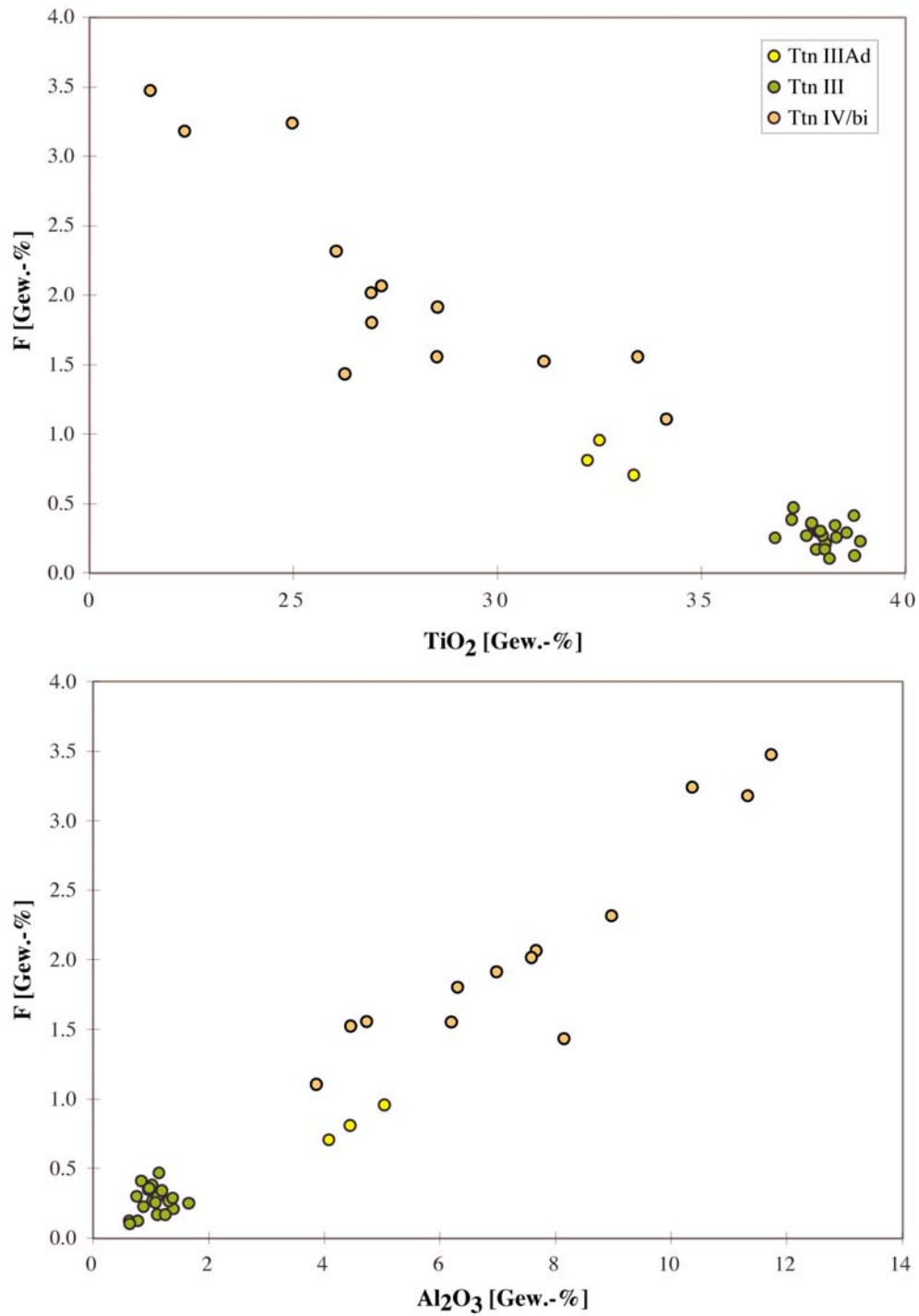
(Tab. A-4.03). Besonders auffällig ist die ausgeprägte Variation des F-Gehalts, der bei dem grünschieferfaziell gebildeten Ttn IV/bi bis 3.5 Gew.-% erreichen kann und mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  positiv und mit  $\text{TiO}_2$  negativ korreliert ist (Abb. 4-10). Hoch-Aluminium-Titanite mit  $X_{\text{Al}}$  bis 0.43 [ $X_{\text{Al}} = \text{Al}^{3+}/(\text{Al}^{3+}+\text{Ti}^{4+}+\text{Fe}^{3+})$ ] treten normalerweise in Gesteinen aus (Ultra-)Hochdruck-Terrains auf (z.B. Oberti *et al.* 1991; Carswell *et al.* 1996), jedoch sind die vorliegenden Hoch-Aluminium-Titanite amphibolitfaziell (Ttn III) und vor allem grünschieferfaziell (Ttn IV/bi) gebildet worden. Ähnliche „Niedrigdruck-Titanite“ mit hohem  $X_{\text{Al}}$  sind auch aus anderen Orogenen bekannt (z.B. Enami *et al.* 1993).



**Abb. 4-09.** Variation zwischen MnO und FeO in den Ilmeniten. Die Analysen für Ilm II stammen von den Proben BAI-2, SP-54 und AW-20b der Einheit 1, ZEH-7 und TO-51 der Einheit 2 sowie LA-41 und LA-39 aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck.

#### 4.6. Amphibol

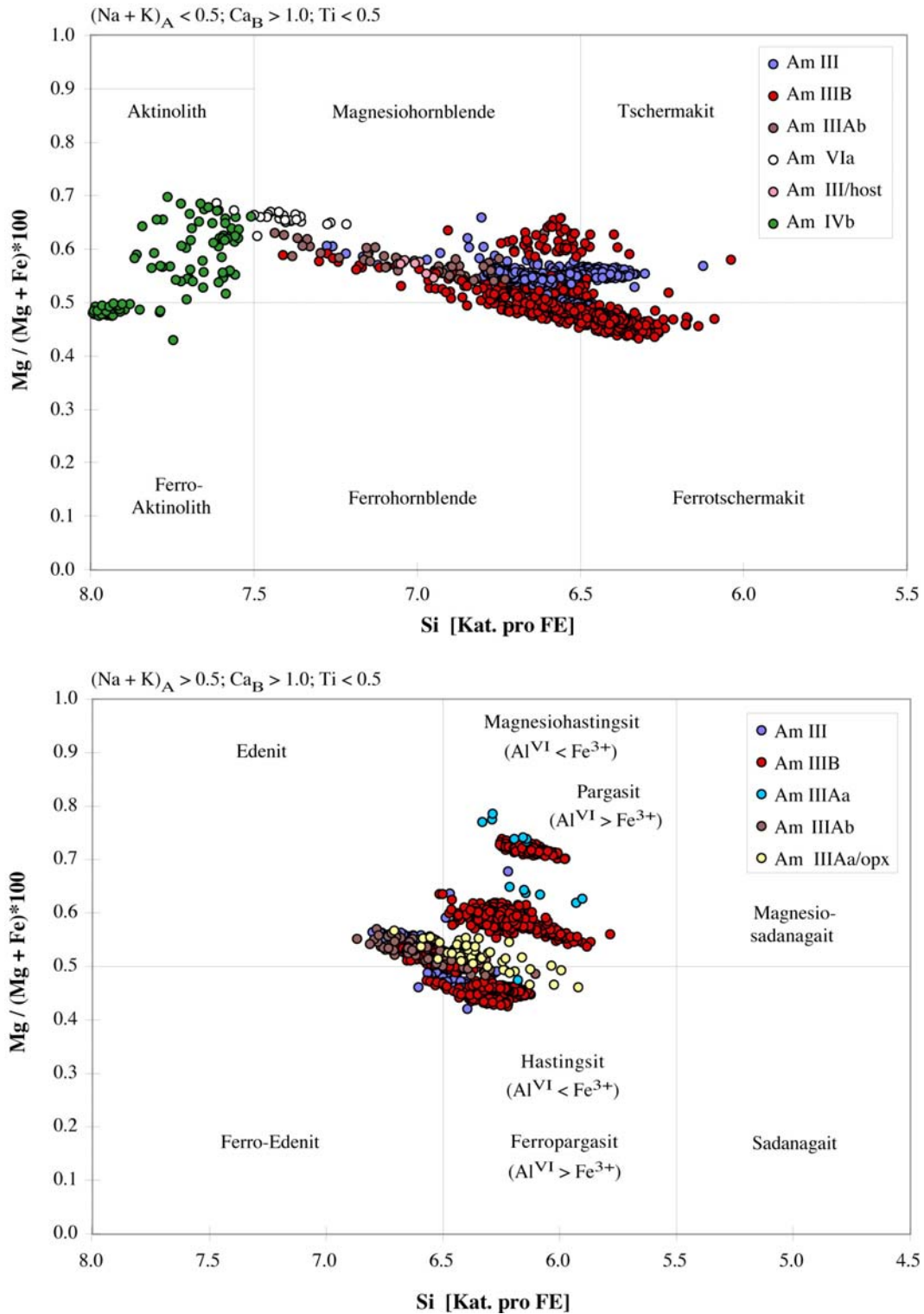
Die Klassifikation der Amphibole erfolgt nach Leake *et al.* (1997). Grundlage der Klassifikation bildet im Wesentlichen der Gehalt an Alkalien der A-Position, das Verhältnis von Mg zu Fe, ausgedrückt durch den  $X_{\text{Mg}}$ -Wert [ $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}_{\text{tot}})$ ], sowie der Si-Gehalt (Abb. 4-11). Hiernach zeigen die Amphibole über weite Bereiche Überlappungen und variieren von Pargasit bis Aktinolith.



**Abb. 4.10.** Korrelationen zwischen von F, TiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Titaniten verschiedener Generationen. Die Analysen für Ttn IIIAd stammen von den Proben ZEH-1 und LO-1 der Einheit 1, für Ttn III von den Proben LA-1, LA-2, GÖ-3, FE-81, TO-48 und SBL-6 der Einheit 2 und für Ttn IV/bi von den Proben FRNO-52 und OP-2 der Einheit 1 sowie LA-1, GÖ-9 und ZEH-7 der Einheit 2.



#### 4. Die chemische Zusammensetzung der Minerale

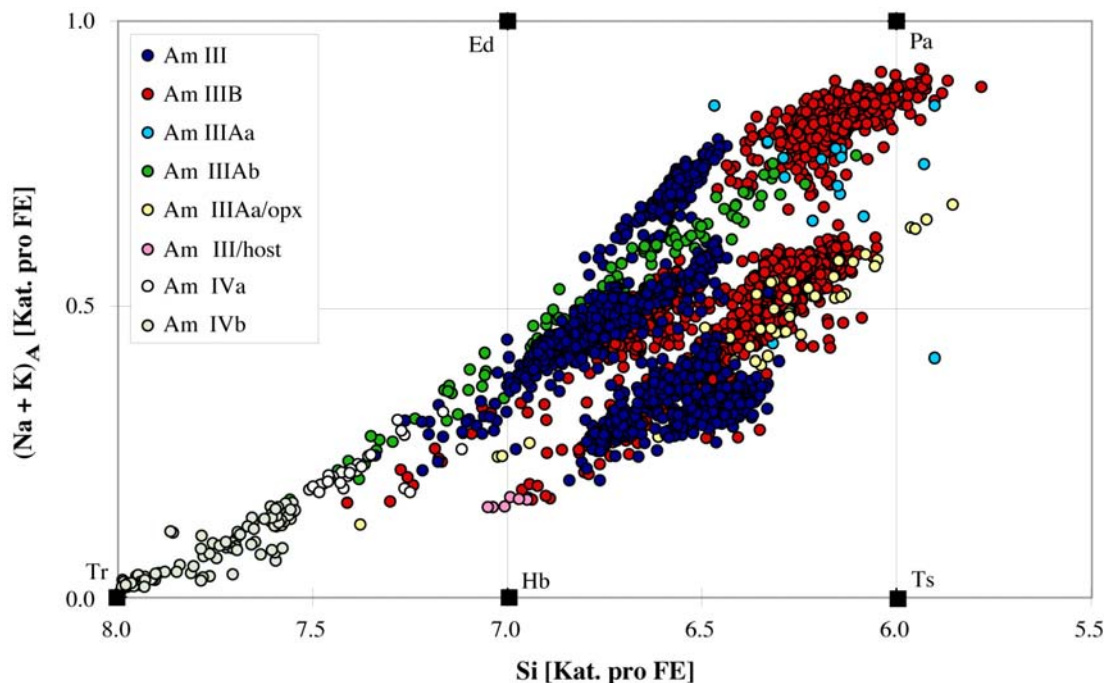


**Abb. 4-11.** Klassifikation der Amphibole nach Leake (1997). Sie variieren von pargasitischer bis aktinolithischer Zusammensetzung. Da die einzelnen Amphibole ähnlich in ihrer Zusammensetzung sind, werden die den jeweiligen Analysen zu Grunde liegenden Proben nicht genannt.

Ein entscheidender Nachteil der IUGS-Klassifikation (Leake 1997) ist die Unterscheidung der Amphibole nach ihrem (Na+K)-Gehalt der A-Position, d.h. die Existenz getrennter Diagramme für  $(Na+K) > 0.5$  und  $(Na+K) < 0.5$ . Dies führt in fast allen Fällen dazu, dass



zwei Diagramme verwendet werden müssen, um alle auftretenden Amphibol-Zusammensetzungen darzustellen zu können (Abb. 4-11). Um diesen Nachteil zu beseitigen, wird in Abb. 4-12  $(\text{Na}+\text{K})_A$  in Abhängigkeit von Si dargestellt. Es veranschaulicht die chemische Entwicklung der Amphibole von ursprünglich pargasitischer Zusammensetzung über Magnesiohornblende bis Aktinolith. Der deutliche Trend hin zu Si-reichen bzw. alkali- und Al-armen Zusammensetzungen kommt dadurch zu Stande, dass Amphibole während der amphibolitfaziellen Metamorphose innerhalb eines Druck- und Temperaturintervalls gewachsen sind und somit in ihrer Zusammensetzung (systematisch) variieren. Die Existenz aktinolithischer Zusammensetzungen ist ein Hinweis darauf, dass bei einigen Proben auch post-amphibolitfazielle Überprägungen stattgefunden haben.



**Abb. 4-12.** Variationsdiagramm mit Si gegen die Besetzung der A-Position. Dieses Diagramm verdeutlicht den chemischen Entwicklungstrend aller Amphibole von pargasitischer bis aktinolithischer Zusammensetzung.

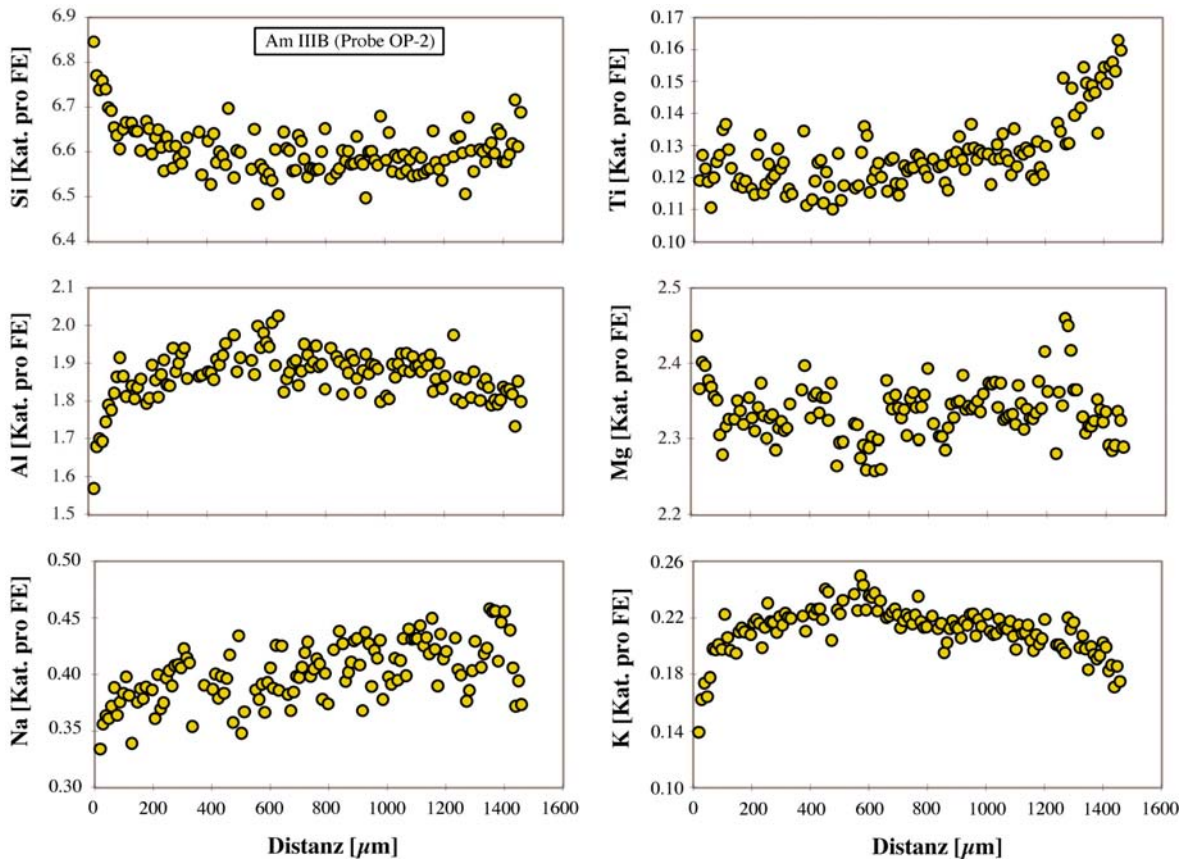
Die chemische Zusammensetzung der Amphibole ist in Tab. A-4.04 dargestellt. Am IIIAa/opx, Am IIIAd, Am IIIAb, Am IIB und Am III zeigen mit Ausnahme der  $\text{TiO}_2$ -,  $\text{FeO}$ - und  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalte für die Hauptelemente ähnliche Werte. Am III und Am IIIB besitzen die höchsten  $\text{TiO}_2$ -Gehalte und ein  $X_{\text{Fe}^{3+}}$  ( $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})$ ) von  $0.2 \pm 0.09$  bzw.  $0.3 \pm 0.08$ . Diese  $X_{\text{Fe}^{3+}}$ -Werte sind typisch für die meisten geologischen Milieus, in denen Amphibole auftreten und entsprechen Sauerstoff-Fugazitäten, die zwischen dem Magnetit-Hämatit- und Graphit-Methan-Puffers liegen (Clowe *et al.* 1988). Zum Teil sind Am IIIAa/opx, Am IIIAd

und Am IIIAb relativ arm an SiO<sub>2</sub> und besitzen Al<sup>IV</sup>-Konzentrationen, die 2.0 Kat. pro FE übersteigen. Die Amphibole Am IVa und Am III/host liegen zwar innerhalb der Variationsbreite der meisten anderen Amphibole, streuen jedoch wesentlich weniger. Ihre SiO<sub>2</sub>-Gehalte sind dabei grundsätzlich höher. Die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte von Am III/host sind darüber hinaus sehr gering. Am IVb besitzt höhere SiO<sub>2</sub>-, aber geringere Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und TiO<sub>2</sub>-Gehalte als die anderen Ca-Amphibole. Die höchsten Gehalte an F und Cl konnten in Am IVb gemessen werden. Die Zusammensetzung der Fe-Mg-Amphibole Am III/exsol ist homogen.

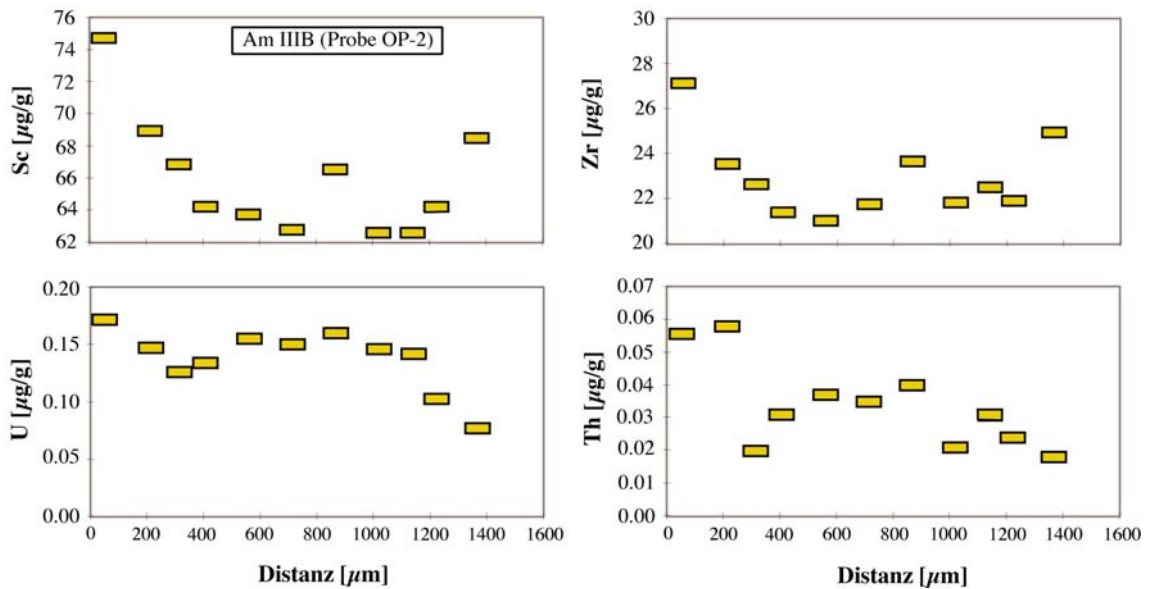
Die Spurenelemente konnten wegen der kleinen Korngrößen der meisten Am-Generationen leider nur in Am III und Am IIIB und im Fall von Li, Be und B auch Am IIIAb und Am IVa analysiert werden. Aufgrund der deutlichen Unterschiede in der Gesamtgesteinschemie der untersuchten Proben (s. Kapitel 7) sind auch die Spurenelement-Gehalte in den Amphibolen sehr unterschiedlich und schwanken unsystematisch (Tab. A-4.04). Dennoch lässt sich tendenziell erkennen, dass die Gehalte der Elemente Ni, Rb, Y, Zr, Ta und Th in Am III höher sind als in Am IIIB. Für die mittleren Seltenen Erden sowie die Elemente Sc, Sr, Hf und U, untergeordnet auch Co und Ba, ähneln sich die Konzentrationen in Am III und Am IIIB. Demgegenüber zeigt Am IIIB höhere Gehalte der Elemente V, Zn, Ga, Nb und Pb.

Zonierungen in den Haupt- und Spurenelementen sind in Abb. 4-13 und Abb. 4-14 für die Proben OP-2 und SP-52 der Einheit 1 sowie in Abb. 4-15 und Abb. 4-16 für die Proben ZEH-7 und GÖ-9 der Einheit 2 dargestellt (die Profile verlaufen vom Rand zum Rand der Mineralkörner). Die Elemente Si und Mg zeigen zunehmende und die Elemente Ti, Al, Na und K abnehmende Konzentrationen vom Kern zum Rand der Mineralkörner. Zonierungen der Spurenelemente zeigen in Probe OP-2 nur Sc, Zr, U und Th (Abb. 4-13). Die Gehalte von Sc und Zr nehmen vom Kern zum Rand zu, während U und Th vom Kern zum Rand abnehmen. Die Probe ZEH-7 zeigt neben Zonierungen der Elemente Sc, V, Y und Nb auch Zonierungen der Seltenen Erden (Abb. 4-15). Alle Spurenelemente nehmen in ihren Konzentrationen vom Kern zum Rand zu. Darüber hinaus zeigt Abb. 4-17 Zonierungen der Elemente Li, Be und B für die Proben ZEH-7, GÖ-2 und GÖ-3 der Einheit 2. Während in allen drei Proben Li deutlich zoniert ist, sind für Be und B die Zonierungen nur undeutlich zu sehen. Möglicherweise führt der große Ionenradius von Li zu einer langsameren Diffusion von Li gegenüber Be und B während der amphibolitfaziellen Äquilibrierung. Besonders interessant ist die Li-Zonierung der Probe GÖ-3. Hier nimmt die Konzentrationen vom Kern zum Rand des Mineralkorns stark zu, was möglicherweise auf eine späte Zufuhr von Li hinweist.

#### 4. Die chemische Zusammensetzung der Minerale

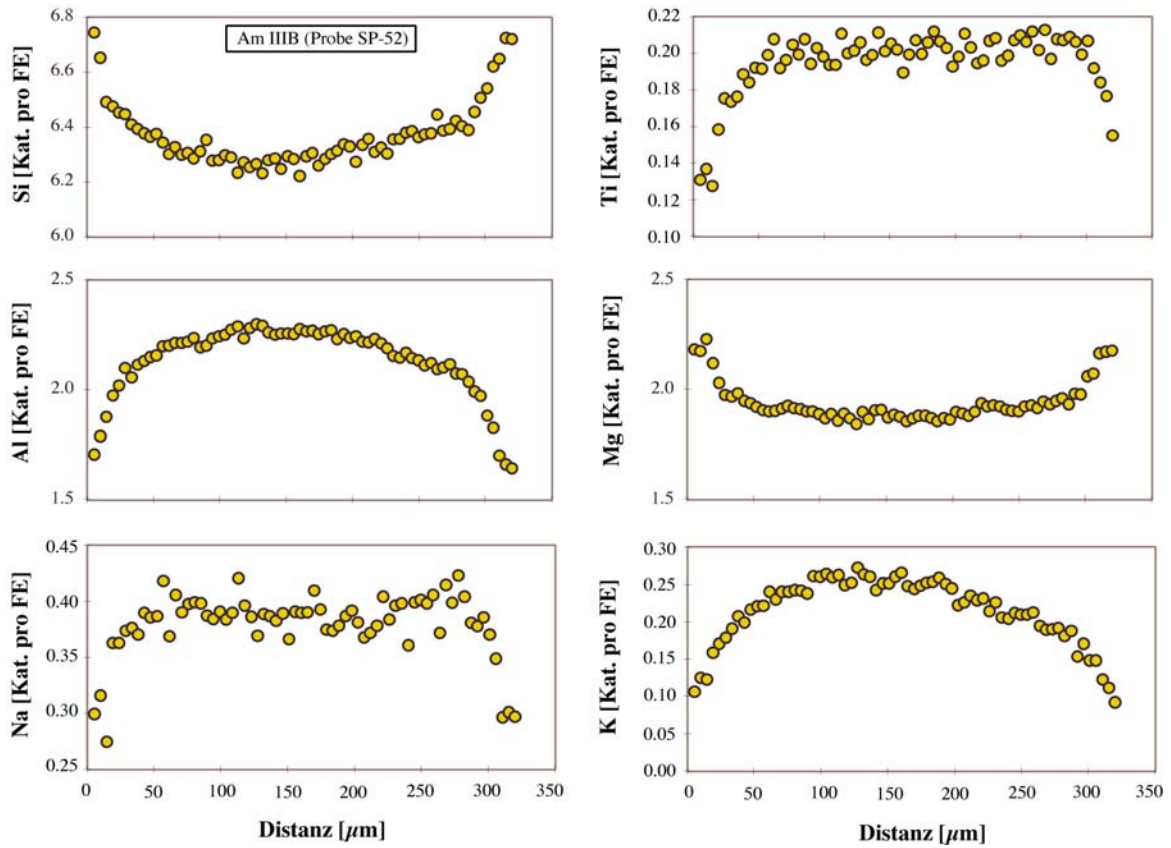


**Abb. 4-13.** Zonierungsprofile der Haupt- und Spurenelemente für Am III B der Probe OP-2. Si, Ti, Sc und Zr zeigen vom Kern zum Rand zunehmende Konzentrationen, während die Gehalte der Elemente Mg, Al, Na, K, U und Th vom Kern zum Rand abnehmen. **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

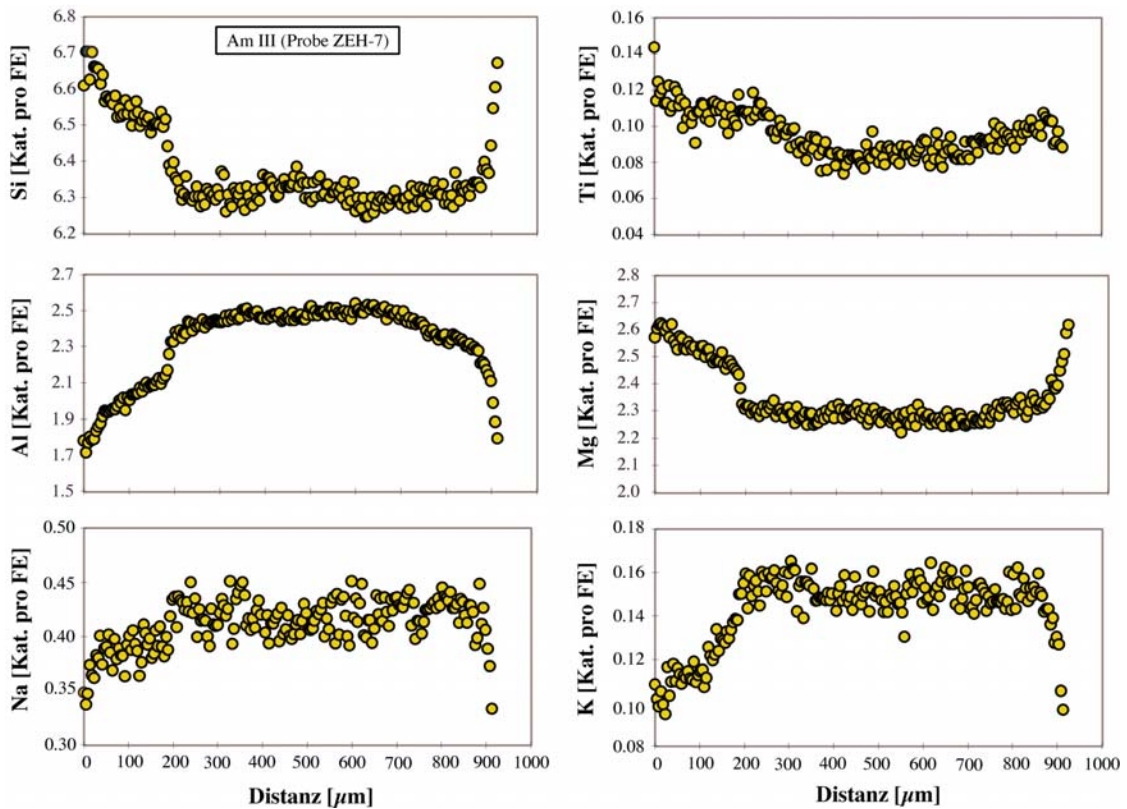


**Abb. 4-13. Fortsetzung.**

#### 4. Die chemische Zusammensetzung der Minerale



**Abb. 4-14.** Zonierungsprofile der Hauptelemente für Am III B (Probe SP-52). Si und Mg zeigen vom Kern zum Rand zunehmende, Ti, Al, Na, und K vom Kern zum Rand abnehmende Konzentrationen.



**Abb. 4-15.** Zonierungsprofile der Haupt- und Spurenelemente für Am III der Probe ZEH-7. Si, Mg, Sc, V, Y, Nb sowie die Seltenen Erden zeigen vom Kern zum Rand zunehmende Konzentrationen,

während die Gehalte der Elemente Ti, Al, Na und K vom Kern zum Rand abnehmen. **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

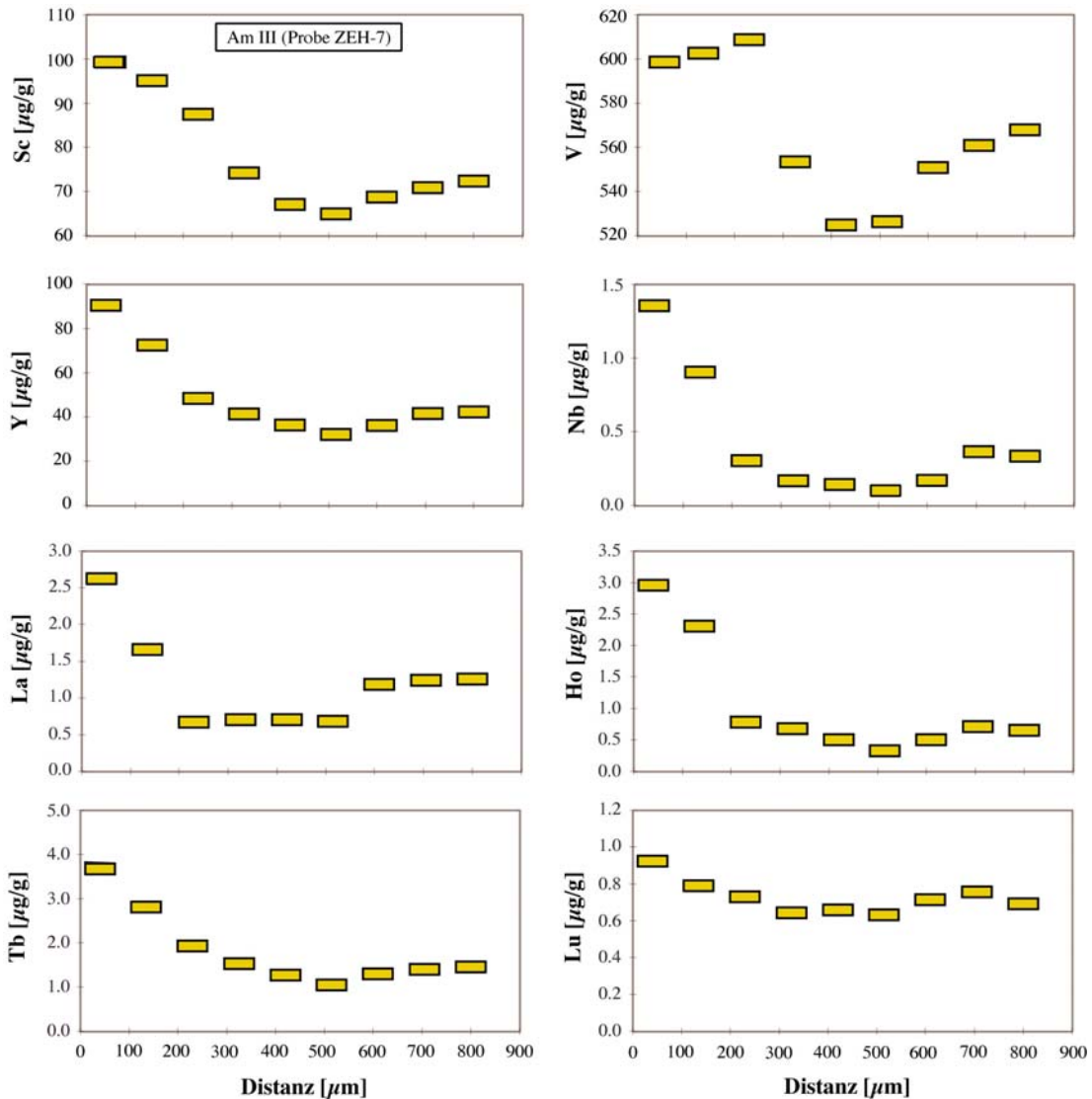
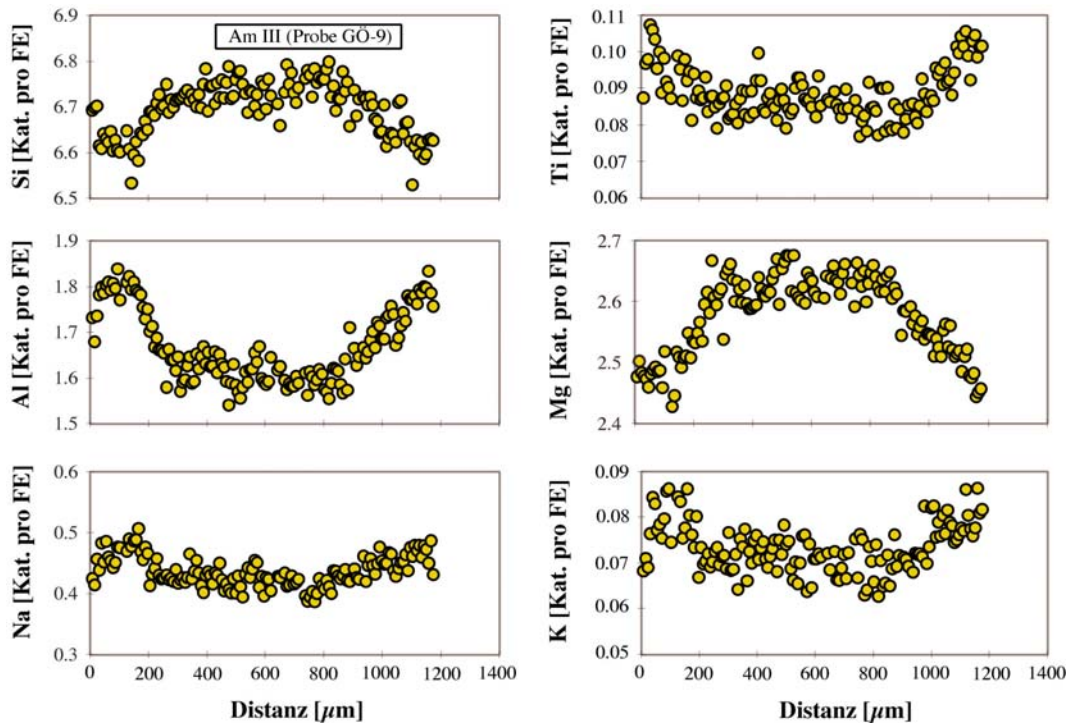


Abb. 4-15. Fortsetzung.

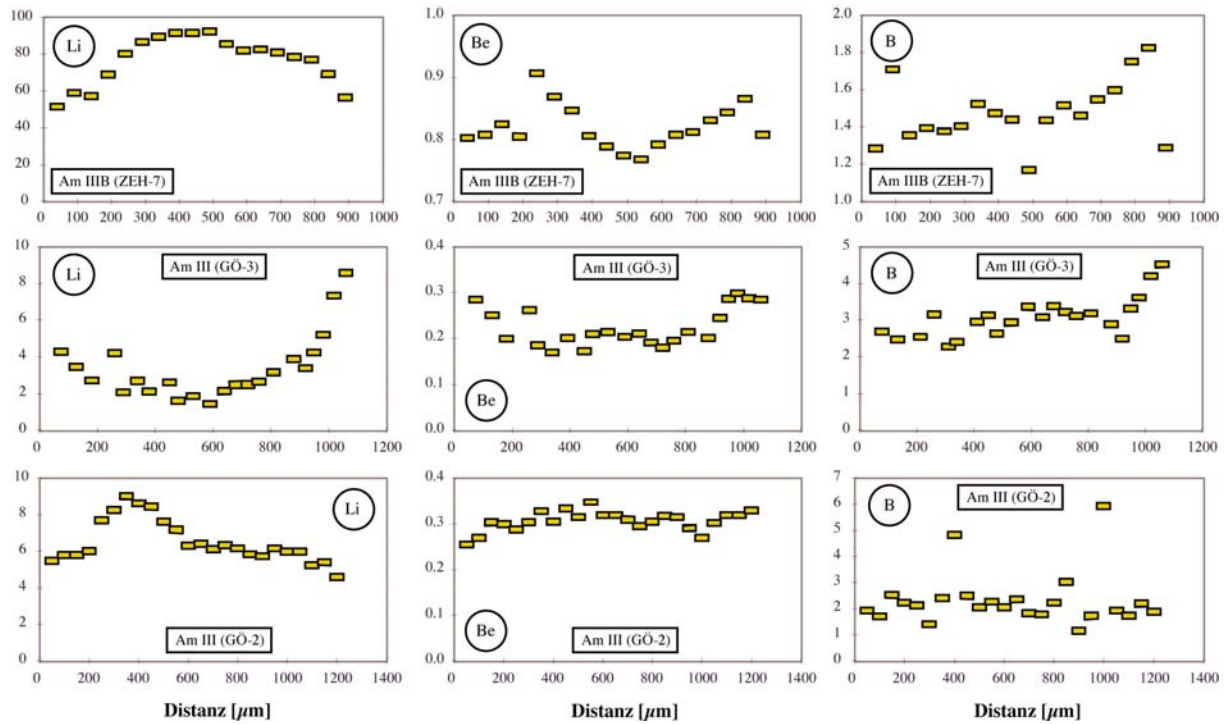
Grundsätzlich ist die chemische Zusammensetzung von Amphibolen abhängig vom Grad der metamorphen Überprägung (z.B. Laird & Albee, 1981; Spear, 1981). Unter der Annahme, dass außer Druck und Temperatur alle intensiven Variablen konstant bleiben (z.B.  $f\text{O}_2$ , Pauschalchemismus der Probe, Paragenese), ist der Gehalt an Alkalien der A-Position linear von der Temperatur und der Al-Gehalt ( $\text{Al}^{\text{VI}}$ ) linear vom Druck abhängig (z.B. Spear, 1981), d.h. mit abnehmender Temperatur und Druck sollten auch die Alkali- und  $\text{Al}^{\text{VI}}$ -Gehalte abnehmen. Dasselbe gilt bei gleichzeitiger Anwesenheit von Ti-Pufferphasen (z.B. Rutil, Ilmenit, Titanit) auch für Ti, denn hohe Ti-Gehalte sind nur bei vergleichsweise hohen Temperaturen und Drücken zu erwarten (Spear, 1981). Dementsprechend sind die beobachteten Hauptelement-Zonierungen der Amphibole durch Abkühlung und



Druckentlastung während der Retrogression entstanden (Wachstumszonierung).



**Abb. 4-16.** Zonierungsprofile der Hauptelemente für Am III der Probe GÖ-9. Si und Mg zeigen vom Kern zum Rand zunehmende Konzentrationen, während die Gehalte der Elemente Ti, Al, Na, und K vom Kern zum Rand abnehmen.



**Abb. 4-17.** Zonierungsprofile der Elemente Li, Be und B für Am III in den Proben ZEH-7, GÖ-3 und GÖ-2. Während Li deutlich zioniert ist, sind die Zonierungen für Be und B nur undeutlich ausgebildet.

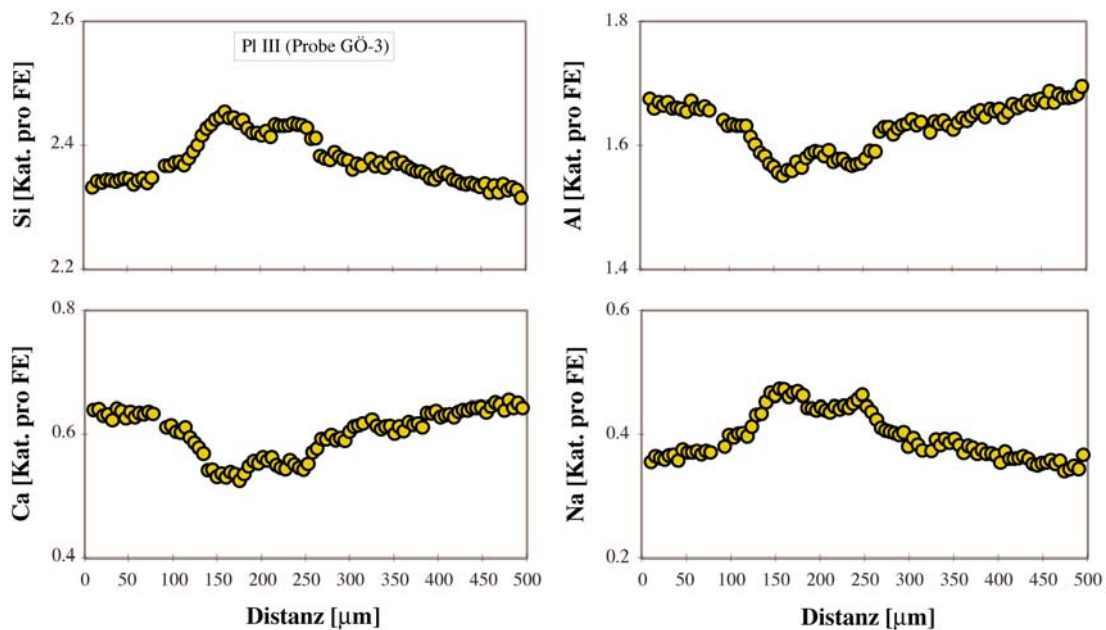
## 4.7. Plagioklas

### 4.7.1. Die Zusammensetzung frischer Plagioklase

Die Zusammensetzung der frischen Plagioklase ist sehr variabel und besitzt eine enorme kompositionelle Bandbreite von  $An_{1,0}$  bis  $An_{8,9}$  (Albit) und  $An_{18,6}$  bis  $An_{92,0}$  (Oligoklas bis Anorthit (Tab. A-4.05). Plagioklas-Zusammensetzungen, die in die Peristerit-Lücke fallen, wurden nicht beobachtet.

Analysen mittels LA-ICP-MS konnten nur an den blastischen Plagioklasen Pl III B und Pl III, mittels SIMS zusätzlich an Pl III Ab durchgeführt werden. Die gewonnenen Daten streuen erheblich (Tab. A-4.05). Systematische Variationen treten bei den leichten bis mittleren Seltenen Erden auf. Bis auf La, das gegenüber Pl III B in Pl III angereichert ist, sind die Elemente Ce bis Eu in Pl III B angereichert. Darüber hinaus sind die Konzentrationen der Elemente Pb, Nb und Sr in Pl III B und die Elemente V, Co, Zr und Ba in Pl III höher.

Einige blastische Plagioklase (Pl III und Pl III B) zeigen Zonierungen in den Haupt- und Spurenelementen, die repräsentativ in Abb. 4-18 dargestellt sind (Probe GÖ-3). Die Konzentrationen von Ca und Al nehmen von Kern zum Rand zu. Na und Si nehmen vom Kern zum Rand ab.



**Abb. 4-18.** Repräsentative Zonierungsprofile für blastische Plagioklase (Pl III und Pl III B). Die Konzentrationen der Elemente Si und Na nehmen von Kern zum Rand ab, die der Elemente Ca und Al vom Kern zum Rand zu.

**4.7.2. Die Serizitisierung der Plagioklase**

Um die chemische Veränderung der Plagioklase bei fortschreitender Serizitisierung zu charakterisieren, wurden exemplarisch an den Proben LA-2 und SBL-6 fünf verschiedene Stufen der Serizitisierung unterschieden (S1 entspricht dem unveränderten Plagioklas, S2 bis S5 zunehmender Serizitisierung) und die entsprechenden Bereiche analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.01 dargestellt.

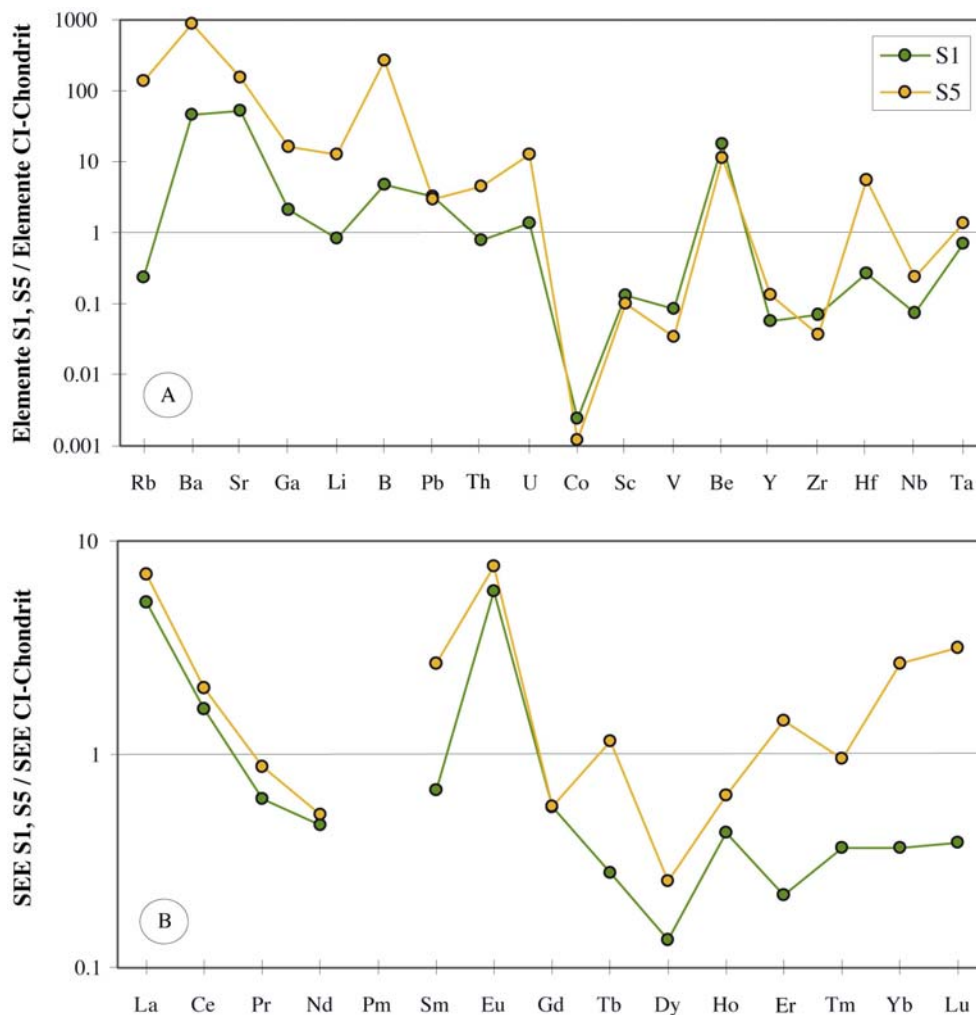
**Tab. 4-01.** Chemische Zusammensetzung der Plagioklase bei fortschreitendem Grad der Serizitisierung.

	S1	S2	S3	S4	S5
SiO <sub>2</sub>	54.6-57.0	53.0-57.1	51.6-58.0	48.9-54.9	48.2-50.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.1-29.9	27.3-28.2	26.9-28.7	27.7-31.5	32.8-35.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1-0.3	<0.1	<0.1	0.03-0.2	0.03-0.2
FeO	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.1-0.8	0.2-0.9
MgO	<0.1	<0.1	<0.1	0.02-0.4	0.04-0.6
CaO	8.3-11.0	4.6-8.9	1.1-1.2	0.9-1.2	0.3-0.6
Na <sub>2</sub> O	5.2-7.1	5.3-6.0	5.3-6.3	3.5-4.9	1.2-2.3
K <sub>2</sub> O	0.2-0.3	1.3-2.9	3.4-4.9	5.7-6.9	8.6-9.9
Sc	0.8	n.a.	n.a.	n.a.	0.6
V	4.7	n.a.	n.a.	n.a.	1.9
Co	1.2	n.a.	n.a.	n.a.	0.6
Ga	19.2	n.a.	n.a.	n.a.	149
Rb	0.5	n.a.	n.a.	n.a.	313
Sr	381	n.a.	n.a.	n.a.	1122
Y	0.09	n.a.	n.a.	n.a.	0.2
Zr	0.3	n.a.	n.a.	n.a.	0.1
Nb	0.02	n.a.	n.a.	n.a.	0.06
Ba	110	n.a.	n.a.	n.a.	2110
La	1.2	n.a.	n.a.	n.a.	1.7
Ce	1.0	n.a.	n.a.	n.a.	1.3
Pr	0.06	n.a.	n.a.	n.a.	0.07
Nd	0.2	n.a.	n.a.	n.a.	0.3
Sm	0.1	n.a.	n.a.	n.a.	0.4
Eu	0.3	n.a.	n.a.	n.a.	0.4
Gd	0.1	n.a.	n.a.	n.a.	0.1
Tb	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	0.03
Dy	0.03	n.a.	n.a.	n.a.	0.05
Ho	0.02	n.a.	n.a.	n.a.	0.03
Er	0.04	n.a.	n.a.	n.a.	0.2
Tm	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	0.02
Yb	0.06	n.a.	n.a.	n.a.	0.2
Lu	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	0.04
Hf	0.03	n.a.	n.a.	n.a.	0.6
Ta	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	0.02
Pb	8.0	n.a.	n.a.	n.a.	7.2
Th	0.02	n.a.	n.a.	n.a.	0.1
U	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	0.09
Li	1.1-1.4	2.6-2.7	4.0-7.5	n.a.	15.8-22.2
Be	0.43-0.44	0.5-0.6	0.3-0.4	n.a.	0.3-0.4
B	4.1-4.3	4.1-4.6	146-185	n.a.	211-263
F	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cl	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

n.a. = nicht analysiert.

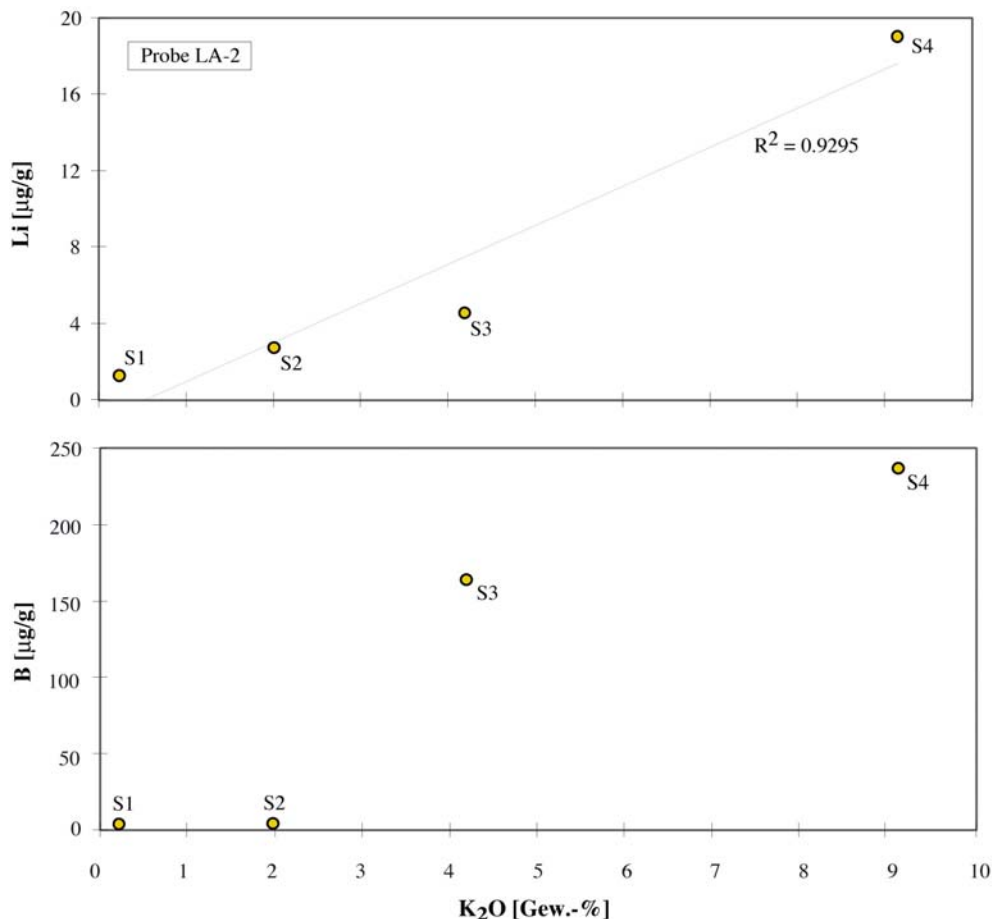


Die zunehmende Serizitisierung ist durch eine kontinuierliche chemische Veränderung gekennzeichnet. Dabei nehmen erwartungsgemäß die Oxide der Hauptelemente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  von S1 nach S5 ab,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{MgO}$  von S1 nach S5 zu. Die Spurenelemente zeigen im Vergleich zwischen S1 und S5 eine erhebliche Streuung (Abb. 4-19). Die Elemente Pb, Co, Sc, V, Be und Zr sind von der Alteration offensichtlich wenig betroffen. Dagegen wurden die Elemente Rb (Anreicherungsfaktor etwa 583), Ga, Ba, Hf und Li (Anreicherungsfaktor jeweils etwa 10) sowie B (Anreicherungsfaktor etwa 60) stark in S5 angereichert (Abb. 4-19 A). Die Seltenen Erden La, Ce, Pr, Nd, Eu und Gd werden von der Serizitisierung kaum beeinflusst, wohingegen Sm und die schweren mittleren bis schweren Seltenen Erden (Tb bis Lu) deutlich in S5 angereichert sind (Anreicherungsfaktor bis etwa 8) (Abb. 4-19 B).



**Abb. 4-19.** Der Spurenelementhaushalt eines vollständig serizitisierten Plagioklases (S5) und eines nicht alterierten Plagioklases (S1) normiert auf CI-Chondrit. **A:** Bis auf Sc, V, Co, Zr und Be sind alle Elemente in Serizit (Src) angereichert. **B:** Sm und die schweren Seltenen Erden sind stark von der Serizitisierung betroffen.

Besonders interessant ist das Verhalten der Elemente Li und B während der Serizitisierung (Tab. 4.01). Li zeigt in den Stufen S1, S2 und S3 jeweils etwa eine Verkoppelung der Konzentration von  $\sim 1.2$  auf  $\sim 4.5$   $\mu\text{g/g}$ . Darüber hinaus ist die Zunahme von Li in allen Stufen der Serizitisierung mit den Hauptelementen  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{MgO}$  korrelierbar (Abb. 4-20). Ein erhöhter K- und Mg-Gehalt (und somit auch zwangsläufig eine erhöhter Rb-Gehalt) der Plagioklase ist ein Indiz für eine beginnende (kryptische) Serizitisierung (z.B. Lippolt *et al.* 1994b). Die starke positive Korrelation zwischen Li und  $\text{K}_2\text{O}$  sowie  $\text{MgO}$  (ohne Abbildung) weist darauf hin, dass bereits im initialen Stadium der Serizitisierung bedeutende Mengen an Li über K und Mg in den Plagioklas aufgenommen werden können. B zeigt innerhalb der ersten beiden Stufen S1 und S2 keinerlei Korrelationen mit den Hauptelementen, was exemplarisch in Abb. 4-20 dargestellt ist. B wird erst bei stärkerer Serizitisierung (S3) dem Plagioklas zugeführt.



**Abb. 4-20.** Korrelation von Li und B mit dem Hauptelementoxid  $\text{K}_2\text{O}$ . Li wird sukzessive durch die voranschreitende Serizitisierung angereichert. Darüber hinaus ist diese Anreicherung positiv mit dem Hauptelement  $\text{K}_2\text{O}$  korreliert. B zeigt diese Korrelationen nicht und wird außerdem erst ab Stufe S3 extrem angereichert.

#### **4.8. Biotit**

Die Zusammensetzung von Bi IIIB und Bi III zeigt im FeO- und MgO-Gehalt deutliche Unterschiede (Tab. A-4.06). Dabei besitzt Bi IIIB systematisch höhere MgO- und niedrigere FeO-Gehalte als Bi III. Darüber hinaus sind die Variationsbreiten dieser Hauptelemente höher als bei Bi III, was sich in den deutlich höheren Mg-Zahlen widerspiegelt. Gegenüber Bi IIIB besitzt Bi III höhere Gehalt an F und Cl.

Außer Li, Be und B konnten die übrigen Spurenelemente wegen der Feinkörnigkeit von Bi III und den darin häufig auftretenden Verwachsungen mit Prehnit nur an Bi IIIB gemessen werden. Bis auf Li und B streuen die Gehalte der Spurenelemente von Bi IIIB kaum. Die Seltenen Erden zeigen für Biotit typische niedrige Werte. Li und B sind relativ zu Bi IIIB in Bi III angereichert.

#### **4.9. Chlorit**

Die Chlorite wurden routinemäßig nur mit der EMS gemessen, denn mit Ausnahme von Chl IV/am und Chl IV/bi sind die Chlorite als akzessorische Phasen meistens zu feinkörnig, um verlässliche SIMS- und LA-ICP-MS-Analysen zu erhalten. Ein Überblick über die chemische Zusammensetzung der Chlorite gibt Tab. A-4.07.

Ein wichtiges Merkmal der Chlorite ist die Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung vom Chemismus der Phasen, aus denen sie gebildet wurden. Chl IV/am und Chl IV/bi zeigen ähnliche Gehalte und Variationsbreiten für die meisten Hauptelemente und darüber hinaus auch die höchsten Gehalte an TiO<sub>2</sub>, MnO und K<sub>2</sub>O. Die geringeren Gehalte an FeO in Chl IV/am spiegeln sich in höheren Mg-Zahlen wider. Chl IV/opx besitzt systematisch höhere MgO-Gehalte als Chl IV/am und Chl IV/bi. Im Vergleich zu den anderen Chloriten ist Chl IV/cpx deutlich anders zusammengesetzt. Er zeigt höhere SiO<sub>2</sub>-, MgO- und CaO-Gehalte bei gleichzeitig niedrigen Gehalten von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und FeO.

Unter allen gemessenen primären und sekundären Phasen besitzt Chlorit die höchsten Li-Konzentrationen, die bei Chl IV/am deutlich höher sind als bei Chl IV/bi. Die Werte für Be sind ähnlich und B ist relativ zu Chl IV/am in Chl IV/bi angereichert.

#### **4.10. Prehnit**

Ähnlich den Chloriten stellen die Prehnite sekundäre Mineralbildungen dar. Repräsentative

Analysen sind in Tab. A-4.07 dargestellt. Die Prehnite sind im Wesentlichen homogen zusammengesetzt, weisen aber beim  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -,  $\text{Na}_2\text{O}$ - und  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalt deutliche Variationen auf.

Bei den Spurenelementen zeigt B hohe Konzentrationen. Somit ist Prehnit neben Serizit (s. Abschnitt 4.7.1) eine wichtige sekundär gebildete, B-reiche Phase der untersuchten Proben.

---

## 5. Geothermobarometrie

### 5.1. Einleitung

Grundsätzlich basiert die Geothermobarometrie auf der Annahme, dass sich in dem betrachteten System ein chemisches Gleichgewicht eingestellt hat, das durch retrograde Einflüsse nicht oder allenfalls in unbedeutender Weise gestört wurde. Diese Voraussetzung ist bei vielen der in dieser Studie untersuchten polymetamorphen Metabasite nicht gegeben. Nur relativ wenige Metabasit-Proben sind während des amphibolitfaziellen Stadiums III in ausreichendem Maß rekristallisiert, so dass sich eine Gleichgewichtsparagenese bilden konnte. Etliche Proben weisen jedoch trotz noch vorhandener eklogit- oder granulitfazieller Relikte zumindest lokal im mm-Bereich eine amphibolitfazielle „Gleichgewichtsparagenese“ auf, die eine Anwendung geothermobarometrischer Methoden auf diese Subsysteme rechtfertigt.

Mit dem Ziel, die Druck-Temperatur-Bedingungen des amphibolitfaziellen Stadiums einzugrenzen, wurden an einigen Amphiboliten thermobarometrische Untersuchungen durchgeführt. Hierfür wurden Proben ausgewählt, die zumindest bereichsweise ein textuelles Gleichgewicht aufweisen und möglichst frei von (sub)grünschieferfaziellen Überprägungen sind. Angewendet wurden das Amphibol-Plagioklas-Thermometer (Blundy & Holland 1990; Holland & Blundy 1994) sowie das Al-Ti-in-Hornblende Thermobarometer (Ernst & Liu 1998). Beide Thermo(barometer sind im Anhang ausführlicher dargestellt.

Neben neun gut äquilibrierten Amphiboliten wurden auch noch drei textuell nicht äquilibrierte Proben mit eklogit- und teilweise granulitfaziellen Relikten (LA-39 und LA-41 aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck, Blatt Lahr/Ost, sowie ZEH-1, Blatt Zell am Harmersbach, aus der Einheit 1) und eine deutlich grünschieferfaziell überprägte Probe (OP-2, Blatt Oppenau) geothermobarometrisch untersucht. Die an den vier letztgenannten Proben (LA-39, LA-41, ZEH-1, OP-2) gewonnenen Temperatur- und Druckabschätzungen sind mit Vorsicht zu betrachten, wie weiter unten dargelegt wird.

### 5.2. Thermobarometrische Untersuchungen an ausgewählten Proben

Die untersuchten Gesteine stammen aus den Einheiten 1 und 2 des CSGC (Abb. 2-02) sowie aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (unsichere Zuordnung zu Einheit 1 oder 3). Ein Überblick über die Proben, ihren Mineralbestand sowie die ermittelten Temperaturen (T) und

Drücke (P) geben die Tabellen 5-01 und 5-02. Um den Einfluss der in manchen Proben vorhandenen leichten chemischen Zonierungen der Amphibole auf die erhaltenen T- und P-Werte abzuschätzen, wurden jeweils die Zusammensetzungen der Kern- und Randbereiche benachbarter Amphibol-Plagioklas-Paare getrennt behandelt.

**Tab. 5-01.** Temperatur-Abschätzungen an ausgewählten Metabasit-Proben mit dem Amphibol-Plagioklas-Geothermometer von Holland & Blundy (1984). Die Temperaturwerte für die Proben OP-2 und ZEH-1 werden als nicht verlässlich eingestuft und sind deshalb kursiv dargestellt (Diskussion sh. Text).

Probe	Einheit	Paragenese (+Am+Pl)	n	T [°C] ( $\pm 1 \sigma$ ) bei einem angenommenem Druck von				
				0.4 GPa	0.5 GPa	0.6 GPa	0.7 GPa	0.8 GPa
<i>Kernzusammensetzungen</i>								
GÖ-2	2	Qtz+Ilm+Ttn	5	765 $\pm$ 16	761 $\pm$ 10	758 $\pm$ 09	755 $\pm$ 09	752 $\pm$ 09
GÖ-5	2	Cpx+Ilm+Ttn+Ap+Mgn+Zr	7	811 $\pm$ 15	815 $\pm$ 15	820 $\pm$ 15	824 $\pm$ 15	828 $\pm$ 16
GÖ-9	2	Ttn	5	762 $\pm$ 17	767 $\pm$ 17	773 $\pm$ 16	779 $\pm$ 16	785 $\pm$ 16
LA-2	2	Cpx+Qtz+Ttn+Ap	2	852 $\pm$ 04	850 $\pm$ 05	847 $\pm$ 05	844 $\pm$ 06	841 $\pm$ 06
SBL-6	2	Cpx+Bi+Ttn+Ap	4	750 $\pm$ 15	754 $\pm$ 14	757 $\pm$ 14	761 $\pm$ 13	764 $\pm$ 13
TO-48	2	Qtz+Ttn+Ap+Mgn+Zr	4	787 $\pm$ 20	777 $\pm$ 18	769 $\pm$ 17	760 $\pm$ 15	750 $\pm$ 14
ZEH-7	2	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	3	792 $\pm$ 17	787 $\pm$ 17	783 $\pm$ 18	779 $\pm$ 18	774 $\pm$ 19
FRNO-52	1	Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap+Zr	5	731 $\pm$ 18	740 $\pm$ 17	749 $\pm$ 16	758 $\pm$ 16	767 $\pm$ 14
OP-2	1	Bi+Ttn	4	676 $\pm$ 13	682 $\pm$ 14	689 $\pm$ 14	696 $\pm$ 14	703 $\pm$ 14
BAI-2	1	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	6	729 $\pm$ 29	726 $\pm$ 29	724 $\pm$ 30	721 $\pm$ 31	718 $\pm$ 01
ZEH-1	1	Qtz+Bi+Rt+Ap	2	683 $\pm$ 21	683 $\pm$ 22	682 $\pm$ 23	681 $\pm$ 24	680 $\pm$ 26
LA-39	HG	Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	768 $\pm$ 10	776 $\pm$ 11	785 $\pm$ 11	794 $\pm$ 11	803 $\pm$ 12
LA-41	HG	Grt+Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	738 $\pm$ 27	735 $\pm$ 34	756 $\pm$ 28	765 $\pm$ 28	774 $\pm$ 28
<i>Randzusammensetzungen</i>								
GÖ-2	2	Qtz+Ilm+Ttn	5	759 $\pm$ 13	755 $\pm$ 13	750 $\pm$ 13	745 $\pm$ 13	740 $\pm$ 13
GÖ-5	2	Cpx+Ilm+Ttn+Ap+Mgn+Zr	7	805 $\pm$ 17	809 $\pm$ 17	813 $\pm$ 17	818 $\pm$ 17	822 $\pm$ 18
GÖ-9	2	Ttn	5	759 $\pm$ 16	765 $\pm$ 16	772 $\pm$ 16	778 $\pm$ 16	784 $\pm$ 16
LA-2	2	Cpx+Qtz+Ttn+Ap	2	824 $\pm$ 76	822 $\pm$ 74	819 $\pm$ 71	817 $\pm$ 68	814 $\pm$ 66
SBL-6	2	Cpx+Bi+Ttn+Ap	4	740 $\pm$ 12	743 $\pm$ 11	748 $\pm$ 10	752 $\pm$ 10	755 $\pm$ 09
TO-48	2	Qtz+Ttn+Ap+Mgn+Zr	4	767 $\pm$ 23	759 $\pm$ 22	750 $\pm$ 20	742 $\pm$ 18	734 $\pm$ 17
ZEH-7	2	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	3	819 $\pm$ 34	812 $\pm$ 33	805 $\pm$ 33	799 $\pm$ 33	792 $\pm$ 32
FRNO-52	1	Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap+Zr	5	751 $\pm$ 14	760 $\pm$ 15	768 $\pm$ 15	777 $\pm$ 15	785 $\pm$ 15
OP-2	1	Bi+Ttn	4	678 $\pm$ 14	684 $\pm$ 14	691 $\pm$ 14	697 $\pm$ 14	703 $\pm$ 14
BAI-2	1	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	6	710 $\pm$ 27	706 $\pm$ 26	702 $\pm$ 27	698 $\pm$ 27	694 $\pm$ 26
ZEH-1	1	Qtz+Bi+Rt+Ap	2	656 $\pm$ 22	652 $\pm$ 22	648 $\pm$ 22	643 $\pm$ 21	639 $\pm$ 21
LA-39	HG	Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	781 $\pm$ 09	791 $\pm$ 09	800 $\pm$ 10	809 $\pm$ 11	818 $\pm$ 11
LA-41	HG	Grt+Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	764 $\pm$ 01	756 $\pm$ 01	782 $\pm$ 01	791 $\pm$ 01	799 $\pm$ 01

n = Anzahl der Temperaturabschätzung verwendeten Mineralpaare. Details zu den Proben und deren Lokalitäten befinden sich im Anhang. HG = Umgebung der Burg Hohengeroldseck (Blatt Lahr/Ost).

Die Druckabhängigkeit des Amphibol-Plagioklas-Thermometers nach Holland & Blundy (1994) ist gering. Dies zeigen die für angenommene Drücke zwischen 0.4 und 0.8 GPa berechneten Temperaturwerte, die sich innerhalb dieses Druckbereichs um weniger als 40 °C (meist < 20 °C) ändern (Tab. 5-01). Weiterhin ergaben sich kaum wesentliche Unterschiede zwischen den Temperaturen, die mit den Kern- und Randzusammensetzungen der Mineralkörner berechnet wurden. Sieht man von zwei Proben aus der Einheit 1 ab, die außergewöhnlich niedrige Temperaturen von ca. 680 °C lieferten (OP-2, ZEH-1), so liegen die für

alle anderen Proben aus den Einheiten 1 und 2 ermittelten Temperaturen für 0.5 GPa zwischen  $726 \pm 29$  °C ( $1 \sigma$ ) und  $850 \pm 5$  °C. Abgesehen von den Proben OP-2 und ZEH-1 liegen auch keine systematischen Temperaturunterschiede zwischen den beiden Einheiten 1 und 2 vor (Tab. 5-01).

**Tab. 5-02.** Temperatur- und Druck-Abschätzungen an ausgewählten Metabasit-Proben mit dem Amphibol-Geothermobarometer von Ernst & Liu (1998). Die für die Proben LA-39 und LA-41 erhaltenen Druckwerte werden als nicht verlässlich eingestuft und sind deshalb kursiv dargestellt (Diskussion sh. Text).

Probe	Einheit	Paragenese (+Am+Pl)	n	Kernzusammensetzung		Randzusammensetzung	
				T [°C]	P [GPa]	T [°C]	P [GPa]
GÖ-2	2	Qtz+Ilm+Ttn	5	$703 \pm 10$	$0.9 \pm 0.1$	$712 \pm 13$	$0.6 \pm 0.2$
GÖ-5	2	Cpx+Ilm+Ttn+Ap+Mgn+Zr	7	$797 \pm 10$	$0.5 \pm 0.1$	$794 \pm 10$	$0.5 \pm 0.1$
GÖ-9	2	Ttn	5	$713 \pm 32$	$0.8 \pm 0.1$	$715 \pm 19$	$0.7 \pm 0.2$
LA-2	2	Cpx+Qtz+Ttn+Ap	2	$855 \pm 07$	$0.7 \pm 0.1$	$850 \pm 14$	$0.6 \pm 0.1$
SBL-6	2	Cpx+Bi+Ttn+Ap	4	$829 \pm 13$	$0.2 \pm 0.1$	$838 \pm 06$	$0.2 \pm 0.1$
TO-48	2	Qtz+Ttn+Ap+Mgn+Zr	4	$780 \pm 08$	$0.3 \pm 0.2$	$771 \pm 25$	$0.3 \pm 0.1$
ZEH-7	2	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	3	$733 \pm 22$	$0.8 \pm 0.2$	$733 \pm 15$	$0.6 \pm 0.1$
FRNO-52	1	Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap+Zr	5	$801 \pm 25$	$1.1 \pm 0.2$	$793 \pm 50$	$0.6 \pm 0.2$
OP-2	1	Bi+Ttn	4	$750 \pm 38$	$0.7 \pm 0.1$	$754 \pm 21$	$0.5 \pm 0.2$
BAI-2	1	Qtz+Bi+Rt+Ilm+Ttn+Ap	6	$758 \pm 38$	$0.6 \pm 0.2$	$737 \pm 34$	$0.3 \pm 0.1$
ZEH-1	1	Qtz+Bi+Rt+Ap	2	$705 \pm 41$	$0.9 \pm 0.3$	$683 \pm 53$	$0.5 \pm 0.2$
LA-39	HG	Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	$730 \pm 46$	<i><math>1.5 \pm 0.2</math></i>	$763 \pm 21$	<i><math>1.4 \pm 0.3</math></i>
LA-41	HG	Grt+Cpx+Opx+Rt+Ilm	3	$825 \pm 07$	<i><math>1.1 \pm 0.1</math></i>	$820 \pm 14$	<i><math>1.1 \pm 0.1</math></i>

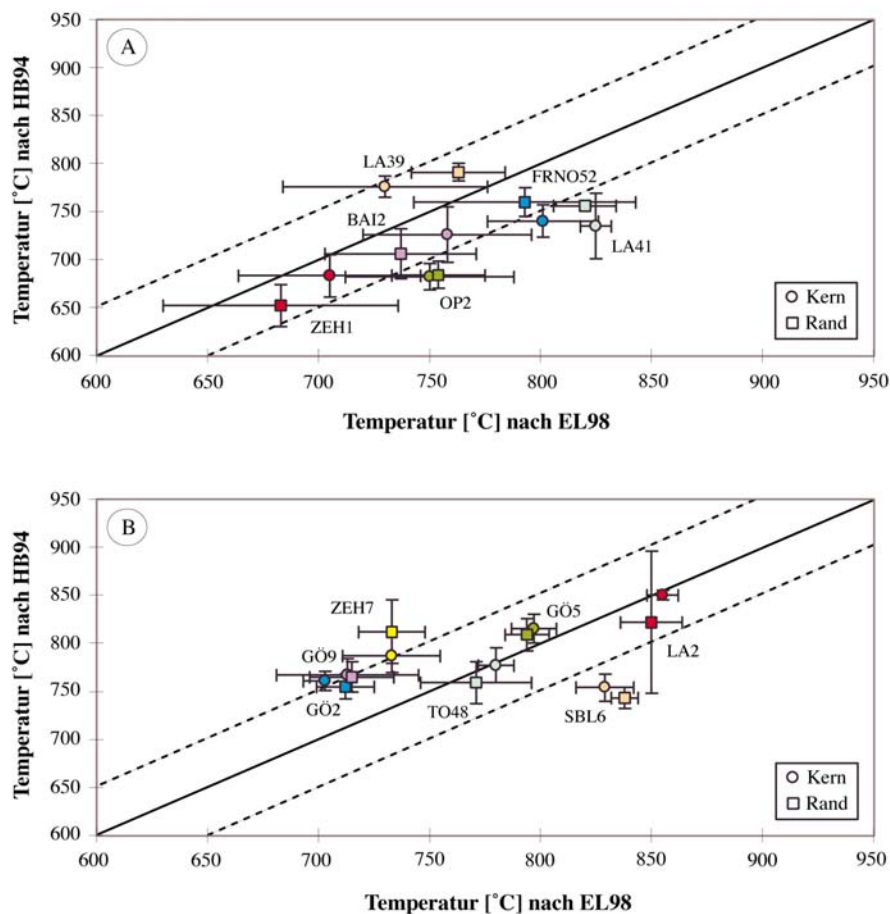
Die Fehler entsprechen der Standardabweichung ( $1 \sigma$ ); n = Anzahl der zur Temperatur- und Druckberechnung herangezogenen Mineralkörner. Details zu den Proben und deren Lokalitäten befinden sich im Anhang. HG = Umgebung der Burg Hohengeroldseck (Blatt Lahr/Ost).

Die Proben OP-2 und ZEH-1 weisen für die Kern- und Randzusammensetzungen deutlich niedrigere Temperaturen als alle anderen Proben auf. Bei der textuell nicht äquilibrierten Probe ZEH-1 ist dies wahrscheinlich auf eine mangelnde Gleichgewichtseinstellung zwischen Amphibol III und Plagioklas III zurückzuführen. Die Probe OP-2 ist deutlich grünschieferfaziell alteriert (Abb. 3-09). Aus diesen Gründen werden die für beide Proben ermittelten Temperaturen als nicht verlässlich angesehen.

Geht man von einem Druck von ca. 0.5 GPa bei der amphibolitfaziellen Überprägung aus (vgl. Kalt *et al.* 1994, 1995, 2000b), so stimmen die an Amphibol-Plagioklas-Paaren ermittelten Temperaturen relativ gut mit den Ergebnissen überein, die sich aus den Na-Gehalten der reliktschen Cordierite in Metapeliten ergeben ( $730$ - $780$  °C; Kalt, unpubl. Res., zitiert in Kalt *et al.* 2000b).

Die Abschätzung von P und T mit Hilfe der Amphibolzusammensetzung nach Ernst & Liu (1998) erfolgt graphisch anhand experimentell ermittelter Isoplethen für  $Al_2O_3$  und  $TiO_2$ . Die Abschätzungen wurden mit den Zusammensetzungen derselben Amphibolkörner

durchgeführt, die auch zur Temperaturbestimmung nach Holland & Blundy (1994) herangezogen wurden. Die für die Kernzusammensetzungen erhaltenen Temperaturen variieren zwischen  $703 \pm 10$  und  $855 \pm 7$  °C, während die Randzusammensetzungen Temperaturen zwischen  $683 \pm 53$  und  $850 \pm 14$  °C lieferten (Tab. 5-02). Da die zur T-Abschätzung nach Ernst & Liu (1998) benutzten  $\text{TiO}_2$ -Isoplethen im P-T-Feld nahezu isotherm verlaufen und auch die Druckabhängigkeit des Thermometers von Holland & Blundy (1994) gering ist, ist es gerechtfertigt, einen „Thermometer-Vergleich“ für einen angenommenen Druck von 0.5 GPa anzustellen (Abb. 5-01). In den meisten Fällen differieren die mit Hilfe der beiden Thermometer ermittelten Temperaturen um weniger als 50 °C. Dies ist ein erstaunliches Resultat, vor allem, wenn man die aus der chemischen Heterogenität der benutzten Minerale resultierende Unsicherheit berücksichtigt.



**Abb. 5-01.** Vergleich der nach Holland & Blundy (1994) (HB94) berechneten und nach Ernst & Liu (1998) (EL98) abgeschätzten Temperaturen für einen angenommenen Druck von 0.5 GPa. **A:** Proben aus der Einheit 1 und aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck; **B:** Proben aus der Einheit 2. Für die meisten Proben ergeben sich Abweichungen von weniger als 50 °C (gestrichelte Linien zur Orientierung).



Die nach Ernst & Liu (1998) ermittelten Drücke variieren stark (0.2-1.1 GPa; Tab. 5-01) und können nicht als verlässlich angesehen werden. Die beiden texturell nicht äquilibrierten Proben aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (LA39, LA41) ergaben besonders hohe Werte von 1.1 und 1.5 GPa. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass der während des granulitfaziellen Stadiums II entstandene Plagioklas während des amphibolitfaziellen Stadiums III nicht ausreichend mit dem neu gebildeten Amphibol äquilibrierte.



---

## 6. Die Verteilung der Spurenelemente

### 6.1. Vorbemerkung

Im folgenden Kapitel wird die Verteilung der Spurenelemente zwischen den wichtigsten Mineralphasen der Metabasite unter besonderer Berücksichtigung der leichten Elemente Li, Be und B dargestellt. Die leichten Elemente stellen, vor allem im Hinblick auf fluidinduzierte stoffliche Veränderungen, sehr wichtige geochemische Indikatoren dar und werden deshalb getrennt von den anderen Spurenelementen behandelt.

Insgesamt wurden sieben Proben aus der Einheit 1, neun Proben aus der Einheit 2 sowie zwei Proben aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (Blatt Lahr/Ost), die möglicherweise der Einheit 3 zuzurechnen sind, untersucht. Unter den insgesamt 34 Elementen wurden die leichten Elemente Li, Be und B mit der SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), alle anderen Elemente mit der LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Plasma Mass Spectrometry) analysiert. Die Konzentrationen der Spurenelemente sind in µg/g angegeben. Details zur Analytik können dem Anhang entnommen werden.

### 6.2. Die leichten Elemente Li, Be und B

#### 6.2.1. Einführung

Das geochemische Verhalten der Elemente Li, Be und B während magmatischer und metamorpher Prozesse ist Gegenstand intensiver Forschung (z.B. Seyfried *et al.* 1984; Ryan & Langmuir 1988; Shaw *et al.* 1988; Leeman *et al.* 1992; Moran *et al.* 1992; Domanik *et al.* 1993; Bebout *et al.* 1993, 1999; Brenan *et al.* 1998a, b; Peacock *et al.* 1999; Tomascak *et al.* 1999, 2002; Zack *et al.* 2002). Während das Fraktionierungsverhalten dieser Elemente und ihrer Isotope bei Prozessen wie der partiellen Schmelzbildung im oberen Erdmantel und dessen metasomatischer Überprägung (z.B. Seitz & Woodland 2000; Woodland *et al.* 2002; Paquin & Altherr 2002), der submarinen Verwitterung (z.B. Seyfried *et al.* 1984; Leeman 1996; Aldahan *et al.* 1997), der Hydrothermal-Metamorphose (z.B. Seyfried *et al.* 1984; Chan *et al.* 1996) und der Subduktion (z.B. Moran *et al.* 1992; Bebout *et al.* 1993, 1999; Johnson & Plank 1999) relativ gut bekannt ist, existieren nur wenig Studien über das Fraktionierungsverhalten bei hohen Temperaturen, d.h. bei amphibolit- und granulitfaziellen Bedingungen (z.B. Shaw *et al.* 1988; Leeman *et al.* 1992; Kasemann *et al.* 2000; Acosta-Vigil *et al.* 2001; Evensen *et al.* 2002) sowie bei niedrigen Drücken.

Die untersuchten Metabasite sind unterschiedlich stark überprägt worden, d.h., die metamorphen Reaktionen sind unterschiedlich weit fortgeschritten (Kapitel 3 und 4). Die Amphibolite des Schwarzwaldes eignen sich deshalb sehr gut, um einerseits eine systematische Studie der Elementgehalte von Li, Be und B in Abhängigkeit des Metamorphosegrads durchzuführen und andererseits, um Hinweise auf die Zusammensetzung bzw. Charakteristik retrograder, amphibolit- und (sub)grünschieferfazieller Fluide zu erhalten.

### 6.2.2. Die Systematik der leichten Elemente Li, Be und B

Die Elemente Li, Be und B wurden in Mineralphasen unterschiedlich metamorphisierter Gesteine gemessen. Die Elementgehalte der Mineralphasen, die in den einzelnen Proben gemessen wurden, sind mit Angabe der relativen Fehler ( $1 \sigma$ ) übersichtlich in Tab. 6-01 zusammengefasst.

**Tab. 6-01.** Übersicht über die Absolutgehalte der Elemente Li, Be und B in den untersuchten Mineralphasen. Alle drei Elemente zeigen z.T. deutliche Variationen (Diskussion s. Text).

		Li [ $\mu\text{g/g}$ ]	Be [ $\mu\text{g/g}$ ]	B [ $\mu\text{g/g}$ ]
<i>Stadium I (Eklogitfazies)</i>				
LO-1 (1)	Cpx I	$35.4 \pm 0.7$	$1.5 \pm 0.3$	$1.3 \pm 0.03$
LO-1 (1)	Grt I	$0.1 \pm 0.1$	D.L.	$0.3 \pm 0.03$
<i>Stadium II (Granulitfazies)</i>				
LA-41 (HoG)	Cpx I/II	$17.1 \pm 4.7$	$0.4 \pm 0.1$	$1.5 \pm 0.2$
LA-39 (HoG)	Cpx IIb	$8.4 \pm 2.2$	$0.06 \pm 0.01$	$0.4 \pm 0.1$
LA-41 (HoG)	Grt II	$0.05 \pm 0.01$	D.L.	$0.5 \pm 0.1$
<i>Stadium III (Amphibolitfazies)</i>				
SP-56 (1)	Am IIIAb	$46.9 \pm 18.1$	$0.7 \pm 0.2$	$2.8 \pm 0.5$
SP-52 (1)	Am IIIB	$6.7 \pm 1.4$	$1.0 \pm 0.4$	$1.2 \pm 0.5$
OP-2 (1)	Am IIIB	$3.3 \pm 0.4$	$2.0 \pm 0.2$	$8.7 \pm 0.8$
LO-1 (1)	Am IIIB	$1.0 \pm 0.2$	$2.0 \pm 0.5$	$2.5 \pm 0.3$
ZEH-1 (1)	Am IIIB	$4.3 \pm 0.6$	$0.2 \pm 0.04$	$2.1 \pm 0.6$
EM-2 (1)	Am IIIB	$1.6 \pm 0.4$	$0.1 \pm 0.2$	$1.5 \pm 0.3$
FRNO-52 (1)	Am IIIB	$6.7 \pm 0.5$	$0.7 \pm 0.2$	$4.5 \pm 1.0$
BAI-2 (1)	Am IIIB	$2.6 \pm 0.4$	$0.3 \pm 0.2$	$8.9 \pm 1.1$
LA-39 (HoG)	Am IIIB	$1.4 \pm 0.7$	$0.3 \pm 0.2$	$0.3 \pm 0.3$
LA-41 (HoG)	Am IIIB	$1.6 \pm 0.1$	$0.6 \pm 0.07$	$0.5 \pm 0.2$
GÖ-2 (2)	Am III	$6.4 \pm 0.9$	$0.3 \pm 0.05$	$2.1 \pm 1.3$
GÖ-3 (2)	Am III	$4.6 \pm 0.3$	$0.2 \pm 0.05$	$1.9 \pm 0.4$
GÖ-5 (2)	Am III	$1.5 \pm 0.3$	$0.5 \pm 0.05$	$1.3 \pm 0.5$
TO-48 (2)	Am III	$7.2 \pm 1.2$	$2.3 \pm 0.3$	$2.2 \pm 0.5$
TO-51 (2)	Am III	$5.6 \pm 0.9$	$0.9 \pm 0.2$	$2.0 \pm 0.4$
LA-1 (2)	Am III	$1.9 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.1$	$6.1 \pm 1.3$
LA-2 (2)	Am III	$3.5 \pm 0.3$	$0.3 \pm 0.07$	$3.0 \pm 0.5$
SBL-6 (2)	Am III	$1.4 \pm 0.3$	$0.6 \pm 0.1$	$2.4 \pm 0.4$
FE-81 (2)	Am III	$5.5 \pm 0.2$	$0.8 \pm 0.2$	$2.8 \pm 0.7$

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Tab. 6-01. Fortsetzung.

		Li [ $\mu\text{g/g}$ ]	Be [ $\mu\text{g/g}$ ]	B [ $\mu\text{g/g}$ ]
<i>Stadium III (Amphibolitfazies)</i>				
SP-56 (1)	Pl IIIAb	$1.2 \pm 0.8$	$1.0 \pm 0.1$	$2.4 \pm 0.3$
SP-52 (1)	Pl IIIB	$0.04 \pm 0.01$	$1.9 \pm 0.4$	$1.3 \pm 0.4$
OP-2 (1)	Pl IIIB	$0.02 \pm 0.01$	$2.2 \pm 1.3$	$9.4 \pm 1.9$
ZEH-1 (1)	Pl IIIB	$0.2 \pm 0.03$	$1.2 \pm 0.2$	$2.7 \pm 0.2$
BAI-2 (1)	Pl IIIB	$0.3 \pm 0.2$	$0.2 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.3$
EM-2 (1)	Pl IIIB	$0.4 \pm 0.2$	$1.5 \pm 0.1$	$6.3 \pm 0.4$
FRNO-52 (1)	Pl IIIB	$0.1 \pm 0.02$	$1.3 \pm 0.06$	$10.8 \pm 2.2$
LA-39 (HoG)	Pl IIIB	$0.3 \pm 0.2$	$0.6 \pm 0.02$	$0.2 \pm 0.08$
LA-41 (HoG)	Pl IIIB	$0.2 \pm 0.004$	$0.8 \pm 0.09$	$0.3 \pm 0.1$
GÖ-2 (2)	Pl III	$0.6 \pm 0.09$	$0.5 \pm 0.1$	$2.0 \pm 1.1$
GÖ-3 (2)	Pl III	$1.4 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.1$	$2.1 \pm 0.2$
GÖ-5 (2)	Pl III	$0.2 \pm 0.02$	$0.7 \pm 0.07$	$1.5 \pm 0.3$
TO-48 (2)	Pl III	$0.5 \pm 0.06$	$3.2 \pm 0.02$	$2.5 \pm 0.5$
TO-51 (2)	Pl III	$0.2 \pm 0.07$	$1.9 \pm 0.1$	$2.1 \pm 0.2$
LA-1 (2)	Pl III	$0.2 \pm 0.09$	$1.4 \pm 0.1$	$7.4 \pm 0.05$
LA-2 (2)	Pl III	$2.0 \pm 0.4$	$0.4 \pm 0.08$	$4.1 \pm 0.2$
SBL-6 (2)	Pl III	$0.3 \pm 0.05$	$0.6 \pm 0.1$	$1.9 \pm 0.5$
BAI-2 (1)	Bi IIIB	$202 \pm 33$	$0.1 \pm 0.01$	$7.0 \pm 2.1$
ZEH-1 (1)	Bi IIIB	$81.3 \pm 7.9$	$0.1 \pm 0.01$	$5.4 \pm 1.8$
SP-52 (1)	Bi IIIB	$109 \pm 6.1$	$0.5 \pm 0.3$	$5.4 \pm 2.0$
TO-51 (2)	Bi III	$186 \pm 22$	$0.2 \pm 0.03$	$28.6 \pm 1.7$
SBL-6 (2)	Cpx III	$17.8 \pm 3.7$	$0.3 \pm 0.05$	$2.1 \pm 0.2$
LA-1 (2)	Cpx III	$11.8 \pm 1.2$	$0.3 \pm 0.06$	$2.8 \pm 0.4$
LA-2 (2)	Cpx III	$15.3 \pm 1.7$	$0.2 \pm 0.02$	$3.4 \pm 0.6$
GÖ-5 (2)	Cpx III	$12.8 \pm 1.3$	$0.3 \pm 0.05$	$1.7 \pm 0.3$
<i>Stadium IV (Grün- und Subgrünschieferfazies)</i>				
LA-1 (2)	Am IVa	$1.3 \pm 0.3$	$0.3 \pm 0.1$	$4.4 \pm 0.2$
FRNO-52 (1)	Chl IV/am	$162 \pm 84$	$0.02 \pm 0.01$	$6.7 \pm 3.9$
GÖ-3 (2)	Chl IV/am	$329 \pm 4.9$	$0.1 \pm 0.02$	$8.6 \pm 0.4$
ZEH-1 (1)	Chl IV/bi	$135 \pm 4.0$	$0.1 \pm 0.02$	$11.8 \pm 2.1$
LA-1 (2)	Prh IV	$2.9 \pm 0.2$	$3.1 \pm 0.6$	$140 \pm 8.9$
EM-2 (1)	Src IV	$60.7 \pm 11.9$	$0.2 \pm 0.01$	$137 \pm 9.2$
LA-2 (2)	Src IV	$19.0 \pm 4.5$	$0.3 \pm 0.1$	$237 \pm 37.1$
GÖ-5 (2)	Src IV	$59.3 \pm 17.9$	$0.6 \pm 0.08$	$49.1 \pm 7.1$
SBL-6 (2)	Src IV	$29.3 \pm 0.6$	$0.8 \pm 0.06$	$179 \pm 1.0$

Die Elemente Li, Be und B wurden mit der SIMS bestimmt und mit einem relativen Fehler ( $1 \sigma$ ) angegeben. Details zu den Proben und deren Lokalitäten befinden sich im Anhang. Neben den Probenbezeichnungen sind in Klammern die tektonometamorphen Einheiten (sensu Kalt *et al.* 2000b) bzw. die Probenlokalität angegeben. D.L.: Analysenwert liegt unter der Nachweisgrenze der SIMS.

### ***Das eklogitfazielle Stadium I***

An einer Probe (LO-1) der Einheit 1, in der die amphibolitfaziellen Reaktionen nur wenig fortgeschritten sind, die also noch weitgehend das eklogitfazielle Stadium I repräsentiert, wurden die Phasen Omphazit (Cpx I) und Granat (Grt I) untersucht (Tab. 6-01). Die Gehalte für Li, Be und B in Cpx I liegen bei  $35.4 \mu\text{g/g}$ ,  $1.5 \mu\text{g/g}$  und  $1.3 \mu\text{g/g}$ . Für Grt I liegen die Absolutgehalte bei  $0.1 \mu\text{g/g}$  für Li und  $0.3 \mu\text{g/g}$  für B. Die Gehalte für Be liegen unter der Nachweisgrenze (D.L.) der SIMS.

### ***Das granulitfazielle Stadium II***

Das granulitfazielle Stadium wurde an Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck untersucht. Hierfür wurden die Phasen Cpx I/II (Probe LA-41), Cpx IIb (Probe LA-39) und Grt II (Probe LA-41) analysiert (Tab. 6-01). Opx II und Pl II konnten aufgrund ihrer Feinkörnigkeit nicht mit der SIMS gemessen werden. In Cpx I/II (Na-reicher Clinopyroxen; s. Kapitel 3) sind die Gehalte für Li und Be mit 17.1 µg/g sowie 0.4 µg/g deutlich niedriger als in Cpx I, während die B-Gehalte ähnlich sind (1.5 µg/g). Bei Cpx IIb, der aus dem vollständigen retrograden Abbau von Cpx I entsteht, liegen die Li, Be- und B-Gehalte bei 8.4 µg/g, 0.06 µg/g und 0.4 µg/g. Leider konnten wegen der zu kleinen Korngrößen nicht alle Cpx-Generationen gemeinsam in einer Proben auf ihre Spurenelement-Gehalte untersucht werden. Da die Li-, Be- und B-Gehalte der Gesamtgesteine für die Proben LO-1, LA-41 und LA-39 leider nicht bekannt sind, müssen die beobachteten systematischen Elementvariationen in den Cpx-Generationen (Cpx I, Cpx I/II und Cpx IIb) nicht kristallechemisch oder durch unterschiedliche P-T-Bildungsbedingungen verursacht worden sein, sondern könnten auch durch Unterschiede in der Gesamtgesteinszusammensetzung bedingt sein. Während die B-Gehalte bei Grt II mit 0.5 µg/g denen von Grt I ähnlich sind, ist die Konzentration von Li in Grt II mit 0.05 µg/g deutlich niedriger als in Grt I. Be liegt unter der Nachweisgrenze der SIMS.

### ***Das amphibolitfazielle Stadium III***

Das frühe amphibolitfazielle Stadium III (s. Kapitel 3) wurde an den Phasen Am IIIAb und Pl IIIAb der Probe SP-56 untersucht (Tab. 6-01). Sie liefern aufgrund ihrer Bildung aus Cpx IIb und Pl IIb erste Hinweise auf die Zusammensetzung der amphibolitfaziellen Fluidphase. So besitzt Am IIIAb mit 46.9 µg/g einen hohen Li-Gehalt. Be und B liegen bei 0.7 µg/g und 2.8 µg/g. Die Li-, Be- und B-Gehalte für Pl IIIAb sind 1.2 µg/g, 1.0 µg/g und 2.4 µg/g und mit Pl III vergleichbar.

Für das fortgeschrittene amphibolitfazielle Stadium (s. Kapitel 3) wurden die Phasen Am IIIB, Pl IIIB und Bi IIIB in den Proben der Einheit 1 sowie Am III, Pl III, Bi III und Cpx III in den Proben der Einheit 2 (Tab. 6-01) untersucht. Die Li-, Be- und B-Gehalte in Am IIIB und Am III schwanken von 1.0–6.7 µg/g, 0.1–2.0 µg/g und 1.2–8.9 µg/g (Am IIIB) sowie von 1.4–7.2 µg/g, 0.2–2.3 µg/g und 1.3–6.1 µg/g (Am III) und unterschieden sich somit für Li und Be (mit Ausnahme der Probe TO-48 mit Be-Gehalten von 2.3 µg/g) nicht wesentlich. Die B-Gehalte sind in den Proben OP-2, BAI-2 und FRNO-52 (Einheit 1) sowie LA-1 (Einheit 2) deutlich erhöht. Die Li- und Be-Gehalte in Am IIIB der Proben aus dem Gebiet der Burg

Hohengeroldseck sind mit denen der Einheit 1 und 2 vergleichbar, doch ist der B-Gehalt deutlich niedriger ( $<0.6 \mu\text{g/g}$ ). Die Plagioklase zeigen bei allen drei Elementen deutliche Variationen (Tab. 6-01). Die höchsten B-Gehalte zeigt Pl III B der Proben OP-2, BAI-2 und FRNO-52 sowie Pl III der Probe LA-1, was zu deutlichen Schwankungen führt ( $1.3 - 11.9 \mu\text{g/g}$  in Pl III B und  $1.6 - 7.4 \mu\text{g/g}$  in Pl III). Ähnliches ist auch für die Elemente Li und Be zu beobachten. So variieren die Li-Gehalte in Pl III B und Pl III um über eine Größenordnung von  $0.02 - 0.4 \mu\text{g/g}$  und  $0.2 - 2.0 \mu\text{g/g}$ . Ungewöhnlich hohe Li-Gehalte zeigen dabei die Proben GÖ-3 und LA-2 der Einheit 2. Die Plagioklase der Proben aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck besitzen niedrige B-Gehalte, während die Li- und Be-Gehalte mit Pl III B und Pl III vergleichbar sind. Zwischen Bi III B und Bi III zeigen sich vor allem im B-Gehalt deutliche Unterschiede (Tab. 6-01). So ist Bi III mit  $29.2 \mu\text{g/g}$  deutlich reicher an B als Bi III B ( $<7.0 \mu\text{g/g}$ ). Die Li-Gehalte sind in Bi III und Bi III B generell sehr hoch. Biotit ist somit eine wichtige Li-Phase in den untersuchten Proben des Stadiums III. Der amphibolitfaziell entstandene Cpx III zeigt in allen untersuchten Proben ähnliche Gehalte für Li, Be und B (Tab. 6-01). Mit einem Li-Gehalt von  $17.8 \mu\text{g/g}$  (Probe SBL-6) und  $11.8 \mu\text{g/g}$  (Proben LA-1) gehört Cpx III neben Biotit zu den Li-reichsten Phasen im Stadium III.

### ***Das (sub)grünschieferfazielle Stadium IV***

Am IVa ist durch Alteration von Am III (Probe LA-1) entstanden. Er besitzt Li- und Be-Gehalte, die niedriger sind als in Am III, während der B-Gehalt deutlich höher ist (Tab. 6-01). Die Chlorite Chl IV/am und Chl IV/bi sind mit Li-Gehalten von  $135-329 \mu\text{g/g}$  die wichtigsten Li-Phasen im Stadium IV. Darüber hinaus lassen die B-Gehalte auf eine Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Phasen schließen, aus denen die Chlorite entstanden sind. So besitzt Chl IV/bi deutlich höhere B-Gehalte als Chl IV/am (Tab. 6-01). Prh IV und vor allem Src IV sind mit B-Gehalten von  $140 \mu\text{g/g}$  und  $237 \mu\text{g/g}$  die wichtigsten B-Träger im Stadium IV. Außerdem besitzt Prh IV unter allen gemessenen Alterationsphasen die höchsten Be-Konzentrationen und Src IV stellt neben Chlorit eine wesentliche Li-Phase dar.

### ***6.2.3. Die Elementverhältnisse B/Li, B/Be und Li/Be***

Die Elemente Li, Be und B verhalten sich bei magmatischen und metamorphen Prozessen sehr unterschiedlich. Während die drei Elemente bei der partiellen Schmelzbildung inkompatibel sind (z.B. Brenan *et al.* 1998a, b; McDonough & Sun, 1995), zeigen sie bei der Wechselwirkung mit fluiden Phasen ein deutlich anderes Verhalten. Li und vor allem B

verhalten sich mobil (z.B. Brenan *et al.* 1998b), während Be weitestgehend immobil bleibt, also nicht in signifikanten Mengen über eine fluide Phase transportiert wird. Diese Eigenschaften, d.h. die Fraktionierung der Elemente Li und B von Be, eignen sich somit besonders, um Informationen über die Zusammensetzung von Fluiden zu erhalten. Insbesondere liefern dabei die Elementverhältnisse B/Li, B/Be und Li/Be wichtige Eckdaten. Für die Berechnung der Elementverhältnisse von Li, Be und B (B/Li, B/Be und Li/Be) wurden dieselben Proben und Analysen verwendet, die der Tab. 6-01 zu Grunde liegen. Die Minimal- und Maximalwerte der Verhältnisse sind in Tab. 6-02 für die Stadien I bis IV übersichtlich dargestellt.

**Tab. 6-02.** Übersicht über die Verhältnisse der Elemente Li, Be und B (B/Li, B/Be und Li/Be) in den untersuchten Mineralphasen. Alle Verhältnisse zeigen z.T. deutliche Variationen (Diskussion s. Text).

		B/Li	B/Be	Li/Be
<i>Stadium I (Eklogitfazies)</i>				
LO-1 (1)	Cpx I	0.03-0.04	0.6-1.1	18.7-31.5
<i>Stadium II (Granulitfazies)</i>				
LA-41 (HoG)	Cpx I/II	0.05-0.1	2.4-5.7	32.8-75.0
LA-39 (HoG)	Cpx IIb	0.04-0.1	5.7-15.0	110-260
<i>Stadium III (Amphibolitfazies)</i>				
SP-56 (1)	Am IIIAb	0.03-0.10	2.2-9.3	26.1-181
SP-52 (1)	Am IIIB	0.1-0.4	0.8-1.7	3.4-8.1
OP-2 (1)	Am IIIB	2.3-3.5	3.9-4.9	1.3-1.9
LO-1 (1)	Am IIIB	1.8-3.8	0.9-1.4	0.3-0.7
ZEH-1 (1)	Am IIIB	0.4-0.9	9.1-17.9	14.1-29.6
EM-2 (1)	Am IIIB	0.6-1.8	4.0-20.1	3.1-23.1
FRNO-52 (1)	Am IIIB	0.6-1.0	4.4-8.3	6.0-10.5
BAI-2 (1)	Am IIIB	2.5-5.0	12.4-35.1	3.1-11.6
LA-39 (HoG)	Am IIIB	0.1-1.7	0.5-1.9	0.7-6.4
LA-41 (HoG)	Am IIIB	0.3-0.5	0.8-1.3	2.2-2.9
GÖ-2 (2)	Am III	0.2-0.9	5.0-18.9	12.6-33.9
GÖ-3 (2)	Am III	0.4-0.6	6.1-13.2	14.0-25.7
GÖ-5 (2)	Am III	0.5-1.8	2.1-4.4	2.0-4.8
TO-48 (2)	Am III	0.2-0.6	0.7-1.4	1.7-4.0
TO-51 (2)	Am III	0.3-0.6	1.9-3.3	4.1-8.1
LA-1 (2)	Am III	3.0-5.5	7.1-10.3	1.6-2.8
LA-2 (2)	Am III	0.7-1.3	7.1-15.6	7.3-15.7
SBL-6 (2)	Am III	1.1-2.9	2.5-5.5	1.2-3.6
FE-81 (2)	Am III	0.5-0.7	2.8-4.8	5.0-7.7

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Vor allem die Clinopyroxene der Stadien I und II (Cpx I, Cpx I/II und Cpx IIb) zeigen systematische Variationen im B/Be- und Li/Be-Verhältnis (Tab. 6-02). Diese steigen von Cpx I über Cpx I/II zu Cpx IIb deutlich an, während das B/Li-Verhältnis im Wesentlichen konstant bleibt. In Cpx I ist das B/Li-Verhältnis geringfügig niedriger als in Cpx I/II und Cpx IIb. In Amphibol und Plagioklas sind ebenfalls systematische Variationen zu erkennen (Tab. 6-02).



Die während des frühen amphibolitfazialen Stadiums III gebildeten Phasen Am IIIAb und Pl IIIAb (s. Kapitel 3) besitzen im Vergleich zu Am III und Am IIIB sowie Pl III und Pl IIIB niedrigere B/Li- und B/Be-Verhältnisse. Am IIIAb darüber hinaus ein deutlich höheres Li/Be-Verhältnis. Darüber hinaus variieren die Li/Be-Verhältnisse in Amphibol (0.3-29.6 in Am IIIB; 1.2-33.9 in Am III) sowie die Li/Be- und B/Li-Verhältnisse in Plagioklas (0.003-3.0 und 1.2-891 in Pl IIIB; 0.07-6.4 und 1.3-51.9 in Pl III) deutlich (Tab. 6-02). Die B/Li- und B/Be-Verhältnisse für Am IIIB und Am III schwanken nicht signifikant.

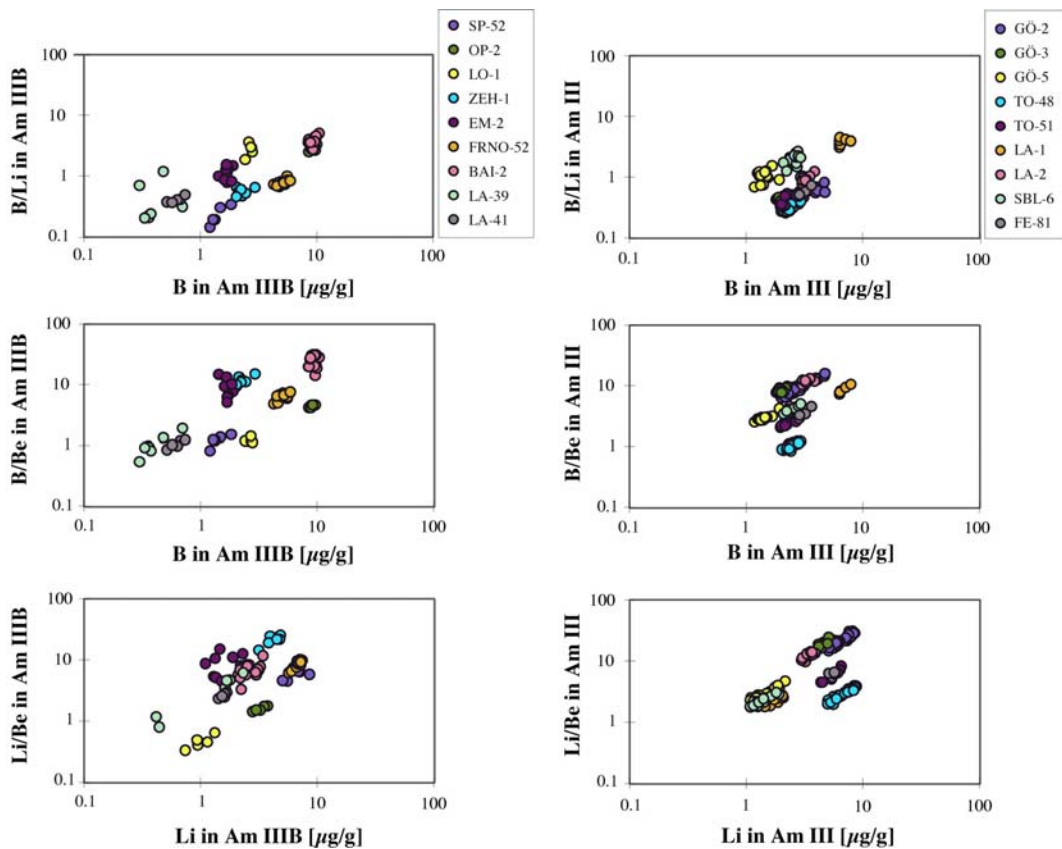
**Tab. 6-02. Fortsetzung.**

		B/Li	B/Be	Li/Be
<i>Stadium III (Amphibolitfazies)</i>				
SP-56 (1)	Pl IIIAb	1.2-4.1	2.1-3.6	0.7-2.3
SP-52 (1)	Pl IIIB	29.1-63.2	0.6-1.0	0.01-0.03
OP-2 (1)	Pl IIIB	289-891	2.3-5.0	0.003-0.01
ZEH-1 (1)	Pl IIIB	12.3-15.5	2.0-2.3	0.1-0.2
EM-2 (1)	Pl IIIB	1.7-7.2	1.7-6.6	0.3-3.0
FRNO-52 (1)	Pl IIIB	47.9-70.8	3.9-4.8	0.06-0.09
BAI-2 (1)	Pl IIIB	27.7-125	7.8-10.4	0.08-0.3
LA-39 (HoG)	Pl IIIB	0.3-1.6	0.3-0.5	0.3-0.9
LA-41 (HoG)	Pl IIIB	8.4-20.8	0.3-0.6	0.02-0.04
GÖ-2 (2)	Pl III	2.9-7.3	3.2-7.1	0.7-1.5
GÖ-3 (2)	Pl III	1.3-2.0	3.2-4.9	1.9-3.4
GÖ-5 (2)	Pl III	7.2-13.8	1.7-2.5	0.2-0.3
TO-48 (2)	Pl III	4.3-5.8	0.8-0.9	0.16-0.19
TO-51 (2)	Pl III	9.3-16.8	1.1-1.2	0.07-0.1
LA-1 (2)	Pl III	27.7-51.9	4.9-5.3	0.1-0.2
LA-2 (2)	Pl III	1.6-2.5	8.2-11.3	3.6-6.4
SBL-6 (2)	Pl III	6.8-11.9	2.7-3.8	0.3-0.5
BAI-2 (1)	Bi IIIB	0.02-0.05	3.3-65.1	116-1833
ZEH-1 (1)	Bi IIIB	0.04-0.08	41.8-128	955-1808
SP-52 (1)	Bi IIIB	0.02-0.08	3.2-30.7	119-454
TO-51 (2)	Bi III	0.1-0.2	109-173	609-1184
SBL-6 (2)	Cpx III	0.09-0.2	6.3-11.0	45.3-104
LA-1 (2)	Cpx III	0.2-0.4	8.0-17.5	33.0-65.0
LA-2 (2)	Cpx III	0.1-0.3	11.8-32.0	62.1-146
GÖ-5 (2)	Cpx III	0.06-0.2	3.7-11.1	31.4-78.5
<i>Stadium IV (Grün- und Subgrünschieferfazies)</i>				
LA-1 (2)	Am IVa	2.9-4.7	10.8-15.7	2.5-5.0
FRNO-52 (1)	Chl IV/am	0.02-0.09	132-475	3400-11050
GÖ-3 (2)	Chl IV/am	0.02-0.03	69.9-98.8	2708-3689
ZEH-1 (1)	Chl IV/bi	0.08-0.1	85.4-133	1091-1370
LA-1 (2)	Prh IV	43.7-52.2	38.4-52.2	0.8-3.7
EM-2 (1)	Src IV	1.9-2.8	524-655	209-314
LA-2 (2)	Src IV	9.5-16.6	528-876	38.5-82.2
GÖ-5 (2)	Src IV	0.5-1.5	63.5-147	61.7-215
SBL-6 (2)	Src IV	6.0-6.2	220-246	35.6-40.8

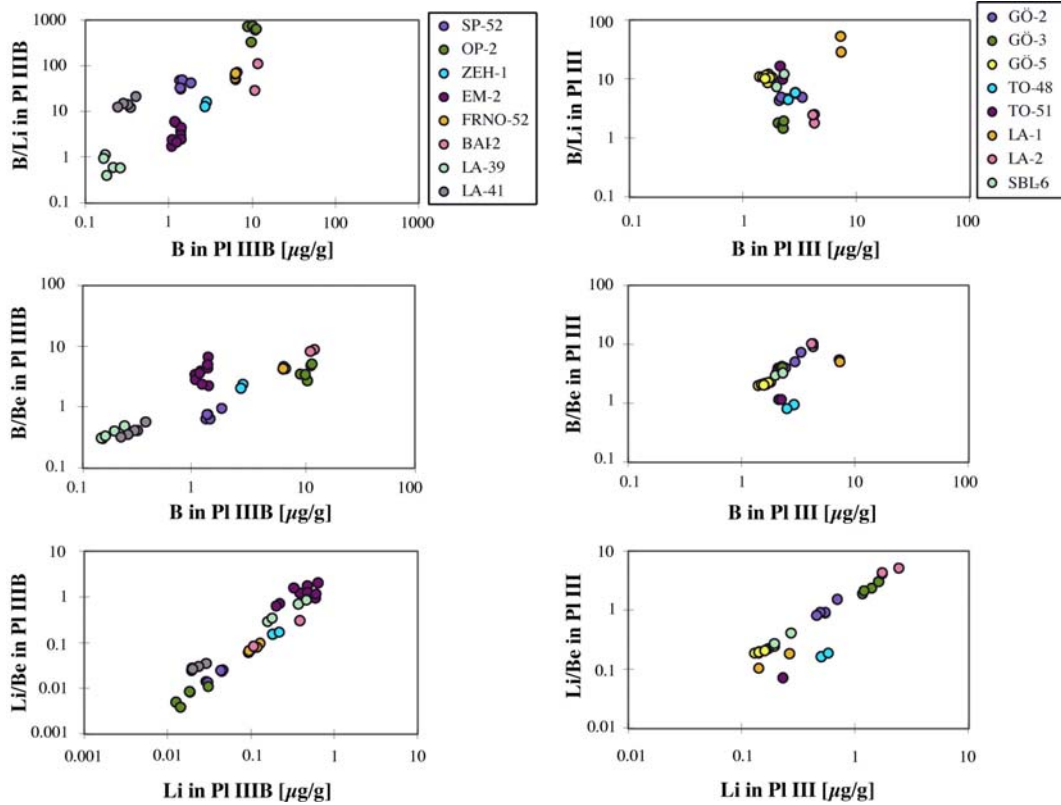
Details zu den Proben und deren Lokalitäten befinden sich im Anhang. Neben den Probenbezeichnungen sind in Klammern die tektonometamorphen Einheiten (sensu Kalt *et al.*, 2000b) bzw. die Probenlokalität angegeben.

Die Amphibole und Plagioklase der Proben aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck zeigen gegenüber den Phasen aus Einheit 1 und 2 keine wesentlichen Unterschiede (Tab. 6-02).

Während in Variationsdiagrammen mit Li gegen B, B gegen Be sowie Li gegen Be keine Korrelationen existieren (ohne Abbildung), sind in den Variationsdiagrammen der Elementverhältnisse (B/Li gegen Li, B/Be gegen Be und Li/Be gegen Be) deutliche Trends erkennbar (Abb. 6-01; Abb. 6-02). Dabei zeigen die B/Li- und B/Be-Verhältnisse in Amphibol (Am IIIB, Am III) und Plagioklas (Pl IIIB, Pl III) positive Korrelationen mit dem B-Gehalt. Ebenso sind die Li/Be-Verhältnisse in Amphibol und Plagioklas positiv mit dem Li-Gehalt korreliert. Dies weist darauf hin, dass B und Li mobil waren, Be sich aber immobil verhielt.



**Abb. 6-01.** Variationsdiagramme der Elementverhältnisse B/Li gegen B, B/Be gegen B und Li/Be gegen Li für Am IIIB und Am III. **A, B, C:** Proben der Einheit 1 sowie aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (LA39, LA41); **D, E, F:** Proben aus der Einheit 2.



**Abb. 6-02.** Variationsdiagramme der Elementverhältnisse B/Li gegen B, B/Be gegen B und Li/Be gegen Li für Pl III B und Pl III. **A, B, C:** Proben der Einheit 1 sowie aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck (LA39, LA41); **D, E, F:** Proben aus der Einheit 2.

#### 6.2.4. Die Verteilung der leichten Elemente Li, Be und B

Bei der Untersuchung der Elementverteilung wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass sich zwischen den Phasen eine Elementverteilungsgleichgewicht eingestellt hat. Um möglichen Störungen dieses Gleichgewichts zu vermeiden, wurden nur diejenigen Proben zur Berechnung der Verteilungskoeffizienten herangezogen, die eine textuelles Gleichgewichtsgefüge besitzen. Die Untersuchung der Elementverteilung von Li, Be und B beschränkt sich deshalb auf 14 vollständig oder nahezu vollständig amphibolitfaziell äquilibrierte Proben der Einheiten 1 und 2 sowie von der Burg Hohengeroldseck, die im Wesentlichen aus Amphibol und Plagioklas bestehen. Außerdem wurde an mehreren Amphiboliten anderer Orogene die Verteilung zwischen Amphibol und Plagioklas untersucht und mit den Ergebnissen der Schwarzwald-Amphibolite verglichen. Die Ergebnisse sind in Tab. 6-03 dargestellt.

Die Verteilung der Elemente Be und B zwischen Amphibol und Plagioklas zeigt nur unwesentliche Variationen und schwankt für Be zwischen 0.6 und 0.7 (Einheit 1), 0.5 und 0.9 (Einheit 2) sowie 0.7 und 0.8 (Burg Hohengeroldseck) (Tab. 6-03; Abb. 6-03). Die Proben ZEH-1 und BAI-2 der Einheit 1 sowie GÖ-2 der Einheit 2 zeigen außergewöhnlich niedrige Verteilungskoeffizienten für Be (0.2 und 0.3 bzw. 0.2). Die Verteilungskoeffizienten für Be in

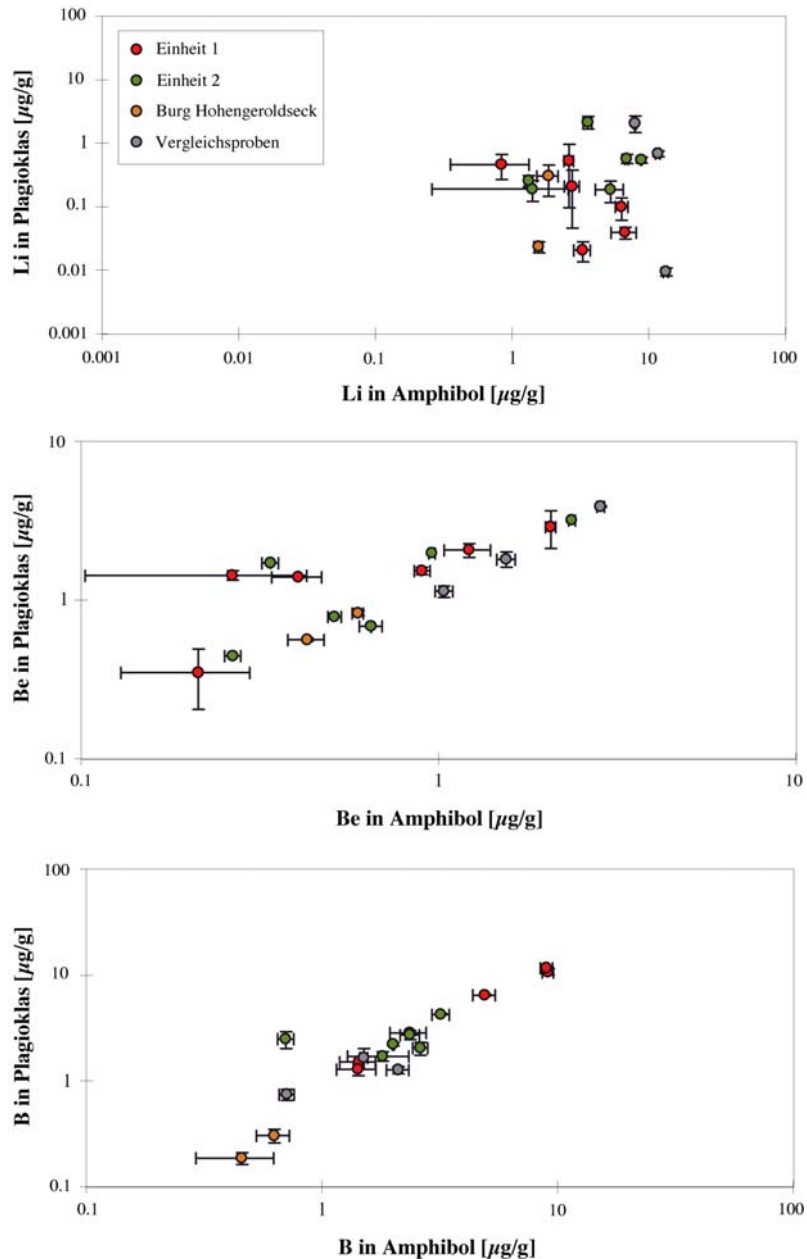
den Vergleichsproben liegen zwischen 0.7 und 0.9. Die Verteilung von B variiert ebenfalls und liegt zwischen 0.7 und 1.1 (Einheit 1), 0.8 und 1.3 (Einheit 2) sowie 2.1 und 2.5 (Burg Hohengeroldseck) (Tab. 6-03; Abb. 6-03). Die Probe GÖ-2 (Einheit 2) besitzt einen deutlich niedrigeren Verteilungskoeffizienten (0.3). Eine Betrachtung der relativen Fehler und der Zählrate für B in Amphibol und Plagioklas der Probe GÖ-2 zeigt, dass eine zunehmende B-Konzentration in Amphibol mit einer Zunahme der relativen Fehler korreliert ist (Abb. 6-04 A). Außerdem nimmt die Zählrate der B/Si-Verhältnisse in Amphibol und Plagioklas über den Zeitraum einer Analyse deutlich ab (Abb. 6-04 B, C). Dies sind Hinweise darauf, dass bei Probe GÖ-2 eine B-Kontamination stattgefunden hat. Die Vergleichsproben variieren in den B-Verteilungskoeffizienten etwas stärker (0.9 und 1.7).

**Tab. 6-03.** Verteilungskoeffizienten (D) für Li, Be und B zwischen Amphibol (Am IIIB, Am III) und Plagioklas (Pl IIIB, Pl III) der Schwarzwald-Amphibolite sowie zwischen Amphibol und Plagioklas aus Vergleichsproben anderer Orogene (Diskussion s. Text).

		$D_{Li}$	$D_{Be}$	$D_B$
<i>Proben aus der Einheit 1</i>				
SP-52	Am IIIB-Pl IIIB	182 ±77.8	0.6 ±0.08	1.0 ±0.1
OP-2	Am IIIB-Pl IIIB	171 ±61.7	0.7 ±0.2	0.9 ±0.1
ZEH-1	Am IIIB-Pl IIIB	7.2 ±5.5	0.2 ±0.1	0.8 ±0.2
EM-2	Am IIIB-Pl IIIB	2.6 ±2.8	0.6 ±0.2	1.1 ±0.3
FRNO-52	Am IIIB-Pl IIIB	75.6 ±40.7	0.6 ±0.1	0.8 ±0.1
BAI-2	Am IIIB-Pl IIIB	14.3 ±11.5	0.3 ±0.1	0.7 ±0.02
<i>Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck</i>				
LA-39	Am IIIB-Pl IIIB	7.3 ±3.3	0.8 ±0.7	2.5 ±0.9
LA-41	Am IIIB-Pl IIIB	68.9 ±15.6	0.7 ±0.03	2.1 ±0.5
<i>Proben aus der Einheit 2</i>				
GÖ-2	Am III-Pl III	12.4 ±2.2	0.2 ±0.02	0.3 ±0.1
GÖ-5	Am III-Pl III	8.8 ±8.6	0.7 ±0.06	1.1 ±0.3
TO-48	Am III-Pl III	16.1 ±1.7	0.7 ±0.01	0.9 ±0.2
TO-51	Am III-Pl III	29.2 ±4.3	0.5 ±0.03	0.9 ±0.02
LA-2	Am III-Pl III	1.7 ±0.4	0.6 ±0.03	0.8 ±0.1
SBL-6	Am III-Pl III	5.3 ±1.2	0.9 ±0.05	1.3 ±0.1
<i>Vergleichsproben anderer Orogene</i>				
8A-19	Am-Pl	4.2 ±1.8	0.7 ±0.02	1.0 ±0.1
Cat-1	Am-Pl	1429 ±213	0.9 ±0.1	1.7 ±0.2
Nax-1	Am-Pl	17.1 ±2.0	0.9 ±0.1	0.9 ±0.2

Probe 8A-19: Val Arbedo, Schweizer Alpen; Probe Nax-1: Naxos, Griechenland; Probe Cat-1: Catalina Island, USA. Die Ergebnisse sind mit einem relativen Fehler (1  $\sigma$ ) angegeben.

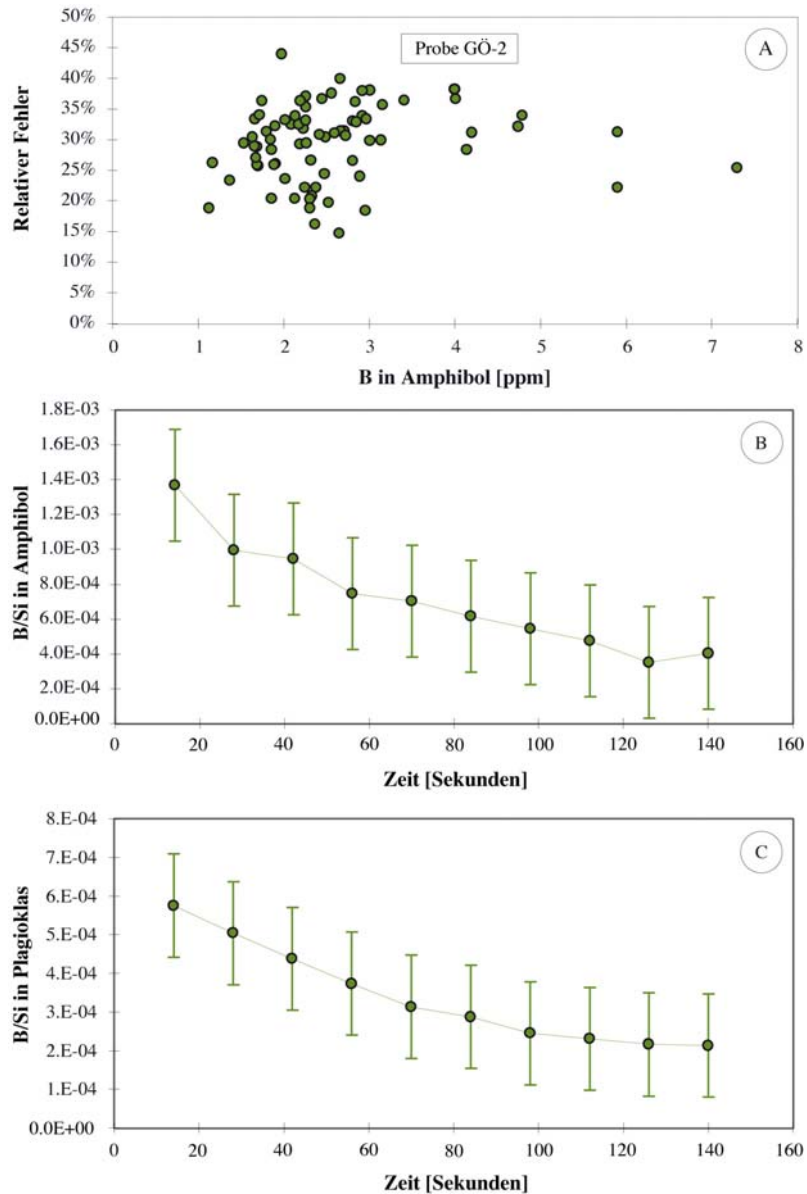
Die Verteilung von Li zwischen Amphibol und Plagioklas ist sehr variabel (Tab. 6-03; Abb. 6-03) und schwankt zwischen 2.6 und 182 (Proben der Einheit 1), 1.7 und 29.2 (Proben der Einheit 2) sowie 7.3 und 68.9 (Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck). Die Vergleichsproben weisen ebenfalls eine hohe Variationsbreite mit Werten von bis zu 1429 auf (Probe Cat-1).



**Abb. 6-03.** Die Verteilung der Elemente Li, Be und B zwischen Amphibol und Plagioklas in den Proben der Einheit 1 und 2 sowie aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck. Vor allem Be und B zeigen bei unterschiedlichen Konzentrationen eine homogene Verteilung, während die Verteilung für Li stark variiert. Ein ähnliches Bild zeigen die Vergleichsproben aus anderen Orogenen.

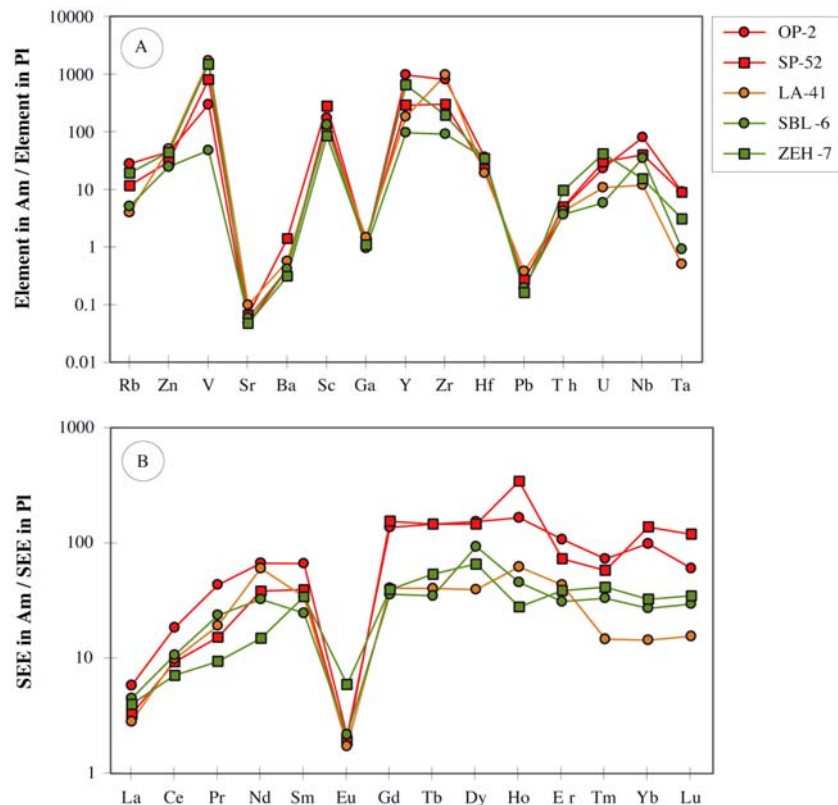
### 6.3. Die Verteilung anderer Spurenelemente

Mit Hilfe der LA-ICP-MS wurde an 2 Proben der Einheit 1 (SP-52, OP-2), 2 Probe der Einheit 2 (ZEH-7, SBL-6) und eine Probe aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck (LA-41) die Phasen Amphibol (Am III, Am IIIB) und Plagioklas (Pl III, Pl IIIB) analysiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-05 übersichtlich dargestellt.



**Abb. 6-04. A:** B-Konzentration und relativer Fehler der B-Analyse in Amphibol; **B,C:** Zählrate des B/Si-Verhältnisses im zeitlichen Verlauf einer Analyse der Probe GÖ-2. Die Zunahme der B-Konzentration bei gleichzeitiger Zunahme des relativen Fehlers sowie die Abnahme der Zählrate im Verlauf einer SIMS-Analyse geben Hinweise auf eine B-Kontamination der Probe.

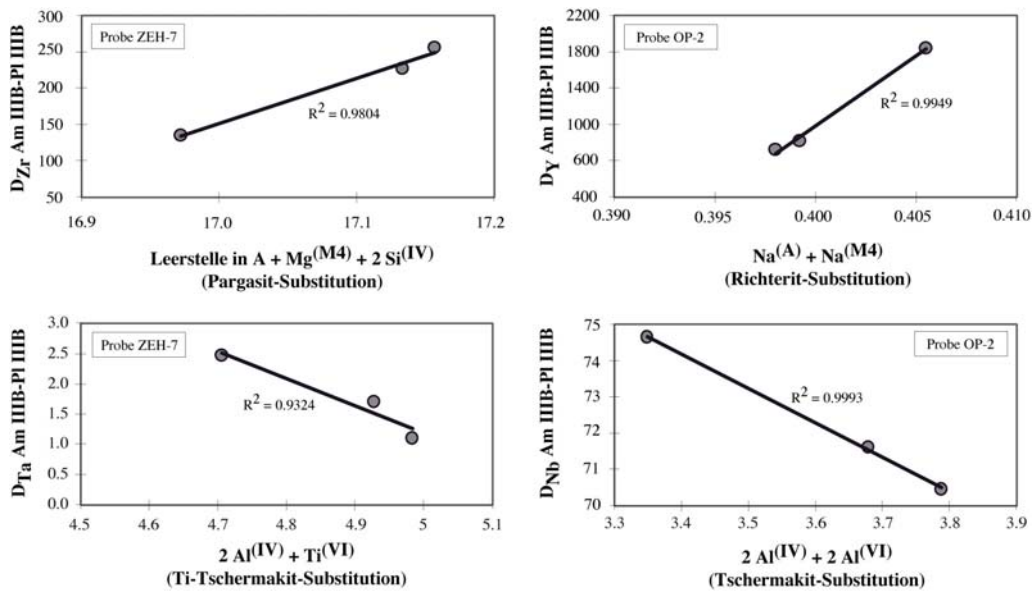
Vor allem die Verteilungskoeffizienten der Elemente Zn, Sr, Ba, Ga, Hf und Pb sowie eingeschränkt die der Elemente Sc und Th zeigen für alle Proben ähnliche Werte (Abb. 6-05 A). Die Verteilungskoeffizienten der schweren mittleren und schweren Seltenen Erden (Gd bis Lu) für die Proben der Einheit 1 zeigen ebenfalls annähernd konstante Werte. Ähnliches gilt für die Probe der Einheit 2, doch liegen die Werte deutlich unter denen der Einheit 1. Die Proben aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck liegen im Bereich der Einheit 2. Die leichten Seltenen Erden zeigen demgegenüber deutliche Variationen innerhalb der Einheiten sowie im Vergleich der Einheiten untereinander. Lediglich die Elemente La, Ce und Eu zeigen für alle Proben ähnliche Werte.



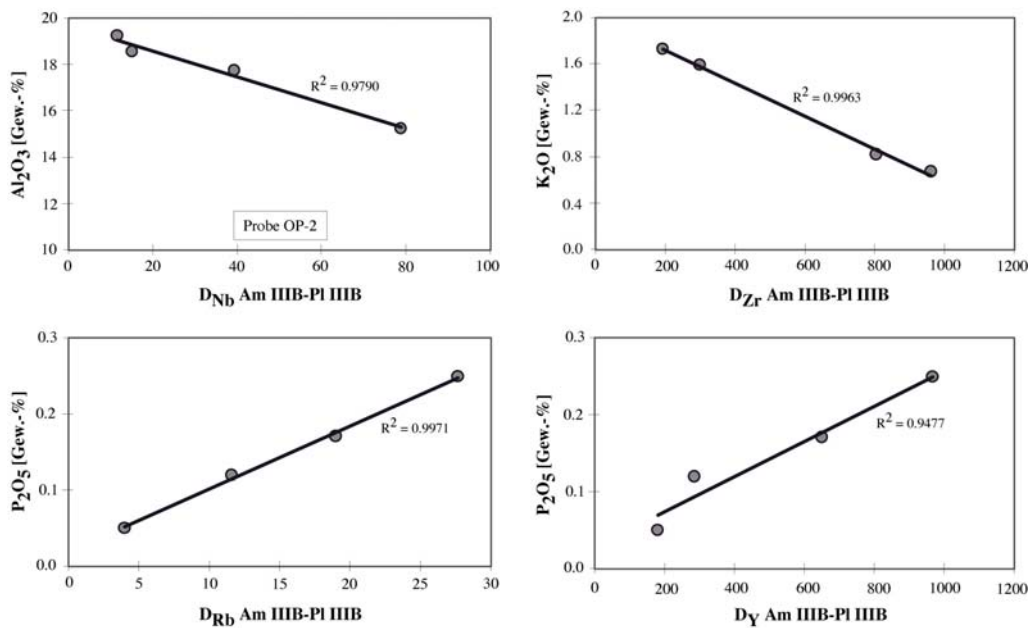
**Abb. 6-05.** Die Verteilung von Spurenelementen zwischen Amphibol und Plagioklas. **A:** Ausgewählte Spurenelemente von Rb bis Ta; **B:** Die Seltenen Erden (Diskussion s. Text).

Die berechneten Verteilungskoeffizienten der Elemente Rb, V, Y, Zr, Nb, Ta, U sowie die schweren mittleren und schweren Seltenen Erden Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb und Lu streuen stark (Abb. 6-05 B). Der Grund für die zum Teil erhebliche Variation der Verteilungskoeffizienten ist die Abhängigkeit der Elementverteilungskoeffizienten von der chemischen Zusammensetzung der Amphibole. So variieren die HFSE Zr, Nb, Ta und Y positiv oder negativ mit der Tschermakit ( $2\text{Si}^{(\text{IV})} + 2\text{Mg}^{(\text{VI})} = 2\text{Al}^{(\text{IV})} + 2\text{Al}^{(\text{VI})}$ )-, Ti-Tschermakit- ( $2\text{Si}^{(\text{IV})} + \text{Mg}^{(\text{VI})} = 2\text{Al}^{(\text{IV})} + \text{Ti}^{(\text{VI})}$ ), Richterit ( $\text{vac}^{(\text{A})} + \text{Ca}^{(\text{M}4)} = \text{Na}^{(\text{A})} + \text{Na}^{(\text{M}4)}$ )- und Pargasit ( $\text{vac}^{(\text{A})} + \text{Mg}^{(\text{VI})} + 2\text{Si}^{(\text{IV})} = \text{Na}^{(\text{A})} + \text{Al}^{(\text{VI})} + 2\text{Al}^{(\text{IV})}$ )-Substitutionsreaktion (Abb. 6-06). Darüber hinaus zeigen die Verteilungskoeffizienten der Elemente Zr, Nb und Y eine starke Abhängigkeit von der Gesamtgesteinschemie (Abb. 6-07). So ist in Probe OP-2 (Einheit 1) Nb negativ mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  korreliert. Gleichzeitig zeigt Nb eine negative Korrelation mit der Tschermakit-Komponente (Abb. 6-06). Zr korreliert negativ mit  $\text{K}_2\text{O}$  und positiv mit der Pargasit-Komponente, d.h., die Konzentration von Zr steigt mit abnehmendem  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalt. Außerdem korrelieren Rb und Y jeweils positiv mit  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Abb. 6-07). Die Co-Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten deutet darauf hin, dass sich die pauschale chemische Zusammensetzung der Gesteine deutlich in der Zusammensetzung der Amphibole

widerspiegelt und somit indirekt die Verteilungskoeffizienten zwischen Amphibol und Plagioklas beeinflusst.



**Abb. 6-06.** Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten von der chemischen Zusammensetzung der Amphibole. Die Elemente Zr, Nb, Ta, Y und Rb sind positiv oder negativ mit der Tschermakit-, Ti-Tschermakit-, Richterit- und Pargasit-Substitutionsreaktion korreliert.



**Abb. 6-07.** Die Verteilungskoeffizienten der Elemente Zr, Nb, Y und Rb in Probe OP-2 (Einheit 1) zeigen eine starke Abhängigkeit von der Gesamtgesteinschemie (Diskussion s. Text).

Darüber hinaus beeinflusst die chemische Zusammensetzung der Plagioklase die Verteilung der schweren mittleren und schweren Seltenen Erden. Die geringen Konzentrationen der jeweiligen Elemente im Plagioklas liegen unter oder knapp über der Nachweisgrenze der LA-ICP-MS (s. auch Tab. A-4.05 im Anhang). Dadurch kommt es bei



den Analysen zu erheblichen Variationen und die berechneten Verteilungskoeffizienten streuen stark.

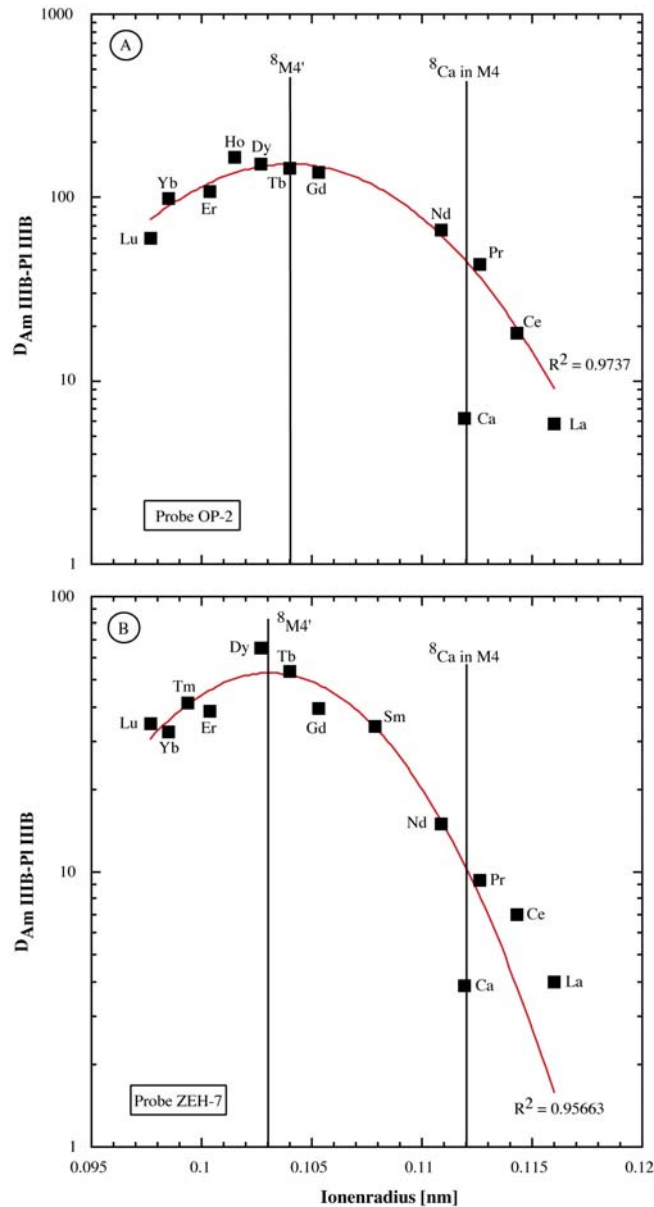
#### **6.4. Kristallchemische Überlegungen zur internen Datenkonsistenz**

Um zu überprüfen, ob die berechneten Verteilungskoeffizienten verlässliche Werte darstellen, wird im folgenden exemplarisch an den Seltenen Erden nach dem Modell von Onuma *et al.* (1968), Brice (1975) und Blundy & Wood (1994) die Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten vom Ionenradius untersucht. Grundlage des Modells sind die Beobachtungen von Onuma *et al.* (1968), wonach die Verteilungskoeffizienten für homovalente Elemente dann am höchsten sind, je ähnlicher sie dem Ionenradius des Hauptelementes sind, für das sie substituiert werden. Darüber hinaus zeigen die Verteilungskoeffizienten solcher Elemente eine parabolische Abhängigkeit. Dabei nehmen die Verteilungskoeffizienten der Elemente exponentiell ab, je weiter ihre Ionenradien vom optimalen Ionenradius des Gitterplatzes entfernt sind, in den sie eingebaut werden.

Die Ergebnisse für die Proben OP-2 und ZEH-7 sind in Abb. 6-08 dargestellt. Hier wurden die Verteilungskoeffizienten der Seltenen Erden gegen den Ionenradius bei achtfacher Koordination (Shannon 1976) aufgetragen. Dem modelltheoretischen Ansatz nach müssen die REE auf einer Parabel liegen, deren Scheitelpunkt dem optimalen Ionenradius des Gitterplatzes entspricht (z.B. Blundy & Wood 1994).

Die Mittelwerte der Verteilungskoeffizienten beider Proben zeigen eine deutliche parabolische Abhängigkeit. Die Scheitelpunkte der Parabeln liegen bei  $0.10401 \text{ nm} \pm 0.00039$  (OP-2) und  $0.10309 \text{ nm} \pm 0.00040$  (ZEH-7). Zusätzlich wurde der Verteilungskoeffizient für  $\text{Ca}^{2+}$  für achtfache Koordination aufgetragen. Interessanterweise stimmen der Scheitelpunkt und somit die Verteilungskoeffizienten der HREE nicht mit der Lage von Ca überein. Vielmehr liegt Ca im Bereich der LREE. Dies wurde bereits von Bottazzi *et al.* (1999) beschrieben. Sie postulieren die Existenz eines zusätzlichen achtfach koordinierten Gitterplatzes ( $\text{M4}'$ ) innerhalb der M4-Position, in den vornehmlich die HREE eingebaut werden. Sie berechnen für diesen Gitterplatz einen optimalen Ionenradius von  $0.103 \text{ nm}$ .

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen eine gute parabolische Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten der  $\text{REE}^{3+}$  und eine Übereinstimmung des Gitterplatzoptimums des Scheitelpunktes der Parabeln mit den Ergebnissen experimenteller Arbeiten. Sie weisen somit auf eine sehr gute Datenkonsistenz und Verlässlichkeit der gemessenen Verteilungskoeffizienten hin.



**Abb. 6-08.** Onuma-Diagramm der Seltenen Erden für die Proben OP-2 (A) und ZEH-7 (B). Beide Proben zeigen eine gute, den theoretischen Vorhersagen entsprechende, parabolische Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten vom Ionenradius. Das Gitterplatzoptimum liegt bei den HREE für OP-2 bei 0.104 nm und für ZEH-7 bei 0.103 nm. In Übereinstimmung mit experimentellen Arbeiten von Bottazzi *et al.* (1999) zeigen die Verteilungskoeffizienten für die REE eine sehr gute Datenkonsistenz.

### 6.5. Zusammenfassung und Diskussion

Aufgrund der Feinkörnigkeit konnten einige Phasen nicht innerhalb einer Probe gemessen werden (s.o.). Bezüglich der Systematik von Li, Be und B ist bei der Interpretation deshalb Vorsicht angebracht. Mit dieser Einschränkung lässt sich zusammenfassend für die leichten Elemente Li, Be und B folgende Systematik für die Stadien I bis IV ableiten:

*Lithium:*

Stadium I: Cpx I  $\gg$  Grt I

Stadium II: Cpx I/II > Cpx IIb >> Grt II

Stadium III: Bi III > Bi IIIB >> Am IIIAb > Cpx III > Am III ≥ Am IIIB > Pl IIIAb > Pl III > Pl IIIB

Stadium IV: Chl IV/am >> Chl IV/bi >> Src IV > Prh IV > Am IVa

*Beryllium:*

Stadium I: Cpx I >> Grt I

Stadium II: Cpx I/II > Cpx IIb >> Grt II

Stadium III: Pl IIIB > Pl IIIAb ~ Am IIIB ≥ Am III ~ Am IIIAb ~ Pl III > Bi IIIB ≥ Cpx III ~ Bi III

Stadium IV: Prh IV > Src IV ~ Am IVa > Chl IV/bi > Chl IV/am

*Bor:*

Stadium I: Cpx I > Grt I

Stadium II: Cpx I/II > Cpx IIb ~ Grt II

Stadium III: Bi III > Bi IIIB ~ Pl IIIB ≥ Am IIIB > Am IIIAb ~ Am III ~ Pl III ~ Cpx III > Pl IIIAb

Stadium IV: Src IV >> Prh IV >> Chl IV/bi > Chl IV/am > Am IVa

Die Ergebnisse der Elementverteilung liefern deutliche Hinweise auf ein chemisches Gleichgewicht, das sich während der Hochtemperaturmetamorphose zwischen den Phasen eingestellt hat. Dieser Interpretation liegen folgende Beobachtungen zu Grunde:

- (a) Die mittels des Thermometers nach Holland & Blundy (1994) ermittelten Temperaturen für die Kern- und Randzusammensetzungen der Amphibole und der koexistierenden Plagioklase liefern homogenen Werte (Kapitel 5). Die Schwankungen zwischen Kern- und Randtemperaturen liegen alle innerhalb der Fehler. Thermometrische Untersuchungen von Kalt *et al.* (1994a) und Hanel *et al.* (1993) an Gesteinen der Einheit 1 des CSGC unterstützen diese Ergebnisse.
- (b) Die Ermittlung von Elementverteilungskoeffizienten zwischen den Phasen Am III–Pl III und Am IIIB–Pl IIIB liefern für eine Reihe von Elementen Werte, die zwar innerhalb gewisser Grenzen variieren, aber eine für natürliche Proben systematische Verteilung anzeigen. Allerdings kann für eine ganze Reihe von Elementen keine systematische Verteilung ermittelt werden. Der Gründe hierfür liegen in
  - (1) der Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten von der chemischen Zusammensetzung der Amphibole;

- (2) der (indirekten) Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten von der chemischen Zusammensetzung der Proben;
  - (3) den Elementkonzentrationen von Ni, Cu, Y, Zr, Nb, Th, U sowie die schweren mittleren und schweren Seltenen Erden im Plagioklas. Diese liegen unter oder nur knapp über der Nachweisgrenze der LA-ICP-MS (s. Tab. A-5.05 und das Kapitel Analytik im Anhang).
- (c) Die Verteilungskoeffizienten verhalten sich exakt den theoretischen Vorhersagen nach den Modellen von Blundy & Wood (1994) und Bottazzi *et al.* (1999) entsprechend und liefern somit Hinweise auf eine sehr gute interne Datenkonsistenz.
- (d) Die Proben besitzen ein blastisches Gefüge und die Phasen Amphibol, Plagioklas und Biotit zeigen grundsätzlich gerade Korngrenzen (s. auch Kapitel 3). Sie stehen in keiner Reaktionsbeziehung zueinander. Dies weist auf ein textuelles Gleichgewicht hin.

---

## ***7. Die chemische Zusammensetzung der Metabasite***

### ***7.1. Verwendete analytische Methoden***

Insgesamt wurden 52 Metabasit-Proben auf ihre Gesamtgesteinszusammensetzungen untersucht (Tabelle A-7.01 im Anhang). Die Hauptelementoxide  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (= Gesamteisen als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  sowie die Spurenelemente Rb, Ba, Th, Nb, Sr, Pb, Zr, Y, Ga, Cr, Ni, Co, Cu, Zn und V wurden mittels RFA gemessen. Darüber hinaus wurden zusätzlich an jeweils 19 ausgewählten Proben der Einheiten 1 und 2 sowie an 3 Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck (Blatt Lahr/Ost), die möglicherweise der Einheit 3 zuzurechnen sind, die Elemente Cs, Ta, Hf, U und die Seltenen Erden mittels ICP-MS aus der Lösung gemessen. An 4 Proben wurden die Elemente Li, Be und B aus Glasperlen durch LA-ICP-MS analysiert. Wie üblich, sind die Oxide der Hauptelemente in Gew.-%, alle Spurenelemente in  $\mu\text{g/g}$  angegeben. Der Anteil von FeO am Gesamteisen aus der RFA-Analyse ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) wurde mittels Titration bestimmt. Die  $\text{H}_2\text{O}$ - und  $\text{CO}_2$ -Gehalte wurden durch Infrarot-Spektroskopie ermittelt.

### ***7.2. Chemische Zusammensetzung der Gesteine***

Gesamtgesteinsanalysen von Metabasiten können Hinweise zum Charakter des magmatischen Eduktgesteins und eventuell auch zum tektonischen Bildungsmilieu liefern, sofern nicht während der metamorphen Prozesse bedeutende stoffliche Änderungen stattfanden und die ursprünglichen chemischen Signaturen überschrieben bzw. ausgelöscht wurden. Selbst wenn diese Voraussetzung erfüllt ist, kommt jedoch noch erschwerend hinzu, dass die magmatischen Gefüge der Gesteine während der Metamorphose meist weitgehend oder völlig ausgelöscht wurden. Dies hat zur Folge, dass man eine eventuelle magmatische Kristallfraktionierung, vor allem aber eine Kristallakkumulation, nicht mehr unmittelbar erkennen kann. Somit ist es nicht mehr so leicht möglich, sogenannte „liquid lines of descent“ zu detektieren. Da jedes Teilvolumen einer Magmakammer, eines Ganges oder eines Lavastromes ein offenes System darstellt, dem Kristalle in oft komplexer Weise entzogen oder zugefügt werden können, ist es bereits bei der Analyse magmatischer Gesteinssysteme erforderlich, die Gefüge und die Zusammensetzung der Phänokristalle zur Interpretation der chemischen Gesamtgesteinszusammensetzungen heranzuziehen. Somit ist klar, dass eine

Interpretation der chemischen Zusammensetzung von Metabasiten ohne die hilfreichen Hinweise aus den magmatischen Gefügen nicht immer zweifelsfrei möglich sein wird.

Betrachtet man nun die in Tabelle A-7.01 dargestellten Analysen der untersuchten Metabasite, so fällt auf, dass einige Analysen durch sehr geringe  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalte von (deutlich) weniger als 2.2 Gew.-% charakterisiert sind. Aus der Einheit 1 sind dies die Proben ZEH-1, TO-68, SP-52, SP-56B, EM-3B, FRSO-2, FRNO-50, HA-6, FE-12A und ZEH-3; aus der Einheit 2 weisen die Proben ZEH-7, EL-4, LA-1 und LA-2, und aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck die Proben LA-36 und LA-39 zu geringe  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalte auf. Weiterhin fällt auf, dass die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalte einiger Proben außerhalb des für basische bis intermediäre Schmelzzusammensetzungen geltenden Intervalls von ca. 15-19 Gew.-% liegen (SP-56B, EM-3B, OP-4, FRSO-2, FRSO-3, FRNO-50, HA-6, HO-8, OP-8, HO-6, HO-7). Bei manchen Proben liegen die CaO-Gehalte deutlich über 12 Gew.-%, während der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt eher niedrig ist (z.B. LA-1, LA-38, OP-8, SP-50A). Während die meisten Proben durch relativ geringe Gehalte an  $\text{TiO}_2$  (< 1.5 Gew.-%) und  $\text{P}_2\text{O}_5$  (< 0.2 Gew.-%) charakterisiert sind, was Alkaligesteine als Edukte ausschließt, weisen die Proben ZEH-3 und ZEH-5 extrem hohe  $\text{TiO}_2$ -Gehalte (> 3.5 Gew.-%) bei gleichzeitig extrem niedrigen  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalten (< 0.07 Gew.-%) auf. Auffällig ist weiterhin, dass viele Proben niedrige  $\text{SiO}_2$ -Gehalte (< 49 Gew.-%) aufweisen, was eigentlich für Alkaligesteine charakteristisch ist, die jedoch als Edukt wegen der geringen  $\text{TiO}_2$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalte nicht in Frage kommen. Problematisch ist auch die Kombination sehr geringer  $\text{SiO}_2$ -Gehalte mit geringen Mg-Zahlen ( $\text{Mg}\#$ ), wie sie z.B. bei den Proben SP-52, SP-56B und ZEH-3 zu beobachten sind. Bereits aus diesen wenigen Feststellungen wird klar, dass viele der untersuchten Proben bedeutende postmagmatische Stoffveränderungen erfahren haben und/oder, dass es sich um ehemalige Magmatite mit akkumulierten Phänokristen handelt. Weiterhin ist natürlich auch denkbar, dass sich die Magmazusammensetzungen in unsystematischer Weise durch Assimilationsvorgänge verändert haben.

Die oben erwähnten Auffälligkeiten in der Hauptelementzusammensetzung einiger Proben wurden bei der Auswahl der Proben, die mittels ICP-MS auf ihre Spurenelementzusammensetzung hin untersucht wurden, berücksichtigt.

An möglichen postmagmatischen Stoffverschiebungen sind folgende Prozesse in Betracht zu ziehen:

- Sofern es sich um ehemalige MOR-Basalte (**M**id **O**cean **R**idge) handelt, könnten sie im Bereich hydrothermalen Konvektionszellen in der jungen ozeanischen Kruste chemisch verändert worden sein. Im Meerwasser-Abwärtsstrom verlieren die Gesteine

Ca und werden andererseits reicher an Na, Si und Mg; im lokalisierten heißen Aufwärtsstrom bilden sich in solchen Konvektionszellen oft epidot-, also Ca-reiche Gesteine, deren Pauschalzusammensetzung eigentlich nicht mehr als basaltisch bezeichnet werden kann. Weiterhin kommt es durch submarine Verwitterung zu einer Anreicherung von K, Rb, Ba und U in der basaltischen Kruste (z.B. Hart & Staudigel, 1982; Seyfried *et al.* 1984; Alt *et al.* 1986; Staudigel *et al.* 1995, 1996).

- Bei der mit der Eklogitbildung während der Subduktion verbundenen Dehydratation können zahlreiche fluidmobile Elemente abgeführt werden, vor allem K, Rb, Ba, U und Pb (Becker *et al.* 2000).
- Die mit der Rehydratation von Eklogiten in der kontinentalen Kruste einhergehenden metasomatischen Veränderungen lassen sich nur schwer abschätzen. Prinzipiell muss aber damit gerechnet werden, dass auch hierbei zusätzliche, in wässrigen Fluidphasen mobile Elemente, also wiederum Alkalien, Ba, Pb, U, Zn, etc. in die Metabasite zugeführt worden sind.

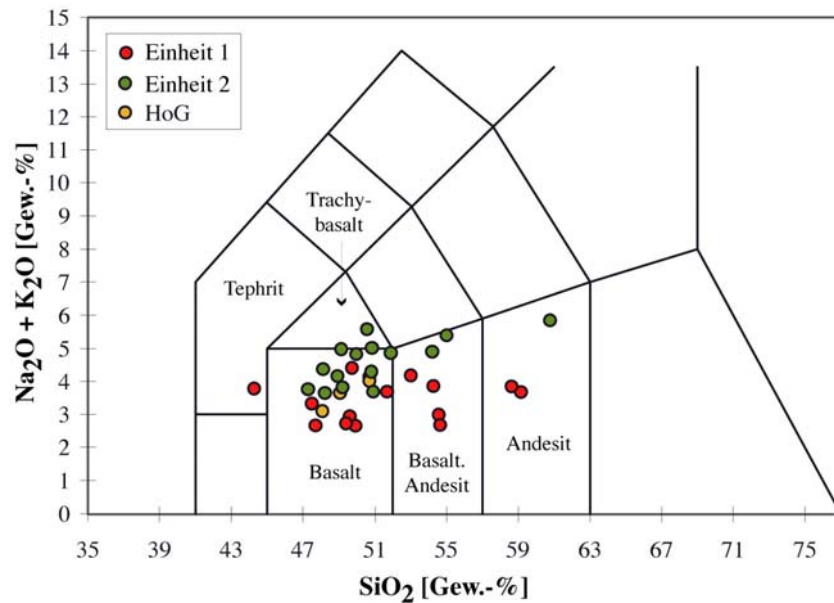
Abschließend muss festgestellt werden, dass bei der weitergehenden Interpretation der Gesamtgesteinsanalysen im Hinblick auf mögliche Eduktgesteine und mögliche metasomatische Prozesse äußerste Zurückhaltung angebracht ist.

### ***7.3. Vergleich der Metabasite aus den verschiedenen Einheiten***

In Tabelle A-7.01 sind für die Metabasite aus den drei tektonischen Einheiten (sensu Kalt *et al.* 2000a) die Mittelwerte und Standardabweichungen der analysierten chemischen Komponenten aufgeführt. Es zeigt sich, dass es keine signifikanten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Metabasite aus den drei Einheiten gibt. Lediglich im TAS-Diagramm (Total Alkali vs Silica; z.B. Le Bas *et al.* 1986) deutet sich an, dass die Amphibolite der Einheit 2 tendenziell höhere Alkali-Gehalte besitzen als die der Einheit 1 (Abb. 7-01). Ob dies mit Verlusten an Alkalien während der eklogitfaziellen Metamorphose der Metabasite aus Einheit 1 zusammenhängt, sei dahingestellt. Weitere systematische Unterschiede konnten nicht gefunden werden.

Um eine genauere chemische Charakterisierung der Amphibolite durchführen zu können, werden im Folgenden die Seltenen Erden La bis Lu in chondritnormierten „Spidergrams“ (Thompson *et al.* 1983) dargestellt. Unter Verwendung weiterer Elemente erfolgt die Darstellung in den auf Primitiven Mantel normierten „Coryell-Masuda-Diagrammen“ (Coryell *et al.* 1963; Hofmann *et al.* 1986) (Abb. 7-02 und Abb. 7-03). Dabei werden die

Elemente in der Reihenfolge nach Sun & McDonough (1989) aufgetragen. Die Inkompatibilität der Elemente nimmt dabei von rechts nach links zu und bezieht sich auf den Fraktionierungsprozess während der Bildung ozeanischer Basalte wie MORB und OIB (Sun & McDonough, 1989). Die Normierungswerte für den CI-Chondrit stammen von McDonough & Sun (1995) und für den Primitiven Mantel für alle dargestellten Elemente außer Phosphor von Hofmann *et al.* (1988). Die Werte für P stammen von Sun & McDonough (1989).

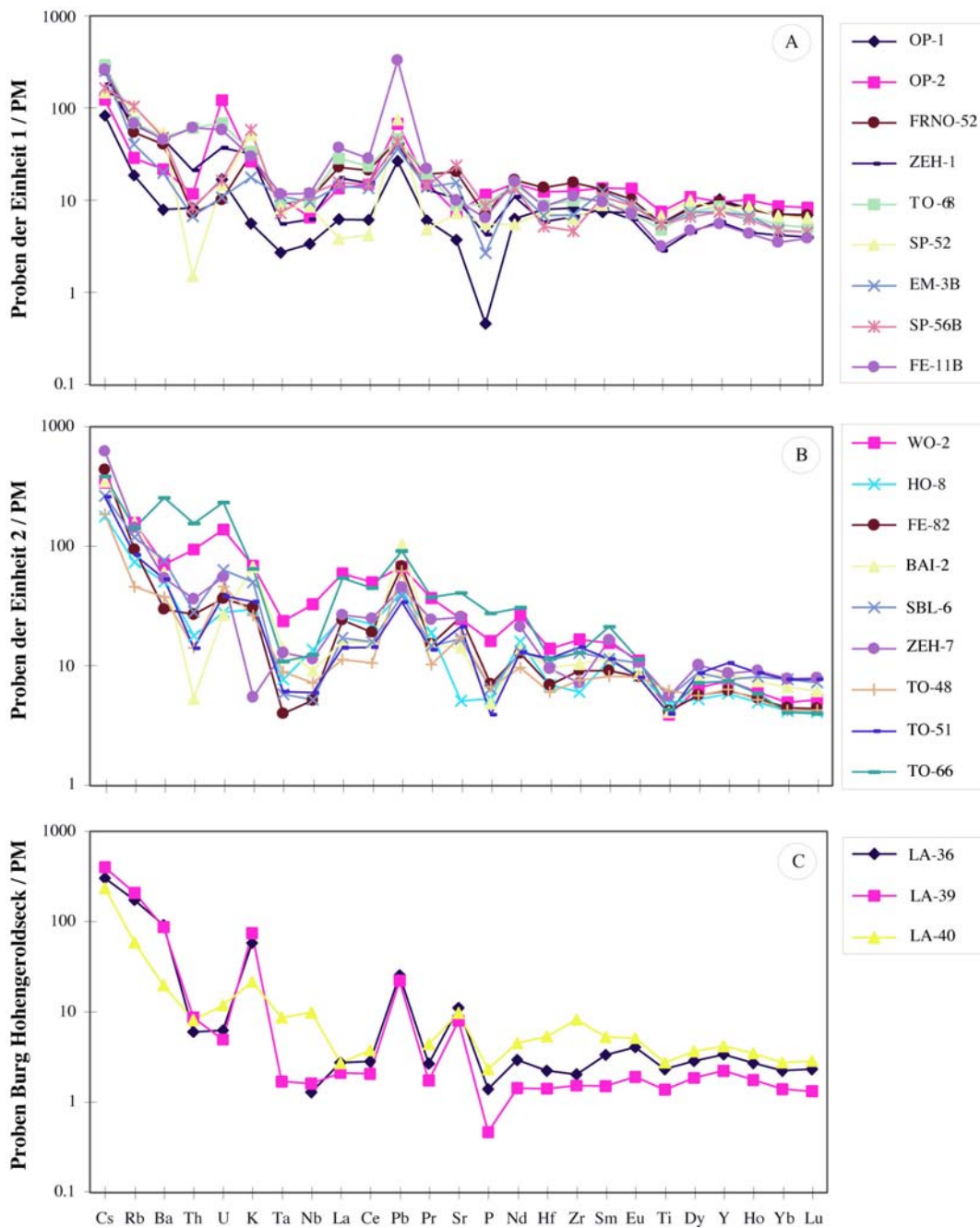


**Abb. 7-01.** TAS-Diagramm (Total Alkali Silica; z.B. Le Bas *et al.* 1986) für die untersuchten Metabasite. Die Proben aus der Einheit 2 zeigen tendenziell höhere Alkali-Gehalte als die aus der Einheit 1.

Wesentliche Merkmale der Amphibolite aus den Einheiten 1 und 2 sind deutlich ausgeprägte negative Anomalien der Elemente Nb, Ta und Ti, weniger deutlich auch Zr und Hf, gegenüber den leichten Seltenen Erden und den LIL-Elementen Cs, Rb, Ba und K (Abb. 7-02). Somit sind die stark inkompatiblen Elemente Cs, Rb, Ba, K sowie die leichten Seltenen Erden La und Ce gegenüber den **High-Field-Strength-Elementen** (HFSE) und den schweren Seltenen Erden stark angereichert. Außerdem weisen fast alle Proben eine deutlich negative P-Anomalie auf. Dies sind typische Charakteristika kalkalkalischer Gesteine, wie sie auch in anderen Orogenen bereits beschrieben wurden (z.B. Tatsumi *et al.* 1986, 1989; Hofmann 1988; Sorensen & Grossman 1989; Sun & McDonough 1989; Miller *et al.* 1994; Brenan *et al.* 1995; Plank & Langmuir 1998; Ayers 1998; Becker *et al.* 1999; Johnson & Plank 1999; Prouteau *et al.* 2001). Ein weiteres Indiz für die kalkalkalische Natur der magmatischen Protolithe der Amphibolite ist eine positive Pb-Anomalie. Da sich Pb während Alterationsprozessen sehr mobil verhalten kann (z.B. Staudigel *et al.* 1995; Becker *et al.*



2000) und postmagmatische Einflüsse bei den untersuchten Proben nicht ausgeschlossen werden können, könnte diese Anomalie jedoch auch sekundär entstanden sein.



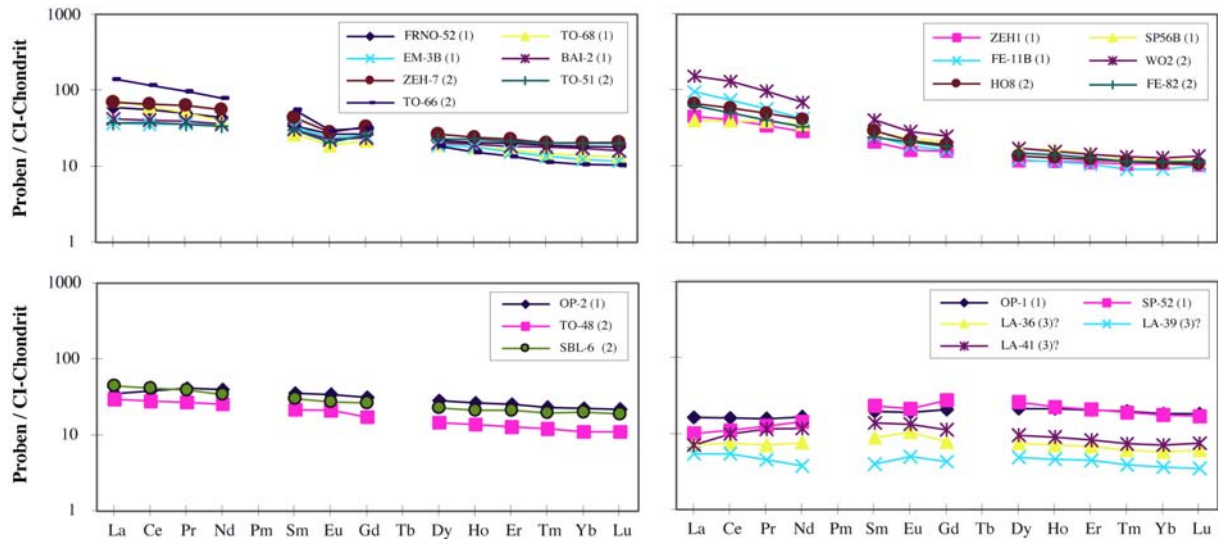
**Abb. 7-02.** Coryell-Masuda-Diagramme normiert auf den Primitiven Mantel (Hofmann *et al.* 1988) für die Proben aus den Einheiten 1 (A), 2 (B) und aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck (C). Während die meisten Proben aus Einheit 1 und 2 ähnliche Muster besitzen, zeigen die Proben OP-1 und SP-52 sowie alle Gesteine aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck ihrerseits ähnliche Muster, die sich von denen der Einheiten 1 und 2 deutlich unterscheiden (Diskussion sh. Text).

Die chondritnormierten Muster der Seltenen Erden zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Proben der verschiedenen Einheiten sowie innerhalb der Einheiten selbst (Abb. 7-03). Die Proben FRNO-52, BAI-2 und TO-68 der Einheit 1 sowie ZEH-7, TO-51B und TO-

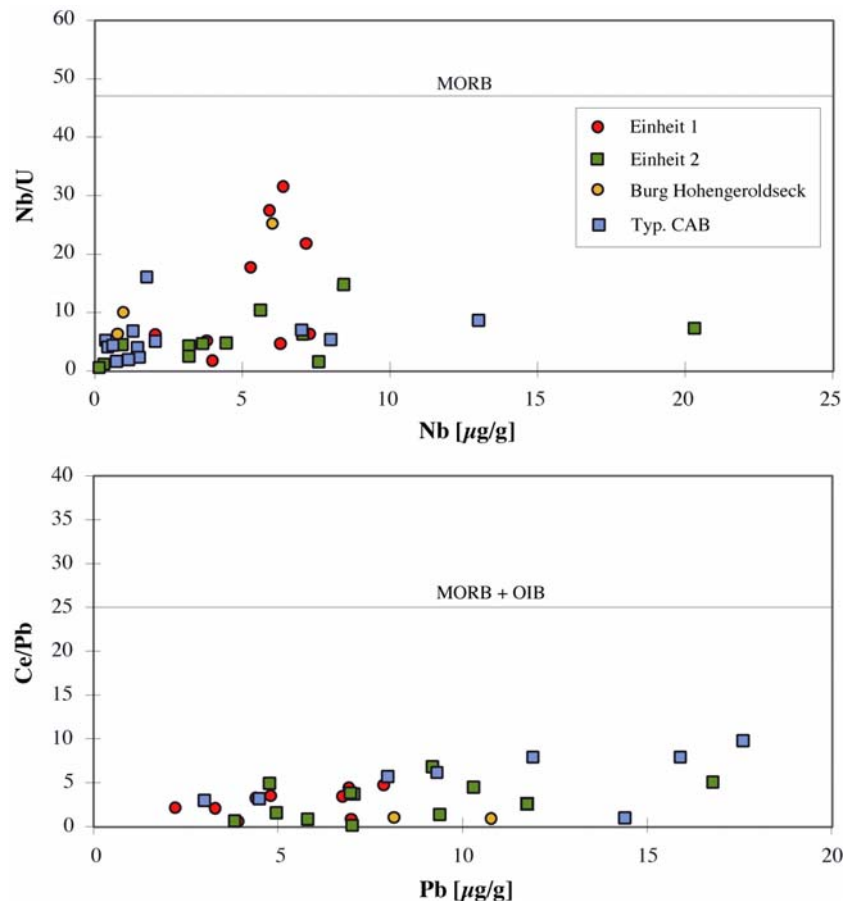
66 der Einheit 2 besitzen positive Eu-Anomalien (Abb. 7-03 A), wohingegen die Proben ZEH-1, FE-11B und SP-56B der Einheit 1 sowie HO-8, WO-2 und FE-82 der Einheit 2 keine Eu-Anomalie besitzen und tendenziell eine stärkere Fraktionierung der leichten über die schweren Seltenen Erden [(La/Yb)<sub>cn</sub> = 3.3-12.0 gegenüber (La/Yb)<sub>cn</sub> = 1.8-13.5] zeigen (Abb. 7-03 B). Vergleichsweise flache Seltene-Erden-Muster [(La/Yb)<sub>cn</sub> = 1.6-2.7] besitzen die Proben OP-2 der Einheit 1 sowie TO-48A und SBL-6A der Einheit 2. Die Probe TO-48A zeigt außerdem eine schwache positive Eu-Anomalie. Die Seltene-Erden-Muster, wie sie in Abb. 7-03 A, B und C für die Einheiten 1 und 2 beschrieben wurden, sind mit einer moderaten bis starken Anreicherung der leichten über die schweren Seltenen Erden typisch für kalkalkalische Gesteine (z.B. Wilson 1989; Altenberger *et al.* 2001; Cruciani *et al.* 2002). Völlig andere Seltene-Erden-Muster zeigen die Proben OP-1 und SP-52 der Einheit 1 sowie alle Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck (Abb. 7-03 D). Die Seltene-Erden-Muster zeigen eine deutliche Verflachung bzw. Abnahme bei den leichten und leichten mittleren Seltenen Erden [(La/Yb)<sub>cn</sub> = 0.6-1.5]. Die Proben LA-36, LA-39 und LA-41 besitzen außerdem eine positive Eu-Anomalie, während Probe SP-52 eine negative Eu-Anomalie zeigt. Die Interpretation dieser Seltene-Erden-Muster ist schwierig. Die Verflachung der Seltene-Erden-Muster sowie die Abnahme der leichten und leichten mittleren Seltenen Erden könnten auf ehemalige Kumulate hinweisen. Hierfür würden auch die hohen Mg-Zahlen der Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck sprechen (Tab. A-7.01). Jedoch ist auch ein MORB-ähnlicher Charakter der Gesteine denkbar. Da die Proben während der amphibolitfaziellen Überprägung rehydratisiert wurden (sh. Kapitel 3), ist bei einer weiterführenden Interpretation solcher Seltene-Erden-Muster Vorsicht geboten.

Ein weiterer Hinweis auf die kalkalkalische Natur der Schwarzwald-Amphibolite liefern die Nb/U- und Ce/Pb-Verhältnisse. Sie liegen bei  $13.5 \pm 11.2$  und  $2.7 \pm 1.5$  (Einheit 1),  $5.2 \pm 4.0$  und  $3.0 \pm 2.1$  (Einheit 2) sowie  $13.8 \pm 10.0$  und  $0.9 \pm 0.1$  (Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck) (Abb. 7-04). Die Werte beider Verhältnisse sind somit deutlich niedriger als die ozeanischer Basalte (MORB, OIB) ( $Nb/U \approx 47 \pm 10$  und  $Ce/Pb \approx 25 \pm 5$ ) (z.B. Hofmann *et al.* 1986; Hofmann 1986, 1997; Stolz *et al.* 1996; Chauvel *et al.* 1995) und liegen, ausgenommen den Ce/Pb-Verhältnissen der Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck, im Bereich der kontinentalen Kruste ( $Nb/U \approx 10$  und  $Ce/Pb \approx 4$ ) (Hofmann *et al.* 1986, Hofmann 1986). Darüber hinaus stimmen die Werte mit Daten typischer IAB (Island Arc Basalt; z.B. McCulloch *et al.* 1991) und CAB kontinentaler Inselbögen (Calcalkaline Basalt; z.B. Reiners *et al.* 2000) überein (Abb. 7-04). Jedoch sind die Elemente Pb und U bei Alterationsprozessen sehr mobil (z.B. Staudigel *et al.* 1995; Becker *et al.* 2000).

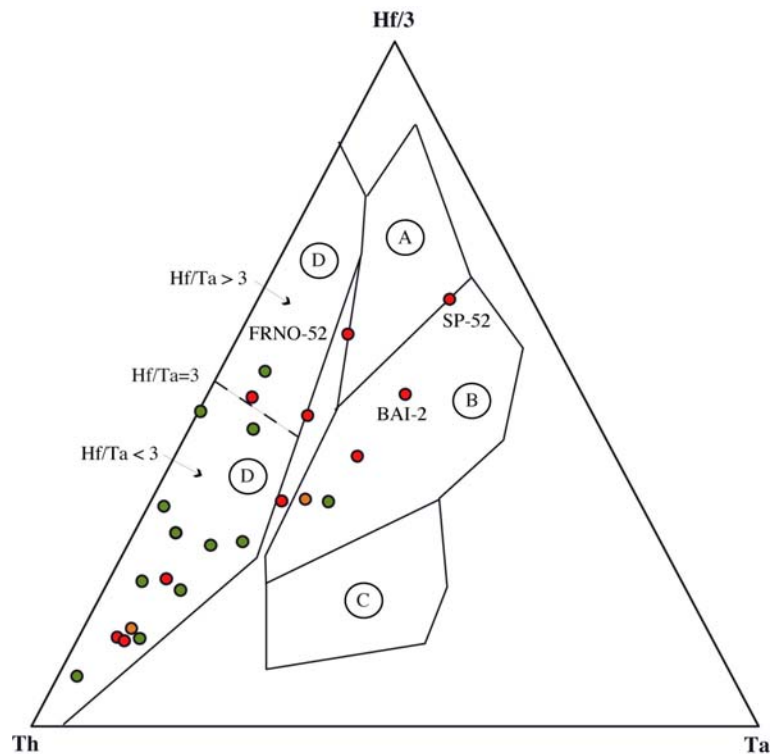
## 7. Die chemische Zusammensetzung der Gesteine



**Abb. 7-03.** „Spidergrams“ normiert auf CI-Chondrit. **(A):** Proben der Einheit 1 und 2 mit deutlich ausgebildeter negativer Eu-Anomalie; **(B):** Probe der Einheit 1 und 2 ohne Eu-Anomalie; **(C):** Proben der Einheit 1 und 2 mit schwach positiver Eu-Anomalie; **(D):** Zwei Proben der Einheit 1 (OP-1 und SP-52) sowie alle Proben aus dem Gebiet der Burg Hohengeroldseck zeigen im Vergleich zu den anderen Proben deutlich andere Seltene-Erden-Muster (Diskussion sh. Text).



**Abb. 7-04.** Diagramme für Nb/U vs. Nb und Ce/Pb vs. Ce. Die Nb/U- und Ce/Pb-Verhältnisse schwanken stark, liegen aber deutlich unter den Werten für ozeanische Basalte. Die Proben SP-56B (Einheit 1) und HO-8 (Einheit 2) besitzen deutlich erhöhte Nb/Ta-Verhältnisse.



**Abb. 7-05.** Hf/3-Th-Ta-Diagramm nach Wood (1980). Viele Amphibolite besitzen Hf/Ta-Verhältnisse  $< 3$  und kommen deshalb im unteren Teil des Feldes D zu liegen (kontinentale Inselbögen).

Es ist also auch denkbar, dass die Nb/U- und Ce/Pb-Verhältnisse metamorphen Ursprungs sind. Hiervon unberührt bleiben die niedrigen Nb-Gehalte der meisten Proben. Sie liefern klare Hinweise auf einen kalkalkalischen Charakter der Gesteine (z.B. Kelemen *et al.* 1993; Rudnick *et al.* 1999).

Neben der Interpretation der geochemischen Signaturen und der Elementverhältnisse bietet vor allem das Diagramm nach Wood (1980) ein adäquates Mittel, um die geotektonische Position von Metabasiten mit Hilfe der Elemente Th, Ta und Hf einzugrenzen (Abb. 7-05). Diese Elemente gelten als weitestgehend immobil bei metasomatischen und metamorphen Prozessen (z.B. Pearce *et al.* 1983).

Zunächst fällt auf, dass die meisten Proben ins Feld D (Basalte destruktiver Plattengrenzen) fallen. Eine Trennungslinie ( $Hf/Ta = 3$ ) unterteilt Feld D in Basalte mit kalkalkalischer Affinität ( $Hf/Ta < 3$ ; kontinentale Inselbögen) von Basalten mit tholeiitischer Affinität ( $Hf/Ta > 3$ ; ozeanische Inselbögen) (Wood 1980). Die meisten der untersuchten Amphibolite aller Einheiten zeigen dabei die Charakteristika von Vulkaniten kontinentaler Inselbögen mit  $Hf/Ta$ -Verhältnissen  $< 3$ . Jedoch lassen einige Proben einen deutlichen Trend zu höheren Verhältnissen erkennen (vor allem die Proben SP-52, BAI-2 und FRNO-52 der Einheit 1). Die Nb/Ta- und Zr/Hf-Verhältnisse dieser Proben liegen bei 18,6, 11,5 sowie 20,1 und 30,4, 45,8

sowie 41.1 und entsprechen damit geochemischen Reservoirs wie MORB (Zr/Hf ~ 36.1, Nb/Ta ~ 17.7) und PM (Zr/Hf ~ 36.3, Nb/Ta ~ 17.6) (z.B. Sun & McDonough 1989; Hofmann 1988). Staudigel *et al.* (1995) weisen in ihrer Arbeit darauf hin, dass sich Th mobil verhalten kann und durch den Prozess der hydrothermalen Alteration (basaltischer) ozeanischer Kruste abgereichert werden kann. Th-Mobilität könnte deshalb für den auffälligen Trend vom Th-Apex in Richtung der Felder A (N-MORB) und B (E-MORB) verantwortlich sein. Mit dieser Einschränkung lässt sich aus Abb. 7-05 eine kalkalkalische Tendenz der untersuchten Schwarzwald-Amphibolite ableiten. Die Hf/Ta-Verhältnisse ( $< 3$ ) sind dabei vor allem für die Proben aus der Einheit 2 typisch für kontinentale Inselbögen.



---

## 8. Schlussfolgerungen

Auf Grund der in dieser Studie ermittelten Daten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die chemische Pauschalzusammensetzung der Metabasite (Haupt- und Spurenelemente) lieferte Hinweise auf das geodynamische Bildungsmilieu ihrer magmatischen Edukte. Anhand weitgehend immobiler Elemente (HFSE, REE) konnte für die meisten Amphibolite eine kalkalkalische Natur ihrer Protolithe nachgewiesen werden. Einige Proben besitzen chemische Signaturen wie sie für Basalte kontinentaler magmatischer Bögen typisch sind. Die Analyse der Hauptelemente zeigte außerdem deutlich, dass einige Amphibolitkörper bedeutende postmagmatische Stoffverschiebungen (Hauptelemente und mobile Spurenelemente) erfahren haben und/oder dass es sich um ehemalige Magmatite mit akkumulierten Phänokristen handelt oder dass die Magmenzusammensetzungen unsystematisch durch Assimilationsvorgänge verändert wurden.

Aus dem Mineralbestand und Gefüge der Metabasite konnte ihre metamorphe Entwicklung rekonstruiert werden. Während die Amphibolite aus der Einheit 2 keine Relikte früherer magmatischer oder metamorpher Stadien erkennen lassen, weisen viele Metabasite der Einheit 1 deutliche Zeichen einer polymetamorphen Entwicklung auf. Reliktische Mineralphasen wie Granat, Omphazit, Disthen und Rutil belegen ein eklogitfazielles Stadium. Weit verbreitete Reaktionskoronen aus Orthopyroxen und Plagioklas zwischen Granat und Quarz dokumentieren, dass die Gesteine während ihrer Exhumierung granulitfazielle Bedingungen erlebt haben. Problematisch bleibt in diesem Zusammenhang die Zuordnung von Metabasiten aus der Umgebung der Burg Hohengeroldseck bei Lahr. Diese Gesteine weisen noch spärliche Relikte eines eklogitischen Stadiums auf (z.B. Disthen), sind aber ansonsten weitgehend unter granulitfaziellen Bedingungen rekristallisiert. Da es sich nicht um Hochtemperatur-Granulite handelt, die typisch für die Einheit 3 sind (Marschall *et al.* 2003), wären diese Gesteine eher der Einheit 1 als der Einheit 3 zuzuordnen. Bisher vorliegende geochronologische Arbeiten belegen, dass die magmatischen Edukte wahrscheinlich ordovizisches Alter haben (ca. 490-460 Ma; Kalt *et al.* 1994b, 2000b). Während die eklogitfazielle Überprägung (Stadium I) vor ca. 343 Ma stattfand (Kalt *et al.* 2000b) lässt sich das Alter der granulitfaziellen Metamorphose (Stadium II) auf ca. 340-335 Ma eingrenzen (Kober *et al.* 2000a). Schließlich folgte die amphibolitfazielle Überprägung (Stadium III) vor ca. 332 Ma (Kalt *et al.* 1994a, Lippolt *et al.* 1994).

Sofern die Amphibolkörner signifikante chemische Zonierungen aufweisen, konnten diese eindeutig als Wachstumszonierungen interpretiert werden. Die Zusammensetzung der Minerale Amphibol und Plagioklas ermöglichte es, mittels geothermobarometrischer Methoden die Bildungsbedingungen der Amphibolite einzugrenzen. So liegen die Temperaturen für alle untersuchten Proben bei 726-850 °C, berechnet nach Holland & Blundy (1994) sowie bei 703-855°C (Kernzusammensetzungen) und 683-850°C (Randzusammensetzungen), graphisch ermittelt nach Ernst & Liu (1998). Die nach Ernst & Liu (1998) bestimmten Drücke schwanken stark um den Wert von 0.5 GPa. Diese Druck- und Temperaturbedingungen stimmen mit den von anderen Autoren (z.B. Hanel *et al.* 1993; Kalt *et al.* 1994; Kalt, unpubl. Res., zitiert in Kalt *et al.* 2000b) an Metabasiten sowie metapsammitischen Gneisen und Migmatiten bestimmten Werten überein.

Die Untersuchung der Inter- und Intrakorn-Spurenelementverteilung wurde vor allem mit der Zielsetzung durchgeführt, fluidinduzierte stoffliche Änderungen und eventuell existierende Zusammenhänge zwischen dem Elementhaushalt der einzelnen Mineralphasen und dem Gesamtgesteinschemismus zu detektieren. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Elemente Lithium, Beryllium und Bor gelegt. Mit der Untersuchung der Elementgehalte konnte eine systematische Elementverteilung zwischen den Mineralphasen in Abhängigkeit des Metamorphosegrades abgeleitet werden. Bei der Interpretation der Systematik und den daraus resultierenden Implikationen ist für die Metamorphosestadien I und II allerdings Zurückhaltung geboten, da aufgrund der Feinkörnigkeit der Proben die einzelnen Mineralphasen in verschiedenen Proben gemessen werden mussten. Beobachtete systematische Variationen müssen hier nicht kristallchemisch bedingt sein, sondern können auch durch Änderungen in den Druck- und Temperaturbedingungen und/oder durch Unterschiede in der Gesamtgesteinschemie verursacht werden.

Um fluidinduzierte Prozesse besser qualitativ erfassen zu können, wurden neben der systematischen Untersuchung der Elementgehalte auch Elementverhältnisse betrachtet. Während diese Verhältnisse der Mineralphasen aus den Stadien I und II keine weiterführende Interpretation zulassen, konnte anhand der Verhältnisse (vor allem von Amphibol) Erkenntnisse über das Verhalten der Elemente Li, Be und B während der Hochtemperaturmetamorphose (Stadium III) gewonnen werden. Demnach verhielten sich Lithium und Bor während der amphibolitfaziellen Überprägung mobil, während Beryllium weitgehend immobil war. Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit den Ergebnissen experimenteller Studien (z.B. Brenan *et al.* 1998b; Johnson & Plank 1999) sowie mit Beobachtungen an metamorphen Gesteinen anderer Orogene (z.B. Bebout *et al.* 1993, 1999).



Einander widersprechende Zonierungsprofile der Elemente Lithium und Bor in Amphibol weisen ebenfalls auf deren mobilen Charakter hin. Aus den Zonierungsprofilen lässt sich ableiten, dass es vor allem in den späten Phasen der amphibolitfaziellen Überprägung zu diesen Stoffverschiebungen gekommen sein muss und Lithium sowie Bor dem System zugeführt wurden.

Für Beryllium und Bor ergaben sich relativ konstante Verteilungskoeffizienten zwischen Amphibol und Plagioklas des Stadiums III (amphibolitfazielle Metamorphose). Für Lithium streuen jedoch die Verteilungskoeffizienten erheblich. Dies ist auf beginnende (kryptische) (sub)grünschieferfazielle Alterationsvorgänge im Plagioklas zurückzuführen. Die systematische Untersuchung der Serizitisierung von Plagioklas ergab, dass bereits mit der beginnenden, lichtmikroskopisch oft nicht erkennbaren Serizitbildung in Plagioklas die Elemente Kalium und Magnesium sowie Lithium angereichert werden. Mit zunehmender Serizitisierung nehmen Kalium, Magnesium und Lithium mehr oder weniger gleichmäßig zu. Auch Bor wird bei der Serizitisierung zugeführt; dieser Effekt ist jedoch erst bei fortgeschrittener Alteration der Plagioklaskörner zu bemerken. Neben Lithium und Bor wurden zur Erfassung der Stoffverschiebung bei der Plagioklas-Alteration auch noch weitere Elemente untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass fast der gesamte Stoffbestand des Plagioklases signifikant durch den Prozess der Serizitisierung gestört wird. Es existieren jedoch Unterschiede zwischen den einzelnen Serizitisierungsstufen.

Bei der postamphibolitfaziellen retrograden Metamorphose bzw. hydrothermalen Alteration zeigten auch manche als „alterationsresistent“ geltende Elemente eine erhöhte Fluidmobilität. So wurden in Klüften Titanite aus zirkulierenden Fluidphasen abgesetzt. Dies ist ein eindeutiger Hinweis auf fluidmobiles Verhalten von Titan bei niedrigen Drücken und Temperaturen.

Neben Lithium, Beryllium und Bor wurden auch andere Spurenelemente zur Berechnung von Verteilungskoeffizienten zwischen Amphibol und Plagioklas herangezogen. Für eine Reihe von Elementen konnte eine homogene Verteilung festgestellt werden. Demgegenüber streut die Verteilung einiger anderer Elemente stark. Dies konnte auf eine deutliche Abhängigkeit der Verteilungskoeffizienten von der chemischen Zusammensetzung der Amphibole zurückgeführt werden. Darüber hinaus zeigen Verteilungskoeffizienten der HFSE auch eine Abhängigkeit von der Gesamtgesteinszusammensetzung. Dies rührt daher, dass sich die pauschale chemische Zusammensetzung der Gesteine deutlich in der Zusammensetzung der Amphibole widerspiegelt und somit indirekt die Verteilungskoeffizienten zwischen Amphibol und Plagioklas beeinflusst. Um aussagekräftige Verteilungskoeffizienten zwischen

Amphibol und Plagioklas zu erhalten, muss bei der Auswahl der Proben deshalb auf eine enge gesamtgesteinschemische Variationsbreite geachtet werden, und nur Gesteine miteinander verglichen werden, die eine chemische Ähnlichkeit besitzen.

---

## Literaturverzeichnis

- Acosta-Vigil A, Pereira MD, Shaw DM, London D (2001) *Contrasting behaviour of boron during crustal anatexis*. *Lithos* **56**: 15-31
- Aldahan AA, Ning S, Possnert G, Backman J, Bostrom K (1997) *<sup>10</sup>Be records from sediments of the Arctic Ocean covering the past 350 ka*. *Marine Geology* **144**: 147-162
- Alt JC, France-Honnorez J, Laverne C, Emmermann R (1986) *Hydrothermal Alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust DSDP hole 504B: The mineralogy, chemistry, and evolution of seawater-basalt interactions*. *J Geophys Res* **91**: 10309-10335
- Alt JC, Zuleger E, Erzinger JA (1995) *Mineralogy and stable isotopic compositions of the hydrothermally altered lower sheeted dike complex, Hole 504B, Leg 140*. *Proc ODP Sci Results* **137/140**: 155-166
- Altenberger U, Oberhänsli R, Stein E, Moghni M (2001) *Geochemistry, tectonic setting and geodynamic significance of late orogenic dikes in the Melibocus Massif, Bergsträsser Odenwald*. *Mineral Petrol* **72**: 209-228
- Altherr R, Henjes-Kunst F, Langer C, Otto J (1999a) *Interaction between crustal-derived felsic and mantle-derived mafic magmas in the Oberkirch Pluton (European Variscides, Schwarzwald, Germany)*. *Contrib Mineral Petrol* **137**: 304-322
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H (2000) *High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)*. *Lithos* **50**: 51-73
- Altherr R, Maass, R (1977) *Metamorphite am Suedrand der Zentralschwarzwaelder Gneisanatexitmasse zwischen Geschwend und Bernau*. *N Jb Geol Paläont Abh* **154**: 129-154
- Ayers J (1998) *Trace element modeling of aqueous fluid – peridotite interaction in the mantle wedge of subduction zones*. *Contrib Mineral Petrol* **132**: 390-404
- Bachdatse V, Briden J C (1991) *Palaeomagnetism of Devonian ring complexes from the Bayuda Desert, Sudan – new constraints on the apparent polar wander path for Gondwanaland*. *Geophys J Int* **104**: 635-646
- Bailey SW (1980) *Summary of recommendations of AIPEA nomenclature committee on clay minerals*. *Am Mineral* **65**: 1-7
- Bea F (1996) *Residence of REE, Y, Th and U in Granites and Crustal Protoliths; Implications for the Chemistry of Crustal Melts*. *J Petrol* **37**: 521-552
- Bebout GE, Ryan JG, Leeman WP (1993) *B-Be systematics in subduction-related metamorphic rocks: Characterization of the subducted component*. *Geochim Cosmochim Acta* **57**: 2227-2237

- Bebout GE, Ryan JG, Leeman WP, Bebout AE (1999) *Fractionation of trace elements by subduction-zone metamorphism – effect of convergent-margin thermal evolution*. Earth Planet Sci Lett **171**: 63-81
- Becker H, Jochum KP, Carlson RW (1999) *Constraints from high-pressure veins in eclogites on the composition of hydrous fluids in subduction zones*. Chem Geol **160**: 291-308
- Becker H, Jochum KP, Carlson RW (2000) *Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones*. Chem Geol **163**: 65-99
- Behr HJ, Gerler J (1987) *Inclusions of sedimentary brines in post-Variscan mineralizations in the Federal Republic of Germany*. Chem Geol **61**: 65-77
- Behr HJ, Horn E, Frentzel-Beyme K, Reutel C (1987) *Fluid inclusion characteristics of the Variscan and post-Variscan mineralizing fluids in the Federal Republic of Germany*. Chem Geol **61**: 273-285
- Blundy J, Holland TJB (1990) *Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer*. Contrib Mineral Petrol **104**: 208-224
- Blundy J, Wood B (1994) *Prediction of crystal-melt partition coefficients from elastic moduli*. Nature **372**: 452-454
- Boigk H, Schöneich J (1974) *Perm, Trias und älterer Jura im Bereich der südlichen Mittelmeer-Mjösen-Zone und des Rheingrabens*. In: Illies JH, Fuchs K (eds) *Approaches to Taphrogenesis*. Schweizbart, Stuttgart: 60-71
- Bottazzi R, Tiepolo M, Vannucci R, Zanetti A, Brumm R, Foley SF, Oberti R (1999) *Distinct site preferences for heavy and light REE in amphibole and the prediction of  $D_{REE}^{Amph/L}$* . Contrib Mineral Petrol **137**: 36-45
- Brenan JM, Shaw HF, Ryerson FJ (1995) *Experimental evidence for the origin of lead enrichment in convergent-margin magmas*. Nature **378**: 54-56
- Brenan JM, Neroda E, Lundstrom CC, Shaw HF, Ryerson FJ, Phinney DL (1998a) *Behaviour of boron, beryllium, and lithium during melting and crystallization: Constraints from mineral-melt partitioning experiments*. Geochim Cosmochim Acta **62**: 2129-2141
- Brenan JM, Ryerson FJ, Shaw HF (1998b) *The role of aqueous fluids in the slab-to-mantle transfer of boron, beryllium, and lithium during subduction: Experiments and models*. Geochim Cosmochim Acta **62**: 3337-3347
- Brewer MS, Lippolt JF (1972) *Isotopische Altersbestimmungen an Schwarzwald-Gesteinen*. Fortschr Mineral **50**: 41-50
- Brice JC (1975) *Some thermodynamic aspects of the growth of strained crystals*. J Cryst Growth **28**: 249-253

- Brockamp O, Clauer M, Zuther M (1994) *K-Ar dating of episodic Mesozoic fluid migrations along the fault system of Gernsbach between the Moldanubian and Saxothuringian (Northern Black Forest, Germany)*. Geol Rundsch **83**: 180-185
- Büsch W, Es-Said SI, Schneider G (1979) *Geochemical Evolution of Amphibolites in the Black Forest (Germany)*. N Jb Mineral Abh **136**: 207-225
- Büsch W, Mehnert KR (1995) *Ein Beispiel für Granitisation im Schwarzwald? (Umdeutung der "Feldspatisationszone" von Gschwend)*. Jh Geol Landesamt Baden-Württemberg **35**: 7-24
- Burgath K, Maass R (1973) *Die variszische Entwicklung im südlichen Schwarzwald*. Septième Congrès Intern Stratigr Géol du Carbonifère, Krefeld 23-28 Aug 1971 Comptes Rendue Band II: 195-209
- Carswell DA, Wilson RN, Zhai M (1996) *Ultra-high pressure aluminous titanites in carbonate-bearing eclogites at Ahuanghe in Dabieshan, central China*. Min Mag **60**: 461-471
- Chan LH, Edmond JM, Thompson G, Gillis K (1992) *Lithium isotopic composition of submarine basalts: Implications for the lithium cycle in the ocean*. Earth Planet Sci Lett **108**: 151-160
- Chan LH, Alt JC, teagle DAH (1996) *Alterations of the upper 1.8 kilometers of oceanic crust: A lithium isotope record at ODP site 504B*. EOS Trans Amer Geophys Union **77**: F805
- Chauvel C, Goldstein SL, Hofmann AW (1995) *Hydration and dehydration of oceanic crust controls Pb evolution in the mantle*. Chem Geol **126**: 65-75
- Chen F, Hegner E, Todt W (2000) *Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: evidence for a cambrian magmatic arc*. Int J Earth Sci **88**: 791-802
- Chen F, Todt W, Hann HP (2003) *Zircon and Garnet Geochronology of Eclogites from the Moldanubian Zone of the Black Forest, Germany*. J Geol **111**: 207-222
- Clowe CA, Popp RK, Fritz SJ (1988) *Experimental investigations of the effect of oxygen fugacity on ferric-ferrous ratios and unit-cell parameters of four natural clin amphiboles*. Amer Min **73**: 487-499
- Coleman RG, Lee DE, Beatty LB, Brannock WW (1965) *Eclogites and eclogites: their differences and similarities*. Bull Geol Soc America **76**: 483-580
- Coryell CD, Chase JW, Winchester A (1963) *A procedure for geochemical interpretation of terrestrial rare-earth abundance patterns*. J Geophys Res **68**: 559-566
- Cruciani G, Franceschelli M, Marchi M, Zucca M (2002) *Geochemistry of metabasites from NE Sardinia, Italy: nature of the protoliths, magmatic trend, and geotectonic setting*. Mineral Petrol **74**: 25-47

- Domanik KJ, Hervig RL, Peacock SM (1993) *Beryllium and boron in subduction zone minerals: An ion microprobe study*. *Geochim Cosmochim Acta* **57**: 4997-5010
- Drach V von (1978) *Mineral-Alter im Schwarzwald. Die jüngere Geschichte der variscischen Gebirgsbildung auf Grund isotopischer Altersbestimmungen*. PhD thesis, University of Heidelberg
- Echtler HP, Chauvet A (1991/1992) *Carboniferous convergence and subsequent crustal extension in the southern Schwarzwald (SW Germany)*. *Geodynamica Acta* **5**: 37-49
- Eigenfeld-Mende I (1948) *Metamorphe Umwandlungserscheinungen an Metabasiten des Südschwarzwaldes*. *Mitteilungen der Badischen Geologischen Landesanstalt* **1**, pp 111
- Enami M, Suzuki K, Liou JG, Bird DK (1993) *Al-Fe<sup>3+</sup> and F-OH substitutions in titanite and constraints on their P-T dependence*. *Eur J Mineral* **5**: 219-231
- Ernst WG (1979) *Coexisting sodic and calcic amphiboles from high-pressure metamorphic belts and the stability of barroisitic amphibole*. *Mineral Mag* **43**: 269-278
- Ernst WG, Liu MJ (1998) *Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB – A semiquantitative thermobarometer*. *Am Mineral* **83**: 952-969
- Evensen JM, London D (2002) *Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite*. *Geochim Cosmochim Acta* **66**: 2239-2265
- Fleed ME, Barnett RL (1978) *Al<sup>IV</sup>/Al<sup>VI</sup> partitioning in calciferous amphiboles from the Froid mine, Sudbury, Ontario*. *Can Min* **16**: 527-532
- Franke W (1989) *Variscan plate tectonics in Central Europe: current ideas and open questions*. *Terra Cognita* **7**: 173
- Franke W (1989a) *Tectonostratigraphic units in the Variscan belt of central Europe*. *Geol Soc Am Spec Pap* **230**: 67-90
- Franke W (2000) *The mid-European segment of the Variscides: tectonometamorphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution*. In: Franke W, Haak V, Oncken O, Tanner D (eds) *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. *Geol Soc Spec Pub* **179**: 35-62
- Franke W, Kreuzer H, Okrusch M, Schüssler U, Seidel E (1995) *Saxothuringian Basin: exotic metamorphic nappes: stratigraphy, structure, and igneous activity*. In: Dallmeyer D, Franke W, Weber K (eds) *Pre-Permian Geology of Central and Western Europe*. Springer, Berlin: 275-294
- Fröhler M, Lebede S (1994) *Das vulkanosedimentäre Permokarbon südwestlich von Baden-Baden, Nordschwarzwald*. *Ber Naturf Ges Freiburg i Br* **82/83**: 47-77

- Garbe-Schönberg CD (1993) *Simultaneous determination of thirty-seven trace elements in twenty-eight international rock standards by ICP-MS*. Geostandards Newsletter **17**: 81-103
- Graham CM, Powell R (1984) *A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California*. J Metamorphic Geol **2**: 13-21
- Grapes RH (1975) *Actinolite-Hornblende Pairs in Metamorphosed Gabbros, Hidaka Mountains, Hokkaido*. Contrib Mineral Petrol **49**: 125-140
- Grapes RH, Graham CM (1978) *The actinolite-hornblende series in metabasites and the so-called miscibility gap: A review*. Lithos **11**: 85-97
- Güldenpfennig M (1998) *Zur geotektonischen Stellung unterkarbonischer Grauwacken und Vulkanite der Zone Badenweiler-Lenzkirch (Südschwarzwald)*. Z dt geol Ges **149**: 213-232
- Hagedorn B, Lippolt HJ (1994) *Isotopische Alter von Zerrüttungszonen als Altersschränke der Freiamt-Sexau-Mineralisation (Mittlerer Schwarzwald)*. Abh Geol Landesamt Baden-Württemberg **14**: 205-219
- Hammarstrom JM, Zen E-an (1986) *Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer*. Am Mineral **71**: 1297-1313
- Hanel M, Lippolt HJ, Kober B, Wimmenauer W (1993) *Lower Carboniferous granulites in the Schwarzwald basement near Hohengeroldseck (SW-Germany)*. Naturwiss **80**: 25-28
- Hanel M, Wimmenauer W (1990) *Petrographische Indizien für den Deckenbau im Kristallin des Schwarzwaldes*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **2**: 89
- Hanel M, Kober B, Kalt A, Montenari M, Wimmenauer W (1999a) *Palynomorphs and single zircon ages from paragneisses of the Schwarzwald (SW Germany): constraints on sedimentation ages*. Terra Nostra **99/1**: 94-95
- Hanel M, Montenari M, Kalt A (1999b) *Determining sedimentation ages of high-grade metamorphic gneisses by their palynological record: a case study in the northern Schwarzwald (Variscan belt, Germany)*. Int Journ Earth Sciences **88**: 49-59
- Hart SR, Staudigel H (1982) *The control of alkalis and uranium in sea water by ocean crust alteration*. Earth Planet Sci Lett **58**: 202-212
- Hautmann S, Lippolt HJ (2000)  *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of central European K-Mn oxides – a chronological framework of supergene alteration processes during the Neogene*. Chem Geol **170**: 37-80
- Harley SL (1989) *The origins of granulites: a metamorphic perspective*. Min Mag **126**: 215-247
- Hellman PL, Green TH (1979) *The role of sphene as an accessory phase in the high-pressure partial melting of hydrous mafic compositions*. Earth Planet Sci Lett **42**: 191-201

- Henken-Mellies WU (1987) *Der Amphibolit von Tiefenstein (Südschwarzwald): Petrographie, Geochemie, Metamorphose, Struktur*. N Jb Mineral Abh **156**: 303-324
- Hepp S, Kalt A, Altherr R (2000) *Preliminary results of petrological and geochemical studies on amphibolites from the Variscan Schwarzwald (Germany)*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 zu Eur J Mineral **12**: 79
- Hess JC, Backfisch S, Lippolt HJ (1983) *Konkordantes Sanidin- und diskordante Biotitalter eines Karbontuffs der Baden-Badener Senke, Nordschwarzwald*. N Jb Geol Paläont Mh: 277-292
- Hess JC, Hanel M, Arnold M, Gaiser A, Prowatke S, Stalder S, Kober B (2000) *Variscan magmatism at the northern margin of the Moldanubian Vosges and Schwarzwald I. Ages of intrusion and colling history*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **12**: 79
- Hess JC, Lippolt HJ, Kober B (1995) *The age of the Kagenfels granite (northern Vosges) and its bearing on the intrusion scheme of late Variscan granitoids*. Geol Rundsch **84**: 568-577
- Higgins JB, Ribbe PH (1976) *The crystal chemistry and space group of natural and synthetic titanites*. Am Mineral **76**: 878-888
- Hofmann AW, Jochum KP, Seufert M, White WM (1986) *Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution*. Earth Planet Sci Lett **79**: 33-45
- Hofmann AW (1986) *Nb in Hawaiian magmas: constraints on source composition and evolution*. Chem Geol **57**: 17-30
- Hofmann AW (1988) *Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust*. Earth Planet Sci Lett **90**: 297-314
- Hofmann AW (1997) *Early Evolution of Continents*. Science **275**: 498-499
- Holdaway MJ, Lee SM (1977) *Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations*. Contrib Mineral Petrol **63**: 175-198
- Holland TJB, Blundy J (1994) *Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry*. Contrib Mineral Petrol **116**: 433-47
- Hollister LS, Grissom GC, Peters EK, Stowell HH, Sisson VB (1987) *Confirmation of the empirical correlation of aluminum in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons*. Am Mineral **72**: 231-239
- Johnson MC, Rutherford MJ (1989) *Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks*. Geology **17**: 837-841
- Johnson MC, Plank T (1999) *Dehydration and Melting Experiments Constrain the Fate of Subducted Sediments*. Geochemistry Geophysics Geosystems **1**: 1999GC000014
- Kalt A, Altherr R (1996) *Metamorphic evolution of garnet-spinel peridotites from the Variscan Schwarzwald (Germany)*. Geol Rundsch **85**: 211-224



- Kalt A, Altherr R, Hanel M (1995) *Contrasting P-T conditions recorded in ultramafic high-pressure rocks from the Variscan Schwarzwald (F.R.G.)*. Contrib Mineral Petrol **121**: 45-60
- Kalt A, Hanel M, Kober B, Montenari M, Wimmenauer W (1999a) *Petrostructural features, age and geodynamic evolution of the metamorphic basement in the Schwarzwald (Variscan belt, Germany)*. Ger Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **11**: 117
- Kalt A, Hanel M, Marschall H (1999b) *Petrology of granulites from the Southern Schwarzwald (Variscan belt, Germany)*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **11**: 117
- Kalt A, Hanel M, Schleicher H, Kramm U (1994b) *Petrology and geochronology of eclogites from the Variscan Schwarzwald (F.R.G.)*. Contrib Mineral Petrol **115**: 287-302
- Kalt A, Kober B, Pidgeon RT (2000a) *Further time constraints on Variscan high-pressure metamorphism in the Schwarzwald (Germany)*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 zu Eur J Mineral **12**: 91
- Kalt A, Altherr R, Hanel M (2000b) *The Variscan basement of the Schwarzwald*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 2 zu Eur J Mineral **12**: 1-43
- Kalt A, Kober B, Rocholl A (1997) *Further petrological and geochronological constraints on eclogites in the Variscan basement of the Schwarzwald (Germany)*. Terra Nova **9**, suppl. 1: 16
- Kalt A, Grauert B, Baumann A (1994a) *Rb-Sr and U-Pb isotope studies on migmatites from the Schwarzwald (Germany): constraints on isotopic resetting during Variscan high-temperature metamorphism*. J Metam Geol **12**: 667-680
- Kalt A (1990/1991) *Isotopengeologische Untersuchungen an Metabasiten des Schwarzwaldes und ihren Rahmengesteinen*. Freiburger Geowiss Beitr **3**: 1-185
- Kasemann S, Erzinger J, Franz G (2000) *Boron recycling in the continental crust of the central Andes from the Palaeozoic to Mesozoic, NW Argentina*. Contrib Mineral Petrol **140**: 328-343
- Kelemen P, Shimizu N, Dunn T (1993) *Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: partitioning of K, Nb, La, and Ce during melt/rock interaction in the upper mantle*. Earth Planet Sci Lett **120**: 111-134
- Keller J (1981) *Carbonatitic volcanism in the Kaiserstuhl alkaline complex: Evidence for highly fluid carbonatitic melts at the Earth's surface*. J Volcanol Geotherm Res **9**: 423-431
- Keller J, Williams CT, Koberski U (1995) *Niocalite and woehlerite from the alkaline and carbonatite rocks at Kaiserstuhl, Germany*. Mineral Mag **59**: 561-566
- Klein H, Wimmenauer W (1984) *Eclogites and their retrograde transformation in the Schwarzwald (Fed. Rep. Germany)*. N Jb Mineral Mh 1984: 25-38

- Klein U, Schumacher JC, Czank M (1996) *Mutual exsolution in hornblende and cummingtonite: Compositions, lamellar orientations, and exsolution temperatures*. Am Mineral **81**: 928-939
- Klein U, Sharp TG, Schumacher JC (1997) *Analytical electron microscopy of nanometer-scale hornblende lamellae: Low-temperature exsolution in cummingtonite*. Am Mineral **82**: 1079-1090
- Kober B, Hanel M, Pidgeon TR, Kalt A (2000a) *Episodes of pre-Variscan sedimentation, constrained by SHRIMP and Pb evaporation dating of single zircons from metasediments of the Schwarzwald (Germany)*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **12**: 99
- Kohn MJ, Spear FS (1989) *Empirical calibration of geobarometers for the assemblage garnet + hornblende + plagioclase + quartz*. Am Mineral **74**: 77-84
- Kohn MG, Spear FS (1990) *Two new barometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont*. Am Mineral **75**: 89-96
- Kossmat F (1927) *Gliederung des varistischen Gebirgsbaues*. Abh Sächs Geol Landesamt **1**: 39
- Laird J, Albee AL (1981) *Pressure-temperature and time indicators in mafic schists: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont*. Am J Sci **281**: 127-175
- Leake BE (1997) *Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names*. Eur J Mineral **9**: 623-651
- Leeman WP, Sisson VB, Reid MR (1992) *Boron geochemistry of the lower crust: Evidence from granulite terranes and deep crustal xenoliths*. Geochim Cosmochim Acta **56**: 775-788
- Leeman WP (1996) *Boron and Other Fluid-mobile Elements in Volcanic Arc Lavas: Implications for Subduction Process*. In: Bebout (ed) *Subduction: Top to Bottom*. Geophysical Monograph: 269-276
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A, Zanettin B (1986) *A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram*. J Petrol **27**: 745-750
- Liati A, Seidel E (1996) *Metamorphic evolution and geochemistry of kyanite eclogites in central Rhodope, northern Greece*. Contrib Mineral Petrol **123**: 239-307
- Lippolt HJ, Hradetzky H, Hautmann S (1994a) *K-Ar dating of amphibole-bearing rocks in the Schwarzwald, SW Germany: I.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints to Hercynian HT-metamorphism*. N Jb Miner Mh **1994/10**: 433-448
- Lippolt HJ, Kirsch H (1994b) *Isotopic Investigation of Post-Variscan Plagioclase Sericitization in the Schwarzwald Gneiss Massif*. Chem Erde **54**: 179-198

- Lippolt HJ, Baranyi I, Todt W (1975) *Die Kalium-Argon-Alter der post-permischen Vulkanite des nord-östlichen Oberrheingraben*. Aufschluß, Sonderband **27**: 205-212
- Lippolt HJ, Horn P, Todt W (1976) *Kalium-Argon-Altersbestimmungen an tertiären Vulkaniten des Oberrhein-Graben-Gebietes: IV Kalium-Argon-Alter von Mineralen und Einschlüssen der Basalt-Vorkommen Katzenbuckel und Roßberg*. N Jb Mineral Abh **127**: 242-260
- Lüders V (1994) *Geochemische Untersuchungen an Gangmineralen aus dem Bergbaurevier Freiamt-Sexau und dem Badenweiler-Quarzfiff (Schwarzwald)*. Abh geol Landesamt Baden-Württemberg **14**: 173-190
- Maass R, Prosch T, Schuler D (1990) *The zone of Badenweiler-Lenzkirch – a Carboniferous accretionary wedge?* N Jb Geol Paläont Mh 1990: 717-734
- Markl G (1999) *Wollastonite formation during Variscan post-tectonic cooling in the Schwarzwald, Germany*. Mineral Petrol **66**: 193-213
- Marschall H, Kalt A, Hanel M (2000) *Petrology of granulites from the Central Schwarzwald (Variscan belt)*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 z Eur J Mineral **12**: 121
- Marschall H, Kalt A, Hanel M (2003) *P-T Evolution of a Variscan Lower Crustal Segment: a study of granulites from the Schwarzwald, Germany*. J Petrol **44**: 227-253
- Matte P (1986) *Tectonics and plate tectonics model for the Variscan belt of Europe*. Tectonophysics **126**: 329-374
- Matte P, Maluski H, Rajlich P, Franke W (1990) *Terrane boundaries in the Bohemian Massif: result of large-scale Variscian shearing*. Tectonophysics **177**: 151-170
- Matthess G (1966) *Zur Geologie des Ölschiefervorkommens von Messel bei Darmstadt*. Abh Hess L-Amt Bodenforsch **51**: 1-87
- Manning CE, Bohlen SR (1991) *The Reaction Titanite + Kyanite = Anorthite + Rutile and Titanite-Rutile Barometry in Eclogites*. Contrib Mineral Petrol **109**: 1-9
- McCulloch MT, Gamble JA (1991) *Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism*. Earth Planet Sci Lett **102**: 358-374
- McDonough WF, Sun SS (1995) *Composition of the Earth*. Chem Geol **120**: 223-253
- McKerrow W S, Dewey J F, Scotese C F (1991) *The Ordovician and Silurian development of the Iapetus Ocean*. Palaeontology **44**: 165-178
- McKerrow W S, MacNiocall C, Ahlberg P E, Clayton G, Cleal J C, Eagar E M C (2000) *The Late Palaeozoic relations between Gondwana and Laurussia*. In: Franke W, Haak V, Oncken O, Tanner D (eds) *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. Geol Soc Spec Pub **179**: 9-20

- Messiga B, Bettini E (1990) *Reactions behaviour during kelyphite and symplectite formation: a case study of mafic granulites and eclogites from the Bohemian Massif*. Eur J Mineral **2**: 125-144
- Messiga B, Tribuzio R, Bottazzi P, Ottolini L (1995) *An ion microprobe study on trace element composition of clinopyroxenes from blueschist and eclogitized Fe-Ti-gabbros, Ligurian Alps, north-western Italy: some petrologic considerations*. Geochim Cosmochim Acta **59**: 59-75
- Metz R (1971) *Mineralogisch-landeskundliche Wanderungen im Nordschwarzwald, besonders in dessen alten Bergbaurevieren*. Aufschluß, Sonderheft **20**, 516pp.
- Mertz DF (1987) *Isotopengeochemische und mineralogische Untersuchungen an postvariscischen hydrothermalen Silikaten*. Inaug-Diss (unpubl), 236 pp., Universität Heidelberg
- Mertz DF, Lippolt HJ, Müller G (1990) *Isotopic dating of adularia-bearing epigenetic mineralizations: I. Saar-Nahe region/Southwest Germany*. Eur J Mineral **2**: 89-102
- Mertz DF, Karpenko MI, Ivanenko VV, Lippolt HJ (1991) *Evidence for Jurassic tectonism in the Schwarzwald basement (SW Germany) by laser-probe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of authigenic K-feldspar*. Naturwiss **78**: 411-413
- Meyer M, Brockamp O, Clauer N, Renk A, Zuther M (2000) *Further evidence for a Jurassic mineralizing event in central Europe: K-Ar dating of hydrothermal alteration and fluid inclusion systematics in wall rocks of the Käfersteige fluorite vein deposit in the northern Black Forest, Germany*. Mineralium Deposita **35**: 754-761
- Miller DM, Goldstein SL, Langmuir CH (1994) *Cerium/lead and lead isotope ratios in arc magmas and the enrichment of lead in the continents*. Nature **368**: 514-520
- Montenari M, Maass R (1996) *Die metamorphen Schiefer der Badenweiler-Lenzkirch-Zone / Südschwarzwald – Paläontologische Alterstellung (Acritarchen und Chitinozoen) und Tektonik*. Ber Naturf Ges Freiburg i Br **84/85**: 33-79
- Montenari M (1996) *Appearance of Microfossils in High-Grade Metamorphic Rocks from SW-Germany*. IX International Palynological Congress Meeting, June 23-28, 1996, Houston, Texas, U.S.A., Abstracts: 110
- Montenari M, Servais T (2000a) *Early Paleozoic (Late Cambrian – Early Ordovician) acritarchs from the metasedimentary Baden-Baden-Gaggenau zone (Schwarzwald, SW Germany)*. Review of Palaeobotany & Palynology **113**: 73-85
- Montenari M, Servais T, Paris F (2000b) *Palynological dating (acritarchs and chitinozoans) of Lower Palaeozoic phyllites from the Black Forest / southwestern Germany*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, série IIa 2000
- Moran AE, Sisson VB, Leeman WP (1992) *Boron depletion during progressive metamorphism: Implications for subduction processes*. Earth Planet Sci Lett **111**: 331-349

- Morimoto N (1988) *Nomenclature of pyroxenes*. Am Mineral **73**: 1123-1133
- Oba T, Yagi K (1986) *Phase Relations on the Actinolite-Pargasite Join*. J Petrol **28**: 23-36
- Oberti R, Smith DC, Rossi G, Caucia F (1991) *The crystal-chemistry of high-aluminum titanites*. Eur J Mineral **3**: 777-792
- O'Brien PJ (2000) *The fundamental Variscan problem: high-temperature metamorphism at different depths and high-pressure metamorphism at different temperatures*. In: Franke W, Haak V, Oncken O, Tanner D (eds) *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. Geol Soc Spec Pub **179**: 35-62
- Okrusch M, Schubert W, Stähle V (2000) *The Odenwald, Germany: Variscan metamorphic evolution and igneous events*. Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 2 z Eur J Mineral **12**: 45-89
- Onuma N, Higuchi H, Wakita H, Nagasawa H (1968) *Trace element partition between two pyroxenes and the host lava*. Earth Planet Sci Lett **5**: 47-51
- Paquin J, Altherr R (2002) *Subduction-related lithium metasomatism during exhumation of the Alpe Arami ultrahigh-pressure garnet Peridotite (Central Alps, Switzerland)*. Contrib Mineral Petrol **143**: 623-640
- Peacock SM, Hervig RL (1999) *Boron isotopic composition of subduction-zone metamorphic rocks*. Chem Geol **160**: 281-290
- Pearce JA (1983) *Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*. In: Hawkesworth CJ, Norry J (eds) *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich: 230 – 249
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, Maury R (1995) *Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust*. Nature **410**: 197-200
- Reiners PW, Hammond PE, McKenna JM, Duncan RA (2000) *Young basalts of the central Washington Cascades, flux melting of the mantle, and trace element signatures of primary arc magmas*. Contrib Mineral Petrol **138**: 249-264
- Pflug, R (1982) *Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens*. Wissensch Buchges, Darmstadt: 346-359
- Plank T, Langmuir CH (1989) *The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle*. Chem Geol **145**: 325-394
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, Maury R (2001) *Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust*. Nature **410**: 197-200
- Röhr C (1990) *Die Genese der Leptinite und Paragneise zwischen Nordrach und Gengenbach im mittleren Schwarzwald*. Frankfurt geowiss Arb Serie **C 11**: 1-159
- Rubatto D (2002) *Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism*. Chem Geol **184**: 123-138

- Rudnick R, Barth M, Horn I, McDonough WF (1999) *Rutile-Bearing Refractory Eclogites: Missing Link Between Continents and Depleted Mantle*. *Science* **287**: 278-281
- Rüger L (1930) *Zur Frage der prämesozoischen Anlage des Rheintalgrabens*. *Badische Geol Abhandl* **2**: 120-129
- Ryan JG, Langmuir CH (1988) *Beryllium systematics in young volcanic rocks: Implications for <sup>10</sup>Be*. *Geochim Cosmochim Acta* **52**: 237-244
- Schaltegger U (2000) *U-Pb geochronology of the Southern Black Forest Batholith (Central Variscan Belt): timing of exhumation and granite emplacement*. *Int J Earth Sciences* **88**: 814-828
- Schlegel A, Brockamp O, Zuther M, Clauser N (2002) *Fossile Geothermalgebiete – Kennzeichen hydrothermal alterierter Sedimente der intramontanen Breisgau-Schramberger Senke im Mittleren Schwarzwald*. *Ber Deutsch Mineral Ges, Beih 1 zu Eur J Mineral* **14**: 144
- Schleicher H (1984) *Der Triberger Granit*. *Fortschr Mineral* **62**: 91-98
- Schleicher H (1994) *Collision type granitic melts in the context of thrust tectonics and uplift history (Triberg granite complex, Schwarzwald, Germany)*. *N Jb Mineral Abh* **166**: 211-237
- Schleicher H, Keller J, Kramm U (1990) *Isotope studies on alkaline volcanics and carbonatites from the Kaiserstuhl, Federal Republic of Germany*. *Lithos* **26**: 21-35
- Schmidt P W, Embleton B J J (1990) *The palaeomagnetism of the Tublagooda Sandstone, Western Australia: Gondwana Palaeozoic apparent polar wandering*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **64**: 303-313
- Schumacher JC (1997) *Appendix 2: The Estimation of the proportion of ferric iron in the electron-microprobe analysis of amphiboles*. *Can Mineral* **35**: 238-246
- Seitz H-M, Woodland AB (2000) *The distribution of lithium in peridotitic and pyroxenitic mantle lithologies – An indicator of magmatic and metasomatic processes*. *Chem Geol* **166**: 47-64
- Seyfried WE, Janecky DR, Mottl MJ (1984) *Alteration of the oceanic crust: implications for geochemical cycles of lithium and boron*. *Geochim Cosmochim Acta* **48**: 557-569
- Shaw DM, Truscott MG, Gray EA, Middleton TA (1988) *Boron and lithium in high-grade rocks and minerals from the Wawa-Kapusking region, Ontario*. *Can J Earth Sci* **25**: 1485-1502
- Sigmund J, Keller J (1994) *Amphibole and garnet bearing mantle xenoliths in the Kaiserstuhl, Germany; reaction to diatreme and carbonatite*. *Mineral Mag* **58A**: 840-841
- Simon K (1990) *Hydrothermal alteration of Variscan granites, southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany*. *Contrib Mineral Petrol* **105**: 177-196

- Simon K, Hoefs J (1987) *Effects of meteoric water interaction on Hercynian granites from the Südschwarzwald, Southwest Germany*. Chem Geol **61**: 253-261
- Smelik EA (1994) *Fluid channelization at the submicroscopic scale in exsolved orthoamphiboles*. Eur J Mineral **7**: 825-834
- Sorensen SS, Grossman JN (1989) *Enrichment of trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina Schist, southern California*. Geochim Cosmochim Acta **53**: 3155-3177
- Spear FS (1981a) *An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite*. Am J Sci **281**: 697-734
- Staudigel H, Plank T, White B, Schmincke HU (1995) *Geochemical Fluxes During Seafloor Alteration of the Basaltic Upper Oceanic Crust: DSDP Sites 417 and 418*. In: Bebout G (ed) *Subduction: Top to Bottom*. Am Geophys Union: 19-36
- Staudigel H, Plank T, White B, Schmincke HU (1996) *Geochemical fluxes during seafloor alteration of the basaltic upper oceanic crust: DSDP site 417 and 418*. In: Bebout (ed) *Subduction: Top to Bottom. Geophysical Monograph*: 19-38
- Stenger R, Baatz K, Klein H, Wimmenauer W (1989) *Metamorphic evolution of the pre-Hercynian basement of the Schwarzwald (Federal Republic of Germany)*. Tectonophysics **157**: 117-121
- Stolz AJ, Jochum KP, Spettel B, Hofmann AW (1996) *Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts*. Geology **24**: 587-590
- Stosch HG, Lugmair GW (1990) *Geochemistry and evolution of MORB-type eclogites from the Münchberg Massif, southern Germany*. Earth Planet Sci Lett **99**: 230-249
- Sun SS, McDonough WF (1989) *Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process*. In: Saunders AD, Norry MJ (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol Soc Spec Publ **42**: 313-345
- Tagiri M (1977) *Fe-Mg partition and miscibility gap between coexisting calcic amphiboles from the southern Abukuma Plateau, Japan*. Contrib Mineral Petrol **62**: 271-281
- Tait J A, Bachdatse V, Soffel H C (1994a) *New palaeomagnetic constraints on the position of central Bohemia during Early Ordovician times*. Geophys J Int **116**: 131-140
- Tait J A, Bachdatse V, Soffel H C (1994b) *Silurian palaeogeography of Armorica: new palaeomagnetic data from central Bohemia*. J Geophys Res **99**: 2897-2907
- Tait J A, Bachtadse V, Franke W, Soffel H C (1997) *Geodynamic evolution of the European Variscan fold belt: palaeomagnetic and geological constraints*. Geol Rundsch **86**: 585-598

- Tait J A, Schätz M, Bachdatse V, Soffel H C (2000) *Palaeomagnetism and Palaeozoic palaeogeography of Gondwana and European terranes*. In: Franke W, Haak V, Oncken O, Tanner D (eds) *Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt*. Geol Soc Spec Pub **179**: 21-34
- Tatsumi Y, Hamilton DL, Nesbitt RW (1986) *Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks*. J Volcanol Geotherm Res **29**: 293-309
- Tatsumi Y (1989) *Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones*. J Geophys Res **94**: 4697-4707
- Taylor SR, McLennan SM (1985) *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Science Publications, pp 312
- Thompson RN, Morrison MA, Dickin AP, Hendry GL (1983) *Continental flood basalts ... Arachnids rule OK?* In: Hawkesworth CJ, Norry MJ (eds) *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*: 158-185
- Todt W (1976) *Zirkon-U/Pb-Alter des Malsburg-Granits vom Süd-Schwarzwald*. N Jb Mineral Mh 1978: 532-544
- Tomascak PB, Tera F, Helz RT, Walker RJ (1999) *The absence of lithium isotope fractionation during basalt differentiation: New measurements by multicollector sector ICP-MS*. Geochim Cosmochim Acta **63**: 907-910
- Tomascak PB, Widom E, Benton LD, Goldstein SL, Ryan JG (2002) *The control of lithium budgets in island arcs*. Earth Planet Sci Lett **196**: 227-238
- Trench A, Torsvik TH (1991) *A revised Palaeozoic apparent polar wander path for southern Britain (eastern Avalonia)*. Geophys J Int **104**: 227-233
- Van der Voo R (1979) *Palaeozoic assembly of Pangea: a new plate tectonic model for the Taconic, Caledonian and Hercynian orogenies*. EOS Trans Am Geophys Union **60**: 241
- von Gehlen K (1987) *Formation of Pb-Zn-F-Ba mineralizations in SW Germany*. Fortschr Mineral **65**: 87-113
- von Gehlen K (1989) *Ore and mineral deposits of the Schwarzwald*. In: Emmermann R, Wohlenberg J (eds) *The German Continental Deep Drilling Program (KTB). Site selection studies in the Oberpfalz and Schwarzwald*. Springer, Heidelberg: 277-295
- Von Raumer JF (1998) *The Palaeozoic evolution in the Alps: from Gondwana to Pangea*. Geol Rundsch **87**: 407-435
- Werling E, Altherr R (1987) *The southern border of the gneiss mass of the central Black Forest: an inverse metamorphic profile interpreted as Variscan back-thrust*. Terra Cognita Abstr **7**: 173
- Wernicke RS, Lippolt HJ (1997) *(U+Th)-He evidence of Jurassic continuous hydrothermal activity in the Schwarzwald basement, Germany*. Chem Geol **138**: 273-285



- Wickert F, Altherr R, Deutsch M (1990) *Polyphase Variscan tectonics and metamorphism along a segment of the Saxothuringian-Moldanubian boundary: The Baden-Baden Zone, northern Schwarzwald (F.R.G.)*. Geol Rundsch **79**: 627-647
- Wilson M (1989) *Igneous Petrology: a global tectonic approach*. Chapman & Hall, 466 p.
- Wimmenauer W (1974) *The alkaline province of central Europe and France*. In: Sorenson H (ed) *The Alkaline Rocks, Alkaline Provinces*. John Wiley & Sons, London: 238-271
- Wimmenauer W (1980) *Lithology of Precambrian in the Schwarzwald. An interim report*. N Jb Mineral Mh 1980: 364-372
- Wimmenauer W (1984) *Das prävariskische Kristallin im Schwarzwald*. Fortschr Mineral **62**, Beih 2: 69-86
- Wimmenauer W (1970) *Zur Petrologie der Magmatite des Oberrheingrabens*. Fortschr Mineral **47**: 242-262
- Wimmenauer W, Stenger R (1989) *Acid and intermediate HP rocks in the Schwarzwald (Federal Republic of Germany)*. Tectonophysics **157**: 109-116.
- Wimmenauer W, Lim KS (1988) *L'association leptyno-amphibolique de la Forêt-Noire (RFA)*. Bull Soc géol France **8**: 35-41
- Wood DA (1980) *The application of Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonometamorphic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province*. Earth Planet Sci Lett **50**: 11-30
- Woodland AB, Seitz H-M, Altherr R, Marschall H, Olker B, Ludwig T (2002) *Li abundances in eclogite minerals: a clue to a crustal or mantle origin*. Contrib Mineral Petrol **143**: 587-601
- Zack T, Foley SF, Rivers T (2002) *Equilibrium and Disequilibrium Trace Element Partitioning in Hydrous Eclogites (Trescolmen, Central Alps)*. J Petrol **43**: 1947-1974
- Zack T, Tomascak PB, Rudnick RL, Dalpe C, McDonough WF (2003) *Extremely light Li in orogenic eclogites: The role of isotope fractionation during dehydration in subducted oceanic crust*. Earth Planet Sci Lett **208**: 279-290
- Zuther M, Brockamp O (1988) *The fossil geothermal system of the Baden-Baden trough (Northern Black Forest, F.R. Germany)*. Chem Geol **71**: 337-353



---

## Anhang

### INHALTSVERZEICHNIS

<b>Repräsentative Analysen der Minerale</b>	<b>Seite 104</b>
<b>Repräsentative Analysen der Gesteine</b>	<b>Seite 138</b>
<b>Probenübersicht</b>	<b>Seite 146</b>
<b>Mineralformelberechnung</b>	<b>Seite 152</b>
<b>Geothermobarometrie</b>	<b>Seite 152</b>
<b>Messmethodik</b>	<b>Seite 153</b>
Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS)	Seite 153
Sekundärionen-Massenspektrometer (SIMS)	Seite 154
Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)	Seite 154
Laser-Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)	Seite 154
Röntgenfluoreszenzspektrometrie (RFA)	Seite 155

## Anhang

**Tab. A-4.01 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Clinopyroxene und Orthopyroxene.

Probe	Cpx I LO-1 Kern	Cpx I LO-1 Rand	Cpx I LA-41 Kern	Cpx I/II LO-1 Kern	Cpx I/II LO-1 Rand	Cpx I/II LA-41 Kern	Cpx I/II LA-41 Rand	Cpx IIb LO-1 Kern	Cpx IIb LO-1 Rand	Cpx IIb LA-41 Kern	Cpx IIb LA-41 Rand	Cpx IIb SP-56B Kern	Cpx IIb SP-56B Rand
Analyse	LO1-24	LO1-37	LA41-7	LO1-23	LO1-22	LA41-1	LA41-2	LO1-40	LO1-38	LA41-40	LA41-27	SP56-18	SP56-25
SiO <sub>2</sub>	53,90	52,76	51,66	52,21	51,95	50,34	50,18	53,22	52,90	51,31	52,40	52,35	51,43
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,11	0,47	0,16	0,11	0,33	0,34	0,09	0,14	0,96	0,20	0,05	0,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,99	7,18	9,76	6,27	6,33	9,41	9,29	1,77	1,17	4,44	2,74	1,36	2,31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,03	0,09	0,00	0,04	0,10	0,01	0,05	0,01	0,04	0,10	0,02	0,02
FeO <sub>t</sub>	7,21	7,41	4,55	9,80	8,97	5,96	6,46	8,71	8,44	6,51	6,30	11,51	11,36
MnO	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,10	0,13	0,09	0,12	0,15	0,09	0,36	0,32
MgO	9,55	10,11	10,72	11,61	11,69	11,72	12,04	13,34	13,89	13,63	14,42	11,93	11,78
CaO	16,44	18,37	18,98	17,71	18,55	19,77	19,53	21,52	22,31	22,07	22,37	22,26	21,79
Na <sub>2</sub> O	4,91	3,89	3,13	2,35	2,24	1,88	1,71	1,15	0,70	0,71	0,45	0,23	0,31
K <sub>2</sub> O	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Summe	100,24	99,88	99,38	100,15	99,92	99,61	99,71	99,94	99,67	99,83	99,08	100,06	99,42
Kationen auf der Basis von 6 Sauerstoffen und 4 Kationen:													
Si	1,944	1,921	1,882	1,919	1,911	1,845	1,840	1,972	1,968	1,897	1,949	1,975	1,950
Ti	0,340	0,308	0,419	0,272	0,274	0,407	0,402	0,077	0,051	0,194	0,120	0,061	0,103
Al	0,004	0,003	0,013	0,004	0,003	0,009	0,009	0,003	0,004	0,027	0,006	0,001	0,003
Cr	0,000	0,001	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000	0,001	0,000	0,001	0,003	0,000	0,000
Fe <sup>3+</sup>	0,109	0,117	0,010	0,049	0,056	0,017	0,022	0,054	0,055	0,009	0,001	0,003	0,014
Fe <sup>2+</sup>	0,109	0,109	0,129	0,253	0,220	0,166	0,176	0,216	0,208	0,192	0,195	0,361	0,346
Mn	0,513	0,549	0,582	0,636	0,641	0,640	0,658	0,737	0,770	0,751	0,799	0,671	0,665
Mg	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	0,003	0,004	0,005	0,003	0,011	0,010
Ca	0,635	0,717	0,741	0,698	0,731	0,777	0,767	0,855	0,889	0,874	0,892	0,900	0,885
Na	0,343	0,274	0,221	0,167	0,160	0,134	0,121	0,082	0,050	0,051	0,033	0,017	0,023
K	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Summe	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4.01 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Cpx III SBL--6 Kern	Cpx III SBL--6 Rand	Cpx III LA-1 Kern	Cpx III LA-1 Rand	Cpx III LA-2 Kern	Cpx III LA-2 Rand	Cpx III GÖ-5 Kern	Cpx III GÖ-5 Rand	Opx IIa AW-20 Kern	Opx IIa SP-56B Kern	Opx IIa LA-39 Kern
Analyse	SBL6-116	SBL6-117	LA1-125	LA1-124	LA2-4	LA2-1	GÖ5-16	GÖ5-15	AW20-88	SP56-248	LA39-56
SiO <sub>2</sub>	52,52	53,07	52,80	52,84	51,28	51,28	51,97	51,77	50,67	50,66	52,81
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,15	0,08	0,07	0,02	0,00	0,02	0,14	0,00	0,00	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,50	0,68	0,43	0,46	0,39	0,35	0,90	1,11	1,40	0,81	2,96
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,01	0,04	0,09	0,09	0,09	0,02	0,00	0,03	0,00	0,08
FeO <sub>t</sub>	10,35	9,96	9,44	9,54	17,19	17,19	11,82	11,84	30,08	30,21	18,30
MnO	0,40	0,37	0,31	0,35	0,37	0,31	0,52	0,51	0,61	0,89	0,41
MgO	12,26	12,61	13,02	13,09	7,18	7,18	11,20	11,15	16,08	15,99	24,52
CaO	22,52	23,26	23,74	23,37	23,31	22,90	22,77	22,93	0,59	0,59	0,44
Na <sub>2</sub> O	0,49	0,40	0,16	0,13	0,05	0,13	0,31	0,35	0,02	0,03	0,03
K <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,00	0,02	0,04	0,00	0,04
Summe	100,20	100,52	100,02	99,95	99,88	99,43	99,51	99,82	99,45	99,15	99,55
Kationen auf der Basis von 6 Sauerstoffen und 4 Kationen:											
Si	1,968	1,981	1,979	1,983	2,005	2,013	1,979	1,964	1,974	1,984	1,935
Ti	0,066	0,030	0,019	0,020	0,018	0,016	0,040	0,050	0,064	0,037	0,128
Al	0,005	0,004	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001
Cr	0,000	0,000	0,001	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002
Fe <sup>3+</sup>	0,024	0,029	0,029	0,019	0,000	0,000	0,024	0,041	0,000	0,000	0,002
Fe <sup>2+</sup>	0,301	0,282	0,266	0,281	0,562	0,564	0,352	0,335	0,980	0,989	0,558
Mn	0,685	0,702	0,728	0,732	0,419	0,420	0,635	0,631	0,933	0,933	1,339
Mg	0,013	0,012	0,010	0,011	0,012	0,010	0,017	0,016	0,020	0,029	0,013
Ca	0,904	0,930	0,954	0,940	0,977	0,963	0,929	0,932	0,025	0,025	0,017
Na	0,035	0,029	0,012	0,009	0,004	0,010	0,023	0,026	0,002	0,002	0,002
K	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	0,002
Summe	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Anhang

**Tab. A-4.01 (Spurenelemente). Fortsetzung.**

Probe	Cpx I LO-1 Kern	Cpx I LO-1 Rand	Cpx I LO-1 Rand	Cpx I/II LA-41 Rand	Cpx I/II LA-41 Kern	Cpx IIb LA-39 Kern	Cpx IIb LA-39 Rand
Analyse	L11	L12	L13	L28	L30	L13	L14
Sc	43,8	42,5	52,7	29,4	31,2	27,4	31,7
V	1257	1185	1209	420	409	124	132
Co	37,2	35,9	34,9	40,4	45,1	36,3	36,2
Ni	8,8	8,5	11,5	159	103	142	137
Cu	<0.3	<0.2	0,3	<0.3	<0.6	<0.4	<0.2
Zn	165	151	162	116	86,4	10,0	12,4
Ga	35,7	31,4	33,3	26,6	26,3	7,1	4,3
Rb	<0.08	<0.03	0,07	0,06	0,06	<0.02	0,06
Sr	75,3	86,7	70,6	30,2	26,5	6,6	6,7
Y	0,4	0,4	0,4	3,4	3,0	5,2	4,5
Zr	4,3	9,0	4,6	35,1	33,1	14,5	9,9
Nb	<0.03	<0.02	0,02	<0.03	<0.03	<0.02	0,02
Ba	<0.09	<0.06	0,02	0,1	0,1	<0.09	<0.06
La	0,1	0,3	0,1	2,4	3,4	0,06	0,08
Ce	1,0	1,8	0,8	9,8	15,7	0,7	0,6
Pr	0,3	0,5	0,2	1,7	2,9	0,2	0,2
Nd	2,1	3,6	1,8	7,8	15,3	1,4	1,3
Sm	1,3	1,2	1,2	1,8	4,5	0,6	0,6
Eu	0,4	0,3	0,4	1,0	1,4	0,2	0,1
Gd	0,8	0,6	0,6	1,4	3,7	0,9	0,9
Tb	0,04	0,06	0,06	0,2	0,4	0,2	0,1
Dy	0,09	0,1	0,09	0,8	1,3	1,0	0,9
Ho	<0.02	0,02	0,01	0,2	0,10	0,2	0,2
Er	<0.08	<0.03	<0.02	0,3	0,2	0,6	0,6
Tm	<0.01	<0.01	0,01	0,04	0,05	0,07	0,04
Yb	<0.10	<0.03	<0.04	0,1	0,1	0,5	0,5
Lu	<0.01	<0.01	0,01	0,02	0,01	0,08	0,07
Hf	0,2	0,6	0,3	1,2	1,2	0,7	0,3
Ta	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.02	<0.01	<0.02
Pb	3,0	3,3	2,9	0,1	0,3	0,1	0,2
Th	<0.01	0,01	0,01	0,2	0,3	<0.02	0,01
U	<0.01	0,02	0,01	0,2	0,3	0,04	0,02



Anhang

**Tab. A-4.02 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Granate.

Probe	Grt I AW-20b Kern	Grt I AW-20b Rand	Grt I LO-1 Kern	Grt I LO-1 Rand	Grt I SP-54 Kern	Grt I SP-54 Rand	Grt I SP-56 Kern	Grt I SP-56 Rand	Grt II LA-41 Kern	Grt II LA-41 Rand
Analyse	AW20b-3	AW20b-2	LO1-26a	LO1-25a	SP54-82	SP54-80	SP56-102	SP56-119	LA41-38	LA41-37
SiO <sub>2</sub>	39,02	39,20	38,10	38,29	39,02	38,76	37,75	38,26	39,86	39,31
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,00	0,04	0,08	0,00	0,00	0,01	0,05	0,08	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,58	21,47	21,59	21,37	21,91	21,64	21,04	21,21	22,38	22,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,05	0,06	0,13
FeO <sub>t</sub>	23,59	22,55	24,16	24,23	19,87	21,69	29,46	25,51	17,30	18,79
MnO	0,43	0,48	0,42	0,41	0,31	0,72	2,58	1,80	0,45	0,59
MgO	5,76	5,25	5,24	5,30	7,08	6,35	4,14	4,43	9,80	8,51
CaO	9,17	10,53	10,81	10,68	11,42	11,02	5,03	8,90	10,36	10,58
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,10	0,00	0,03	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00
K <sub>2</sub> O	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Summe	99,72	99,60	100,39	100,41	99,63	100,20	100,02	100,22	100,30	100,00
Kationen auf der Basis von 12 Sauerstoffen:										
Si	3,023	3,037	2,961	2,975	2,993	2,985	2,998	2,998	2,989	2,985
Ti	0,004	0,000	0,002	0,005	0,000	0,000	0,001	0,003	0,004	0,004
Al	1,970	1,961	1,978	1,957	1,981	1,964	1,969	1,959	1,978	1,970
Cr	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,003	0,003	0,008
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe <sup>2+</sup>	1,529	1,461	1,570	1,574	1,275	1,397	1,957	1,672	1,085	1,193
Mn	0,665	0,607	0,607	0,613	0,809	0,729	0,490	0,517	1,096	0,963
Mg	0,028	0,031	0,028	0,027	0,020	0,047	0,173	0,119	0,028	0,038
Ca	0,761	0,874	0,900	0,889	0,938	0,909	0,428	0,747	0,832	0,861
Na	0,013	0,015	0,000	0,005	0,000	0,003	0,001	0,003	0,002	0,000
K	0,002	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Summe	7,995	7,990	8,049	8,044	8,017	8,035	8,017	8,020	8,018	8,023

Fortsetzung auf der nächsten Seite.





Tab. A-4.02 (Spurenelemente). Fortsetzung.

Probe	Grt I LO-1 Rand	Grt I LO-1 Rand	Grt II LA-41 Kern	Grt II LA-41 Rand
Analyse	L5	L7	L25	L23
Sc	59,0	61,8	48,2	52,0
V	348	326	91,9	68,8
Co	53,6	51,5	60,7	57,7
Ni	<3,4	<1,7	4,9	9,5
Cu	<0,4	<0,3	<0,3	<0,2
Zn	112	116	62,5	68,2
Ga	17,0	17,4	6,4	7,4
Rb	<0,04	<0,02	0,08	0,4
Sr	0,1	0,5	0,3	1,0
Y	28,5	28,5	47,4	35,4
Zr	1,7	1,6	10,1	4,4
Nb	<0,02	0,01	0,2	0,03
Ba	<0,07	<0,1	0,09	0,8
La	<0,01	<0,02	0,02	0,03
Ce	0,06	0,06	0,1	0,4
Pr	0,06	0,05	0,03	0,07
Nd	1,0	1,2	0,5	0,4
Sm	2,7	2,8	0,6	0,5
Eu	1,8	1,9	0,6	0,3
Gd	5,7	5,8	2,3	1,3
Tb	1,0	0,9	0,7	0,5
Dy	5,5	6,0	6,2	4,7
Ho	1,1	1,1	1,8	1,4
Er	3,0	3,5	7,0	4,1
Tm	0,4	0,5	1,3	0,6
Yb	2,8	2,7	11,1	4,2
Lu	0,4	0,4	1,8	0,6
Hf	0,02	<0,03	0,2	0,05
Ta	<0,01	<0,01	0,01	<0,01
Pb	0,07	<0,06	<0,07	0,1
Th	<0,01	<0,01	0,02	<0,01
U	0,01	0,02	0,02	0,03



## Anhang

**Tab. A-4.03 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Titanate Rutil, Ilmenit und Titanit.

Probe	Rt I AW-20b Kern	Rt I BAI-2 Kern	Rt I EM-2 Kern	Rt I SP-52 Kern	Rt I SP-54 Kern	Rt I SP-56 Kern	Rt I ZEH-1 Kern	Rt I ZEH-7 Kern	Rt I LA-39 Kern	Rt I LO-1 Kern	Ilm II BAI-2 Kern	Ilm II SP-54 Kern	Ilm II TO-51 Kern
Analyse	AW20-4	BAI2-98	EM2-59	SP52-73	SP54-2	SP56-125	ZEH1-1	ZEH7-1	LA39-20	LO1-34	BAI2-97	SP54-37	TO51-54
SiO <sub>2</sub>	0,00	0,03	0,02	0,21	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0,32	0,02	0,02	0,21
TiO <sub>2</sub>	98,77	97,90	99,63	98,59	99,04	98,74	98,26	99,13	99,45	98,09	51,40	52,45	50,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,08	0,18	0,01	0,05	0,03	0,00	0,03	0,15	0,06	0,01	0,00	0,03
FeO	0,47	0,66	0,48	0,89	0,85	0,80	0,63	0,73	0,39	1,03	45,41	45,49	45,98
MnO	0,02	0,03	0,01	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	1,00	0,94	0,99
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,89	0,32	0,00
CaO	0,36	0,38	0,22	0,35	0,41	0,49	0,19	0,15	0,44	0,57	0,09	0,05	0,30
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03
K <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
F	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	99,64	99,11	100,58	100,14	100,44	100,15	99,13	100,09	100,47	100,12	98,84	99,28	98,36
Kationen auf der Basis von 2 (Rt), 3 (Ilm) und 5 (Ttn) Sauerstoffen:													
Si	0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,005
Ti	0,993	0,990	0,993	0,987	0,989	0,989	0,993	0,992	0,992	0,982	0,979	1,000	0,978
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,005	0,007	0,005	0,010	0,009	0,009	0,007	0,008	0,004	0,012	0,042	0,000	0,034
Fe <sup>2+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,920	0,965	0,951
Mn	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,020	0,022
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,012	0,000
Ca	0,005	0,006	0,003	0,005	0,006	0,007	0,003	0,002	0,006	0,008	0,002	0,001	0,008
Na	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Summe	1,004	1,005	1,004	1,006	1,006	1,006	1,003	1,004	1,005	1,008	2,000	1,999	2,000

**Aufgrund des unbekanntes Gehaltes an volatilen Komponenten wurde bei den Hoch-Al-Titaniten auf die Formelberechnung verzichtet.**

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-4.03 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Ilm II ZEH-7 Kern	Ilm II LA-39 Kern	Ilm II LA-41 Kern	Ilm III GÖ-2 Kern	Ilm III TO-48 Kern	Ilm IIIB ZEH-1 Kern	Ttn III LA-1 Kern	Ttn III LA-2 Kern	Ttn III TO-48 Kern	Ttn III SBL-6 Kern	Ttn IIIB OP-2 Kern
Analyse	ZEH7-81	LA39-136	LA41-11	GÖ2-53	TO48-122	ZEH1-50	LA1-163	LA2-81	TO48-135	SBL6-231	OP2-101
SiO <sub>2</sub>	0,03	0,02	0,00	0,00	0,03	0,05	29,84	30,46	30,03	29,90	30,67
TiO <sub>2</sub>	49,89	53,89	53,53	50,88	48,57	51,01	37,61	37,99	38,77	38,16	38,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,32	1,04	0,85	0,64	1,39
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,04	0,08	0,16	0,00	0,00	0,13	0,03	0,00	0,00	0,04
FeO	48,37	41,51	42,90	40,06	41,88	32,18	0,38	0,61	1,09	0,68	0,34
MnO	0,44	0,59	0,51	8,99	7,78	16,37	0,01	0,06	0,20	0,07	0,09
MgO	0,02	3,28	2,27	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,21	0,01	0,06	0,13	0,25	0,33	28,01	28,25	28,05	28,07	28,46
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,00	0,04	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,004
K <sub>2</sub> O	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,04	0,02	0,00	0,007
F	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,26	0,26	0,41	0,10	0,28
Summe	99,03	99,34	99,37	100,26	98,54	99,97	97,30	98,48	99,02	97,53	99,578
Kationen auf der Basis von 2 (Rt), 3 (Ilm) und 5 (Ttn) Sauerstoffen:											
Si	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	1,000	1,008	0,991	1,001	1,003
Ti	0,953	1,003	1,003	0,960	0,931	0,964	0,948	0,946	0,962	0,961	0,949
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052	0,040	0,033	0,025	0,054
Cr	0,000	0,001	0,001	0,003	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,094	0,000	0,000	0,078	0,137	0,071	0,011	0,017	0,030	0,019	0,009
Fe <sup>2+</sup>	0,934	0,859	0,894	0,763	0,756	0,606	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,009	0,012	0,011	0,191	0,168	0,348	0,000	0,002	0,005	0,002	0,002
Mg	0,001	0,121	0,084	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,006	0,000	0,002	0,004	0,007	0,009	1,006	1,002	0,992	1,007	0,997
Na	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
K	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
Summe	2,000	1,996	1,997	2,000	2,000	2,000	3,020	3,017	3,015	3,016	3,016

**Aufgrund des unbekanntes Gehaltes an volatilen Komponenten wurde bei den Hoch-Al-Titaniten auf die Formelberechnung verzichtet.**

Anhang

**Tab. A-4.04 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Amphibole.

Probe	Am IIIAa/opx AW-20b Kern Analyse	Am IIIAd SP-56B Kern SP56-101	Am IIIAd SP-56B Rand SP56-100	Am IIIAd SP-54 Kern SP45-169	Am IIIAd SP-54 Rand SP45-167	Am IIIAd LA-39 Kern LA39-12	Am IIIAd LA-39 Rand LA39-13	Am IIIAb SP-56B Kern SP56-11	Am IIIAb SP-56B Rand SP56-12	Am IIIB BAI-2 Kern BAI2-73	Am IIIB BAI-2 Rand BAI2-74	Am IIIB EM-2 Kern EM2-29
SiO <sub>2</sub>	42,92	43,37	42,57	41,453	41,434	43,75	43,49	45,47	48,39	42,59	45,75	47,69
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,12	0,14	0,255	0,158	1,47	1,39	0,35	0,25	1,37	1,24	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,65	12,17	13,04	14,7	15,607	13,51	13,74	9,64	6,99	12,41	9,42	9,98
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,07	0,00	0,023	0	0,34	0,32	0,02	0,04	0,09	0,13	0,01
FeO <sub>t</sub>	16,67	18,27	18,33	12,451	12,835	7,89	7,46	17,49	16,30	15,80	15,32	10,02
MnO	0,36	0,30	0,27	0,129	0,158	0,17	0,10	0,24	0,21	0,32	0,30	0,16
MgO	10,79	10,14	10,08	12,585	12,515	15,33	15,37	11,23	12,82	10,13	11,56	15,52
CaO	10,32	10,36	10,51	11,219	10,807	11,92	11,67	11,19	11,27	11,06	10,96	11,97
Na <sub>2</sub> O	2,22	1,79	1,81	2,491	2,529	3,08	2,98	1,27	0,93	1,63	1,36	1,51
K <sub>2</sub> O	0,34	0,45	0,50	0,593	0,535	0,19	0,25	0,50	0,28	0,78	0,49	0,46
F	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,15	0,10	<0,10
Cl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	97,54	97,03	97,26	96,256	96,877	97,64	96,75	97,40	97,48	96,18	96,53	97,59
Kationen auf Basis von 23 Sauerstoffen:												
Si	6,315	6,451	6,318	6,153	6,086	6,292	6,289	6,721	7,069	6,412	6,792	6,830
Ti	0,030	0,013	0,016	0,028	0,017	0,159	0,151	0,039	0,028	0,155	0,139	0,028
Al	2,368	2,133	2,281	2,571	2,701	2,290	2,341	1,679	1,203	2,202	1,649	1,685
Cr	0,002	0,008	0,000	0,003	0,000	0,039	0,036	0,002	0,004	0,011	0,015	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,639	0,699	0,785	0,465	0,590	0,128	0,157	0,585	0,536	0,293	0,321	0,268
Fe <sup>2+</sup>	1,411	1,573	1,490	1,080	0,986	0,822	0,745	1,576	1,455	1,696	1,581	0,932
Mn	0,045	0,038	0,034	0,016	0,020	0,020	0,012	0,031	0,025	0,041	0,037	0,019
Mg	2,367	2,249	2,230	2,785	2,740	3,286	3,313	2,474	2,791	2,274	2,559	3,313
Ca	1,626	1,650	1,671	1,784	1,700	1,837	1,808	1,772	1,764	1,784	1,744	1,836
Na	0,633	0,515	0,520	0,717	0,720	0,859	0,834	0,363	0,264	0,476	0,390	0,420
K	0,064	0,086	0,095	0,112	0,100	0,035	0,046	0,094	0,052	0,149	0,094	0,084
Summe	15,499	15,416	15,441	15,714	15,661	15,767	15,733	15,336	15,190	15,493	15,319	15,416

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Anhang

**Tab. A-4.04 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Am IIIB EM-2 Rand	Am IIIB FRNO-52 Kern	Am IIIB FRNO-52 Rand	Am IIIB LA-41 Kern	Am IIIB LA-41 Rand	Am IIIB LO-1 Kern	Am IIIB LO-1 Rand	Am IIIB OP-2 Kern	Am IIIB OP-2 Rand	Am IIIB SP-52 Kern	Am IIIB SP-52 Rand	Am IIIB ZEH-1 Kern
Analyse	EM2-27	FRNO52-42	FRNO52-43	LA41-10	LA41-8	LO1-15	LO1-16	OP2-3	OP2-4	SP52-4	SP52-5	ZEH1-98
SiO <sub>2</sub>	47,36	41,14	41,88	41,92	41,36	42,55	42,32	43,85	44,34	43,27	46,14	45,42
TiO <sub>2</sub>	0,23	1,56	1,89	1,02	0,96	0,78	1,17	1,13	1,32	1,45	1,09	0,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,21	13,07	12,53	14,69	15,39	11,49	11,23	10,81	10,46	11,27	8,58	10,21
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,00	0,06	0,10	0,00	0,08	0,18	0,14	0,02	0,03	0,04
FeO <sub>t</sub>	10,40	18,08	17,75	9,36	9,49	14,64	14,99	16,68	16,39	18,11	16,87	17,82
MnO	0,21	0,26	0,33	0,09	0,07	0,06	0,08	0,32	0,33	0,41	0,37	0,34
MgO	15,52	8,32	8,54	13,67	13,59	12,80	12,29	10,27	10,14	9,31	10,83	10,43
CaO	11,66	10,80	10,77	11,26	11,34	11,29	11,02	11,36	11,52	11,15	11,02	11,14
Na <sub>2</sub> O	1,53	1,68	1,58	2,70	2,99	2,61	2,79	1,34	1,34	1,19	0,97	1,17
K <sub>2</sub> O	0,50	0,92	0,81	1,26	0,66	0,55	0,61	1,15	0,98	0,68	0,49	0,53
F	<0,10	0,11	<0,10	<0,10	<0,10	0,17	0,12	0,18	0,12	0,15	0,12	0,16
Cl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	97,63	95,84	96,07	96,02	95,93	96,78	96,56	97,10	96,95	96,85	96,40	97,79
Kationen auf Basis von 23 Sauerstoffen:												
Si	6,773	6,297	6,375	6,192	6,101	6,327	6,345	6,579	6,658	6,510	6,895	6,710
Ti	0,025	0,180	0,216	0,113	0,106	0,088	0,132	0,128	0,149	0,164	0,123	0,078
Al	1,722	2,358	2,248	2,556	2,675	2,014	1,984	1,912	1,852	1,998	1,511	1,778
Cr	0,001	0,002	0,000	0,007	0,012	0,000	0,010	0,021	0,016	0,003	0,004	0,005
Fe <sup>3+</sup>	0,391	0,297	0,277	0,160	0,214	0,514	0,372	0,248	0,151	0,390	0,346	0,459
Fe <sup>2+</sup>	0,852	2,017	1,983	0,996	0,956	1,307	1,507	1,844	1,907	1,888	1,762	1,742
Mn	0,025	0,034	0,043	0,012	0,009	0,008	0,010	0,041	0,042	0,052	0,046	0,043
Mg	3,310	1,900	1,938	3,010	2,989	2,837	2,747	2,298	2,270	2,089	2,412	2,297
Ca	1,787	1,771	1,756	1,782	1,792	1,799	1,770	1,826	1,853	1,797	1,765	1,763
Na	0,425	0,497	0,466	0,774	0,855	0,752	0,811	0,391	0,390	0,347	0,282	0,335
K	0,090	0,180	0,157	0,238	0,124	0,105	0,116	0,219	0,187	0,130	0,092	0,100
Summe	15,402	15,533	15,458	15,840	15,832	15,750	15,803	15,507	15,473	15,369	15,238	15,309

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Anhang

**Tab. A-4.04 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Am IIIB ZEH-1 Rand	Am III FE-81 Kern	Am III FE-81 Rand	Am III GÖ-2 Kern	Am III GÖ-2 Rand	Am III GÖ-3 Kern	Am III GÖ-3 Rand	Am III GÖ-9 Kern	Am III GÖ-9 Rand	Am III LA-1 Kern	Am III LA-1 Rand	Am III LA-2 Kern
Analyse	ZEH1-99	FE81-73	FE81-72	GÖ2-46	GÖ2-47	GÖ3-22	GÖ3-23	GÖ9-3	GÖ9-1	LA1-27	LA1-25	LA2-47
SiO <sub>2</sub>	43,86	45,28	45,06	44,21	44,54	45,02	47,42	45,29	45,60	43,24	49,94	39,29
TiO <sub>2</sub>	0,93	0,64	0,72	0,96	1,16	1,04	0,99	0,74	0,85	1,86	0,86	2,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,27	9,60	9,64	9,97	9,22	9,66	7,06	9,42	9,79	11,34	4,99	12,62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,04	0,11	0,04	0,03	0,01	0,00	0,01	0,18	0,19	0,07
FeO <sub>t</sub>	18,19	13,28	14,62	16,27	16,37	18,43	17,66	17,03	17,19	15,18	12,69	23,58
MnO	0,39	0,35	0,31	0,33	0,25	0,38	0,31	0,33	0,39	0,23	0,20	0,24
MgO	9,04	13,20	12,72	11,39	11,47	11,04	12,29	11,88	11,36	10,88	14,12	5,21
CaO	11,24	12,02	12,12	10,34	10,50	10,58	10,54	10,03	10,50	11,58	12,02	11,19
Na <sub>2</sub> O	1,27	1,04	1,10	1,29	1,25	1,44	0,94	1,54	1,64	1,68	0,68	1,69
K <sub>2</sub> O	0,72	1,04	0,91	0,30	0,35	0,25	0,19	0,40	0,39	0,85	0,30	1,63
F	0,12	0,26	0,16	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,12	<0,10	<0,10
Cl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	97,97	96,51	97,24	95,16	95,15	97,86	97,41	96,66	97,71	97,01	95,99	97,52
Kationen auf Basis von 23 Sauerstoffen:												
Si	6,520	6,697	6,643	6,639	6,705	6,626	6,971	6,701	6,708	6,467	7,356	6,149
Ti	0,104	0,071	0,080	0,108	0,132	0,115	0,110	0,083	0,094	0,209	0,096	0,236
Al	2,150	1,673	1,675	1,765	1,636	1,676	1,224	1,643	1,697	1,998	0,867	2,328
Cr	0,006	0,006	0,004	0,013	0,005	0,003	0,001	0,000	0,001	0,021	0,022	0,009
Fe <sup>3+</sup>	0,327	0,392	0,479	0,651	0,579	0,732	0,576	0,707	0,537	0,172	0,104	0,194
Fe <sup>2+</sup>	1,934	1,251	1,324	1,392	1,481	1,536	1,595	1,400	1,577	1,726	1,458	2,891
Mn	0,049	0,044	0,038	0,042	0,032	0,047	0,038	0,041	0,049	0,029	0,025	0,032
Mg	2,004	2,910	2,796	2,549	2,575	2,422	2,693	2,620	2,492	2,426	3,101	1,216
Ca	1,790	1,904	1,915	1,664	1,693	1,667	1,659	1,590	1,655	1,855	1,896	1,875
Na	0,367	0,299	0,314	0,377	0,365	0,411	0,268	0,441	0,466	0,486	0,195	0,512
K	0,137	0,197	0,172	0,057	0,066	0,048	0,035	0,076	0,074	0,163	0,056	0,325
Summe	15,387	15,444	15,440	15,256	15,269	15,283	15,170	15,301	15,350	15,553	15,177	15,768

Fortsetzung auf der nächsten Seite.



Anhang

**Tab. A-4.04 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Am III LA-2 Rand	Am III SBL-6 Kern	Am III SBL-6 Rand	Am III TO-48 Kern	Am III TO-48 Rand	Am III TO-51 Kern	Am III TO-51 Rand	Am III ZEH-7 Kern	Am III ZEH-7 Rand	Am IVb LA-1 Kern	Am IVb SP-56 Kern	Am IVb AW-20b Kern
Analyse	LA2-48	SBL6-187	SBL6-185	TO48-3	TO48-1	TO51-1	TO51-2	ZEH7-93	ZEH7-94	LA1B2P4-10	SP56-154	AW20-132
SiO <sub>2</sub>	41,05	44,47	51,04	42,89	42,86	42,75	44,68	43,09	45,76	52,72	52,98	52,93
TiO <sub>2</sub>	1,88	1,83	0,75	1,58	1,50	1,56	1,39	1,11	0,82	0,01	0,08	0,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,74	9,02	4,20	9,72	9,70	11,02	9,70	10,56	8,25	2,50	2,96	3,44
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,00	0,01	0,01	0,03	0,09	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01
FeO <sub>t</sub>	22,32	17,30	14,84	18,76	17,81	18,64	18,07	15,85	14,51	15,98	13,47	14,64
MnO	0,21	0,23	0,26	0,54	0,41	0,41	0,46	0,21	0,26	0,23	0,26	0,22
MgO	5,22	10,85	13,83	9,52	9,88	8,83	9,77	11,38	13,26	12,95	15,04	15,12
CaO	11,35	11,56	11,98	11,30	11,56	11,29	11,01	11,78	11,56	12,63	11,84	10,86
Na <sub>2</sub> O	1,65	1,69	0,78	1,56	1,38	1,31	1,10	1,33	1,15	0,31	0,37	0,57
K <sub>2</sub> O	1,57	1,01	0,34	0,70	0,83	0,77	0,52	0,67	0,37	0,11	0,11	0,10
F	<0,10	<0,10	<0,10	0,24	0,19	0,18	0,11	0,16	0,11	0,35	<0,10	<0,10
Cl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	98,17	97,96	98,01	96,57	95,94	96,67	96,69	96,02	95,95	97,43	97,10	98,18
Kationen auf Basis von 23 Sauerstoffen:												
Si	6,335	6,650	7,417	6,529	6,550	6,493	6,714	6,479	6,782	7,741	7,675	7,598
Ti	0,218	0,205	0,082	0,181	0,172	0,178	0,157	0,125	0,091	0,001	0,009	0,030
Al	2,318	1,590	0,718	1,743	1,746	1,973	1,717	1,871	1,441	0,433	0,505	0,582
Cr	0,019	0,000	0,001	0,001	0,004	0,011	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,001	0,200	0,173	0,406	0,353	0,312	0,365	0,510	0,587	0,000	0,127	0,180
Fe <sup>2+</sup>	2,880	1,964	1,630	1,981	1,923	2,055	1,905	1,482	1,212	1,962	1,505	1,577
Mn	0,028	0,029	0,032	0,069	0,053	0,052	0,058	0,027	0,032	0,029	0,032	0,027
Mg	1,202	2,419	2,997	2,162	2,250	2,000	2,189	2,550	2,931	2,834	3,248	3,236
Ca	1,876	1,851	1,865	1,844	1,892	1,837	1,772	1,897	1,836	1,987	1,838	1,669
Na	0,494	0,491	0,219	0,459	0,408	0,385	0,322	0,389	0,331	0,087	0,103	0,158
K	0,309	0,192	0,063	0,136	0,161	0,150	0,099	0,129	0,069	0,021	0,019	0,018
Summe	15,679	15,591	15,196	15,512	15,511	15,447	15,298	15,463	15,312	15,095	15,061	15,078

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

## Anhang

**Tab. A-4.04 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Am IVa GÖ-3 Kern	Am IVa GÖ-3 Rand	Am III/host GÖ-3 Kern	Am III/host GÖ-3 Rand	Am III/exsol GÖ-3 Kern	Am III/exsol GÖ-3 Kern	Am III/incl GÖ-3 Kern	Am III/incl GÖ-3 Rand
Analyse	GÖ3-28	GÖ3-29	GÖ-3-1	GÖ3-2	GÖ3-6a	GÖ3-7a	GÖ3-10	GÖ3-9
SiO <sub>2</sub>	43,935	45,225	47,83	48,31	52,74	52,85	53,31	52,98
TiO <sub>2</sub>	1,039	1,019	0,88	0,70	0,12	0,13	0,12	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,707	9,387	6,77	6,64	1,11	1,01	0,99	1,32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,007	0,022	0,08	0,08	0,00	0,05	0,00	0,00
FeO <sub>t</sub>	17,412	17,16	16,81	16,96	24,93	25,95	24,57	24,96
MnO	0,275	0,307	0,43	0,39	0,81	0,65	0,76	0,62
MgO	11,127	11,708	12,80	13,10	15,67	15,54	16,42	16,11
CaO	10,677	10,602	10,79	10,59	1,29	1,08	1,31	2,05
Na <sub>2</sub> O	1,595	1,351	1,03	0,89	0,15	0,13	0,13	0,14
K <sub>2</sub> O	0,281	0,273	0,14	0,16	0,01	0,00	0,01	0,05
F	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Cl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Summe	97,06	97,05	97,57	97,81	96,84	97,39	97,61	98,36
Kationen auf Basis von 23 Sauerstoffen:								
Si	6,509	6,673	6,993	7,038	7,865	7,858	7,859	7,772
Ti	0,116	0,113	0,097	0,076	0,013	0,015	0,013	0,015
Al	1,869	1,632	1,167	1,140	0,196	0,178	0,172	0,228
Cr	0,001	0,003	0,009	0,009	0,000	0,006	0,000	0,000
Fe <sup>3+</sup>	0,694	0,698	0,615	0,590	0,052	0,072	0,083	0,151
Fe <sup>2+</sup>	1,463	1,419	1,440	1,476	3,057	3,155	2,945	2,911
Mn	0,035	0,038	0,054	0,048	0,102	0,082	0,095	0,077
Mg	2,457	2,576	2,791	2,844	3,483	3,445	3,609	3,523
Ca	1,695	1,676	1,691	1,653	0,207	0,172	0,206	0,322
Na	0,458	0,386	0,291	0,252	0,042	0,037	0,038	0,040
K	0,053	0,051	0,027	0,030	0,002	0,000	0,002	0,009
Summe	15,349	15,266	15,174	15,157	15,019	15,018	15,021	15,048

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**



## Anhang

**Tab. A-4.04 (Spurenelemente). Fortsetzung.**

Probe	Am III	Am III	Am III	Am III	Am III	Am III	Am IIIB	Am IIIB
	GÖ-2	GÖ-2	SBL-6	SBL-6	ZEH-7	ZEH-7	OP-2	OP-2
Analyse	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand
	L8	L15	L5	L3	L14	L12	L6	L9
Sc	65,8	71,9	73,1	71,5	61,6	67,6	68,3	66,3
V	479	512	437	414	453	506	550	519
Co	55,9	59,4	65,4	63,5	42,6	42,1	56,5	55,2
Ni	56,6	46,1	84,1	82,9	7,9	8,1	73,1	80,6
Cu	369	472	0,3	6,7	<0,2	<0,3	66,0	84,8
Zn	148	152	161	160	167	166	140	163
Ga	18,0	19,0	19,3	19,0	21,8	21,7	23,9	23,7
Rb	3,8	6,5	9,9	9,7	1,7	2,1	6,4	5,7
Sr	19,1	19,3	23,0	23,6	32,8	31,8	14,9	13,6
Y	22,6	25,3	17,2	17,0	51,8	41,0	33,0	29,6
Zr	22,3	27,2	29,5	34,0	14,9	9,9	25,1	23,5
Nb	0,5	0,6	1,0	1,1	0,9	0,6	2,0	1,9
Ba	26,7	36,6	47,8	50,6	12,1	17,9	41,2	36,0
La	3,1	3,4	4,9	5,1	3,5	2,1	3,7	3,7
Ce	9,7	11,7	10,3	10,2	15,1	8,9	10,6	9,5
Pr	1,6	1,9	1,3	1,3	3,0	1,8	1,7	1,5
Nd	8,5	10,4	6,9	6,6	16,8	9,9	8,9	8,4
Sm	2,8	3,3	1,7	1,8	6,8	3,8	3,0	3,0
Eu	1,2	1,2	0,8	0,7	2,5	2,0	1,1	0,9
Gd	2,6	3,5	2,3	2,2	7,0	4,6	4,2	4,0
Tb	0,6	0,7	0,4	0,3	1,3	1,0	0,8	0,7
Dy	4,0	4,6	2,8	2,9	8,8	6,7	5,2	4,9
Ho	0,9	0,9	0,6	0,6	1,8	1,4	1,2	1,1
Er	2,5	2,5	1,7	1,9	5,3	4,3	3,2	3,0
Tm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,7	0,5	0,5
Yb	2,8	2,8	1,8	2,4	5,5	5,0	3,8	3,3
Lu	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,5
Hf	0,8	1,1	1,3	1,6	1,3	0,7	1,0	1,1
Ta	<0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	<0,01	0,10	0,10
Pb	0,9	1,0	1,5	1,7	1,8	2,0	4,1	3,8
Th	0,4	0,4	0,08	0,09	0,2	0,07	0,03	0,03
U	0,3	0,3	0,0	0,2	0,6	0,6	0,1	0,1

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Tab. A-4.04 (Spurenelemente). Fortsetzung.

Probe	Am IIIB	Am IIIB	Am IIIB	Am IIIB	Am IIIB	Am IIIB
	LO-1	LO-1	LA-41	LA-41	SP-52	SP-52
Analyse	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand
	L6	L3	L9	L8	L7	L8
Sc	41,3	41,6	16,7	22,7	105	101
V	898	1193	370	307	605	598
Co	76,7	78,1	84,9	78,2	46,3	45,3
Ni	9,5	15,3	197	188	7,0	5,8
Cu	<0,6	<0,5	0,3	0,6	1,5	1,5
Zn	253	309	131	131	205	203
Ga	32,8	37,5	25,1	26,9	22,7	26,8
Rb	8,4	3,8	8,7	10,6	6,3	8,3
Sr	24,2	38,0	26,6	26,1	22,1	24,6
Y	5,7	2,4	2,5	4,4	70,8	62,9
Zr	8,0	11,2	18,6	21,6	33,3	31,1
Nb	0,1	<0,04	0,2	0,2	7,2	7,0
Ba	24,9	11,3	12,7	13,4	51,8	64,9
La	0,3	0,03	0,4	1,0	2,1	2,3
Ce	1,4	0,1	1,8	4,3	7,7	7,8
Pr	0,3	0,07	0,3	0,6	1,3	1,3
Nd	1,4	0,6	0,9	2,6	8,7	8,0
Sm	1,0	0,5	0,3	0,9	6,5	5,6
Eu	0,8	0,2	0,4	0,5	1,7	2,0
Gd	1,0	0,9	0,4	0,8	12,4	9,6
Tb	0,2	0,1	0,10	0,2	2,3	1,9
Dy	1,4	0,8	0,6	1,0	13,7	11,7
Ho	0,2	0,1	0,1	0,1	2,8	2,5
Er	0,6	0,2	0,2	0,5	7,3	6,6
Tm	0,1	0,02	0,02	0,04	1,0	1,0
Yb	0,2	0,1	0,08	0,3	7,2	6,6
Lu	0,1	<0,02	0,01	0,04	0,9	1,1
Hf	0,3	0,7	0,6	0,9	1,3	1,1
Ta	<0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,1	0,1
Pb	2,1	1,4	0,7	0,6	3,8	5,0
Th	<0,02	<0,02	0,02	0,08	0,07	0,10
U	0,04	<0,01	0,09	0,1	0,2	0,3

Anhang

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Plagiokläse.

Probe	Pl II/cpx I LA-41 Kern	Pl IIa AW-20b Kern	Pl IIa AW-20b Rand	Pl IIb SP-54 Kern	Pl IIb SP-54 Rand	Pl IIb LO-1 Kern	Pl IIb LO-1 Rand	Pl IIc AW-20b Kern	Pl IIc AW-20b Rand	Pl IIc SP-56B Kern	Pl IIc SP-56B Kern	Pl IIIc AW-20b Kern	Pl IIIc SP-56B Rand
Analyse	LA41-105	AW20-38	AW20-41	SP54-107	SP54-106	LO1-42	LO1-41	AW20-53	AW20-54	SP56-239	SP56-238	AW20-57	SP56-237
SiO <sub>2</sub>	69,99	52,99	52,30	63,08	62,13	61,35	63,05	45,33	45,24	46,34	46,32	58,76	50,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,98	30,80	31,20	23,27	23,47	19,35	24,13	35,95	35,41	34,77	35,24	26,71	32,37
FeO <sub>t</sub>	0,23	0,343	0,360	0,19	0,41	1,62	0,43	0,490	1,32	0,32	0,33	0,147	0,32
CaO	0,36	12,30	13,01	4,04	4,45	8,29	4,79	18,42	17,19	17,25	17,70	7,91	14,13
Na <sub>2</sub> O	11,86	4,44	4,15	9,51	9,06	8,71	9,22	0,983	1,10	1,49	1,45	7,34	3,45
K <sub>2</sub> O	0,04	0,025	0,048	0,40	0,35	0,13	0,18	0,013	0,022	0,03	0,00	0,055	0,01
Summe	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:													
Si	3,015	2,377	2,348	2,783	2,761	2,786	2,750	2,067	2,079	2,125	2,109	2,604	2,278
Al	0,964	1,628	1,651	1,210	1,230	1,036	1,240	1,932	1,918	1,879	1,891	1,395	1,727
Fe <sup>3+</sup>	0,007	0,012	0,012	0,006	0,014	0,056	0,014	0,017	0,046	0,011	0,011	0,005	0,011
Ca	0,017	0,591	0,626	0,191	0,212	0,403	0,224	0,900	0,846	0,848	0,864	0,376	0,685
Na	0,990	0,386	0,361	0,814	0,780	0,767	0,780	0,087	0,098	0,132	0,128	0,630	0,303
K	0,002	0,001	0,003	0,023	0,020	0,008	0,010	0,001	0,001	0,002	0,000	0,003	0,001
Summe	4,996	4,997	5,002	5,027	5,017	5,055	5,018	5,003	4,989	4,997	5,003	5,013	5,004

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI IIIc LA-39 Kern	PI IIIc LA-39 Rand	PI IIIAd AW-20b Kern	PI IIIAd AW-20b Rand	PI IIIAd SP-56B Kern	PI IIIAd SP-56B Rand	PI IIIAd SP-54 Kern	PI IIIAd SP-54 Rand	PI IIIAb SP-56B Kern	PI IIIAb SP-56B Rand	PI IIIAb SP-54 Rand	PI IIIAb LO-1 Rand	PI IIIAb LO-1 Rand
Analyse	LA39-117	LA39-118	AW20-128	AW20-129	SP56-131	SP56-133	SP54-134	SP54-135	SP56-259	SP56-258	SP54-68	LO1-46	LO1-47
SiO <sub>2</sub>	57,81	57,63	58,81	51,34	52,09	48,62	49,30	46,95	53,48	59,93	54,98	55,65	53,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,49	27,79	26,07	30,37	31,09	33,14	32,71	34,31	30,17	26,21	29,27	27,91	30,68
FeO <sub>t</sub>	0,09	0,24	0,11	0,34	0,19	0,35	0,16	0,32	0,49	0,33	0,19	1,08	0,53
CaO	8,35	8,78	7,57	12,81	13,35	15,17	14,76	16,74	11,72	7,34	10,91	9,12	11,57
Na <sub>2</sub> O	7,00	6,87	7,36	4,16	3,98	2,74	3,09	1,92	4,78	7,53	5,57	6,59	4,99
K <sub>2</sub> O	0,07	0,05	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	0,07	0,06	0,06	0,06
Summe	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71	100,71
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:													
Si	2,568	2,551	2,627	2,353	2,347	2,221	2,248	2,150	2,403	2,638	2,457	2,500	2,387
Al	1,439	1,449	1,372	1,640	1,651	1,784	1,758	1,851	1,597	1,359	1,541	1,478	1,618
Fe <sup>3+</sup>	0,003	0,008	0,004	0,012	0,007	0,012	0,006	0,011	0,016	0,011	0,006	0,037	0,018
Ca	0,398	0,416	0,362	0,629	0,644	0,743	0,721	0,821	0,564	0,346	0,522	0,439	0,555
Na	0,602	0,590	0,637	0,370	0,348	0,242	0,273	0,171	0,417	0,642	0,482	0,574	0,432
K	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003
Summe	5,014	5,017	5,005	5,007	4,998	5,003	5,007	5,005	5,000	5,000	5,013	5,032	5,013

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI IIIAb LA-39 Kern	PI IIIAb LA-39 Rand	PI IIIB BAI-2 Kern	PI IIIB BAI-2 Rand	PI IIIB EM-2 Kern	PI IIIB EM-2 Rand	PI IIIB FRNO-52 Kern	PI IIIB FRNO-52 Rand	PI IIIB LA-39 Kern	PI IIIB LA-39 Rand	PI IIIB LA-41 Kern	PI IIIB LA-41 Rand
Analyse	LA39-120	LA39-119	BAI2-111	BAI2-109	EM2-19	EM2-18	FRNO52-21	FRNO52-19	LA39-45	LA39-44	LA41-22	LA41-21
SiO <sub>2</sub>	59,17	59,56	58,26	52,97	45,08	45,25	57,42	57,43	59,15	57,31	57,98	57,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,40	26,11	26,70	29,99	35,73	35,79	27,41	27,74	26,88	27,89	26,95	27,66
FeO <sub>t</sub>	0,14	0,11	0,22	0,33	0,15	0,23	0,15	0,31	0,14	0,20	0,22	0,22
CaO	7,48	7,25	8,02	12,01	18,22	18,28	8,63	8,89	7,80	8,97	7,97	8,50
Na <sub>2</sub> O	7,43	7,71	7,27	4,89	1,07	1,03	6,77	6,55	7,32	6,57	7,11	7,08
K <sub>2</sub> O	0,06	0,08	0,17	0,07	0,01	0,01	0,13	0,10	0,05	0,04	0,16	0,15
Summe	100,71	100,71	100,64	100,26	100,25	100,58	100,52	101,02	101,34	100,98	100,38	101,01
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:												
Si	2,624	2,637	2,593	2,394	2,072	2,073	2,561	2,550	2,608	2,545	2,586	2,551
Al	1,379	1,363	1,401	1,598	1,936	1,932	1,441	1,452	1,397	1,460	1,416	1,449
Fe <sup>3+</sup>	0,005	0,003	0,008	0,011	0,005	0,008	0,005	0,010	0,005	0,007	0,008	0,007
Ca	0,355	0,344	0,382	0,582	0,897	0,898	0,413	0,423	0,368	0,427	0,381	0,405
Na	0,639	0,662	0,628	0,429	0,095	0,092	0,585	0,564	0,626	0,566	0,614	0,610
K	0,003	0,004	0,010	0,004	0,000	0,000	0,008	0,006	0,003	0,002	0,009	0,008
Summe	5,005	5,013	5,021	5,018	5,006	5,003	5,012	5,004	5,006	5,006	5,014	5,030

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**



Anhang

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI IIIB OP-2 Kern	PI IIIB OP-2 Rand	PI IIIB SP-52 Kern	PI IIIB SP-52 Rand	PI IIIB ZEH-1 Kern	PI IIIB ZEH-1 Rand	PI IIIB SP-56B Kern	PI IIIB SP-56B Rand	PI IIIB SP-54 Kern	PI IIIB SP-54 Rand	PI III FE-81 Kern	PI III FE-81 Rand	PI III GÖ-2 Kern
Analyse	OP2-58	OP2-56	SP52-23	SP52-22	ZEH1-137	ZEH1-136	SP56-246	SP56-243	SP54-122	SP54-121	FE81-49	FE81-50	GÖ2-85
SiO <sub>2</sub>	60,75	58,78	57,16	53,37	55,31	53,18	51,27	57,18	62,42	63,37	56,24	56,03	56,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,20	25,84	28,11	30,70	28,88	30,48	31,66	27,83	23,99	23,12	28,16	28,28	27,54
FeO <sub>t</sub>	0,06	0,62	0,15	0,10	0,18	0,21	0,18	0,24	0,11	0,22	0,30	0,34	0,14
CaO	6,32	7,41	9,01	11,81	10,55	12,50	13,76	8,98	4,54	4,41	10,07	10,34	9,28
Na <sub>2</sub> O	7,89	7,30	6,57	4,85	5,45	4,63	3,64	6,62	9,20	9,34	5,85	5,62	6,37
K <sub>2</sub> O	0,24	0,18	0,11	0,04	0,16	0,10	0,03	0,07	0,35	0,31	0,15	0,15	0,18
Summe	100,46	100,12	101,11	100,87	100,53	101,10	100,71	100,71	100,71	100,71	100,77	100,76	100,01
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:													
Si	2,690	2,626	2,537	2,392	2,478	2,384	2,317	2,542	2,753	2,788	2,511	2,503	2,538
Al	1,315	1,361	1,470	1,621	1,525	1,610	1,686	1,459	1,247	1,199	1,482	1,489	1,458
Fe <sup>3+</sup>	0,002	0,021	0,005	0,003	0,006	0,007	0,006	0,008	0,004	0,007	0,010	0,011	0,005
Ca	0,300	0,355	0,428	0,567	0,506	0,601	0,666	0,428	0,214	0,208	0,482	0,495	0,447
Na	0,677	0,632	0,565	0,421	0,474	0,402	0,319	0,571	0,787	0,797	0,507	0,487	0,554
K	0,013	0,010	0,006	0,002	0,009	0,006	0,002	0,004	0,020	0,018	0,009	0,009	0,010
Summe	4,997	5,005	5,011	5,007	4,998	5,011	4,997	5,012	5,025	5,016	5,000	4,994	5,013

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI III GÖ-2 Rand	PI III GÖ-3 Kern	PI III GÖ-3 Rand	PI III GÖ-9 Kern	PI III GÖ-9 Rand	PI III LA-2 Kern	PI III LA-2 Rand	PI III SBL-6 Kern	PI III SBL-6 Rand	PI III TO-48 Kern	PI III TO-48 Rand	PI III TO-51 Kern	PI III TO-51 Rand
Analyse	GÖ2-83	GÖ3-25	GÖ3-24	GÖ9-22	GÖ9-21	LA2-54	LA2-52	SBL6-89	SBL6-88	TO48-42	TO48-41	TO51-74	TO51-73
SiO <sub>2</sub>	56,86	54,67	55,47	59,49	59,37	53,54	52,16	59,98	60,86	59,91	59,72	50,99	48,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,82	29,26	29,11	26,19	26,56	30,10	31,43	25,51	25,16	25,27	25,51	31,47	32,25
FeO <sub>t</sub>	0,25	0,08	0,09	0,11	0,18	0,15	0,26	0,35	0,29	0,13	0,24	0,74	1,58
CaO	9,47	10,80	10,39	7,30	7,48	12,03	13,28	6,56	6,38	6,86	7,03	13,57	14,59
Na <sub>2</sub> O	6,49	5,40	5,73	7,29	7,30	4,67	4,07	7,50	7,74	7,68	7,51	3,65	2,50
K <sub>2</sub> O	0,15	0,15	0,12	0,22	0,14	0,17	0,12	0,47	0,34	0,18	0,11	0,06	0,08
Summe	101,04	100,36	100,92	100,59	101,03	100,67	101,33	100,37	100,78	100,03	100,20	100,48	99,56
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:													
Si	2,531	2,456	2,475	2,638	2,623	2,406	2,339	2,665	2,689	2,669	2,659	2,310	2,232
Al	1,459	1,549	1,531	1,369	1,383	1,595	1,661	1,336	1,310	1,327	1,339	1,680	1,748
Fe <sup>3+</sup>	0,008	0,003	0,003	0,004	0,006	0,005	0,009	0,012	0,010	0,004	0,008	0,025	0,055
Ca	0,452	0,520	0,497	0,347	0,354	0,579	0,638	0,312	0,302	0,328	0,335	0,659	0,719
Na	0,560	0,470	0,496	0,626	0,625	0,407	0,354	0,646	0,663	0,663	0,648	0,320	0,223
K	0,009	0,008	0,007	0,013	0,008	0,010	0,007	0,026	0,019	0,010	0,006	0,003	0,005
Summe	5,019	5,007	5,009	4,996	4,999	5,002	5,007	4,997	4,993	5,002	4,995	4,998	4,980

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

**Tab. A-4.05 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI III ZEH-7 Kern	PI III ZEH-7 Rand
Analyse	ZEH7-67	ZEH7-65
SiO <sub>2</sub>	51,22	55,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,11	27,94
FeO <sub>t</sub>	0,24	0,33
CaO	13,32	9,70
Na <sub>2</sub> O	4,02	6,07
K <sub>2</sub> O	0,08	0,15
Summe	99,98	99,59
Kationen auf Basis von 8 Sauerstoffen:		
Si	2,329	2,505
Al	1,667	1,489
Fe <sup>3+</sup>	0,008	0,011
Ca	0,649	0,470
Na	0,354	0,532
K	0,004	0,009
Summe	5,012	5,016

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4.05 (Spurenelemente). Fortsetzung.**

Probe	PI IIIB LA-39 Rand	PI IIIB LA-39 Rand	PI IIIB LA-41 Kern	PI IIIB LA-41 Rand	PI IIIB OP-2 Kern	PI IIIB OP-2 Rand	PI IIIB SP-52 Kern	PI IIIB SP-52 Rand
Analyse	L16	L17	L34	L32	L5	L3	L12	L13
Sc	0,7	0,2	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5
V	0,2	1,7	<0.15	0,4	<0.16	<0.22	1,8	8,6
Co	0,05	0,3	<0.07	0,3	0,1	<0.08	0,5	1,8
Ni	<1.7	<3.7	<2.4	1,6	<1.9	<1.5	<2.2	<1.9
Cu	<0.3	<0.4	0,3	<0.4	<0.3	<0.2	<0.2	<0.3
Zn	0,4	1,0	1,8	7,1	2,9	2,3	8,2	11,7
Ga	15,1	10,2	17,3	27,3	20,7	20,9	21,1	19,7
Rb	1,5	1,5	5,3	6,9	0,1	<0.04	1,7	2,3
Sr	118	112	290	454	303	286	316	273
Y	0,07	<0.03	<0.03	<0.03	0,01	<0.03	0,07	0,2
Zr	<0.06	<0.05	0,03	<0.08	0,09	<0.04	<0.06	0,07
Nb	<0.02	<0.03	<0.03	<0.03	<0.02	<0.02	<0.04	0,1
Ba	5,2	4,2	59,7	97,5	102,55	65,9	43,1	37,5
La	0,09	0,1	0,3	0,6	0,8	0,7	0,4	0,4
Ce	0,2	0,2	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6
Pr	0,02	0,03	0,04	0,08	0,03	0,04	0,07	0,07
Nd	0,1	0,2	0,08	0,2	0,2	0,2	0,08	<0.08
Sm	0,02	<0.08	<0.07	<0.08	<0.05	<0.05	<0.07	0,07
Eu	0,3	0,2	0,5	0,8	0,4	0,5	0,9	0,6
Gd	0,04	<0.05	<0.05	<0.08	<0.05	0,03	<0.06	0,1
Tb	<0.01	<0.01	<0.01	0,009	<0.01	0,004	0,003	0,006
Dy	0,02	<0.05	0,01	<0.05	<0.03	0,03	<0.03	0,05
Ho	0,011	<0.01	0,003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,003
Er	0,05	<0.05	<0.03	<0.05	<0.03	<0.03	<0.03	<0.05
Tm	<0.01	<0.01	0,002	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,006
Yb	0,02	<0.05	<0.01	<0.08	<0.06	<0.07	<0.05	<0.05
Lu	<0.01	<0.01	<0.01	0,009	<0.01	<0.01	0,003	<0.01
Hf	0,01	<0.04	<0.04	<0.07	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
Ta	<0.01	<0.01	<0.01	0,005	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Pb	0,9	0,8	1,5	2,3	18,8	19,1	16,3	13,7
Th	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,004	0,009	<0.01	<0.01
U	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,007	<0.01

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

**Tab. A-4.05 (Spurenelemente). Fortsetzung.**

Probe	Pl III	Pl III	Pl III	Pl III
	SBL-6	SBL-6	ZEH-7	ZEH-7
Analyse	Kern	Rand	Kern	Rand
	L16	L15	L15	L14
Sc	0,8	1,9	<0,9	<0,9
V	13,1	34,6	<0,5	<0,4
Co	1,7	4,9	0,2	0,2
Ni	<3,1	8,0	<5,9	2,1
Cu	0,1	0,6	<0,8	<0,4
Zn	9,1	14,6	5,5	3,6
Ga	21,1	18,7	19,7	25,8
Rb	2,4	1,3	0,6	<0,2
Sr	381	367	929	997
Y	0,08	0,3	<0,1	<0,09
Zr	0,5	0,9	<0,1	0
Nb	0,03	0,06	<0,1	0,03
Ba	111	104	65,3	73,2
La	1,6	1,4	0,8	1,6
Ce	1,4	1,8	1,4	2,8
Pr	0,09	0,2	0,10	0,3
Nd	0,1	0,5	0,7	1,4
Sm	<0,1	<0,1	<0,2	0,2
Eu	0,4	0,5	0,4	0,7
Gd	<0,07	0,03	<0,2	0,07
Tb	0,01	<0,01	<0,03	<0,02
Dy	0,02	0,02	0,09	<0,08
Ho	<0,01	0,01	0,03	<0,03
Er	<0,06	<0,05	0,03	<0,08
Tm	0,005	<0,01	<0,04	<0,02
Yb	<0,10	<0,07	<0,1	<0,2
Lu	<0,02	<0,01	<0,03	<0,03
Hf	<0,04	<0,04	<0,08	<0,08
Ta	<0,02	<0,01	0,008	<0,02
Pb	9,3	8,8	12,7	16,3
Th	<0,01	0,02	<0,04	<0,04
U	0,03	<0,01	<0,02	<0,03

## Anhang

**Tab. A-4-06 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Biotite.

Probe	Bi III TO-51 Kern	Bi III TO-51 Rand	Bi IIIB BAI-2 Kern	Bi IIIB SP-52 Kern	Bi IIIB SP-52 Rand	Bi IIIB ZEH-1 Kern
Analyse	TO51-35	TO51-36	BAI2-46	SP52-108	SP52-107	ZEH1-12
SiO <sub>2</sub>	35,79	35,41	35,69	36,10	35,53	34,34
TiO <sub>2</sub>	4,57	4,28	3,24	4,86	4,44	3,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,06	15,11	14,99	14,39	14,54	14,86
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,11	0,00	0,03	0,00
FeO <sub>t</sub>	20,43	20,06	17,75	19,88	20,79	21,12
MnO	0,07	0,09	0,12	0,21	0,18	0,22
MgO	10,30	10,19	12,38	10,72	10,98	11,12
CaO	0,14	0,06	0,08	0,01	0,10	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,13	0,26	0,25	0,21	0,18
K <sub>2</sub> O	8,42	8,00	8,38	9,07	8,21	7,36
Summe	94,02	93,35	92,99	95,49	94,99	92,66
Kationen auf der Basis von 11 Sauerstoffen:						
Si	2,756	2,731	2,744	2,738	2,710	2,684
Ti	0,265	0,248	0,188	0,277	0,254	0,202
Al	1,276	1,374	1,358	1,287	1,307	1,368
Cr	0,002	0,002	0,007	0,000	0,002	0,000
Fe <sup>3+</sup>	0,197	0,194	0,171	0,189	0,199	0,207
Fe <sup>2+</sup>	1,118	1,100	0,970	1,072	1,127	1,173
Mn	0,005	0,006	0,008	0,013	0,012	0,015
Mg	1,183	1,172	1,419	1,212	1,248	1,295
Ca	0,011	0,005	0,006	0,001	0,008	0,003
Na	0,032	0,019	0,038	0,036	0,031	0,027
K	0,827	0,788	0,822	0,878	0,799	0,734
Summe	7,672	7,639	7,731	7,704	7,697	7,707

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**



**Tab. A-4.06 (Spurenelemente). Fortsetzung.**

Probe	Bi IIIB	Bi IIIB	Bi IIIB	Bi IIIB
	SP-52	SP-52	SP-52	SP-52
Analyse	Kern	Rand	Kern	Rand
	L6	L3	L5	L4
Sc	0,7	0,2	0,4	0,5
V	9,8	6,7	8,9	9,4
Co	387	338	417	375
Ni	60,0	55,8	60,5	62,0
Cu	9,2	5,0	8,0	5,9
Zn	1,7	<0,9	1,3	1,1
Ga	275	240	246	263
Rb	86,0	81,9	83,0	85,2
Sr	303	300	299	322
Y	2,7	1,6	2,9	2,4
Zr	1,9	0,3	0,8	1,1
Nb	1,7	0,9	1,5	1,4
Ba	10,0	8,1	9,9	10,0
La	1559	1408	1497	1539
Ce	3,5	0,2	0,5	0,8
Pr	6,5	0,4	0,9	0,9
Nd	0,7	0,0	0,1	0,1
Sm	2,7	0,3	0,7	0,6
Eu	0,3	<0,1	0,07	0,1
Gd	0,1	<0,05	0,02	0,03
Tb	0,3	<0,2	0,08	0,3
Dy	0,06	0,02	0,02	0,03
Ho	0,3	0,04	0,2	0,1
Er	0,05	<0,02	0,02	0,02
Tm	0,2	<0,07	0,08	0,1
Yb	0,02	<0,02	0,01	<0,01
Lu	0,3	0,06	0,06	0,1
Hf	0,04	<0,02	0,008	0,006
Ta	0,06	0,1	0,04	0,09
Pb	0,3	0,3	0,3	0,4
Th	4,3	3,5	3,9	4,0
U	<0,01	0,01	0,007	<0,01





## Anhang

**Tab. A-4-07 (Hauptelemente).** Repräsentative Einzelanalysen der Chlorite und Prehnite.

Probe	Chl IV/opx EL-5	Chl IV/opx EL-5	Chl IV/am GÖ-2	Chl IV/am GÖ-2	Chl IV/am GÖ-3	Chl IV/am GÖ-3	Chl IV/am GÖ-9	Chl IV/am GÖ-9	Chl IV/am FRNO-52	Chl IV/am FRNO-52	Chl IV/am SP-52
Analyse	Kern EL5B1-2	Kern EL5B1-8	Rand GÖ2-49	Rand GÖ2-50	Kern GÖ3-12	Kern GÖ3-20	Kern GÖ9-37	Kern GÖ9-52	Kern FRNO52-17	Kern FRNO52-18	Kern SP52-56
SiO <sub>2</sub>	34,423	27,605	25,68	26,87	25,91	26,77	27,50	27,44	26,67	26,91	26,27
TiO <sub>2</sub>	0,018	0	0,20	0,40	0,05	0,03	0,27	0,13	0,12	0,24	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,457	17,951	15,88	17,61	20,10	18,95	18,60	17,98	18,47	17,61	19,16
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,077	0,026	0,00	0,02	0,01	0,04	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00
FeO <sub>t</sub>	18,682	22,913	31,92	22,69	26,89	26,78	26,67	25,94	27,66	27,72	26,76
MnO	0,169	0,235	0,34	0,19	0,64	0,46	0,23	0,50	0,16	0,20	0,20
MgO	14,74	17,506	11,44	16,65	13,79	14,03	13,59	15,54	13,06	13,47	14,00
CaO	4,922	0,134	0,15	0,18	0,17	0,09	0,08	0,08	0,11	0,10	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,018	0,011	0,00	0,02	0,03	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00
K <sub>2</sub> O	0,117	0,019	0,00	0,01	0,02	0,05	0,10	0,00	0,05	0,20	0,04
Summe	88,624	86,402	85,60	84,64	87,60	87,20	87,04	87,65	86,31	86,47	86,59
Kationen auf der Basis von 14 (Chl) bzw. 11 (Prh) Sauerstoffen und 8 (Chl) bzw. 2 (Prh) OH:											
Si	3,457	2,915	2,901	2,901	2,764	2,862	2,934	2,904	2,893	2,921	2,828
Ti	0,001	0,000	0,017	0,033	0,004	0,002	0,022	0,011	0,010	0,020	0,007
Al	1,830	2,234	2,114	2,241	2,527	2,387	2,339	2,243	2,361	2,252	2,431
Cr	0,006	0,002	0,000	0,002	0,001	0,003	0,000	0,001	0,003	0,001	0,000
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe <sup>2+</sup>	1,569	2,023	3,015	2,048	2,399	2,394	2,380	2,296	2,509	2,516	2,409
Mn	0,014	0,021	0,033	0,017	0,058	0,042	0,021	0,045	0,014	0,018	0,018
Mg	2,207	2,755	1,927	2,680	2,192	2,236	2,161	2,453	2,111	2,179	2,246
Ca	0,530	0,015	0,019	0,020	0,019	0,010	0,009	0,009	0,013	0,011	0,009
Na	0,004	0,002	0,000	0,005	0,005	0,002	0,000	0,004	0,000	0,002	0,000
K	0,015	0,003	0,000	0,002	0,003	0,006	0,013	0,001	0,007	0,028	0,006
Summe	9,633	9,970	10,025	9,948	9,972	9,944	9,881	9,966	9,919	9,948	9,953

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-4-07 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Chl IV/am SP-52	Chl IV/am OP-2	Chl IV/am BAI-2	Chl IV/am BAI-2	Chl IV/am FE-81	Chl IV/am SBL-6	Chl IV/am SBL-6	Chl IV/am TO-48	Chl IV/am TO-51	Chl IV/am TO-51	Chl IV/am ZEH-1
Analyse	SP52-71	OP2-8	BAI2-29	BAI2-104	FE81-27	SBL6-69	SBL6-72	TO48-65	TO51-13	TO51-14	ZEH1-74
SiO <sub>2</sub>	28,83	25,54	27,16	27,24	28,85	26,23	26,32	30,44	26,44	25,02	27,83
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,03	0,07	0,04	0,15	0,05	0,04	0,14	0,06	0,05	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,57	20,08	19,15	19,67	16,43	20,01	19,67	15,84	18,44	19,37	17,31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,00	0,08	0,05	0,08	0,02	0,05	0,04	0,00	0,04	0,03
FeO <sub>t</sub>	25,94	27,22	23,22	24,70	23,90	25,15	25,07	23,86	29,30	29,67	26,57
MnO	0,22	0,45	0,22	0,23	0,22	0,21	0,22	0,43	0,21	0,23	0,16
MgO	15,15	12,59	15,19	14,15	16,75	15,06	15,30	14,30	13,24	11,77	14,51
CaO	0,25	0,11	0,19	0,15	0,07	0,16	0,09	1,64	0,04	0,09	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,09	0,00	0,00	0,05
K <sub>2</sub> O	0,05	0,03	0,00	0,01	0,12	0,03	0,03	0,24	0,04	0,01	0,05
Summe	86,12	86,09	85,30	86,24	86,58	86,94	86,81	87,00	87,78	86,25	86,68
Kationen auf der Basis von 14 (Chl) bzw. 11 (Prh) Sauerstoffen und 8 (Chl) bzw. 2 (Prh) OH:											
Si	3,102	2,778	2,906	2,900	3,051	2,786	2,800	3,210	2,846	2,757	2,984
Ti	0,004	0,003	0,005	0,003	0,012	0,004	0,003	0,011	0,005	0,004	0,006
Al	1,975	2,574	2,415	2,469	2,048	2,505	2,465	1,969	2,339	2,516	2,187
Cr	0,003	0,000	0,006	0,005	0,006	0,002	0,004	0,003	0,000	0,004	0,002
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe <sup>2+</sup>	2,335	2,476	2,078	2,200	2,114	2,234	2,230	2,104	2,638	2,733	2,383
Mn	0,020	0,042	0,020	0,021	0,020	0,019	0,020	0,038	0,020	0,021	0,014
Mg	2,430	2,041	2,423	2,246	2,641	2,384	2,426	2,248	2,124	1,933	2,319
Ca	0,028	0,013	0,021	0,017	0,008	0,018	0,010	0,185	0,005	0,010	0,013
Na	0,008	0,007	0,006	0,001	0,001	0,002	0,005	0,019	0,001	0,000	0,011
K	0,007	0,004	0,000	0,001	0,017	0,004	0,004	0,032	0,005	0,001	0,007
Summe	9,913	9,937	9,881	9,862	9,919	9,959	9,966	9,818	9,982	9,980	9,924

**Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

Anhang

**Tab. A-4-07 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Chl IV/am ZEH-1 Rand	Chl IV/am ZEH-7 Kern	Chl IV/am ZEH-7 Kern	Chl IV/bi SP-52 Rand	Chl IV/bi SP-52 Kern	Chl IV/bi OP-2 Kern	Chl IV/bi BAI-2 Kern	Chl IV/bi TO-51 Kern	Chl IV/bi TO-51 Rand	Chl IV/bi ZEH-1 Kern	Chl IV/bi ZEH-1 Rand
Analyse	ZEH1-39	ZEH7-14	ZEH7-86	SP52-36	OP2-52	OP2-74	BAI2-45	TO51-20	TO51-21	ZEH1-21	ZEH1-20
SiO <sub>2</sub>	28,16	29,82	30,09	27,92	26,52	26,72	29,02	28,18	25,43	26,68	26,36
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,07	0,77	0,27	0,04	0,15	0,06	0,42	0,08	0,07	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,17	15,71	15,52	17,32	19,01	18,79	20,16	16,68	19,42	18,86	19,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,01	0,07	0,03	0,06	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01
FeO <sub>t</sub>	23,72	22,48	21,67	27,10	26,17	27,33	20,75	28,35	29,78	26,32	26,62
MnO	0,25	0,06	0,15	0,19	0,36	0,32	0,21	0,19	0,23	0,30	0,27
MgO	15,50	17,93	17,24	13,80	14,03	13,74	14,24	13,84	11,90	14,33	14,01
CaO	0,74	0,19	0,28	0,12	0,02	0,09	3,79	0,11	0,09	0,05	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,01	0,00	0,05
K <sub>2</sub> O	0,07	0,09	0,52	0,25	0,03	0,05	0,06	0,32	0,02	0,01	0,01
Summe	86,75	86,38	86,37	87,00	86,23	87,20	88,33	88,14	86,98	86,64	86,84
Kationen auf der Basis von 14 (Chl) bzw. 11 (Prh) Sauerstoffen und 8 (Chl) bzw. 2 (Prh) OH:											
Si	2,972	3,129	3,155	2,993	2,858	2,863	2,972	3,003	2,775	2,862	2,826
Ti	0,007	0,006	0,061	0,022	0,003	0,012	0,005	0,034	0,006	0,006	0,012
Al	2,261	1,943	1,918	2,189	2,415	2,374	2,434	2,095	2,497	2,384	2,438
Cr	0,001	0,001	0,006	0,002	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe <sup>2+</sup>	2,094	1,973	1,901	2,429	2,358	2,449	1,777	2,527	2,717	2,361	2,387
Mn	0,022	0,006	0,014	0,017	0,032	0,029	0,018	0,018	0,021	0,027	0,024
Mg	2,439	2,806	2,695	2,205	2,254	2,195	2,175	2,199	1,936	2,291	2,239
Ca	0,084	0,022	0,031	0,014	0,002	0,011	0,416	0,012	0,010	0,006	0,009
Na	0,012	0,004	0,009	0,001	0,000	0,000	0,007	0,005	0,003	0,000	0,010
K	0,009	0,012	0,070	0,034	0,004	0,007	0,007	0,044	0,002	0,001	0,001
Summe	9,900	9,901	9,861	9,907	9,931	9,941	9,813	9,938	9,971	9,940	9,948

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

Anhang

**Tab. A-4-07 (Hauptelemente). Fortsetzung.**

Probe	Chl IV/cpx SP-54	Chl IV/cpx SP-54	Prh IV LA-1	Prh IV LA-1	Prh IV ZEW-1	Prh IV ZEW-1
Analyse	Kern SP54-88	Kern SP54-117	Kern LA1-64	Rand LA1-62	Kern ZEW1-6	Rand ZEW1-7
SiO <sub>2</sub>	32,91	33,14	43,33	42,95	43,19	43,52
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,97	13,83	23,63	24,03	24,13	23,30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,06	0,02	0,00	0,00
FeO <sub>t</sub>	19,30	18,10	0,40	0,08	0,05	0,17
MnO	0,13	0,07	0,01	0,01	0,00	0,02
MgO	18,71	19,15	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	1,41	0,69	26,56	26,05	26,27	25,95
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,10	0,13	0,15	0,05	0,09
K <sub>2</sub> O	0,04	0,09	0,04	0,12	0,00	0,01
Summe	86,54	85,20	94,16	93,42	93,71	93,06

Kationen auf der Basis von 14 (Chl) bzw. 11 (Prh) Sauerstoffen und 8 (Chl) bzw. 2 (Prh) OH:

Si	3,381	3,427	3,024	3,016	3,020	3,062
Ti	0,002	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000
Al	1,691	1,685	1,944	1,989	1,988	1,932
Cr	0,001	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,023	0,005	0,003	0,010
Fe <sup>2+</sup>	1,658	1,565	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,011	0,006	0,001	0,001	0,000	0,001
Mg	2,865	2,951	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,155	0,076	1,986	1,960	1,968	1,956
Na	0,009	0,019	0,017	0,021	0,007	0,012
K	0,006	0,011	0,004	0,011	0,000	0,001
Summe	9,778	9,744	7,001	7,003	6,987	6,973

## Anhang

**Tab. A-7.01.** Chemische Zusammensetzung der Gesteine (Haupt- und Spurenelemente).

Probe	OP1	OP2	FRNO52	ZEH1	TO68	SP52	SP56B	EM3B
Einheit	1	1	1	1	1	1	1	1
SiO <sub>2</sub>	46,56	49,10	47,94	53,66	53,03	45,91	43,01	47,90
TiO <sub>2</sub>	1,41	1,88	1,41	0,72	1,20	1,69	1,37	1,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,66	15,23	18,66	16,81	14,50	17,73	19,63	20,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,92	1,73	1,52	1,37	2,45	1,28	3,88	1,06
FeO	9,32	8,26	8,65	7,94	7,74	11,51	9,58	7,81
MnO	0,23	0,19	0,18	0,18	0,15	0,20	0,19	0,15
MgO	7,70	6,28	4,67	5,56	6,70	5,83	5,57	6,61
CaO	11,17	9,82	8,93	9,01	8,50	9,14	10,02	9,15
Na <sub>2</sub> O	2,40	3,20	3,25	1,99	1,49	1,60	1,85	2,06
K <sub>2</sub> O	0,18	0,82	0,97	0,98	1,04	1,59	1,81	0,55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,25	0,15	0,09	0,20	0,12	0,19	0,06
H <sub>2</sub> O	0,97	1,47	1,62	1,23	1,58	0,83	1,89	1,52
CO <sub>2</sub>	0,17	0,15	0,10	0,10	0,13	n.a.	0,05	0,05
Total	98,70	98,38	98,05	99,64	98,71	97,43	99,04	98,65
Mg#	56,07	55,89	48,01	54,56	57,16	47,70	45,77	59,90
Cs	2	3	7	5	8	4	4	7
Rb	10	15	29	35	38	53	56	22
Ba	48	130	245	280	291	320	290	120
Th	0,7	0,9	0,6	1,7	4,9	0,1	0,7	0,5
U	0,3	2,5	0,2	0,7	1,4	0,3	0,3	0,2
Ta	0,09	0,37	0,32	0,19	0,33	0,28	0,25	0,39
Nb	2,1	4,0	6,4	3,8	6,3	5,3	7,2	5,9
Pb	4,6	11,8	7,7	7,2	8,0	13,0	7,6	6,4
Sr	68	133	372	191	160	131	430	283
Zr	80	121	150	64	97	61	45	67
Hf	2,1	3,3	3,7	1,6	2,3	2,0	1,4	1,8
La	3,81	8,25	14,01	10,68	17,42	2,34	9,49	8,67
Ce	9,79	23,51	33,88	24,71	37,43	6,70	24,02	21,58
Pr	1,45	3,78	4,62	3,14	4,64	1,15	3,54	3,36
Nd	7,49	18,11	19,76	12,93	17,76	6,49	15,99	16,01
Sm	2,86	5,19	5,00	3,08	3,87	3,44	4,22	4,86
Eu	1,06	1,93	1,48	0,90	1,05	1,19	1,27	1,33
Gd	4,08	6,16	5,22	3,11	4,25	5,41	4,22	4,89
Tb	n.a.	1,01	n.a.	n.a.	n.a.	0,80	n.a.	n.a.
Dy	5,18	6,90	5,37	2,87	4,73	6,33	4,19	4,65
Ho	1,15	1,43	1,12	0,63	0,97	1,21	0,88	0,97
Er	3,21	4,07	3,16	1,78	2,62	3,28	2,31	2,44
Tm	0,48	0,57	0,46	0,26	0,36	0,46	0,30	0,33
Yb	2,91	3,58	2,90	1,73	2,23	2,82	1,91	1,97
Lu	0,44	0,53	0,44	0,25	0,32	0,41	0,29	0,29
Y	40	38	38	23	34	32	29	30
Sc	n.a.	41,7	n.a.	n.a.	n.a.	28,6	n.a.	n.a.
V	299	336	318	282	337	365	291	223
Cr	341	82	21	55	278	41	D.L.	54
Co	36	35	26	31	19	36	36	26
Ni	44	47	26	4	58	17	10	8
Cu	36	84	25	25	29	50	35	17
Zn	107	84	106	92	115	106	85	97
Ga	18	19	22	18	18	20	20	20
Li	n.a.	41,4	n.a.	n.a.	n.a.	70,1	n.a.	n.a.
Be	n.a.	1,3	n.a.	n.a.	n.a.	0,7	n.a.	n.a.
B	n.a.	7,7	n.a.	n.a.	n.a.	4,8	n.a.	n.a.
Nb/U	6,1	1,6	31,5	5,1	4,6	17,7	21,7	27,4
Ce/Pb	2,1	2,0	4,4	3,4	4,7	0,5	3,2	3,4

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	FE11B	WO4	OP4	FRSO2	FRSO3	FRNO50	FRNO53	ZEH2
Einheit	1	1	1	1	1	1	1	1
SiO <sub>2</sub>	56,01	47,36	49,97	46,22	51,37	48,02	53,00	58,21
TiO <sub>2</sub>	0,79	1,21	2,02	0,55	1,37	2,30	0,75	0,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,41	16,41	12,71	20,67	20,26	19,70	17,71	16,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25	3,50	2,79	1,34	1,18	1,80	1,35	1,26
FeO	6,31	6,82	10,30	4,67	7,18	8,43	7,50	6,64
MnO	0,15	0,16	0,22	0,10	0,16	0,15	0,18	0,18
MgO	5,79	9,48	5,72	7,02	4,12	5,29	4,81	3,73
CaO	6,79	7,63	9,21	11,89	6,89	7,98	8,48	7,26
Na <sub>2</sub> O	2,76	2,55	2,60	1,61	2,90	1,73	2,74	2,92
K <sub>2</sub> O	0,93	1,45	0,95	1,88	1,14	1,15	1,01	0,64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,10	0,15	0,11	0,30	0,26	0,09	0,12
H <sub>2</sub> O	1,72	2,74	1,60	2,46	1,81	1,80	1,53	1,06
CO <sub>2</sub>	0,09	0,07	0,06	0,05	0,11	0,15	0,31	0,13
Total	99,14	99,48	98,30	98,57	98,79	98,76	99,46	99,41
Mg#	60,67	65,32	46,93	70,29	49,75	51,04	52,23	48,73
Cs	7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rb	36	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ba	276	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Th	5,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
U	1,2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ta	0,41	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nb	7,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pb	57,9	7,9	5,6	8,2	9,5	8,3	8,5	23,4
Sr	182	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zr	106	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Hf	2,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
La	22,66	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ce	45,40	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pr	5,28	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nd	19,03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Sm	3,69	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Eu	1,03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Gd	3,19	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Dy	2,97	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ho	0,62	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Er	1,70	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tm	0,22	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Yb	1,44	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lu	0,25	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Y	22	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Sc	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
V	212	331	391	145	215	402	301	162
Cr	116	280	91	83	55	20	41	47
Co	27	38	36	28	23	27	26	23
Ni	15	25	39	8	13	D.L.	6	2
Cu	38	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zn	162	107	108	49	106	92	81	246
Ga	18	20	21	17	24	22	17	18
Li	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Be	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nb/U	6,2							
Ce/Pb	0,8							

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	HA6	SP50A	FE12A	BA11	BA12	ZEH3	ZEH5	MW
Einheit	1	1	1	2	2	1	1	1
SiO <sub>2</sub>	48,75	46,61	50,68	47,63	49,37	41,92	43,97	48,97
TiO <sub>2</sub>	1,36	0,53	0,56	1,67	1,03	4,38	3,57	1,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,44	15,12	15,23	19,15	18,06	14,95	18,08	17,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,06	1,55	1,28	3,04	1,95	3,22	1,75	1,94
FeO	7,48	6,26	7,57	7,82	7,39	11,63	8,93	8,08
MnO	0,15	0,13	0,16	0,22	0,18	0,23	0,19	0,18
MgO	6,69	9,92	9,44	4,36	6,23	8,98	6,06	6,37
CaO	8,82	14,18	6,13	7,91	7,87	5,55	7,21	8,68
Na <sub>2</sub> O	1,89	2,17	0,73	3,04	2,76	1,64	2,43	2,27
K <sub>2</sub> O	0,65	0,44	3,59	1,77	2,09	0,12	0,59	1,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,06	0,18	0,30	0,11	0,02	0,07	0,14
H <sub>2</sub> O	1,46	2,08	3,22	1,69	1,77	4,61	3,05	1,90
CO <sub>2</sub>	0,06	0,18	0,16	0,42	0,15	2,03	2,68	0,34
Total	98,95	99,23	98,93	99,02	98,96	99,28	98,58	98,85
Mg#	61,11	71,96	68,19	45,00	57,43	55,04	53,33	55,74
Cs	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9	n.a.	n.a.	6
Rb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	85	n.a.	n.a.	38
Ba	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	365	n.a.	n.a.	236
Th	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,4	n.a.	n.a.	1,6
U	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,5	n.a.	n.a.	0,8
Ta	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,49	n.a.	n.a.	0,31
Nb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	5,6	n.a.	n.a.	5,4
Pb	9,0	12,5	6,4	20,5	18,1	28,5	502,3	34,5
Sr	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	257	n.a.	n.a.	221
Zr	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	100	n.a.	n.a.	89
Hf	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,6	n.a.	n.a.	2,3
La	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9,92	n.a.	n.a.	10,73
Ce	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	24,68	n.a.	n.a.	25,17
Pr	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3,61	n.a.	n.a.	3,46
Nd	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	16,48	n.a.	n.a.	15,01
Sm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4,49	n.a.	n.a.	4,07
Eu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,25	n.a.	n.a.	1,25
Gd	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4,71	n.a.	n.a.	4,52
Tb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,91
Dy	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4,99	n.a.	n.a.	4,82
Ho	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,05	n.a.	n.a.	1,00
Er	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,89	n.a.	n.a.	2,75
Tm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,44	n.a.	n.a.	0,39
Yb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,76	n.a.	n.a.	2,42
Lu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,39	n.a.	n.a.	0,36
Y	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	34	n.a.	n.a.	32
Sc	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	35,2
V	212	149	217	282	289	769	552	308
Cr	113	359	654	17	128	113	153	143
Co	26	45	45	24	29	43	31	31
Ni	14	42	117	D.L.	5	25	47	27
Cu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	16	n.a.	n.a.	35
Zn	106	77	151	124	105	148	956	148
Ga	21	14	19	25	20	19	22	20
Li	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	55,8
Be	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,0
B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	6,2
Nb/U					10,4			13,2
Ce/Pb					1,4			2,6

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**



## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	STABW	WO2	OP7	HO8	FE82	SBL6	ZEH7	TO48
Einheit	1	2	2	2	2	2	2	2
SiO <sub>2</sub>	3,96	53,85	48,04	45,95	48,17	49,39	49,37	49,12
TiO <sub>2</sub>	0,93	0,98	0,91	1,23	1,05	1,37	1,40	1,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,24	16,51	16,61	19,45	16,46	16,34	18,54	15,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,86	2,00	1,50	2,67	2,29	2,33	0,96	5,24
FeO	1,63	5,25	6,15	7,35	7,69	7,50	8,60	7,48
MnO	0,03	0,16	0,12	0,15	0,27	0,16	0,12	0,27
MgO	1,73	6,36	5,99	7,78	8,60	5,99	5,68	5,13
CaO	1,92	7,13	11,45	8,80	9,43	8,95	8,47	8,89
Na <sub>2</sub> O	0,65	3,12	2,82	2,71	2,77	3,87	1,82	3,91
K <sub>2</sub> O	0,75	2,14	0,57	0,92	0,95	1,55	1,73	0,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,35	0,08	0,12	0,15	0,14	0,17	0,14
H <sub>2</sub> O	0,84	1,55	1,87	1,83	1,68	1,33	1,40	1,09
CO <sub>2</sub>	0,67	0,07	2,45	0,08	0,14	0,11	n.a.	0,36
Total	0,51	99,47	98,56	99,04	99,65	99,03	98,26	99,67
Mg#	7,81	64,12	61,27	61,24	63,59	55,28	54,31	45,45
Cs	2	9	6	5	12	7	17	5
Rb	22	84	19	39	50	64	77	24
Ba	102	428	93	305	180	464	328	227
Th	1,8	7,6	0,3	1,4	2,2	2,3	2,9	1,1
U	0,7	2,8	0,7	0,6	0,7	1,3	1,1	0,9
Ta	0,11	0,83	D.L.	0,27	0,14	0,20	0,45	0,31
Nb	1,6	20,3	1,3	8,4	3,2	3,2	7,1	4,4
Pb	102,6	11,7	6,5	7,2	11,8	6,7	7,9	10,9
Sr	114	447	185	92	468	306	461	320
Zr	32	161	52	58	89	124	70	73
Hf	0,7	3,7	1,3	1,8	1,9	3,0	2,5	1,6
La	6,04	36,19	2,46	15,67	14,82	10,50	16,39	6,90
Ce	11,69	80,21	6,90	35,67	30,55	25,15	39,87	16,87
Pr	1,32	8,91	1,15	4,57	3,69	3,57	5,89	2,47
Nd	4,64	31,46	6,02	18,97	15,09	15,57	25,30	11,45
Sm	0,81	5,98	2,14	4,27	3,52	4,41	6,38	3,14
Eu	0,29	1,61	0,84	1,20	1,17	1,53	1,55	1,17
Gd	0,96	4,92	2,77	3,77	3,56	5,19	6,48	3,38
Tb	0,15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,94	0,72	n.a.
Dy	1,28	4,18	3,10	3,35	3,62	5,56	6,43	3,58
Ho	0,25	0,86	0,66	0,70	0,76	1,15	1,30	0,74
Er	0,73	2,27	1,87	1,94	2,04	3,34	3,61	2,03
Tm	0,11	0,33	0,26	0,28	0,28	0,48	0,50	0,30
Yb	0,67	2,05	1,70	1,73	1,83	3,18	3,23	1,75
Lu	0,10	0,33	0,27	0,26	0,28	0,46	0,50	0,27
Y	6	29	25	23	24	30	34	25
Sc	9,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	38,7	31,2	n.a.
V	137	229	279	242	214	250	363	436
Cr	154	243	293	82	220	78	69	D.L.
Co	7	28	34	32	36	39	28	34
Ni	27	75	84	19	93	42	4	9
Cu	20	20	35	22	14	57	40	22
Zn	180	88	83	83	64	80	71	154
Ga	2	18	17	19	17	19	22	20
Li	20,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	100,3	101,0	n.a.
Be	0,4	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,5	0,7	n.a.
B	2,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	9,8	17,1	n.a.
Nb/U	10,6	7,3	1,8	14,8	4,3	2,5	6,3	4,8
Ce/Pb	1,4	6,8	1,1	4,9	2,6	3,7	5,0	1,6

MW: Mittelwert; STABW: Standartabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	TO51	TO66	WO1	OP8	HO6	HO7	EL4	LA1
Einheit	2	2	2	2	2	2	2	2
SiO <sub>2</sub>	52,43	46,44	59,57	46,35	49,27	47,58	46,35	47,21
TiO <sub>2</sub>	1,00	1,07	0,90	1,07	1,20	1,35	1,22	0,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,33	16,77	17,10	14,08	19,57	20,03	16,72	15,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,52	3,02	1,85	1,83	1,35	1,93	1,87	1,08
FeO	6,39	7,28	4,52	7,69	7,65	7,55	8,21	6,66
MnO	0,35	0,18	0,12	0,17	0,18	0,16	0,17	0,16
MgO	6,03	6,60	3,29	8,10	5,87	4,89	10,17	7,67
CaO	7,81	10,29	4,69	13,16	7,48	8,18	8,93	14,92
Na <sub>2</sub> O	3,65	2,18	3,35	2,18	2,76	2,71	1,87	1,34
K <sub>2</sub> O	1,07	2,02	2,36	1,06	1,39	1,90	0,79	1,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,59	0,23	0,09	0,21	0,20	0,17	0,10
H <sub>2</sub> O	1,57	1,32	1,64	2,40	1,65	2,21	2,13	2,34
CO <sub>2</sub>	0,27	0,14	0,09	0,53	0,10	0,07	0,14	0,20
Total	98,50	97,90	99,71	98,71	98,68	98,76	98,74	98,70
Mg#	57,97	56,66	51,30	63,21	56,74	51,05	67,06	66,56
Cs	7	10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rb	46	76	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ba	322	1539	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Th	1,1	12,7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
U	0,8	4,7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ta	0,21	0,38	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nb	3,7	7,6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pb	5,9	16,0	11,5	7,1	4,1	11,0	5,7	8,4
Sr	385	744	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zr	138	124	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Hf	3,1	3,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
La	8,67	33,35	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ce	22,90	72,05	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Pr	3,30	9,06	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nd	15,40	36,27	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Sm	4,40	8,17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Eu	1,17	1,65	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Gd	5,15	6,34	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Dy	5,51	4,57	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ho	1,24	0,83	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Er	3,36	2,16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tm	0,50	0,28	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Yb	3,20	1,68	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lu	0,49	0,25	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Y	41	29	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Sc	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
V	183	270	177	250	233	284	117	262
Cr	153	120	54	508	63	39	103	684
Co	31	35	18	40	28	23	51	37
Ni	73	28	11	224	13	2	105	266
Cu	21	40	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zn	69	83	88	82	98	95	88	64
Ga	18	18	20	16	22	23	16	15
Li	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Be	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nb/U	4,7	1,6						
Ce/Pb	3,9	4,5						

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	LA2	WEH2	GÖ5	MW	STABW	LA36	LA39	LA41
Einheit	2	2	2	2	2	3(?)	3(?)	3(?)
SiO <sub>2</sub>	46,47	50,57	47,76	46,65	9,71	48,24	49,67	47,50
TiO <sub>2</sub>	1,07	0,82	1,43	1,40	0,84	0,58	0,34	0,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,67	17,46	15,32	16,44	3,41	18,61	18,65	19,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,37	2,30	3,13	2,17	0,94	1,20	0,83	1,20
FeO	7,88	6,33	8,79	7,27	1,81	5,90	5,19	5,51
MnO	0,16	0,20	0,26	0,18	0,06	0,14	0,12	0,13
MgO	3,61	6,31	6,23	6,17	1,86	8,56	9,67	8,50
CaO	14,46	8,56	10,45	8,80	2,84	10,80	8,94	12,30
Na <sub>2</sub> O	1,48	2,90	3,12	2,56	0,81	1,76	1,58	2,38
K <sub>2</sub> O	2,01	1,82	0,92	1,32	0,60	1,80	2,31	0,67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,09	0,15	0,16	0,12	0,03	0,01	0,05
H <sub>2</sub> O	1,83	1,61	1,47	1,87	0,74	1,26	1,48	1,04
CO <sub>2</sub>	0,31	0,14	0,20	0,51	0,77	0,13	0,42	0,10
Total	98,49	99,11	99,23	94,81	20,09	99,01	99,21	99,30
Mg#	43,97	59,80	51,53	54,39	11,80	70,84	76,34	71,87
Cs	n.a.	n.a.	n.a.	8	4	8	11	6
Rb	n.a.	n.a.	n.a.	52	24	92	112	31
Ba	n.a.	n.a.	n.a.	382	382	557	525	118
Th	n.a.	n.a.	n.a.	3,0	3,6	0,5	0,7	0,7
U	n.a.	n.a.	n.a.	1,3	1,2	0,1	0,1	0,2
Ta	n.a.	n.a.	n.a.	0,34	0,20	D.L.	0,06	0,30
Nb	n.a.	n.a.	n.a.	6,0	5,0	0,8	1,0	6,0
Pb	5,2	62,6	8,0	38,1	101,3	4,5	3,8	D.L.
Sr	n.a.	n.a.	n.a.	333	182	200	144	176
Zr	n.a.	n.a.	n.a.	93	39	20	15	79
Hf	n.a.	n.a.	n.a.	2,3	0,9	0,6	0,4	1,4
La	n.a.	n.a.	n.a.	14,30	10,40	1,68	1,28	1,64
Ce	n.a.	n.a.	n.a.	32,64	22,36	4,49	3,28	5,94
Pr	n.a.	n.a.	n.a.	4,25	2,55	0,64	0,42	1,06
Nd	n.a.	n.a.	n.a.	17,64	9,37	3,45	1,69	5,32
Sm	n.a.	n.a.	n.a.	4,31	1,93	1,28	0,57	2,01
Eu	n.a.	n.a.	n.a.	1,22	0,38	0,58	0,27	0,74
Gd	n.a.	n.a.	n.a.	4,31	1,54	1,52	0,84	2,21
Tb	n.a.	n.a.	n.a.	0,68	0,37	n.a.	n.a.	n.a.
Dy	n.a.	n.a.	n.a.	4,25	1,38	1,80	1,18	2,31
Ho	n.a.	n.a.	n.a.	0,88	0,29	0,38	0,25	0,49
Er	n.a.	n.a.	n.a.	2,42	0,81	1,07	0,69	1,29
Tm	n.a.	n.a.	n.a.	0,35	0,12	0,15	0,10	0,18
Yb	n.a.	n.a.	n.a.	2,18	0,79	0,92	0,57	1,12
Lu	n.a.	n.a.	n.a.	0,33	0,12	0,15	0,08	0,18
Y	n.a.	n.a.	n.a.	28	9	13	9	16
Sc	n.a.	n.a.	n.a.	29	13	n.a.	n.a.	n.a.
V	222	305	306	290	136	203	133	153
Cr	248	16	215	169	157	501	448	391
Co	31	30	38	32	9	34	37	32
Ni	84	13	94	60	68	124	154	154
Cu	n.a.	n.a.	n.a.	29	13	39	84	33
Zn	66	86	119	134	178	51	46	46
Ga	20	18	21	19	4	17	14	17
Li	n.a.	n.a.	n.a.	69,3	39,0	n.a.	n.a.	n.a.
Be	n.a.	n.a.	n.a.	0,6	0,3	n.a.	n.a.	n.a.
B	n.a.	n.a.	n.a.	8,8	6,4	n.a.	n.a.	n.a.
Nb/U				6,9	4,5	6,2	9,9	25,1
Ce/Pb				3,3	1,8	1,0	0,9	

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma). **Fortsetzung auf der nächsten Seite.**

## Anhang

**Tab. A-7.01. Fortsetzung.**

Probe	LA38	LA45	MW	STABW
Einheit	3(?)	3(?)	3(?)	3(?)
SiO <sub>2</sub>	47,67	48,72	48,36	0,88
TiO <sub>2</sub>	1,43	1,38	0,88	0,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,27	15,30	17,41	1,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,94	1,19	1,27	0,41
FeO	5,88	7,03	5,90	0,70
MnO	0,19	0,17	0,15	0,03
MgO	6,54	6,88	8,03	1,30
CaO	13,04	12,44	11,50	1,65
Na <sub>2</sub> O	2,63	2,71	2,21	0,51
K <sub>2</sub> O	0,06	0,06	0,98	1,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,11	0,07	0,05
H <sub>2</sub> O	1,52	1,21	1,30	0,20
CO <sub>2</sub>	2,65	1,70	1,00	1,13
Total	98,96	98,90	99,08	0,17
Mg#	62,94	62,72	68,94	5,95
Cs	n.a.	n.a.	8	3
Rb	n.a.	n.a.	79	42
Ba	n.a.	n.a.	400	245
Th	n.a.	n.a.	0,6	0,1
U	n.a.	n.a.	0,2	0,1
Ta	n.a.	n.a.	0,18	0,17
Nb	n.a.	n.a.	2,6	3,0
Pb	9,9	6,0	6,1	2,7
Sr	n.a.	n.a.	173	28
Zr	n.a.	n.a.	38	36
Hf	n.a.	n.a.	0,8	0,5
La	n.a.	n.a.	1,53	0,22
Ce	n.a.	n.a.	4,57	1,33
Pr	n.a.	n.a.	0,71	0,32
Nd	n.a.	n.a.	3,49	1,81
Sm	n.a.	n.a.	1,29	0,72
Eu	n.a.	n.a.	0,53	0,24
Gd	n.a.	n.a.	1,52	0,69
Tb	n.a.	n.a.		
Dy	n.a.	n.a.	1,76	0,57
Ho	n.a.	n.a.	0,37	0,12
Er	n.a.	n.a.	1,02	0,30
Tm	n.a.	n.a.	0,14	0,04
Yb	n.a.	n.a.	0,87	0,28
Lu	n.a.	n.a.	0,14	0,05
Y	n.a.	n.a.	13	4
Sc	n.a.	n.a.		
V	339	312	228	93
Cr	217	218	355	132
Co	37	37	35	2
Ni	62	64	112	46
Cu	n.a.	n.a.	52	28
Zn	68	62	55	10
Ga	19	18	17	2
Li	n.a.	n.a.		
Be	n.a.	n.a.		
B	n.a.	n.a.		
Nb/U			13,8	10,0
Ce/Pb			0,9	0,1

MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung (1 Sigma).



## Anhang

### Probenübersicht Einheit 1. Zusammenfassung der angewandten Analytik und der Probenlokalität.

Probe	LOI	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	Titration	RFA TU	RFA TR	EMS	F, Cl	SIMS	ICP-MS	LA-ICP-MS	Bemerkungen	Lokalität	Topographische Karte (1:25000)
<b>BAI 1</b>	X	X	X	X	X						Anst., im Bachlauf mit Migmatit	Röt im Murgtal	7416 Baiersbronn
<b>BAI 2</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Anst., im Bachlauf mit Migmatit	Röt im Murgtal	7416 Baiersbronn
<b>OP1</b>	X	X	X	X	X				X			W' Maisach	7515 Oppenau
<b>OP2</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		W' Maisach	7515 Oppenau
<b>OP3</b>												W' Maisach	7515 Oppenau
<b>OP4</b>	X	X	X	X	X				X			W' Maisach	7515 Oppenau
<b>ZEH1</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Lesest., Bachlauf, feinkörn.	Wegbiegung Hermersberg/Engelberg	7614 Zell am Harmersbach
<b>ZEH2</b>	X	X	X	X	X						Lesest., Bachlauf, feinkörn.	Wegbiegung Hermersberg/Engelberg	7614 Zell am Harmersbach
<b>WO4</b>	X	X	X	X	X							Erzenbach	7615 Wolfach
<b>WO5</b>	X	X	X	X	X	X	X	X				S' Kesselberg	7615 Wolfach
<b>HO3</b>												N' Hagenbach	7715 Hornberg
<b>HO5</b>												S' Turm	7715 Hornberg
<b>HO6</b>	X	X	X	X	X							S' Turm	7715 Hornberg
<b>HO7</b>	X	X	X	X	X							S' Turm	7715 Hornberg
<b>HO8</b>	X	X	X	X	X					X		S' Turm	7715 Hornberg
<b>HO9</b>												S' Turm	7715 Hornberg
<b>EM2</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Lesesteine	Spielberg N' Reichenbach	7813 Emmendingen
<b>EM3</b>	X	X	X	X	X				X		Lesest., feinkörn. Fels	Am Felsen bei Eckleberg	7813 Emmendingen
<b>EM5</b>											Kalksilikatfels	350m E' Vogtsepplihof b. Obertal	7813 Emmendingen
<b>FRNO20</b>											Lesestein (Hbl+Plag)	Schererhof i. Ahlenbachtal S' Glottertal	7913 Freiburg Nord-Ost
<b>FRNO50</b>	X	X	X	X	X							Teschen	7913 Freiburg Nord-Ost
<b>FRNO51</b>												Teschen	7913 Freiburg Nord-Ost
<b>FRNO52</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X			Brombeerkopf	7913 Freiburg Nord-Ost
<b>FRNO53</b>	X	X	X	X	X							Kapphansenhof	7913 Freiburg Nord-Ost
<b>FRSO1</b>												Oberer Kapplerwald	8013 Freiburg Süd-Ost
<b>FRSO2</b>	X	X	X	X	X							Oberer Kapplerwald	8013 Freiburg Süd-Ost
<b>FRSO3</b>	X	X	X	X	X							Galgenberg	8013 Freiburg Süd-Ost
<b>FRSO5</b>												Reuferhof	8013 Freiburg Süd-Ost
<b>HA6</b>	X	X	X	X	X							Steinwald	7714 Haslach im Kinzigtal
<b>HA7</b>												Steinwald	7714 Haslach im Kinzigtal
<b>HA8</b>	X	X	X	X	X							N'Landwasser	7714 Haslach im Kinzigtal
<b>EL1</b>	X	X	X	X	X				X			Lehen	7814 Elzach

Fortsetzung auf der nächsten Seite.

## Anhang

### Probenübersicht Einheit 1. Fortsetzung.

Probe	LOI	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	Titration	RFA TU	RFA TR	EMS	F, Cl	SIMS	ICP-MS	LA-ICP-MS	Bemerkungen	Lokalität	Topographische Karte (1:25000)
<b>EL2</b>												Reschenberg	7814 Elzach
<b>EL3</b>												Reschenberg	7814 Elzach
<b>EL4</b>	X	X	X	X	X							Rohhardsberg	7814 Elzach
<b>EL5</b>												Rohhardsberg	7814 Elzach
<b>SP50</b>	X	X	X	X	X						Lesest., hell, mittelk. Amph	Absätzler Hof, Str. Kandel-St. Peter	7914 Sankt Peter
<b>SP51</b>											Lesest., dkl, feink. Amph	Absätzler Hof, Str. Kandel-St. Peter	7914 Sankt Peter
<b>SP52</b>	X			X	X	X	X	X	X	X	Lesest., dkl, feink. Amph	Absätzler Hof, Str. Kandel-St. Peter, alt.	7914 Sankt Peter
<b>SP53</b>											Lesest., dkl, grobk. Amph	Absätzler Hof, Str. Kandel-St. Peter	7914 Sankt Peter
<b>SP54</b>	X			X	X	X	X	X			Lesest., Amph mit Eklo-Rel.	Hulochhof bei St. Peter, alteriert	7914 Sankt Peter
<b>SP55</b>											Lesest., Amph mit Eklo-Rel.	Hulochhof bei St. Peter	7914 Sankt Peter
<b>SP56</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Lesest., Amphibolit	Hulochhof bei St. Peter	7914 Sankt Peter
<b>SP57</b>	X	X	X	X	X						Lesest., Amph mit ++ Fsp	Habstmoosbei St. Märgen	7914 Sankt Peter
<b>SP58</b>											Lesest., Amph mit ++ Fsp	Habstmoosbei St. Märgen	7914 Sankt Peter
<b>ST1</b>											Lesestein (grüner Stich)	Laitschenbach am Hang und im Wäldchen	8112 Staufen im Breisgau
<b>TO46</b>												Hasbach	8113 Todtnau
<b>TO47</b>												Hasbach	8113 Todtnau
<b>TO68</b>	X	X	X	X	X				X		Anst, feinkörn., klüftig, Bi	S' Geisköpfe	8113 Todtnau
<b>FE11</b>	X	X	X	X	X				X		Anst. + Lesesteine	Steiertenkopf im Bärental	8114 Feldberg
<b>FE12</b>	X	X	X	X	X						Anst. (Amph od Peridot.)	Südlich Silberberg	8114 Feldberg
<b>AW20b</b>						X	X					Spirzendobel, Blatt Hinterzarten 8014	8014 Hinterzarten

## Anhang

### Probenübersicht Einheit 2. Zusammenfassung der angewandten Analytik und der Probenlokalität.

Probe	LOI	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	Titration	RFA Tü	RFA TR	EMS	F, Cl	SIMS	ICP-MS	LA-ICP-MS	Bemerkungen	Lokalität	Topographische Karte (1:25000)
OP7	X	X	X	X	X	X	X	X	X			S' In den Mauern	7515 Oppenau
OP8	X	X	X	X	X							S' In den Mauern	7515 Oppenau
OP9												S' In den Mauern	7515 Oppenau
LA1	X	X	X	X	X	X	X	X			Anst., gestreckt, frisch	Mittelbuck	7613 Lahr/Ost
LA2	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Lesestein, feinkörn., Qz-Segr	Mittelbuck	7613 Lahr/Ost
ZEH6	X	X	X	X	X				X		Anst., mit Kalksilikaten	Steinbruch Riersbach	7614 Zell am Harmersbach
ZEH7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Lesestein	Mitteltal	7614 Zell am Harmersbach
ZEH8											Lesestein	Mitteltal	7614 Zell am Harmersbach
WO1	X	X	X	X	X							Wildschapbach	7615 Wolfach
WO2	X	X	X	X	X				X			Wildschapbach	7615 Wolfach
WO3												SE' Kurzenbach	7615 Wolfach
HA1												Urenkopf	7714 Haslach im Kinzigtal
HA2												Urenkopf	7714 Haslach im Kinzigtal
HA3	X	X	X	X	X							Urenkopf	7714 Haslach im Kinzigtal
HA4												Urenkopf	7714 Haslach im Kinzigtal
ST2a												S' Untermünstertal	8112 Staufen im Breisgau
ST2b												S' Untermünstertal	8112 Staufen im Breisgau
TO48	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Linsen in Migm/Gneis	Brenntfelsen WSW' Gisiboden	8113 Todtnau
TO49											Linsen in Migm/Gneis	Brenntfelsen WSW' Gisiboden	8113 Todtnau
TO51	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Linsen in Migm/Gneis	Brennthalde Mulden, Str. Aitern nach Belchen	8113 Todtnau
TO60											Anst., klüftig, feinkörnig	S' Ortseinfahrt Schlechnau an B317	8113 Todtnau
TO61											Anst., mit Leukosomen	S' Ortseinfahrt Schlechnau an B317	8113 Todtnau
TO62											Lesestein, in Metagraniten	Elsberg	8113 Todtnau
TO63											Lesestein, Hornblendit?	Elsberg	8113 Todtnau
TO65											Lesestein, rund - glacial??	Straße Richtung Gisiboden (Mauswinkel)	8113 Todtnau
TO66	X	X	X	X	X				X		Anst., mit dunklen Gneisen	E' Gisiboden	8113 Todtnau
TO67											Anst., zerklüft., mit Gneisen	S' Felgismoos	8113 Todtnau
FE80	X	X	X	X	X						Anst., mit Kalksilikaten	Ecklewald	8114 Feldberg
FE81						X	X	X			Anst., mit Kalksilikaten	Ecklewald	8114 Feldberg
FE82	X	X	X	X	X				X		Anst., klüftig, alteriert	Roßbrücken	8114 Feldberg
FE83											Lesestein, grün, Bi	W' Spießhorn	8114 Feldberg
FE84											Anst., zerklüft., große Hbl	N' Kornrütte	8114 Feldberg

Fortsetzung auf der nächsten Seite.



## Anhang

### Probenübersicht Einheit 2. Fortsetzung.

Probe	LOI	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	Titration	RFA Tü	RFA TR	EMS	F, Cl	SIMS	ICP-MS	LA-ICP-MS	Bemerkungen	Lokalität	Topographische Karte (1:25000)
<b>FE86</b>											Anst., mit Kalksilikat	Ecklewald	8114 Feldberg
<b>SBL5</b>											Lesestein	Vogelsau bei Urberg (Kuppe im Wald)	8114 Feldberg
<b>SBL6</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Lesestein	Inner-Urberg (im Wäldchen)	8214 St. Blasien
<b>SBL7</b>											Lesestein	Inner-Urberg (im Wäldchen), alteriert	8214 St. Blasien
<b>SBL8</b>											Anst.	Bredsteinfelsen (Oberbildstein)	8214 St. Blasien
<b>WEH1</b>												Roßrücken	8313 Wehr
<b>WEH2</b>	X	X	X	X	X							Roßrücken	8313 Wehr
<b>WEH3</b>												Roßrücken	8313 Wehr
<b>GÖ1</b>												Riesenbühl	8314 Görwihl
<b>GÖ2</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Häldele	8314 Görwihl
<b>GÖ3</b>	X	X	X	X	X	X	X	X				Häldele	8314 Görwihl
<b>GÖ5</b>	X	X	X	X	X	X	X	X				N`Vogelbach	8314 Görwihl
<b>GÖ6</b>												N`Vogelbach	8314 Görwihl
<b>GÖ7</b>												N`Vogelbach	8314 Görwihl
<b>GÖ8</b>												N`Vogelbach	8314 Görwihl
<b>GÖ9</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X			S`Bantlisloch	8314 Görwihl
<b>GÖ10</b>												S`Bantlisloch	8314 Görwihl
<b>GÖ13</b>												Tiefenstein	8314 Görwihl

## Anhang

### Probenübersicht Burg Hohengeroldseck. Zusammenfassung der angewandten Analytik und der Probenlokalität.

Probe	LOI	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	Titration	RFA-TÜ	RFA-TR	EMS	F, Cl	SIMS	ICP-MS	LA-ICP-MS	Bemerkungen	Lokalität	Topographische Karte (1:25000)
LA36	X	X	X	X	X				X		Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA37											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA38	X	X	X	X	X						Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA39	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA40											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA41	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA42											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA43											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA44											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA45	X	X	X	X	X						Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA46											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA47											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA48											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
LA49											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
ZEH3	X	X	X	X	X						Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
ZEH4											Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
ZEH5	X	X	X	X	X				X		Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
SBL3	X	X	X	X	X						Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost
SBL4	X	X	X	X	X						Lesestein	Umgebung Burg Hohengeroldseck	7613 Lahr/Ost



### ***Mineralformelberechnung***

Die Mineralformeln aller untersuchten Phasen außer Amphibol wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm *FormelCalc* von Hans-Peter Mayer und Lorenz Niederberger (Mineralogisches Institut, Universität Heidelberg) berechnet. Den Berechnungen liegen folgende Annahmen zu Grund:

Pyroxene	: 6 O, 4 Kationen ( $\text{Fe}^{3+}$ stöchiometrisch berechnet)
Granat	: 12 O, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{2+}$
Rutil	: 2 O, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{3+}$
Ilmenit	: 3 O, 2 Kationen ( $\text{Fe}^{3+}$ stöchiometrisch berechnet)
Titanit	: 5 O, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{3+}$
Plagioklas	: 8 O, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{3+}$
Biotit	: 11 O und 2 OH, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{2+}$
Chlorit	: 14 O und 8 OH, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{2+}$
Prehnit	: 11 O und 2 OH, $\text{Fe}^{\text{tot}} = \text{Fe}^{3+}$

Die Amphibole wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm *Amphor IV* von Bernd Schulte (früher Universität Darmstadt) berechnet. Das Programm wurde im Rahmen dieser Studie modifiziert und um die Klassifikation der Amphibole nach Leake *et al.* (1997) erweitert. Die Formelberechnung wurde auf der Basis von 23 Sauerstoffen durchgeführt. Für die  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ -Abschätzung wurde die Vorgehensweise von Schumacher (1997) verwendet.

### ***Geothermobarometrie***

Zur Temperaturbestimmung wurde das Amphibol-Plagioklas-Thermometer nach Holland & Blundy (1994) verwendet. Grundlage dieser Methode bildet der temperaturabhängige Na-Austausch, der auf den Austauschreaktionen  $(\text{NaAl}) (\square\text{Si})_{-1}$  und  $(\text{NaSi}) (\text{CaAl})_{-1}$  zwischen koexistierendem Amphibol und Plagioklas beruht. Die Unsicherheit dieses Thermometers liegt bei  $\pm 35\text{-}40$  °C. Die Temperaturen wurden mit Hilfe des Programms *Hornblende-Plagioclase-Thermometry* von Holland & Blundy (1994) berechnet.

Darüber hinaus wurden Druck- und Temperatur mittels dem Al-Ti-in-Hornblende Thermobarometer nach Ernst & Liu (1998) ermittelt. Diese Methode erfolgt graphisch anhand

experimentell bestimmter Isoplethen. Grundlage des Thermobarometers bilden Amphibole, die aus natürlichen Basalten synthetisiert wurden. Die Untersuchung der Amphibole zeigte, dass die Isoplethen für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sensibel auf Änderungen der Druck- und Temperaturbedingungen reagieren. Demgegenüber sind die Isoplethen für  $\text{TiO}_2$  weitgehend unabhängig vom Druck, zeigen jedoch eine deutliche Temperaturabhängigkeit.

### *Messmethodik*

#### **Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS)**

Alle Mineralanalysen – sowohl Einzelpunktmessungen als auch Linienprofile - wurden mit einer CAMECA SX51 (Baujahr 1993) Elektronenstrahl-Mikrosonde am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg an polierten und mit Kohlenstoff bedampften Dünnschliffen durchgeführt. Zur täglichen Kalibrierung wurden folgende Oxid- und Silikatstandards von CAMECA (Paris, Frankreich) und dem Smithsonian Institute (Washington D.C., USA) benutzt:

Mineral	Standard	Peak-Zählzeit [Sekunden]	Messkristall
Na	Albit	10	TAP
Mg	Periklas	10-20	TAP
Al	Korund	10	TAP
Si	Wollastonit	10	TAP
Ca	Wollastonit	10	PET
K	Orthoklas	10	PET
Ti	Rutil	10-20	PET
Cr	Eskolait	10-20	PET
Fe	Hämatit	10	LIF
Mn	Rhodonit	10	LIF
F	Topas	40	PC0
Cl	Skapolith	30	PC0

Die EMS ist mit fünf wellenlängendispersiven Spektrometern und verschiedenen Analysatorkristallen (PET, LIF, TAB) sowie einem energiedispersiven Pentafet-Detektor (SiLi-Halbleiterdetektor) der Firma Oxford Instruments ausgerüstet. Die Matrixkorrektur

erfolgte mit dem PAP-Algorithmus von CAMECA. Strahlstrom sowie Beschleunigungsspannung lagen bei 20 nA und 15 kV.

Aufgrund bestehender Interferenzen von Fluor mit Eisen und Mangan muss der gemessene Fluor-Gehalt korrigiert werden:

$$F = F^* - (-0.00005585 \times FeO^2 + 0.00889 \times FeO - 0.0044) + MnO \times 0.015$$

Es gilt:  $F^* = F_2O \times 0.703694$

### **Sekundärionen-Massenspektrometer (SIMS)**

Die Analysen für die Elemente Li, Be und B wurden an der Ionensonde CAMECA IMS-3f (modifiziert von Thomas Ludwig) am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg durchgeführt. Als Primärionen wurden Sauerstoffionen ( $^{16}O^-$ ) mit einer Energie von 14.5 kV verwendet. Die Beschleunigungsspannung der Sekundärionen betrug 4.5 kV. Die Messungen erfolgten mit einem Energiefilter (Offset  $\sim 75$  eV,  $M/\Delta M \sim 1000$ ) und einer Stromstärke des Primärstrahls von 10 nA. Zur Kalibrierung wurde das Standardglas NIST SRM-610 verwendet. Als Referenzisotop diente  $^{30}Si$ .

Um Kontaminationen zu vermeiden, wurden die Dünnschliffe vor der Analyse mit Ethanol und im Ultraschallbad gereinigt. Anschließend wurden die Schliffe mit Gold beschichtet.

### **Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)**

Die Spurenelementanalysen an ausgewählten Proben wurden mit Hilfe der ICP-MS VG PlasmaQuad PQ 1 am Institut für Geochemie der Universität Kiel an Lösungen durchgeführt. Das Gerät ist mit einem VG multi-channel-analyzer (MCA) ausgestattet. Die allgemeine Funktionsweise des Gerätes und die Messbedingungen werden ausführlich in Garbe-Schönberg (1993) beschrieben. Die Präparation der Proben erfolgte nach der Methode von Garbe-Schönberg (1993) am Institut für Geochemie der Universität Kiel.

### **Laser-Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (LA-ICP-MS)**

Die Spurenelementgehalte der Mineralphasen ausgewählter Proben wurden mit Hilfe der LA-ICP-MS Elan 6100 DRC der Firma Perkin Elmer SCIEX am Institut für Isotopengeologie und Mineralische Rohstoffe der ETH Zürich (Schweiz) gemessen. Als Laser diente ein ArF Excimer von der Firma Lambda Physik mit einer Wellenlänge von 193 nm. Als Transportgas diente Helium. Um einen möglichen Maschinendrift zu kontrollieren, wurde zu Beginn und nach jedem Messzyklus mit zehn Analysen ein internationaler Standard (NIST-SRM 610)

routinemäßig mitgemessen. Die Datenreduktion erfolgte mit dem Computerprogramm *LAMTRACE* von Simon Jackson. Die Analysen wurden an polierten Dünnschliffen mit einer Schliffdicke von 30-50 µm durchgeführt.

### **Röntgenfluoreszenzspektrometrie (RFA)**

Die Haupt- und Spurenelemente der Amphibolite wurden am Mineralogischen Institut der Universität Tübingen mit dem wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenz-Spektrometer SRS 303 der Firma Siemens an Schmelztabletten gemessen. Zur Herstellung der Tabletten wurden 1.5 g analysenfeines Gesteinspulver und 7.5 g Flussmittel (*di*-Lithiumtetraborat  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) vermengt. Zur Kalibrierung des Gerätes wurden internationale Standards verwendet, die bei jedem Messzyklus mitanalysiert wurden. Jede Probe wurde zweifach gemessen, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Die Spurenelemente wurden nochmals am Mineralogischen Institut der Universität Trier mit dem wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenz-Spektrometer SRS 3000 der Firma Bruker Axs (früher Siemens) an Pulver-Presstabletten gemessen. Für die Herstellung der Presslinge wurden 5 g analysenfeines Gesteinspulver mit 3 Tropfen einer 2.5 %igen Mowiol-Lösung vermengt und in einem Aluminiumträger 15 s gepresst. Jede Probe wurde dreifach gemessen, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

## **Danksagung**

Am erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit waren viele Personen beteiligt, denen ich auf diesem Weg herzlichen Dank aussprechen möchte:

Prof. Dr. Angelika Kalt und Prof. Dr. Rainer Altherr für ihr Vertrauen und die Überlassung des Dissertationsthemas sowie ihre fachliche und persönliche Unterstützung.

Dr. Hans-Peter Mayer, Thomas Ludwig und Ilse Glass (Universität Heidelberg) sowie Dr. Thomas Pettke und Leonard Martin Klemm (ETH Zürich, Schweiz) für die Organisation und fachliche Unterstützung bei der Mineralanalytik.

Dr. Heinrich Taubald (Universität Tübingen), Dr. Dieter Garbe-Schönberg (Universität Kiel), Dr. Michael Seitz und Dr. Yann Lahaye (Universität Frankfurt) für die Durchführung von Gesamtgesteinsanalysen.

Dem gesamten Kollegium des Mineralogischen Instituts der Universität Heidelberg. Die einzelnen Persönlichkeiten haben ein Arbeitsklima geschaffen, das sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Meiner Frau, Melanie Hepp. Um diese Arbeit realisierbar zu machen, hat sie tiefe Einschnitte in ihrem persönlichen Umfeld hingenommen. Für diese wichtige Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken.

Diese Arbeit ist meiner Schwester gewidmet.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Stefan Hepp, geboren am 24.11.1970 in Biberach, an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbst verfasst und mich dabei keiner anderen als der von mir ausdrücklich bezeichneten Quellen und Hilfen bedient habe.

Ich, Stefan Hepp, geboren am 24.11.1970 in Biberach, erkläre zudem an Eides statt, dass ich an keiner anderen Stelle ein Prüfungsverfahren beantragt habe, dass ich die Dissertation nicht in dieser oder anderer Form bereits anderweitig als Prüfungsarbeit verwendet habe und dass ich sie an keiner anderen Fakultät als Dissertation vorgelegt habe.

Heidelberg, 06.11.2003

Stefan Hepp