

# Konsistente Dokumentation, Analyse und Interpretation mesoalpin metamorpher Mineralparagenesen der Zentralalpen

Inauguraldissertation  
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Bern  
zur Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Dirk Rainer Schmatz

aus Deutschland

Leiter der Arbeit:  
Prof. Dr. M. Engi und Dr. J. E. Lieberman,  
Mineralogisch-petrographisches Institut der Universität Bern

Von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
auf Antrag des Herrn Prof. Dr. M. Engi angenommen.

Bern, den 22. April 1993

Der Dekan:

Prof. Dr. Tj. Peters

---

## Vorwort

Während der langen Zeit des Rumbastelns an dieser Arbeit stellte ich mir immer wieder die Frage nach dem Sinn dieses Unterfangens, besonders in Zeiten, während denen es schlecht lief. Max Frisch, der ähnlichen Gedanken nachhing, nachdem er sein Architekturstudium abgebrochen hatte, schrieb 19?? einen Aufsatz, in dem er treffend schrieb:

... Andererseits muss man sich gestehen, dass man in diesen Jahren auch etwas geleistet hat. Und wir bringen doch auch etwas mit. Ich meine nicht die Testate und das Wissen aus Büchern und Vorlesungen. Aber man hat an sich selber gearbeitet. Mit grossem Aufwand an Zeit und Seele. Auch all die Irrungen können nicht verloren sein; selbst wenn sie an sich albern sind, so bedeuten sie doch eine Strecke auf unserem Weg nach menschlicher Reife. Das ist es: wir sind weniger vorgedrungen in der Richtung auf einen Beruf im alltäglichen Sinn dieses Wortes, es ging uns weniger darum, einen Beruf zu besitzen als ein Mensch zu werden. Auch wenn wir dieses Ziel noch unmöglich erlangt haben können, so sind wir doch immerhin vorwärts gekommen ...

Diese Arbeit entstand unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Engi und Dr. Joshua Lieberman. Martin und Josh, herzlichen Dank für Eure Beratung und Unterstützung.

Herzlicher Dank gilt auch allen folgenden Leuten, ohne deren Ratschläge oder tatkräftige Unterstützung diese Arbeit wohl nie zustande gekommen wäre.

Manfred Thüring, sowohl für Diskussionen am Aufschluss als auch für das Fachsimpeln über Kawasaki und Moto Guzzi oder für ermunternde Remote-login-Transatlantik-Gespräche. Helmut Horn, durch den das mächtige UNIX an seinem Kryptischen etwas verlor und sich die Core dumps im Rahmen hielten. Felix Würsten für die Hilfe an der Sonde und Ursula Irion für die feinen Znachts. Günter Böhm für die Mithilfe in der Bibliothek, die leckeren Frühstücke auf dem 6. Stock und die aufmunternden Gedanken über Gott und die Welt. Clemens Halmes, der begeisterte L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-er, für Anregungen und Tips. Zaver Oetztürk, der mir in Sachen relationale Datenbanken die Augen öffnete. Kostas Petrakakis für die unerschrockene Programmierung von neuen MINSORT-Subroutinen. Jürg Megert und Vreni Jakob für die Herstellung erstklassiger Dünnschliffe für Mikroskop und Sonde. Ursula und Urs Mäder und Rob und Ingrid Berman für das herzliche Zuhause während meines Aufenthaltes in Ottawa und dem Petro-Team des Geological Survey of Canada für die kritische Beurteilung von PARADIS. Und allen Institutsmitgliedern, die irgendwie zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders erwähnen möchte ich alle, die mich bei der Literatursuche tatkräftig unterstützten oder ohne Zögern ihre Sondendaten oder Sondenschliffe zur Verfügung stellten: Prof. M. Frey, Prof. V. Trommsdorff, Prof. H.R. Pfeifer, E. Klaper, R. Teutsch, E. Frank, P. Guntli, M. Liniger, B. Kamber, R. Oberhänsli, T. Thönen, N. Waber.

Ein besonderer Dank für die Unterstützung während der langen Zeit des Studierens gilt meinen Eltern und meiner Schwester Berit.

Diese Arbeit ist meiner Schwester Berit gewidmet.

---

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, Phasengleichgewichte von metamorphen Paragenesen zu interpretieren, konsistent von der Dokumentation der petrographischen Primärdaten bis zur Auswertung der Druck- und Temperaturberechnungen. Untersucht werden mesoalpin metamorphe, metapelitische Paragenesen aus den Zentralalpen, einer Region, die als eine der geologisch bestuntersuchten der Welt gilt. Als Datenquellen dienten neben eigenen Daten vorwiegend Dissertationen, Diplomarbeiten und Publikationen der letzten 20 Jahre. Auf der Basis einer intern konsistenten thermodynamischen Datenbank werden die Druck- und Temperaturbedingungen abgeleitet, unter denen die Paragenesen equilibrierten. Die Resultate bilden die Grundlage für Isothermen- und Isobarenkarten der mesoalpiner Metamorphose.

Die Arbeit gliedert sich in 3 Teile:

**1. Dokumentation:** Sowohl die primären petrographischen und mineralchemischen Daten als auch die daraus abgeleiteten Resultate (P-T-Diagramme, T-X-Diagramme) werden mit Hilfe der speziell strukturierten, relationalen Datenbank, **PARADIS**<sup>1</sup> dokumentiert und verwaltet. **PARADIS** wurde nach den Grundsätzen der konzeptionellen Datenmodellierung entwickelt. Die Relationen sind normalisiert bis zur 3. Normalform und weisen eine ihrer Funktion entsprechend optimierte Speicherstruktur und Indexierung auf.

Die Datenbank **PARADIS** wurde auf einer SUN unter UNIX mit Hilfe von INGRES, einem kommerziellen Datenbankmanagementsystem, implementiert.

Zwei benutzerfreundliche 4GL-Applikationen, die sich der relationalen Sprache QUEL bedienen, dienen der Datenverwaltung (Abfrage, Eingabe, Modifikation und Löschen). Die Applikationen bestehen aus einer Abfolge von Bildschirmformularen und gestatten dem Benutzer über ein Menü die gewünschte Aktion. Ein integriertes FORTRAN-Programm dient der Analytik von P-T-Diagrammen.

Sämtliche Informationen, also sowohl geologische Primärdaten als auch daraus abgeleitete Resultate, können – mit Hilfe diverser vorgefertigter Reporte – in geeigneten Formaten an Graphikprogramme oder Geographische Informationssysteme ausgegeben werden.

**2. Evaluation von Paragenesedaten:** Als Anfang eines petrologischen Inventars der Zentralalpen wurden veröffentlichte und unveröffentlichte Arbeiten der letzten 20 Jahre nach Paragenesedaten abgesucht und auf ihre Verwertbarkeit für die Druck- und Temperaturberechnung geprüft. Es findet sich eine Liste der evaluierten Arbeiten und eine Auswahl von Arbeiten, die Eintrag in die Datenbank **PARADIS** fanden und deren Daten im 3. Teil die Basis für die Druck- und Temperaturberechnungen boten. Leider sind es in erster Linie Unzulänglichkeiten in der Dokumentation, die eine Neuinterpretation vieler Paragenesedaten aus der Literatur verunmöglichten.

Über 80 der wichtigsten Arbeiten mit quantitativen Druck- und Temperaturabschätzungen der letzten 20 Jahre werden regionenweise vorgestellt und die darin angewendeten Methoden und Resultate kurz erläutert. Obwohl die unterschiedlichsten Methoden zur Anwendung kamen, zeigen die Resultate trotz regional grosser Streubreiten ein erstaunlich kohärentes Bild.

**3. Analytik und Interpretation von Paragenesedaten:** Die Datenbank **PARADIS** stellt die geologisch relevanten Informationen externen petrologischen Programmen (NORM, MIN-

---

<sup>1</sup>Paragenesen Daten Informations System

---

SORT, PTAX oder TWEEQU) zur Verfügung und nimmt deren Resultate (z.B. P-T- oder T-X-Diagramme) wieder auf. In diesem Sinne sind die Interpretationen soweit konsistent mit den unterliegenden Daten, als es die (heutigen) thermodynamischen Modelle erlauben.

Das integrierte Programm INTERSECT findet alle Schnittpunkte der Gleichgewichtskurven in einem P-T-Diagramm und berechnet den Durchschnitt von P und T mit Standardabweichung, gewichtet nach der Grösse des Schnittwinkels und/oder nach den  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werten der sich schneidenden Reaktionen.

Von 57 Proben liegen neue Temperaturwerte, von 45 neue Drucke vor. Die Temperaturen der Literatur liegen im Durchschnitt systematisch um  $ca\ 32 \pm 52\ ^\circ C$  unter den mit PTAX neu berechneten Temperaturen; die Drucke aus der Literatur streuen enorm um die PTAX-Drucke ( $55 \pm 1176\ bar$ ), eine systematische Abweichung ist aber nicht feststellbar.

Die mit dem GMT-System erstellte Isothermenkarte widerspiegelt das bekannte Bild des konzentrischen Isogradenmusters, mit der Temperaturzunahme von N nach S und dem Temperaturmaximum bei Bellinzona. Die Isobaren deuten ein markantes Druckmaximum auf der Höhe von Biasca an. Der Druckabfall gegen die Insubrische Linie hin wird interpretiert als Anpassung der Barometer an die tieferen Drucke nach Erreichen der Maximaltemperatur.

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	1
Zusammenfassung . . . . .	2
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1 Problematik . . . . .	9
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	9
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>I Konsistente Dokumentation von metamorphen Mineralparagenesen</b>	<b>11</b>
<b>2 ParaDIS</b>	<b>13</b>
2.1 Konzeptionelle Datenmodellierung . . . . .	13
2.2 Datenarchitektur und Relationenmodell . . . . .	14
2.3 Logische Datenstrukturen . . . . .	18
2.3.1 Das konzeptionelle Strukturdiagramm . . . . .	18
2.3.2 Zugriffspfade . . . . .	19
2.4 Physische Datenstrukturen . . . . .	20
2.4.1 Indexe, Speicherstrukturen und DB-Optimierung . . . . .	21
2.5 Anwendungen . . . . .	21
2.5.1 Die Anwendung UNIVERSAL . . . . .	21
2.5.2 Die Anwendung SPOUT . . . . .	22
<b>3 Daten</b>	<b>27</b>
3.1 Datenanalyse . . . . .	27
3.1.1 Publikation, Autoren und Referenzen . . . . .	27
3.1.2 Handstück und Mineralien . . . . .	28
3.1.3 EMS-Analysen und -Messprofile . . . . .	29
3.1.4 Paragenesen und P-T-Interpretationen . . . . .	29
3.1.5 Plots . . . . .	30
3.1.6 Flüssigkeitseinschlüsse . . . . .	32
<b>II Evaluation von Paragenesedaten mesoalpiner Mineralvergesellschaftungen der Zentralalpen</b>	<b>33</b>
<b>4 Evaluation von Paragenese-Daten aus der Literatur</b>	<b>35</b>
4.1 Anforderungen an Paragenese-Daten . . . . .	35
4.1.1 Definition einer Paragenese . . . . .	35

4.1.2	Erkennung und Beschreibung einer Paragenese . . . . .	36
4.2	Anforderungen an Elektronenmikrosonde-Daten . . . . .	37
4.3	Datenquellen . . . . .	37
4.3.1	Kriterien für die Literatur-Evaluation . . . . .	38
4.3.2	Fehlerquellen . . . . .	39
4.4	Evaluierte Literatur . . . . .	39
4.5	Verwendete Daten . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Die mesoalpine Metamorphose in den Zentralalpen</b>	<b>51</b>
5.1	Historischer Überblick . . . . .	51
5.2	Bisherige quantitative Druck- und Temperaturabschätzungen . . . . .	52
5.2.1	Lukmaniergebiet . . . . .	52
5.2.2	Olivone-nördliches V. Mesolcina, nordwestliche und mittlere Adula- Decke . . . . .	54
5.2.3	Nufenen- und Bedretto-region . . . . .	54
5.2.4	Campolungo, Alpe Sponda, Leventina . . . . .	54
5.2.5	Val Calanca . . . . .	55
5.2.6	Südliches V. Mesolcina, V. Bodengo . . . . .	55
5.2.7	Region Bellinzona . . . . .	55
5.2.8	Aarmassiv . . . . .	56
5.2.9	Das Profil Brig-Crevola . . . . .	56
5.2.10	Das Profil Antronapiana-Locarno . . . . .	57
5.2.11	Zusammenfassung . . . . .	57
<b>III</b>	<b>Analyse und Interpretation von Paragenesedaten mesoalpiner Mi- neralvergesellschaftungen der Zentralalpen</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Analyse der Paragenese-Daten</b>	<b>61</b>
6.1	Datenfluss und Werkzeuge . . . . .	61
6.1.1	INGRES . . . . .	61
6.1.2	PARADIS und die Anwendungen UNIVERSAL und SPOUT . . . . .	62
6.1.3	PTAX, TWEEQU und GridLoc . . . . .	64
6.1.4	GMT-System . . . . .	65
6.2	PTAX-methodisches . . . . .	66
6.2.1	System, Aktivitätsmodelle . . . . .	66
6.2.2	Erläuterung zu den Tabellen . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Nufenenregion</b>	<b>69</b>
7.1	Nuf183, Nuf189 . . . . .	69
7.2	Fus46, Nuf243, Nuf244, Fus80b, Nuf27 . . . . .	70
7.3	Fus70, Nuf242, Nuf237, Nuf179 . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Das Gebiet der mittleren und südlichen Adula-Decke</b>	<b>75</b>
8.1	DS5: Granat-Disthen-Muscovit-Biotit-Gneiss . . . . .	75
8.2	DS6: Granat-Muscovit-Disthen-Biotit-Gneiss . . . . .	75
8.3	RT159, Th46 . . . . .	78
8.4	DS10a, EK45, B367, K1437 . . . . .	78
8.5	K1185: granatführender Glimmerschiefer . . . . .	83

8.6	RT140, RT150, DS4, K1264, EK50 . . . . .	85
8.7	K1285: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	88
8.8	K198: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	88
<b>9</b>	<b>Lukmaniergebiet</b>	<b>91</b>
9.1	25: Metapelit . . . . .	91
9.2	12: Metapelit . . . . .	91
9.3	TT513: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	95
9.4	77: Metapelit . . . . .	98
9.5	NW76: Granat-Glimmer-Gneis . . . . .	98
9.6	NW77: Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer . . . . .	98
9.7	TT379: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	101
9.8	TT480: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	103
9.9	TT416: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	104
9.10	TT479: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	104
9.11	TT337: Granat-Glimmerschiefer . . . . .	107
9.12	38: Metapelit . . . . .	107
9.13	133: Metapelit . . . . .	111
9.14	NW80: Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer . . . . .	111
9.15	59: Metapelit . . . . .	111
9.16	NW142, NW158, NW33, MF1755 und MF1746 . . . . .	111
9.17	NW79, 121a, 14 und 10 . . . . .	114
<b>10</b>	<b>Alpe Sponda</b>	<b>117</b>
10.1	DS7: Granat-Disthen-Staurolith-Glimmerschiefer . . . . .	117
10.2	DS8: Disthen-Staurolith-Granat-Glimmerschiefer . . . . .	117
10.3	AI349: Cordieritgestein mit Paragonit . . . . .	121
10.4	AI405: Granatfels . . . . .	121
10.5	AI378: Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer . . . . .	121
10.6	AI518: Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer mit Sillimanit . . . . .	121
<b>11</b>	<b>Vergleich der PTAX-Resultate mit denen der Literatur</b>	<b>125</b>
11.1	Das Granat-Biotit-Thermometer . . . . .	125
11.2	Das Anorthit-Grossular-Barometer . . . . .	125
11.3	Diskussion . . . . .	127
<b>12</b>	<b>Isothermen- und Isobarenkarte der mesoalpiner Metamorphose</b>	<b>129</b>
12.1	Voraussetzungen . . . . .	129
12.2	Interpolation mit bikubischen Splines . . . . .	130
12.3	Probenauswahl und allgemeine Beobachtungen . . . . .	130
12.3.1	Isothermenkarte . . . . .	131
12.3.2	Isobarenkarte . . . . .	131
<b>13</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen</b>	<b>135</b>
13.1	Diskussion der Methodik . . . . .	135
13.2	Geologische Interpretation . . . . .	137
	<b>Literatur</b>	<b>139</b>

<b>IV</b>	<b>Anhang</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>157</b>
A.1	Bisherige Temperaturabschätzungen . . . . .	157
A.2	Verwendete Handstücke . . . . .	165
A.3	Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Resultate . . . . .	167
A.4	Beschreibung der neuen Proben . . . . .	169
A.5	Abkürzungen . . . . .	175
A.6	Sondenstandards . . . . .	176
<b>B</b>	<b>INGRES kurz vorgestellt</b>	<b>177</b>
B.1	INGRES, ein relationales DBMS . . . . .	177
B.1.1	Relationale Datenbanken . . . . .	177
B.1.2	Relationale Sprachen . . . . .	178
B.2	System-Struktur . . . . .	178
B.2.1	Das Backend . . . . .	179
B.2.2	Die Frontends . . . . .	179
B.2.3	Verteilte Datenbanken . . . . .	180
<b>C</b>	<b>Das relationale Modell</b>	<b>181</b>
C.1	Definition der Konstruktionselemente . . . . .	181
C.2	Relationale Datenstruktur . . . . .	183
C.3	Relationale Datenintegrität . . . . .	184
C.3.1	Die Integritätsregeln des relationalen Modells . . . . .	184
C.3.2	Erhalt der Integrität bei Löschung . . . . .	184
C.4	Relationale Datenmanipulation . . . . .	185
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>188</b>
	Curriculum vitae . . . . .	190
	<b>Figurenverzeichnis</b>	<b>190</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Problematik

Ein wesentliches Ziel der geologischen Alpenforschung besteht in der Bestimmung der physikalischen Bedingungen, insbesondere Druck und Temperatur, denen ein Gestein während der Metamorphose unterworfen war.

Seit es die Elektronenmikrosonde erlaubt, Mineralchemismen quantitativ und genau zu bestimmen, fielen im Bereich der Zentralalpen eine Fülle von Daten an, die sich in einer Reihe von Publikationen zu diesem Thema niederschlugen. Der Mangel an thermodynamischen Mineraldaten ausreichender Qualität liess jedoch anfänglich nur grobe Abschätzungen von Druck und Temperatur zu.

Die angewendeten Methoden sind sehr unterschiedlich und beruhen auf einer Fülle von oft schwer zu bestimmenden Grössen. Es existieren beispielsweise viele Thermometer und Barometer, aus denen der Petrologe ein passendes auswählte, um damit die Druck- und Temperaturbedingungen seiner Proben zu berechnen. Viele dieser Thermo- und Barometer wurden verschieden kalibriert, benutzen verschiedene Mineral-Aktivitätsmodelle und basieren auf thermodynamischen Daten, welche selbst wieder mit verschiedenen Methoden bestimmt und nicht auf ihre Konsistenz hin geprüft wurden.

Geologische Überlegungen und Vergleiche mit der Literatur bilden jeweils einen letzten Filter, der «unrealistische» Werte zurückbehält.

- Aufgrund dieser inkonsistenten Kalibrationen und angewendeten Methoden können in den meisten Fällen P-T-Bestimmungen von verschiedenen Quellen der petrologischen Literatur nicht regional interpretiert und objektiv verglichen werden.
- Analytische Daten, die von Feldpetrologen gesammelt wurden, sind in der Regel nicht einheitlich dokumentiert. Eine Neuinterpretation von metamorphen Phasengleichgewichten durch nachfolgende Petrologen ist deshalb sehr schwierig oder gar unmöglich.

### 1.2 Ziel der Arbeit

Die Verfügbarkeit von immer besseren thermodynamischen Mineraldaten (inklusive Aktivitätsmodellen) eröffnet die Möglichkeit, auf der Basis von bestehenden mineralchemischen Daten Neuberechnungen von Druck und Temperatur vorzunehmen. Dabei sollten moderne Methoden zum Einsatz gelangen, die sich für die Bestimmung von P und T nicht wie bisher nur auf ein Thermometer bzw. Barometer stützen, sondern die möglichst viele der formulierbaren Gleichgewichte in einer Paragenese berücksichtigen.

Wesentliche Ziele der vorliegenden Arbeit sind:

- Beginn eines petrologischen Inventars der Zentralalpen. Wichtigste Voraussetzung für die Analyse und (Neu-)Interpretation von metamorphen Mineral-Paragenesen ist eine einheitliche und konsistente Dokumentation der petrographischen Primärdaten. Dies lässt sich erreichen, indem man sämtliche notwendigen Informationen in einer einzigen, gut organisierten Struktur unterbringt und an einer zentralen Stelle verwaltet. Zu diesem Zweck sollte eine speziell strukturierte Datenbank erstellt werden, die die petrologischen Daten dokumentieren und optimal zur Verfügung stellen kann.
- Evaluation der Paragenesedaten aus der Literatur. Bestehende Arbeiten sollen kritisch evaluiert und die brauchbaren Paragenesedaten extrahiert werden. Eigene Paragenesedaten von ausgewählten Proben sollten die Literaturquellen ergänzen und allfällige «Löcher» stopfen.
- Neuberechnung von Druck und Temperatur auf der Basis einer intern konsistenten Datenbank. Dazu sollten moderne petrologische Programme zur Anwendung kommen, die es erlauben, sämtliche formulierbaren Gleichgewichte in einer Paragenese zu berücksichtigen.
- Erstellen von Isothermen- und Isobarenkarten der mesoalpiner Metamorphose und Vergleich mit bisherigen Resultaten.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei voneinander unabhängige Teile:

#### **Teil 1: Dokumentation**

Die Entwicklung der Datenbank **PARADIS** nach der von VETTER (1990) beschriebenen Methode der konzeptionellen Datenmodellierung wird detailliert beschrieben. Es wird eingegangen auf die Datenarchitektur, das Relationenmodell, die logischen und die vom Datenbanksystem INGRES abhängigen physischen Datenstrukturen und die Anwendungsprogramme.

#### **Teil 2: Evaluation von Paragenesedaten**

Petrologische Literatur wird hinsichtlich der Verwertbarkeit für Druck- und Temperaturberechnungen geprüft. Im Rahmen eines historischen Überblicks findet sich eine Zusammenstellung der quantitativen Druck- und Temperaturbestimmungen in den Zentralalpen der letzten 20 Jahre.

#### **Teil 3: Analytik und Interpretation von Paragenesedaten**

Nach einer detaillierten Beschreibung der Arbeitsmethodik und der verwendeten Software wird in allen Proben P und T abgeschätzt. Eine Statistik gibt Auskunft über Abweichungen der Resultate von denen der Literatur. Eine Isothermen- und Isobarenkarte der mesoalpiner Metamorphose schliesst die Arbeit ab.

## Teil I

# Konsistente Dokumentation von metamorphen Mineralparagenesen



# Kapitel 2

## ParaDIS

Im folgenden wird das Datenmodell und die Implementation der Datenbank **PARADIS**<sup>1</sup> unter INGRES, einem kommerziellen RDBMS<sup>2</sup>, auf einer SUN 4 erläutert. Es wurde die Methodik der konzeptionellen Datenmodellierung von VETTER (1990) angewendet, die zunächst kurz vorgestellt wird.

### 2.1 Konzeptionelle Datenmodellierung

Für die Realisierung der Datenbank **PARADIS** wurde eine datenorientierte Vorgehensweise gewählt; im Unterschied zu einer funktionsorientierten Vorgehensweise stehen die Daten selbst im Mittelpunkt der Betrachtung. Dabei wird zunächst eine grobe, aber möglichst umfassende Datenarchitektur (d.h. ein sehr grobes, konzeptionelles Datenmodell) festgelegt. Diese Architektur wird nach und nach mit Details ergänzt, die im Rahmen der Entwicklung einzelner Anwendungen erarbeitet werden. So kommt nach und nach ein globales (d.h. anwendungsübergreifendes) konzeptionelles Datenmodell zustande, das folgende Vorteile aufweist (VETTER, 1990):

Ein konzeptionelles Datenmodell

- beinhaltet typenmässige, aber keine wertmässigen Aussagen über einen zu modellierenden Realitätsausschnitt.
- ist unabhängig von der DV-technischen Implementierung der Daten auf Speichermedien.
- ist neutral gegenüber Einzelanwendungen und deren lokaler Sicht auf die Daten.

Die Daten existieren unabhängig von ihrer Verwendung; die Datenmodelle lassen sich also auch dann definieren, wenn die Funktionen noch gar nicht bekannt sind. Ausserdem ist ein typenmässig definiertes Datenmodell recht stabil, weil die Datentypen im Verlauf der Zeit kaum einer Änderung unterliegen. Nur die Datenwerte ändern!

Ein datenorientiertes Vorgehen bedarf auch einer konzeptionellen Arbeitsweise. Dabei wird die Lösung für ein Problem vom Groben zum Detail entwickelt.

Zunächst konzentriert man sich auf die Entitätsmengen und Beziehungsmengen, die von Bedeutung sind. So entsteht eine Datenarchitektur. Die Details (Entitätsattribute, Beziehungsattribute) werden anschliessend im Rahmen einer sogenannten Datenanalyse ermittelt

---

<sup>1</sup>Paragenesen Daten Informations System

<sup>2</sup>Relationales Datenbank Management System

und mit der Datenarchitektur vereinigt. Die so erarbeiteten Konstruktionselemente sind mit Hilfe eines optimalen, voll normalisierten Relationenmodells<sup>3</sup> zu definieren.

Dieses bildet die Grundlage für die zu ermittelnden physischen Datenstrukturen. Um diese möglichst optimal zu gestalten, sind noch weitere Angaben notwendig. Dazu gehören sowohl die logischen Datenstrukturen, mit denen die geplanten Zugriffe auf die Daten zu dokumentieren sind, als auch Angaben über die Beziehungsintegrität und die Datenmengen. Hardware- und softwarespezifische Überlegungen werden solange zurückgestellt, bis eine logisch einwandfreie Lösung vorliegt. Erst dann wird die Datenbank realisiert, indem das konzeptionelle Modell in eine geeignete physische Datenstruktur transformiert wird. Erst die physische Datenstruktur ist abhängig vom Datenbankmanagementsystem (DBMS), das zur Anwendung gelangen soll.

## 2.2 Datenarchitektur und Relationenmodell

Aufgrund der Anforderungen, die an die zu realisierende Datenbank **PARADIS** gestellt werden, kann der zu modellierende Realitätsausschnitt klar abgegrenzt werden. Die für petrologische Fragestellungen wichtigen Entitätsmengen, für die Informationen gesammelt und in der Datenbank gespeichert werden sollen, sind in Tabelle 2.1 aufgelistet und kurz beschrieben. Tabelle 2.2 zeigt sämtliche Beziehungsmengen und deren Abbildungstyp, die für diese Entitätsmengen in Frage kommen. Es kommen 3 verschiedene Abbildungstypen vor:

**1:M** Ein Element der Menge A steht mit beliebig vielen (also auch null oder nur einem) Elementen in B in Beziehung. Umgekehrt steht jedes Element in B jederzeit mit einem Element in A in Beziehung.

*Beispiel: In einem Gesteinshandstück können viele Mineralien vorkommen; ein Mineral(korn) kann nur zu einem Handstück gehören.*

**C:M** Ein Element in A steht mit beliebig vielen Elementen in B in Beziehung. Umgekehrt steht jedes Element in B mit höchstens einem oder möglicherweise auch keinem Element in A in Beziehung.

*Beispiel: Ein Mineral kann mehrere fremde Mineralien als Einschlüsse aufweisen, aber selbst nur von einem oder keinem anderen Mineral eingeschlossen werden.*

**M:M** Ein Element der Menge A steht mit beliebig vielen Elementen in B in Beziehung. Umgekehrt steht ein Element aus B mit beliebig vielen Elementen in A in Beziehung.

*Beispiel: Eine Publikation kann von einem oder mehreren Autoren verfasst worden sein. Umgekehrt kann ein Autor bei mehreren Publikationen mitgewirkt haben.*

Figur 2.1 zeigt die globale Datenarchitektur im Überblick. Die Entitätsmengen befinden sich am oberen Bildrand. Pfeile zeigen die Abbildungstypen der Beziehungsmengen an.

Für jede Entitätsmenge wird eine Relation definiert (vgl. Tabelle 2.3). Die Relationen sind mit einem Relationenschlüssel oder auch Primärschlüssel auszuweisen. Als Primärschlüssel wurden fast ausschliesslich fortlaufende natürliche Zahlen gewählt. So erhält jedes neue Tupel sofort einen sehr kurzen Primärschlüssel zugeteilt und kann später leicht und schnell wiedergefunden werden.

---

<sup>3</sup>Das relationale Modell, von Codd (1970) entwickelt, beschreibt *die Art und Weise, wie Daten zu sehen sind*. Es handelt sich um eine Vorschrift, wie Daten zu repräsentieren (Datenstruktur, Datenintegrität) und zu manipulieren sind.

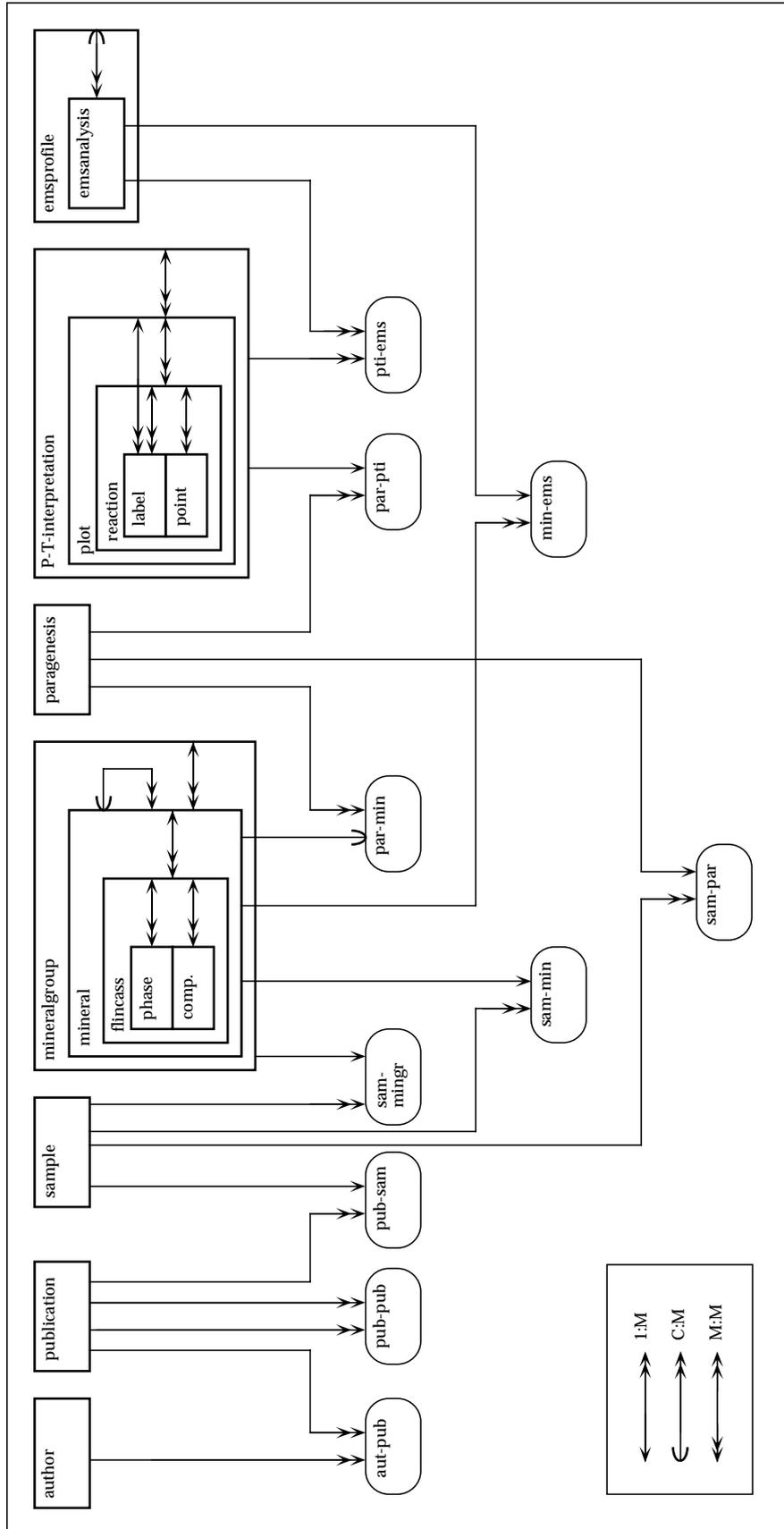


Fig. 2.1: Datenarchitektur

<b>Publikation</b>	Paper, Dissertation, Diplomarbeit
<b>Autor</b>	Der Verantwortliche
<b>Handstück</b>	Die Probe
<b>Paragenese</b>	Assoziation von verschiedenen kogenetischen Mineralindividuen einer Probe, aufgrund textueller Beobachtungen zu einer Paragenese gruppiert
<b>P-T-Interpretation</b>	Druck- und Temperaturabschätzung, auf den chemischen Analysen der Mineralindividuen einer Paragenese basierend und aus einem P-T-Stabilitätsdiagramm berechnet
<b>Stabilitätsdiagramm</b>	P-T-, T-X- usw. Diagramm, auf dem die P-T-Interpretation beruht, einschliesslich den Berechnungsoptionen für das Diagramm (TWEEQU-restart File) und den ausgewählten Formelparametern der Mineralien, die für die Berechnung des Diagramms verwendet wurden (TWEEQU-cmp File)
<b>Reaktion</b>	Reaktionskurve im Stabilitätsdiagramm
<b>Label</b>	Beschriftung einer Reaktionskurve in einem Stabilitätsdiagramm
<b>Punkt</b>	Punkt auf einer Reaktionskurve
<b>Mineral</b>	Textuell identifizierbares Mineralindividuum
<b>Mineralgruppe</b>	Gruppe von Mineralindividuen der gleichen Art (Bsp.: Gruppe Biotit besteht aus Matrixbiotit, Einschlussbiotit, Querbiotit)
<b>Assoziation von Flüssigkeitseinschlüssen</b>	Assoziation von gleichalten Flüssigkeitseinschlüssen eines Minerals, gruppiert aufgrund textueller Beobachtungen
<b>Phase</b>	optisch identifizierbare Phase eines Flüssigkeitseinschlusses
<b>Chemische Komponente</b>	Teil der Analyse eines Flüssigkeitseinschlusses
<b>EMS-Analyse</b>	Elektronenmikrosondeanalyse eines Mineralindividuum
<b>Analysen-Messprofil</b>	Elektronenmikrosondeanalysen, zu einem Messprofil über ein Mineral gruppiert

Tab. 2.1: Definition der Entitätsmengen

Eine Ausnahme bildet die Relation «mineralgroup», die einen zusammengesetzten Primärschlüssel aufweist, der sich aus den Schlüsselteilen «SAM#» (Primärschlüssel der Relation «sample») und «miname» (Attribut der Relation «mineral») zusammensetzt.

Die Beziehungsmengen werden abhängig von ihrem Abbildungstyp dargestellt.

Beziehungsmengen der Abbildungstypen (1:M), (M:1), (C:M), (M:C) stellt man mit Hilfe von Fremdschlüsseln dar:

Die Beziehungsmenge «Handstück – Mineral» vom Typ (1:M) stellt man beispielsweise dar, indem in der Relation «mineral» mit dem Primärschlüssel «MIN#» der Fremdschlüssel «SAM#» eingeführt wird. («SAM#» ist Primärschlüssel der Relation «sample».) Der Primärschlüssel bewirkt, dass pro Mineral, also pro «MIN#»-Wert, nur ein «SAM#»-Wert vorkommen kann; umgekehrt ist es jedoch möglich, dass ein «SAM#»-Wert, zusammen mit verschiedenen «MIN#»-Werten, mehrfach vorkommt.

Beziehungsmenge			Typ
Menge A	↔	Menge B	A:B
Publikation	↔	Autor	M:M
Publikation	↔	Publikation	M:M
Publikation	↔	Handstück	1:M
Handstück	↔	Mineral	1:M
Handstück	↔	Paragenese	1:M
Paragenese	↔	Mineral	C:M
Handstück	↔	Mineralgruppe	1:M
Mineralgruppe	↔	Mineral	1:M
Paragenese	↔	P-T-Interpretation	1:M
P-T-Interpretation	↔	EMS-Analyse	M:M
P-T-Interpretation	↔	Stabilitätsdiagramm	1:M
Stabilitätsdiagramm	↔	Label	1:M
Stabilitätsdiagramm	↔	Reaktion	1:M
Reaktion	↔	Label	1:M
Reaktion	↔	Punkt	1:M
Mineral	↔	Einschlussmineral	C:M
Mineral	↔	Flüssigkeitseinschluss	1:M
Flüssigkeitseinschluss	↔	Phase	1:M
Flüssigkeitseinschluss	↔	chemische Komponente	1:M
Mineral	↔	EMS-Analyse	1:M
EMS-Analysen-Messprofil	↔	EMS-Analyse	C:M

Tab. 2.2: Beziehungsmengen und deren Abbildungstyp

Die Beziehungsmengen vom Typ (C:M), beispielsweise «Paragenese – Mineral», werden analog dargestellt. Da jedoch ein Mineral nicht notwendigerweise einer Paragenese zuzuordnen ist, müssen für den Fremdschlüssel Nullwerte<sup>4</sup> zugelassen werden.

Für eine Beziehungsmenge ist eine eigene Relation zu definieren, wenn sie eine komplexe Abbildung (M:M) darstellt. Aus dem Namen dieser Relation geht hervor, welche Entitätsmengen in Beziehung zueinander gebracht werden (Tabelle 2.3, unterer Teil). Zum Beispiel wird die Beziehungsmenge «Publikation – Autor» durch die Relation «writes» dargestellt. Sie enthält die Information, welche Publikation von welchem Autor stammt. Sie weist einen zusammengesetzten Primärschlüssel auf, der sich aus den Schlüsselteilen «PUB#» (Primärschlüssel in «publication») und «AUT#» (Primärschlüssel in «author») zusammensetzt. Folglich kann zwar sowohl eine Publikation als auch ein Autor in der Relation mehrfach vorkommen, die Kombination Publikation/Autor allerdings nur einmal!

Die auf diese Weise erhaltenen Elementar-Relationen repräsentieren die Datenarchitektur. Damit die Beziehungsintegrität erhalten bleibt, wenn ein Primärschlüsselwert gelöscht werden soll, geschieht folgendes mit den entsprechenden Fremdschlüsseln:

**Weitergabe der Löschung (wl):** Löscht man beispielsweise ein Stabilitätsdiagramm, so werden alle Daten mit dem entsprechenden Fremdschlüssel in den Relationen «plot-reaction», «plotpoint», «plotlabel» gelöscht.

<sup>4</sup>Ein *Nullwert* (englisch: *Null Value*) bedeutet «nicht existent» und darf nicht verwechselt werden mit einem *numerischen 0-Wert* (englisch: *zero*).

Name	Schlüssel
publication	<u>PUB#</u>
author	<u>AUT#</u>
sample	<u>SAM#</u> PUB#
paragenesis	<u>PAR#</u> SAM#
ptinterpretation	<u>PTI#</u> PAR#
plot	<u>PLT#</u> PTI#
plotreaction	<u>RCN#</u> <u>PLT#</u>
plotlabel	<u>LAB#</u> <u>RCN#</u> <u>PLT#</u>
plotpoint	<u>PNT#</u> <u>RCN#</u> <u>PLT#</u>
mingroup	<u>MINAME</u> <u>SAM#</u>
mineral	<u>MIN#</u> nw IN_MIN#    nw PAR#    MINAME    SAM#
flincassociation	<u>FLI#</u> MIN#
flincphase	<u>FPH#</u> <u>FLI#</u>
flincomposition	<u>FCM#</u> <u>FLI#</u>
emsprofile	<u>EMP#</u> MIN#
emsanalysis	<u>EMS#</u> MIN#            nw EMP#
references	<u>PUB#</u> <u>REL_PUB#</u>
writes	<u>PUB#</u> <u>AUT#</u>
baseson	<u>PTI#</u> <u>EMS#</u>

Tab. 2.3: Elementarrelationen; Abkürzungen: nw: Nullwerte sind zugelassen.

**Nullsetzung bei Löschung (nl):** Löscht man zum Beispiel eine Paragenese oder ein EMS-Analysen-Messprofil, so werden die entsprechenden Fremdschlüssel in den Relationen «mineral» bzw. «emsanalysis» auf Null gesetzt.

**Bedingte Löschung (bl):** Ein Handstück kann beispielsweise nur gelöscht werden, wenn weder Einträge für zugehörige Mineralien noch Paragenesen vorliegen.

In die einzelnen Elementarrelationen müssen noch Attribute eingeführt werden, damit sämtliche wichtigen Eigenschaften der unterliegenden Entitäten erfasst werden können (vgl. Kapitel 3). Durch diesen Prozess entsteht ein globales Datenmodell.

Abschliessend müssen die Relationen bis zur 3. Normalform normalisiert werden (VETTER, 1990). Voll normalisierte Relationen weisen keine Redundanz auf, und es treten keine Schwierigkeiten bei Speicheroperationen (Einschub-, Lösch- und Modifikationsoperationen) auf. Voll normalisierte Relationen halten einen Realitätsausschnitt einwandfrei entsprechend der getätigten Beobachtungen fest und lassen sich wie eine präzise, verbale Realitätsbeschreibung interpretieren.

## 2.3 Logische Datenstrukturen

### 2.3.1 Das konzeptionelle Strukturdiagramm

Im konzeptionellen Strukturdiagramm sind sowohl voraussichtliche Datenmengen und Angaben zur Beziehungsintegrität als auch Primärschlüssel-Fremdschlüssel-Beziehungen dargestellt. Jede Relation ist in Form eines Kästchens dargestellt, und die Relationen, die aufgrund

des Primärschlüssel-Fremdschlüssel-Prinzips miteinander in Beziehung stehen, sind mit Pfeilen verbunden (vgl. Fig. 2.2).

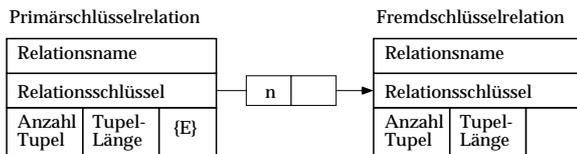
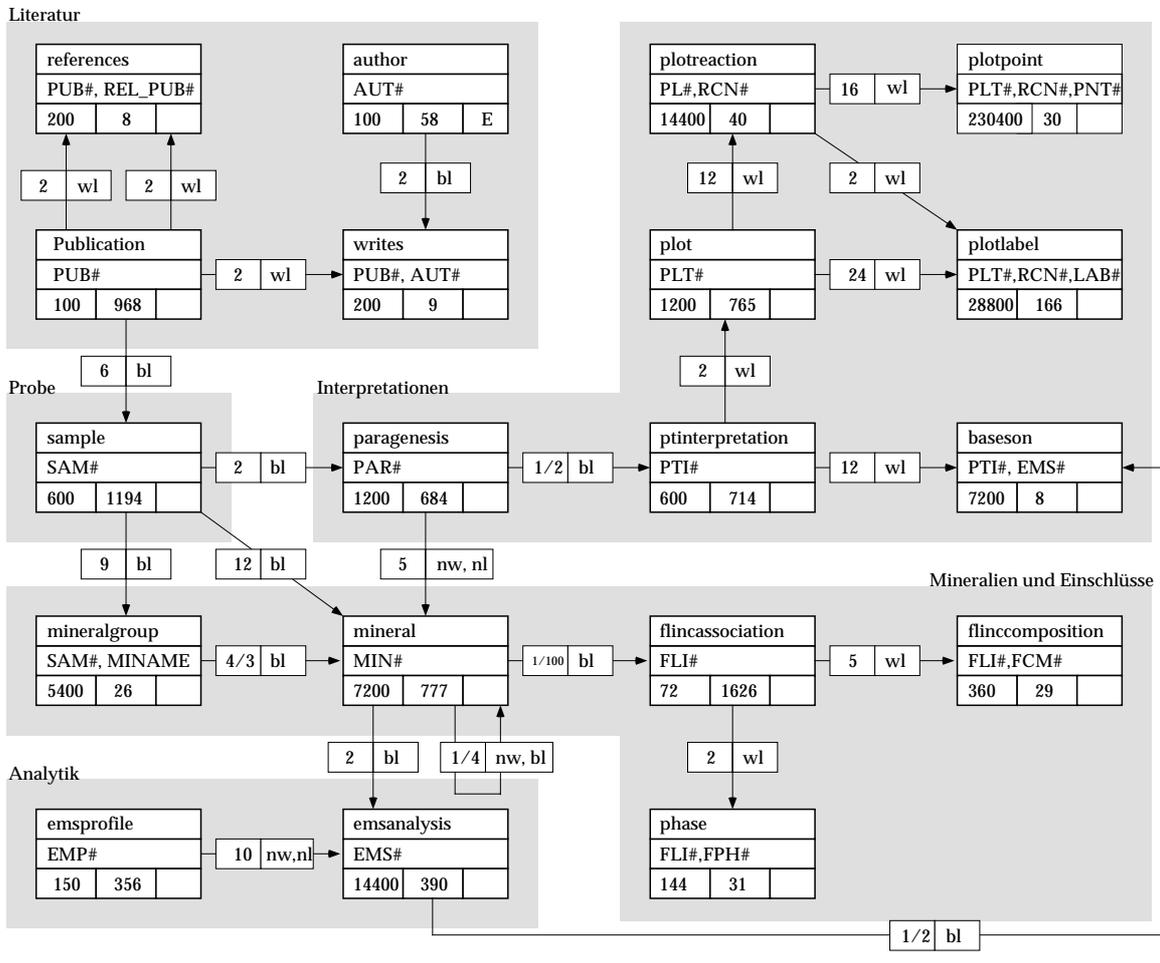


Fig. 2.2: Konzeptionelles Strukturdiagramm mit Hervorhebung der Sachgebiete; Abkürzungen: wl: Weitergabe der Löschung; nl: Nullsetzung bei Löschung; bl: Bedingte Löschung; nw: Nullwerte sind zugelassen; E: Eigenständige Relation (Datenmanipulation ist ohne Rücksicht auf andere Relationen möglich); n: Ein Tupel der Primärschlüsselrelation steht mit n Tupeln der Fremdschlüsselrelation in Verbindung.

### 2.3.2 Zugriffspfade

Mit Hilfe des konzeptionellen Strukturdiagrammes lassen sich Zugriffspfade ableiten, die beschreiben, in welcher Reihenfolge die Daten zur Verfügung zu stellen sind, damit Anwen-

dungsprogramme möglichst effizient arbeiten können. Die Zugriffspfadmatrix zeigt an, von welcher Relation auf eine andere zugegriffen wird. In dieser Matrix sind sämtliche Zugriffspfade vereinigt (vgl. Fig. 2.3).

von \ zu	publication	author	sample	paragenesis	ptinterpretation	plot	plotcmp	plotlabel	plotpoint	plotreaction	plotrestart	mineralgroup	mineral	flincass	flinccomp	flincphase	emsprofile	emsanalysis	references	writes	baseson	
publication																						
author																						
sample																						
paragenesis																						
ptinterpretation																						
plot																						
plotcmp																						
plotlabel																						
plotpoint																						
plotreaction																						
plotrestart																						
mineralgroup																						
mineral																						
flincass																						
flinccomp																						
flincphase																						
emsprofile																						
emsanalysis																						
references																						
writes																						
baseson																						

Fig. 2.3: Zugriffspfadmatrix

## 2.4 Physische Datenstrukturen

Im Unterschied zu indizierten, netzwerkförmig strukturierten oder hierarchisch-netzwerkförmigen Datenbeständen, für die die physischen Datenstrukturen zuerst abgeleitet werden müssen, können mit einem relationalen DBMS wie INGRES die Relationen direkt implementiert werden.

### 2.4.1 Indexe, Speicherstrukturen und DB-Optimierung

Für den Zugriff auf eine Relation können beliebige Attribute in Frage kommen. Falls der Abfrage jedoch ein Attribut zugrunde liegt, für das kein Index vorliegt, erfordert selbst eine einfache Abfrage ein sequentielles Durchlesen der ganzen Relation.

Eine Speicherstruktur ist eine File-Architektur, die einen speziellen Zugriff auf Daten in den Tabellen ermöglicht. Speicherstrukturen mit Schlüsseln ermöglichen einen bedeutend schnelleren Zugriff auf die Daten als wenn die Tabelle oder der Index keinen Schlüssel hätte. INGRES bietet 4 Basis-Speicherstrukturen an: heap, hash, isam und btree (CHIP SPECIAL, 1989; DATE 1987). Jede Speicherstruktur bietet optimale Leistung für bestimmte Abfragen und Anwendungen. Die idealen Speicherstrukturen der Tabellen und Indexe werden aufgrund deren Grösse und Funktionen bestimmt.

Für jede Tabelle wurden Speicherstrukturen mit eindeutigen (engl. unique) Schlüsseln gewählt. Diese eindeutigen Schlüssel entsprechen den Primärschlüsseln der Tabellen. Mit Hilfe der Zugriffsmatrix (vgl. Fig. 2.3) wurden die zusätzlich notwendigen Indexe und deren Speicherstruktur mit zum Teil mehrdeutigen (engl. non-unique) Schlüsseln ermittelt (vgl. Tabelle 2.4).

INGRES benutzt einen Query-Optimierer, der vor jeder Datenbank-Transaktion eine optimale Zugriffsstrategie entwickelt (DATE 1987). Der Query-Optimierer benutzt dazu sowohl Basisinformationen wie Datengrösse, Anzahl Daten, Indexe als auch mehr datenbezogene Informationen wie z.B. den Grad an Datenduplikation innerhalb eines Attributsfeldes. Diese datenbezogene Information kann INGRES mit dem Programm «optimizeDB», das eine Statistik über die Verteilung der Schlüsselwerte erstellt, zugänglich gemacht werden. Die Zugriffszeit auf die Daten wird so erheblich verkürzt.

## 2.5 Anwendungen

Eine INGRES-Anwendung ist ein Programm, das ein bestimmtes Problem löst, indem es eine Datenbank öffnet und eine Serie von Operationen (Abfrage-, Einschub-, Lösch-, Modifikationsoperationen) ausführt.

Eine typische Anwendung zeigt einen bestimmten Datensatz auf einem Bildschirmformular an und gestattet dem Benutzer über ein Menü die gewünschte Aktion. Ein Bildschirmformular mit Menü nennt man Frame. Eine vollständige Anwendung besteht in der Regel aus einer komplexen Abfolge von Frames.

Für die Datenbank **PARADIS** existieren zwei Anwendungen, UNIVERSAL und SPOUT, deren Funktionen im Folgenden kurz beschrieben werden.

### 2.5.1 Die Anwendung UNIVERSAL

Diese Anwendung erlaubt die vollständige Manipulation (Eingabe, Abfrage, Veränderung, Löschen) aller *Primärdaten* in **PARADIS**. Man ist gezwungen, der logischen Datenstruktur zu folgen, damit bei der Eingabe von Daten die Schlüssel-Fremdschlüssel-Beziehungen korrekt abgelegt werden können. Figur 2.4 zeigt die leicht vereinfachte Frame-Abfolge von UNIVERSAL. Jede Frame erlaubt die vollständige Manipulation einer oder mehrerer Tabellen.

Man beginnt mit der Eingabe der Publikationsdaten. Erst nach dem Publikationseintrag kann man dazugehörige Handstückbeschreibungen eingeben. Nach dem Handstück folgen die Paragenesen und/oder die Mineralien, falls vorhanden deren Mineral- und Flüssigkeitseinschlüsse und schliesslich die EMS-Analysen. Paragenesen können auch nachträglich definiert werden;

Tabellen <i>Indexe</i>	Speicher- struktur	unique ±	Schlüssel
publication <i>pubidx</i>	cbtree isam	+ +	PUB# title, keywords
author <i>autidx</i>	btree isam	+ +	AUT# secondname, firstname
sample <i>samidx</i>	cbtree isam	+ -	SAM# PUB#, sampcd1, sampcd2
paragenesis <i>paridx</i>	cbtree hash	+ -	PAR# SAM#
ptinterpretation <i>ptiidx</i>	btree hash	+ -	PTI# PAR#
plot plotcmp plotlabel plotpoint plotreaction plotrestart	btree btree btree btree btree btree	+ + + + + +	PLT# PLT#, part# PLT#, RCN#, LAB# PLT#, RCN#, PNT# PLT#, RCN# PLT#, part#
mineralgroup	btree	+	SAM#, miname
mineral <i>minidx1</i> <i>minidx2</i> <i>minidx3</i>	cbtree isam hash hash	+ - - -	MIN# SAM#, PAR#, in_min#, miname PAR# in_min#
flincass <i>flaidx</i>	btree isam	+ -	FLI# MIN#, PAR#
flinccomp <i>flcidx</i>	btree hash	+ -	FCM# FLI#
flincphase <i>flpidx</i>	btree hash	+ -	FPH# FLI#
emsprofile	btree	+	EMP#
emsanalysis <i>emsidx</i>	cbtree isam	+ -	EMS# MIN#, EMP#
references writes baseson	isam isam btree	+ + +	PUB#, rel_PUB# PUB#, AUT# PTI#, EMS#

Tab. 2.4: Speicherstrukturen

auch die beschriebenen Mineralien oder Mineraleinschlüsse lassen sich nachträglich noch einer Paragenese zuordnen oder aus ihr entfernen. EMS-Analysen können entweder eingetippt (Uff!) oder von einem Elektronenmikrosondefile eingelesen und anschliessend den entsprechenden Mineralien zugeordnet werden. Analysen, die zu einer Messreihe über ein oder mehrere Mineralien gehören, kann man zu Messprofilen gruppieren.

Fakten und Interpretationen sind in der Datenbank getrennt. Die Interpretationen können gelöscht werden, ohne dass die Fakten beeinflusst werden (z.B. kann man die Parageneseninformation löschen, ohne dass die Mineralien gelöscht werden). Fakten kann man hingegen nur dann löschen, wenn keine anderen Fakten oder Interpretationen auf ihnen basieren (bedingte Löschung).

### 2.5.2 Die Anwendung SPOUT

Die Anwendung SPOUT erfüllt zwei Aufgaben:

1. Ausgabe sämtlicher Daten (also sowohl *Primär*- als auch *Sekundär*daten) in verschie-

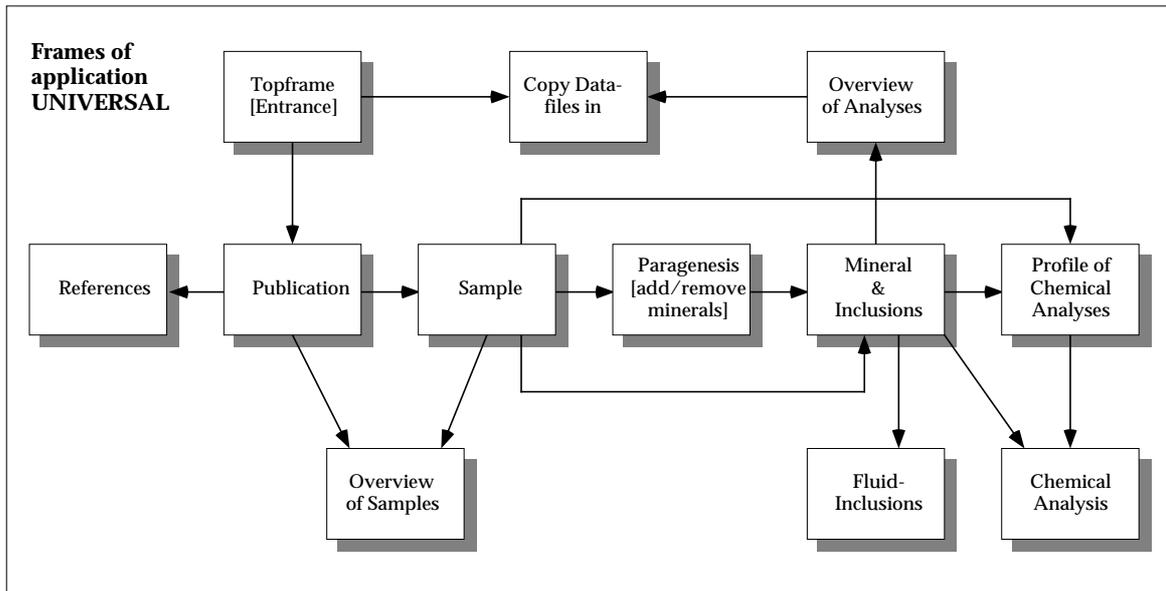


Fig. 2.4: Abfolge der Frames in der Anwendung UNIVERSAL

densten Formaten und

2. Manipulation von *Sekundärdaten* (Erstellung von P-T-Interpretationen und Auswertung von Stabilitätsdiagrammen). *Primärdaten* lassen sich nicht verändern.

### Datenausgabe

Bei der Datenausgabe ist man nicht mehr gezwungen, der logischen Datenstruktur zu folgen, da die Schlüssel-Fremdschlüssel-Beziehungen ja alle schon bestehen. SPOUT erlaubt den Einstieg in **PARADIS** auf Handstückebene. Figur 2.5 zeigt die leicht vereinfachte Frame-Abfolge von SPOUT.

Die Ausgabe beliebiger Datensätze erfolgt in verschiedensten Formaten, entweder mit Hilfe von vorgefertigten INGRES-Reporten oder integrierten Fortran-Programmen.

- Diverse Reporte erlauben die Ausgabe von einfachen Beschreibungen (z.B. von Handstücken, Handstücklisten, Paragenesen, Mineralien). Sie können wahlweise als einfaches Textfile oder als fertig formatiertes  $\text{\LaTeX}$ -File ausgegeben werden, das, mit  $\text{\TeX}$  gesetzt, druckreife Dokumente produziert.
- Mineralanalysen werden in Formaten ausgegeben, die für Normierungsprogramme wie MINSORT oder NORM geeignet sind, welche die Daten für petrologische Programme wie TWEEQU vorbereiten. Die Analysen lassen sich wahlweise für eine ganze Probe, eine Paragenese, nur ein einzelnes Mineral oder für eine P-T-Interpretation ausgeben. Im letzten Fall muss man sich die geeigneten Analysen aussuchen. SPOUT erzeugt dann automatisch Verweise zu den Analysen, so dass die analytischen Grundlagen für die P-T-Interpretation festgelegt sind.
- Stabilitätsdiagramme (P-T, T-X usw.) und assoziierte Daten (Diagramm-Berechnungsoptionen: TWEEQU-restart-File und die chemische Zusammensetzung der Mineralien: TWEEQU-cmp-File) werden im gleichen Format geschrieben, wie sie das Programm

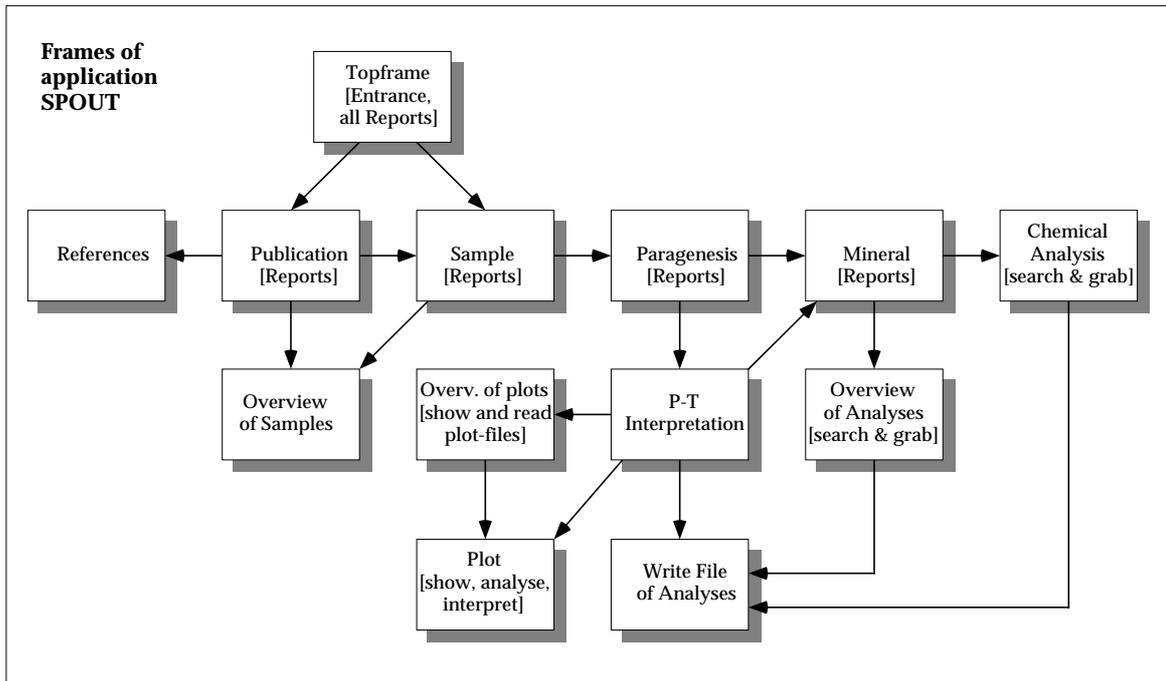


Fig. 2.5: Abfolge der Frames in der Anwendung SPOUT

TWEEQU ausgibt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, Diagramme in **PARADIS** mit Hilfe von auf TWEEQU abgestimmten Zeichenprogrammen (GridLoc) oder integrierten UNIX-Programmen (AWK-Postscript-Konverter, Pageview) auf dem Bildschirm anzuzeigen oder mit Hilfe des restart-Files neu zu berechnen, eventuell mit leicht geänderten Optionen.

- Druck- und Temperaturwerte von P-T-Interpretationen oder andere Probandaten (Gesteinsnamen, -codes, Parageneseninformationen usw.) können entweder zusammen mit den Probenkoordinaten als rohes GMT-Datenfile oder sogar in Form eines fertigen UNIX-Shellscriptes für das GMT-System ausgegeben werden. Das GMT-System vermag auf einer Basiskarte thematische Informationen an ihren geographischen Orten darzustellen. Druck und Temperaturwerte können konturiert werden. Damit besteht die Möglichkeit, Isobaren-, Isothermen- oder andere thematische Karten zu erstellen.

### Analytik

SPOUT dient jedoch auch zur Bearbeitung von Sekundärdaten wie P-T-Interpretationen und Stabilitätsdiagrammen. Hat man eine Paragenese in der Datenbank gefunden, so kann man dazu eine oder mehrere P-T-Interpretationen eingeben.

Stabilitätsdiagramme, auf der Basis von Mineralanalysen aus **PARADIS** mit dem Programm TWEEQU berechnet, lassen sich zusammen mit den Berechnungsoptionen (das restart-File) und den chemischen Zusammensetzungen der Mineralien (das cmp-File) wieder zur P-T-Interpretation ins **PARADIS** einlesen. Pro P-T-Interpretation können mehrere Diagramme eingelesen werden. Ein Plotfile enthält neben den Reaktionskurven und deren Labels auch die Delta-Größen ( $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta V$ ) der Reaktionen.

In SPOUT integriert sind Programme, die aus diesen Daten eines P-T-Stabilitätsdiagrammes petrologisch wichtige Informationen extrahieren können:

- Man kann irgendeine Kurve des Diagramms auswählen, T (bzw. P) eingeben und erhält P (bzw. T). Dies ist besonders in einfachen Diagrammen mit wenigen Kurven nützlich.
- Bei komplizierten P-T-Diagrammen mit vielen Kurven besteht die Möglichkeit, mit verschiedenen Berechnungsmethoden einen einzigen, optimalen P-T-Punkt zu ermitteln, bei dem das System equilibriert hat. Berücksichtigt werden dabei die Schnittpunkte der Reaktionskurven:
  1. Durchschnittliche T und P mit Standardabweichung aus *sämtlichen* Schnittpunkten.
  2. Durchschnittliche T und P mit Standardabweichung aus allen Schnittpunkten ausser denen, wo sich zwei Kurven unter *sehr kleinem Winkel* schneiden.
  3. Durchschnittliche T und P mit Standardabweichung aus allen Schnittpunkten ausser denen, wo Reaktionen mit *sehr kleinen  $\Delta S$  und  $\Delta V$*  beteiligt sind.
  4. Durchschnittliche T und P mit Standardabweichung aus allen Schnittpunkten ausser denen, wo die Schnittwinkel *und  $\Delta S, \Delta V$*  sehr klein sind.
  5. Durchschnittliche T und P, gewichtet nach dem Schnittwinkel der Kurven.
  6. Durchschnittliche T und P, gewichtet nach  $\Delta S$  und  $\Delta V$ .
  7. Durchschnittliche T und P, gewichtet nach Schnittwinkel der Kurven *und  $\Delta S, \Delta V$* .

Die Standardabweichungen stellen ein Mass für die Streuung der Schnittpunkte dar und erlauben eine Abschätzung der Konsistenz der Resultate unter der Voraussetzung der drei kritischen Annahmen für die Thermobarometrie (vgl. Kap. 6.1.3). Die Standardabweichungen repräsentieren jedoch nicht statistisch gültige Gesamtunsicherheiten der P-T-Abschätzung. Die Gesamtunsicherheiten sind ausserordentlich schwer quantitativ abzuschätzen und können nicht mit statistischen Standardmethoden berechnet werden (vgl. BERMAN, 1991).

Alle Resultate werden in **PARADIS** beim Stabilitätsdiagramm abgelegt. Der bevorzugte P-T-Punkt lässt sich mit Verweis auf die Berechnungsmethode in der P-T-Interpretation abspeichern und kann z.B. für Isothermen- und Isobarenkarten verwendet werden.



# Kapitel 3

## Daten

### 3.1 Datenanalyse

Im folgenden werden sämtliche Relationen mit allen ihren Attributen vorgestellt. Dabei wird insbesondere auch auf die Domänen hingewiesen, die den Attributen unterliegen, damit für jeden Datenbankbenutzer klar ersichtlich ist, in welcher Form ein Eintrag zu erfolgen hat. Selbstverständlich wird sich der Benutzer nicht um das Einsetzen von irgendwelchen Schlüsseln kümmern müssen, das DBMS kann diese Aufgabe viel schneller und zuverlässiger lösen.

In den Tabellen findet man Informationen über die Namen der Attribute (Primär- und Fremdschlüssel sind versal geschrieben), die zugehörigen Datentypen, deren Länge und Erläuterungen zu den Domänen oder andere Bemerkungen.

Attribute, die Nullwerte enthalten können, sind kursiv geschrieben. Nullwerte sind nur dort sinnvoll, wo speziell darauf hingewiesen werden soll, dass keine Daten vorliegen. Dies ist, wie bereits erwähnt, bei bestimmten Fremdschlüsseln sinnvoll, wenn die entsprechenden Primärschlüssel nicht existieren. Erlaubt man bei numerischen Datentypen Nullwerte, so kann ausserdem klar zwischen «nicht existent» und «numerisch 0» unterschieden werden. Vor allem bei EMS-Analysen von Mineralien ist es wichtig, unterscheiden zu können, ob ein Element im Mineral nicht vorkommt (numerisch 0) oder ob das Element gar nicht gemessen wurde (Nullwert).

Die verwendeten Datentypen sind INGRES-spezifisch und wurden mit der relationalen Sprache QUEL definiert.

#### 3.1.1 Publikation, Autoren und Referenzen

Um eine geologische Publikation möglichst vollständig zu charakterisieren, benötigt man die folgenden Angaben, die auf die Relationen «author», «writes», «publication» und «references» verteilt sind (vgl. Tabelle 3.1).

In der Relation «publication» finden sich die Angaben über das eigentliche Werk.

Die Relation «writes» wird vom DBMS automatisch manipuliert. Sie enthält die Information, welche Publikation von welchem Autor stammt.

Die Relation «references» verweist auf andere, beispielsweise thematisch verwandte Publikationen in der Datenbank oder auf Publikationen, die in der Referenzliste erscheinen.

PUBLICATION			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PUB#	integer	4	Primärschlüssel
year	integer	2	Erscheinungsjahr
title	varchar	240	Titel
territory	varchar	180	Arbeitsgebiet
keywords	varchar	110	Schlüsselwörter
type	char	5	Diss, Pap, Dipl...
journal	varchar	60	Zeitschrift
volume	char	10	Band
frompage	integer	2	Beginn Seitenzahl
topage	integer	2	Ende Seitenzahl
institute	varchar	50	Adr. des Autors
university	varchar	50	Universität
emsanalyst	varchar	25	Sonde-Laborant
remarks	varchar	200	Bemerkungen
newdate	date		Eintragsdatum

AUTHOR			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
AUT#	integer	4	Primärschlüssel
secondname	varchar	25	Nachname
firstname	varchar	25	Vorname

WRITES			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PUB#	integer	4	Primärschlüssel
AUT#	integer	4	Primärschlüssel
sort#	integer	1	Reihenfolge

REFERENCES			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PUB#	integer	4	Primärschlüssel
REL_PUB#	integer	4	Primärschlüssel

Tab. 3.1: Relationen «author», «writes», «publication» und «references»

### 3.1.2 Handstück und Mineralien

Die Relationen «sample», «mineralgroup» und «mineral» enthalten die wichtigsten Informationen zur Charakterisierung eines Handstücks.

Die Relation «sample» enthält nicht nur die makroskopische Gesteinsbeschreibung, sondern auch Angaben über den Fundort.

Die Relation «mineralgroup» beschreibt zusammenfassend gleiche Mineralien (z.B. Schieferungsbiotit, Quersbiotit usw.) aus verschiedenen textuellen Umgebungen (Paragenesen).

In der Relation «mineral» können mikroskopische Beobachtungen abgelegt werden.

SAMPLE			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
SAM#	integer	4	Primärschlüssel
PUB#	integer	4	Fremdschlüssel
sampcd1	char	15	1. Code
sampcd2	char	15	2. Code
rockname	varchar	80	Gesteinsname
rockclass	varchar	40	Gesteinsklasse
tectunit	varchar	80	tekton. Einheit
descript	varchar	400	makr. Beschr.
fabric	varchar	180	Gefüge
location	varchar	150	Fundort
xcoord	float	4	Längen-Koord.
ycoord	float	4	Breiten-Koord.
zcoord	float	4	Höhe über Meer
remarks	varchar	200	Bemerkungen

MINERALGROUP			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
SAM#	integer	4	Primärschlüssel
MINAME	char	20	Primärschlüssel
<i>modal</i>	integer	1	Modalanteil

MINERAL			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
MIN#	integer	4	Primärschlüssel
<i>IN_MIN#</i>	integer	4	Fremdschlüssel
<i>PAR#</i>	integer	4	Fremdschlüssel
SAM#	integer	4	Fremdschlüssel
MINAME	char	20	Fremdschlüssel
<i>mingrainsize</i>	float	4	min. Korngrösse
<i>maxgrainsize</i>	float	4	max. Korngrösse
description	varchar	525	mikr. Beschr.
remarks	varchar	200	Bemerkungen

Tab. 3.2: Relationen «sample», «mineral» und «mineralgroup»

### 3.1.3 EMS-Analysen und -Messprofile

Die Relation «*emsanalysis*» enthält alle wichtigen Informationen einer Elektronenmikrosonde-Messung. «*emsprofile*» gruppiert die Analysen zu einem Messprofil über ein oder mehrere Mineralien und gibt somit Auskunft über chemische Zonierungen.

EMSANALYSIS				EMSPROFILE			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen	Attribut	Typ	L	Bemerkungen
EMS#	integer	4	Primärschlüssel	EMP#	integer	4	Primärschlüssel
MIN#	integer	4	Fremdschlüssel	profdescription	varchar	200	Beschreibung
GRA#	integer	4	Kornnummer	rim1against	char	20	Nachbar 1
EMP#	integer	4	Fremdschlüssel	rim2against	char	20	Nachbar 2
x_position	float	8	Messtischkoord.	lengthmm	float	4	Profillänge
y_position	float	8	Messtischkoord.	distancemm	float	4	Pt.-Abstand
anacd1	char	10	1. Code	remarks	varchar	100	Bemerkungen
anacd2	char	10	2. Code				
rimcore	char	10	Messort im Korn				
averagean	integer	1	Durchschnitt				
SiO <sub>2</sub>	float	4	Gew% der				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	float	4	Oxide				
TiO <sub>2</sub>	float	4					
FeO	float	4					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	float	4					
MnO	float	4					
MgO	float	4					
CaO	float	4					
Na <sub>2</sub> O	float	4					
K <sub>2</sub> O	float	4					
NiO	float	4					
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	float	4					
ZnO	float	4					
H <sub>2</sub> O	float	4					
F	float	4					
Cl	float	4					
Li <sub>2</sub> O	float	4					
tot	float	4	Total				
remarks	varchar	150	Bemerkungen				
newdate	date		Eintragsdatum				

Tab. 3.3: Relationen «*emsanalysis*» und «*emsprofile*»

### 3.1.4 Paragenesen und P-T-Interpretationen

Die Relationen «*paragenesis*» und «*ptinterpretation*» enthalten die Informationen über Paragenesen und Druck-Temperatur-Abschätzungen. Druck-Temperatur-Werte können von Hand oder als Resultat von einem in der Anwendung SPOUT (vgl. Kapitel 2.5.2) integrierten Plot-Analyseprogramm automatisch eingesetzt werden.

In der Relation «*baseson*» steht, auf welchen EMS-Analysen die P-T-Abschätzung basiert (P-T-interpretation bases on EMS-analysis).

PARAGENESIS			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PAR#	integer	4	Primärschlüssel
SAM#	integer	4	Fremdschlüssel
facies	char	30	Metam.-Fazies
locfabric	vchar	300	Paragenese-Textur
metage	char	20	Metamorphosealter
presest	char	10	P des Autors
tempest	char	10	T des Autors
source	vchar	100	Quelle der Daten
remarks	text	200	Bemerkungen

BASESON			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PTI#	integer	4	Primärschlüssel
EMS#	integer	4	Primärschlüssel

PTINTERPRETATION			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PTI#	integer	4	Primärschlüssel
SAM#	integer	4	Fremdschlüssel
PAR#	integer	4	Fremdschlüssel
PT_PLT#	integer	4	Plot-Nummer
id.code	char	20	Code
quality	integer	2	Güte
temperatur	float	8	Temperatur
t_dispersion	float	8	T-Verteilung
pressure	float	8	Druck
p_dispersion	float	8	P-Verteilung
calcmeth	char	30	Methode
thermometer	char	100	Thermometer
barometer	char	100	Barometer
description	vchar	400	Beschreibung
date	date		Eintragsdatum

Tab. 3.4: Relationen «paragenesis», «ptinterpretation» und «baseson»

### 3.1.5 Plots

Druck- und Temperaturabschätzungen wurden mit dem Programm TWEEQU (BERMAN 1991) vorgenommen. Die berechneten Phasendiagramme können direkt eingelesen und bei der P-T-Interpretation abgelegt werden. In Tabelle 3.5 finden sich die dazu benötigten Relationen. «Plotcmp» und «Plotrestart» sind Hilfsrelationen, in die das composition- resp. das restart-file Zeile für Zeile abgelegt werden, damit die Diagramme sofort neu berechnet werden können, z.B. mit leicht abgeänderten Berechnungsoptionen.

Die TWEEQU-files werden automatisch eingelesen und die Daten in die entsprechenden Relationen verteilt. In der Anwendung SPOUT integrierte Analyseprogramme können auf diese Daten zugreifen und Durchschnittswerte von P, T und deren Standardabweichungen berechnen.

PLOT			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
PTI#	integer	4	Fremdschlüssel
plotlabx	char	25	Diagramm-x-Label
plotlaby	char	25	Diagramm-y-Label
xmin	float	8	x-Minimalwert
xmax	float	8	x-Maximalwert
ymin	float	8	y-Minimalwert
ymax	float	8	y-Maximalwert
xplen	float	8	?
yplen	float	8	?
val1	float	8	?
val2	float	8	?
mod	integer	4	?
rcn	integer	4	Anzahl Reaktionen
compsfile	char	25	Name des cmp-Files
ttot	float	8	T, alle Punkte
ttotdev	float	8	T-Stdabw.
ptot	float	8	P, alle Punkte
ptotdev	float	8	P-Stdabw.
ntot	float	8	Anzahl aller Punkte
ta	float	8	T, ohne enge Winkel
tadev	float	8	T-Stdabw.
pa	float	8	P, ohne enge Winkel
padev	float	8	P-Stdabw.
na	float	8	Anzahl Punkte
tsv	float	8	T, ohne kleine SV
tsvdev	float	8	T-Stdabw.
psv	float	8	P, ohne kleine SV
psvdev	float	8	P-Stdabw.
nsv	float	8	Anzahl Punkte
tasv	float	8	T, ohne SV, Winkel
tasvdev	float	8	T-Stdabw.
pasv	float	8	T, ohne SV, Winkel
pasvdev	float	8	P-Stdabw.
nasv	float	8	Anzahl Punkte
twa	float	8	T, winkelgewichtet
pwa	float	8	P, winkelgewichtet
twsv	float	8	T, SV-gewichtet
pwsv	float	8	P, SV-gewichtet
twasv	float	8	T, wink.-, SV-gew.
pwasv	float	8	P, wink.-, SV-gew.
remarks	varchar	400	Bemerkungen

PLOTLABEL			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
RCN#	integer	4	Primärschlüssel
LAB#	integer	4	Primärschlüssel
x	float	8	x-Koordinate
y	float	8	y-Koordinate
ht	float	8	?
beta	float	8	Rotationswinkel
title	varchar	120	Label-Text

PLOTREACTION			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
RCN#	integer	4	Primärschlüssel
labels	integer	4	Anzahl Labels
points	integer	4	Anzahl Punkte
deltah	float	8	Delta H
deltas	float	8	Delta S
deltav	float	8	Delta V

PLOTPOINT			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
RCN#	integer	4	Primärschlüssel
PNT#	integer	4	Primärschlüssel
xval	float	8	x-Koordinate
yval	float	8	y-Koordinate
movedraw	integer	2	Zeichen-Befehl

PLOTCMP			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
PART#	integer	4	Primärschlüssel
text	varchar	100	Textteil

PLOTRESTART			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
PLT#	integer	4	Primärschlüssel
PART#	integer	4	Primärschlüssel
text	varchar	100	Textteil

Tab. 3.5: Relationen «plot», «plotlabel», «plotreaction», «plotcmp», «plotpoint» und «plotrestart»

### 3.1.6 Flüssigkeitseinschlüsse

Flüssigkeitseinschlüsse, die zusammen entstanden sind, bilden eine Assoziation. Um Flüssigkeitseinschluss-Assoziationen umfassend beschreiben zu können, sind drei Relationen notwendig. Obwohl viele analytische Methoden existieren, um Flüssigkeitseinschlüsse zu untersuchen, wurde vorerst nur auf die Heiztisch-Analytik Rücksicht genommen.

FLINCASSOCIATION			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
FLI#	integer	4	Primärschlüssel
MIN#	integer	4	Fremdschlüssel
PAR#	integer	4	Fremdschlüssel
modeofocc	varchar	300	Erscheinungsform
relage	varchar	100	relatives Alter
size	varchar	80	Grösse
morphology	varchar	300	Morphologie
<i>tmin</i>	float	4	
<i>tmcarmean</i>	float	4	
<i>tmcarlow</i>	float	4	
<i>tmcarup</i>	float	4	
<i>tmcarreaction</i>	varchar	30	
<i>temean</i>	float	4	
<i>telow</i>	float	4	
<i>teup</i>	float	4	
<i>tereaction</i>	varchar	30	
<i>tmicemean</i>	float	4	
<i>tmicelow</i>	float	4	
<i>tmiceup</i>	float	4	
<i>tmicereaction</i>	varchar	30	
<i>tmclamean</i>	float	4	
<i>tmclalow</i>	float	4	
<i>tmclaup</i>	float	4	
<i>tmclareaction</i>	varchar	30	
<i>thcarlow</i>	float	4	
<i>thcarup</i>	float	4	
<i>thcarreaction</i>	varchar	30	
<i>tmsolidmean</i>	float	4	
<i>tmsolidlow</i>	float	4	
<i>tmsolidup</i>	float	4	
<i>tmsolidreaction</i>	varchar	30	
<i>thtotmean</i>	float	4	
<i>thtotlow</i>	float	4	
<i>thtotup</i>	float	4	
<i>thtotreaction</i>	varchar	30	
<i>tdecmean</i>	float	4	
<i>tdeclow</i>	float	4	
<i>tdecup</i>	float	4	
<i>tmax</i>	float	4	
<i>bulkdensity</i>	float	4	
<i>molvol</i>	float	4	
remarks	varchar	150	Bemerkungen
otherdata	varchar	300	weitere Daten?

FLINCPHASE			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
FPH#	integer	4	Primärschlüssel
FLI#	integer	4	Fremdschlüssel
phase	char	20	Phase
<i>modal</i>	integer	2	Modalanteil

FLINCCOMPOSITION			
Attribut	Typ	L	Bemerkungen
FCM#	integer	4	Primärschlüssel
FLI#	integer	4	Fremdschlüssel
species	char	10	chem. Spezies
<i>wtperc</i>	float	4	Gew.-%
<i>molperc</i>	float	4	Mol-%

Tab. 3.6: Relationen «flincassociation», «flincphase» und «flinccomposition»

## Teil II

# Evaluation von Paragenesedaten mesoalpiner Mineralvergesellschaftungen der Zentralalpen



## Kapitel 4

# Evaluation von Paragenese-Daten aus der Literatur

### 4.1 Anforderungen an Paragenese-Daten

Bevor man Anforderungen an eine Paragenesenbeschreibung stellen kann, muss man sich darüber im klaren sein, welche Prozesse eine Paragenese erzeugen, wie eine Paragenese definiert wird und wie man die Paragenese erkennen kann.

#### 4.1.1 Definition einer Paragenese

Metamorphose ist die Umwandlung eines Gesteins im festen Zustand und wird bewirkt durch eine bedeutende Veränderung der intensiven Variablen  $P$ ,  $T$ ,  $X$  und der Spannungen, die auf das Gestein wirken.

Alle diese Veränderungen bewirken einerseits eine Überprägung von neuen Strukturen über alte, z.T. diese völlig verwischend. Die neuen Strukturen können andere Korngrößen und -orientierungen aufweisen. Andererseits verändert sich sowohl die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins als auch die chemische Zusammensetzung der Mineralien. Alle diese Veränderungen in Struktur und Zusammensetzung sind eine Anpassung des Systems an einen neuen, stabileren Gleichgewichtszustand.

Die spezielle Aufgabe eines Petrologen besteht nun darin, Drucke und Temperaturen zu berechnen, denen ein Gestein während der Metamorphose unterworfen wurde. Um diese Ableitungen machen zu können, werden Mineralparagenesen interpretiert, einerseits unter dem Aspekt der chemischen Prozesse, die sie erzeugt haben, andererseits unter dem Aspekt der Strukturen, die das Resultat der physikalischen Kräfte sind, die auf das Gestein wirkten. PRESS & SIEVER (1986) definieren eine Mineralparagenese und deren Bedeutung folgendermassen:

...Precise guides [to pressure and temperature] are given by mineral assemblages, which consist of two, three or many minerals found together in a rock and whose textures indicate that they were formed at the same time in chemical equilibrium.

Diese zunächst klare Definition wirft jedoch einige Diskussionspunkte auf:

- Ordnet man Mineralien nur aufgrund textueller Kriterien einer Paragenese zu, so muss sichergestellt sein, dass die Paragenese syn- oder posttektonisch entstand, d.h.

die Texturen und die Mineralien entstanden gleichzeitig und man kann annehmen, dass sowohl textuelles als auch chemisches Gleichgewicht vorliegt.

- Nur diskontinuierliche chemische Reaktionen (Mineralumwandlungen) können die Textur beeinflussen! Kontinuierliche Reaktionen (Ionenaustausch) benötigen in der Regel geringere Aktivierungsenergien und können nach Beendigung der diskontinuierlichen Reaktionen noch weiterlaufen.

So können sich beispielsweise durch Fe-Mg-Austausch die Chemismen von Granat und Biotit bei der Abkühlung kontinuierlich weiter verändern, ohne dass die Textur des Gesteins beeinflusst wird. Aufgrund geringerer Ionendiffusionsgeschwindigkeit entstehen in der Regel am Granat Abkühlungsänderer, während die Biotite keine Zonierung zeigen. Granatänderer und Biotite ändern ihren Chemismus gleichzeitig, gehören somit zur gleichen Paragenese, allerdings zu einer späteren als die Granatkerne.

Teile ein und desselben Minerals können somit zu verschiedenen Paragenesen gehören!

- Metamorphe Reaktionen werden in der Regel mit thermodynamischen Methoden studiert. SPRY (1983) weist jedoch darauf hin, dass bei der Beurteilung metamorpher Mineralparagenesen die Kinetik nicht vergessen werden sollte. Die Reaktionsrate kann so langsam werden, dass kinetisch kontrollierte Texturen entstehen, die ein eingefrorenes Reaktionsstadium zeigen, das den Zustand des Energieminimums nicht erreicht hat und auf einem metastabilen Niveau stehen geblieben ist, weil die Aktivierungsenergie für die Reaktion unterschritten wurde. Dies gilt für kontinuierliche und diskontinuierliche Reaktionen gleichermaßen.

#### 4.1.2 Erkennung und Beschreibung einer Paragenese

In Anbetracht der oben erwähnten Problematik ist es keine triviale Aufgabe, eine Paragenese zu erkennen, besonders nicht in Gesteinen der Zentralalpen, deren Metamorphose sowohl polyphas als auch plurifaziell war. Im gleichen Gestein kommen deshalb in der Regel mehrere Paragenesen vor. Im folgenden werden die Erkennungskriterien kurz repetiert (vgl. auch SPRY, 1983; MASON, 1986):

1. Jedes Mineral der Paragenese sollte irgendwo im Gestein eine gemeinsame Korngrenze mit allen anderen Mineralien der Paragenese aufweisen.
2. Die Textur muss durch metamorphe Rekristallisation entstanden sein, d.h. die Paragenese entstand syn- oder posttektonisch.
3. Die Mineralien müssen stabil erscheinen, d.h. Zerfalls- oder Reaktionsprodukte gehören nicht zur Paragenese.
4. Zersetzungserscheinungen wie Serizitisierung, Saussuritisierung, Chloritisierung oder chemische Zonierungen oder chemische Reaktionen zwischen Mineralien sind Anpassungen des Systems an einen stabileren Gleichgewichtszustand und somit Hinweise auf die Entstehung einer neuen Paragenese.
5. Die Mineralien (oder Mineralteile) dürfen keine chemische Zonierung aufweisen.

Problematisch bei den Punkten 1-4 ist natürlich, dass man mit Hilfe *optischer* Methoden versucht, ein *chemisches* Gleichgewicht zu erkennen. Diese Erkennungsmerkmale sind deshalb nur als Anhaltspunkte zu betrachten und können keine letzte Sicherheit geben.

Mehr Sicherheit über die Paragenesenzugehörigkeit der Mineralien oder Mineralteile kann nur die auf detaillierten chemischen Analysen (Punkt 5) basierende Chemographie oder eine thermodynamische Gleichgewichtsberechnung geben.

Gerade bei chemischen Zonierungen von Mineralien ist es oft sehr schwierig, Paragenesen voneinander abzugrenzen. Beschreibungen dieser Zonierung oder Illustrationen in Form von chemischen Profilen über Mineralien sind jedoch für sinnvolle Abschätzungen von P und T unerlässlich.

## 4.2 Anforderungen an Elektronenmikrosonde-Daten

Für Druck- und Temperaturberechnungen müssen die Elektronenmikrosonde-Daten gewissen Anforderungen genügen.

Wünschenswert wäre natürlich, dass möglichst *alle* chemisch variablen Mineralien der im Gestein vorhandenen Paragenesen analysiert worden sind, damit man bei der Berechnung auch *alle* chemischen Gleichgewichte berücksichtigen kann. Existieren Messprofile über zonierte Mineralien, so können im Glücksfall die Veränderungen von Druck und Temperatur über verschiedene Metamorphosephasen detailliert bestimmt werden.

Als Mindestanforderung aber sollte mit den verfügbaren Analysen ein Thermometer oder ein Barometer formuliert werden können.

Die einzelnen Elektronenmikrosondeanalysen müssen den folgenden 3 Bedingungen genügen, damit man sie für Druck- und Temperaturberechnungen verwenden kann:

1. Das Total darf höchstens 2% Abweichung von 100% aufweisen! Ausgenommen sind natürlich wasserhaltige Mineralien, deren Total je nach Wassergehalt unter 100% liegt (Biotite ca 94.9%, Muskovite ca 94.7%, Chlorite ca 86.2%). Granate liegen in der Regel etwas über 100% (100.4%).
2. Bei der Normierung der Analyse muss die ermittelte Strukturformel den kristallchemischen Forderungen entsprechen! Es müssen folglich *alle* im Mineral vorhandenen Hauptelemente analysiert worden sein. (Vor allem bei älteren Arbeiten kann es vorkommen, dass aufgrund einer anderen petrologischen Fragestellung als P-T-Metrik nur eine Auswahl der im Mineral vorhandenen Elemente gemessen wurde.)
3. Sowohl für wasserfreie wie wasserhaltige Minerale sollten, ausgehend von einem Endglied, kristallchemisch sinnvolle Substitutionen zu den ermittelten Strukturformeln führen.

## 4.3 Datenquellen

Als Datenquellen kamen sämtliche verfügbaren veröffentlichten und unveröffentlichten Arbeiten wie Dissertationen, Diplom- und Lizentiatsarbeiten und Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften in Frage.

Als Anfang eines petrologischen Inventars der Zentralalpen wurde Arbeiten mit quantitativen Analysemethoden (Mikroröntgenspektroskopie, Röntgenfluoreszenz, Röntgendiffraktometrie usw.) speziell Beachtung geschenkt. Allerdings kamen auch Arbeiten, die rein qualitative Erkenntnisse enthielten, wie detaillierte petrographische Beschreibungen oder strukturelle Untersuchungen (meistens Diplom- und Lizentiatsarbeiten), in die Liste, da sie ausgezeichnetes Ausgangsmaterial für zukünftige quantitative Untersuchungen liefern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch nur diejenigen Arbeiten weiterverwendet, die sowohl brauchbare Proben- und Paragenesenbeschreibungen als auch verwertbare mineralchemische Analysen (Elektronenmikrosonde) enthielten, da mit diesen Daten Druck- und Temperaturberechnungen vorgenommen werden sollten.

### 4.3.1 Kriterien für die Literatur-Evaluation

Arbeiten, die EMS-Analysen von Mineralien enthalten, wurden genauer untersucht und gemäss Tabelle 4.1 kategorisiert.

Kriterium	Erfüllbarkeit	Wann erfüllt
EMS	komplett	Sämtliche Mineralien mindestens einer der gefundenen Paragenesen wurden mit der Elektronenmikrosonde analysiert. Von jedem analysierten Mineral ist mindestens eine Analyse brauchbar.
	brauchbar	Es wurden zwar nicht alle Mineralien einer Paragenese analysiert, aber mit den vorhandenen Analysen kann mit geeigneten Thermo- oder Barometern eine Temperatur bzw. ein Druck berechnet werden.
	unbrauchbar	Die Analysen werden für P-T-Berechnungen unbrauchbar, falls einer der folgenden Punkte zutrifft: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es lässt sich kein Thermo- oder Barometer anwenden, weil Analysen der dazu notwendigen Mineralien fehlen.</li> <li>• Die Analysen sind schlecht.</li> <li>• Logistische Fehler, wie sie auch in Tabelle 4.2 aufgeführt sind, können die EMS-Daten wertlos machen!</li> </ul>
P-T-calc	ja oder nein	Mit den EMS-Analysen wurden Druck-Temperatur-Berechnungen vorgenommen. (Das heisst aber nicht, dass die EMS-Analysen als brauchbar evaluiert wurden!)
<b>PARADIS</b>	ja oder nein	Sämtliche verfüg- und brauchbaren Daten befinden sich bereits in der Datenbank <b>PARADIS</b> .
Geochemie	XRF	Röntgenfluoreszenz
	andere	nasschemische Methoden wie Kalorimetrie, Komplexometrie, Flammenphotometrie, Spektralphotometrie, Gravimetrie, Coulometrie, Atomabsorption usw.
andere		der ganze Rest: XRD (Röntgendiffraktometrie), NAA, Fluid-inclusions (z.B. Mikrothermometrie), Radioaktivität, Wasseranalysen, Zirkon-Untersuchungen nach Pupin, Isotopengeologische Methoden wie Altersbestimmungen irgendwelcher Art (U/Pb, K/Ar, Rb/Sr, Spaltspuren usw.), optische Methoden (Zonenmethode nach Rittmann, Immersionsmethode usw.), Modalbestandsanalysen, Geophysikalische Methoden (Magnetik, Seismik usw.), Photogrammetrie, Strukturen (makroskopisch, Qz-Achsen), experimentelle Methoden wie Kalorimetrie usw., Kathodenlumineszenz, Elektronenmikroskopie, DTA

Tab. 4.1: Evaluationskriterien für Literaturquellen

### 4.3.2 Fehlerquellen

Es folgt eine tabellarische Zusammenstellung der häufigsten, meist logistischen Unzulänglichkeiten, die leider in sehr vielen der Arbeiten vorkommen und eine Rekonstruktion der Resultate erschweren oder gar verunmöglichen. Die einzelnen Punkte sind entsprechend ihrer Häufigkeit geordnet. Kombinationen verschiedener Punkte kommen oft vor:

Fehlerquelle	Art
Fundort	In der Arbeit finden sich keine, falsche oder mehrere (!) Fundortangaben/Koordinaten für ein Handstück.
Dokumentation	Es gibt keine Handstücknamen, keine Aufschluss-, Handstück-, Paragenese- oder Mineralbeschreibungen, kein Modalbestand.
Datenstruktur	Die <i>Zugehörigkeiten</i> Analyse – Mineral, Mineral – Paragenese, Paragenese – Handstück usw. sind nicht mehr rekonstruierbar! Mögliche Gründe: falsche oder fehlende Probennummern oder -namen.
Analytik	Die Mineralanalysen einer Paragenese stammen aus verschiedenen Handstücken.
	Obwohl Mineralien analysiert wurden, finden sich keine, nicht alle oder nur «repräsentative» Analysen (Auszüge, Durchschnitte) in der Arbeit abgedruckt. Die Analysen sind auch nicht mehr vom Autor erhältlich.
	Die Analysen sind schlecht

Tab. 4.2: Fehlerquellen

## 4.4 **Evaluierte Literatur**

Es folgen Tabellen mit den bearbeiteten Publikationen und Informationen über die jeweils angewendeten Analysemethoden. Arbeiten ohne Kommentar sind rein beschreibend (Petrographie, Strukturen usw.).

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[ABLM85]	komplett	•	•		
[ACR75]	keine	•			Stresseffekte um Quarz-Einschlüsse in Granaten
[AH79]	unbrauchbar				XRD;
[AJ65]	keine				Rb-Sr-Alter an Bio und Mus
[AJE66]	keine				Rb-Sr-Alter an Bio, K-Ar
[Abr52]	keine				XRD;
[Abr75]	unbrauchbar			XRF	Spektralphotom., NAA, Isotopen, Flammenphotom.
[Aeb85]	keine				Strukturanalysen
[Aem76]	keine				
[Amm73]	keine			XRF	
[Ams71]	keine				
[Ams74]	keine				Strukturen
[Arn68]	keine				nasschem. Mineralanalysen
[BB80]	keine	•			XRD; Guinier
[BB82a]	keine	•			XRD; opt. Meth., IR-Spektroskopie
[BB82b]	keine				
[BBI <sup>+</sup> 80]	keine				Palynologie
[BND83]	keine	•			
[BNFF83]	keine	•			
[BL83a]	brauchbar	•			
[BLM85]	brauchbar	•	•	XRF	Atomabsorption, Spektrophotometrie, Gravimetrie
[BP73]	keine			XRF	
[Bal89]	keine			XRF	Altersbestimmung
[Ban78]	unbrauchbar			XRF	
[Bau79]					NAA, Wasseranalysen
[Bau82]	keine	•			
[Bea52]	keine				
[Bia60]	keine			nasschemisch	
[Bia71a]	keine				
[Bia71b]	keine			nasschemisch	
[Bl <sup>+</sup> 83b]	keine			XRF	
[Bla65a]	keine				
[Bla65b]	keine				Spektralanalysen, Modalanalysen
[Bla72]	keine	•			Sauerstoffisotopen
[Bö86]	keine			XRF	XRD; Kathodenlumineszenz
[Bos81]	keine				
[Bru65]	keine				
[Buc72]	unbrauchbar			XRF	XRD;
[Bü80]	brauchbar	•		XRF	

Tab. 4.3: Evaluierte Literatur

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Bü81]	keine	•			
[Bü83]	unbrauchbar			XRF	XRD;
[Bur42]	keine				
[Bur89]	unbrauchbar				
[CD73]	komplett	•			
[Cha61]	keine				
[Cha68]	keine				
[Cod81]	keine				
[Col83]	keine				
[Col88]	unbrauchbar	•			
[Cor74]	keine				
[DBN84]	komplett	•	•		
[DN87]	keine			XRF	Rb-Sr-Geochemie
[DS85a]	keine				K-Ar Hornblende
[DS85b]	keine				K/Ar-Alter
[Deu79]	unbrauchbar	•			
[Die84]	brauchbar	•		XRF	
[ET70]	keine				
[ET74]	komplett	•	•		
[ET78]	komplett	•	•	XRF	
[ET83]	komplett		•		
[ETG81]	keine			XRF	
[ETR79]	komplett	•	•		
[Egg75]	keine				XRD; Guinier
[Egl61]	keine				
[Egl66]	keine				
[Eng73]	unbrauchbar	•			XRD;
[Eng78]	keine				
[Ern77]	komplett	•	•		
[Ern78]	brauchbar	•			
[Ett87]	keine				Strukturen
[FBFM80]	keine	•			
[FBFS82]	unbrauchbar				
[FHF <sup>+</sup> 74]	keine				
[FHJS83]	keine			XRF	
[FJN76]	keine				
[FO74]	keine				
[FS79]	keine	•		XRF	XRD; K-Ar, <sup>39</sup> Ar - <sup>40</sup> Ar, Hellglimmer
[FGT85]	keine				stabile Isotopen
[FW75]	keine				XRD;
[Feh22]	keine				
[Fer64]	keine			nasschemisch	
[Fis23]	keine				

Tab. 4.4: Evaluierte Literatur (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Fis86]	komplett	•	•		
[Fis88]	unbrauchbar	•			
[Fis89]	keine				Strukturen
[Fox74]	keine	•		XRF	
[Fox75]	?	•			
[Fra75]	keine			XRF	XRD; optische Methoden
[Fra79a]	unbrauchbar				XRD;
[Fra79b]	brauchbar	•			XRD;
[Fra83]	brauchbar	•			
[Fre67]	keine				Stratigraphie
[Fre69]	unbrauchbar	•		XRF	
[Fre74]	keine				
[Fre75]	?	•			
[Fre78]	unbrauchbar	•		XRF	XRD;
[Fre86]	keine				
[Fum74]	keine				
[GH89]	keine				K-Ar, fission track
[GL89]	brauchbar	•	•		
[GM78]	unbrauchbar			XRF	
[GN67]	keine				
[GSS76]	keine	•		XRF	
[GSSF85]	unbrauchbar				U-Tisch
[Gan37]	keine				Stratigraphie
[Gan83]	keine			XRF	Guinier, Coulometrie
[Gar47]	keine				
[Gau76]	unbrauchbar				
[Gau79]	keine				
[Gau80]	brauchbar	•	•	XRF	
[Geh81]	keine				
[Gen78]	keine				
[Ger66]	keine				
[Gie84]	unbrauchbar			XRF	
[Gig85]	brauchbar	•		XRF	Altersbestimmung
[Gre76]	keine				
[Gre85]	keine				Strukturen
[Gr"63]	keine				U-Pb-Alter
[Gru70]	keine	•			
[Gü54]	keine			nasschemisch	
[Gun87]	brauchbar		•	XRF	
[HB69]	keine				Rb-Sr-Alter Biotit
[HF80]	keine	•			$\delta^{18}\text{O}$ und $\delta D$ -Bestimmung
[HFJ89]	keine				fission-track
[HFLV90]	keine				
[HGS75]	keine				Geochronologie

Tab. 4.5: Evaluerte Literatur (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[HRS80]	keine				Strukturen
[Hä72]	keine				XRD; Strukturen
[Haf58]	keine				
[Hal44]	keine			nasschemisch	
[Hal72]	keine				Strukturen
[Ham85]	keine	•			
[Han72]	unbrauchbar				
[Han81]	keine			XRF	Zirkonmorphologie nach Pupin
[Has49]	keine			nasschemisch	
[Hei69]	keine				
[Hei72]	keine			XRF	
[Hei75]	keine	•			
[Hei78]	keine				
[Hei82]	komplett	•	•		
[Hei83]	komplett	•	•		
[Hei86a]	komplett	•	•		
[Hei86b]	keine				
[Hei87]	keine				Strukturen
[Hel77]	keine				Magnetik
[Her81]	keine				Strukturen
[Hig64a]	keine				
[Hig64b]	keine				Strukturen
[His75a]	keine				
[His75b]	unbrauchbar			XRF	
[His75c]	keine			XRF	
[His77]	unbrauchbar	•			
[His78]	keine	•			
[Hub22]	keine				
[Hub81]	keine				Strukturen
[HA82]	keine				Strukturen
[Hü27]	keine				Radioaktivität
[Hü88]	unbrauchbar	•			Fluid-inclusions
[Hun66]	unbrauchbar				DTA
[Hun69]	keine				Rb-Sr Phengit
[Hun74]	keine				Altersbestimmung
[Hur86]	keine				Rb-Sr, K-Ar von Bio, Mus; FT Apatit, Zirkon
[Hut21]	keine				
[IA85]	unbrauchbar			XRF	XRD; Infrarotspektroskopie
[IH82]	keine				
[Iro78]	?	•			
[Iro80]	unbrauchbar				
[Iro83]	brauchbar	•	•	XRF	XRD;

Tab. 4.6: *Evaluierte Literatur (Fortsetzung)*

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[JGN <sup>+</sup> 61]	keine				Rb-Sr Muskovit und Biotit
[JNW67]	keine				Rb-Sr an Biotit, Phengit
[Jä70]	keine				Rb-Sr whole rock und versch. Mineralien
[Jä73]	keine				U-Pb Zirkon; Rb-Sr, Hellglimmer, whole rock
[Jä83]	keine				Abkühlalter
[Jea81]	keine				
[Jen69]	keine				
[Joo69]	keine				
[KBN87]	komplett	•	•		
[KG75]	keine				U-Pb Monazit, Xenotim
[KGG81]	keine				Altersbestimmung
[KLR78]	keine				Feldradioaktivität
[Kä28]	keine				
[Kaj73]	keine				XRD; Elektronenmikroskopie
[Kam92]	komplett	•	•		
[Kel68]	keine			nasschemisch	
[Ker47]	keine				
[Keu71]	keine			nasschemisch	Photometr. ...
[Keu72b]	unbrauchbar	•		XRF, nasschem.	
[Keu72a]	unbrauchbar	•		nasschemisch	
[Kla80]	brauchbar	•			
[Kla82]	komplett	•	•		
[Kla85]	komplett	•	•		
[Kla86]	keine	•			
[Kla90]	keine				Strukturen
[Kle76a]	keine			XRF	
[Kle76b]	keine	•			XRD;
[Koc82]	komplett	•	•	XRF	
[Kra70]	keine				
[Kub83]	unbrauchbar			XRF	
[Kü74]	keine				XRD; Bradley, Guinier
[Kun88]	keine				ja
[Kup77]	keine				
[LG88]	keine				
[Lab65]	keine				
[Lar81]	keine				
[Lau83]	keine				Strukturen
[Led43]	keine				
[Leu86a]	keine				
[Leu86b]	keine				Strukturen
[Lin87]	brauchbar		•	XRF	
[LN66]	keine				

Tab. 4.7: Evaluierte Literatur (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Lö81]	keine	•			
[Lö85]	keine				Strukturen
[Lö86]	keine	•			
[Lö87]	brauchbar	•	•		
[Lü65]	keine				
[MO88]	keine				
[MP80]	keine				Strukturen
[MS78]	keine				Strukturen
[MST87]	keine				
[Mar84]	keine				
[Mat80]	keine				
[Mer79]	brauchbar	•			
[Mer80]	unbrauchbar				
[Mer82]	keine	•			Fluid-inclusions
[Mer85]	unbrauchbar				
[Mil65a]	keine				Strukturen
[Mil65b]	keine				Strukturen
[Mil74a]	keine				Strukturen
[Mil74c]	keine				Strukturen
[Mil74b]	keine				Strukturen
[Mil76a]	keine				Modalbestandsanalysen
[Mil76b]	keine				Strukturen
[Mil78]	keine				Strukturen
[Min31]	keine				
[Mö69]	unbrauchbar				Strukturen; nasschem. Mineralanalysen
[Mor81]	keine			XRF	
[Mor85]	unbrauchbar	•			
[Mou73]	keine				XRD;
[Mü58a]	keine			nasschemisch	
[Mü58b]	keine			nasschemisch	
[Mü86]	brauchbar			XRF	
[Mul79]	keine	•			fluid inclusions
[Mur86]	unbrauchbar			XRF	K/Ar und Rb/Sr-Alter
[NN65]	keine				
[Nab76]	keine				
[Nei48]	keine			nasschemisch	
[Nie31]	keine			nasschemisch	
[Nig60]	keine				
[Nig65]	keine			nasschemisch	Kalor., kompl., flammenph., gravim., Radioakt.
[Nig70]	keine				
[OSM88]	keine				
[Obe80]	brauchbar	•			

Tab. 4.8: *Evaluierte Literatur* (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Obe85]	brauchbar	•	•	XRF	
[Obe86]	keine			XRF	
[Obe87]	keine	•			
[Osc86]	keine			XRF	XRD; Calorimetrie
[Ott81]	keine				
[PCG89]	keine				
[PFV+90]	keine				Strukturen
[PJ76]	keine				Altersbestimmung
[PK86]	keine			XRF	Isotopen
[PS87]	komplett	•	•		
[PSW74]	keine	•			Fluid inclusions
[Per83]	brauchbar			XRF	
[Per85]	unbrauchbar				
[Pet63]	keine				spektrograph., DTA
[Pet68]	brauchbar	•			
[Pfi91]	keine				Strukturen
[Phi82]	unbrauchbar				K-Ar, Alkali amphibole
[RA79]	keine				Strukturen
[Raz77]	keine				
[Rin92]	unbrauchbar	•			
[Ros69]	?	•			Stresseffekte um Einschlüsse; Piezothermometrie
[SB71]	keine				
[SHS68]	unbrauchbar			XRF	XRD; spektrometr. Methoden
[SJ81]	keine				Rb-Rr whole rock
[SO87]	unbrauchbar			XRF	
[SW67]	keine				Vergleich EMS-U-Tisch
[Sch84a]	unbrauchbar			XRF	Altersbestimmung
[Sch84b]	unbrauchbar	•			XRD; Fluid-inclusions
[Sch86a]	keine				Altersbestimmung
[Sch86b]	unbrauchbar	•		XRF	
[Sch88]	unbrauchbar				
[Sch89a]	keine			XRF	Atomabsorption, Altersbest.
[Sch89b]	keine	•			
[Sha69]	keine				Modalanalysen, Strukturen
[Sie84]	keine				Altersbestimmung
[Sim81]	unbrauchbar			XRF	XRD; Strukturen
[Sim82]	keine				Strukturen
[Soo86]	unbrauchbar			XRF	K/Ar-Datierung, Flincs (Mikrothermometrie)
[Soo90]	keine				FT Apatit, Zirkon; K-Ar Biotit, Muskovit
[St"78]	keine				
[SO91]	komplett	•	•		Sauerstoffisotopen

Tab. 4.9: Evaluerte Literatur (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Ste64]	keine				K-Ar Alter an Hornblende
[Ste66a]	keine			nasschemisch	ja
[Ste66b]	unbrauchbar				
[Ste69]	keine				
[Ste78]	unbrauchbar				
[Ste80]	unbrauchbar			XRF	Spaltspuren
[Ste84a]	keine			XRF	Rb-Sr whole rock
[Ste84b]	keine				Rb-Sr, K-Ar, FT
[Ste84c]	keine			XRF	Altersbestimmung
[Sti75]	keine			XRF	Altersbestimmung
[Str62]	keine				
[Sua83]	keine				Seismik, Magnetik
[TE69]	brauchbar	•			
[TE72]	komplett		•		
[TE74]	unbrauchbar			XRF	
[TE77]	brauchbar	•	•		
[TER75]	keine				
[TSU85]	keine	•			
[Teu79]	unbrauchbar				XRD; Guinier, Bradley
[Teu82]	komplett	•	•		XRD; Guinier
[The82]	unbrauchbar			XRF	
[The83]	keine				
[Tho76b]	keine	•			
[Tro66a]	keine	•			optische Daten
[Tro66b]	keine				
[Tro68]	unbrauchbar				
[Tro72]	keine				
[VV76]	keine				Strukturanalysen
[VV81]	keine				
[Val83]	keine			XRF	
[Van59]	keine			nasschemisch	XRD;
[Vol76a]	keine				Gefügeanalytik
[Vol76b]	keine				Strukturen
[WK69]	keine				optische Methoden
[WKHR76]	keine	•			Abkühlalter, theoret. Modell
[WO89]	keine				
[WRJ77]	keine				Rb-Sr, K-Ar
[WSHS63]	keine				Spektroskopie
[WWW74]	keine	•			
[Wab86]	komplett	•	•		
[Wal83]	unbrauchbar	•			
[Web66]	keine				
[Wen56]	keine				
[Wen62]	keine				

Tab. 4.10: Evaluierte Literatur (Fortsetzung)

Arbeit	EMS	PT	Pa	Geochemie	andere
[Wen63]	keine				U-Tisch
[Wen65]	keine				XRD; Gefügestudie
[Wen68]	keine				
[Wen70]	keine				
[Wen82]	keine				
[Wen86]	keine				
[Wer80]	keine				
[Wer86]	keine				
[Wie66]	keine				
[Wys29]	keine				
[ZW85]	keine				K-Ar Hornblende
[Zgr75]	unbrauchbar				XRD; Guinier, NAA (Würenlingen), UV
[Zin79]	keine			XRF	
[deC83]	keine			XRF	Coulomat
[vR71]	keine				

Tab. 4.11: Evaluierte Literatur (Fortsetzung)

## 4.5 Verwendete Daten

Aufgrund der obigen Bewertungskriterien wurden aus der Literatur die folgenden Arbeiten ausgewählt, sämtliche Daten in der Datenbank **PARADIS** abgespeichert und von ca. 60 der darin beschriebenen mesoalpiner Paragenesen die Druck-Temperatur-Bedingungen berechnet. Sechs eigene Proben ergänzen die Daten aus der Literatur. Das folgende Kapitel geht im Detail auf die Methodik der Verarbeitung ein, mit besonderer Berücksichtigung der verwendeten Software-Werkzeuge.

- [ABLM85] Aurisicchio, C., Bocchio, R., Liborio, G., and Mottana, A. Petrogenesis of the eclogites from Soazza, Switzerland. *Chemical Geology*, 50:47– 63, 1985.
- [Bal92] Balz, K. *Die Gesteine zwischen Nufenenpass (VS/TI) und Griesspass (CH/I)*. Diplomarbeit, Universität Bern, 1992.
- [BLM85] Bocchio, R., Liborio, G., and Mottana, A. Petrology of the amphibolitized eclogites of Gorduno, Lepontine Alps, Switzerland. *Chemical Geology*, 50:65– 86, 1985.
- [DBN84] Droop, G. and Bucher-Nurminen, K. Reaction Textures and Metamorphic Evolution of Sapphirine-bearing Granulites from the Gruf-Complex, Italian Central Alps. *Journal of Petrology*, 25:766– 803, 1984.
- [Ern77] Ernst, W. Mineralogic Study of Eclogitic Rocks from Alpe Arami, Lepontine Alps, Southern Switzerland. *Journal of Petrology*, 18:371– 398, 1977.
- [ET74] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Stability of Enstatite + Talk, and CO<sub>2</sub>-metasomatism of Metaperidotite, Val d’Efra, Lepontine Alps. *American Journal of Science*, 274:274– 296, 1974.
- [ET78] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Petrogenesis of Garnet Lherzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 40:333– 348, 1978.

- [ET79] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Petrology of an eclogite-metarodingite suite at Cima di Gagnone, Ticino, Switzerland. *American Mineralogist*, 64:15– 31, 1979.
- [ET83] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Fluorine hydroxyl Titanian Clinohumite in Alpine recrystallized Garnet Peridotite: compositional controls and petrologic significance. *American Journal of Science*, 283:355– 369, 1983.
- [Fis86] Fischer, M. *Zur Petrographie der Bohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1986.
- [Fra79] Frank, E. *Metamorphose mesozoischer Gesteine im Querprofil Brig-Verampio: mineralogisch-petrographische und isotopengeologische Untersuchungen*. Dissertation, Universität Bern, 1979.
- [Gau80] Gautschi, A. *Metamorphose und Geochemie der basischen Gesteine des Bergeller Ostrandes (Graubünden, Schweiz / Provinz Sondrio, Norditalien)*. Dissertation, ETH Zürich, 1980.
- [GL89] Guntli, P. and Liniger, M. Metamorphose in der Margna-Decke im Bereich Piz da la Margna und Piz Fedoz (Oberengadin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 69:289– 301, 1989.
- [Gun87] Guntli, P. *Geologische und petrographische Untersuchungen der Margna südlich des Silsersees, Oberengadin: II. Fedoz*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1987.
- [Hei82] Heinrich, C. A. Kyanite-Eclogite to Amphibolite Facies Evolution of Hydrous Mafic and Pelitic Rocks, Adula Nappe, Central Alps. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81:30– 38, 1982.
- [Hei83] Heinrich, C. A. *Die regionale Hochdruckmetamorphose der Aduladecke, Zentralalpen, Schweiz*. Dissertation, ETH Zürich, 1983.
- [Hei86] Heinrich, C. A. Eclogite Facies Regional Metamorphism of Hydrous Mafic Rocks in the Central Alpine Adula Nappe. *Journal of Petrology, Part 1*, 27:123– 154, 1986.
- [IZ83] Irouschek-Zumthor, A. *Mineralogie und Petrographie von Metapeliten der Simano-Decke unter besonderer Berücksichtigung cordieritführender Gesteine zwischen Alpe Sponda und Biasca*. Dissertation, Universität Basel, 1983.
- [KBN87] Klaper, E.-M. and Bucher-Nurminen, K. Alpine metamorphism of pelitic schists in the Nufenen Pass area, Lepontine Alps. *Journal of metamorphic Geology*, 5:175– 194, 1987.
- [Kla82] Klaper, E.-M. Deformation und Metamorphose in der nördlichen Maggia-Zone. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:47– 76, 1982.
- [Kla85] Klaper, E.-M. *Deformation History and Metamorphic Mineral Growth along the Pennine Frontal Thrust (Wallis, Ticino), Switzerland*. Dissertation, ETH Zürich, 1985.
- [Koc82] Koch, E. *Mineralogie und plurifazielle Metamorphose der Pelite in der Adula-Decke (Zentralalpen)*. Dissertation, Universität Basel, 1982.
- [Lin87] Liniger, M. *Geologie und Petrographie der Margna südlich des Silsersees, Oberengadin*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1987.
- [Loe87] Loew, S. *Die tektono-metamorphe Entwicklung der Nördlichen Adula-Decke (Zentralalpen, Schweiz)*. Dissertation, Universität Basel, 1987.
- [Obe85] Oberhänsli, R. *Mineralogy and Geochemistry of metalamprophyres from the Central Swiss Alps*. Habilitationsschrift, Universität Bern, 1985.
- [Obe86] Oberhänsli, R. Geochemistry of meta-lamprophyres from the Central Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:315– 342, 1986.
- [Obe87] Oberhänsli, R. Mineralogy and Alpine metamorphism of metalamprophyres from the Central Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67:321– 338, 1987.
- [PS87] Peters, T. and Stettler, A. Radiometric age, thermobarometry and mode of emplacement of the Totalp peridotite in the Eastern Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67:285– 294, 1987.

- [Sch93] Schmatz, D. *Konsistente Dokumentation, Analyse und Interpretation mesoalpin metamorpher Mineralparagenesen*. Dissertation, Universität Bern, in prep.
- [SO91] Staps-Ohnmacht, P. *Phasenpetrologie und  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Isotopenchemie der Metapelite des Lucomagno-Komplexes (Zentralalpen)*. Dissertation, Universität des Saarlandes, 1991.
- [TE72] Trommsdorff, V. and Evans, B. W. Progressive metamorphism of antigorite schist in the Bergell Tonalite aureole (Italy). *American Journal of Science*, 272:423– 437, 1972.
- [TE77] Trommsdorff, V. and Evans, B. W. Antigorite-Ophicarbonates: Contact Metamorphism in Valmalenco, Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62:301– 312, 1977.
- [Teu82] Teutsch, R. *Alpine Metamorphose der Misoixer-Zone (Bündnerschiefer, Metabasite, Granitische Gneise)*. Dissertation, Universität Bern, 1982.
- [Tho90] Thoenen, T. *Lukmanier-Pass area (Central Alps, Switzerland)*. Unveröffentl. Daten, 1990.
- [Wab86] Waber, N. *Mineralogie und Metamorphose in der nördlichen Lukmanier-Decke, Val Piora, Tessin*. Diplomarbeit, Universität Bern, 1986.

## Kapitel 5

# Die mesoalpine Metamorphose in den Zentralalpen

### 5.1 Historischer Überblick

Der geologische Begriff «Lepontin» wurde von 1956 von WENK strukturell definiert. Die «Lepontinische Gneisregion» ist die Region der südlichen Zentralalpen, in der während der mesoalpinen Regionalmetamorphose Kristallindecken aus präalpinem Grundgebirge textuell konkordant mit ihren mesozoischen Hülsedimenten überprägt wurden. Diese Region stimmt etwa mit dem Bereich der amphibolitfaziellen, alpinen Überprägung überein.

Von Norden nach Süden kann eine Zunahme des Metamorphosegrades beobachtet werden. Die Faziesserie vom Barrow-Typus reicht von unmetamorphen Sedimenten bis zur höchsten Amphibolitfazies der Sillimanitzone in den tiefsten tektonischen Einheiten des Lepontins.

Die ersten Mineralzonen im Bereich der Zentralalpen wurden von NIGGLI (1960) beschrieben. Mineralparagenesen in den unterschiedlichsten Lithologien wie Metapeliten (NIGGLI, 1960; NIGGLI & NIGGLI, 1965; FOX, 1975; KLEIN, 1976B; THOMPSON, 1976; FRANK, 1979B; TEUTSCH, 1982), Metakarbonaten (WENK, 1962; TROMMSDORFF, 1966) und Meta-Ultrabasiten (EVANS & TROMMSDORFF, 1970, 1974) beschreiben ein grossräumiges, konzentrisches Muster. WENK & KELLER (1969) konnten nachweisen, dass auch die Verteilung der Anorthitgehalte von Plagioklasen in basischen Gesteinen diesem lepontinischen Isogradenmuster folgt.

Das systematische, aber asymmetrische Isogradenmuster hat sein Zentrum in den am tiefsten erodierten tektonischen Einheiten des alpinen Deckenstapels, unmittelbar nördlich der Insubrischen Linie, an der es abrupt endet. An der Insubrischen Linie stossen die amphibolitfaziellen Gesteine des Lepontins an unmetamorphe Gesteine der Südalpen. Hier wurde der lepontinische Bereich relativ zum südalpinen gehoben (GANSSE, 1968).

Die Deckengrenzen sind oft komplex verfaltet und werden von den steiler einfallenden Isogradflächen diskordant geschnitten. Daraus folgt, dass das lepontinische Metamorphoseereignis nach Abschluss der Deckenbildung stattgefunden oder diese zumindest überdauert haben muss (NIGGLI, 1960; NIGGLI & NIGGLI, 1965, TROMMSDORFF, 1966; FOX, 1975; THOMPSON, 1976).

Radiometrische Datierungen ergeben ein oligozänes Alter für dieses Metamorphoseereignis (JÄGER & FAUL, 1959; STEIGER, 1964). Temperaturen im Bereich des Metamorphosehöhenpunktes und teilweise Rekristallisationen hielten jedoch bis ins Miozän oder sogar länger an (JÄGER et al., 1967; KÖPPEL & GRÜNENFELDER, 1975).

Im Osten des Lepontins befindet sich die zum Teil jüngere Bergeller Intrusion, die das Isogradenmuster kontaktmetamorph überprägt (TROMMSDORFF & EVANS, 1972, 1977; GUNTLI & LINIGER, 1989).

Aufgrund der Beziehung von Kristallisation und Deformation kann in vielen Gesteinen jedoch noch ein zweites, älteres alpines Metamorphoseereignis nachgewiesen werden. Dieses frühere (eoalpine) Ereignis wird durch eklogitische Paragenesen dokumentiert (ERNST, 1977, 1978; EVANS & TROMMSDORFF, 1978; HEINRICH, 1983). Wo das spätere (mesoalpine oder lepontische) Ereignis die Amphibolitfazies erreicht, überprägt es zunehmend die eoalpinen Paragenesen.

Detaillierte Untersuchungen von Struktur und Metamorphose führten zur Entdeckung von mindestens drei alpinen Hauptdeformationsphasen (HIGGINS, 1964; CHADWICK, 1965; SIBBALD, 1971; THAKUR, 1971; HALL, 1972). Die erste (F1) wird mit der Platznahme der Decken in Verbindung gebracht, die zweite (F2) mit der Ausbildung der Hauptschieferung und die dritte (F3) mit der Steilstellung der Deckenstirnen in Norden des Lepontins (Rückfaltung) und der Ausbildung von kleinräumigen Crenulationsfalten (MILNES, 1974a,b; KLAEPER, 1985). Die mesoalpine Metamorphose erreichte ihren Höhepunkt zwischen F2 und F3 und war während F3 schon stark abgeklungen (HUBER, 1980).

## 5.2 Bisherige quantitative Druck- und Temperaturabschätzungen

Seit der Einführung der Elektronenmikrosonde vor etwa 20 Jahren besteht die Möglichkeit, Mineralchemismen quantitativ und genau zu bestimmen. Dies und auch die Verfügbarkeit von besseren thermodynamischen Mineraldaten und Aktivitätsmodellen führte im Bereich der Zentralalpen zu einer grossen Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten, deren wesentliches Ziel die möglichst genaue Bestimmung von Druck und Temperatur während der mesoalpinen Metamorphose war.

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Arbeiten der letzten 20 Jahre regionenweise vorgestellt und die darin angewendeten Methoden und Resultate kurz erläutert. Im Anhang A.1 findet sich eine tabellarische Zusammenstellung der wichtigsten Resultate (Tabellen A.1 - A.8). Abbildung 5.1 zeigt einen Überblick über die durchschnittlichen Drucke und Temperaturen in den entsprechenden Gebieten.

### 5.2.1 Lukmaniergebiet

Das Lukmaniergebiet gehört zu den bestuntersuchten Teilen des Penninikums. Die P-T-Abschätzung (500-580 °C/5-6 kbar) beruht auf Phasengleichgewichtsstudien und kalibrierten Geothermo- und Barometern (FISCHER, 1986, 1988; FOX, 1974, 1975; FREY, 1969; WABER, 1986), Stresseffekten um Quarzeinschlüssen (ADAMS et al., 1975) und <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-Isotopenstudien (HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1980; STAPS-OHNMACHT, 1991) (vgl. Tab. A.2).

Es fällt auf, dass in den älteren Arbeiten sowohl die Drucke als auch die Temperaturen tiefer sind als in neueren Arbeiten. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich an neueren Kalibrierungen der Thermo- und Barometer.

Die Maximaltemperaturen können nach HOERNES & FRIEDRICHSEN (1980) und STAPS-OHNMACHT (1991) aufgrund der Quarz-Ilmenit- und Quarz-Granat-Sauerstoffisotopenfraktionierung jedoch noch bedeutend höher gewesen sein (680 - 730 °C). Eventuell handelt es sich

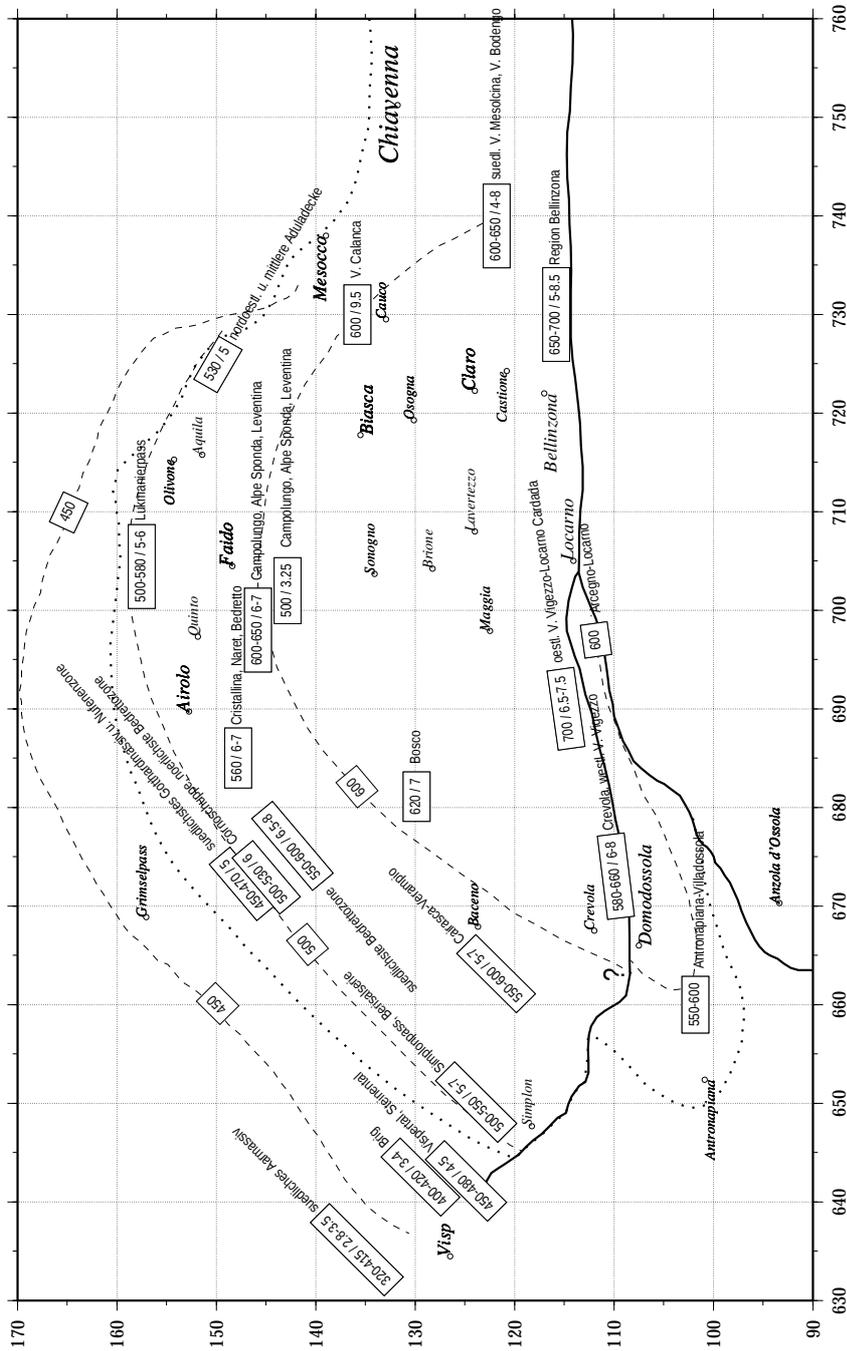


Fig. 5.1: Durchschnittliche Abschätzungen von Temperatur [° C] und Druck [kbar] im Bereich der Zentralalpen, zusammengestellt aus der Literatur der letzten 20 Jahre. Die einzelnen Werte werden regionenweise im Text diskutiert. Eingezeichnet sind der Rand der Amphibolitfazies aus der Tektonischen Karte der Schweiz (gepunktet) und Isothermen für 450 (Sanidin-Mikroclin-Isograde), 500 und 600 °C (gestrichelt)

bei diesen aussergewöhnlich hohen Temperaturen jedoch auch um Relikte einer voralpinen Metamorphose.

### 5.2.2 Olivone–nördliches V. Mesolcina, nordwestliche und mittlere Adula-Decke

Die P-T-Abschätzungen aus der nördlichen und mittleren Adula-Decke variieren erstaunlich wenig (530 °C/5 kbar), obwohl sie aufgrund verschiedener Phasengleichgewichte, Thermo- und Barometer in unterschiedlichen Lithologien (Kalzitmarmore, Metamergel, Metapelite, Serpentine und Rodingite) abgeleitet wurden (KLEIN, 1976; DEUTSCH, 1979; LÖW, 1981; BAUMGARTNER, 1982; BAUMGARTNER & LÖW, 1983; DEUTSCH, 1982).

### 5.2.3 Nufenen- und Bedrettozone

In der Region Nufenen–Bedretto konnte aufgrund der grossen Anzahl Proben der Metamorphoseverlauf detailliert beschrieben werden. Die P-T-Abschätzungen basieren auf Phasengleichgewichtsdigrammen (KAMBER, 1992), verschiedenen Thermo- und Barometern wie Granat-Biotit, Kalzit-Dolomit, Anorthit-Grossular usw. (GRUBENMANN, 1970; KLAPER & BUCHER-NURMINEN, 1987; KLAPER, 1985, 1986) und stammen aus Metapeliten, Hornblendegarbenschiefern und Marmoren der Nufenenzone, Cornoschuppe und Bedrettozone.

Im Gebiet Nufenenpass–Griessee–L. di Morasco nimmt von Norden gegen Süden sowohl die Temperatur als auch der Druck zu (450-470 °C/5 kbar – 500-530 °C/6 kbar – 550-600 °C/6.5-8 kbar). KLAPER (1985) und KLAPER & BUCHER-NURMINEN (1987) unterteilen dieses Profil in 4 Metamorphosezonen, die sie durch univariante Reaktionen voneinander abgrenzen und nehmen eine kontinuierliche Zunahme der Metamorphose an. KAMBER (1992) hingegen interpretiert die Druck- und Temperaturzunahme aufgrund einer Detailkartierung und eines gut beprobten P-T-Profiles als Metamorphosesprung, hervorgerufen durch ein Anheben eines südlichen Blockes (Cornoschuppe und nördlichste Bedrettozone) gegenüber einem nördlichen (südlichstes Gotthardmassiv und Nufenenzone) nach dem Höhepunkt der Metamorphose. Temperatur und Druck im Gebiet Cristallina, Naret, Bedretto (560 °C/6-7 kbar) beruhen auf Granat-Biotit-, Anorthit-Grossular-, Kalzit-Dolomit-Thermobarometern, angewendet in Marmoren und Kalkglimmerschiefern (KLAPER, 1980, 1982).

### 5.2.4 Campolungo, Alpe Sponda, Leventina

Die Druck- und Temperaturabschätzungen variieren in dieser Region relativ stark, vor allem für den Metamorphosehöhepunkt.

Für den Metamorphosehöhepunkt im Campolungogebiet gibt ROSENFELD (1969) 600 °C und 8 kbar an, berechnet mit Hilfe einer piezometrischen Technik, mit der aus Stresseffekten um Quarzeinschlüsse der Druck abgeschätzt werden kann.

HOERNES & FRIEDRICHSEN (1980) errechnen mit Sauerstoffisotopen-Geothermometrie für das Campolungogebiet eine Durchschnittstemperatur von 630 °C; die Werte streuen allerdings von 500-680 °C. Für Alpe Sponda geben sie einen engen Bereich von 660-670 °C an, für Molare 570-600 °C.

IROUSCHEK (1983) kommt für die Region Alpe Sponda mit Hilfe des Granat-Biotit-Thermometers und Anorthit-Grossular-Barometers, angewendet in Metapeliten, auf durchschnittlich 600-650 °C und 6-10 kbar.

HISS (1977, 1978) errechnet mit Hilfe des Feldspatthermometers (homogenisierter Alkalifeldspat) für die Leventinagneisse in diesem Gebiet Temperaturen im Bereich 550-650 °C.

Die Werte von 600-650 °C/6-7 kbar in Abb. 5.1 stammen aus FREY et al. (1980) und stellen einen guten Mittelwert dar.

MERCOLLI (1979, 1982) erhält für ein Stadium der retrograden Metamorphose mit Hilfe der Kalzit-Dolomit-Thermometrie, angewendet in Metadolomiten, einen Wert von 500 °C. Dies entspricht den Resultaten von TROMMSDORFF et al. (1985), abgeleitet aus (K,Na)Cl-Einschlüssen. WALTHER (1983) erhält 500 °C und  $\approx 3.25$  kbar mit Kalzit-Dolomit-Thermometrie kombiniert mit Studien an Flüssigkeitseinschlüssen (Bestimmung von Zusammensetzung und Dichte) in metasomatischen Reaktionszonen, die sich entlang existierender Quarzvenen gebildet haben. Auch diese Werte finden sich in Abb. 5.1.

### 5.2.5 Val Calanca

Die Druck- und Temperaturabschätzungen im zentralen Teil des Val Calanca (bei Rossa, P. di Strega, Torrone Alto) beruhen auf der Granat-Biotit-Thermometrie und Anorthit-Grossular-Barometrie in Metapeliten (KOCH, 1982) und Sauerstoffsotopen-Geothermometrie (HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1980). Die Temperaturen streuen nur sehr wenig um 600 °C (KOCH: 595-664 °C, HOERNES & FRIEDRICHSEN: 590-620 °C). Leider liegt nur eine Druckberechnung vor, die mit 9.5 kbar sehr hoch ausgefallen ist.

### 5.2.6 Südliches V. Mesolcina, V. Bodengo

Auch in dieser Region stammen die Druck- und Temperaturwerte aus unterschiedlichen Quellen. Sauerstoffsotopentemperaturen in Gneissen liegen im V. Bodengo von BLATTNER (1972) vor, allerdings mit einer grossen Streubreite von 400-690 °C (vgl. Tab. A.4).

TROMMSDORFF & EVANS (1969) geben Bedingungen von 600-650 °C/4 kbar für einen Magnetit-Chlorit-Enstatit-Forsterit-Schiefer im V. Cama an.

KOCH (1982) berechnet P-T-Werte mit kalibrierten Thermo- und Barometern (Granat-Biotit, Anorthit-Grossular) in Metapeliten. Die Temperaturen seiner Proben von Lostalio (V. Mesolcina), V. Bodengo, V. Grono und V. di Darengo streuen im engen Bereich von 597-645 °C; die Drucke variieren allerdings zwischen 6.5 und 8.4 kbar.

THOMPSON (1976) schätzt Druck und Temperatur nach der Staurolith-, Sillimanit- und Andalusit-Isograde ab und erhält für das nördliche V. Mesolcina 525 °/4 kbar und für das südliche 650 °C/6 kbar.

WENK et al. (1974) verwendet diverse Mineralreaktionen zur Abschätzung und schlägt 650 °C und 6 kbar für die Region des V. Bodengo vor.

Die in Abb. 5.1 verwendeten Werte von 600-650 °C/6-7 kbar bilden den Durchschnitt der obigen Resultate.

### 5.2.7 Region Bellinzona

Bei den wenigen Arbeiten, die für die Region Bellinzona vorliegen, streuen besonders die Druckwerte relativ breit.

HEITZMANN (1975), der etwa 20 km westlich von Bellinzona arbeitete, schlägt für die dortigen Metapelite und granitoiden Gneisse 670-700 °C/3.5-5 kbar vor (beginnende Anatexis, Alkalifeldspat + Sillimanit).

Mit Granat-Biotit-Thermometrie erhält BÜHL (1980, 1981) in den Gneissen der Zone von Bellinzona im Gebiet des Corno di Gesero Temperaturen von 690 °C.

SCHMIDT (1988, 1989) kommt mit der Chlorit-Breakdown-Reaktion in der Peridotit-Rodinit-Blackwall und dem Granat-Biotit-Thermometer in der Peridotit-Amphibolit-Blackwall

des Ganna Rossa Ultramafitites auf 690-730 °C. Den Druck schätzte er mit dem Auftauchen von Sillimanit ± Disthen auf 8 kbar, übereinstimmend mit dem Intrusionsdruck des Bergeller Tonalites (REUSSER, 1987).

ERNST (1977) kommt aufgrund von Phasengleichgewichtsstudien in Metapeliten und mafischen Gesteinen um Alpe Arami und in symplektitischen und amphibolitischen Paragenesen im Eklogit auf Werte von 600-650 °C/6-7 kbar.

### 5.2.8 Aarmassiv

Die Sanidin-Mikroklin-Isograde entspricht nach BERNOTAT & BAMBAUER (1980, 1982) und BAMBAUER & BERNOTAT (1982) einer 450 °C-Isotherme während der lepontischen Metamorphose. Diese Isograde wurde anhand von 11 ausgewählten Profilen durch die Zentralalpen ermittelt und verläuft von Visp in einer geraden Linie nach Göschenen, biegt dann nach SE gegen Hinterrhein um und verläuft von dort Richtung S bis nach Mesocco (vgl. Abb. 5.1). HOERNES & FRIEDRICHSEN (1980) bestimmten für Göschenen und Andermatt jedoch eine Sauerstoffisotopentemperatur von 460-530 °C.

Für das südliche Aarmassiv erhält MORARIU (1985) mit der Kalzit-Dolomit-Thermometrie, dem Lawsonit-Laumontit-Übergang und Rückschlüssen aus der tektonischen Überdeckung 350±30 °C/≤3.5 kbar. Mit Granat-Biotit- und 2-Feldspat-Thermometrie kommt HAMMERSCHLAG (1985) für die gleiche Region auf 320-415 °C.

Studien an Flüssigkeitseinschlüssen in alpinen Spaltenquarzen, die sicher in der Abkühlungs-/Hebungsphase nach dem Maximum der mesoalpiner Metamorphose gebildet wurden, ergeben für das südliche Aarmassiv Minimaldrucke von 2.5-2.8 kbar (POTY et al., 1974).

### 5.2.9 Das Profil Brig–Crevola

Druck- und Temperaturangaben aus diesem Bereich der Zentralalpen stellen Durchschnittswerte dar von Abschätzungen aus verschiedenen Arbeiten.

FRANK (1979, 1983), FRANK & STETTLER (1979) und BUCHER-NURMINEN et al. (1983) haben das gesamte Profil im Detail bearbeitet. In karbonat- und/oder margaritführenden Bündnerschiefern konnten sie mehrere kartierbare Mineralzonen und Reaktionsisograden unterscheiden und einen deutlichen Metamorphosegradienten von Brig nach Crevola nachweisen:

- erstes Auftauchen von Biotit + Kalzit resp. Granat + Ca-Amphibol,
- Paragonit + Kalzit + Quarz «out» Isograd,
- Margarit + Kalzit + Quarz «out» Isograd (480 °C/4 kbar und 520 °C/7 kbar)
- Skapolith «in» Isograd,
- Muskovit + Kalzit + Quarz «out» Isograd,
- Margarit «out» Isograd in quarz- und kalzitfreien Gesteinen (bei Bosco).

Die Druck- und Temperaturabschätzungen basieren sowohl auf kalibrierten Thermometern (Granat-Biotit, Muscovit-Paragonit, Skapolith-Kalzit-Plagioklas, Graphitkristallinität) und Barometern (Anorthit-Grossular-Alumosilikat) als auch auf phasenpetrologischen Überlegungen und quantitativen thermodynamischen Berechnungen.

HAMMERSCHLAG (1985) verwendete vor allem das Granat-Biotit und 2-Feldspat-Thermometer und das Anorthit-Grossular-Alumosilikat-Barometer zur Temperatur- und Druckabschätzung in Quarz-Feldspatgesteinen. Er konnte zwar einen Temperaturgradienten vom Simplonpassgebiet bis zum V. Vigizzo nachweisen, die Drucke gruppieren sich jedoch überall um 7 kbar.

### 5.2.10 Das Profil Antronapiana–Locarno

Druck- und Temperaturabschätzungen in diesem Bereich stammen aus den Arbeiten von HAMMERSCHLAG (1985), der Quarz-Feldspatgesteine bearbeitete, und COLOMBI (1988), der die mafischen Gesteine untersuchte.

HAMMERSCHLAG (1985) kann zwar eine Temperaturzunahme gegen Locarno hin nachweisen (Granat-Biotit-, 2-Feldspat-Thermometer), die Drucke gruppieren sich jedoch immer um 7 kbar (Anorthit-Grossulat-Alumosilikat-Barometer, Si-Gehalt im Hellglimmer).

COLOMBI (1988) benutzt neben den herkömmlichen Thermometern (Granat-Biotit, Granat-Amphibol, Kalzit-Dolomit) zwei neue Kalibrierungen (Reaktion: Albit = Edenit + 4 Quarz; temperaturabhängiger Ti-Gehalt im Amphibol).

Das Thermometer, das auf dem temperaturabhängigen Ti-Einbau im Amphibol basiert, zeigt die regional kohärenteste Verteilung der Metamorphosetemperaturen; diese Resultate werden deshalb hier verwendet, obwohl COLOMBI (1988) darauf hinweist, dass gewisse Temperaturen etwas hoch ausgefallen sein könnten.

Auch COLOMBI kann eine deutliche Temperaturzunahme von Antronapiana (550 °C) nach Locarno (700 °C) nachweisen, wo die höchsten Temperaturen zwischen dem östlichen V. Vigizzo und Locarno Cardada gemessen wurden. Bei Arcegno, nur wenige Kilometer südlich davon gegen die Insubrische Linie hin, fallen die Temperaturen auf 600 °C. Südlich von Antronapiana, bei Bannio im V. Anzasca, fallen die Temperaturen ebenfalls ab, hier auf etwa 500 °C. Im weiteren dokumentiert COLOMBI 2 Isograde:

- Chlorit «out» Isograd und
- Diopsid «in» Isograd, der etwa in der Fortsetzung des Diopsid-Kalzit-Isograds von TROMMSDORFF (1966) verläuft.

### 5.2.11 Zusammenfassung

Die Resultate von über 80 Arbeiten der letzten 20 Jahre, die hier zusammengefasst wurden, zeigen trotz regional grosser Streubreiten ein kohärentes Bild, dies obwohl die unterschiedlichsten Methoden der Druck- und Temperaturabschätzung zur Anwendung kamen.

Während sich die Temperaturen in allen Regionen in einem relativ engen Bereich von etwa 50 °C bewegen, variieren die Drucke in einem bedeutend grösseren Ungenauigkeitsintervall von durchschnittlich 1 kbar bis zu einem Maximum von 3.5 kbar im Bereich Bellinzona.

Verbindet man Regionen gleicher Temperatur, so liegen die entstehenden Isothermen etwa parallel zu den Mineralzonen von NIGGLI (1960). Die absolute Lage dieser Isothermen ist natürlich in weiten Bereichen sehr spekulativ, einerseits aufgrund der Variationen der Werte in den einzelnen Regionen, andererseits weil in vielen Gebieten einfach keine Daten vorliegen. Am besten dokumentiert ist die 500 °C-Isotherme, die sich vom Simplonpass über den Nufenenpass und Lukmanierpass bis in die mittlere Adula-Decke zieht. In diesem Temperaturbereich existiert ein relativ steiler Temperaturgradient, der die Eingabelung der Isotherme erleichtert. Besonders im Bereich des Nufenenpasses konnte ihre Lage durch neuere Arbeiten genau ermittelt werden (KAMBER, 1992; KLAPER, 1985, 1986); die Natur ihrer Entstehung wird jedoch sehr unterschiedlich interpretiert.

Gegen den Bereich Locarno-Bellinzona hin erhöht sich die Temperatur zwar deutlich, der Temperaturgradient wird aber flacher und die Lage der Isothermen somit sehr unsicher, besonders im östlichen Bereich der Zentralalpen, wo Temperaturen um 600 °C von der Region Cairasca-Verampio (FRANK, 1979, FRANK & STETTLER, 1979) bis in den östlichen Teil des V. Vigizzo (HAMMERSCHLAG, 1985) berechnet wurden. Die Form und Lage der

600 °C-Isotherme zwischen Simplonlinie und Insubrischer Linie entspricht dem Durchschnitt verschiedener Thermometer aus der Arbeit von COLOMBI (1988). Der Übergang über die Simplonlinie ist unklar. Da die Simplonlinie jünger als die mesoalpine Metamorphose ist (TRÜMPY, 1980), wäre ein Versatz der Isothermen wahrscheinlich. Bei Locarno konnte COLOMBI einen Temperaturabfall gegen die Insubrische Linie hin nachweisen, von 700 °C bei Locarno-Cardada auf 600 °C bei Arcegno-Locarno.

Isobaren wurden keine eingezeichnet; ihre Form würde etwa der der Isothermen entsprechen, wenn man den Ausreisser im V. Calanca vernachlässigt.

## Teil III

# Analyse und Interpretation von Paragenesedaten mesoalpiner Mineralvergesellschaftungen der Zentralalpen



## Kapitel 6

# Analyse der Paragenese-Daten

### 6.1 Datenfluss und Werkzeuge

Figur 6.1 stellt die Arbeitsweise vor. Die geologisch relevanten Informationen der ausgewählten Literatur (Publikationsreferenzen, Handstück-, Paragenese- und Mineralbeschreibungen, Elektronenmikrosondeanalysen usw.) und die eigenen Daten fließen zur Dokumentation in die speziell strukturierte Datenbank **PARADIS**<sup>1</sup> (vgl. Kap. 6.1.2).

Die Datenbank stellt mit Hilfe von Applikationsprogrammen die Daten externen petrologischen Programmen (NORM, MINSORT<sup>2</sup>, PTAX/TWEEQU [vgl. Kap. 6.1.3] zur Verfügung und nimmt deren Resultate wieder auf (vgl. Fig. 6.2).

Mittels vorgefertigter Reporte lassen sich beliebige Kombinationen von Datensätzen (Primärdaten und Resultate) aus der Datenbank extrahieren und an Geographische Informationssysteme oder Graphikprogramme wie zum Beispiel das GMT-System (vgl. Kap. 6.1.4) weitergeben.

Das GMT-System erlaubt die Konturierung der Druck- und Temperaturpunkte und somit die Herstellung von Isothermen- und Isobarenkarten der mesoalpiner Metamorphose in den Zentralalpen.

#### 6.1.1 INGRES

INGRES ist ein kommerzielles, relationales Datenbank-Managementsystem (RDBMS). Ein RDBMS ist ein System, das relationale Datenbanken verwaltet und beliebig vielen Benutzern den Zugang zu den Datenbanken ermöglichen kann.

Eine relationale Datenbank besteht lediglich aus einer Sammlung von Tabellen (formaler auch Relationen genannt). Der Zugang zu den Datenbanken erfolgt mit Hilfe einer relationalen Sprache (QUEL, SQL).

INGRES bietet eine 4 GL-Entwicklungsumgebung (forth generation language), mit dessen Unterstützung relativ leicht Datenbanktabellen erstellt und menügesteuerte Applikationen programmiert werden können.

INGRES ist für diverse Hardware-Plattformen (SUN, VAX usw.) erhältlich und läuft unter verschiedensten Betriebssystemen (UNIX, VMS, usw.). Für eine detailliertere Beschreibung von INGRES siehe Anhang B.

---

<sup>1</sup>Paragenesen Daten Inventar System

<sup>2</sup>Mineralnormierungsprogramme (Petraakis & Dietrich, 1985)

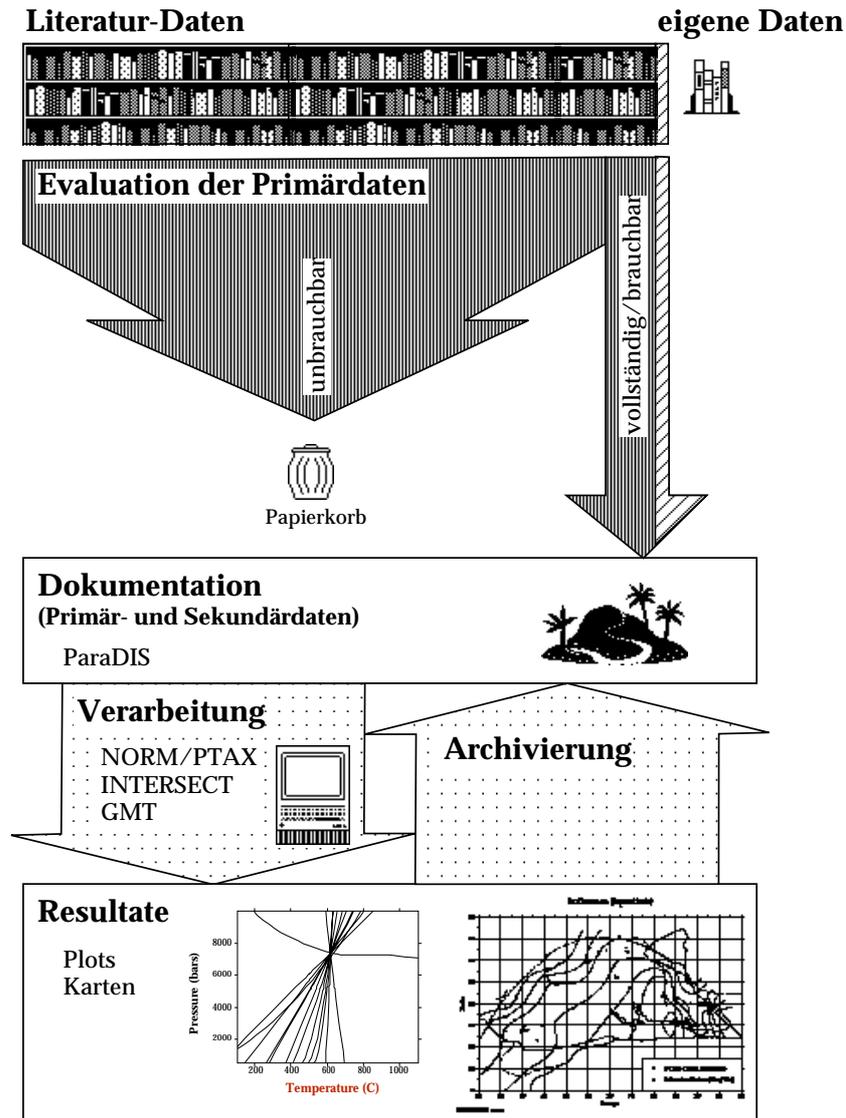


Fig. 6.1: Datenflussdiagramm

### 6.1.2 PARADIS und die Anwendungen UNIVERSAL und SPOUT

Die relationale Datenbank **PARADIS** enthält Objekte, die für petrologische Fragestellungen wichtig sind und für die Informationen gesammelt und gespeichert werden sollen. In **PARADIS** finden sich sowohl Primär-Daten (Publikationsreferenzen, Handstück-, Paragenesen- und Mineralbeschreibungen, Elektronenmikrosondeanalysen usw.) als auch daraus abgeleitete Sekundärdaten (Druck- und Temperaturberechnungen, Phasendiagramme).

In der Tabelle 6.1 sind die Objekte kurz beschrieben, für die Informationen in **PARADIS** abgelegt werden können.

Die Verwaltung der Daten in **PARADIS** geschieht mit menügesteuerten, benutzerfreundlichen Anwendungsprogrammen. Ein typisches Anwendungsprogramm zeigt einen bestimmten Datensatz der Datenbank auf einem Bildschirmformular an und gestattet dem Benutzer über das Menü die gewünschte Aktion (Abfrage-, Einschub-, Lösch-, Modifikationsoperation).



Fig. 6.2: Verarbeitung

Für **PARADIS** existieren zwei Anwendungsprogramme: UNIVERSAL, das der Dateneingabe und -manipulation dient, und SPOUT, das man sowohl zur Datenanalytik als auch zur Datenausgabe (Reporte in verschiedensten Formaten) benutzt.

SPOUT stellt die Daten in **PARADIS** externen petrologischen Programmen, NORM, MIN-SORT<sup>3</sup> (PETRAKAKIS & DIETRICH, 1985), PTAX/TWEEQU (vgl. Kap. 6.1.3), zur Verfügung und gibt deren Resultate – vor allem P-T- und T-X-Phasendiagramme – wieder in die Datenbank zurück (vgl. Fig. 6.2).

In die Applikation SPOUT ist auch das FORTRAN-Programm INTERSECT integriert, welches die Diagramme analysiert, indem es eine statistische Auswertung der Schnittpunkte aller im Diagramm vorkommenden Reaktionskurven vornimmt und so den wahrscheinlichsten P-T-Punkt ermittelt, bei dem eine Paragenese equilibriert hat.

<sup>3</sup>Mineralnormierungsprogramme

<b>Publikation</b>	Paper, Dissertation, Diplomarbeit
<b>Autor</b>	Der Verantwortliche
<b>Handstück</b>	Die Probe
<b>Paragenese</b>	Assoziation von verschiedenen kogenetischen Mineralindividuen einer Probe, aufgrund textueller Beobachtungen zu einer Paragenese gruppiert
<b>P-T-Interpretation</b>	Druck- und Temperaturabschätzung, auf den chemischen Analysen der Mineralindividuen einer Paragenese basierend und aus einem P-T-Stabilitätsdiagramm berechnet
<b>Stabilitätsdiagramm</b>	P-T-, T-X- usw. Diagramm, auf dem die P-T-Interpretation beruht, einschliesslich den Berechnungsoptionen für das Diagramm (TWEEQU-restart File) und den ausgewählten Formelparametern der Mineralien, die für die Berechnung des Diagramms verwendet wurden (TWEEQU-cmp File)
<b>Reaktion</b>	Reaktionskurve im Stabilitätsdiagramm
<b>Label</b>	Beschriftung einer Reaktionskurve in einem Stabilitätsdiagramm
<b>Punkt</b>	Punkt auf einer Reaktionskurve
<b>Mineral</b>	Textuell identifizierbares Mineralindividuum
<b>Mineralgruppe</b>	Gruppe von Mineralindividuen der gleichen Art (Bsp.: Gruppe Biotit besteht aus Matrixbiotit, Einschlussbiotit, Querbiotit)
<b>Assoziation von Flüssigkeitseinschlüssen</b>	Assoziation von gleichalten Flüssigkeitseinschlüssen eines Minerals, gruppiert aufgrund textueller Beobachtungen
<b>Phase</b>	optisch identifizierbare Phase eines Flüssigkeitseinschlusses
<b>Chemische Komponente</b>	Teil der Analyse eines Flüssigkeitseinschlusses
<b>EMSAnalyse</b>	Elektronenmikrosondeanalyse eines Mineralindividuums
<b>Analysen-Messprofil</b>	Elektronenmikrosondeanalysen, zu einem Messprofil über ein Mineral gruppiert

 Tab. 6.1: Was findet sich in **PARADIS**?

SPOUT vermag auch vorgefertigte INGRES-Reporte zu starten, mit denen sich beliebige Kombinationen von Datensätzen aus der Datenbank in beliebigem Format (ASCII, Postscript,  $\LaTeX$ , EXCEL usw.) extrahieren lassen. Die optimalen oder auch nach Qualität gewichteten Druck-Temperatur-Bestimmungen werden so an Graphikprogramme wie das GMT-System (vgl. Kap. 6.1.4) ausgegeben.

Für eine genauere Beschreibung von **PARADIS** und dessen Anwendungen siehe Kapitel 2.

### 6.1.3 PTAX, TWEEQU und GridLoc

PTAX<sup>4</sup> ist ein Programm, das Phasendiagramme, Projektionen und Schnitte zu berechnen vermag. Verschiedenste Parameter können als Diagrammachsen gewählt werden, wie z.B.

<sup>4</sup>Druck ( $P$ ), Temperatur-, Aktivität-, Zusammensetzung ( $X$ )

Druck, Temperatur,  $X_{CO_2}$ ,  $a_{Mineralphase}$ ,  $a_{wässrigeSpezies}$ . Die Berechnung der Diagramme basiert auf einer intern konsistenten Datenbank thermodynamischer Eigenschaften von Mineralien und Fluids (BERMAN, 1988, 1990), die auf Resultaten von Experimenten beruht und mit der Methode der mathematischen Programmierung abgeleitet wurde (BERMAN et al., 1986). PTAX ist Teil des GEOCALC-Softwarepaketes und wurde an der University of British Columbia in Vancouver (UBC) entwickelt.

TWEEQU<sup>5</sup> ist der verbesserte Nachfolger von PTAX (BERMAN, 1991).

Irgendein Schnittpunkt zweier Gleichgewichte in einem P-T-Diagramm stellt eine mögliche korrekte P-T-Bestimmung dar. Um mehr Sicherheit in der P-T-Bestimmung zu erhalten, sollten deshalb möglichst viele, im Idealfall *alle*, Gleichgewichte berücksichtigt werden und nicht nur einige auserwählte.

Die wichtigste Annahme von PTAX/TWEEQU besteht darin, dass alle Mineralzusammensetzungen, die in der Berechnung verwendet wurden, untereinander im Gleichgewicht sind, ihr Gleichgewicht also am gleichen P-T-Punkt eingestellt haben. Unter dieser Annahme schneiden sich alle Gleichgewichte im gleichen P-T-Punkt. Dies sollte entsprechend der Definition für alle Mineralien einer Paragenese zutreffen (vgl. Kap. 4.1.1); leider ist das nur der selten erfüllte Idealfall.

Unerlässliche Voraussetzung für den Gebrauch von PTAX/TWEEQU sind jedoch die folgenden 3 Annahmen (LIEBERMAN & PETRAKAKIS, 1991, und BERMAN, 1991):

1. Irgendeine Form von momentanem *thermodynamischem Gleichgewicht* hat sich eingestellt und ist in der Probe *erhalten geblieben*.
2. Die Extrapolation von experimentellen Resultaten zu den Eigenschaften von natürlichen Mineralien wurde korrekt durchgeführt (PTAX/TWEEQU vollzieht diese Extrapolation explizit und intern konsistent).
3. Die analysierten Mineralzusammensetzungen sind perfekt.

Wenn alle Gleichgewichte mit Hilfe einer einzigen, intern konsistenten thermodynamischen Datenbank (einschliesslich konsistenter Aktivitäts-Zusammensetzungs-Modelle und Zustandsgleichungen) berechnet wurden, stellt die *Verteilung* von P-T-Schnittpunkten ein Mass für die Gültigkeit der Annahme und ein qualitatives Mass für die Unsicherheit in der P-T-Bestimmung dar.

Diese Unsicherheit kann in vielen Fällen bedeutend reduziert werden, indem Mineralien mit schlecht bekannten thermodynamischen Eigenschaften oder Mischungsmodellen aus der Berechnung weggelassen werden. Mit verbesserten thermodynamischen Daten sollte es in Zukunft möglich sein, mit diesem Programm festzustellen, ob sich alle Mineralgleichgewichte unter den gleichen P-T-Bedingungen eingestellt haben.

Von PTAX/TWEEQU existieren Versionen für DOS, Macintosh und UNIX.

GridLoc ist ein Macintosh-Programm, mit dem sich schnell und flexibel Phasendiagramme von Plot-Files im PTAX/TWEEQU-Format druckreif darstellen lassen (LIEBERMAN, 1992). Die Diagramme können gedruckt, als PICT-Files gesichert oder über das «Clipboard» an andere, kommerzielle Grafikprogramme zur weiteren Verarbeitung weitergegeben werden.

#### 6.1.4 GMT-System

Die meisten Wissenschaftler kennen die Sequenz *Rohdaten* → *Verarbeitung* → *druckreife Illustration*. Dieser Prozess ist oft mühsam und wird oft manuell durchgeführt, weil kommerzielle oder hausgemachte Software meistens nur Teile dieser Arbeit übernehmen kann. Das

<sup>5</sup>Thermobarometry with Estimation of Equilibration state

GMT-System<sup>6</sup> ist ein kostenloses, public-domain-Softwarepaket, das die Manipulation von tabellenförmigen, zeitlich abhängigen oder gerasterten Daten erlaubt und diese Daten in verschiedensten Formen, vom einfachen x-y-Diagramm bis zu Karten in unterschiedlichsten Projektionen und farbigen, perspektivischen und schattierten Reliefillustrationen, darzustellen vermag. Für unsere Zwecke besonders wichtig ist die Möglichkeit, räumlich unregelmässig verteilte Daten (P-T-Punkte) gewichtet konturieren zu können (kontinuierliche Splines-Interpolation mit Spannungsfaktor), Profile zu legen und daraus thematische Karten herzustellen.

Das GMT-System wurde an der School of Ocean and Earth Science and Technology der University of Hawaii (SOEST/UH) und der Scripps Institution of Oceanography der University of California at San Diego (SIO/UCSD) entwickelt (SMITH & WESSEL, 1990; WESSEL & SMITH, 1991). Es wurde in der Programmiersprache C geschrieben und läuft auf beliebigen UNIX-Plattformen (SUN, DEC, NEXT, Silicon Graphics workstations, aber auch auf IBM und HP).

Das GMT-System befolgt die Modular-Design-Philosophie von UNIX: Der Prozess: *Rohdaten* → *Verarbeitung* → *druckreife Illustration* wird unterteilt in einzelne Schritte; jeder Schritt wird von einem speziellen GMT- oder UNIX-Tool durchgeführt. Mit Hilfe von Shell scripts oder Pipes können diese Tools miteinander verknüpft werden und so benutzerspezifische Aufgaben lösen.

Die GMT-Tools benötigen beliebige (x,y,z)-Daten im ASCII-Format als Eingabe. Die Ausgabe erfolgt entweder im ASCII-Format, in einem systemunabhängigen XDR-Format<sup>7</sup> oder in der *Postscript*-Sprache, mit deren Hilfe mehrere Plotfiles einander überlagert und beliebig komplexe Grafiken erzeugt werden können. Es besteht auch die Möglichkeit, ein GMT-Postscript-Outputfile in ein Macintosh-EPS-File<sup>8</sup> zu konvertieren und so in kommerzielle Macintosh-Programme einzubauen.

## 6.2 PTAX-methodisches

### 6.2.1 System, Aktivitätsmodelle

Sämtliche Berechnungen wurden im System Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> durchgeführt.

Für die thermobarometrische Anwendung von PTAX wurden immer alle formulierbaren Reaktionen berechnet und in den Diagrammen dargestellt, egal ob stabil oder metastabil, da beide gleich informativ sind.

Die berechneten Temperaturen und Drucke sind natürlich nur dann direkt vergleichbar, wenn immer die gleichen Aktivitätsmodelle verwendet werden. Deshalb kamen nur die folgenden Lösungsmodelle und Gleichungen zum Einsatz:

**Granat:** BERMAN, 1990

**Biotit:** INDARES & MARTIGNOLE, 1985

**Plagioklas:** FUHRMAN & LINDSLEY, 1988

**Hellglimmer:** CHATTERJEE & FROESE, 1975

**Staurolith, Chlorit, Chloritoid:** ideal berechnet

**Wasser:** HAAR et al., 1984

---

<sup>6</sup>Generic Mapping Tools

<sup>7</sup>External Data Representation

<sup>8</sup>Encapsulated-Postscript

### 6.2.2 Erläuterung zu den Tabellen

Die Resultattabellen enthalten folgende Informationen:

**Probe:** Handstückcode und -name.

**Mineralogie:** sämtliche bekannten Mineralien einer Probe. Die Mineralien der als *mesoalpin* interpretierten Paragenese sind *kursiv*, Akzessorien oder Mineralien anderer Paragenesen normal geschrieben.

**benutzte Paragenese:** Diese Mineralien wurden in die PTAX-Berechnung einbezogen. In der Regel handelt es sich nur um eine Teilmenge der *mesoalpinen* Paragenese, da nur im Idealfall die Chemismen aller Mineralien bekannt waren.

**Resultat:** gewichtete und ungewichtete Mittelwerte der Schnittpunkte der Gleichgewichtskurven auf dem entsprechenden Phasendiagramm mit Standardabweichung (genaue Beschreibung der Berechnungsmethodik vgl. Kap. 2.5.2).

**bisherige P-T-Abschätzung:** Vergleich mit den Resultaten der Autoren, die fast ausschliesslich das Granat-Biotit-Thermometer und das Anorhtit-Grossular-Barometer anwendeten.

**Gleichgewichte:** eine Liste der verwendeten Gleichgewichte, inklusive deren  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte und Angaben über die lineare Abhängigkeit der Reaktionen.



# Kapitel 7

## Nufenenregion

### 7.1 Nuf183, Nuf189

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**Nuf183:** Biotit-reicher Granatschiefer

**Nuf189:** Granat-Glimmerschiefer

Für Probe Nuf183 steht keine Plagioklasanalyse zur Verfügung. Es resultieren zwar 3 linear unabhängige Reaktionen, die aber nicht alle wasserfrei sind. Die wasserfreien Reaktionen 1, 8, 13, 14 und 15 sind linear abhängig und schneiden sich bei 515 °C und 7535 bar. Bei  $X_{H_2O} = 0.7$  verlaufen auch die wasserführenden durch diesen P-T-Punkt.

In Probe Nuf189 fehlt ein Alumosilikat. Auch hier resultieren 3 linear unabhängige Reaktionen, die nicht alle wasserfrei sind. Die linear abhängigen, wasserfreien (Nr. 1, 7 und 9 in Tab. 7.1 b) schneiden sich bei 537 °C und 6400 bar. Bei  $X_{H_2O} = 0.8$  verlaufen auch die wasserführenden Reaktionen durch diesen Punkt (vgl. Fig. 7.1).

In beiden Fällen wird die Temperatur vom Granat-Biotit-Thermometer bestimmt.

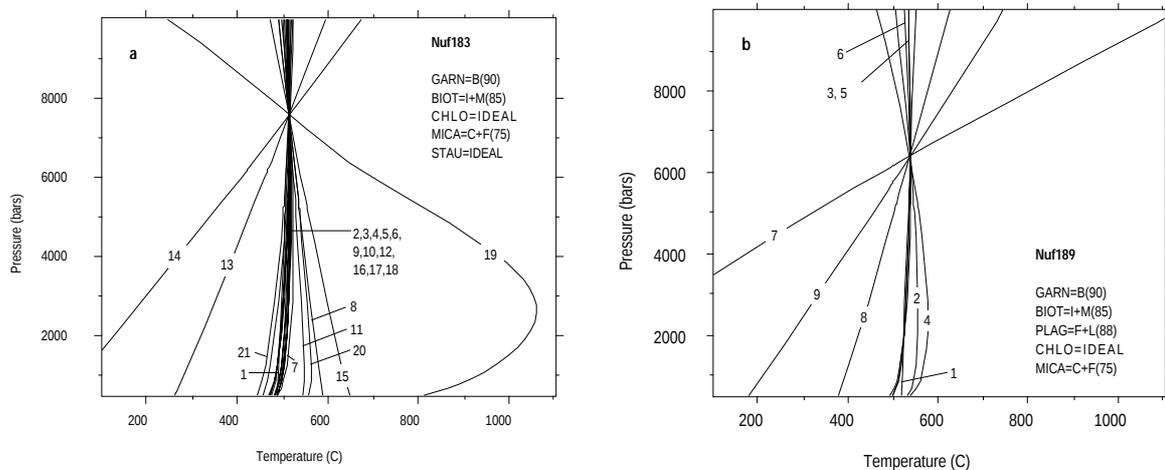


Fig. 7.1: (a) Nuf183, (b) Nuf189

a) Probe:	<b>183, Biotit-reicher Granatschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl-Czo</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Qtz-St-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	Schnittpunkt	515 °C	7535 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper & Bucher (1987)	450-550°C	5000-6000 bar
Gleichgewichte in Figur 7.1 a (3 linear unabhängig)			
1	Alm + Phl = Prp + Ann		$\Delta S_r$ 12.0 $\Delta V_r$ 0.24
2	3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 4 Prp + Phl		-323.2 -24.09
3	6 St + 117 aQtz + 8 Phl + 69 Chl = 8 Ann + 123 Prp + 288 W		-7481.0 -597.36
4	3 aQtz + Ms + 3 Chl + Alm = Ann + 5 Prp + 12 W		-311.2 -23.86
5	4 Alm + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + Ms + 3 Chl + 4 Ann		371.2 25.04
6	69 Chl + 117 aQtz + 6 St = 288 W + 115 Prp + 8 Alm		-7577.1 -599.24
7	123 Alm + 115 Phl + 288 W = 6 St + 117 aQtz + 69 Chl + 115 Ann		8957.8 626.38
8	8 Ann + 3 Chl + 24 Ms + 27 Prp = 6 St + 45 aQtz + 32 Phl		-276.2 19.10
9	8 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 33 Prp + 47 Phl		-5124.5 -342.31
10	6 St + 141 aQtz + 8 Ms + 93 Chl = 8 Ann + 155 Prp + 384 W		-10066.8 -790.11
11	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl		47.0 43.19
12	32 Ann + 93 Chl + 123 Ms = 324 W + 24 St + 99 aQtz + 155 Phl		-9831.7 -574.14
13	32 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Ann		108.0 26.65
14	27 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Ann		47.9 25.47
15	8 Alm + 3 Chl + 24 Ms + 19 Prp = 6 St + 45 aQtz + 24 Phl		-180.2 20.99
16	47 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Ann		-4560.2 -331.22
17	41 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 33 Alm		-5520.7 -350.10
18	8 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 41 Prp + 39 Phl		-5028.4 -340.42
19	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann		419.2 50.51
20	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl		143.1 45.08
21	32 Alm + 69 Chl + 115 Ms = 228 W + 24 St + 123 aQtz + 115 Phl		-6861.8 -373.83
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			
b) Probe:	<b>Nuf189, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Chl-Czo-Opk-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	Schnittpunkt	537 °C	6400 bar
bisherige T-Abschätzung:	Klaper (1985)	468 ± 19°C	
Gleichgewichte in Figur 7.1 b (2 linear unabhängig)			
1	Alm + Phl = Prp + Ann		$\Delta S_r$ 12.0 $\Delta V_r$ 0.24
2	12 W + 5 Prp + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz		443.5 31.36
3	3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 4 Prp + Phl		-323.2 -24.09
4	12 W + 5 Phl + Grs + 5 Alm = 5 Ann + 3 An + 3 Chl + 3 aQtz		503.5 32.53
5	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Prp + Ann		-311.2 -23.86
6	4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Phl + 4 Alm		-371.2 -25.04
7	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl		120.2 7.26
8	3 Chl + 4 Grs + 5 Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Phl + 12 An		157.7 4.95
9	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An		132.2 7.50
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 7.1: (a) Nuf183, (b) Nuf189

## 7.2 Fus46, Nuf243, Nuf244, Fus80b, Nuf27

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**Fus46:** Hellglimmerschiefer

**Nuf243:** Granat-Glimmerschiefer

**Nuf244:** Granat-Glimmerschiefer

**Fus80b:** Plagioklasschiefer

**Nuf27:** Kalkglimmerschiefer

Weil für die oben aufgeführten Handstücke nur Granat- bzw. Biotitanalysen vorlagen, konnten nur das Granat-Biotit-Thermometer und das Anorthit-Grossular-Barometer angewendet werden (vgl. Tab. 7.2 und Fig. 7.2).

Von Probe Fus46 lagen mehrere Analysen vor. Die Berechnung der beiden Gleichgewichte mit allen möglichen Kombinationen der Analysen ergab vor allem beim Granat-Biotit-Thermometer eine ausserordentlich grosse Streuung. Für die Isothermen- und Isobarenkarten wurden die Durchschnittsanalysen verwendet; diese Resultate liegen auch am nächsten bei denen von KLAPER (1982).

Probe Nuf27 konnte nur für die Granat-Biotit-Thermometrie verwendet werden. Die Druckvorgabe stammt aus P-T-Berechnungen von Gesteinsproben aus der näheren Umgebung.

benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Qtz-Ky		
a) Probe:	<b>Fus46, Hellglimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-Czo-Chl</i>		
Resultat:	Durchschnitt	495 °C	6946 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1982)	560°C	6800 bar
b) Probe:	<b>Nuf243, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky-St-Czo-Opk-Tur</i>		
Resultat:	Schnittpunkt	589 °C	7469 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1985)	536 ± 43°C	7031 ± 445 bar
c) Probe:	<b>Nuf244, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-St-Czo-Opk-Gr</i>		
Resultat:	Schnittpunkt	633 °C	7496 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1985)	599 ± 35°C	5993 ± 34 bar
d) Probe:	<b>Fus80b, Plagioklasschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-St-Qtz-Ky-Chl</i>		
Resultat:	Schnittpunkt	569 °C	6752 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1982)	560°C	6800 bar
e) Probe:	<b>Nuf27, Kalkglimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Hbl-Dol-Czo-Cal-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt		
Resultat:		517 °C	6000 bar (angenommen)
bisherige T-Abschätzung:	Klaper (1985)	410 ± 25°C	
Gleichgewichte in Figur 7.2 (2 linear unabhängig)			
		$\Delta S_r$	$\Delta V_r$
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 7.2: (a) Fus46, (b) Nuf243, (c) Nuf244, (d) Fus80b, (e) Nuf27

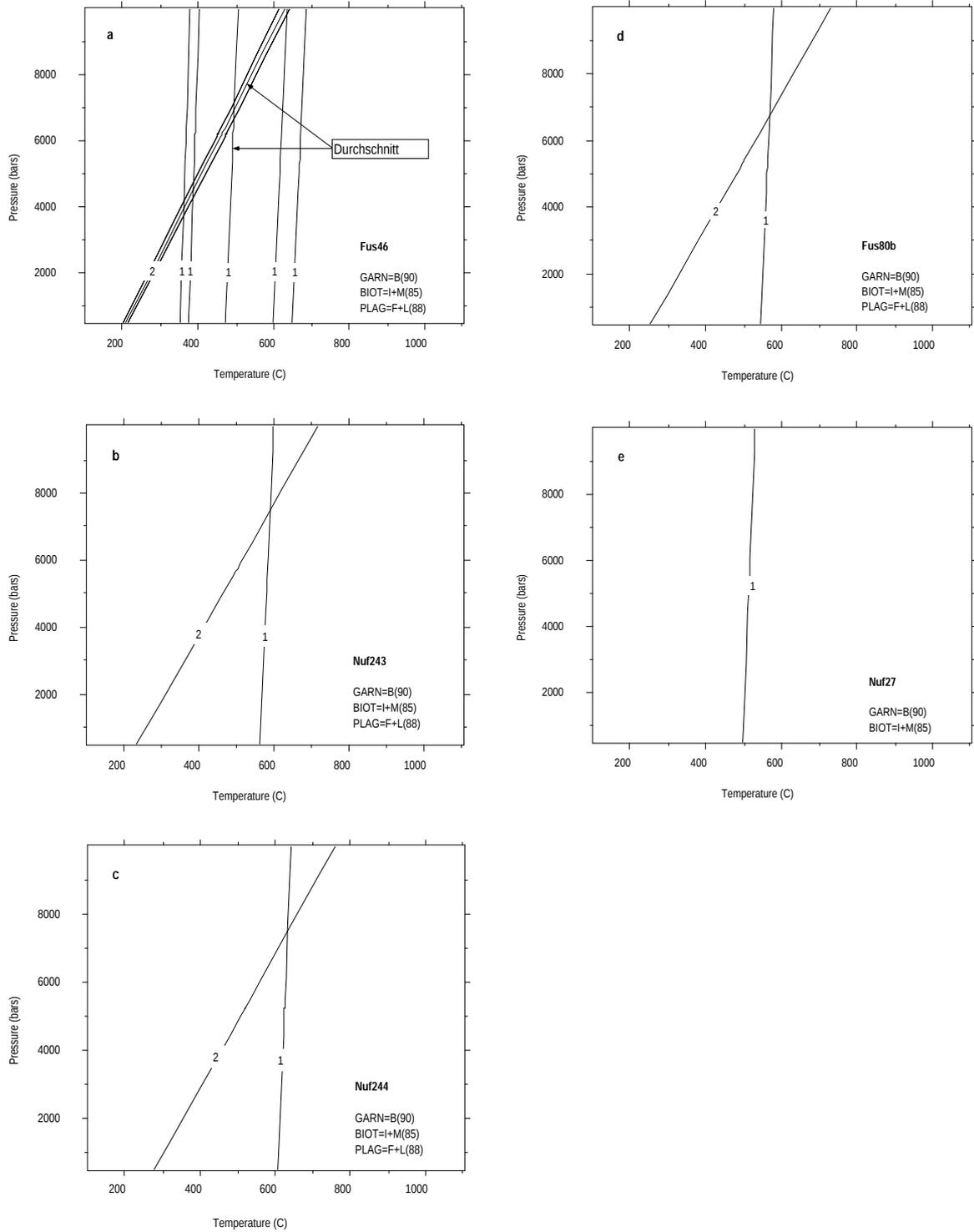


Fig. 7.2: (a) Fus46, (b) Nuf243, (c) Nuf244, (d) Nuf80b, (e) Nuf27

### 7.3 Fus70, Nuf242, Nuf237, Nuf179

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**Fus70:** Kalkglimmerschiefer

**Nuf242, Nuf237, Nuf179:** Granat-Glimmerschiefer

Die Analysen der einzelnen Mineralien wurden jeweils gemittelt. Es existieren keine Analysen von Staurolith. Es resultieren nur H<sub>2</sub>O-konservierende Reaktionen, von denen drei linear unabhängig sind (vgl. Fig. 7.3).

Es fällt auf, dass Reaktion 4 am weitesten weg vom Schnittpunkt der anderen Reaktionen liegt. Diese Reaktion weist jedoch die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte auf und ist folglich am empfindlichsten auf kleine Änderungen in der Aktivität oder Zusammensetzung einer involvierten Phase (BERMAN, 1991). Sie fällt bei der Berechnung der  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -gewichteten arithmetischen Mittel praktisch nicht ins Gewicht (vgl. Tab. 7.3).

In Nuf179 fehlt ein Alumosilikat; die Reaktionen sind linear abhängig.

a) Probe:	<b>Fus70, Kalkglimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-Cal-Dol-Ep</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	604 ± 86 °C	6295 ± 1418 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	627 ± 7 °C	6831 ± 426 bar
	winkelgewichtet	626°C	6796 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	576°C	6034 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	625°C	6992 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1982)	560°C	5400 bar
b) Probe:	<b>Nuf242, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky-St-Czo-Opk-Czo-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	516 ± 143 °C	4999 ± 2218 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	530 ± 139 °C	5345 ± 2116 bar
	winkelgewichtet	535°C	5427 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	470°C	4710 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	536°C	5971 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1985)	493 ± 30°C	5104 ± 645 bar
c) Probe:	<b>Nuf237, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-Czo-Crb-Chl-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	440 ± 74 °C	5486 ± 1616 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	448 ± 68 °C	5751 ± 1530 bar
	winkelgewichtet	461°C	5935 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	420°C	5412 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	468°C	6470 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Klaper (1985)	451 ± 30°C	8095 ± 591 bar
d) Probe:	<b>Nuf179, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Czo-Chl-Opk-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz		
Resultat:	Schnittpunkt	498 °C	5566 bar
bisherige T-Abschätzung:	Klaper (1985)	414 ± 27 °C	
Gleichgewichte in Figur 7.3 (3 linear unabhängig)			
		$\Delta S_r$	$\Delta V_r$
1	Alm + Phl = Prp + Ann	12.0	0.24
2	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
3	Ms + Prp = aQtz + Phl + 2 Ky	-18.8	0.67
4	Ms + Alm = Ann + 2 Ky + aQtz	-6.8	0.90
5	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
6	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 7.3: (a) Fus70, (b) Nuf242, (c) Nuf237, (d) Nuf179

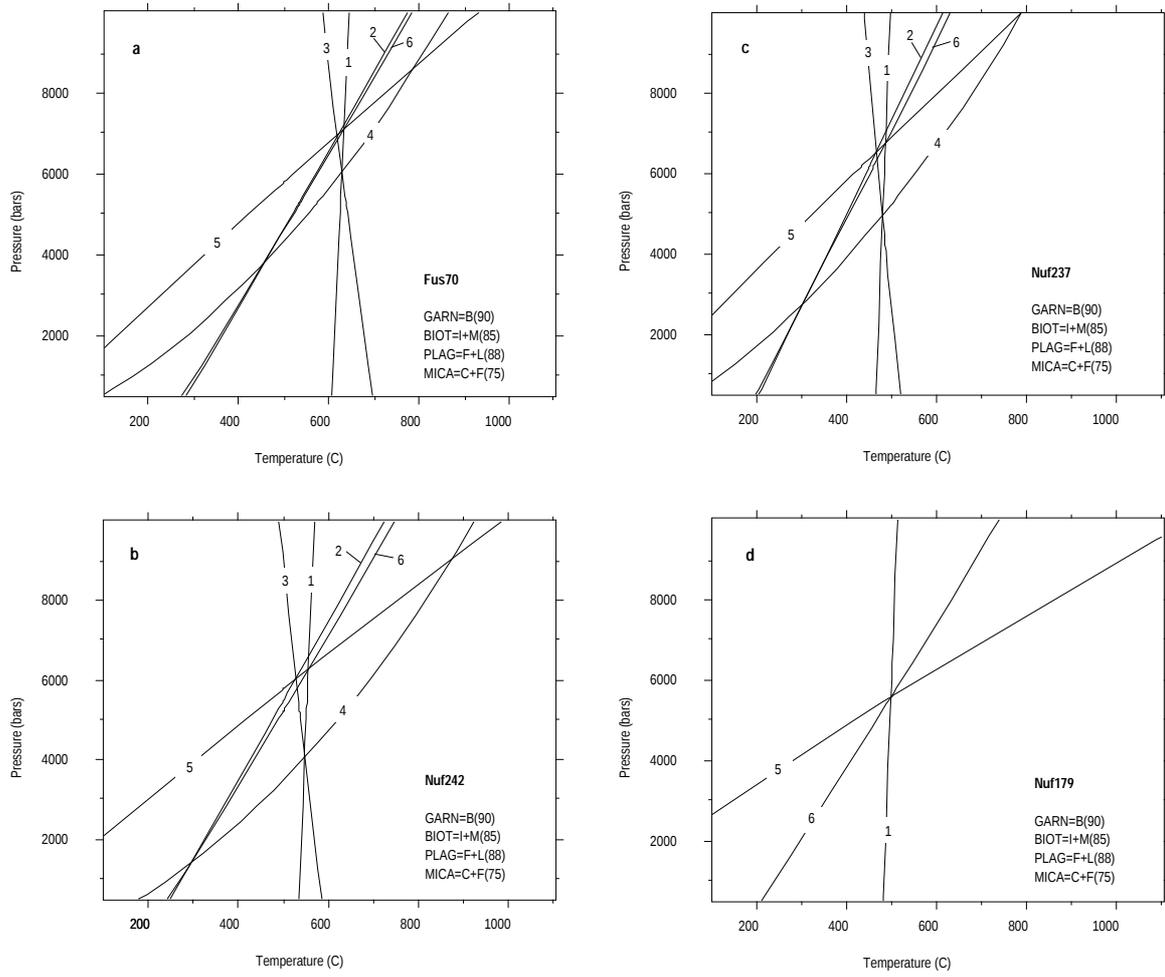


Fig. 7.3:  $\Delta$   
 (a) Fus70, (b) Nuf242, (c) Nuf237, (d) Nuf179

## Kapitel 8

# Das Gebiet der mittleren und südlichen Adula-Decke

### 8.1 DS5: Granat-Disthen-Muscovit-Biotit-Gneiss

Die Analysen der einzelnen Mineralien wurden jeweils gemittelt, da die Mineralien keine nennenswerte Zonierung aufweisen. Obwohl Disthen gegenüber dem fibrolithischen Sillimanit den grösseren Modalanteil aufweist (5% gegenüber <1%), scheint er, aufgrund seiner stark zersetzten Erscheinung, nicht mit den anderen Mineralien im Gleichgewicht zu sein. Für Fibrolith wurden die thermodynamischen Daten von Sillimanit verwendet.

Die wasserkonservierenden Reaktionen (davon 3 linear unabhängige) verlaufen fast alle durch den gleichen P-T-Punkt (Fig. 8.1 a) und deuten ein gutes Gleichgewicht an (vgl. Tab. 8.1 a). Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.9 konvergieren auch Reaktionen mit Paragonit und Wasser durch dieses P-T-Feld (Fig. 8.1 b, c).

Chlorit ersetzt den Biotit pseudomorph und gehört zu einer späteren, wahrscheinlich retrograd entstandenen Paragenese. Bezieht man Chlorit trotzdem in die Berechnung mit ein, so fallen die entsprechenden Reaktionen zu viel tieferen Temperaturen (ca 550 °C).

### 8.2 DS6: Granat-Muscovit-Disthen-Biotit-Gneiss

Auch hier wurden die Mittelwerte der Analysen verwendet, da die Mineralien keine nennenswerte Zonierung aufweisen. Die wasserkonservierenden Reaktionen (davon 3 linear unabhängige) verlaufen fast alle durch den gleichen P-T-Punkt (Fig. 8.1 d) und deuten ein gut erhaltenes Gleichgewicht an (vgl. Tab. 8.1). Reaktion 2 weicht am stärksten vom Durchschnitt ab, weist jedoch auch die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte auf.

Da der Hellglimmer einen relativ hohen Paragonitanteil enthält (20%), wurde er noch in die Berechnung einbezogen.  $X_{H_2O}$  muss jedoch auf 0.66 herabgesetzt werden, damit Reaktionen mit Paragonit auch durch die gleiche P-T-Region konvergieren. Das T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 7400 bar bestätigt diesen Wert (vgl. Fig. 8.1 e und f und Tab. 8.1).

a) Probe:	<b>DS5, Granat-Disthen-Muscovit-Biotit-Gneiss</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Sil-Qtz-Ky-Chl-Opk-Ap-Tur-Zrn</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Sil-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	692 ± 14 °C	5357 ± 201 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	692 ± 14 °C	5357 ± 201 bar
	winkelgewichtet	696°C	5392 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	694°C	5297 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	696°C	5328 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pg-Pl-Sil-Qtz-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	697 ± 15 °C	5312 ± 547 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	696 ± 14 °C	5364 ± 239 bar
	winkelgewichtet	698°C	5370 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	696°C	5312 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	696°C	5293 bar
d) Probe:	<b>DS6, Granat-Muscovit-Disthen-Biotit-Gneiss</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Ky-Qtz-Opk-Ap-Py-Zrn</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	613 ± 24 °C	7227 ± 404 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	618 ± 2 °C	7369 ± 99 bar
	winkelgewichtet	618°C	7360 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	605°C	7144 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	618°C	7404 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pg-Pl-Ky-Qtz-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	616 ± 11 °C	7403 ± 428 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	616 ± 4 °C	7360 ± 127 bar
	winkelgewichtet	617°C	7378 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	613°C	7315 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	616°C	7383 bar
Gleichgewichte in Figur 8.1 a-c (3 linear unabhängig)			
1	Grs + 2 Sil + aQtz = 3 An	112.1	5.45
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Sil + Ann	20.2	2.04
3	Pg + aQtz = W + Sil + Ab	1.2	-0.42
4	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	W + 3 Sil + Grs + Ab = 3 An + Pg	110.9	5.87
7	3 aQtz + 2 Pg + Grs = 2 Ab + 3 An + 2 W	114.5	4.61
8	Alm + Ms + Pg = W + 3 Sil + Ann + Ab	21.3	1.63
9	3 aQtz + 2 Pg + Ann = 2 Ab + Alm + Ms + 2 W	-17.8	-2.88
10	Prp + Ms = 2 Sil + Phl + aQtz	8.2	1.81
11	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
12	Prp + Pg + Ms = Ab + 3 Sil + Phl + W	9.3	1.39
13	2 Pg + Phl + 3 aQtz = 2 W + Prp + Ms + 2 Ab	-5.8	-2.65
Gleichgewichte in Figur 8.1 d-f (3 linear unabhängig)			
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Pg + aQtz = W + Ky + Ab	-12.3	-0.99
4	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	W + 3 Ky + Grs + Ab = 3 An + Pg	151.4	7.58
7	3 aQtz + 2 Pg + Grs = 2 Ab + 3 An + 2 W	114.5	4.61
8	Alm + Ms + Pg = W + 3 Ky + Ann + Ab	-19.2	-0.09
9	3 aQtz + 2 Pg + Ann = 2 Ab + Alm + Ms + 2 W	-17.8	-2.88
10	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
11	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
12	Prp + Pg + Ms = Ab + 3 Ky + Phl + W	-31.2	-0.32
13	2 Pg + Phl + 3 aQtz = 2 W + Prp + Ms + 2 Ab	-5.8	-2.65
Δ <i>S<sub>r</sub></i> in $J \cdot K^{-1}$ ; Δ <i>V<sub>r</sub></i> in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 8.1: DS5: (a) wasserfreies System, (b) alle Reaktionen; DS6: (d) wasserfreies System, (e) alle Reaktionen

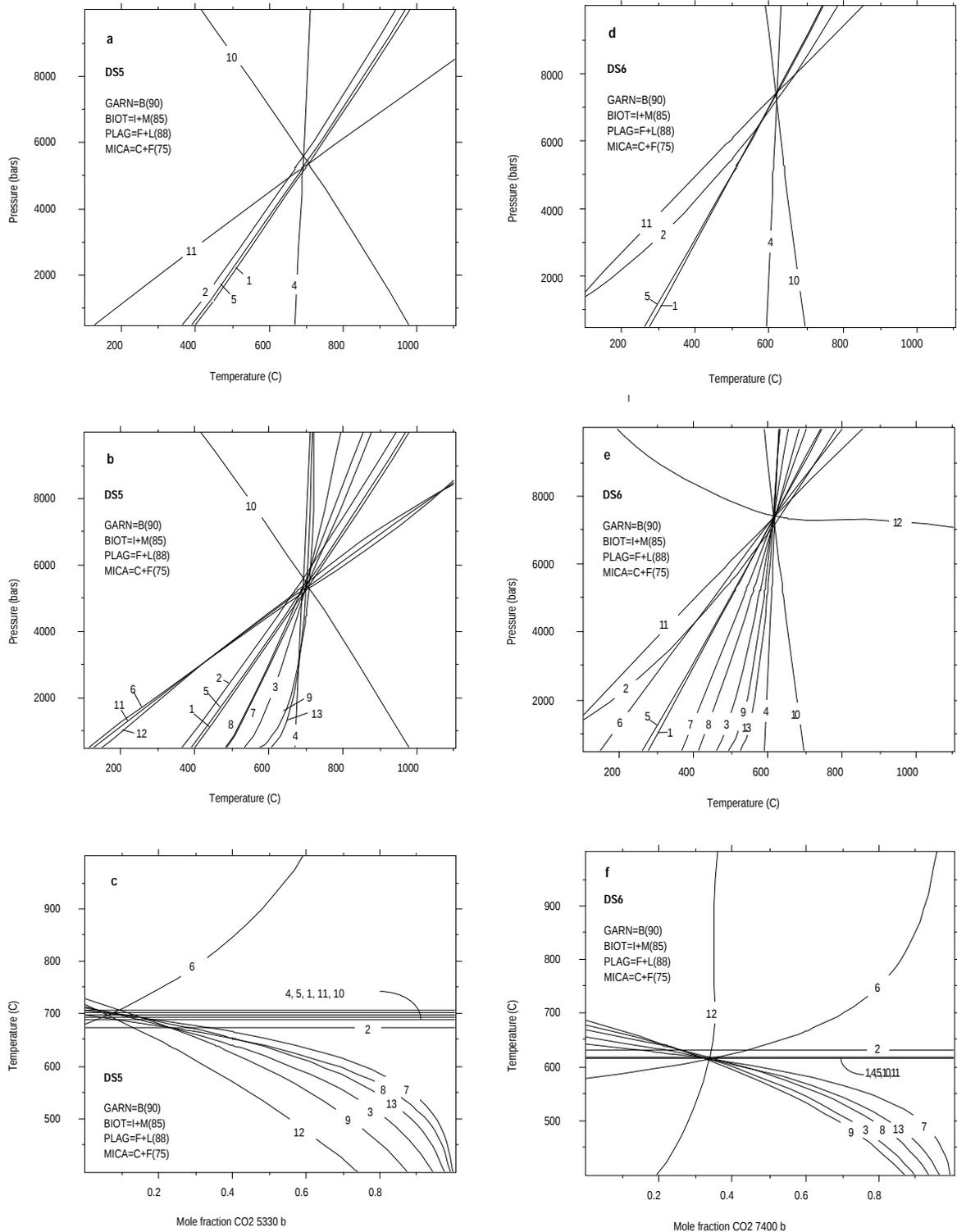


Fig. 8.1: DS5:(a) wasserkonservierende Reaktionen (b) sämtliche Reaktionen, Paragonit eingeschlossen (c) T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 5330 bar; DS6: (d) wasserkonservierende Reaktionen (e) sämtliche Reaktionen, Paragonit eingeschlossen (f) T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 7400 bar

### 8.3 RT159, Th46

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**RT159:** pelitischer Bündnerschiefer

**Th46:** Glimmerschiefer

Abgesehen von Reaktion 2, welche die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte aufweist, schneiden sich die wasserkonservierenden Reaktionen (3 linear unabhängige) in einem engen Bereich (vgl. Fig. 8.2 a, d).

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.83 (Probe RT159) bzw. 0.79 (Probe Th46) konvergieren die meisten wasserfreisetzenden Reaktionen durch diesen P-T-Bereich (vgl. Tab. 8.2).

Die linear abhängigen Reaktionen 2, 4, 9, 10 und 11 schneiden sich bei anderen Drucken als die restlichen Gleichgewichte. Diese Abseitslage ist unabhängig vom  $X_{H_2O}$  – Reaktion 2 ist wasserkonservierend und liegt abseits – und muss zurückzuführen sein auf den Chemismus der festen Phasen (Messfehler, Ungleichgewicht aufgrund retrograder Veränderung, Probleme mit den eng verknüpften Aktivitätsmodellen von Almandin und Annit).

Reaktionen mit Chlorit liegen weit abseits und deuten auf eine retrograde Chloritentstehung hin.

### 8.4 DS10a, EK45, B367, K1437

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**DS10a:** Muscovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss

**B367, K1437:** Glimmerschiefer

**EK45:** granatführender Glimmerschiefer

Mit den zur Verfügung stehenden Analysen resultieren nur wasserkonservierende Reaktionen; diese sind unabhängig von der Zusammensetzung der fluiden Phase. 3 Reaktionen sind linear unabhängig.

In Probe DS10a wurden die Analysen der einzelnen Mineralien gemittelt, da keine nennenswerte Zonierung der Mineralien vorlag. Für die anderen Proben (B367, K1437, EK45) liegt jeweils nur eine Analyse pro Mineral vor.

In Probe DS10a tritt untergeordnet auch fibrolithischer Sillimanit auf (2%), weshalb die gleiche Berechnung auch mit Sillimanit anstelle von Disthen durchgeführt wurde. Die meisten Reaktionen liegen in der Nähe der Reaktion Disthen = Sillimanit. Allerdings streuen alle Reaktionen mit Sillimanit weiter als die äquivalenten mit Disthen. Sillimanit ist offenbar ein Spätprodukt und scheint nicht mehr im Gleichgewicht mit den anderen Mineralien zu sein.

In den Probe B367 und K1437 musste Staurolith von der Paragenese ausgeschlossen werden, da er nur untergeordnet auftritt und in Probe B367 sogar nur als Einschluss im Disthen vorkommt. Alle Reaktionen mit Staurolith streuen zudem extrem weit.

Es fällt auf, dass Reaktion 2 in allen Proben am weitesten weg vom Schnittpunkt der anderen Reaktionen liegt. Diese Reaktion weist jedoch die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte auf und ist somit am empfindlichsten auf kleine Änderungen in der Aktivität oder Zusammensetzung einer involvierten Phase (BERMAN, 1991). Sie fällt bei der Berechnung der  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -gewichteten arithmetischen Mittel praktisch nicht ins Gewicht (vgl. Tab. 8.3).

a) Probe:	<b>RT159, pelitischer Bündnerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Ilm-Chl-Tur</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	579 ± 15 °C	6803 ± 1186 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	579 ± 16 °C	6622 ± 1079 bar
	winkelgewichtet	581°C	6663 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	582°C	6171 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	584°C	6194 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	586 ± 36 °C	6936 ± 1316 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	587 ± 35 °C	6871 ± 1242 bar
	winkelgewichtet	599°C	7078 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	590°C	6215 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	610°C	6621 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Teutsch (1982)	627°C	6800 ± 1000 bar
d) Probe:	<b>Th46, Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-St-Sil-Ep-Ap-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	579 ± 64 °C	7227 ± 1298 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	611 ± 7 °C	7917 ± 458 bar
	winkelgewichtet	610°C	7860 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	561°C	7089 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	609°C	8085 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	599 ± 49 °C	7667 ± 913 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	606 ± 19 °C	7785 ± 596 bar
	winkelgewichtet	602°C	7698 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	607°C	8088 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	598°C	7897 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Koch (1982)	643 ± 35 °C	8400 bar
Gleichgewichte in Figur 8.2 a-f (3 linear unabhängig)		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	-12.0	-0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	-4053.8	-194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	-2622.4	-121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	18.8	-0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	747.7	7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	631.3	22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	-120.2	-7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	-2995.8	-134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	-3680.4	-181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	-3957.8	-192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	-2718.5	-123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	951.8	11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	1047.8	13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
		ΔS <sub>r</sub> in J · K <sup>-1</sup> ; ΔV <sub>r</sub> in J · bar <sup>-1</sup>	

Tab. 8.2: RT159: (a) wasserfreies System, (b) alle Reaktionen; Th46: (d) wasserfreies System, (e) alle Reaktionen

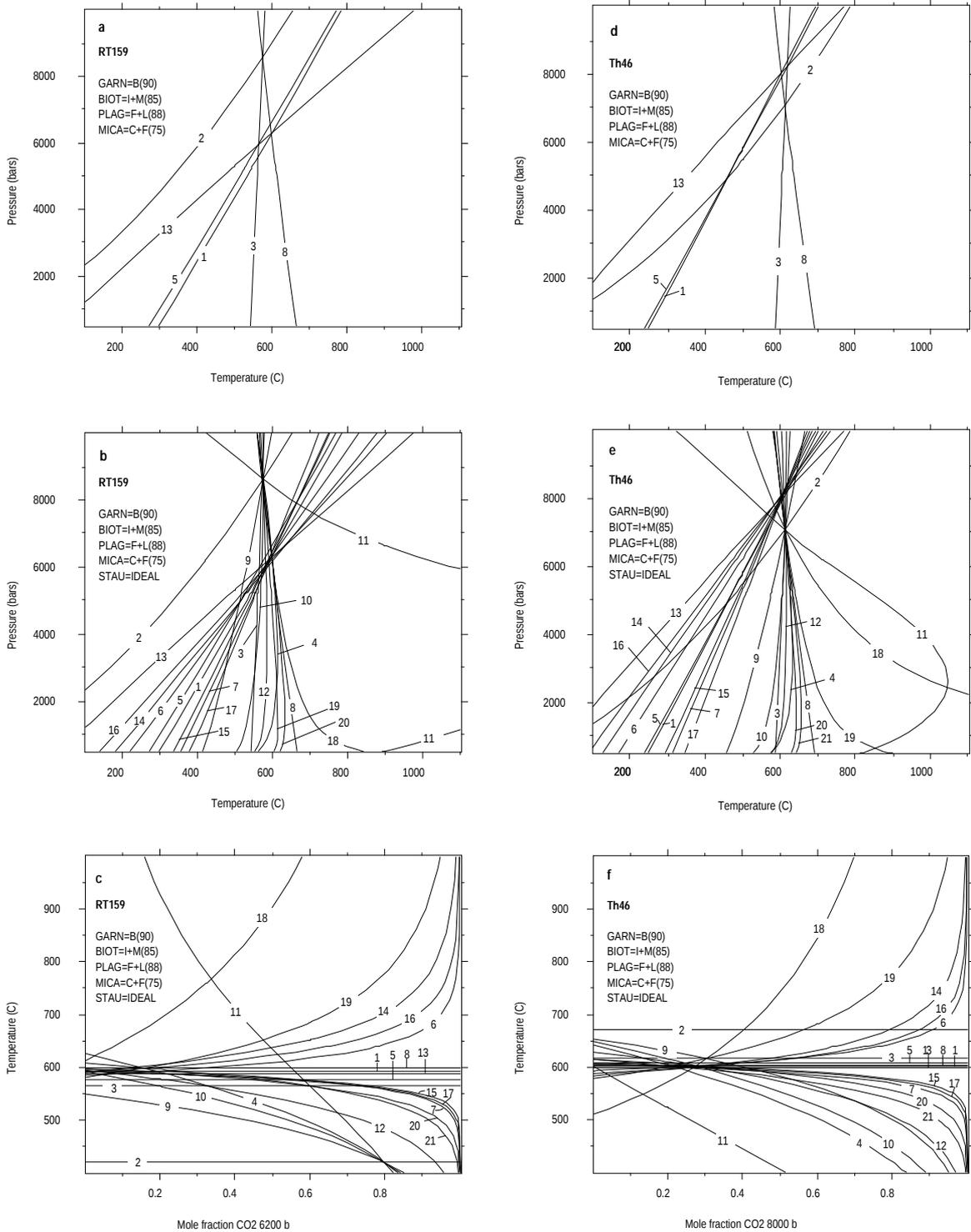


Fig. 8.2: RT159: (a) wasserkonservierende Reaktionen (b) sämtliche Reaktionen, (c) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub>-Diagramm bei 6200 bar; Th46: (d) wasserkonservierende Reaktionen (e) sämtliche Reaktionen, (f) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub>-Diagramm bei 8000 bar

a) Probe:	<b>DS10a, Muscovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-Sil-Chl-Opk-Ap-Rt-Py-Tur-Zrn</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	662 ± 29 °C	6548 ± 1869 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	663 ± 30 °C	6264 ± 1702 bar
	winkelgewichtet	666°C	6262 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	668°C	5556 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	671°C	5594 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Sil-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	655 ± 97 °C	6021 ± 1490 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	655 ± 97 °C	6021 ± 1490 bar
	winkelgewichtet	680°C	6281 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	668°C	5575 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	686°C	5811 bar
c) Probe:	<b>B367, Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-Sil-St-Chl-Ap-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	688 ± 55 °C	6574 ± 894 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	708 ± 3 °C	6919 ± 211 bar
	winkelgewichtet	707°C	6929 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	670°C	6375 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	706°C	7020 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Koch (1982)	645 ± 28 °C	7200 bar
d) Probe:	<b>EK45, granatführender Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Sil-Chl-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Sil		
Resultat:	alle Schnittpunkte	612 ± 29 °C	4623 ± 417 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	612 ± 29 °C	4623 ± 417 bar
	winkelgewichtet	619°C	4691 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	615°C	4499 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	620°C	4559 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Koch (1982)	631 ± 44 °C	6500 bar
e) Probe:	<b>K1437, Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-St-Sil-Chl-Ap-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	612 ± 159 °C	6938 ± 3097 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	629 ± 146 °C	7439 ± 2928 bar
	winkelgewichtet	648°C	7672 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	569°C	6754 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	663°C	8634 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Koch (1982)	664 ± 33 °C	9500 bar
Gleichgewichte in Figur 8.3 a,c,e (3 linear unabhängig)			
		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
5	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
6	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
Gleichgewichte in Figur 8.3 b,d (3 linear unabhängig)			
		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	Grs + aQtz + 2 Si = 3 An	112.1	5.45
2	Alm + Ms = 2 Si + aQtz + Ann	20.2	2.04
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
5	Prp + Ms = Phl + aQtz + 2 Si	8.2	1.81
6	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
Δ <i>S<sub>r</sub></i> in $J \cdot K^{-1}$ ; Δ <i>V<sub>r</sub></i> in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 8.3: (a) DS10a mit Disthen, (b) DS10a mit Sillimanit, (c) B367, (d) EK45, (e) K1437

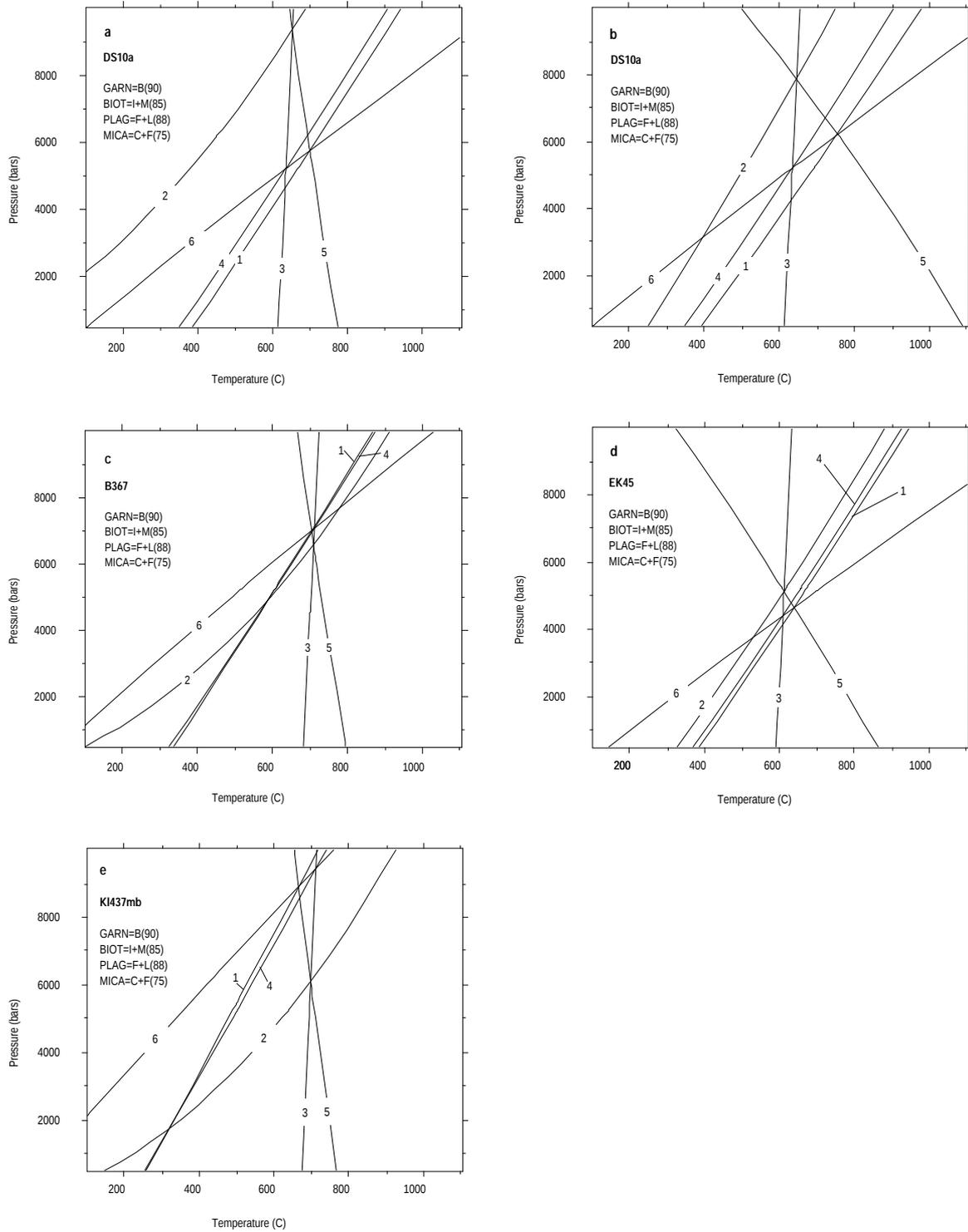


Fig. 8.3: (a) DS10a mit Disthen, (b) DS10a mit Sillimanit, (c) B367 (Ky), (d) EK45 (Sil), (e) K1437(Ky)

## 8.5 K1185: granatführender Glimmerschiefer

Die wasserfreien Reaktionen deuten ein fast perfektes Gleichgewicht an (3 linear unabhängige Reaktionen), selbst dann noch, wenn man das chemische System um Na erweitert und noch Paragonit (relativ grosse Paragonitkomponente im Hellglimmer) und Staurolith mit in die Berechnung einschliesst (4 linear unabhängige Reaktionen!).

Die wasserhaltigen Reaktionen konvergieren durch das gleiche P-T-Feld bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.65. Es resultieren so 5 (!) linear unabhängige Reaktionen (vgl. Fig. 8.4 a-d).

Reaktionen mit Chlorit streuen weit; Chlorit wird als retrograde Phase interpretiert.

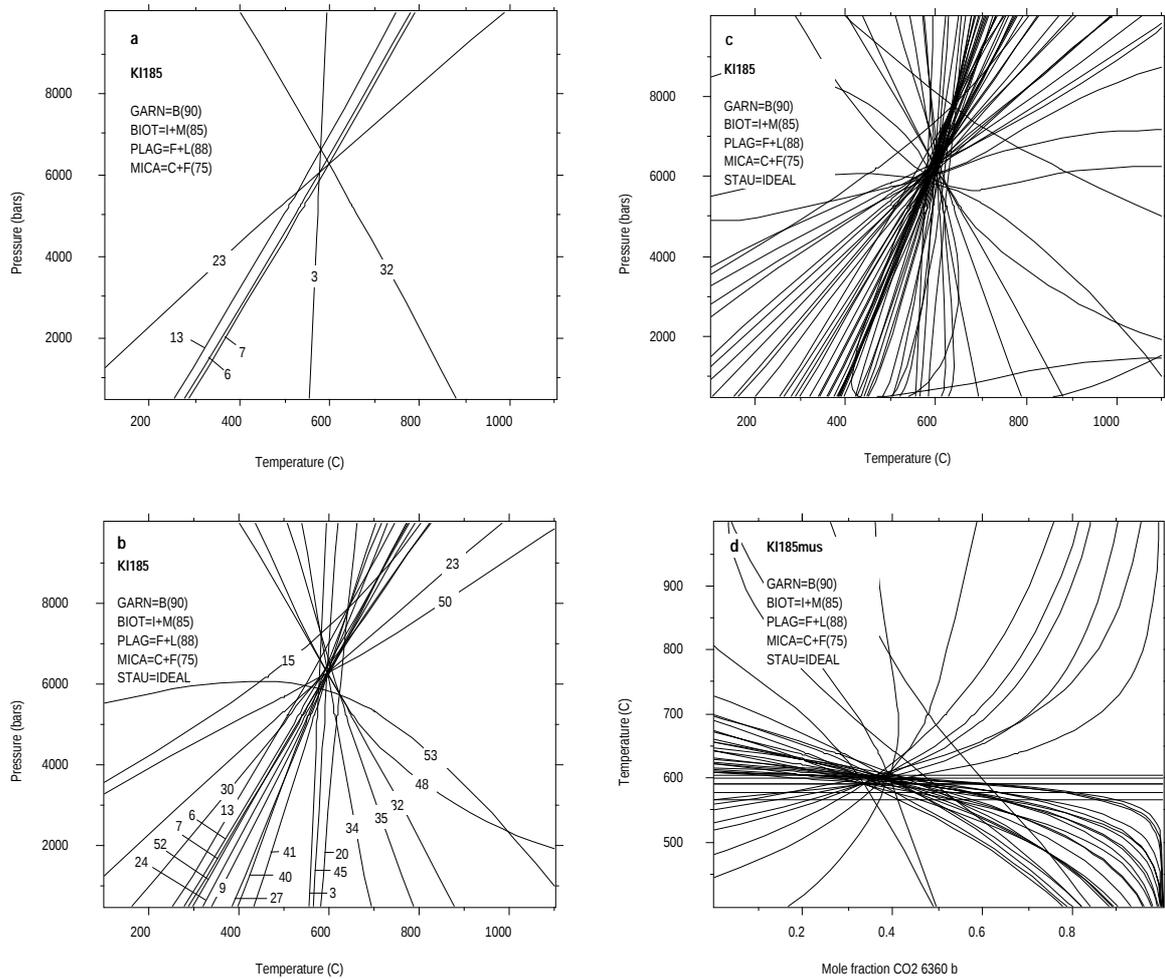


Fig. 8.4: K1185: (a) trockenes System ohne Paragonit, (b) trockenes System mit Paragonit und Staurolith, (c) alle Phasen, (d) T- $X_{H_2O}$ -Diagramm bei 6360 bar

a) Probe:	<b>K1185, granatführender Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	Grt-Bt-Hgl-Pl-Sil-Qtz-St-Chl-Cld-Ep-Rt-Opk		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Sil-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	580 ± 19 °C	6227 ± 311 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	580 ± 19 °C	6227 ± 311 bar
	winkelgewichtet	585°C	6278 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	582°C	6135 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	585°C	6180 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pg-Pl-Sil-Qtz-St		
Resultat:	alle Schnittpunkte	602 ± 35 °C	6485 ± 754 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	599 ± 28 °C	6434 ± 594 bar
	winkelgewichtet	595°C	6351 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	614°C	6641 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	599°C	6351 bar
c) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pg-Pl-Sil-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	600 ± 36 °C	6392 ± 843 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	600 ± 30 °C	6402 ± 590 bar
	winkelgewichtet	600°C	6383 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	600°C	6353 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	601°C	6362 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Koch (1982)	595 ± 26 °C	7300 bar
Gleichgewichte in Figur 8.4 (5 linear unabhängig)			
		ΔS <sub>T</sub>	ΔV <sub>T</sub>
1	Grs + 2 Pg + 3 aQtz = 2 W + 3 An + 2 Ab	114.5	4.61
2	3 aQtz + 2 Pg + Ann = 2 Ab + Alm + Ms + 2 W	-17.8	-2.88
3	Phl + Alm = Ann + Py	12.0	0.24
4	aQtz + Pg = Ab + Sil + W	1.2	-0.42
5	21 aQtz + 46 Pg + 8 Alm = 46 Ab + 6 St + 34 W	10.0	-15.80
6	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
7	2 Sil + aQtz + Grs = 3 An	112.1	5.45
8	Ab + Grs + 3 Sil + W = Pg + 3 An	110.9	5.87
9	12 Ab + 17 Grs + 30 aQtz + 6 St = 12 Pg + 51 An + 8 Alm	1935.7	94.24
10	32 Ab + 7 Grs + 6 St + 20 W = 32 Pg + 21 An + 8 Alm	791.2	48.10
11	23 Grs + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 69 An + 8 Alm	2622.4	121.92
12	2 Pg + Phl + 3 aQtz = 2 W + Py + Ms + 2 Ab	-5.8	-2.65
13	Ms + Alm = Ann + aQtz + 2 Sil	20.2	2.04
14	Alm + Ms + Pg = W + 3 Sil + Ann + Ab	21.3	1.63
15	12 Pg + 17 Ms + 25 Alm = 12 Ab + 17 Ann + 30 aQtz + 6 St	312.4	33.21
16	32 Pg + 7 Ms + 15 Alm = 32 Ab + 7 Ann + 6 St + 20 W	134.5	4.38
17	12 W + 23 Ms + 31 Alm = 23 Ann + 48 aQtz + 6 St	419.2	50.51
18	8 Ann + 62 Pg + 45 aQtz = 50 W + 6 St + 8 Ms + 62 Ab	-132.3	-38.86
19	21 aQtz + 8 Py + 46 Pg + 8 Ann = 46 Ab + 8 Phl + 6 St + 34 W	-86.0	-17.69
20	12 Ab + 13 aQtz + 6 St = 34 Sil + 12 Pg + 8 Alm	30.2	1.55
21	8 Alm + 25 Pg + 21 Sil = 13 W + 6 St + 25 Ab	-14.8	-7.00
22	25 aQtz + 6 St = 12 W + 46 Sil + 8 Alm	44.4	-3.48
23	Py + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
24	12 Ab + 25 Grs + 8 Ms + 30 aQtz + 6 St = 12 Pg + 75 An + 8 Ann	2993.7	154.21
25	32 Ab + 15 Grs + 8 Ms + 6 St + 20 W = 32 Pg + 45 An + 8 Ann	1849.1	108.07
26	31 Grs + 8 Ms + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 93 An + 8 Ann	3680.4	181.90
27	12 Ab + 17 Grs + 8 Phl + 30 aQtz + 6 St = 8 Py + 12 Pg + 51 An + 8 Ann	2031.8	96.12
28	32 Ab + 7 Grs + 8 Phl + 6 St + 20 W = 8 Py + 32 Pg + 21 An + 8 Ann	887.2	49.98
29	23 Grs + 8 Phl + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 8 Py + 69 An + 8 Ann	2718.5	123.81
30	60 Sil + 12 Pg + 13 Grs + 8 Alm = 12 Ab + 39 An + 6 St	1426.9	69.32
31	12 W + 96 Sil + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	2757.8	139.78
32	Py + Ms = Phl + aQtz + 2 Sil	8.2	1.81
33	Py + Pg + Ms = Ab + Phl + 3 Sil + W	9.3	1.39
34	25 Py + 12 Pg + 17 Ms + 8 Ann = 12 Ab + 25 Phl + 30 aQtz + 6 St	12.3	27.31
35	17 Py + 12 Pg + 17 Ms + 8 Alm = 12 Ab + 17 Phl + 30 aQtz + 6 St	108.3	29.20
36	15 Py + 32 Pg + 7 Ms + 8 Ann = 32 Ab + 15 Phl + 6 St + 20 W	-45.5	0.84
37	7 Py + 32 Pg + 7 Ms + 8 Alm = 32 Ab + 7 Phl + 6 St + 20 W	50.5	2.73
38	12 W + 31 Py + 23 Ms + 8 Ann = 31 Phl + 48 aQtz + 6 St	47.0	43.19
39	12 W + 23 Py + 23 Ms + 8 Alm = 23 Phl + 48 aQtz + 6 St	143.1	45.08
40	12 Ab + 5 Alm + 13 Ms + 6 St = 60 Sil + 12 Pg + 13 Ann	-292.2	-28.14
41	6 St + 5 aQtz + 8 Ms + 12 Ab = 8 Ann + 12 Pg + 50 Sil	191.5	17.91
42	17 Alm + 25 Ms + 6 St = 12 W + 96 Sil + 25 Ann	548.3	47.65
43	5 W + 6 St + 8 Ms + 17 Ab = 8 Ann + 17 Pg + 45 Sil	185.5	20.01
44	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Sil + 12 W	205.7	12.88
45	12 Ab + 8 Phl + 13 aQtz + 6 St = 34 Sil + 8 Py + 12 Pg + 8 Ann	126.3	3.44
46	8 Ann + 25 Pg + 8 Py + 21 Sil = 13 W + 6 St + 8 Phl + 25 Ab	-110.9	-8.89
47	8 Phl + 25 aQtz + 6 St = 12 W + 46 Sil + 8 Py + 8 Ann	140.5	-1.59
48	60 Sil + 12 Pg + 5 Grs + 8 Ann = 12 Ab + 15 An + 8 Ms + 6 St	369.0	9.35
49	12 W + 96 Sil + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	1699.8	79.80
50	60 Sil + 8 Py + 12 Pg + 13 Grs + 8 Ann = 12 Ab + 39 An + 8 Phl + 6 St	1330.9	67.44
51	12 W + 96 Sil + 8 Py + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	2661.8	137.89
52	12 Ab + 13 Ms + 5 Py + 6 St = 60 Sil + 5 Phl + 12 Pg + 8 Ann	232.2	26.96
53	12 Ab + 13 Ms + 13 Py + 6 St = 60 Sil + 13 Phl + 12 Pg + 8 Alm	136.2	25.07
54	25 Ms + 17 Py + 6 St = 12 W + 96 Sil + 17 Phl + 8 Ann	344.2	43.64
55	25 Ms + 25 Py + 6 St = 12 W + 96 Sil + 25 Phl + 8 Alm	248.2	41.75
ΔS <sub>T</sub> in J · K <sup>-1</sup> ; ΔV <sub>T</sub> in J · bar <sup>-1</sup>			

Tab. 8.4: K1185: (a) trockenes System ohne Paragonit, (b) trockenes System mit Paragonit und Staurolith, (c) alle Phasen

## 8.6 RT140, RT150, DS4, K1264, EK50

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**RT140:** pelitischer Bündnerschiefer

**RT150:** kalkiger Bündnerschiefer

**DS4:** Granat-Sillimanit-Biotit-Muscovit-Gneiss

**K1264:** Granat-Glimmerschiefer

**EK50:** Granat-Disthen-Glimmerschiefer

In Ermangelung einer Plagioklasanalyse lassen sich für Probe RT140 zwar 3 linear unabhängige Reaktionen formulieren, davon ist jedoch eine von  $X_{H_2O}$  abhängig. Die wasserfreien (Nr. 1, 2 und 4 in Tabelle 8.5) sind linear abhängig und schneiden sich bei 637 °C und 5585 bar. Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.93 gehen auch wasserführende Kurven durch diesen Punkt. Da die wasserfreien Reaktionen die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte aufweisen, ist ihre Lage unsicher. Chlorit konnte aus der Paragenese ausgeschlossen werden, weil Reaktionen mit Chlorit weit streuen; Chlorit wird als retrogrades Produkt interpretiert.

Für Probe RT150 ergibt das Granat-Biotit-Thermometer bei angenommenen 6000 bar eine zu tiefe Temperatur von ca 450 °C.

In der Probe DS4 waren leider sämtliche Plagioklasanalysen unbrauchbar, so dass auch hier nur Granat-Biotit-Thermometrie betrieben werden konnte. Das Thermometer ergibt jedoch bei 5500 bar (Druck aus P-T-Berechnung einer benachbarten Probe entnommen) eine den benachbarten Proben entsprechende Temperatur von 723 °C, wenn man die Durchschnitte aller Analysen benutzt.

In Probe K1264 lässt sich nur das Granat-Chloritoid-Thermometer anwenden, das eine für die nördliche Adula-Decke sehr hohe Temperatur von über 600 °C ergibt. Reaktionen mit Staurolith streuen sehr weit.

In Probe EK50 beobachtete KOCH (1982) Berührungsparagenesen von Disthen und Sillimanit?! Weil nur beschränkt Analysen zur Verfügung standen, sind hier nur das Anorthit-Grossular-Barometer und Granat-Biotit-Thermometer anwendbar. Mit den Durchschnittschemismen der Matrixmineralien ergeben sich ausserordentlich hohe Drucke und Temperaturen von über 800 °C und 10.5 kbar. Dieser P-T-Punkt liegt im Bereich der beiden Phasenübergänge Disthen = Sillimanit und  $\alpha$ -Quarz =  $\beta$ -Quarz.

KOCH (1982) verzichtete bei dieser Probe auf eine Druckabschätzung, weil er kaum Berührungsparagenesen von Granat mit Plagioklas fand. Er wendete nur das Granat-Biotit-Thermometer an, das eine Temperatur von  $597 \pm 22$  °C ergab, also bedeutend tiefer als die mit PTAX berechnete Temperatur. Aufgrund dieser grossen Abweichungen wird diese Probe nicht verwendet für die Isothermenkarte.

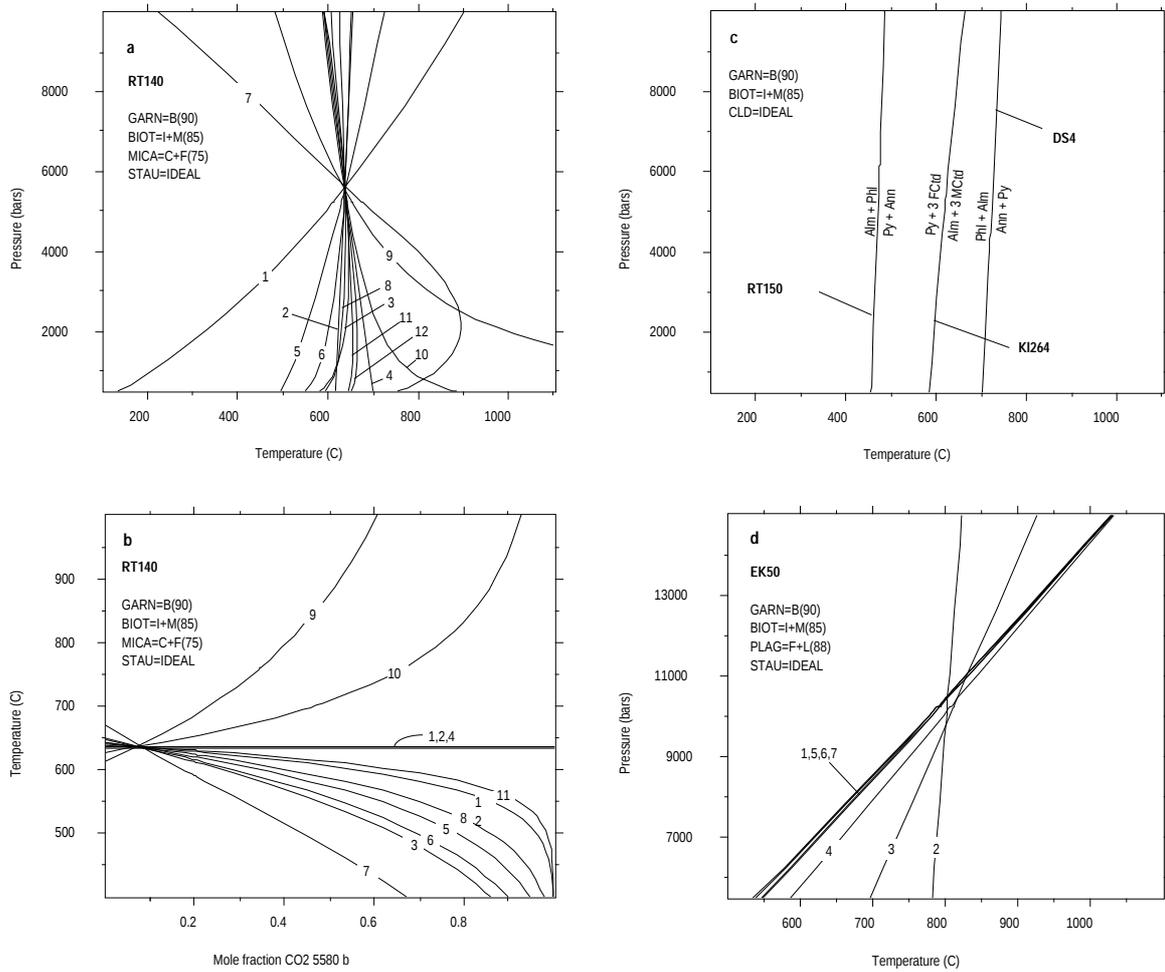


Fig. 8.5: RT140: (a) alle möglichen Reaktionen, (b)  $T-X_{CO_2}$  Diagramm bei 5580 bar; (c) RT150, DS4, K1264: Granat-Biotit- und Granat-Chloritoid-Thermometer; (d) EK50: alle möglichen Reaktionen

a) Probe:	<b>RT140, pelitischer Bündnerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Ilm-Chl</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	637 ± 1 °C	5579 ± 57 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	637 ± 1 °C	5584 ± 49 bar
	winkelgewichtet	637°C	5589 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	637°C	5574 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	637°C	5585 bar
bisherige T-Abschätzung:	Teutsch (1982)	622°C	
c) Probe:	<b>Kl264, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Hgl-Ky-Qtz-Chl-Cld-St-Ep-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Cld		
Resultat:	Schnittpunkt	626°C	6000 bar (angenommen)
Probe:	<b>DS4, Granat-Sillimanit-Biotit-Muscovit-Gneiss</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Sil-Qtz-Ap-Tur-Zrn</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt		
Resultat:		723°C	5500 bar (angenommen)
Probe:	<b>RT150, kalkiger Bündnerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Chl-Qtz-Czo-Cal</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt		
Resultat:		477°C	7000 bar (angenommen)
bisherige T-Abschätzung:	Teutsch (1982)	513°C	
d) Probe:	<b>EK50, Granat-Disthen-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-Ky-St-Sil-Ep-Chl-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Qtz-Ky-Sil		
Resultat:	alle Schnittpunkte	827 ± 39 °C	10850 ± 853 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	816 ± 13 °C	10659 ± 327 bar
	winkelgewichtet	812°C	10549 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	866°C	11699 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	808°C	10556 bar
bisherige T-Abschätzung:	Koch (1982)	597 ± 22 °C	
Gleichgewichte in Figur 8.5 a,b (3 linear unabhängig)		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
2	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
3	12 W + 46 Ky + 8 Alm = 25 aQtz + 6 St	576.6	29.74
4	Ms + Prp = aQtz + Phl + 2 Ky	-18.8	0.67
5	17 Alm + 25 Ms + 6 St = 12 W + 96 Ky + 25 Ann	-747.7	-7.17
6	8 Ms + 17 aQtz + 6 St = 12 W + 62 Ky + 8 Ann	-631.3	-22.52
7	12 W + 23 Ms + 31 Alm = 23 Ann + 48 aQtz + 6 St	-419.2	-50.51
8	12 W + 8 Prp + 46 Ky + 8 Ann = 8 Phl + 25 aQtz + 6 St	-480.5	-27.85
9	25 Ms + 17 Prp + 6 St = 12 W + 17 Phl + 96 Ky + 8 Ann	-951.8	-11.18
10	25 Ms + 25 Prp + 6 St = 12 W + 25 Phl + 96 Ky + 8 Alm	-1047.8	-13.07
11	12 W + 31 Prp + 23 Ms + 8 Ann = 31 Phl + 48 aQtz + 6 St	47.0	43.19
12	12 W + 23 Prp + 23 Ms + 8 Alm = 23 Phl + 48 aQtz + 6 St	143.1	45.08
Gleichgewichte in Figur 8.5 c		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Alm + 3 Mg-Cld = Prp + 3 Fe-Cld	21.8	0.08
2	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
Gleichgewichte in Figur 8.5 d		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	aQtz + 2 Ky + Grs = 3 An	-139.1	-6.59
2	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
3	aQtz = bQz	2.7	0.10
4	Ky = Si	13.5	0.57
5	bQz + 2 Ky + Grs = 3 An	136.3	6.49
6	2 Si + aQtz + Grs = 3 An	112.1	5.45
7	2 Si + bQz + Grs = 3 An	109.3	5.35
ΔS <sub>r</sub> in J · K <sup>-1</sup> ; ΔV <sub>r</sub> in J · bar <sup>-1</sup>			

Tab. 8.5: (a) RT140: alle möglichen Reaktionen; (c) RT150, DS4, Kl264: Granat-Biotit- und Granat-Chloritoid-Thermometer; (d) EK50: alle möglichen Reaktionen

### 8.7 K1285: Granat-Glimmerschiefer

In diesem Handstück fehlt Plagioklas. Mit den verfügbaren Analysen resultieren bloss 5 linear abhängige Gleichgewichte, die sich bei 639 °C und 6464 bar schneiden. Die Temperatur entspricht der des Granat-Biotit-Thermometers.

Disthen kommt als ein einige  $\mu\text{m}$ -grosser Einschluss im Granat vor und gehört offenbar nicht zur Paragenese; Reaktionen mit Disthen streuen auch sehr weit.

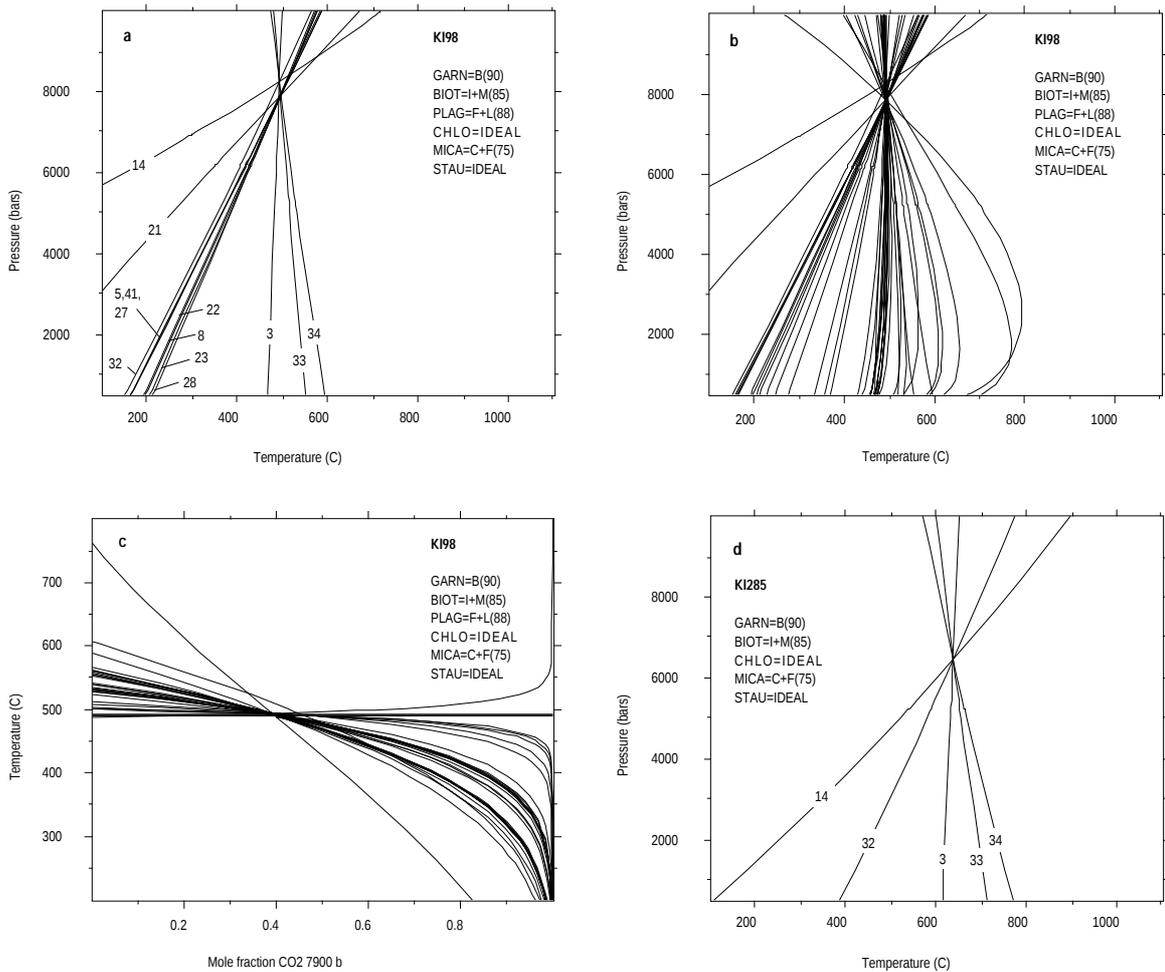


Fig. 8.6: K198: (a) Reaktionen ohne Wasser, (b) alle Reaktionen, (c) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 7900 bar; (d) K1285, trockenes System

### 8.8 K198: Granat-Glimmerschiefer

In diesem Handstück liegt kein Alumosilikat vor. Die wasserfreien Gleichgewichte, berechnet mit den Durchschnittschemismen der Mineralien, beschreiben ein eng begrenztes P-T-Feld; 3 Gleichgewichte sind linear unabhängig. Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.60 verlaufen fast alle der wasserführenden Gleichgewichte durch den gleichen P-T-Bereich, 4 davon sind linear unabhängig

(vgl. Fig. 8.6 a, b und Tab. 8.6 a, b).

Reaktionen mit Paragonit streuen sehr weit (kleiner Anteil von Paragonit im Hellglimmer und auch kleiner Modalanteil von Paragonit im Gestein).

a) Probe:	<b>K198, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Gr<sub>t</sub>-Bt-Hgl-Pl-Qtz-St-Chl-Ep-Ap-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl		
Resultat:	alle Schnittpunkte	499 ± 14 °C	8069 ± 271 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	499 ± 15 °C	8060 ± 253 bar
	winkelgewichtet	499°C	8090 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	498°C	7982 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	500°C	8052 bar
b) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	493 ± 12 °C	8013 ± 384 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	493 ± 4 °C	7946 ± 171 bar
	winkelgewichtet	493°C	7965 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	492°C	7945 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	492°C	7871 bar
bisherige T-Abschätzung:	Koch (1982)	599 ± 35 °C	
d) Probe:	<b>K1285, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Gr<sub>t</sub>-Bt-Hgl-Qtz-St-Chl-Ky-Cld-Ap-Rt-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Qtz-St-Chl		
Resultat:	Schnittpunkt	639 °C	6464 bar
Gleichgewichte in Figur 8.6 (4 linear unabhängig)			
		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	5 Alm + Grs + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + 3 Chl + 3 An + 5 Ann	-503.5	-32.53
2	12 W + 5 Phl + 4 Alm = 4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz	371.2	25.04
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	288 W + 115 Phl + 123 Alm = 115 Ann + 69 Chl + 117 aQtz + 6 St	8957.8	626.38
5	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
6	3 aQtz + 5 Ms + 4 Grs + 3 Chl = 12 An + 5 Phl + 12 W	157.7	4.95
7	12 W + 5 Prp + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz	-443.5	-31.36
8	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 24 Grs = 3 Alm + 5 Ann + 72 An + 3 Chl	3125.9	154.46
9	180 W + 6 St + 80 Phl + 39 Grs + 72 Alm = 80 Ann + 117 An + 48 Chl	10678.2	642.48
10	23 Grs + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 69 An + 8 Alm	2622.4	121.92
11	36 W + 30 St + 216 aQtz + 40 Phl + 123 Grs = 40 Ann + 369 An + 24 Chl	-17140.1	-869.88
12	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Prp + Ann	311.2	23.86
13	12 W + 4 Prp + Phl = 3 Chl + Ms + 3 aQtz	323.2	24.09
14	27 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Ann	47.9	25.47
15	41 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 33 Alm	-5520.7	-350.10
16	12 W + 23 Ms + 31 Alm = 23 Ann + 48 aQtz + 6 St	419.2	50.51
17	32 Ann + 93 Chl + 123 Ms = 324 W + 24 St + 99 aQtz + 155 Phl	9831.7	574.14
18	32 Alm + 69 Chl + 115 Ms = 228 W + 24 St + 123 aQtz + 115 Phl	6861.8	373.83
19	288 W + 115 Prp + 8 Alm = 69 Chl + 117 aQtz + 6 St	7577.1	599.24
20	288 W + 123 Prp + 8 Ann = 69 Chl + 8 Phl + 117 aQtz + 6 St	7481.0	597.36
21	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
22	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 3 Ms + 27 Grs = 8 Ann + 81 An + 3 Chl	3522.7	176.95
23	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Grs = 8 Alm + 57 An + 3 Chl + 5 Ms	2464.7	116.97
24	8 Ann + 48 Chl + 33 Grs + 72 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 99 An	1156.6	102.70
25	8 Alm + 48 Chl + 41 Grs + 80 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 123 An	98.7	42.72
26	31 Grs + 8 Ms + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 93 An + 8 Ann	3680.4	181.90
27	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Grs = 8 Alm + 72 An + 3 Chl	3065.9	153.28
28	24 Grs + 8 Phl + 45 aQtz + 6 St = 3 Prp + 3 Chl + 72 An + 8 Ann	-3161.9	-155.16
29	180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Grs = 8 Alm + 117 An + 48 Chl	-9717.7	-623.60
30	180 W + 6 St + 72 Prp + 8 Phl + 39 Grs = 8 Ann + 117 An + 48 Chl	-9813.8	-625.49
31	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	-2718.5	-123.81
32	32 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Ann	108.0	26.65
33	8 Ann + 3 Chl + 24 Ms + 27 Prp = 6 St + 45 aQtz + 32 Phl	276.2	-19.10
34	8 Alm + 3 Chl + 24 Ms + 19 Prp = 6 St + 45 aQtz + 24 Phl	-180.2	20.99
35	47 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Ann	-4560.2	-331.22
36	8 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 33 Prp + 47 Phl	5124.5	342.31
37	8 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 41 Prp + 39 Phl	5028.4	340.42
38	8 Ann + 155 Prp + 384 W = 6 St + 141 aQtz + 8 Ms + 93 Chl	-10066.8	-790.11
39	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
40	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	-143.1	-45.08
41	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 8 Ms + 32 Grs = 8 Ann + 96 An + 3 Chl	4123.8	213.25
42	180 W + 6 St + 80 Prp + 8 Ms + 47 Grs = 8 Ann + 141 An + 48 Chl	-10775.7	-683.58
Δ <i>S<sub>r</sub></i> in $J \cdot K^{-1}$ ; Δ <i>V<sub>r</sub></i> in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 8.6: K198: (a) trockenes System, (b) alle Reaktionen; (d) K1285: trockenes System



## Kapitel 9

# Lukmaniergebiet

### 9.1 25: Metapelit

In dieser Probe zeigt der Granat zwar eine Zonierung, diese ist allerdings völlig unsystematisch. (Nur in einem Granatkorn zeigt die Pyropkomponente eine starke Zunahme gegen den Rand; alle anderen Komponenten schwanken völlig unsystematisch innerhalb eines Kornes.) Der An-Gehalt im Plagioklas schwankt von 15.5% im Kern bis 20.5% am Rand. Alle anderen Mineralien sind nicht zoniert. Deshalb wird mit dem Durchschnitt der Granatanalysen gerechnet, und die Plagioklaskern- und Plagioklasrandanalysen werden getrennt behandelt. Im wasserfreien System resultieren je 3 linear unabhängige Reaktionen. Reaktion 2 liegt abseits, weist aber auch die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte auf und fällt bei der Berechnung des gewichteten Mittels nicht ins Gewicht. Es ergibt sich eine Druckerniedrigung von 8630 bar (mit der Plagioklaskernanalyse) auf 7550 bar (mit der Randanalyse) bei gleichbleibenden Temperaturen von 557 °C.

Im wasserhaltigen System wird bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.68 die beste Konvergenz der Gleichgewichte erreicht (vgl. Fig. 9.1 und Tab. 9.1).

Reaktionen mit Chlorit streuen weit. Chlorit scheint ein retrogrades Produkt zu sein.

### 9.2 12: Metapelit

In dieser Probe zeigt sowohl Granat als auch Plagioklas einen deutlichen chemischen Zonarbau. Almandin- und Pyropkonzentrationen sind gegenläufig: die Kerne sind almandinreich und pyroparm, die Ränder pyropreich und almandinarm. Es lässt sich eine Zunahme der Grossularkomponente gegen den Rand beobachten. In den Plagioklasen nimmt die Anorthitkomponente vom Zentrum gegen den Rand hin zu.

Es wurden Gleichgewichtsberechnungen für die Bereiche Granatkern/Plagioklaskern und Granatrand/Plagioklasrand vorgenommen. Die Kerne ergeben tiefere Werte (464 °C/7621 bar) als die Ränder (527 °C/7793 bar).

Chlorit ist nicht im Gleichgewicht mit den anderen Mineralien (Gleichgewichte mit Chlorit streuen weit!) und ist wohl sekundär entstanden.

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.31 bzw. 0.54 konvergieren auch wasserhaltige Reaktionen für die Kerne bzw. Ränder (vgl. Fig. 9.2 c und f).

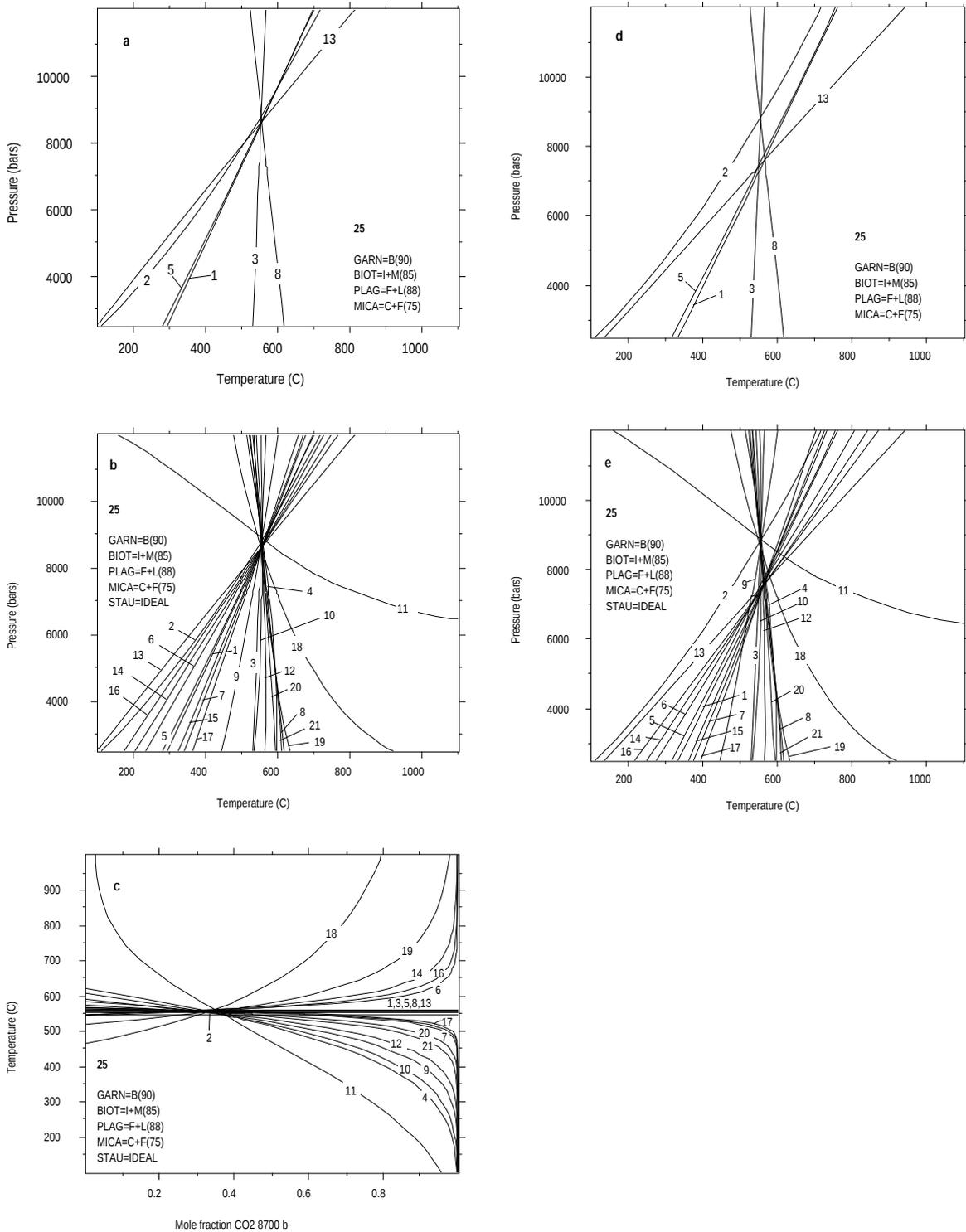


Fig. 9.1: 25: Granatdurchschnitt und Plagioklaskerne (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; (c) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 8700 bar; Granatdurchschnitt und Plagioklaskeränder (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

<b>25, Metapelit</b>			
Probe:	<i>Gr<sub>t</sub>-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Chl-Opk-Gr</i>		
Mineralogie:	<i>Gr<sub>t</sub>-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Chl-Opk-Gr</i>		
a) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	560 ± 23 °C	8810 ± 451 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	556 ± 1 °C	8661 ± 91 bar
	winkelgewichtet	556°C	8670 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	568°C	8916 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	556°C	8625 bar
b) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	558 ± 7 °C	8698 ± 225 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	557 ± 3 °C	8689 ± 110 bar
	winkelgewichtet	558°C	8714 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	558°C	8660 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	559°C	8698 bar
d) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	557 ± 7 °C	7876 ± 627 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	558 ± 8 °C	7780 ± 571 bar
	winkelgewichtet	558°C	7816 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	559°C	7544 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	560°C	7558 bar
e) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	563 ± 19 °C	7963 ± 696 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	563 ± 17 °C	7878 ± 610 bar
	winkelgewichtet	569°C	7994 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	564°C	7617 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	575°C	7829 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	561°C	7900 bar
Gleichgewichte in Figur 9.1 (3 linear unabhängig)		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	Gr <sub>s</sub> + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Gr <sub>s</sub> + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Gr <sub>s</sub> + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Gr <sub>s</sub> = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Gr <sub>s</sub> = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Gr <sub>s</sub> + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Gr <sub>s</sub> = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Gr <sub>s</sub> + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Gr <sub>s</sub> = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08

Δ*S<sub>r</sub>* in  $J \cdot K^{-1}$ ; Δ*V<sub>r</sub>* in  $J \cdot bar^{-1}$

Tab. 9.1: Resultate für 25: Granatdurchschnitt und Plagioklaskerne: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; Granatdurchschnitt und Plagioklasränder: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

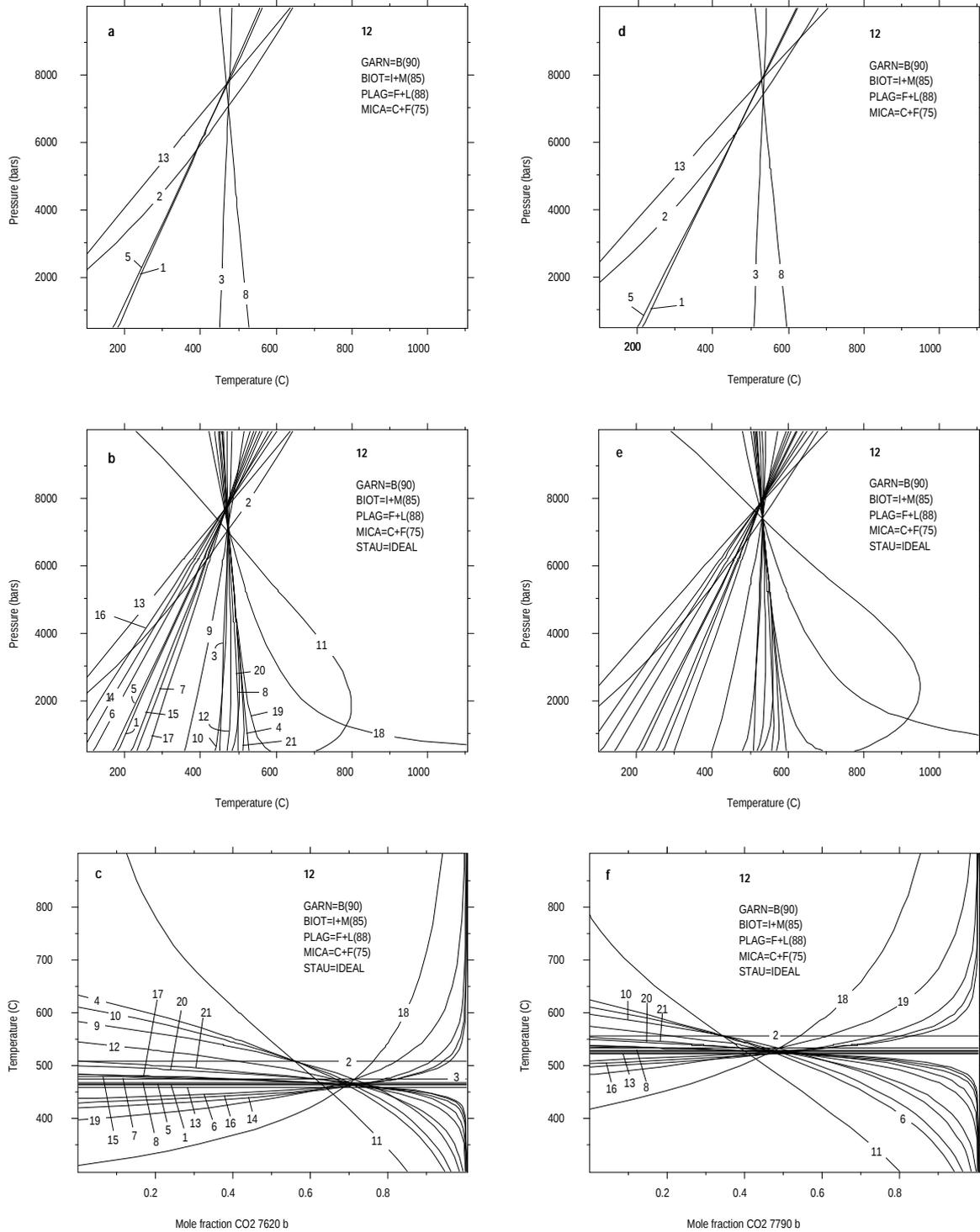


Fig. 9.2: 12: Granat- und Plagioklaskerne (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen, (c) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 7620 bar; Granat- und Plagioklasränder (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen, (f) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 7790 bar

Probe:	<b>12, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Chl-Opk-Gr</i>		
a) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz (Kerne)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	455 ± 34 °C	7201 ± 803 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	459 ± 31 °C	7329 ± 755 bar
	winkelgewichtet	466°C	7448 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	446°C	7135 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	468°C	7673 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O (Kerne)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	465 ± 27 °C	7457 ± 589 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	467 ± 13 °C	7527 ± 425 bar
	winkelgewichtet	466°C	7502 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	469°C	7720 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	464°C	7621 bar
d) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz (Ränder)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	525 ± 42 °C	7567 ± 768 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	532 ± 3 °C	7800 ± 213 bar
	winkelgewichtet	532°C	7777 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	512°C	7415 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	531°C	7879 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O (Ränder)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	527 ± 30 °C	7664 ± 540 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	530 ± 8 °C	7733 ± 278 bar
	winkelgewichtet	528°C	7711 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	530°C	7871 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	527°C	7793 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991) 457°C		
Gleichgewichte in Figur 9.2 (3 linear unabhängig)		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08

ΔS<sub>r</sub> in J · K<sup>-1</sup>; ΔV<sub>r</sub> in J · bar<sup>-1</sup>

Tab. 9.2: Resultate für 12: Granat- und Plagioklaskerne (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; Granat- und Plagioklasränder (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

### 9.3 TT513: Granat-Glimmerschiefer

In dieser Probe liegen schwach zonierte Granate vor. Die Kerne weisen etwas höhere Grossular- und Spessartingehalte, dafür aber leicht tiefere Pyrop- und Almandingehalte auf als die Ränder.

Wie in Probe 12 (vgl. Kapitel 9.2) ergeben sich für die Kerne der Granate tiefere P-T-Werte (590 °C/6430 bar) als für die Ränder (634 °C/6660 bar).

Das  $X_{H_2O}$  steigt dabei von 0.78 auf 0.94 an, wie aus Figur 9.3 c und f ersichtlich ist.

Chlorit ist in beiden Fällen nicht mit den anderen Mineralien im Gleichgewicht und ist wohl retrograd entstanden.

Probe: <b>TT513, Granat-Glimmerschiefer</b>			
Mineralogie:	<i>Gr<sub>t</sub>-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Hbl-Chl-Tur-Ap-Ep-Ilm</i>		
a) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz (Kerne)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	581 ± 40 °C	6131 ± 657 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	594 ± 2 °C	6409 ± 158 bar
	winkelgewichtet	594°C	6400 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	569°C	5994 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	594°C	6470 bar
b) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O (Kerne)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	592 ± 13 °C	6344 ± 285 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	593 ± 7 °C	6369 ± 205 bar
	winkelgewichtet	592°C	6361 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	593°C	6479 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	590°C	6431 bar
d) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz (Ränder)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	617 ± 30 °C	6622 ± 420 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	625 ± 4 °C	6662 ± 279 bar
	winkelgewichtet	626°C	6668 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	622°C	6514 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	626°C	6547 bar
e) benutzte Paragenese:	Gr <sub>t</sub> -Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O (Ränder)		
Resultat:	alle Schnittpunkte	628 ± 17 °C	6746 ± 416 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	627 ± 10 °C	6726 ± 323 bar
	winkelgewichtet	631°C	6776 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	628°C	6550 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	634°C	6659 bar
Gleichgewichte in Figur 9.3 (3 linear unabhängig)		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Gr <sub>s</sub> + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Gr <sub>s</sub> + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Gr <sub>s</sub> + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Gr <sub>s</sub> = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Gr <sub>s</sub> = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Gr <sub>s</sub> + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Gr <sub>s</sub> = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Gr <sub>s</sub> + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Gr <sub>s</sub> = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08

ΔS<sub>r</sub> in J · K<sup>-1</sup>; ΔV<sub>r</sub> in J · bar<sup>-1</sup>

Tab. 9.3: Resultate für TT513: Granatkerne (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; Granatränder (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

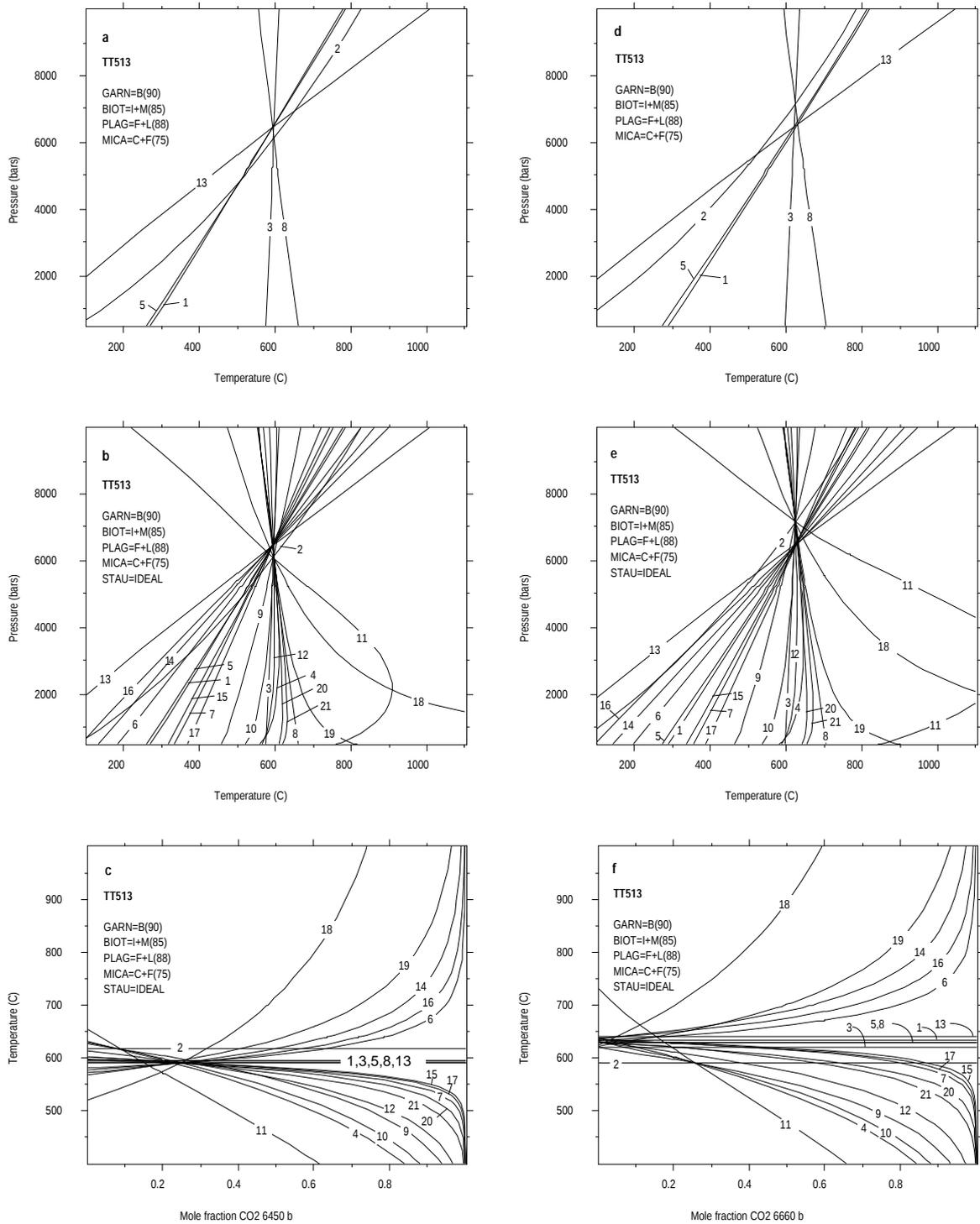


Fig. 9.3: TT513: Granatkerne (a) wässerkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen, (c) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 6450 bar; Granatränder (d) wässerkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen, (f) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 6660 bar

## 9.4 77: Metapelit

Da keine Angaben über Zonierungen der Mineralien verfügbar waren, wurden alle Analysen gemittelt. Es liegt eine gute Konvergenz aller Kurven vor, abgesehen von Reaktion 2, die jedoch die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte aufweist.

Obwohl der Hellglimmer einen grossen Paragonitanteil enthält, liegen Gleichgewichte, die Paragonit involvieren, weit abseits, deuten Ungleichgewicht an und wurden deshalb weglassen.

Auch Chlorit ist nicht im Gleichgewicht mit den anderen Phasen. Es handelt sich wahrscheinlich um sekundären Chlorit (vgl. auch Beschreibungen und Dünnschliffphoto S.28 in STAPS-OHNMACHT, 1991).

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.68 konvergieren auch wasserhaltige Reaktionen (vgl. Fig. 9.4 a-c und Tab. 9.4 a-c).

## 9.5 NW76: Granat-Glimmer-Gneis

Es sind 6 wasserfreie Reaktionen formulierbar, die sich, abgesehen von Reaktion 2, in einem relativ eng begrenzten Feld schneiden (vgl. Tab. 9.4 d und Fig. 9.4 d); 3 davon sind linear unabhängig. Reaktion 2 weist sehr kleine  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte auf, und somit kann ihre Lage sehr stark variieren bei nur sehr kleinen Änderungen der Aktivität oder Zusammensetzung einer der involvierten Phasen.

Bezieht man noch die wasserfreisetzenden Reaktionen in die Berechnung ein, so ändert sich bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.7 das gewichtete Mittel für P und T nur unwesentlich; die Abseitslage der wasserfreien Reaktion 2 bewirkt jedoch vor allem beim Druck eine sehr grosse Unsicherheit.

Chlorit gehört nicht zur Paragenese und ist wohl retrograd entstanden.

## 9.6 NW77: Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer

Ohne Staurolithanalyse resultieren nur wasserfreie Reaktionen; davon sind 3 linear unabhängig (vgl. Fig. 9.4 f und Tab. 9.4 f).

Die Drucke sind sehr hoch. Mögliche Gründe dafür sind die von WABER (1986) beschriebene Saussuritisierung und Albitisierung der Plagioklase, die eine Reduktion des Anorthitgehaltes bewirken. Dies führt zu einer Vergrößerung des Stabilitätsfeldes von Anorthit, was sich in einer Verschiebung der Reaktionen 1, 5 und 13 gegen höhere Drucke äussert.

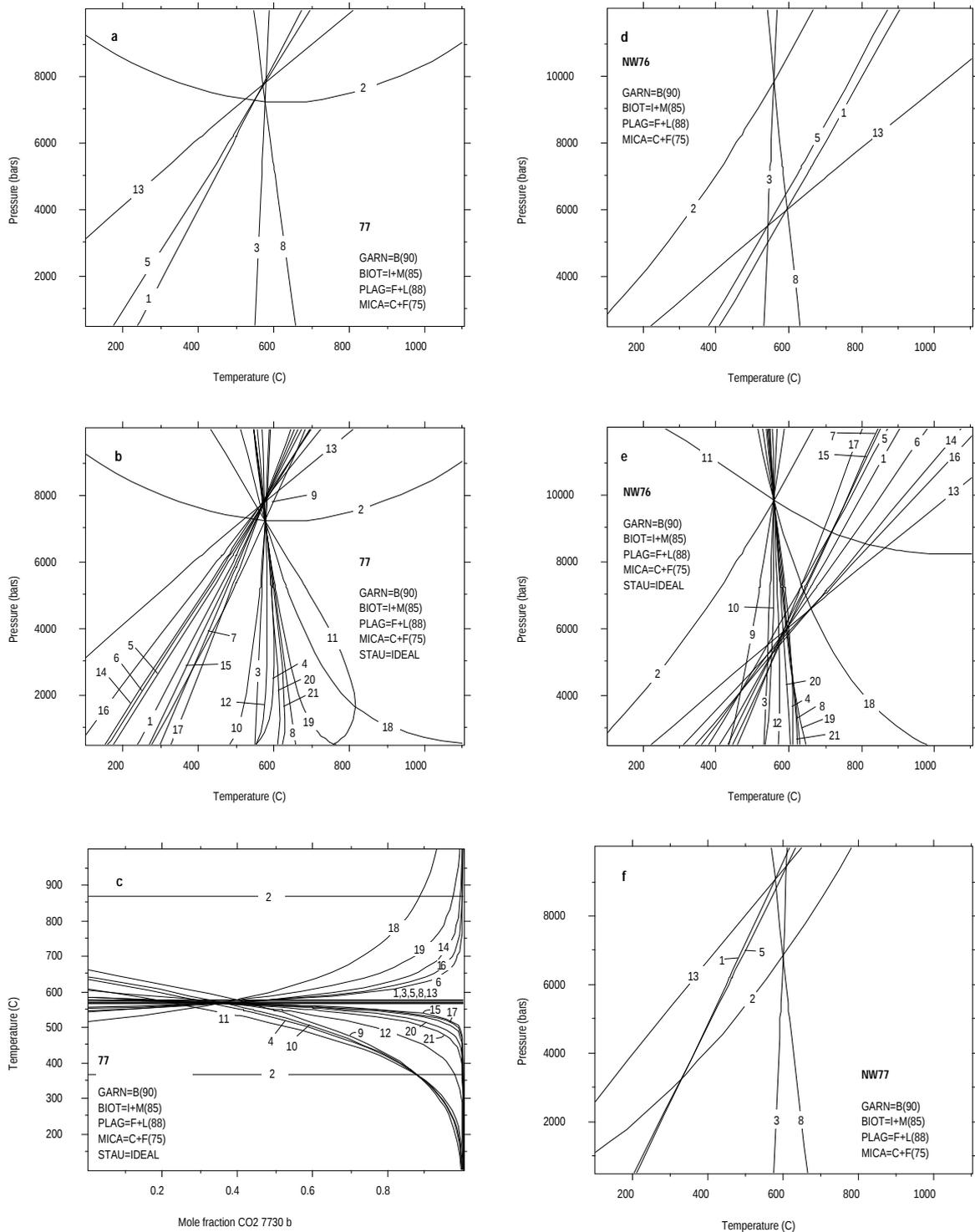


Fig. 9.4: 77: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; (c) T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> Diagramm bei 7730 bar; NW76: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen; NW77: (f) wasserfreie Reaktionen

a) Probe:	<b>77, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-St-Chl-Gr-Ilm</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	567 ± 16 °C	7548 ± 277 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	567 ± 16 °C	7592 ± 271 bar
	winkelgewichtet	567°C	7492 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	565°C	7608 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	569°C	7678 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	574 ± 23 °C	7607 ± 577 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	572 ± 11 °C	7605 ± 281 bar
	winkelgewichtet	570°C	7554 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	577°C	7851 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	570°C	7727 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	535-575°C	6700-7500 bar
d) Probe:	<b>NW76, Granat-Glimmer-Gneis</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-Chl-Zrn-Tur-Ap-Rt-Mag-Hem-And-Gr-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	565 ± 24 °C	6865 ± 1957 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	565 ± 25 °C	6566 ± 1778 bar
	winkelgewichtet	567°C	6531 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	569°C	5812 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	571°C	5835 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	581 ± 59 °C	7182 ± 2032 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	583 ± 60 °C	6832 ± 1877 bar
	winkelgewichtet	601°C	7068 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	587°C	6005 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	618°C	6509 bar
f) Probe:	<b>NW77, Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-Chl-Opk-Zrn-Tur-Toz-Rt-Gr-Hem-Ilm-And-Ap</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	540 ± 113 °C	7472 ± 2487 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	552 ± 103 °C	7873 ± 2349 bar
	winkelgewichtet	569°C	8089 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	510°C	7314 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	578°C	8862 bar
Gleichgewichte in Figur 9.4 (3 linear unabhängig)		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08

Δ*S<sub>r</sub>* in  $J \cdot K^{-1}$ ; Δ*V<sub>r</sub>* in  $J \cdot bar^{-1}$

Tab. 9.4: 77: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; NW76: (d) wasser-konservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen; NW77: (f) wasserfreie Reaktionen

## 9.7 TT379: Granat-Glimmerschiefer

Mit den Granatrandanalysen und den Durchschnittsanalysen der restlichen Mineralien ergeben sich im wasserfreien System 3 linear unabhängige Reaktionen, die sich in einem eng begrenzten P-T-Feld schneiden. Reaktion 2 ist der übliche Ausreisser mit den niedrigen  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werten.

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.7 konvergieren auch wasserführende Reaktionen mit Staurolith (vgl. Fig. 9.5 a-c).

Gleichgewichte mit Chlorit streuen weit; Chlorit gehört offenbar nicht zur Paragenese, ist wohl retrograd entstanden und wurde deshalb aus der Berechnung ausgeschlossen. Obwohl der Hellglimmer einen grossen Paragonitanteil aufweist, musste auch Paragonit aus der Berechnung ausgeschlossen werden, da auch Reaktionen mit Paragonit weit streuen.

Probe:		<b>TT379, Granat-Glimmerschiefer</b>	
a) Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-St-Chl-Ilm-Tur</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	573 ± 22 °C	8541 ± 372 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	574 ± 23 °C	8596 ± 370 bar
	winkelgewichtet	574°C	8487 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	572°C	8613 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	577°C	8727 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	581 ± 16 °C	8692 ± 446 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	579 ± 13 °C	8650 ± 320 bar
	winkelgewichtet	578°C	8579 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	582°C	8851 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	577°C	8735 bar
Gleichgewichte in Figur 9.5 a-c (3 linear unabhängig)		$\Delta S_r$	$\Delta V_r$
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08

$\Delta S_r$  in  $J \cdot K^{-1}$ ;  $\Delta V_r$  in  $J \cdot bar^{-1}$

Tab. 9.5: Resultate für TT379: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen

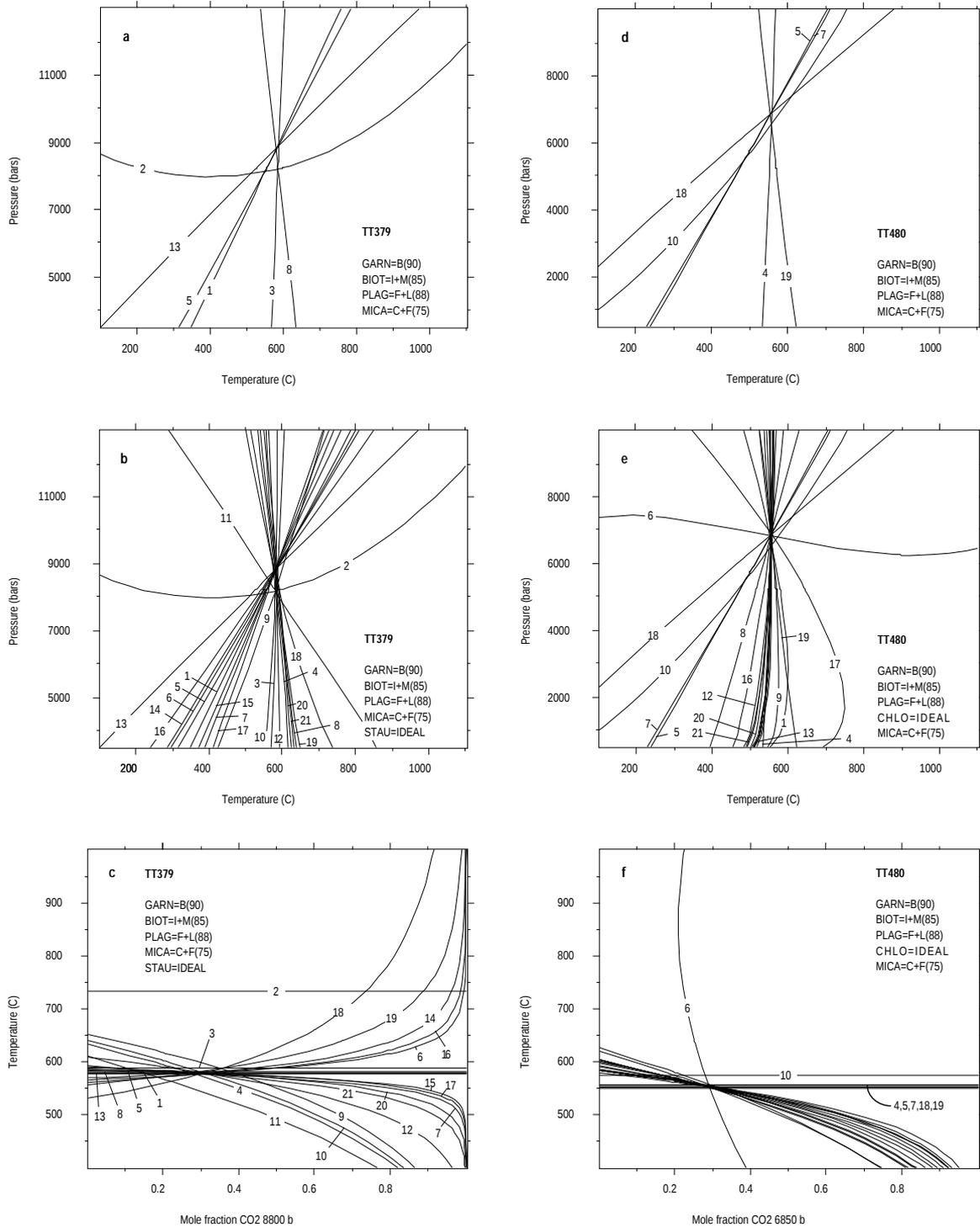


Fig. 9.5: TT379: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; (c) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 8800 bar; TT480: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen, (f) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 6850 bar

## 9.8 TT480: Granat-Glimmerschiefer

Mit den Kernmessungen der Granate und den Durchschnittsanalysen der restlichen Mineralien resultieren im wasserfreien System 3 linear unabhängige Reaktionen. Gleichgewichte mit Chlorit und Wasser konvergieren bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.71 (vgl. Fig. 9.5 d-f).

Probe:	<b>TT480, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-Chl-Czo-Ilm-Rt-Tur</i>		
d) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	546 ± 34 °C	6589 ± 596 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	556 ± 2 °C	6830 ± 149 bar
	winkelgewichtet	556°C	6820 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	535°C	6467 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	555°C	6888 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	554 ± 10 °C	6785 ± 251 bar
	ohne kleine $\Delta$ 's u. Schnittwinkel	554 ± 3 °C	6809 ± 162 bar
	winkelgewichtet	555°C	6824 bar
	$\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	554°C	6826 bar
	winkel- u. $\Delta S, \Delta V$ -gewichtet	554°C	6859 bar
Gleichgewichte in Figur 9.5 d-f (3 linear unabhängig)			$\Delta S_r$ $\Delta V_r$
1	5 Alm + Grs + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + 3 Chl + 3 An + 5 Ann	503.5	32.53
2	12 W + 5 Phl + 5 Alm = 5 Ann + 3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz	364.4	25.94
3	4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Phl + 4 Alm	-371.2	-25.04
4	Phl + Alm = Ann + Py	12.0	0.24
5	aQtz + 2 Ky + Grs = 3 An	139.1	6.59
6	12 W + 5 Phl + 6 Ky + 4 Grs + 5 Alm = 5 Ann + 12 An + 3 Chl	920.8	52.32
7	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
8	3 aQtz + 5 Ms + 4 Grs + 3 Chl = 12 An + 5 Phl + 12 W	157.7	4.95
9	12 W + 5 Py + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz	443.5	31.36
10	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
11	Ann + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Phl + 6 Ky + Alm	-391.8	-22.33
12	3 Chl + 5 Ms = 12 W + aQtz + 5 Phl + 8 Ky	-398.6	-21.43
13	3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz = 12 W + 5 Py	-304.4	-24.76
14	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Py + Ann	-311.2	-23.86
15	3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 4 Py + Phl	-323.2	-24.09
16	5 Ms + Grs + 3 Chl = 3 An + 6 Ky + 5 Phl + 12 W	-259.5	-14.83
17	12 W + 5 Py + 6 Ky + 4 Grs = 12 An + 3 Chl	860.7	51.14
18	Py + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
19	Ms + Py = aQtz + Phl + 2 Ky	-18.8	0.67
20	4 Alm + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Py + 6 Ky + 4 Ann	-331.7	-21.15
21	3 Chl + 4 Ms = 12 W + Py + 4 Phl + 6 Ky	-379.8	-22.09
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 9.6: Resultate für TT480: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

## 9.9 TT416: Granat-Glimmerschiefer

Mit den Durchschnittsanalysen der Mineralien resultieren im wasserfreien System 3 linear unabhängige Reaktionen. Reaktion 10 ist der übliche Ausreisser.

Gleichgewichte mit Chlorit und Wasser konvergieren bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.67 (vgl. Fig. 9.6 a-c).

## 9.10 TT479: Granat-Glimmerschiefer

Mit den Durchschnittsanalysen der Mineralien resultieren im wasserfreien System 3 linear unabhängige Reaktionen. Reaktion 10 ist der übliche Ausreisser.

Gleichgewichte mit Chlorit und Wasser konvergieren bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.71 (vgl. Fig. 9.6 d-f).

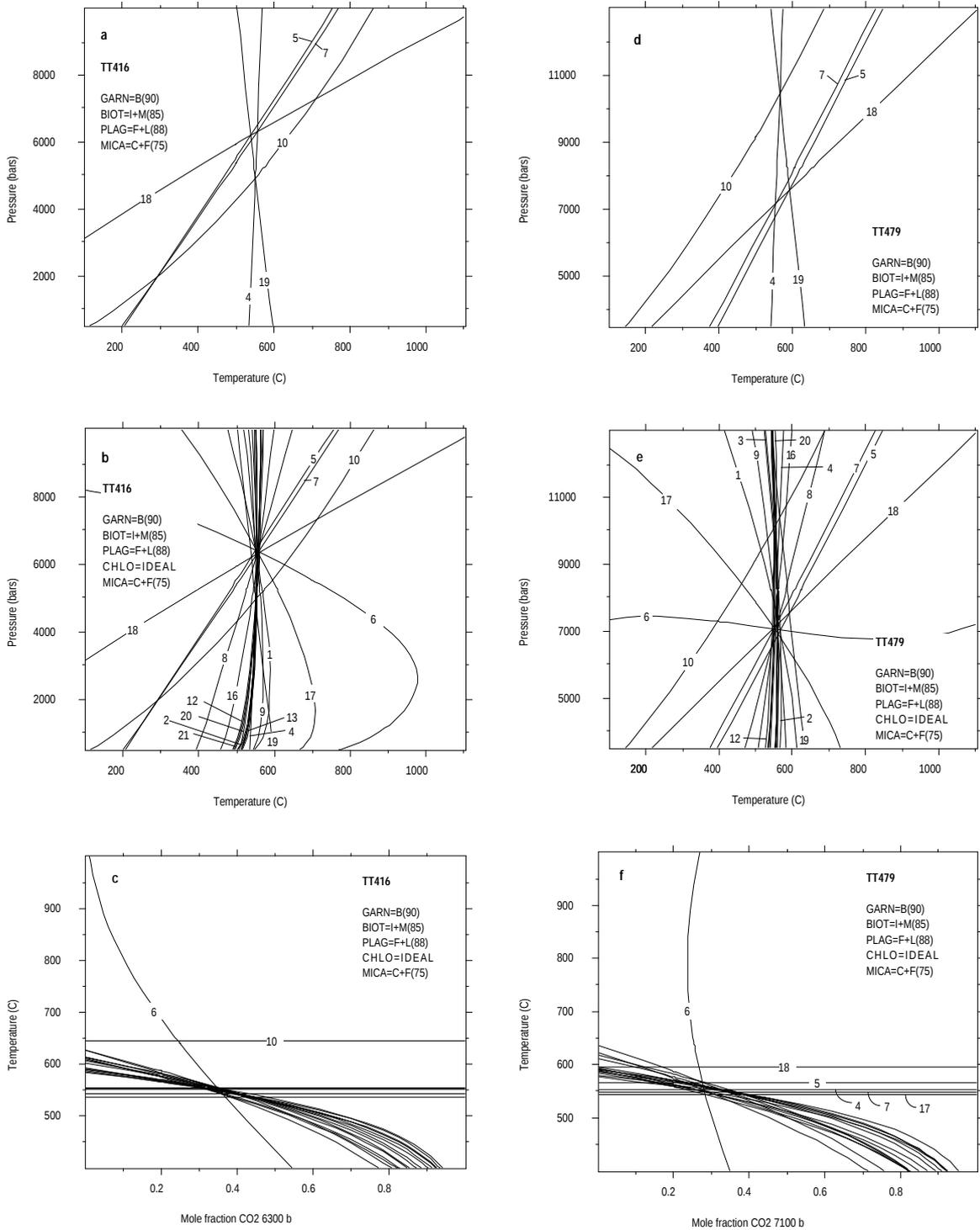


Fig. 9.6: TT416: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; (c) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 6300 bar; TT479: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen, (f) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 7100 bar

a) Probe:	<b>TT416, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-Chl-Hbl-Czo-Cal-Dol-Tur-Rt-Ilm</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	508 ± 118 °C	5226 ± 1776 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	562 ± 50 °C	6124 ± 673 bar
	winkelgewichtet	555°C	6053 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	471°C	4940 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	549°C	6263 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	550 ± 35 °C	5841 ± 851 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	555 ± 17 °C	6066 ± 593 bar
	winkelgewichtet	555°C	6156 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	553°C	6073 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	554°C	6348 bar
d) Probe:	<b>TT479, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-Chl-Czo-Tur-Rt-Ilm</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	570 ± 17 °C	8209 ± 1466 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	571 ± 18 °C	7987 ± 1335 bar
	winkelgewichtet	572°C	7988 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	573°C	7426 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	575°C	7450 bar
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	554 ± 17 °C	8079 ± 1615 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	555 ± 21 °C	7552 ± 1035 bar
	winkelgewichtet	553°C	7427 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	555°C	7723 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	555°C	7095 bar
Gleichgewichte in Figur 9.6 (3 linear unabhängig)			$\Delta S_r$ $\Delta V_r$
1	5 Alm + Grs + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + 3 Chl + 3 An + 5 Ann	503.5	32.53
2	12 W + 5 Phl + 5 Alm = 5 Ann + 3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz	364.4	25.94
3	4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Phl + 4 Alm	-371.2	-25.04
4	Phl + Alm = Ann + Py	12.0	0.24
5	aQtz + 2 Ky + Grs = 3 An	139.1	6.59
6	12 W + 5 Phl + 6 Ky + 4 Grs + 5 Alm = 5 Ann + 12 An + 3 Chl	920.8	52.32
7	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
8	3 aQtz + 5 Ms + 4 Grs + 3 Chl = 12 An + 5 Phl + 12 W	157.7	4.95
9	12 W + 5 Py + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz	443.5	31.36
10	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
11	Ann + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Phl + 6 Ky + Alm	-391.8	-22.33
12	3 Chl + 5 Ms = 12 W + aQtz + 5 Phl + 8 Ky	-398.6	-21.43
13	3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz = 12 W + 5 Py	-304.4	-24.76
14	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Py + Ann	-311.2	-23.86
15	3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 4 Py + Phl	-323.2	-24.09
16	5 Ms + Grs + 3 Chl = 3 An + 6 Ky + 5 Phl + 12 W	-259.5	-14.83
17	12 W + 5 Py + 6 Ky + 4 Grs = 12 An + 3 Chl	860.7	51.14
18	Py + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
19	Ms + Py = aQtz + Phl + 2 Ky	-18.8	0.67
20	4 Alm + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Py + 6 Ky + 4 Ann	-331.7	-21.15
21	3 Chl + 4 Ms = 12 W + Py + 4 Phl + 6 Ky	-379.8	-22.09
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 9.7: TT416: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; TT479: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

## 9.11 TT337: Granat-Glimmerschiefer

In dieser Probe fehlt Disthen. Chloritoid musste ausgeschlossen werden, weil Gleichgewichte mit Chloritoid weit abseits lagen. Trotzdem resultieren 3 linear unabhängige Reaktionen, die ein eng begrenztes P-T-Feld beschreiben.

Reaktionen mit Wasser, Staurolith und Chlorit konvergieren in das gleiche P-T-Feld bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.68 (vgl. Fig. 9.7 a-c und Tab. 9.10 a,b). 4 Reaktionen sind dann linear unabhängig.

## 9.12 38: Metapelit

Der Anorthitgehalt im Plagioklas ist relativ gering, in dieser Probe jedoch etwas höher als in 133 (STAPS-OHNMACHT [1991] weist eine kontinuierliche Zunahme des An-Gehaltes von Norden nach Süden nach). Die Plagioklase zeigen eine Zunahme des Anorthitgehaltes vom Kern gegen den Rand.

Mit der Plagioklas-Randanalyse (maximaler An-Gehalt) und den Durchschnittsanalysen der restlichen Mineralien resultieren im wasserfreien System 4 linear unabhängige Reaktionen, die sich in einem eng begrenzten P-T-Feld schneiden. Der Druck ist allerdings sehr hoch: 9350 bar bei 560 °C (STAPS-OHNMACHT [1991] erhält 10'100-13'800 bar, je nach angenommener Temperatur). Man beachte, dass Reaktion 10 zwei Äste aufweist.

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.68 verlaufen auch wasserführende Gleichgewichte durch das P-T-Feld, das von den wasserfreien beschrieben wird. 5 Gleichgewichte sind jetzt linear unabhängig (vgl. Fig. 9.7 d-f und Tab. 9.9 und 9.8).

d) Probe:	<b>38, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-St-Chl-Qtz-Ky-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-St-Chl-Qtz-Ky</i>		
Resultat:	alle Schnittpunkte	557 ± 38 °C	9123 ± 874 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	564 ± 17 °C	9287 ± 421 bar
	winkelgewichtet	565°C	9261 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	560°C	9371 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	560°C	9350 bar
e) benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-St-Chl-Qtz-Ky-H<sub>2</sub>O</i>		
Resultat:	alle Schnittpunkte	561 ± 19 °C	9311 ± 609 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	562 ± 9 °C	9314 ± 295 bar
	winkelgewichtet	563°C	9277 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	561°C	9361 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	561°C	9382 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	450-540°C	10'100-13'800 bar

Tab. 9.8: Resultate für 38: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen

Kapitel 9. Lukmaniergebiet

Gleichgewichte in Figur 9.7 d-f (4 linear unabhängig)		$\Delta S_r$	$\Delta V_r$
1	5 Alm + Grs + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + 3 Chl + 3 An + 5 Ann	503.5	32.53
2	12 W + 5 Phl + 5 Alm = 5 Ann + 3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz	364.4	25.94
3	12 W + 5 Phl + 4 Alm = 4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz	371.2	25.04
4	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
5	288 W + 115 Phl + 123 Alm = 115 Ann + 69 Chl + 117 aQtz + 6 St	8957.8	626.38
6	aQtz + 2 Ky + Grs = 3 An	139.1	6.59
7	12 W + 5 Phl + 6 Ky + 4 Grs + 5 Alm = 5 Ann + 12 An + 3 Chl	920.8	52.32
8	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
9	3 aQtz + 5 Ms + 4 Grs + 3 Chl = 12 An + 5 Phl + 12 W	157.7	4.95
10	12 W + 5 Prp + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz	443.5	31.36
11	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 24 Grs = 3 Alm + 5 Ann + 72 An + 3 Chl	3125.9	154.46
12	180 W + 6 St + 80 Phl + 39 Grs + 72 Alm = 80 Ann + 117 An + 48 Chl	10678.2	642.48
13	23 Grs + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 69 An + 8 Alm	2622.4	121.92
14	36 W + 30 St + 216 aQtz + 40 Phl + 123 Grs = 40 Ann + 369 An + 24 Chl	17140.1	869.88
15	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
16	Ann + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Phl + 6 Ky + Alm	-391.8	-22.33
17	3 Chl + 5 Ms = 12 W + aQtz + 5 Phl + 8 Ky	-398.6	-21.43
18	12 W + 5 Prp = 3 Chl + 2 Ky + 4 aQtz	304.4	24.76
19	3 Alm + 5 Ann + 3 Chl + 48 Ky = 6 St + 21 aQtz + 5 Phl	212.2	3.80
20	252 W + 24 St + 125 Phl + 93 Alm = 125 Ann + 75 Chl + 234 Ky	6803.6	529.56
21	12 W + 46 Ky + 8 Alm = 25 aQtz + 6 St	576.6	29.74
22	40 Ann + 24 Chl + 246 Ky = 36 W + 30 St + 93 aQtz + 40 Phl	-32.2	-58.82
23	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Prp + Ann	-311.2	-23.86
24	12 W + 4 Prp + Phl = 3 Chl + Ms + 3 aQtz	323.2	24.09
25	27 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Ann	47.9	25.47
26	41 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 33 Alm	-5520.7	-350.10
27	12 W + 23 Ms + 31 Alm = 23 Ann + 48 aQtz + 6 St	419.2	50.51
28	32 Ann + 93 Chl + 123 Ms = 324 W + 24 St + 99 aQtz + 155 Phl	-9831.7	-574.14
29	32 Alm + 69 Chl + 115 Ms = 228 W + 24 St + 123 aQtz + 115 Phl	-6861.8	-373.83
30	288 W + 115 Prp + 8 Alm = 69 Chl + 117 aQtz + 6 St	7577.1	599.24
31	288 W + 123 Prp + 8 Ann = 69 Chl + 8 Phl + 117 aQtz + 6 St	7481.0	597.36
32	5 Ms + Grs + 3 Chl = 3 An + 6 Ky + 5 Phl + 12 W	-259.5	-14.83
33	12 W + 5 Prp + 6 Ky + 4 Grs = 12 An + 3 Chl	860.7	51.14
34	3 Alm + 5 Ann + 3 Chl + 21 Grs + 90 Ky = 6 St + 5 Phl + 63 An	3133.1	142.27
35	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
36	40 Ann + 24 Chl + 93 Grs + 432 Ky = 36 W + 30 St + 40 Phl + 279 An	12903.0	554.42
37	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
38	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 3 Ms + 27 Grs = 8 Ann + 81 An + 3 Chl	3522.7	176.95
39	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Grs = 8 Alm + 57 An + 3 Chl + 5 Ms	2464.7	116.97
40	8 Ann + 48 Chl + 33 Grs + 72 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 99 An	-1156.6	-102.70
41	8 Alm + 48 Chl + 41 Grs + 80 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 123 An	-98.7	-42.72
42	31 Grs + 8 Ms + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 93 An + 8 Ann	3680.4	181.90
43	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Grs = 8 Alm + 72 An + 3 Chl	3065.9	153.28
44	24 Grs + 8 Phl + 45 aQtz + 6 St = 3 Prp + 3 Chl + 72 An + 8 Ann	3161.9	155.16
45	180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Grs = 8 Alm + 117 An + 48 Chl	9717.7	623.60
46	180 W + 6 St + 72 Prp + 8 Phl + 39 Grs = 8 Ann + 117 An + 48 Chl	9813.8	625.49
47	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
48	Ms + Prp = aQtz + Phl + 2 Ky	-18.8	0.67
49	4 Alm + 3 Chl + 4 Ms = 12 W + 5 Prp + 6 Ky + 4 Ann	-331.7	-21.15
50	3 Chl + 4 Ms = 12 W + Prp + 4 Phl + 6 Ky	-379.8	-22.09
51	6 St + 5 Phl + 21 Ms + 18 Alm = 26 Ann + 3 Chl + 90 Ky	-355.9	15.16
52	8 Ann + 3 Chl + 54 Ky = 6 St + 18 aQtz + 5 Phl + 3 Ms	232.7	1.09
53	8 Alm + 3 Chl + 38 Ky + 5 Ms = 6 St + 26 aQtz + 5 Phl	178.0	8.31
54	17 Alm + 25 Ms + 6 St = 12 W + 96 Ky + 25 Ann	-747.7	-7.17
55	51 Chl + 93 Ms + 6 St = 216 W + 85 Phl + 198 Ky + 8 Ann	-7407.8	-386.76
56	6 St + 125 Ms + 75 Chl = 8 Alm + 246 Ky + 125 Phl + 312 W	-10542.0	-565.39
57	8 Ms + 17 aQtz + 6 St = 12 W + 62 Ky + 8 Ann	-631.3	-22.52
58	8 Alm + 3 Chl + 48 Ky = 6 St + 21 aQtz + 5 Prp	272.2	4.98
59	8 Ann + 3 Chl + 48 Ky + 3 Prp = 6 St + 21 aQtz + 8 Phl	176.2	3.09
60	32 Alm + 75 Chl + 234 Ky = 252 W + 24 St + 125 Prp	-5302.8	-500.06
61	252 W + 24 St + 93 Prp + 32 Phl = 32 Ann + 75 Chl + 234 Ky	5687.0	507.61
62	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
63	32 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Ann	108.0	26.65
64	8 Ann + 3 Chl + 24 Ms + 27 Prp = 6 St + 45 aQtz + 32 Phl	-276.2	19.10
65	8 Alm + 3 Chl + 24 Ms + 19 Prp = 6 St + 45 aQtz + 24 Phl	-180.2	20.99
66	47 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Ann	-4560.2	-331.22
67	8 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 33 Prp + 47 Phl	-5124.5	-342.31
68	8 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 41 Prp + 39 Phl	-5028.4	-340.42
69	8 Ann + 155 Prp + 384 W = 6 St + 141 aQtz + 8 Ms + 93 Chl	10066.8	790.11
70	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
71	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
72	8 Ann + 3 Chl + 18 Grs + 90 Ky = 6 St + 5 Phl + 3 Ms + 54 An	2736.3	119.78
73	8 Alm + 3 Chl + 26 Grs + 90 Ky + 5 Ms = 6 St + 5 Phl + 78 An	3794.3	179.76
74	8 Ann + 17 Grs + 96 Ky + 12 W = 6 St + 8 Ms + 51 An	2995.8	134.62
75	8 Alm + 3 Chl + 21 Grs + 90 Ky = 6 St + 5 Prp + 63 An	3193.1	143.45
76	3 Prp + 90 Ky + 21 Grs + 3 Chl + 8 Ann = 63 An + 8 Phl + 6 St	3097.0	141.57
77	8 Ann + 25 Grs + 96 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 8 Phl + 75 An	3957.8	192.70
78	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 8 Ms + 32 Grs = 8 Ann + 96 An + 3 Chl	4123.8	213.25
79	180 W + 6 St + 80 Prp + 8 Ms + 47 Grs = 8 Ann + 141 An + 48 Chl	10775.7	683.58
80	6 St + 5 Prp + 21 Ms + 13 Alm = 21 Ann + 3 Chl + 90 Ky	-415.9	13.98
81	6 St + 18 Prp + 21 Ms = 8 Ann + 3 Chl + 90 Ky + 13 Phl	-572.0	10.91
82	6 St + 26 Prp + 21 Ms = 8 Alm + 3 Chl + 90 Ky + 21 Phl	-668.1	9.03
83	6 St + 13 aQtz + 5 Prp + 8 Ms = 8 Ann + 3 Chl + 64 Ky	-327.0	2.24
84	156 W + 24 St + 85 Prp + 32 Ms = 32 Ann + 51 Chl + 282 Ky	2648.9	330.87
85	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
86	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
87	8 Ann + 3 Chl + 13 Grs + 90 Ky = 6 St + 5 Prp + 8 Ms + 39 An	-2135.1	-83.48

$\Delta S_r$  in  $J \cdot K^{-1}$ ;  $\Delta V_r$  in  $J \cdot bar^{-1}$

Tab. 9.9: Reaktionen für 38

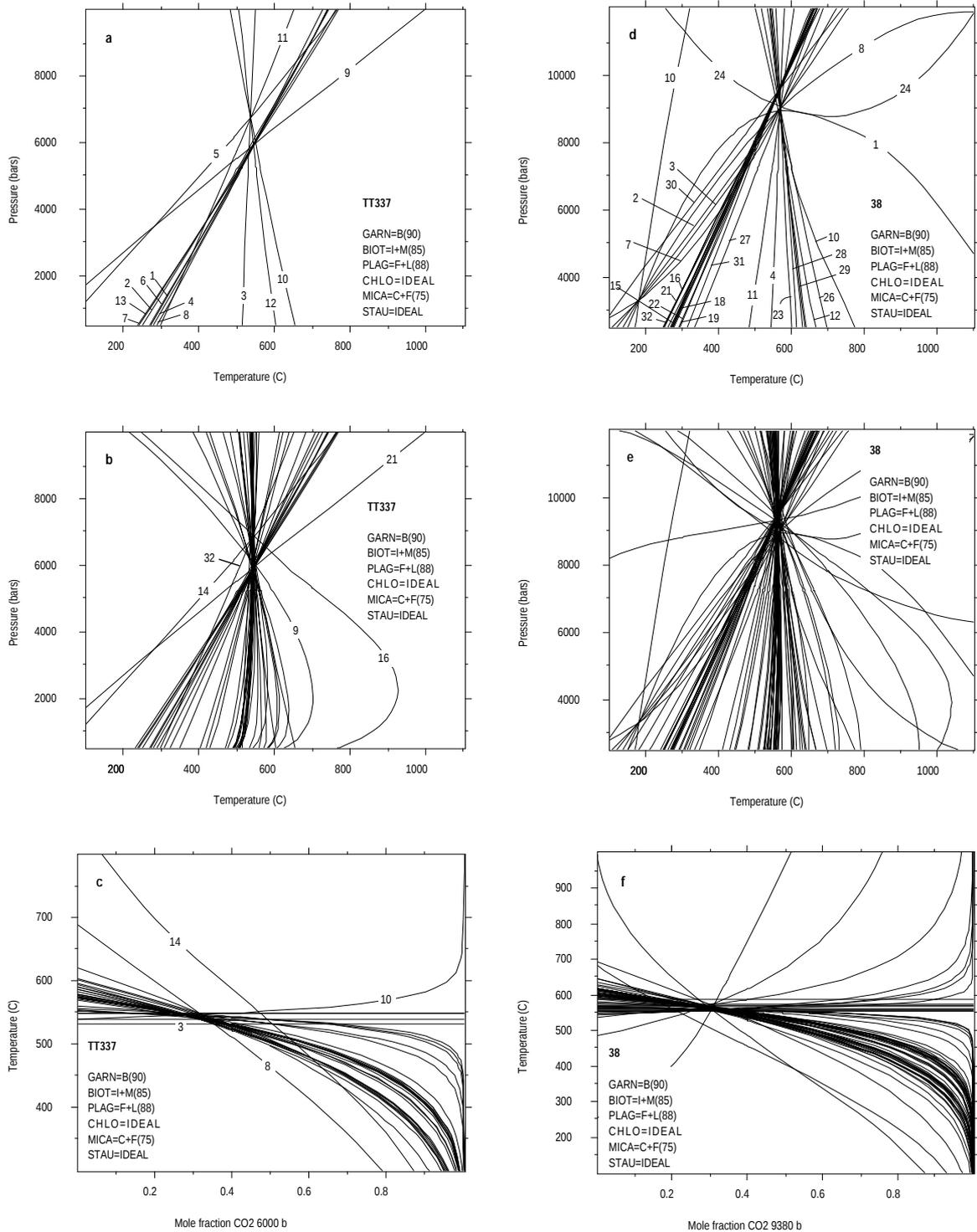


Fig. 9.7: TT337: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen; (c) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 6000 bar; 38: (d) wasserkonservierende Reaktionen, (e) alle Reaktionen, (f) T- $X_{CO_2}$  Diagramm bei 9380 bar

a) Probe:	<b>TT337, Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl-Cld-Tur-Ap-Ep-Ilm-Opk</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl		
Resultat:	alle Schnittpunkte	543 ± 84 °C	6107 ± 1610 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	543 ± 21 °C	6124 ± 529 bar
	winkelgewichtet	542°C	6085 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	553°C	6132 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	547°C	6006 bar
b) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-St-Chl-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	543 ± 28 °C	6110 ± 678 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	543 ± 11 °C	6121 ± 434 bar
	winkelgewichtet	544°C	6149 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	543°C	6024 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	543°C	5971 bar
Gleichgewichte in Figur 9.7 a-c (3 linear unabhängig)		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	5 Alm + Grs + 5 Phl + 12 W = 3 aQtz + 3 Chl + 3 An + 5 Ann	503.5	32.53
2	4 Ann + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Phl + 4 Alm	-371.2	-25.04
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	288 W + 115 Phl + 123 Alm = 115 Ann + 69 Chl + 117 aQtz + 6 St	8957.8	626.38
5	Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50
6	3 aQtz + 5 Ms + 4 Grs + 3 Chl = 12 An + 5 Phl + 12 W	157.7	4.95
7	12 W + 5 Prp + Grs = 3 An + 3 Chl + 3 aQtz	443.5	31.36
8	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 24 Grs = 3 Alm + 5 Ann + 72 An + 3 Chl	3125.9	154.46
9	180 W + 6 St + 80 Phl + 39 Grs + 72 Alm = 80 Ann + 117 An + 48 Chl	10678.2	642.48
10	23 Grs + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 69 An + 8 Alm	2622.4	121.92
11	36 W + 30 St + 216 aQtz + 40 Phl + 123 Grs = 40 Ann + 369 An + 24 Chl	17140.1	869.88
12	Alm + 3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 5 Prp + Ann	-311.2	-23.86
13	3 Chl + Ms + 3 aQtz = 12 W + 4 Prp + Phl	-323.2	-24.09
14	27 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Ann	47.9	25.47
15	41 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 33 Alm	-5520.7	-350.10
16	12 W + 23 Ms + 31 Alm = 23 Ann + 48 aQtz + 6 St	419.2	50.51
17	32 Ann + 93 Chl + 123 Ms = 324 W + 24 St + 99 aQtz + 155 Phl	-9831.7	-574.14
18	32 Alm + 69 Chl + 115 Ms = 228 W + 24 St + 123 aQtz + 115 Phl	-6861.8	-373.83
19	69 Chl + 117 aQtz + 6 St = 288 W + 115 Prp + 8 Alm	-7577.1	-599.24
20	69 Chl + 8 Phl + 117 aQtz + 6 St = 288 W + 123 Prp + 8 Ann	-7481.0	-597.36
21	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
22	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 3 Ms + 27 Grs = 8 Ann + 81 An + 3 Chl	3522.7	176.95
23	6 St + 45 aQtz + 5 Phl + 19 Grs = 8 Alm + 57 An + 3 Chl + 5 Ms	2464.7	116.97
24	8 Ann + 48 Chl + 33 Grs + 72 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 99 An	-1156.6	-102.70
25	8 Alm + 48 Chl + 41 Grs + 80 Ms = 180 W + 6 St + 80 Phl + 123 An	-98.7	-42.72
26	31 Grs + 8 Ms + 48 aQtz + 6 St = 12 W + 93 An + 8 Ann	3680.4	181.90
27	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Grs = 8 Alm + 72 An + 3 Chl	3065.9	153.28
28	24 Grs + 8 Phl + 45 aQtz + 6 St = 3 Prp + 3 Chl + 72 An + 8 Ann	3161.9	155.16
29	180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Grs = 8 Alm + 117 An + 48 Chl	9717.7	623.60
30	180 W + 6 St + 72 Prp + 8 Phl + 39 Grs = 8 Ann + 117 An + 48 Chl	9813.8	625.49
31	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
32	32 Alm + 3 Chl + 24 Ms = 6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 24 Ann	108.0	26.65
33	8 Ann + 3 Chl + 24 Ms + 27 Prp = 6 St + 45 aQtz + 32 Phl	-276.2	19.10
34	8 Alm + 3 Chl + 24 Ms + 19 Prp = 6 St + 45 aQtz + 24 Phl	-180.2	20.99
35	47 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 80 Prp + 39 Ann	-4560.2	-331.22
36	8 Ann + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 33 Prp + 47 Phl	-5124.5	-342.31
37	8 Alm + 48 Chl + 39 Ms = 180 W + 6 St + 41 Prp + 39 Phl	-5028.4	-340.42
38	6 St + 141 aQtz + 8 Ms + 93 Chl = 8 Ann + 155 Prp + 384 W	-10066.8	-790.11
39	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
40	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
41	6 St + 45 aQtz + 5 Prp + 8 Ms + 32 Grs = 8 Ann + 96 An + 3 Chl	4123.8	213.25
42	180 W + 6 St + 80 Prp + 8 Ms + 47 Grs = 8 Ann + 141 An + 48 Chl	10775.7	683.58
Δ <i>S<sub>r</sub></i> in $J \cdot K^{-1}$ ; Δ <i>V<sub>r</sub></i> in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 9.10: Resultate für TT337: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) alle Reaktionen

## 9.13 133: Metapelit

Der Plagioklas dieser Probe weist einen ausserordentlich geringen Anorthitgehalt auf (1%) und ist womöglich nachträglich albitisiert worden. Verwendet man die Durchschnittsanalysen (keine deutliche Zonierung feststellbar!), so ist klar ersichtlich, dass der Plagioklas mit diesem geringen Anorthitgehalt nicht im Gleichgewicht mit den anderen Phasen steht. Dies trifft auch dann zu, wenn man eine Rand-Analyse mit dem maximalen Anorthit-Gehalt nimmt (1.2% An). Die Gleichgewichte mit Anorthit verschieben sich stark gegen tiefere Temperaturen und damit gegen höhere Drucke (vgl. Fig 9.8).

Obwohl der Hellglimmer eine relativ grosse Paragonitkomponente enthält (ca 25%), liegen Gleichgewichte mit Paragonit weit abseits und deuten Ungleichgewicht an. Ebenso streuen Gleichgewichte mit Chlorit extrem weit.

Einzig das Granat-Biotit-Thermometer scheint ein Resultat zu geben, das etwa dem der umliegenden Proben entspricht (545 °C bei angenommenen 6000 bar).

## 9.14 NW80: Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer

Mit den zur Verfügung stehenden Analysen lassen sich nur 2 wasserkonservierende Reaktionen berechnen (vgl. Tab. 9.11 b), die sich bei 564 °C und 4793 bar schneiden (vgl. Fig. 9.8 b).

## 9.15 59: Metapelit

Der Granat dieser Probe ist deutlich zoniert. Die Kerne weisen etwas höhere Grossular- und Spessartingehalte, dafür aber tiefere Pyrop- und Almandingehalte auf als die Ränder. Nur 2 linear unabhängige Reaktionen sind formulierbar (vgl. Fig. 9.8 c und Tab. 9.11 c).

Es wurden Granatkern- und Granatrandanalysen unterschieden. Wieder ergeben die Granat-ränder höhere Werte (573°C/8700 bar) als die Granatkerne (500°C/6757 bar).

Der Chlorit ist ein retrogrades Produkt, wie aus einem Dünnschliffphoto auf S. 28 der Dissertation von STAPS-OHNMACHT (1991) ersichtlich ist.

## 9.16 NW142, NW158, NW33, MF1755 und MF1746

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**NW142:** Biotit-Granat-Gneis

**NW158:** Biotit-Gneis

**NW33:** Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer

**MF1755:** Laminiertes Schiefer

**MF1746:** Laminiertes Schiefer

Die oben aufgeführten Handstücke konnten nur für die Granat-Biotit-Thermometrie verwendet werden, weil nur Granat- bzw. Biotitanalysen vorhanden sind. Die Druckvorgabe stammt aus P-T-Berechnungen von Gesteinsproben aus der Nähe. Für alle Proben wurden die gleichen Mischungsmodelle verwendet (Granat: BERMAN [1990], Biotit: INDARES and MARTIGNOLE [1985]) (vgl. Tab. 9.11 d und Fig. 9.8 d).

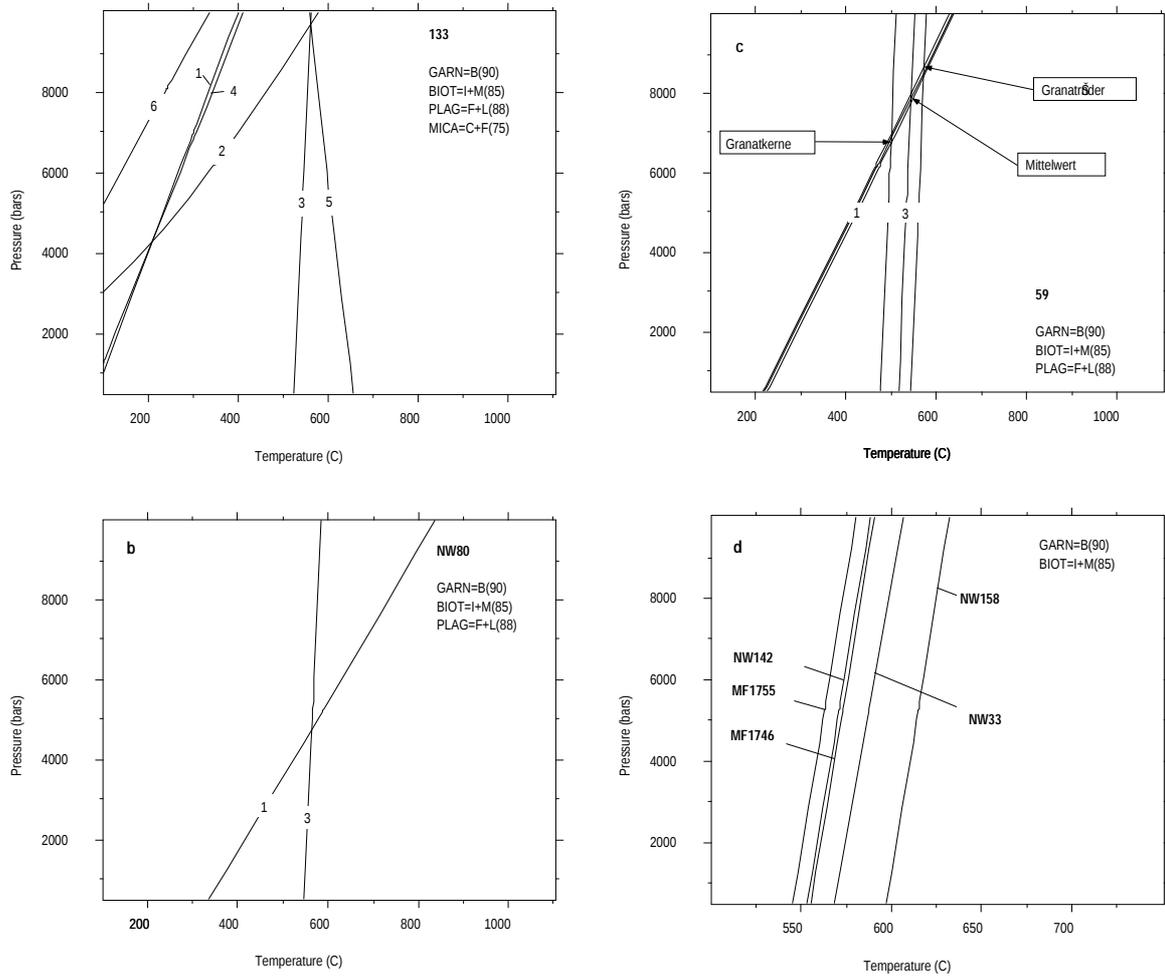


Fig. 9.8: (a) 133, (b) NW80, (c) 59, (d) Granat-Biotit-Temperaturen von NW142, NW158, NW33, MF1755 und MF1746

a) Probe:	<b>133, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-Chl-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	545 °C	6000 bar (Annahme)	
bisherige T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	540 °C	
b) Probe:	<b>NW80, Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-St-Chl-And-Opk-Tur-Zrn-Ap-Gr-Hem-Ilm</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	Schnittpunkt	564 °C	4793 bar
c) Probe:	<b>59, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-Ky-St-Chl-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Pl-Qtz-Ky		
Resultat:	Granatkern	500 °C	6757 bar
Resultat:	Granatrand	574 °C	8700 bar
Resultat:	Mittelwert	544 °C	7910 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	504-532 °C	7500-7800 bar
d) benutzte Paragenese:	Grt-Bt		
Probe:	<b>NW142, Biotit-Granat-Gneis</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Kfs-Qtz-Chl-Ep-Czo-Cld-Opk</i>		
Resultat:		574 °C	6000 bar (Annahme)
bisherige T-Abschätzung:	Waber (1986)	481 °C	
Probe:	<b>NW158, Biotit-Gneis</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Hbl-Chl</i>		
Resultat:		618 °C	6000 bar (Annahme)
Probe:	<b>NW33, Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-St-Ky-Chl-Gr-Opk-Ilm-Tur-Hem</i>		
Resultat:		591 °C	6000 bar (Annahme)
bisherige T-Abschätzung:	Waber (1986)	577 °C	
Probe:	<b>MF1755, Laminiertes Schiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Qtz-Czo-Cal-Dol-Chl-Ilm-Po-Tur-Gr</i>		
Resultat:		566 °C	6000 bar (Annahme)
bisherige T-Abschätzung:	Fischer (1986)	513 ± 35 °C	
Probe:	<b>MF1746, Laminiertes Schiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Qtz-Czo-Cal-Chl-Ilm-Po-Tur-Gr-Opk</i>		
Resultat:		576 °C	6000 bar (Annahme)
bisherige T-Abschätzung:	Fischer (1986)	510 ± 40 °C	
Gleichgewichte in Figur 9.8 a-d (3 linear unabhängig)	$\Delta S_r$	$\Delta V_r$	
1 aQtz + 2 Ky + Grs = 3 An	139.1	6.59	
2 Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90	
3 Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24	
4 Ms + Grs + Alm = Ann + 3 An	132.2	7.50	
5 Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67	
6 Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26	
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 9.11: (a) 133, (b) NW80, (c) 59, (d) NW142, NW158, NW33, MF1755, 1746

## 9.17 NW79, 121a, 14 und 10

Es handelt sich um folgende Gesteine:

**NW79:** Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer

**121a:** Metapelit

**14:** Metapelit

**10:** Metapelit

Da in allen diesen Proben die Plagioklasanalyse fehlt, lässt sich kein gutes Barometer formulieren. In den Proben NW79 und 121a resultieren zwar 3 linear unabhängige Reaktionen, die aber nicht alle wasserfrei sind. Die wasserfreien und linear abhängigen (Nr. 1, 2 und 4 in Tabelle 9.12) schneiden sich bei 571 °C und 7040 bar für Probe NW79, resp. bei 526 °C und 4560 bar für Probe 121a. Setzt man  $X_{H_2O} = 0.59$  resp. 0.47, so verlaufen auch die wasserführenden Reaktionen durch diesen Punkt (vgl. Fig. 9.9 a und b).

In den Proben 14 und 10 können nur die 3 linear abhängigen, wasserfreien Reaktionen 1, 2 und 4 formuliert werden.

Reaktion 2 (Granat-Biotit-Thermometer) bestimmt die Temperatur.

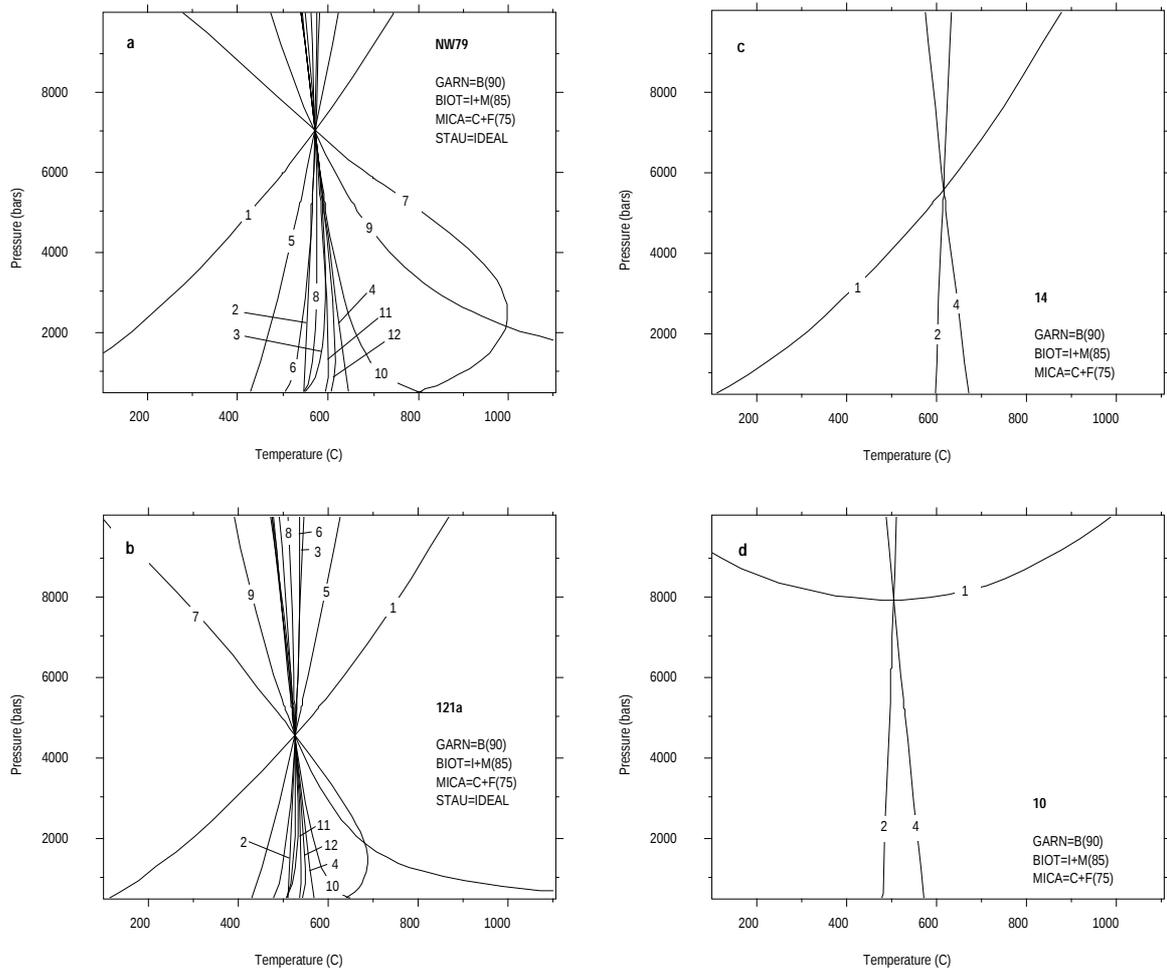


Fig. 9.9: (a) NW79, (b) 121a, (c) 14, (d) 10

a) Probe:	<b>NW79, Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-Ky-St-Chl-And-Zrn-Gr-Opk-Ilm-Tur-Hem-Mnz</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Qtz-Ky-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	Schnittpunkt	571 °C	7040 bar
bisherige T-Abschätzung:	Waber (1986)	558°C	
b) Probe:	<b>121a, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-St-Ky-Chl-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Qtz-St-Ky-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	526 °C	4560 bar
c) Probe:	<b>14, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Ms-Qtz-St-Ky-Chl-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	615 °C	5593 bar
bisherige T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	570°C	
d) Probe:	<b>10, Metapelit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Pl-Hgl-Qtz-St-Ky-Chl-Gr-Ilm</i>		
benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Qtz-Ky		
Resultat:	alle Schnittpunkte	504 °C	7921 bar
bisherige T-Abschätzung:	Staps-Ohnmacht (1991)	478°C	
Gleichgewichte in Figur 9.9 (3 linear unabhängig)			
		$\Delta S_r$	$\Delta V_r$
1	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
2	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
3	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
4	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
5	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
6	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
7	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
8	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
9	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
10	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
11	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
12	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 9.12: (a) NW79, (b) 121a, (c) 14, (d) 10

# Kapitel 10

## Alpe Sponda

### 10.1 DS7: Granat-Disthen-Staurolith-Glimmerschiefer

Die Analysen der einzelnen Mineralien wurden jeweils gemittelt, da die Mineralien keine nennenswerte Zonierung aufweisen. Die wasserfreien Reaktionen (3 linear unabhängige) schneiden sich in einem sehr kleinen Bereich (Fig. 10.1 a und Tab. 10.2).

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.75 schneiden sich die wasserführenden Reaktionen im gleichen Bereich wie die wasserkonservierenden (vgl. Fig. 10.1 b), wie das T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 6230 bar bestätigt (vgl. Fig. 10.1 c und d). Der Hellglimmer weist eine relativ hohe Paragonitkomponente auf, weshalb auch Paragonit mit in die Berechnung einbezogen wurde.

Chlorit kann texturell von der Paragenese ausgeschlossen werden (pseudomorph nach Biotit und Staurolith, also wohl retrograd). Die Berechnung bestätigt diese Beobachtung, denn Reaktionen mit Chlorit liegen bei viel tieferen Temperaturen. Ebenso liegen Reaktionen mit Ilmenit bei tieferen Temperaturen.

### 10.2 DS8: Disthen-Staurolith-Granat-Glimmerschiefer

Abgesehen von Reaktion 2, welche die kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werte aufweist und folglich am empfindlichsten auf kleine Änderungen in der Aktivität oder Zusammensetzung einer involvierten Phase ist (BERMAN, 1991), schneiden sich die wasserkonservierenden Reaktionen (3 linear unabhängige) in einem engen Druck-Temperatur-Bereich (vgl. Fig. 10.1 e und Tab. 10.1).

Bei  $X_{H_2O} = 0.75$  verlaufen auch die meisten wasserfreisetzen Reaktionen durch diesen P-T-Bereich (vgl. Tab. 10.1).

Die linear abhängigen Reaktionen 2, 4, 9, 10 und 11 schneiden sich bei viel höheren Drucken (ca. 7000 bar). Diese Abseitslage ist unabhängig vom  $X_{H_2O}$  – Reaktion 2 ist wasserkonservierend und liegt abseits – und muss zurückzuführen sein auf den Chemismus der festen Phasen (Messfehler, Ungleichgewicht aufgrund retrograder Veränderung, Probleme mit den eng verknüpften Aktivitätsmodellen von Almandin und Annit).

Die Paragonitkomponente im Hellglimmer ist relativ klein (1-15%), Ungenauigkeiten bezüglich Paragonit sind folglich gross; Reaktionen mit Paragonit streuen auch dementsprechend weit und wurden hier weggelassen.

Chlorit kann wie bei Probe DS7 (vgl. Kapitel 10.1) texturell von der Paragenese ausgeschlossen werden (retrograd, pseudomorph nach Biotit und Staurolith entstanden). Auch hier bestätigt die Rechnung diese Beobachtung, da Reaktionen mit Chlorit bei viel tieferen

Temperaturen liegen.

Probe:	<b>DS8, Disthen-Stauroolith-Granat-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Ilm-Chl-Ap-Zrn</i>		
e) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	582 ± 10 °C	5650 ± 759 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	582 ± 11 °C	5534 ± 691 bar
	winkelgewichtet	583°C	5571 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	584°C	5245 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	585°C	5260 bar
f) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	593 ± 26 °C	5593 ± 971 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	592 ± 22 °C	5679 ± 737 bar
	winkelgewichtet	599°C	5775 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	595°C	5365 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	608°C	5580 bar
Gleichgewichte in Figur 10.1e und f (3 linear unabhängig)		ΔS <sub>r</sub>	ΔV <sub>r</sub>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
ΔS <sub>r</sub> in J · K <sup>-1</sup> ; ΔV <sub>r</sub> in J · bar <sup>-1</sup>			

Tab. 10.1: DS8: (e) wasserkonservierende Reaktionen, (f) sämtliche Reaktionen

Probe:	<b>DS7, Granat-Disthen-Stauroolith-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Ky-Qtz-St-Ilm-Chl-Opk-Ap-Zrn</i>		
a) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz		
Resultat:	alle Schnittpunkte	610 ± 19 °C	6546 ± 356 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	601 ± 1 °C	6358 ± 87 bar
	winkelgewichtet	601°C	6366 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	615°C	6604 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	601°C	6321 bar
c) benutzte Paragenese:	Grt-Bt-Ms-Pg-Pl-Ky-Qtz-St-H <sub>2</sub> O		
Resultat:	alle Schnittpunkte	600 ± 20 °C	6247 ± 464 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	599 ± 13 °C	6222 ± 303 bar
	winkelgewichtet	598°C	6206 bar
	ΔS, ΔV-gewichtet	599°C	6258 bar
	winkel- u. ΔS, ΔV-gewichtet	597°C	6228 bar
Gleichgewichte in Figur 10.1a-d (3 linear unabhängig)			
1	Grt + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Pg + aQtz = W + Ky + Ab	-12.3	-0.99
4	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
5	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
6	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
7	W + 3 Ky + Grs + Ab = 3 An + Pg	151.4	7.58
8	3 aQtz + 2 Pg + Grs = 2 Ab + 3 An + 2 W	114.5	4.61
9	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
10	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
11	Alm + Ms + Pg = W + 3 Ky + Ann + Ab	-19.2	-0.09
12	3 aQtz + 2 Pg + Ann = 2 Ab + Alm + Ms + 2 W	-17.8	-2.88
13	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
14	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
15	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
16	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
17	8 Alm + 34 Ky + 12 Pg = 6 St + 13 aQtz + 12 Ab	428.8	17.86
18	8 Alm + 21 Ky + 25 Pg = 13 W + 6 St + 25 Ab	268.7	4.99
19	8 Alm + 46 Pg + 21 aQtz = 34 W + 6 St + 46 Ab	10.0	-15.80
20	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
21	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
22	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
23	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
24	12 Pg + 60 Ky + 13 Grs + 8 Alm = 12 Ab + 39 An + 6 St	2236.9	103.58
25	6 St + 30 aQtz + 17 Grs + 12 Ab = 8 Alm + 51 An + 12 Pg	1935.7	94.24
26	20 W + 6 St + 7 Grs + 32 Ab = 8 Alm + 21 An + 32 Pg	791.2	48.10
27	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
28	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
29	Prp + Pg + Ms = Ab + 3 Ky + Phl + W	-31.2	-0.32
30	2 Pg + Phl + 3 aQtz = 2 W + Prp + Ms + 2 Ab	-5.8	-2.65
31	13 Ann + 60 Ky + 12 Pg = 6 St + 13 Ms + 5 Alm + 12 Ab	517.8	6.12
32	8 Ann + 50 Ky + 12 Pg = 6 St + 5 aQtz + 8 Ms + 12 Ab	483.5	10.64
33	25 Alm + 17 Ms + 12 Pg = 6 St + 30 aQtz + 17 Ann + 12 Ab	312.4	33.21
34	8 Ann + 45 Ky + 17 Pg = 5 W + 6 St + 8 Ms + 17 Ab	422.0	5.69
35	15 Alm + 7 Ms + 32 Pg = 20 W + 6 St + 7 Ann + 32 Ab	134.5	4.38
36	8 Ann + 62 Pg + 45 aQtz = 50 W + 6 St + 8 Ms + 62 Ab	-132.3	-38.86
37	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
38	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
39	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
40	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
41	8 Ann + 34 Ky + 12 Pg + 8 Prp = 6 St + 13 aQtz + 8 Phl + 12 Ab	332.7	15.97
42	8 Ann + 21 Ky + 25 Pg + 8 Prp = 13 W + 6 St + 8 Phl + 25 Ab	172.6	3.10
43	8 Ann + 46 Pg + 8 Prp + 21 aQtz = 34 W + 6 St + 8 Phl + 46 Ab	-86.0	-17.69
44	12 Pg + 60 Ky + 5 Grs + 8 Ann = 12 Ab + 15 An + 8 Ms + 6 St	1179.0	43.61
45	6 St + 30 aQtz + 8 Ms + 25 Grs + 12 Ab = 8 Ann + 75 An + 12 Pg	2993.7	154.21
46	20 W + 6 St + 8 Ms + 15 Grs + 32 Ab = 8 Ann + 45 An + 32 Pg	1849.1	108.07
47	8 Prp + 12 Pg + 60 Ky + 13 Grs + 8 Ann = 12 Ab + 39 An + 8 Phl + 6 St	2140.9	101.69
48	6 St + 30 aQtz + 8 Phl + 17 Grs + 12 Ab = 8 Ann + 51 An + 12 Pg + 8 Prp	2031.8	96.12
49	20 W + 6 St + 8 Phl + 7 Grs + 32 Ab = 8 Ann + 21 An + 32 Pg + 8 Prp	887.2	49.98
50	8 Ann + 60 Ky + 12 Pg + 5 Phl = 6 St + 5 Prp + 13 Ms + 12 Ab	577.8	7.30
51	8 Alm + 60 Ky + 12 Pg + 13 Phl = 6 St + 13 Prp + 13 Ms + 12 Ab	673.8	9.19
52	8 Ann + 17 Ms + 12 Pg + 25 Prp = 6 St + 30 aQtz + 25 Phl + 12 Ab	12.3	27.31
53	8 Alm + 17 Ms + 12 Pg + 17 Prp = 6 St + 30 aQtz + 17 Phl + 12 Ab	108.3	29.20
54	8 Ann + 7 Ms + 32 Pg + 15 Prp = 20 W + 6 St + 15 Phl + 32 Ab	-45.5	0.84
55	8 Alm + 7 Ms + 32 Pg + 7 Prp = 20 W + 6 St + 7 Phl + 32 Ab	50.5	2.73
$\Delta S_r$ in $J \cdot K^{-1}$ ; $\Delta V_r$ in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 10.2: DS7: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (c) sämtliche Reaktionen, Paragonit eingeschlossen

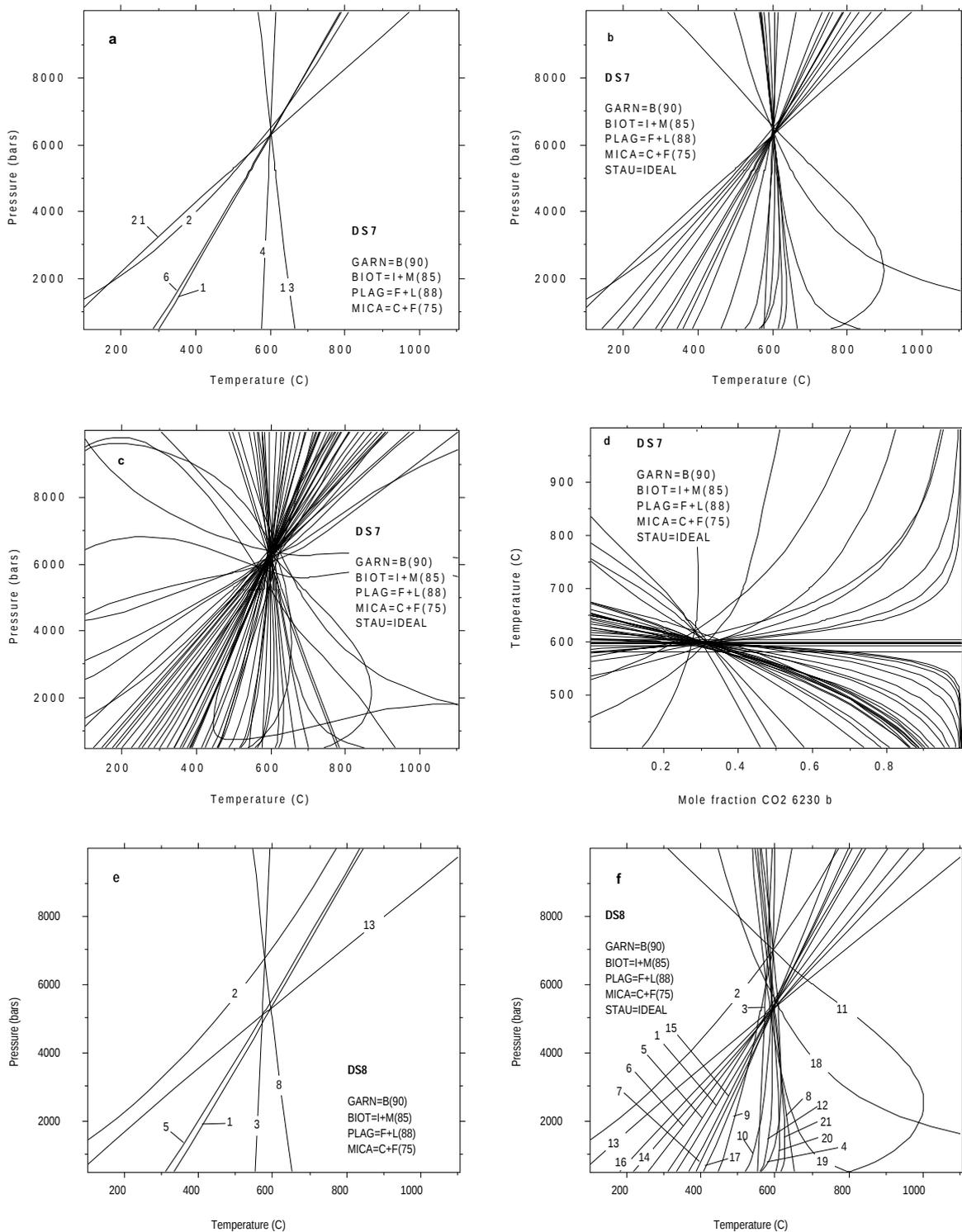


Fig. 10.1: DS7: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) wasserführende Reaktionen eingeschlossen, ohne Paragonit, (c) sämtliche Reaktionen, Paragonit eingeschlossen (d) T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 6230 bar; DS8: (e) wasserkonservierende Reaktionen, (f) wasserführende Reaktionen eingeschlossen

### 10.3 AI349: Cordieritgestein mit Paragonit

Die wasserkonservierenden Reaktionen beschreiben ein eng definiertes P-T-Feld; Reaktion 2 mit den kleinsten  $\Delta S$ - und  $\Delta V$ -Werten liegt etwas abseits, fällt aber bei der gewichteten Mittelwertsbildung nicht ins Gewicht (vgl. Tab. 10.3 a und Fig. 10.2 a). Obwohl der Hellglimmer einen grossen Paragonitanteil enthält, musste Paragonit aus der Berechnung ausgeschlossen werden, weil weit streuende Gleichgewichtskurven resultieren, die als Ungleichgewichte gewertet werden.

Bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.73 verlaufen auch Gleichgewichte mit Staurolith und  $H_2O$  durch diesen Punkt.

### 10.4 AI405: Granatfels

In dieser Probe fehlt Disthen als Matrixmineral. Trotzdem lassen sich 3 linear unabhängige Reaktionen formulieren, eine davon ist jedoch abhängig von der Zusammensetzung der fluiden Phase und geht bei einem  $X_{H_2O}$  von 0.80 genau durch den Schnittpunkt der beiden anderen (vgl. Tab. 10.3 c und Fig. 10.2 c). Der P-T-Punkt wird von den Reaktionen 3 (Granat-Biotit-Thermometer) und 13 bestimmt.

Die Paragonitkomponente ist sehr klein im Hellglimmer; Paragonit wurde deshalb aus der Berechnung ausgeschlossen, ebenso Chlorit, der nur im Granat auf Spaltrissen vorkommt, also retrograd entstanden ist. Disthen liegt nur als Einschluss im Granat vor. Gleichgewichte mit Disthen streuen weit und deuten Ungleichgewicht an.

### 10.5 AI378: Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer

Mit den vorhandenen Analysen lässt sich nur das Granat-Biotit-Thermometer anwenden. Bei einem angenommenen Druck von 6.5 kbar ergibt sich eine Temperatur von 597 °C, was genau dem von IROUSCHEK (1983) angegebenen Wert entspricht.

### 10.6 AI518: Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer mit Sillimanit

Mit den verfügbaren Analysen kann nur das Anorthit-Grossular-Barometer und das Granat-Biotit-Thermometer angewendet werden. Mit Disthen ergibt sich 650 °C/7893 bar, mit Sillimanit 651 °C/8130 bar. Beide Punkte fallen somit ins Stabilitätsfeld des Disthens, liegen jedoch ganz in der Nähe der Disthen-Sillimanit-Reaktion.

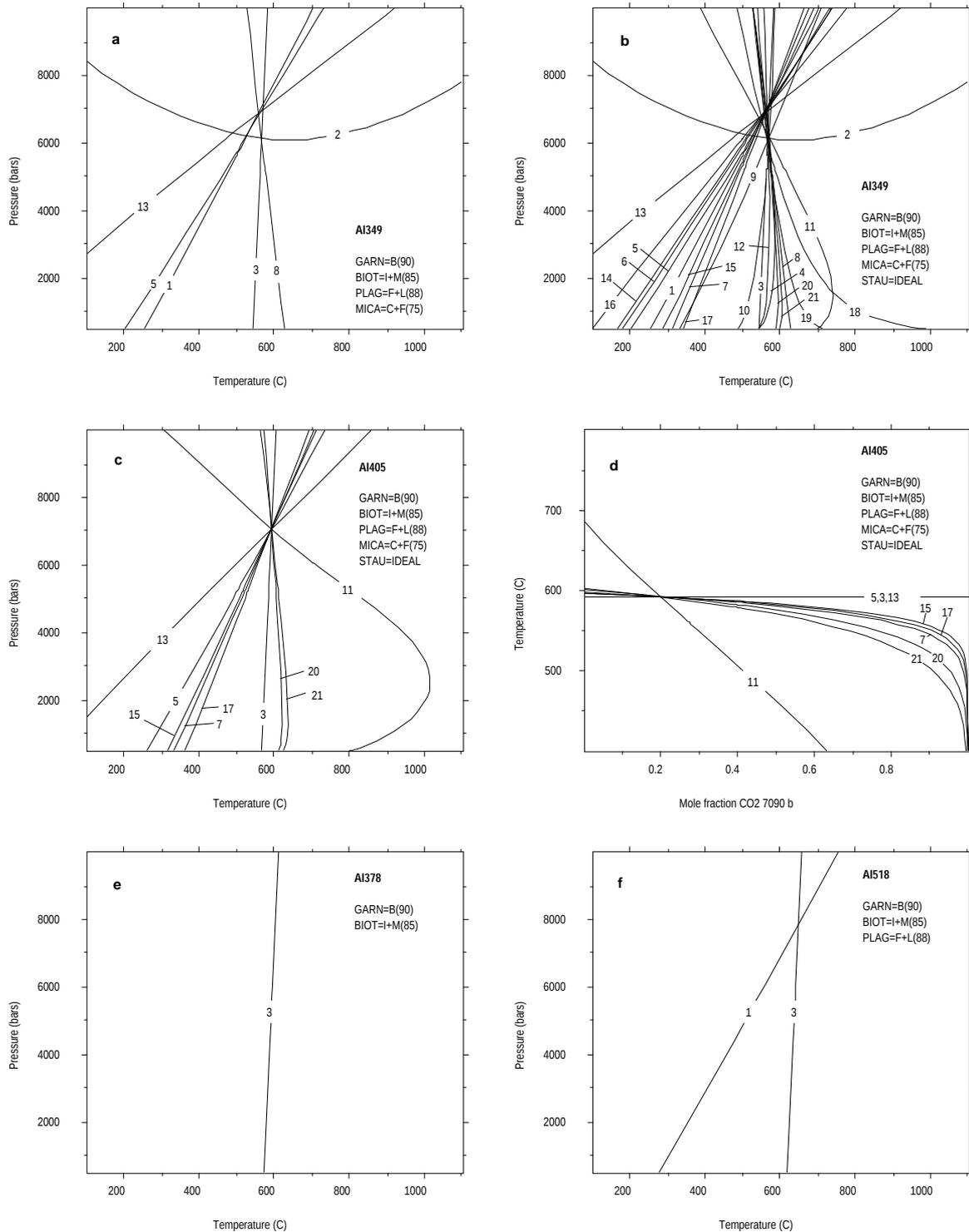


Fig. 10.2: AI349: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) wasserführende Reaktionen eingeschlossen; AI405: (c) sämtliche Reaktionen,  $X_{H_2O} = 0.80$  (d) T- $X_{CO_2}$ -Diagramm bei 7090 bar; AI378: (e) Granat-Biotit-Thermometer; AI518: (f) Granat-Biotit-Thermometer und Anorthit-Grossular-Barometer

a) Probe:	<b>AI349, Cordieritgestein mit Paragonit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Ky-Qtz-St-Crd-Chl</i>		
benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz</i>		
Resultat:	alle Schnittpunkte	552 ± 24 °C	6616 ± 399 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	553 ± 24 °C	6681 ± 389 bar
	winkelgewichtet	552°C	6543 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	550°C	6708 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	555°C	6814 bar
b) benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-H<sub>2</sub>O</i>		
Resultat:	alle Schnittpunkte	564 ± 27 °C	6652 ± 763 bar
	ohne kleine Δ's u. Schnittwinkel	562 ± 19 °C	6726 ± 494 bar
	winkelgewichtet	558°C	6644 bar
	Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	569°C	7066 bar
	winkel- u. Δ <i>S</i> , Δ <i>V</i> -gewichtet	560°C	6922 bar
c) Probe:	<b>AI405, Granatfels</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Hgl-Pl-Qtz-St-Ky-Ap-Chl-Ep</i>		
benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Qtz-St-H<sub>2</sub>O</i>		
Resultat:	Schnittpunkt	593°C	7089 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Irouschek (1983)	470-640°C	
e) Probe:	<b>AI378, Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Qtz-St-Chl-Ilm-Rt-Ap-Tur-Gr</i>		
benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt</i>		
Resultat:		597°C	6500 bar (angenommen)
bisherige P-T-Abschätzung:	Irouschek (1983)	595 ± 27 °C	6800-9900 bar
f) Probe:	<b>AI518, Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer mit Sillimanit</b>		
Mineralogie:	<i>Grt-Bt-Ms-Pl-Ky-Sil-Qtz-St</i>		
benutzte Paragenese:	<i>Grt-Bt-Pl-Ky-Qtz</i>		
Resultat:	Schnittpunkt	650 °C	7893 bar
bisherige P-T-Abschätzung:	Irouschek (1983)	622-655°C	6500-9000 bar
Gleichgewichte in Figur 10.2 a-f (3 linear unabhängig)		Δ <i>S<sub>r</sub></i>	Δ <i>V<sub>r</sub></i>
1	Grs + 2 Ky + aQtz = 3 An	139.1	6.59
2	Alm + Ms = aQtz + 2 Ky + Ann	-6.8	0.90
3	Phl + Alm = Ann + Prp	12.0	0.24
4	8 Alm + 46 Ky + 12 W = 6 St + 25 aQtz	576.6	29.74
5	Alm + Grs + Ms = 3 An + Ann	132.2	7.50
6	12 W + 96 Ky + 25 Grs + 8 Alm = 75 An + 6 St	4053.8	194.59
7	6 St + 48 aQtz + 23 Grs = 8 Alm + 69 An + 12 W	2622.4	121.92
8	Prp + Ms = 2 Ky + Phl + aQtz	-18.8	0.67
9	6 St + 25 Ms + 17 Alm = 25 Ann + 96 Ky + 12 W	-747.7	-7.17
10	6 St + 17 aQtz + 8 Ms = 8 Ann + 62 Ky + 12 W	-631.3	-22.52
11	31 Alm + 23 Ms + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Ann	419.2	50.51
12	8 Ann + 46 Ky + 8 Prp + 12 W = 6 St + 25 aQtz + 8 Phl	480.5	27.85
13	Prp + Ms + Grs = 3 An + Phl	120.2	7.26
14	12 W + 96 Ky + 17 Grs + 8 Ann = 51 An + 8 Ms + 6 St	2995.8	134.62
15	6 St + 48 aQtz + 8 Ms + 31 Grs = 8 Ann + 93 An + 12 W	3680.4	181.90
16	12 W + 8 Prp + 96 Ky + 25 Grs + 8 Ann = 75 An + 8 Phl + 6 St	3957.8	192.70
17	6 St + 48 aQtz + 8 Phl + 23 Grs = 8 Ann + 69 An + 8 Prp + 12 W	2718.5	123.81
18	6 St + 17 Prp + 25 Ms = 8 Ann + 96 Ky + 17 Phl + 12 W	-951.8	-11.18
19	6 St + 25 Prp + 25 Ms = 8 Alm + 96 Ky + 25 Phl + 12 W	-1047.8	-13.07
20	8 Ann + 23 Ms + 31 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 31 Phl	47.0	43.19
21	8 Alm + 23 Ms + 23 Prp + 12 W = 6 St + 48 aQtz + 23 Phl	143.1	45.08
Δ <i>S<sub>r</sub></i> in $J \cdot K^{-1}$ ; Δ <i>V<sub>r</sub></i> in $J \cdot bar^{-1}$			

Tab. 10.3: AI349: (a) wasserkonservierende Reaktionen, (b) wasserführende Reaktionen eingeschlossen; AI405: (c) sämtliche Reaktionen; AI378: (e) Granat-Biotit-Thermometer; AI518: (f) Granat-Biotit-Thermometer und Anorthit-Grossular-Barometer



## Kapitel 11

# Vergleich der PTAX-Resultate mit denen der Literatur

Im folgenden sollen die Druck- und Temperaturabschätzungen dieser Arbeit denjenigen der Literatur gegenübergestellt werden.

Viele Autoren wendeten dabei ausschliesslich das Granat-Biotit-Thermometer und das Anorthit-Grossular-Barometer an.

In der Literatur finden sich verschiedene Formate für Temperatur- und Druckangaben. Es kommen sowohl genaue Einzelwerte oder Durchschnittswerte mehrerer Berechnungen, beide mit oder ohne Fehlerangaben, als auch Intervallangaben vor. Damit man die Resultate besser miteinander vergleichen kann, wurden hier alle Angaben auf das gleiche Format gebracht. Bei Intervallangaben wurde der Mittelwert berechnet und die halbe Intervallgrösse als Streubereich angenommen. Wo Fehlerangaben für Einzel- oder Durchschnittswerte vorliegen, wurden diese Fehler als Streubereich der P-T-Daten interpretiert.

### 11.1 Das Granat-Biotit-Thermometer

Die mit PTAX Neuberechneten Temperaturen weichen zum Teil deutlich von den Granat-Biotit-Temperaturen der Literatur ab, wie Figur 11.1a zeigt.

Oberhalb von ca 500 °C liegen die Temperaturen dieser Arbeit systematisch etwas höher als die Granat-Biotit-Temperaturen der Literatur. Dies kommt auch im Histogramm (Figur 11.1b) zum Ausdruck. Die Säulenbreite entspricht dem grob abgeschätzten mittleren Fehler der Temperaturen aus der Literatur.

Unter 500 °C streuen die Temperaturen der Literatur unsystematisch und weit ober- und unterhalb der mit PTAX berechneten. Die durchschnittliche Abweichung aller Literaturwerte von den PTAX-Temperaturen beträgt  $-32 \pm 52$  °C.

### 11.2 Das Anorthit-Grossular-Barometer

Die Druckwerte aus der Literatur streuen völlig unsystematisch um diejenigen dieser Arbeit (vgl. Fig.11.2a). In der gleichen Probe können sich die Neuberechneten Drucke um bis zu 2500 bar von denen der Literatur unterscheiden.

In den mittleren Bereichen (6000-8000 bar) kann man eine geringere Abweichung der Literaturwerte von den PTAX-Werten feststellen. Die durchschnittliche Abweichung aller Drucke

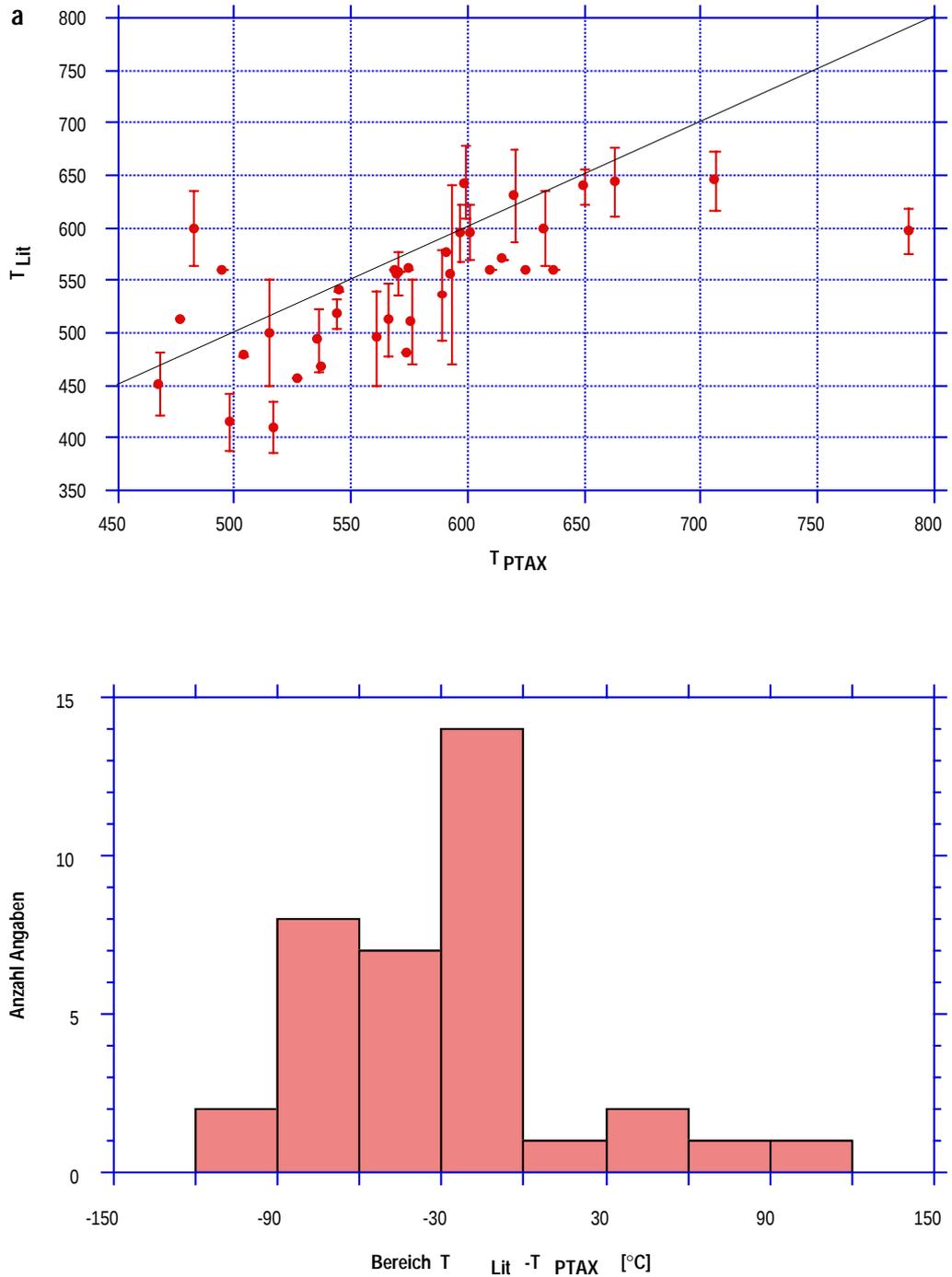


Fig. 11.1: (a) Temperaturvergleich anhand eines  $T_{Lit}-T_{PTAX}$ -Diagrammes: im mittleren und oberen Bereich liegen die Temperaturen der Literatur systematisch tiefer als die PTAX-Temperaturen; (b) Differenz  $T_{Lit}-T_{PTAX}$ ; die Säulenbreite entspricht dem grob abgeschätzten Fehler der Literaturdaten.

aus der Literatur beträgt zwar nur 55 bar, die Standardabweichung ist mit 1176 bar jedoch ausserordentlich gross.

### 11.3 Diskussion

Sowohl die Drucke als auch die Temperaturen dieser Arbeit sind oft deutlich verschieden von denen der Literatur. Als Gründe dafür kommen die folgenden Punkte in Frage:

- Entscheidend für die zum Teil sogar *systematischen* Abweichungen der Werte wirkte sich in erster Linie sicherlich die unterschiedliche Berechnungsmethodik aus! Die Drucke und Temperaturen dieser Arbeit wurden auf der Basis von intern konsistenten, thermodynamischen Daten und Aktivitätsmodellen berechnet, wobei möglichst alle formulierbaren Gleichgewichte einbezogen wurden. Ausserdem wurden für alle Proben immer die gleichen thermodynamischen Daten und Aktivitätsmodelle verwendet. In der hier ausgewählten Literatur kamen hingegen nur das Granat-Biotit-Thermometer und das Anorthit-Grossular-Barometer zum Einsatz.
- Eine Streuung der Resultate war zu erwarten, weil die Autoren unterschiedliche Kalibrierungen sowohl des Thermo- als auch des Barometers verwendeten. Die folgenden Kalibrationen wurden benutzt:

**Grt-Bt:** FERRY & SPEAR (1978), THOMPSON (1976), GOLDMAN & ALBEE (1977),  
INDARES & MARTIGNOLE (1985), HODGES & SPEAR (1982)

**An-Grs:** GHENT (1975, 1976), ARANOVICH & PODLESSKII (1980)

- Die Streuung der Resultate kann auch auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass in dieser Arbeit kaum jemals die gleichen Mineralanalysen für die Berechnungen verwendet wurden wie in der Literatur! Meistens sind nämlich in der Literatur pro Mineral mehrere Analysen aufgeführt; ein Hinweis auf die Analysen, die in der P-T-Berechnung Verwendung fanden, fehlt jedoch in der Regel. Bei einer anderen Analysenwahl ist aber mit anderen Resultaten zu rechnen!
- Die Fe- und Mg-Diffusion im Granat nimmt gegen tiefere Temperaturen stark ab. Die Schliesstemperatur für die Diffusion ist abhängig von der Abkühlrate und der Grösse des Granates (CYGAN & LASAGA, 1985). THOMPSON & ENGLAND (1984) geben bei einer Abkühlrate von ca. 5 °C/ma für einen kleinen Granat von 0.1 mm Durchmesser eine Schliesstemperatur von etwa 600 °C an. Bei grösseren Körnern liegt sie bedeutend höher.  
Gesteine in den äusseren Bereichen der mesoalpiner Metamorphose entstanden unter tieferen Metamorphosebedingungen. Vor allem grössere Granate zeigen deshalb oft ausgeprägte und komplexe Zonierungen (z.B. STAPS-OHNMACHT, 1991), was einen deutlichen Hinweis auf Ungleichgewicht darstellt und auch Schwankungen in den Temperaturabschätzungen erwarten lässt.
- FERRY & SPEAR (1978) kalibrierten die Fe-Mg-Austauschreaktion zwischen Granat und Biotit im Temperaturbereich von 550 °C - 800 °C. Das heisst, dass die Kalibrierung des Thermometers in einem anderen Temperaturbereich stattfand, als es oft angewendet wird. Unterhalb von 550 °C muss extrapoliert werden, was mit Fehlern behaftet sein kann!
- Die Fehleranfälligkeit der Druckbestimmung ist gross, weil selbst die Steigung der «Barometer» im P-T-Diagramm relativ steil ist und die kleinen Schnittwinkel von Gleichgewichtskurven grosse Unsicherheiten bewirken.

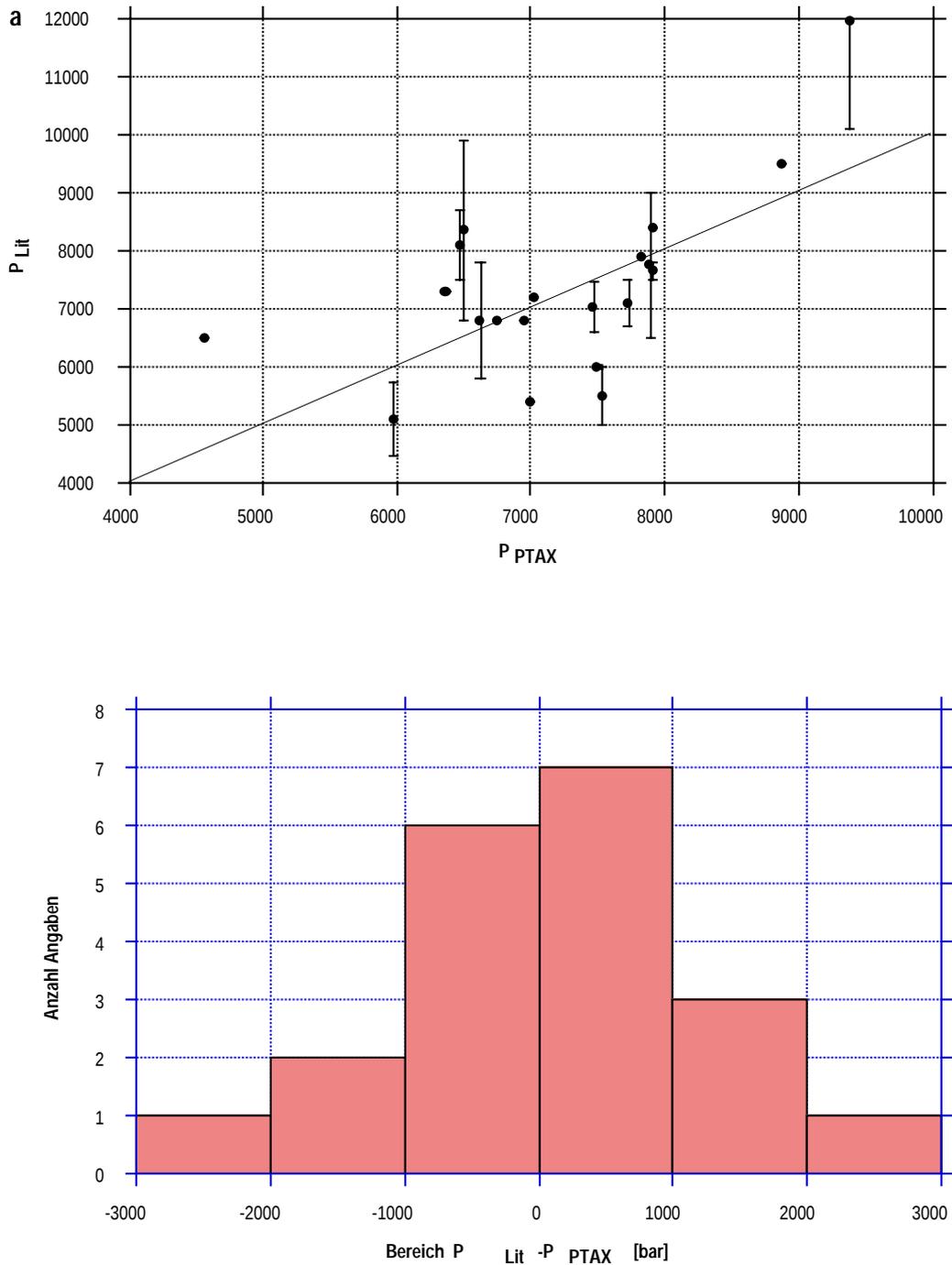


Fig. 11.2: (a) Druckvergleich anhand eines  $P_{Lit}-P_{PTAX}$ -Diagrammes: Die Streuung ist unsystematisch, die Abweichung der Einzelwerte zum Teil erheblich; (b) Differenz  $T_{Lit}-T_{PTAX}$ ; die Säulenbreite entspricht dem grob abgeschätzten Fehler der Literaturdaten

## Kapitel 12

# Isothermen- und Isobarenkarte der mesoalpinen Metamorphose

### 12.1 Voraussetzungen

Die im vorhergehenden Kapitel berechneten Druck- und Temperaturwerte sollen an ihrem geographischen Ort dargestellt und durch Isobaren und Isothermen konturiert werden. Dies ist nur dann sinnvoll, wenn die folgenden beiden Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Das Einstellen der Druck- und Temperaturwerte fand «posttektonisch» statt.
2. Alle errechneten Drucke und Temperaturen beschreiben das gleiche Metamorphoseereignis.

**Voraussetzung 1** wird durch die Beobachtungen bestätigt, dass im Bereich der Zentralalpen die Mineralzonen ein grossräumiges, konzentrisches Muster beschreiben, quer über die Deckengrenzen hinweg (z.B. NIGGLI, 1960). Die oft komplex verfalteten Deckengrenzen werden von den steiler einfallenden Isogradenflächen diskordant geschnitten. Daraus folgt, dass das lepontische Metamorphoseereignis nach Abschluss der Deckenbildung stattgefunden oder diese zumindest überdauert haben muss (NIGGLI, 1960; NIGGLI & NIGGLI, 1965; TROMMSDORFF, 1966; FOX, 1975; THOMPSON, 1976).

Postmetamorphe Verstellungen an den Deckenstirnen sind zwar bekannt (z.B. KAMBER, 1992), die Distanzen, über die mesoalpin metamorphe Gesteine transportiert wurden, sind jedoch klein, gemessen an der Grösse des Lepontins, und werden hier vernachlässigt. Sie vermögen das grossräumige Bild nicht zu beeinträchtigen.

**Voraussetzung 2** ist aufgrund der polymetamorphen und plurifaziellen Überprägung der Gesteine schwierig zu kontrollieren. Letzte Sicherheit kann eigentlich nur eine detaillierte Altersbestimmung jeder verwendeten Paragenese geben.

Die Zuordnung der Paragenesen zu den einzelnen Metamorphosephasen geschieht nur auf der Basis von texturellen Beobachtungen. Die Metapelite, die in dieser Arbeit zur P-T-Berechnung verwendet wurden, weisen maximal 3 Paragenesen auf. Die erste findet sich, wenn überhaupt noch vorhanden, nur reliktsch als Einschlussparagenese in grossen Porphyroblasten und wird einem frühen Metamorphoseereignis zugesprochen. Die zweite, meist als Berührungsparagenese beschrieben, besteht aus den Mineralien mit dem grössten Modalanteil im Gestein und der deutlichsten Textur (Matrixmineralien, die Hauptschieferung

bildend) und wird deshalb dem mesoalpinen Metamorphoseereignis zugeordnet. Die dritte entstand zuletzt, meist unter retrograden Bedingungen und besteht aus Umwandlungsprodukten (Chloritisierung, Saussuritisierung) der älteren Mineralien.

Es können mindestens 3 alpine Deformationsphasen ( $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_3$ ) nachgewiesen werden.  $F_1$  bewirkte die Platznahme der Decken,  $F_2$  wird mit der Ausbildung der Hauptschieferung in Verbindung gebracht und  $F_3$  mit der Rückfaltung (MILNES, 1974a,b; KLAPER, 1985).

Die mesoalpine Metamorphose erreichte ihren Höhepunkt nach  $F_2$  (posttektonische Einstellung der P- und T-Werte) und bildete somit die Mineralien der Hauptschieferung. Paragenesen, die aus Mineralien der Hauptschieferung bestehen, können deshalb diesem Metamorphoseereignis zugeordnet werden. Die aus diesen Paragenesen abgeleiteten Drucke und Temperaturen sollten also innerhalb des Bereiches der mesoalpinen Metamorphose konturierbar sein.

Eine Unterteilung des mesoalpinen Metamorphoseereignisses in verschiedene Phasen – mit verschiedenen Druck- und/oder Temperaturmaxima – kann texturell nicht nachgewiesen werden.

## 12.2 Interpolation mit bikubischen Splines

Obwohl die Probenfundorte sehr unregelmässig im Lepontin verstreut sind, wurde versucht, die Temperatur- und Druckwerte mit Hilfe von Splines zu konturieren.

Zur Elimination von redundanten Datenwerten rastert das GMT-Programm *blockmedian* die Region des Lepontins auf und berechnet für jeden Block, der einen Datenwert enthält, eine mittlere Position und einen mittleren Datenwert. Man erzielt die besten Resultate, wenn man die Rastergrösse etwa gleich wählt wie den mittleren Abstand der Probenpunkte, in unserem Fall etwa 4 Kilometer. Eine kleinere Rastergrösse bewirkt irreführende, scheinbare Details mit lokalen Maxima und Minima der Isolinien, bei einer grösseren geht Information verloren. Ein Rundungsfaktor von etwa 6 rundet die Linien leicht ab und hilft so auch, eine scheinbare Detailliertheit zu vermeiden.

*surface* legt eine kontinuierliche, je nach Wahl des Spannungsfaktors gebogene Splines-Oberfläche durch die gerasterten T- und P-Werte, und *grdcontour* zeichnet darauf die Isothermen bzw. Isobaren (SMITH & WESSEL, 1990; WESSEL & SMITH, 1991).

Der Verlauf der Isolinien ist sehr stark abhängig von der Wahl der Rastergrösse, des Spannungsfaktors der Splineoberfläche und des Rundungsfaktors der Isolinien.

Auf einen erhöhten Spannungsfaktor zur Vermeidung von unerwünschten Oszillationen und lokalen Maxima und Minima wurde verzichtet, weil dieser den Linienverlauf dort am stärksten beeinflusst, wo keine Datenpunkte vorliegen und eine Korrektur deshalb gar nicht angebracht ist. Die Isolinien entsprechen somit natürlichen, bikubischen Splines.

## 12.3 Probenauswahl und allgemeine Beobachtungen

In dieser Arbeit liegen nur 57 Proben vor, die sehr heterogen über das Lepontin verteilt sind. Fast alle dieser 57 Proben liefern zwar konturierbare Temperaturen, aber nur 45 davon konturierbare Drucke.

Aus KAMBER (1991) konnten noch P-T-Resultate von 10 Proben direkt übernommen werden. Diese Werte wurden mit der gleichen Methodik berechnet, die in dieser Arbeit zur Anwendung kam (PTAX), und sind somit direkt mit unseren Resultaten vergleichbar (vgl. Tab A.11 und A.14).

Weil im Westen des Lepontins keine Primärdaten zur Verfügung standen, wurden dort zusätzlich noch Druck- und Temperaturwerte von weiteren 10 Proben direkt aus der Literatur übernommen (FRANK, 1979; vgl. Tab A.11 und A.14). Diese Werte sind jedoch nicht konsistent mit den PTAX-Resultaten und wurden nur der Vollständigkeit halber zugezogen, damit (approximative) Isolinien auch im Westen des Gebietes verfolgt werden können.

Für die Isothermenkarte mussten die Proben K1264 und K1285 weggelassen werden, weil das Grt-Cld- und Grt-Bt-Thermometer unrealistisch hohe Temperaturen ergaben, die nicht kontrollierbar sind, da jeweils nur ein Thermometer berechenbar ist. Auch Probe EK50 wurde wegen extrem hoher Druck- und Temperaturwerte weggelassen.

Aufgrund der geringen Datendichte stellen die Isothermen- und Isobarenkarten nur eine grobe Betrachtung der Daten dar. Man sollte nur allgemeine Trends ablesen und darf auf keinen Fall die Lage einer Isolinie als absolut ansehen. Die Verlässlichkeit auf die Lage der Linien nimmt mit zunehmendem Abstand von den Probenfundorten ab. Der genaue Verlauf der Linien ist besonders dort unsicher, wo weite Strecken zwischen Datenpunkten interpoliert werden müssen, wie zum Beispiel im zentralen Lepontin, wo keine Daten vorliegen. Bei nur geringfügigen Änderungen der Konturierungsparameter (Rastergrösse, Spannungsfaktor) verschieben sich die Isolinien hier am stärksten (Oszillation der Splines). Dies gilt auch für die Bereiche ausserhalb der Zone der Probenfundorte, wo extrapoliert werden muss.

Mit Vorsicht sind auch lokale Maxima und Minima zu interpretieren, die durch Oszillationen der Splines zustande kommen können und dann geologisch keine Bedeutung haben.

Der Einfluss der Topographie wurde nicht berücksichtigt, obwohl die Höhendifferenz der verschiedenen Proben ziemlich gross ist (Berggipfel bis Talsohle und Bohrung).

### 12.3.1 Isothermenkarte

Die Isothermen spiegeln das bekannte Bild des konzentrischen Isogradenmusters wider (vgl. Fig. 12.1); das Zentrum dieses Musters liegt etwa bei Bellinzona. Die Temperatur nimmt gegen die Insubrische Linie hin zu, wo sich das Temperaturmaximum befindet.

Aus der Dichte der Isothermen kann man den Temperaturgradienten qualitativ abschätzen. Er nimmt von den externen, kühleren Teilen der Zentralalpen (Nufenengebiet) gegen das wärmere Zentrum hin deutlich ab.

Der etwas zweifelhafte Verlauf der 550 °C-Isotherme im Gebiet südlich des Lukmanierpasses ist auf die Verteilung der Temperaturwerte zurückzuführen, die keinen Gradient erkennen lässt, was auch schon in den Berechnungen von STAPS-OHNMACHT (1991) zum Ausdruck kam.

Das Ausschweifen der 600 °C-Isotherme bei Mesocco kann als Artefakt angesehen werden, hervorgerufen durch die geringe Proben-dichte in diesem Bereich, die ein Oszillieren der Splines bewirkt.

### 12.3.2 Isobarenkarte

Die Isobaren beschreiben zwar auch ein grobes, konzentrisches Muster, das Druckmaximum fällt jedoch nicht mit dem Temperaturmaximum zusammen, sondern liegt etwa auf der Höhe von Biasca. Gegen die Insubrische Linie hin fällt der Druck ab.

Der steile Druckgradient in den nördlichen Regionen (Nufenen- und Lukmaniergebiet) nimmt gegen Süden stark ab.

Im zentralen Lepontin ist die Proben-dichte gering und die Druckverteilung flach, der Verlauf der Isobaren somit sehr unsicher.

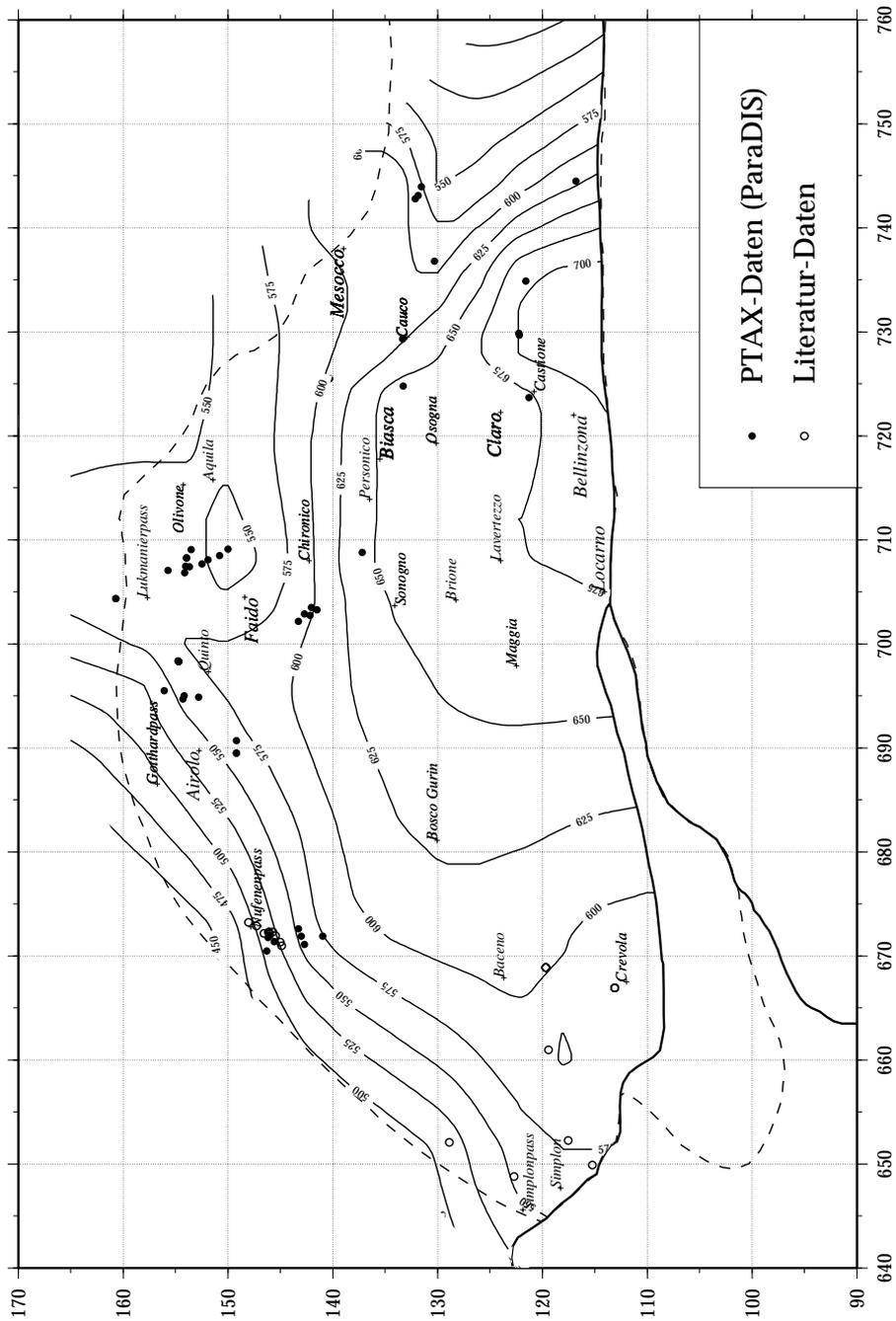


Fig. 12.1: Isothermenkarte der mesoalpiner Metamorphose; die Konturierung erfolgte durch Splinesinterpolation

Der erneute Druckanstieg gegen SW bei Crevola ist nur auf eine einzige Probe zurückzuführen und muss keine Bedeutung haben, speziell da der Datenpunkt aus der Literatur übernommen werden musste.



# Kapitel 13

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Mineralien einer Paragenese equilibrierten (gemäss Definition) zur gleichen Zeit, unter ganz bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen. Diese lassen sich im Idealfall bestimmen, sofern die Paragenese auf dem Weg des Gesteins an die Oberfläche erhalten blieb.

In der vorliegenden Arbeit wurden so an 57 Gesteinen der Zentralalpen P-T-Bedingungen bestimmt. In Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen belegen diese Daten eine Zunahme des Metamorphosegrades von Norden nach Süden.

Die heute an der Erdoberfläche aufgeschlossenen Mineralparagenesen können einer Faziesserie vom Barrow-Typus zugeordnet werden, die von unmetamorphen Sedimenten bis zur höchsten Amphibolitfazies in den tiefsten tektonischen Einheiten des Lepontins reicht. Die Mineralparagenesen beschreiben grossräumig ein konzentrisches Muster mit dem Zentrum unmittelbar nördlich der Insubrischen Linie, welche einen Metamorphosesprung markiert.

### 13.1 Diskussion der Methodik

Was stellen nun diese Faziesserie und die aus den Paragenesen abgeleiteten Drucke und Temperaturen eigentlich dar?

Die Gesamtheit der P-T-Punkte, im Profil durch ein metamorphes Gebiet, liegt im P-T-Diagramm auf einer Kurve, «metamorphe Geotherme» (ENGLAND & RICHARDSON, 1977) oder «P-T-Array» (ENGLAND & THOMPSON, THOMPSON & ENGLAND, 1984) genannt. Weil die einzelnen P-T-Werte von Paragenesen abgeleitet wurden, die zu verschiedenen Zeiten während der Metamorphose entstanden, ist ein P-T-Array keine echte Geotherme.

Es stellt sich mithin die Frage, welcher Teil der P-T-t-Entwicklung durch die Paragenesen belegt wird, die heute an der Erdoberfläche anstehen?

ENGLAND & RICHARDSON (1977) erwarten, dass eine Paragenese im Zustand maximaler Entropie,  $S_{max}$ , erhalten bleibt, weil für retrograde Reaktionen auf dem Abkühlweg die treibende Kraft abnimmt. In erster Näherung dürften deshalb die Maximaltemperatur der Metamorphose  $T_{max}$  und dementsprechend  $P(T_{max})$  belegt sein.

Zudem können Fluids, die von Entwässerungsreaktionen produziert werden, das Muttergestein verlassen und deshalb retrograde Reaktionen nicht mehr treiben. Allerdings durchlaufen hochgradige Gesteine einen langen Dekompressionsweg nahe  $T = T_{max}$ , so dass nach THOMPSON & ENGLAND (1984) diachrone Paragenesen zu erwarten sind.

Speziell können auf dem retrograden Teil des P-T-Weges fluidunabhängige Reaktionen ablaufen, z.B. die Umwandlung von  $Al_2SiO_5$ -Polymorphen oder kontinuierliche Kationen-Aus-

tauschkreaktionen (THOMPSON & ENGLAND, 1984). Gerade diese Austauschreaktionen können sehr temperaturabhängig sein. Oft erlauben textuelle Beobachtungen neben Sondendaten (Zonierung) ein Erkennen solch retrograder Veränderungen; dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass zuweilen  $T < T_{max}$  und  $P(T < T_{max})$  belegt worden sind. Dies trifft speziell bei hochgradigen Paragenesen zu.

Da im Bereich der mesoalpinen Metamorphose in verschiedenen Regionen unterschiedliche Temperaturen erreicht wurden, kann man auch verschiedene Stadien in den Reaktionsabläufen erwarten. Die P-T-Bestimmungen in den äusseren, kühleren Bereichen der Metamorphose dürften also nicht den gleichen (Zeit-)Punkt auf dem P-T-t-Weg repräsentieren wie in den zentralen, heisseren Regionen.

Dies lässt sich am Beispiel von Granat verdeutlichen. In den untersuchten Metapeliten spielt Granat als Reaktant eine Hauptrolle, sowohl in Reaktionen mit grosser als auch mit kleiner Steigung (Thermometer bzw. Barometer) im P-T-Diagramm. In vielen Paragenesen ist Granat das Mineral der Paragenese mit der geringsten Diffusivität, weshalb die Diffusion von Ionen im System von jener der Ionen im Granat kontrolliert wird. Diese Diffusivität ist stark temperaturabhängig und kommt beim Unterschreiten einer bestimmten Temperatur praktisch zum Stillstand. Die Schliesstemperatur wiederum ist abhängig von der Geometrie des Granates und der Abkühlrate (CYGAN & LASAGA, 1985).

Für Granat mit einem Durchmesser von 0.1 bis 1 mm liegt die Schliesstemperatur bei einer – für das Lepontin zutreffenden – Abkühlrate (5-10 °C/Ma) zwischen 600-680 °C (THOMPSON & ENGLAND, 1984)<sup>1</sup>.

Bei der mesoalpinen Metamorphose herrschten in den äusseren Bereichen des Lepontins Temperaturen, die weit unterhalb dieser Schliesstemperaturen lagen (vgl. z.B. Nufenengebiet, Lukmaniergebiet). In diesen kühleren Regionen besteht somit eher die Chance, dass Wachstumszonierungen von Granaten erhalten bleiben und damit auch ein Erinnerungsvermögen an P-T-Bedingungen vor Erreichen von  $T_{max}$  und  $P(T_{max})$ .

Dagegen lagen die Temperaturen im Bereich der höchsten Metamorphose (Region Bellinzona) deutlich über den Schliesstemperaturen. Hier mag das Erinnerungsvermögen der Paragenesen infolge Diffusion z.T. ausgelöscht sein, weil sich die Paragenesen aufgrund von Diffusionsreaktionen nach Erreichen von  $T_{max}$  und  $P(T_{max})$  an tiefere Bedingungen anpassen!

Tatsächlich beobachteten beispielsweise KLAPER (1985) im Nufenenpassgebiet und STAPS-OHNMACHT (1991) im Lukmaniergebiet eine ausgesprochene Wachstumszonierung im Granat. Aus dem Gebiet der Alpe Sponda beschreibt IROUSCHEK (1983) Granate, welche neben einer deutlichen Wachstumszonierung auch einen Abkühlrand aufweisen. Die von BÜHL (1981) in der Zone von Bellinzona beschriebenen Granate sind praktisch homogen, abgesehen von einem Abkühlrand.

Wie unsicher bzw. wie genau sind die P-T-Bestimmungen mit der hier angewendeten Methodik?

Je mehr linear unabhängige Reaktionen formuliert- und berechenbar sind, desto besser lässt sich die Qualität der P-T-Daten abschätzen. Als grobes Mass ist die Streuung der Schnittpunkte dieser Reaktionskurven zu gebrauchen. Diese Streuung überschätzt die P-T-Unge nauigkeit im allgemeinen, dies als Folge von zwei möglichen Effekten:

1. geringe  $\Delta S$ - und  $\Delta V$  einzelner Gleichgewichte

---

<sup>1</sup>Für das Lepontin gibt Hurford (1986) anfängliche Abkühlraten von 10-12 °C/Ma während des Oligozäns an.

## 2. geringe Schnittwinkel durch ähnliche P-T-Steigung von Gleichgewichten

Als besserer Indikator für die («a priori») Fehler in den P-T-Bestimmungen kann deshalb ein gewichtetes Streumass berechnet werden.

Die regionale Verbreitung der gewichteten Mittelwerte erlaubt ebenfalls eine Einschätzung dieses Fehlers, nun «a posteriori».

Geht man von der Annahme aus, dass die Paragenesen während des gleichen, mesoalpinen Metamorphoseereignisses entstanden, so sollten geographisch benachbarte Proben innerhalb der («a priori») Fehlergrenzen etwa die gleichen Drucke und Temperaturen ergeben. Relativ stark voneinander abweichende Resultate treten jedoch auch für benachbarte Proben auf, z.B. aus dem Lukmaniergebiet. Speziell die Druckwerte variieren stark, auch bei Proben, die aus der gleichen lithologischen Einheit stammen. Einige Proben wurden aufgrund äusserst unwahrscheinlicher Resultate ausgeschlossen; die Resultate waren aufgrund der geringen Anzahl berechenbarer Gleichgewichte unkontrollierbar.

Die Gründe dafür können vielfältig sein. Fehler in der Mikrosondenanalytik bewirken Ungenauigkeiten in der Mineralchemie, was sich direkt in den Druck- und Temperaturabschätzungen niederschlägt. Ebenso sind die thermodynamischen Mineraldaten und die verwendeten Aktivitätsmodelle mit einem (unbekannten) Fehler behaftet.

## 13.2 Geologische Interpretation

Die deutliche Druckabnahme südlich von Biasca in der Isobarenkarte (vgl. Fig. 12.2) könnte auf eine Anpassung der Paragenesen an tiefere Metamorphosebedingungen zurückzuführen sein. Begünstigt würde dies z.B. durch die hohen Temperaturen, die in diesem Bereich deutlich über der Diffusionsschliesstemperatur des Granates liegen (siehe oben). Die tatsächlichen Werte für  $P(T_{max})$  waren im Süden wohl etwas höher (6.5-8.5 kbar in der Zone von Bellinzona, SCHMIDT [1989]).

Grossräumige postmetamorphe Deformationen können das Isothermen- und Isobarenmuster stören. KAMBER (1991) beschreibt beispielsweise im Nufenenpassgebiet einen Metamorphosesprung zwischen penninischen (520 °C/6000 bar) und helvetischen Einheiten (470 °C/5200 bar), den er auf ein postmetamorphes Anheben der penninischen Einheiten relativ zu den helvetischen interpretiert. Verläuft die Verschiebungsfläche etwa parallel zu den Isothermen oder Isobaren wie im Nufenengebiet, so kann sich eine derartige Diskontinuität in einer Verdichtung der Isothermen bzw. Isobaren äussern.

Für die Alpen allgemein anerkannt ist, dass nach einer eoalpinen Hochdruckmetamorphose, hervorgerufen durch Subduktion von ozeanischer und ausgedünnter kontinentaler Kruste während der Annäherung von Afrika an Europa, eine spätkretazische bis paläogene Kontinentalkollision der Adriatischen Platte mit Europa stattgefunden hat (z.B. COWARD & DIETRICH, 1989; HUNZIKER et al., 1989). Die anschliessende thermische Erholung der verdickten kontinentalen Kruste bewirkte die mesoalpine Metamorphose.

Aufgrund von Altersdatierungen wurde die Hochdruckmetamorphose, deren Relikte sich in der Cima-Lunga- und Adula-Decke in Form von Eklogiten und Peridotiten finden (z.B. HEINRICH, 1983), bisher in der Kreidezeit angesiedelt (eoalpine Phase).

Neueste Altersdatierungen stellen jedoch dies in Frage. Sm-Nd-Mineralalter von Granatperidotiten und Eklogiten aus der Cima-Lunga-Decke (40 Ma) deuten jedoch auf ein eozänes Alter der Hochdruckmetamorphose in der Cima-Lunga-Decke hin, solche aus der Adula-Decke (93 Ma) auf eine kretazische Hochdruckmetamorphose in der Adula-Decke (BECKER,

1992; GEBAUER et al., 1991). BECKER (1992) deutet deshalb die mesoalpine Regionalmetamorphose der Simano-Decke (Barrow-Typ) als Resultat einer Überschiebung der heißen Cima-Lunga-Decke auf die Simano-Decke, die dadurch von Süden nach Norden aufgeheizt wurde. Begründet wird dies einerseits mit der unterschiedlichen Metamorphosegeschichte von Cima-Lunga- und Simano-Decke: Während die Cima-Lunga-Gesteine Anzeichen von isothermaler Dekompression und damit eine retrograde Entwicklung zeigen, weist die Simano-Decke von Süden nach Norden eine prograde Metamorphoseentwicklung auf. Zudem sind U-Pb-Monazitalter von 27 Ma (KÖPPEL & GRÜNENFELDER, 1975) aus der südlichen Simano-Decke bekannt, d.h. die Aufheizung der Simano-Decke auf Amphibolitfaziesbedingungen soll 13–15 Ma gedauert haben.

Die Konsequenzen dieser neuen Befunde sind noch nicht vollständig diskutiert. Immerhin hätten Adula- und Simano-Decke eine unterschiedliche Geschichte, was die Annahme in Frage stellt, dass beide einmal eine zusammenhängende Decke bildeten (vgl. EVANS & TROMMSDORFF, 1978). Die Mineralisograde der mesoalpinen Barrow-Metamorphose im südlichen Lepontin wären zudem nicht zur gleichen Zeit entstanden, und somit sollten Isothermen und Isobaren nicht über die gesamte Region durchgezogen werden.

Junge U-Pb-Alter von Granaträndern von  $ca\ 28.0 \pm 2.5$  Ma und damit übereinstimmende Rb-Sr-Alter von Amphibolen von  $27.7 \pm 1.1$  Ma aus den südlichen Lepontinischen Alpen sollen Stadien auf dem prograden Weg der mesoalpinen Metamorphose darstellen (VANCE & O'NIONS, 1991). Dadurch müsste die Klimax der mesoalpinen Metamorphose, die bisher zwischen 21 und 35 Ma angenommen wurde (JÄGER, 1973; KÖPPEL & GRÜNENFELDER, 1975; DEUTSCH & STEIGER, 1985), bedeutend später stattgefunden haben!

Aufgrund dieser momentan noch laufenden Diskussion können die P-T-Daten dieser Arbeit noch nicht vollständig regionalgeologisch und genetisch interpretiert werden.

# Literatur

- [ABLM85] Aurisicchio, C., Bocchio, R., Liborio, G., and Mottana, A. Petrogenesis of the eclogites from Soazza, Switzerland. *Chemical Geology*, 50:47– 65, 1985.
- [Abr52] Abrecht, H. *Zur mineralchemischen Kenntnis von Anhydrit und Albit als Zerrklüftmineralien aus dem Simplontunnel*. Dissertation, Universität Bern, 1952.
- [Abr75] Abrecht, J. *Die Granit-Kontaktzone und die Migmatitischen Gesteine im Gebiet des Gruben- und Aeren-Gletschers (Haslital, Schweiz)*. Dissertation, Universität Bern, 1975.
- [ACR75] Adams, H., Cohen, L., and Rosenfeld, J. Solid inclusion piezometry: II. Geometric basis, calibration for the association quartz-garnet, and application to some pelitic schists. *American Mineralogist*, 60:584– 598, 1975.
- [Aeb85] Aebischer, F. G. *Struktur und Petrographie im Gebiet Tremorgio-Campolungo*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1985.
- [Aem76] Aemissegger, B. *Der Nordrand des Malenco-Serpentinites, Piz Fora und Sasso d'Entova*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1976.
- [AH79] Abrecht, T. and Hänni, H. Eine Beryll-Phenakit ( $\text{Be}_2\text{SiO}_4$ )-Paragenese aus dem Rotondo-Granit. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:1– 4, 1979.
- [AJ65] Arnold, A. and Jäger, E. Rb-Sr Altersbestimmungen an Glimmern im Grenzbereich zwischen voralpinen Alterswerten und alpiner Verjüngung des Biotits. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 58(1):369– 390, 1965.
- [AJE66] Armstrong, R., Jäger, E., and Eberhardt, . A comparison of K-Ar and Rb-Sr ages on alpine biotites. *Earth and Planetary Science Letters*, 1:13– 19, 1966.
- [Amm73] Ammann, P. *Geologia e petrographia della regione del Pizzo Molare*. Dissertation, ETH Zürich, 1973.
- [Ams71] Amstutz, A. Formation des Alpes dans le segment Ossola - Tessin. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 64(1):149– 150, 1971.
- [Ams74] Amstutz, A. Structures alpines autour de San Lorenzo et mécanismes orogéniques. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 67(1):91– 99, 1974.
- [AP80] Aranovich, L. and Podlesskii, K. The Garnet-Plagioclase Barometer. *Doklady, Earth Science Sections*, 251:101– 103, 1980.
- [Arn68] Arnold, A. *Die Gesteine der Region Nalps-Curnera im nordöstlichen Gotthardmassiv, ihre Metamorphose und ihre Kalksilikatfels-Einschlüsse (Petrographische Untersuchungen im Bereich der Anlagen der Kraftwerke Vorderrhein)*. Dissertation, Universität Bern, 1968.
- [Bal89] Baltzer, D. *Petrographie, Geochemie, Tektonik, Metamorphose und Geochronologie im nord-westlichen Teil der Suretta-Decke*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1989.
- [Ban78] Bangerter, G. C. *Struktur und Metamorphose im Grenzgebiet des Malenco-Serpentins und der Margna-Decke im Gebiet des Monte Braccia (Provinz Sondrio, Italien)*. Diplomarbeit, ETH und Universität Zürich, 1978.
- [Bau79] Baumann, W. *Die Goldvererzungen der Antiform von Vanzone (Prov. Novara, Italien)*. Diplomarbeit, Universität Zürich, 1979.
- [Bau82] Baumgartner, L. *Petrologie der Alp Confin, Misoa (GR/Schweiz)*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1982.
- [BB80] Bernotat, W. and Bambauer, H. Die Mikroklin/Sanidin-Isograde in Aar- und Gotthardmassiv. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73(2):559– 561, 1980.
- [BB82a] Bambauer, H. and Bernotat, W. The Microcline/Sanidine Transformation Isograd in Metamorphic Regions. I. Composition and structural state of alkali feldspars from granitoid rocks of two N-S traverses across the Aar massif and Gotthard "Massif", Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:185– 230, 1982.
- [BB82b] Bernotat, W. and Bambauer, H. The Microcline/Sanidine Transformation Isograd in Meta-

- morphic Regions. II. The region of Lepontine metamorphism. Central Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:231– 244, 1982.
- [BBI<sup>+</sup>80] Bolli, H., Burri, M., Isler, A., Nabholz, W., Pantić, N., and P., P. Der nordpenninische Saum zwischen Westgraubünden und Brig. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73(3):779– 797, 1980.
- [Bea52] Bearth, P. Über einen Wechsel der Mineralfazies in der Wurzelzone des Penninikums. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 38:363– 373, 1952.
- [Bec92] Becker, H. Garnet peridotite and eclogite Sm-Nd mineral ages from the Lepontine dome (Switzerland): New evidence for Eocene high-pressure metamorphism in the Central Alps. in prep., 1992.
- [BEGB86] Berman, R., Engi, M., Greenwood, H., and Brown, T. Derivation of Internally-Consistent Thermodynamic Data by the Technique of Mathematical Programming: a Review with Application to the System MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Journal of Petrology*, 27(6):1331–1364, 1986.
- [Ber88] Berman, R. Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>. *Journal of Petrology*, 29(2):445– 522, 1988.
- [Ber90] Berman, R. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *American Mineralogist*, 75:328– 344, 1990.
- [Ber91] Berman, R. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique, with petrological applications. *Canadian Mineralogist*, 29:833– 855, 1991.
- [Bia60] Bianconi, F. *Geologia della Regione del Campolungo con speciale Riguardo alle Formazioni Triassiche*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1960.
- [Bia71a] Bianconi, F. Geologia e petrographia della regione del Campolungo. *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, 142, 1971.
- [Bia71b] Bianconi, F. *Geologia e petrographia della regione del Campolungo*. Dissertation, ETH Zürich, 1971.
- [BL83a] Baumgartner, L. and Löw, S. Deformation und Metamorphose der Adula-Decke südwestlich San Bernadino. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 63:215– 232, 1983.
- [Bl<sup>+</sup>83b] Bläuer, C. *Geologische und petrographische Untersuchungen in der Aroser Zone zwischen Weisshorn und Prätisch*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1983.
- [Bla65a] Blanc, B. L. *Zur Geologie Zwischen Madesino und Chiavenna*. Dissertation, Universität Zürich, 1965.
- [Bla65b] Blattner, P. Ein anatektisches Gneissmassiv zwischen Valle Bodengo und Valle de Livo (Prov. Sondrio und Como). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 45:973–1071, 1965.
- [Bla72] Blattner, P. Oxygen Isotopic Composition of Minerals from Lepontine Gneisses, Valle Bodengo (Prov. di Sondrio, Italia). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 52:33– 37, 1972.
- [BLM85] Bocchio, R., Liborio, G., and Mottana, A. Petrology of the amphibolitized eclogites of Gorduno, Lepontine alps, Switzerland. *Chemical Geology*, 50:65– 86, 1985.
- [BND83] Bucher-Nurminen, K. and Droop, G. The metamorphic evolution of garnet-cordierite-sillimanite-gneiss of the Gruf-Complex, Eastern Pennine Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 84:215– 227, 1983.
- [BNFF83] Bucher-Nurminen, K., Frank, E., and Frey, M. A model for the progressive regional metamorphism of margarite bearing rocks in the central alps. *American Journal of Science*, 283(A):370– 395, 1983.
- [Bö86] Böhm, C. *Geologie und Petrographie im Gebiet von Val Russein und Val Gliems, Graubünden*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1986.
- [Bos81] Bossart, P. J. *Geologie des südlichen Gotthardkristallins und dessen Sedimenthülle im Raum Blinnental-Merengenbachtal (Goms, VS)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1981.
- [BP73] Bucher, K. and Pfeiffer, H.-R. Ueber Metamorphose und Deformation der östlichen Malenco-Ultramafitite und deren Rahmengesteinen (Provinz Sondrio, Nord-Italien). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 53(2):231– 241, 1973.
- [Bru65] Bruggmann, H. O. *Geologie und Petrographie des südlichen Misox (Val Grono, Val Leggia, Val Cama)*. Dissertation, Universität Zürich, 1965.
- [Bü80] Bühl, H. *Petrographie, Metamorphose und Strukturen in der Zone von Bellinzona im Gebiet des Corno di Gesero (GR/TI)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1980.
- [Bü81] Bühl, H. Zur Sillimanitbildung in den Gneisen der Zone von Bellinzona. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 61:275– 295, 1981.
- [Bü83] Bühler, C. *Petrographische und Geochemische Untersuchungen im Gebiet La Tscheppa - Lagrev (Julier- Bernina-Decke)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1983.
- [Buc72] Bucher, K. *Geologie und Petrographie des Malenco-Serpentinites, nördlicher Kontakt*. Diplom-

- arbeit, ETH Zürich, 1972.
- [Bur42] Burckhardt, C. Geologie und Petrographie des Basodino-Gebietes. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 22(1):99–186, 1942.
- [Bur89] Burchard, U. *Geologie und Petrographie des Schwarzenberges (Mattmark, Saastal, VS) – Die Manganvorkommen zwischen Monte Rosa- und Dent Blanche-Decke in den Gebieten Zermatt - Saas Fee und Alagna*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1989.
- [CD73] Chinner, G. and Dixon, J. Some high-pressure paragenesis of the Allalin-Gabbro, Valais, Switzerland. *Journal of Petrology*, 14:185–202, 1973.
- [CD89] Coward, M. and Dietrich, D. Alpine tectonics – an overview. In Coward, M., Dietrich, D., and Park, R., editors, *Alpine tectonics*, volume 45, pages 1–29, 1989.
- [CF75] Chatterjee, N. and Froese, E. A thermodynamic study of the pseudobinary join muscovite-paragonite in the system  $KAlSi_3O_8$ - $NaAlSi_3O_8$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ . *American Mineralogist*, 60:985–993, 1975.
- [Cha61] Chatterjee, N. The alpine metamorphism in the Simplon Area, Switzerland and Italy. *Geologische Rundschau*, 51:1–72, 1961.
- [Cha65] Chadwick, B. *The structural and metamorphic geology of the Lukmanier region, Ticino - Grisons*. Dissertation, Imperial College, London, 1965.
- [Cha68] Chadwick, B. Deformation and Metamorphism in the Lukmanier Region, Central Switzerland. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 79:1123–1150, 1968.
- [CL85] Cygan, R. and Lasaga, A. Self-Diffusion of Magnesium in Garnet at 750 °C to 900 °C. *American Journal of Science*, 285:328–350, 1985.
- [Cod70] Codd, E. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*, 13(6):377–387, 1970.
- [Cod81] Codoni, A. G. *Geologia e Petrografia della regione del Pizzo di Claro*. Dissertation, ETH Zürich, 1981.
- [Col83] Colombi, A. *Contribution a l'étude géologique de la région de Bosco Gurin (TI)*. Diplomarbeit, Université de Lausanne, 1983.
- [Col88] Colombi, A. *Métamorphisme et Géochimie des roches mafiques des alpes ouest-centrales (Géoprofil Viège-Domodossola-Locarno)*. Dissertation, Université de Lausanne, 1988.
- [Cor74] Corfu, F. *Geologisch-Petrographische-Strukturelle Untersuchungen in den Ophiolith-Zonen des mittleren Val Madris (Alp Merla)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1974.
- [Dat87] Date, C. *A guide to INGRES*. Addison-Wesley, 1987.
- [DBN84] Droop, G. and Bucher-Nurminen, K. Reaction Textures and Metamorphic Evolution of Sapphirine-bearing Granulites from the Gruf Complex, Italian Central Alps. *Journal of Petrology*, 25:766–803, 1984.
- [deC83] deCapitani, C. *Petrographische Untersuchungen in der Gegend Furtschellas - Grialetsch (Oberengadin) unter besonderer Berücksichtigung der Manganerz-Vorkommen*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1983.
- [Deu79] Deutsch, A. Serpentine und Rodingite der Cima Sgiu (NW Adula-Decke, Tessin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:319–347, 1979.
- [Die84] Diethelm, K. *Geologie und Petrographie des Bergel-Ostrandes II*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1984.
- [DN87] DelMoro, A. and Notarpietro, A. Rb-Sr geochemistry of some hercynian granitoids overprinted by eoalpine metamorphism in the upper Valtellina, central alps, Switzerland. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67(3), 1987.
- [DS85a] Deutsch, A. and Steiger, R. A reassessment appraised: comment on “hornblende K-Ar ages and the climax of tertiary metamorphism in the lepontine alps (south central switzerland): an old problem reassessed” - reply to Peter K. Zeitler and Jan R. Wijbrans. *Earth and Planetary Science Letters*, 76:393–395, 1985.
- [DS85b] Deutsch, A. and Steiger, R. Hornblende K/Ar ages and the climax of Tertiary metamorphism in the lepontine Alps (South Central Switzerland): an old problem reassessed. *Earth and Planetary Science Letters*, 72:175–189, 1985.
- [Egg75] Egger, A. *Petrographische Untersuchungen im nordwestlichen Aarmassiv nördlich Tellli bei Blatten - Lötschen, VS*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1975.
- [Egl61] Egli, W. *Geologie der Soja-Schuppe südlich Olivone*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1961.
- [Egl66] Egli, W. *Geologisch-Petrographische Untersuchungen in der NW-Aduladecke und in der Soja-schuppe (Bleniotal, Kanton Tessin)*. Dissertation, ETH Zürich, 1966.
- [Eng73] Engi, M. *Strukturen und Metamorphose im Kontaktbereich des südwestlichen Malenco*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1973.

- [Eng78] England, P. Some thermal considerations of the alpine metamorphism - past, present, and future. *Tectonophysics*, 46:21– 40, 1978.
- [Ern77] Ernst, W. Mineralogic Study of Eclogitic Rocks from Alpe Arami, Lepontine Alps, Southern Switzerland. *Journal of Petrology*, 18(3):371– 398, 1977.
- [Ern78] Ernst, W. Petrochemical Study of Lherzolitic Rocks from the Western Alps. *Journal of Petrology*, 19:341– 392, 1978.
- [ET70] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Regional Metamorphism of Ultramafic Rocks in the Central Alps: Parageneses in the System CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 50:481– 492, 1970.
- [ET74] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Stability of enstatite + talc, and CO<sub>2</sub>-metasomatism of metaperidotite, Val d'efra, Lepontine Alps. *American Journal of Science*, 274:274– 296, 1974.
- [ET78] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Petrogenesis of garnet lehrzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, 40:333– 348, 1978.
- [ET83] Evans, B. W. and Trommsdorff, V. Fluorine hydroxyl titanium clinohumite in alpine recrystallised garnet peridotite: compositional controls and petrologic significance. *American Journal of Science*, 283(A):355– 369, 1983.
- [ETG81] Evans, B. W., Trommsdorff, V., and Goles, G. G. Geochemistry of high-grade eclogites and metarodingites from the Central Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 76:301– 311, 1981.
- [ETR79] Evans, B. W., Trommsdorff, V., and Richter, W. Petrology of an eclogite-metarodingite suite at Cima di Gagnone, Ticino, Switzerland. *American Mineralogist*, 64:15– 31, 1979.
- [Ett87] Etter, U. *Stratigraphische und strukturgeologische Untersuchungen im Gotthardmassivischen Mesozoikum zwischen dem Lukmanierpass und der Gegend von Ilanz*. Dissertation, Universität Bern, 1987.
- [FBFM80] Frey, M., Bucher, E., Frank, E., and Mullis, J. Alpine Metamorphism along the geotraverse Basel-Chiasso - a review. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73(2):527– 546, 1980.
- [FBFS82] Frey, M., Bucher, K., Frank, E., and Schwander, H. Margarite in the Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:21– 45, 1982.
- [Feh22] Fehr, W. *Geologisch-petrographische Untersuchungen im zentralen Teile der südlichen Gneise des Aarmassivs*. Dissertation, Universität Bern, 1922.
- [Fer64] Ferrini, D. *Le pietre verdi dei Dintorni di Chiavenna*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1964.
- [FGT85] Früh-Green, G. and Thompson, A. Stable isotope indications of fluid motion in the amphibolitisation of eclogites in the Adula nappe. *Terra cognita*, 5:0– 336, 1985.
- [FHF<sup>+</sup>74] Frey, M., Hunziker, J., Frank, W., Boquet, J., Dal Piaz, G., Jäger, E., and Niggli, E. Alpine metamorphism of the Alps, a Review. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 54:247– 290, 1974.
- [FHJS83] Frey, M., Hunziker, J., Jäger, E., and Stern, W. Regional distribution of white K-mica polymorphs and their phengite content in the Central Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 83:185– 197, 1983.
- [Fis23] Fischer, E. H. *Petrographische Untersuchungen im westlichen Gotthardmasiv*. Dissertation, Universität Bern, 1923.
- [Fis86] Fischer, M. *Zur Petrographie der Bohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1986.
- [Fis88] Fischer, M. Petrographie, Mineralchemie und Metamorphose von Metasedimenten der Sondierbohrung Sta. Maria I, Lukmanierpass. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 68:55– 66, 1988.
- [Fis89] Fisch, H. Zur Kinematik der südlichen Steilzone der Zentralalpen E von Bellinzona. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 69(3):377– 392, 1989.
- [FJN76] Frey, M., Jäger, E., and Niggli, E. Gesteinsmetamorphose im Bereich der Geotraverse Basel-Chiasso. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:649– 659, 1976.
- [FL88] Fuhrman, M. and Lindsley, D. Ternary-feldspar modeling and thermometry. *American Mineralogist*, 73:201– 216, 1988.
- [FO74] Frey, M. and Orville, P. Plagioclase in margarite-bearing rocks. *American Journal of Science*, 274:31– 47, 1974.
- [Fox74] Fox, J. *Petrology of some low-variance meta-pelites from the Lukmanier Pass area, Switzerland*. Dissertation, Cambridge University, 1974.
- [Fox75] Fox, J. Three-dimensional isograds from the Lukmanier Pass, Switzerland, and their tectonic significance. *Geological Magazine*, 112(6):547– 564, 1975.
- [Fra75] Frank, E. *Mineralogisch-petrographische und geochemische Untersuchungen der Berisal-Augengneise und der Bündnerschiefer im östlichen Simplongebiet (Steinental - Alpe Veglia)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1975.
- [Fra79a] Frank, E. Celsian in leucocratic gneisses of the Berisal-complex, Central Alps, Switzerland.

- Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:245– 250, 1979.
- [Fra79b] Frank, E. *Metamorphose Mesozoischer Gesteine im Querprofil Brig-Verampio: Mineralogisch-Petrographische und Isotopengeologische Untersuchungen*. Dissertation, Universität Bern, 1979.
- [Fra83] Frank, E. Alpine metamorphism of calcareous rocks along a crosssection in the Central Alps: occurrence and breakdown of muscovite, margarite and paragonite. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 63:37– 93, 1983.
- [Fre67] Frey, J. Geologie des Greinagebietes. *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, 131:1–112, 1967.
- [Fre69] Frey, M. *Die Metamorphose des Keupers vom Tafeljura bis zum Lukmanier-Gebiet (Veränderungen tonig-mergeliger Gesteine vom Bereich der Diagenese bis zur Stauroolith-Zone)*. Dissertation, Universität Bern, 1969.
- [Fre74] Frey, M. Alpine Metamorphism of Pelitic and Marly Rocks of the Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 54:489– 506, 1974.
- [Fre75] Frey, M. *Progressive Low-Grade Metamorphism of a Black Shale Formation, Central Swiss Alps, with Special Reference to Pyrophyllite and Margarite Bearing Assemblages*. Habilitationsschrift, Universität Bern, 1975.
- [Fre78] Frey, M. Progressive Low-Grade Metamorphism of a Black Shale Formation, Central Swiss Alps, with Special Reference to Pyrophyllite and Margarite Bearing Assemblages Valais, Switzerland. *Journal of Petrology*, 19:95– 135, 1978.
- [Fre86] Frey, M. Very low-grade metamorphism of the Alps - an introduction. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:13– 27, 1986.
- [FS78] Ferry, J. and Spear, F. Experimental calibration of partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib Mineral Petrol*, 66:113– 117, 1978.
- [FS79] Frank, E. and Stettler, A. K-Ar and  $^{39}\text{Ar}$  -  $^{40}\text{Ar}$  systematics of white K-mica from an Alpine metamorphic profile in the Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:375– 394, 1979.
- [Fum74] Fumasoli, M. *Geologie des Gebietes nördlich und südlich der Iorio-Tonalen Linie im Westen von Gravedona (Como, Italia)*. Dissertation, ETH Zürich, 1974.
- [FW75] Frey, M. and Wieland, B. Chloritoid in autochton-paraautochtonen Sedimenten des Aarmassivs. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:407– 418, 1975.
- [GA77] Goldman, D. and Albee, A. Correlation of Mg/Fe - partitioning between Garnet and Biotite with  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  - partitioning between quartz and magnetite. *American Journal of Science*, 277:750– 767, 1977.
- [Gan37] Gansser, A. Der Nordrand der Tambodecke (Geologische und Petrographische Untersuchungen zwischen San Bernadino und Splügenpass). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 17:294– 523, 1937.
- [Gan68] Gansser, A. The Insubric Line, a major geotectonic problem. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 48:132– 143, 1968.
- [Gan83] Ganguin, J. *Etude géologique et pétrographique de la Täschalp*. Diplomarbeit, Universität Bern, 1983.
- [Gar47] Gard, J. *Recherches géologiques dans le Haut Val d'Anniviers (Gardes de Bordon et Val de Moiry)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1947.
- [Gau76] Gautschi, A. *Geologisch-Petrographische Untersuchungen am Südrand des Malenco-Serpentinities (Prov. Sondrio, N-Italien)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1976.
- [Gau79] Gautschi, A. Geologie und Petrologie des Fedozzer Gabbros (Östliche Zentralalpen; Provinz Sondrio, Nord-Italien/Kanton Graubünden, Schweiz). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:423– 427, 1979.
- [Gau80] Gautschi, A. *Metamorphose und Geochemie der basischen Gesteine des Bergeller Ostrandes (Graubünden, Schweiz/Provinz Sondrio, Norditalien)*. Dissertation, ETH Zürich, 1980.
- [Geh81] Gehring, A. *Zur Geologie des Simplonpassgebietes*. Diplomarbeit, Universität Zürich, 1981.
- [Gen78] Genoud, M. *Alpe Veglia (Carte Géologique avec notice explicative)*. Diplomarbeit, Université de Lausanne, 1978.
- [Ger66] Gerber, R. *Der Malencoserpentin östlich des Passo d'Ur*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1966.
- [GGTT91] Gebauer, D., Grünenfelder, M., Tilton, G., and Trommsdorff, V. The geodynamic evolution of the gar-peridotite/eclogite association of Alpe Arami (Central Alps) from early Proterozoic to Oligocene HP-metamorphism. *Terra Abstracts*, 3:5, 1991.
- [GH89] Giger, M. and Hurford, A. Tertiary intrusives of the central alps: their tertiary uplift, erosion, redeposition and burial in the south-alpine foreland. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 82(3):857– 866, 1989.
- [Ghe75] Ghent, E. Temperature, pressure and mixed - volatile equilibria attending metamorphism of stauroilite-kyanite-bearing assemblages, Esplanade Range, British Columbia. *Geological Society*

- of America, *Bulletin*, 86:1654–1660, 1975.
- [Ghe76] Ghent, E. Plagioklase - garnet -  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  - quartz: a potential geobarometer - geothermometer. *American Mineralogist*, 61:710– 714, 1976.
- [Gie84] Giere, R. *Geologie und Petrographie des Bergell-Ostrandes*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1984.
- [Gig85] Giger, M. *Petrographisch-geologische Untersuchungen der Davoser Dorfberg-Decke und ihrer benachbarten tektonischen Einheiten im Gebiet Weissfluhjoch - Schafläger - Dorfberg (Davos; Kanton Graubünden)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1985.
- [GL89] Guntli, P. and Liniger, M. Metamorphose in der Margna-Decke im Bereich Piz da la Margna und Piz Fedoz (Oberengadin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 69:289– 301, 1989.
- [GM78] Gautschi, A. and Montrasio, A. Die andesitisch-basaltischen Gänge des Bergeller Ostrandes und ihre Beziehung zur Regional- und Kontaktmetamorphose. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 58:329– 343, 1978.
- [GN67] Graeser, S. and Niggli, E. Zur Verbreitung der Phengite in den Schweizer Alpen; ein Beitrag zur Zoneographie der alpinen Metamorphose. «Etages tectoniques». «*Etages tectoniques*» Colloq. à Neuächtel, pages 89– 104, 1967.
- [Gr<sup>n</sup>63] Grünfelder, M. Heterogenität akzessorischer Zirkone und die petrographische Deutung ihrer Uran-Blei-Zerfallsalter; 1.) Der Zirkon des Granodioritgneises von Acquacalda (Lukmanierpass). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 43:235– 257, 1963.
- [Gre76] Greller, M. *Zur Geologie des Camughera-Moncucco, W Domodossola (Provinz Novara, Italien)*. Diplomarbeit, Universität Zürich, 1976.
- [Gre85] Greco, A. Analisi strutturale della parte frontale del ricoprimento pennidico dell'Antigorio in Val Formazza (Novara, Italia). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 65:299– 323, 1985.
- [Gru70] Grubenmann, J. *Die Bündnerschiefer der Val Torta (Val Bedretto)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1970.
- [GSS76] Günthert, A., Stern, W., and Schwander, H. Isochemische Granitgneisbildung im Maggia-Lappen (Lepontin der Zentralalpen). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:105– 143, 1976.
- [GSSF85] Günthert, A., Schwander, H., Stern, W., and Frank, E. Anorthitgehalt von Plagioklasen in Karbonatführenden Gesteinen der Amphibolitfazies der Zentralalpen (Tosa - Tessin - Region). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 65:159– 210, 1985.
- [Gü54] Günthert, A. Beiträge zur Petrographie und Geologie des Maggia-Lappens (NW-Tessin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 34:1– 159, 1954.
- [Gun87] Guntli, P. *Geologische und Petrographische Untersuchungen der Margna südlich des Silsersees, Oberengadin: II. Fedoz*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1987.
- [Hä72] Häny, R. Das Migmatitgebiet der Valle Bodengo (östliches Lepontin). *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, 145, 1972.
- [HA82] Huber-Aleffi, A. *Strain Determinations in the Conglomeratic Gneiss of the Lebendun nappe, Ticino, Switzerland*. Dissertation, ETH Zürich, 1982.
- [Haf58] Hafner, S. Petrographie des südwestlichen Gotthardmassivs (zwischen Gotthardpass und Nufenenpass). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 38:255– 362, 1958.
- [Hal44] Halm, E. *Die Kupfer-Wismut-Lagestätten im obern Val d' Anniviers (Wallis)*. Dissertation, Universität Bern, 1944.
- [Hal72] Hall, W. D. M. *The structural Geology and metamorphic history of the lower Pennine Nappes, Valle di Bosco, Ticino, Switzerland*. Dissertation, University of London, 1972.
- [Ham85] Hammerschlag, J.-G. *Métamorphisme progressif dans la séquence quartzofeldspathique profil Aar-Bergell (Alpes Centrales)*. Dissertation, Université de Lausanne, 1985.
- [Han72] Hansen, J. Zur Geologie, Petrographie und Geochemie der Bündnerschiefer-Serien zwischen Nufenenpass (Schweiz) und Cascata Toce (Italia). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 52:109– 153, 1972.
- [Han81] Hansmann, W. *Geologisch-Petrographische Untersuchungen im südlichen Bergell 2. Val Ligancio*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1981.
- [Has49] Hasler, P. Geologie und Petrographie der Sambuco-Massari-Gebirgsgruppe zwischen der oberen Leventina und Valle Magia. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 29:50– 155, 1949.
- [HB69] Hunziker, C. J. and Bearth, P. Rb-Sr-Altersbestimmung aus den Walliser Alpen, Biotitalterswerte und ihre Bedeutung für die Abkühlungsgeschichte der alpinen Metamorphose. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 62(1):205– 222, 1969.
- [HDM89] Hunziker, J., Desmons, J., and Martinotti, G. Alpine thermal evolution in the central and western Alps. In Coward, M., Dietrich, D., and Park, R., editors, *Alpine tectonics*, volume 45, pages 353– 367, 1989.
- [Hei69] Heitzmann, P. *Die Bündnerschiefer zwischen Val Piora und Val Cassinello (Val Bedretto)*.

- Diplomarbeit, 1969.
- [Hei72] Heim, M. *Die Geologie des Albrun-Gebietes im hinteren Binntal (Wallis)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1972.
- [Hei75] Heitzmann, P. Zur Metamorphose und Tektonik im südöstlichen Teil der lepontischen Alpen (Provincia di Como, Italia). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:467– 522, 1975.
- [Hei78] Heinrich, C. *Metamorphose und Strukturen der Cima Lunga-Serie. I Cima di Gagnone - Val Motto*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1978.
- [Hei82] Heinrich, C. Kyanite-eclogite to amphibolite facies evolution of hydrous mafic and pelitic rocks, Adula nappe, Central Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 81:30– 38, 1982.
- [Hei83] Heinrich, C. *Die regionale Hochdruckmetamorphose der Aduladecke, Zentralalpen, Schweiz*. Dissertation, ETH Zürich, 1983.
- [Hei86a] Heinrich, C. A. Eclogite Facies Regional Metamorphism of Hydrous Mafic Rocks in the Central Alpine Adula Nappe. *Journal of Petrology*, 27(1):123– 154, 1986.
- [Hei86b] Heitzmann, P. Retrograde Metamorphose und Verformung in der Wurzelzone zwischen Ticino und Mera (Lepontinische Alpen). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:111– 114, 1986.
- [Hei87] Heitzmann, P. Evidence of late oligocene/early miocene backthrusting in the central alpine “root zone”. *Geochimica Acta (Paris)*, 1(3):183– 192, 1987.
- [Hel77] Heller, F. Paläomagnetische Daten aus dem westlichen Lepontin (Zentralalpen). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 57:135– 143, 1977.
- [Her81] Herren, E. *Tektonik und Deformation im Gebiet nördlich des Griesgletschers im Obergoms (Wallis)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1981.
- [HF80] Hoernes, S. and Friedrichsen, H. Oxygen and hydrogen-isotopic composition of Alpine- and pre-Alpine minerals of the Swiss Central Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 72:19– 32, 1980.
- [HFJ89] Hurford, A., Flisch, M., and Jäger, E. Unravelling the thermo-tectonic evolution of the alps: a contribution from fission track analysis and mica dating. In Coward, M., Dietrich, D., and Park, R., editors, *Alpine tectonics*, volume 45, pages 369– 398, 1989.
- [HFLV90] Heitzmann, P., Frei, W., Lehner, P., and Valasek, P. Crustal indentation in the alps - an overview of reflection seismic profiling in Switzerland. *American Geophysical Union/ Bayreuth Proceedings*, 1990.
- [HGS75] Hännly, R., Grauert, B., and Soptrajanova, G. Paleozoic Migmatites affected by High Grade Tertiary Metamorphism in the Central Alps (Valle Bodengo, Italy). A geochronological Study. *Contrib Mineral Petrol*, 51:173– 196, 1975.
- [Hig64a] Higgins, A. Fossil remains in stau-kya-schists of the Bedretto-Mulde Bündnerschiefer. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 57(1):151– 156, 1964.
- [Hig64b] Higgins, A. K. *The Structural and Metamorphic Geology of the area between Nufenenpass and Basodino, Tessin, Schweiz*. Dissertation, Imperial College, London, 1964.
- [His75a] Hiss, B. M. *Petrographische Untersuchungen der SBB-Sondierbohrung Biaschina (TI). Metamorpher Anhydrit im Leventina-Gneiss*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1975.
- [His75b] Hiss, B. Metamorpher Anhydrit im Leventina-Gneiss. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:217– 225, 1975.
- [His75c] Hiss, B. Petrographische Untersuchung der SBB-Sondierbohrung Biaschina (TI). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:201– 215, 1975.
- [His77] Hiss, B. M. *Feldspäte als petrogenetische Indikatoren in granitoiden Gneissen des Lepontins*. Dissertation, Universität Basel, 1977.
- [His78] Hiss, B. M. Feldspäte als petrogenetische Indikatoren in granitoiden Gneissen des Lepontins. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 58:243– 288, 1978.
- [HRS80] Huber, M., Ramsay, J., and Simpson, C. Deformation in the Maggia and Antigorio nappes. Lepontine Alps. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73(2):593– 606, 1980.
- [HS82] Hodges, K. and Spear, F. Geothermometry, geobarometry and the Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist*, 67:1118, 1982.
- [Hü27] Hügly, W. *Petrographisch-geologische Untersuchungen im östlichen Aarmassiv zwischen Wendenjoch - Wassen - Erstfeld*. Dissertation, Universität Bern, 1927.
- [Hü88] Hügi, M. *Petrographie und Mineralogie der Lercheltinzone (Monte-Leone-Decke, Binntal, VS) - Die Quarze der Mineraliengrube Lenggenbach (Binntal, VS) und ihre Einschlüsse*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1988.
- [Hub22] Huber, M. *Intrusions- und Kontakterscheinungen im Oberhasle. Beitrag zur Petrographie und Geologie des mittleren Aarmassivs*. Dissertation, Universität Bern, 1922.
- [Hub81] Huber, M. I. *Geologisch-Strukturelle Untersuchungen im oberen Maggiagebiet (Tessin, Schweiz)*. Dissertation, ETH Zürich, 1981.

- [Hun66] Hunziker, J. Zur Geologie und Geochemie des Gebietes zwischen Valle Antigorio (Provincia di Novara) und Valle di Campo (Kt. Tessin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 46:473– 552, 1966.
- [Hun69] Hunziker, J. Rb-Sr Altersbestimmungen aus den Walliser Alpen, Hellglimmer- und Gesamtgesteinsalterswerte. *Eclogae geologicae Helveticae*, 62:527– 542, 1969.
- [Hun74] Hunziker, J. Rb-Sr and K-Ar age determination and the alpine tectonic history of the western alps. *Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova*, 31, 1974.
- [Hur86] Hurford, A. J. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps, South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib Mineral Petrol*, 92:413– 427, 1986.
- [Hut21] Huttenlocher, H. *Beiträge zur Petrographie und Geologie des westlichen Aarmassives*. Dissertation, Universität Bern, 1921.
- [IA85] Irouschek, A. and Armbruster, T. Wagnerite from a metapelitic rock of the Simano nappe (Lepontine Alps, Switzerland), part 1: mineralogy and geochemistry. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 65:137– 151, 1985.
- [IH82] Irouschek, A. and Huber, M. Pseudotachylite zones in the Leventina gneiss (Lepontine Alps, Ticino, Switzerland). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:313– 325, 1982.
- [IM85] Indares, A. and Martignole, J. Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite. *American Mineralogist*, 70:272– 278, 1985.
- [Iro78] Irouschek, A. *Untersuchungen an Metapeliten der Campo Tencia-Masse unter besonderer Berücksichtigung des Na-Gehaltes von Muskovit*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1978.
- [Iro80] Irouschek, A. Zur Verbreitung von Cordierit im zentralen Lepontin. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 60:137– 144, 1980.
- [Iro83] Irouschek, A. *Mineralogie und Petrographie von Metapeliten der Simano-Decke unter besonderer Berücksichtigung cordieritführender Gesteine zwischen Alpe Sponda und Biasca*. Dissertation, Universität Basel, 1983.
- [Jä70] Jäger, E. Rb-Sr systems in different degrees of metamorphism. *Eclogae geologicae Helveticae*, 63(1), 1970.
- [Jä73] Jäger, E. Die alpine Orogenese im Lichte radiometrischer Altersbestimmungen. *Eclogae geologicae Helveticae*, 66(1):11– 21, 1973.
- [Jä83] Jäger, E. Detailed history of tectonic movements in the Alps determined by cooling ages of minerals. 1983.
- [Jea81] Jeanbourquin, P. *Géologie et Pétrographie dans la région du Simplon*. Diplomarbeit, Université de Lausanne, 1981.
- [Jen69] Jenni, J.-P. *Die Minerallagerstätten in der NW-Flanke des Bristenstocks*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1969.
- [JF59] Jäger, E. and Faul, H. Age measurements on some granites and gneisses from the Alps. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 70, 1959.
- [JGN<sup>+</sup>61] Jäger, E., Geiss, J., Niggli, E., Streckeisen, A., Wenk, E., and Wüthrich, H. Rb-Sr Alter an Gesteinsglimmern der Schweizer Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 41(2):255– 272, 1961.
- [JNW67] Jäger, E., Niggli, E., and Wenk, E. Rb-Sr Altersbestimmungen an Glimmern der Zentralalpen. *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, NF134:1– 67, 1967.
- [Joo69] Joos, M. G. *Zur Geologie und Petrographie der Monte Giove-Gebirgsgruppe im östlichen Simplon-Gebiet (Novara, Italien)*. Dissertation, Universität Basel, 1969.
- [Kä28] Känel, F. *Die Arsenkieslagerstätte von Salanfe (Kt. Wallis)*. Dissertation, Universität Bern, 1928.
- [Kaj73] Kajel, L. *Geologisch-mineralogische Untersuchungen an Karbonvorkommen im westlichen und nördlichen Aarmassiv*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1973.
- [Kam92] Kamber, B. *Die Gesteine zwischen Nufenenpass (VS/TI) und Griespass (CH/I)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1992.
- [KBN87] Klaper, E. and Bucher-Nurminen, K. Alpine metamorphism of pelitic schists in the Nufenen Pass area, Lepontine Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 5:175– 194, 1987.
- [Kel68] Keller, F. *Mineralparagenesen und Geologie der Campo Tencia - Pizzo Forno - Gebirgsgruppe*. Dissertation, 1968.
- [Ker47] Kern, R. *Zur Petrographie des Centovalli (Tessin, Schweiz)*. Dissertation, ETH Zürich, 1947.
- [Keu71] Keusen, H.-R. *Untersuchungen über die Metamorphose der basischen und ultrabasischen Gesteine vom Geisspfadpass (passo della rossa)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1971.
- [Keu72a] Keusen, H. *Mineralogie und Petrographie des metamorphen Ultrabasit-Komplexes vom Geisspfad (Penninische Alpen)*. Dissertation, Universität Bern, 1972.

- [Keu72b] Keusen, H. Mineralogie und Petrographie des metamorphen Ultrabazit-Komplexes vom Geisspfad (Penninische Alpen). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 52:385– 478, 1972.
- [KG75] Köppel, V. and Grünenfelder, M. Concordant U-Pb ages of monazite and xenotime from the central alps and the timing of high temperature alpine metamorphism, a preliminary report. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:129– 132, 1975.
- [KGG81] Köppel, V., Günthert, A., and Grünenfelder, M. Patterns of U-Pb Zircon and Monazite ages in Polymetamorphic Units of the Swiss Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 61:97– 119, 1981.
- [Kla80] Klaper, E. *Strukturen, Deformation und Metamorphose in der nördlichen Maggia-Zone*. Diplomarbeit, Universität Zürich, 1980.
- [Kla82] Klaper, E. M. Deformation und Metamorphose in der nördlichen Maggia-Zone. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:47– 76, 1982.
- [Kla85] Klaper, E.-M. *Deformation History and Metamorphic Mineral Growth along the Pennine Frontal Thrust (Wallis, Ticino), Switzerland*. Dissertation, ETH Zürich, 1985.
- [Kla86] Klaper, E. Deformation und Metamorphose im Gebiet des Nufenenpasses, Lepontinische Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:115– 128, 1986.
- [Kla90] Klaper, E. A discussion of contour maps in the Toce subdome of the pennine realm (Switzerland, Italy). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 70:349– 360, 1990.
- [Kle76a] Klein, H. H. Alumosilikatführende Knauern im Lepontin. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:435– 456, 1976.
- [Kle76b] Klein, H. H. Metamorphose von Peliten zwischen Rheinwaldhorn und Pizzo Paglia (Adula- und Simanodecke). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:457– 479, 1976.
- [KLR78] Kissling, E., Labhart, T., and Rybach, L. Radiometrische Untersuchungen am Rotondogranit. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 58:357– 388, 1978.
- [Koc82] Koch, E. *Mineralogie und plurifazielle Metamorphose der Pelite in der Adula-Decke (Zentralalpen)*. Dissertation, Universität Basel, 1982.
- [Kra70] Kramers, J. D. *Gantergneis und Eistengneiss zwischen Gantertal und Heiligkreuz, Monte-Leone-Decke*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1970.
- [Kre83] Kretz, R. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68:277– 279, 1983.
- [Kü74] Küpfer, T. *Zur Geologie und Petrographie der nördlichen Val Punteglias*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1974.
- [Kub83] Kubli, T. *Geologie und Petrographie der Fornoserie im unteren Val Forno*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1983.
- [Kun88] Kunz, M. *Mineralogisch-petrographische Untersuchungen am Westhang des Pizzo di Claro. – Atomare Auslenkungsparameter von Feldspäten mit unterschiedlichem Si/Al-Ordnungsgrad*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1988.
- [Kup77] Kupferschmid, C. *Geologie auf der Lugnezer Seite der Piz Aul-Gruppe*. Dissertation, Universität Bern, 1977.
- [Lab65] Labhart, T. P. *Petrotektonische Untersuchungen am Südrand des Aarmassivs nördlich Naters (Wallis, Schweiz)*. Dissertation, Universität Bern, 1965.
- [Lar81] Lardelli, T. *Die Tonalelinie im unteren Veltlin*. Dissertation, Universität Zürich, 1981.
- [Lau83] Laubscher, H. Detachment, shear and compression in the central alps. *Geol. Soc. Am. Memoir*, 158:191– 211, 1983.
- [Led43] Ledermann, H. *Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Schieferhülle des zentralen Aaregranits im obern Lötschental (westliches Aarmassiv)*. Dissertation, Universität Bern, 1943.
- [Leu86a] Leu, W. Lithostratigraphie und Tektonik der nordpenninischen Sedimente in der Region Bedretto - Baceno - Visp. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 79:769– 824, 1986.
- [Leu86b] Leu, W. *Die Penninischen Sedimente in der Region Bedretto-Baceno-Visp*. Dissertation, Universität Bern, 1986.
- [LG88] Liniger, M. and Guntli, P. Bau und Geschichte des zentralen Teils der Margna-Decke. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 68:41– 54, 1988.
- [Lie92] Lieberman, J. *GridLoc v.1.3. Phase Diagram Plotting Program for Macintosh Computers*, 1992.
- [Lin87] Liniger, M. *Geologie und Petrographie der Margna südlich des Silsersees, Oberengadin*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1987.
- [LN66] Liskay-Nagy, M. Geologie der Sedimentbedeckung des südwestlichen Gotthard-Massivs im Oberwallis. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 58:901– 965, 1966.
- [Lö81] Löw, S. *Strukturelle und petrographische Beobachtungen im zentralen Teil der Adula-Decke westlich von San Bernadino (GR/Schweiz)*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1981.

- [Lö85] Löw, S. Struktur der Adula-Stirn: Feldbeobachtungen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 65:123– 125, 1985.
- [Lö86] Löw, S. Ein tektono-metamorphes Entwicklungsmodell der nördlichen Adula-Decke. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:129– 134, 1986.
- [Lö87] Löw, S. Die tektono-metamorphe Entwicklung der Nördlichen Adula-Decke (Zentralalpen, Schweiz). *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, 161, 1987.
- [LP91] Lieberman, J. and Petrakakis, K. TWEEQU Thermobarometry: Analysis of Uncertainties and Applications to Granulites from Western Alaska and Austria. *Canadian Mineralogist*, 29:857– 887, 1991.
- [Lü65] Lüthy, H. *Geologie der gotthardmassivischen Sedimentbedeckung und der penninischen Bündnerschiefer im Blinnental, Rappental und Binntal (Oberwallis)*. Dissertation, Universität Bern, 1965.
- [Mar84] Marthaler, M. Géologie des unités penniniques entre le val d'Anniviers et le val de Tourtemagne (Valais, Suisse). *Eclogae geologicae Helvetiae*, 77(2):395– 448, 1984.
- [Mas86] Mason, R. *Petrology of the Metamorphic Rocks*. George Allen & Unwin, London, 1986.
- [Mat80] Matthes, M. *Zur Geologie des Simplonpassgebietes*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1980.
- [Mer79] Mercolli, I. *Le inclusioni fluide nei noduli di quarzo dei marmi dolomitici della regione del Campolungo (Ticino)*. Dissertation, ETH Zürich, 1979.
- [Mer80] Mercolli, I. Fluor-Verteilung in Tremolit und Talk in den metamorphen Dolomiten des Campolungo (Tessin) und ihre phasenpetrologische Bedeutung. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 60:31– 44, 1980.
- [Mer82] Mercolli, I. Le inclusioni fluide nei noduli di quarzo dei marmi dolomitici della regione del Campolungo (Ticino). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:245– 312, 1982.
- [Mer85] Merz, C. *Minéralogie et pétrographie de la région de Valle di Campo (Versant Nord entre le Batnall et le Pizzo Dei Croselli)*. Lizentiatsarbeit, Université de Lausanne, 1985.
- [Mil65a] Milnes, A. Structure and history of the Antigorio nappe (Simplon Group, North Italy). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 45(1):167– 177, 1965.
- [Mil65b] Milnes, A. G. *Structure and History of the Antigorio Nappe (Simplon Group, North Italy)*. Dissertation, Universität Basel, 1965.
- [Mil74a] Milnes, A. Post-nappe folding in the northern lepontine alps. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 67:333– 348, 1974.
- [Mil74b] Milnes, A. Structure of the Pennine Zone (Central Alps): a new working hypothesis. *Mitt. a. d. Geol. Inst. d. ETH u. Uni. Zürich*, 203, 1974.
- [Mil74c] Milnes, A. Structure of the Pennine Zone (Central Alps): a new working hypothesis. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 85(2):1727–1732, 1974.
- [Mil76a] Milnes, A. Note on the modal composition of the antigorio gneiss (Lepontine Alps, Northern Italy). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:101– 103, 1976.
- [Mil76b] Milnes, A. Strukturelle Probleme im Bereich der Schweizer Geotraverse - das Lukmanier-Massiv. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:615– 618, 1976.
- [Mil78] Milnes, A. Structural zones and continental collision, central alps. *Tectonophysics*, 47:369– 392, 1978.
- [Min31] Minder, W. *Beiträge zur Petrographie des mittleren Aarmassivs. Tektonisch-petrographische Studien im Zentralgranit des Haslitales*. Dissertation, Universität Bern, 1931.
- [Mö69] Möckel, J. Structural Petrology of the garnet peridotite of Alpe Arami (Ticino), Switzerland. *Leidse geologische mededelingen*, 42:61– 130, 1969.
- [MO88] Mercolli, I. and Oberhänsli, R. Variscan tectonic Evolution in the Central Alps: a working hypothesis. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 68:491– 500, 1988.
- [Mor81] Morand, P.-C. *Geologisch-Petrographische Untersuchungen im südlichen Bergell: 1. Val Porcellizzo (Prov. Sondrio, N-Italien)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1981.
- [Mor85] Morariu, D. *Deformation und Metamorphose der mesozoischen Metasedimente am West- und Südrand des Aarmassivs (Leukerbad-Ausserberg)*. Dissertation, Universität Basel, 1985.
- [Mou73] Moussalli, H. *Bestimmung der Gitterkonstanten von Hellglimmer in den Tessiner Alpen. Abhängigkeit des Parameters b vom Metamorphosegrad*. Diplomarbeit, Universität Basel, 1973.
- [MP80] Milnes, A. and Pfiffner, O. Tectonic evolution of the Central Alps in the cross section St. Gallen-Como. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73(2):619– 633, 1980.
- [MS78] Milnes, A. and Schmutz, H. Structure and history of the Suretta nappe - (Pennine zone, Central Alps) - a field study. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 71(1):19– 23, 1978.
- [MST87] Mercolli, I., Skippen, G., and Trommsdorff, V. The tremolite veins of Campolungo and their genesis. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67:75– 84, 1987.

- [Mü58a] Müller, R. *Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Adula (Ein Beitrag zur Kenntnis der Phengitgneisse, Paragneisse, Amphibolite und Migmatite)*. Dissertation, Universität Bern, 1958.
- [Mü58b] Müller, R. O. *Petrographische Untersuchungen in der nördlichen Adula*. Dissertation, Universität Bern, 1958.
- [Mü86] Mützenberg, S. *Petrographische und Strukturelle Untersuchungen am Bergell Nordostrand, südlich Maloja*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1986.
- [Mul79] Mullis, J. The system methane-water as geologic thermometer and barometer from the external part of the Central Alps. *Bull. Mineral.*, 1979.
- [Mur86] Muralt, R. *Mineralogisch-geologische Untersuchungen in der Adula-Decke am Nordhang des San Bernadino-Passes. (Graubünden, Schweiz)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1986.
- [Nab76] Nabholz, W. Die Bündnerschiefer im Alpen-Querprofil durch das Tessin. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:605– 613, 1976.
- [Nei48] Neidinger, E. A. *Petrographische Untersuchungen im oberen Lauterbrunnental (Berne Oberland)*. Dissertation, Universität Bern, 1948.
- [Nie31] Niederer, J. *Beiträge zur Petrographie des östlichen Aarmassivs. Petrographisch-geologische Untersuchungen im Gebiete zwischen dem Val Clavaniev und dem Val Milar im Bündner Oberland*. Dissertation, Universität Bern, 1931.
- [Nig60] Niggli, E. Mineral-Zonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen. *Int. geol. Congr. Copenhagen, Rep. 21st Sess. Norden*, 13:132– 138, 1960.
- [Nig65] Niggli, C. R. *Petrographie und Petrogenese der Migmatite und Gneise im südlichen Aarmassiv zwischen Obergesteln und Furkapass*. Dissertation, Universität Bern, 1965.
- [Nig70] Niggli, E. Alpine Metamorphose und alpine Gebirgsbildung. *Fortschritte der Mineralogie*, 47:16– 26, 1970.
- [NN65] Niggli, E. and Niggli, C. Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen (Stilpnomelan, Alkali/Amphibol, chloritoid, Staurolith, Disthen, Sillimanit). *Eclogae geologicae Helvetiae*, 58:335– 368, 1965.
- [Obe80] Oberhänsli, R. P-T Bestimmungen anhand von Mineralanalysen in Eklogiten und Glaukophaniten der Ophiolite von Zermatt. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 60:215– 235, 1980.
- [Obe85] Oberhänsli, R. *Mineralogy and Geochemistry of Meta-Lamprophyres from the central swiss alps*. Habilitationsschrift, Universität Bern, 1985.
- [Obe86] Oberhänsli, R. Geochemistry of meta-lamprophyres from the Central Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:315– 342, 1986.
- [Obe87] Oberhänsli, R. Mineralogy and Alpine metamorphism of metalamprophyres from the Central Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67:321– 338, 1987.
- [Osc86] Oschidari, H. *Mineralogisch-petrographische und geochemische Untersuchungen am Südrand des Aarmassivs zwischen Oberwald und Ulrichen*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1986.
- [OSM88] Oberhänsli, R., Schenker, F., and Mercolli, I. Indications of Variscan nappe tectonics in the Aar Massif. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 68:509– 520, 1988.
- [Ott81] Ottiger, R. *Geologie der Chummehornregion*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1981.
- [Par89] Parthier, U. Ingres – Datenbank-Management der Zukunft. *Chip Special*, 1989.
- [PCG89] Pfeifer, H., Colombi, A., and Ganguin, J. Zermatt-Saas and Antrona Zone: A petrographic and geochemical comparison of polyphase metamorphic ophiolites of the West-Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 69(2):217– 236, 1989.
- [PD85] Petrakakis, K. and Dietrich, H. MINSORT: Formula and endmember calculation and sort of microprobe analyses of common silicates and oxide minerals. *Neues Jahrbuch der Mineralogie. Mh.*, 8:379– 384, 1985.
- [Per83] Peretti, A. *Geologie und Petrographie der Fornoserie: Piz dei Rossi*. Diplomarbeit, Universität Zürich, 1983.
- [Per85] Peretti, A. Der Monte del Forno-Komplex am Bergell-Ostrand: seine Lithostratigraphie, alpine Tektonik und Metamorphose. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 78(1):23– 48, 1985.
- [Pet63] Peters, T. *Mineralogie und Petrographie des Totalpserpentins bei Davos*. Dissertation, Universität Bern, 1963.
- [Pet68] Peters, T. Distribution of Mg, Fe, Al, Ca and Na in Coexisting Olivine, Orthopyroxene and Clinopyroxene in the Totalp Serpentinite (Davos, Switzerland) and in the Alpine Metamorphosed Malenco Serpentinite (N. Italy). *Contrib Mineral Petrol*, 18:65– 75, 1968.
- [Pfi91] Pfiffner, O. Crustal shortening of the alps along the EGT profile. 1991.
- [PFV<sup>+</sup>90] Pfiffner, O., Frei, W., Valasek, P., Stäubli, M., Levato, L., Du Bois, L., Schmid, S., and Smithson, S. Crustal shortening in the alpine orogen: results from deep seismic reflection profiling

- in the eastern swiss alps, line NFP 20-East. *Tectonics*, 9(6):1327–1355, 1990.
- [Phi82] Phillip, R. *Geologie und Petrographie der Bernina (VI: Grevasalvas - Lunghin)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1982.
- [PJ76] Purdy, J. and Jäger, E. K-Ar-ages on rockforming minerals from the central alps. *Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova*, 30:1– 30, 1976.
- [PK86] Peretti, A. and Köppel, V. Geochemical and lead isotope evidence for a mid-ocean ridge type mineralization within a polymetamorphic ophiolite complex (Monte del Forno, North Italy/Switzerland). *Earth and Planetary Science Letters*, 80:252– 264, 1986.
- [PS86] Press, F. and Siever, R. *Earth*. W.H. Freeman and Company, New York, 4 edition, 1986.
- [PS87] Peters, T. and Stettler, A. Radiometric age, thermobarometry and mode of emplacement of the Totalp peridotite in the Eastern Swiss Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 67:285– 294, 1987.
- [PSW74] Poty, B., Stalder, H., and Weisbrod, A. Fluid Inclusions Studies in Quartz from Fissures of Western and Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 54:717– 752, 1974.
- [RA79] Ramsay, J. and Allison, I. Structural analysis of shear zones in an alpinised Hercynian Granite (Maggia Lappen, Pennine Zone, Central Alps). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 59:251– 279, 1979.
- [Raz77] Raz, U. *Metamorphose und Strukturen im Gebiet des Scersen inferiore*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1977.
- [Reu87] Reusser, E. *Phasenbeziehungen im Tonalit der Bergeller Intrusion (Graubünden, Schweiz/-Provinz Sondrio, Italien)*. Dissertation, ETH Zürich, 1987.
- [Rin92] Ring, U. The Alpine geodynamic evolution of Penninic nappes in the eastern Central Alps: geothermobarometric and kinematic data. *Journal of Metamorphic Geology*, 10:33– 53, 1992.
- [Ros69] Rosenfeld, J. Stress effects around quartz inclusions in almandine and the piezothermometry of coexisting aluminium silicates. *American Journal of Science*, 267:317– 351, 1969.
- [SB71] Steck, A. and Burri, G. Chemismus und Paragenesen von Granaten aus Granitgneisen der Grünschiefer- und Amphibolitfazies der Zentralalpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 51:534– 538, 1971.
- [Sch84a] Schaltegger, U. *Geologie und Petrographie der Gneiszone von Erstfeld in der Umgebung des Sustenpasses, Aarmassiv (Kt. Uri/Bern)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1984.
- [Sch84b] Schmutz, L. *Mineralbildende Prozesse an einer Erzlagerstätte im Val d’Anniviers (Wallis, Schweiz)*. Dissertation, Universität Basel, 1984.
- [Sch86a] Schaltegger, U. Voralpine und alpine Mineralbildung in der Gneiszone von Erstfeld (Sustenpass, Aarmassiv); der Mechanismus der K-Ar- und Rb-Sr-Verjüngung alpin umgewandelter Biotite. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 66:395– 412, 1986.
- [Sch86b] Schenker, F. *Spätpaläozoischer saurer Magmatismus und Beckenbildung im Aarassiv unter kompressiver Tektonik*. Dissertation, Universität Bern, 1986.
- [Sch88] Schmidt, M. *Petrographie der Ganna Rossa und Strukturen in der Zone von Bellinzona*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1988.
- [Sch89a] Schaltegger, U. *Geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen am zentralen Aaregranit und seinen assoziierten Gesteinen zwischen Aare und Reuss (Aarmassiv, Schweiz)*. Dissertation, Universität Bern, 1989.
- [Sch89b] Schmidt, M. W. Petrography and structural evolution of ophiolitic remnants in the Bellinzona Zone, Southern Steep Belt, Central Alps (CH/I). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 69:393– 405, 1989.
- [Sha69] Sharma, R. On Banded Gneisses and Migmatites from Lavertezzo and Rozzera (Valle Verzasca, Canton Ticino). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 49:199– 276, 1969.
- [SHS68] Schwander, H., Hunziker, J., and Stern, W. Zur Mineralchemie von Hellglimmern in den Tessiner Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 48(2):357– 390, 1968.
- [Sib71] Sibbald, T. *The structural and metamorphic geology of the Val Piora region, Ticino, Switzerland*. Dissertation, Imperial College, London, 1971.
- [Sie84] Siegenthaler, R. *Alter und Geochemie von Glimmern und Feldspäten*. Dissertation, Universität Bern, 1984.
- [Sim81] Simpson, C. *Ductile shear zones: a mechanism of rock deformation in the Orthogneiss of the Maggia-Nappe, Ticino*. Dissertation, ETH Zürich, 1981.
- [Sim82] Simpson, C. The structure of the northern lobe of the Maggia nappe, Ticino, Switzerland. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 75(3):495– 516, 1982.
- [SJ81] Steinitz, C. and Jäger, E. Rb-Sr and K-Ar studies on rocks from the Suretta Nappe; Eastern Switzerland. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 61(1):121– 131, 1981.

- [SO87] Stille, P. and Oberhänsli, R. Petrology and Alpine metamorphic evolution of the metabasic and ultrabasic rocks in the Berisal crystalline complex (Switzerland). *Lithos*, 20:169– 180, 1987.
- [SO91] Staps-Ohnmacht, P. *Phasenpetrologie und  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Isotopenchemie der Metapelite des Lucomagno-Komplexes (Zentralalpen)*. Dissertation, Universität des Saarlandes, 1991.
- [Soo86] Soom, M. *Geologie und Petrographie von Ausserberg (VS) – Kluftmineralisationen am Südwestrand des Aarmassivs*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1986.
- [Soo90] Soom, M. *Abkühlungs- und Hebungsgeschichte der Externmassive und der penninischen Decken beidseits der Simplon-rhone-Linie seit dem Oligocän: Spaltspurendatierung an Ap-Zir und K/Ar-Datierungen an Bi/Mu (Westliche Zentralalpen)*. Dissertation, Universität Bern, 1990.
- [Spr83] Spry, A. *Metamorphic Textures*. Pergamon Press, 1983.
- [St'78] Stäuble, J. *Metamorphose und Strukturen der Cima Lunga Serie (II Val d'Agro)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1978.
- [Ste64] Steiger, R. Dating of orogenic phases in the central alps by K-Ar ages of hornblende. *Journal of Geophysical Research*, 69:5407–5421, 1964.
- [Ste66a] Steck, A. *Petrographische und tektonische Untersuchungen am Zentralen Aaregranit und seinen altkristallinen Hüllgesteinen im westlichen Aarmassiv im Gebiet Belalp-Grisighorn*. Dissertation, Universität Bern, 1966.
- [Ste66b] Stern, W. Zur Mineralchemie von Glimmern aus Tessiner Pegmatiten. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 46(1):137– 188, 1966.
- [Ste69] Stern, W. Nachträge und Korrekturen zu Mineralchemischen Daten von Glimmern aus den Tessiner Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 49:341– 343, 1969.
- [Ste78] Steck, A. Albit-Oligoklas-Mineralgesellschaften der Peristeritlücke aus alpinmetamorphen Granitgneisen des Gotthardmassivs. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:269– 292, 1978.
- [Ste80] Steiner, H. *Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Gesteinen des Maggia-Lappens (Ostende des Val Sambuco, Ticino)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1980.
- [Ste84a] Steiner, H. Mineralogisch-petrographische, geochemische und isotopengeologische Untersuchungen an einem Meta-Lamprophyr und seinem granodioritischen Nebengestein (Matorello-Gneiss) aus der Maggia-Decke. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 64:261– 271, 1984.
- [Ste84b] Steiner, H. Radiometrische Altersbestimmungen an Gesteinen der Maggia-Decke (Penninikum der Zentralalpen). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 64:227– 259, 1984.
- [Ste84c] Steiner, H. *Radiometrische Altersbestimmungen an Gesteinen der Maggia-Decke*. Dissertation, Universität Bern, 1984.
- [Sti75] Stille, P. *Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an den Gesteinen des Berisalkomplexes (Steinental, Alpe Veglia): geochemische Untersuchungen an den Amphiboliten, radiometrische Altersbestimmungen an den Berisal-Augengneisen*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1975.
- [Sto86] Stonebreaker, M. *The INGRES Papers: Anatomy of a Relational Database System*. Addison-Wesley, 1986.
- [Str62] Strohbach, H. *Der mittlere Abschnitt der Tambodecke samt seiner mesozoischen Unterlage und Bedeckung. Geologische, Petrographische und morphologische Untersuchungen und Betrachtungen zw. Mesocco (GR) und Campodolcino (I)*. Dissertation, ETH Zürich, 1962.
- [Sua83] Suana, M. *Die Manganerzlagerstätten von Tinizong (Oberhalbstein, Graubünden)*. Dissertation, Universität Bern, 1983.
- [SW67] Schwander, H. and Wenk, E. Studien mit der Röntgenmikrosonde an basischen Plagioklasen alpiner Metamorphite. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 47:225– 234, 1967.
- [SW90] Smith, W. and Wessel, P. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55:293– 305, 1990.
- [TE69] Trommsdorff, V. and Evans, B. The stable Association Enstatite-Forsterite-Chlorite in Amphibolite Facies Ultramafics of the Lepontine Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 49(2):325– 332, 1969.
- [TE72] Trommsdorff, V. and Evans, B. W. Progressive metamorphism of antigorit schists in the Bergell Tonalite aureole (Italy). *American Journal of Science*, 272:423– 437, 1972.
- [TE74] Trommsdorff, V. and Evans, B. Alpine Metamorphism of Peridotitic Rocks. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 54:333– 352, 1974.
- [TE77] Trommsdorff, V. and Evans, B. Antigortite-Ophicarbonates: Contact Metamorphism in Valmalenco, Italy. *Contrib Mineral Petrol*, 62:301– 312, 1977.
- [TE84] Thompson, A. and England, P. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Journal*

- of *Petrology*, 25:929– 955, 1984.
- [TER75] Trommsdorff, V., Evans, B., and Richter, W. Eklogit/Rodingit-Uebergänge in Ultramafititen der Cima-Lunga-Serie. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 55:572– 574, 1975.
- [Teu79] Teutsch, R. *Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Gesteinen der Adula-Decke im Gebiet der Alp d' Arbeola (Mesocco/GR)*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1979.
- [Teu82] Teutsch, R. *Alpine Metamorphose der Misozer Zone (Bündnerschiefer, Metabasite und granitische Gneise)*. Dissertation, Universität Bern, 1982.
- [Tha71] Thakur, V. *The structural and metamorphic history of the mesozoic and pre-mesozoic basement rocks of the Molare region*. Dissertation, Imperial College, London, 1971.
- [The82] Thelin, P. *Les Gneiss oeilles de la nappe du Grand-St-Bernard: essai d'évaluation des critères susceptibles d'en préciser l'hérédité pré-metamorphique Vol 1: Critères structuraux, texturaux et minéralogiques*. Dissertation, Université de Lausanne, 1982.
- [The83] Thelin, P. Cadre évolutif des événements magmatico-métamorphique du socle ante-triasique dans le domaine pennique (Valais). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 63:393– 420, 1983.
- [Tho76a] Thompson, A. Mineral reactions in pelitic rocks: II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. *American Journal of Science*, 276:425– 454, 1976.
- [Tho76b] Thompson, P. Isograd patterns and pressure-temperature distribution during regional metamorphism. *Contrib Mineral Petrol*, 57:277– 295, 1976.
- [Tho90] Thoenen, T. *Lukmanier-Pass area (Central Alps, Switzerland)*. Unveröffentl. Daten, 1990.
- [Tr"80] Trümpy, R. *Geology of Switzerland – a guide book*. Wepf & Co. Publishers, Basel, New York, 1980.
- [Tro66a] Trommsdorff, V. Beobachtungen zur Paragenese Forsterit (Klinohumit, Chondrit) - Klinochlor in metamorphen Dolomitgesteinen des Lepontins. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 46(2):421– 430, 1966.
- [Tro66b] Trommsdorff, V. Progressive Metamorphose kieseliger Karbonatgesteine in den Zentralalpen zwischen Bernina und Simplon. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 46:431– 460, 1966.
- [Tro68] Trommsdorff, V. Mineralreaktionen mit Wollastonit und Vesuvian in einem Kalksilikatfels der alpinen Disthenzone (Claro, Tessin). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 48(3):655– 666, 1968.
- [Tro72] Trommsdorff, V. Change in T-X during Metamorphism of Siliceous Dolomitic Rocks of the Central Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 52:567– 571, 1972.
- [TSU85] Trommsdorff, V., Skippen, G., and Ulmer, P. Halite and sylvite as solid inclusions in high-grade metamorphic rocks. *Contrib Mineral Petrol*, 89:24– 29, 1985.
- [Val83] Valenti, G. *Geologia e Petrographia della Zona di Bosco Gurin (TI)*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1983.
- [Van59] Vanderplas, L. Petrology of the Northern Adula region, Switzerland (with particular reference to glaucophane-bearing rocks). *Leidse geologische mededelingen*, 24(2):415– 602, 1959.
- [Vet90] Vetter, M. *Aufbau betrieblicher Informationssysteme mittels konzeptioneller Datenmodellierung*. B.G.Teubner Stuttgart, 1990.
- [VO91] Vance, D. and O'Nions, R. Constraints on prograde and retrograde Alpine thermal histories from precise garnet chronometry. *Terra Abstracts*, 3:436, 1991.
- [Vol76a] Voll, G. Recrystallization of quartz, biotite and feldspars from Erstfeld to Leventina nappe, swiss alps and its geological significance. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:641– 647, 1976.
- [Vol76b] Voll, G. Structural studies of the Valser Rhine Valley and Lukmanier region and their importance for the nappe structure of the Central Swiss alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:619– 626, 1976.
- [vR71] von Raumer, J. Das Mont-Blanc-Massiv-Alt kristallin im Bereich schwacher alpiner Metamorphose. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 51:193– 225, 1971.
- [VV76] Vogler, W. and Voll, G. Fabrics and Metamorphism from Tonalite, Granitic Augengneis and Tonale Series at the S-Margin of the Swiss Alps E of Bellinzona. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:635– 640, 1976.
- [VV81] Vogler, W. and Voll, G. Deformation and Metamorphism at the South-Margin of the Alps, East of Bellinzona, Switzerland. *Geologische Rundschau*, 70:1232–1262, 1981.
- [Wab86] Waber, N. *Mineralogie und Metamorphose in der nördlichen Lukmanier-Decke, Val Piora, Tessin*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1986.
- [Wal83] Walther, J. Description and interpretation of metamorphic phase relations at high pressure and temperature. 2. Metasomatic reaction between quartz and dolomite at Campolungo, Switzerland. *American Journal of Science*, 283(A):459– 485, 1983.
- [Web66] Weber, W. *Zur Geologie zwischen Chiavenna und Mesocco*. Dissertation, ETH und Universität Zürich, 1966.

- [Wen56] Wenk, E. Die lepontinische Gneissregion und die jungen Granite der Valle della Mera. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 49:251– 265, 1956.
- [Wen62] Wenk, E. Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 42:139– 151, 1962.
- [Wen63] Wenk, E. Klinohumit und Chondroit in Marmoren der Tessiner Alpen und der Disgrazia-Gruppe. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 43:287– 293, 1963.
- [Wen65] Wenk, E. Gefügestudie an Quarzknauern und -lagen der Tessiner Kulmination. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 45(2):467– 515, 1965.
- [Wen68] Wenk, E. Cordierit in Val Verzasca. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 48:455– 457, 1968.
- [Wen70] Wenk, E. Zur Regionalmetamorphose und Ultrametamorphose im Lepontin. *Fortschritte der Mineralogie*, 47:431– 460, 1970.
- [Wen82] Wenk, E. Tonalite und Granodiorite des Cocco-Zuges. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 62:77– 84, 1982.
- [Wen86] Wenk, H. R. Introduction to the Geology of the Bergell Alps with Guide for Excursions. *Jber. Natf. Ges. Graubünden*, 103:29– 90, 1986.
- [Wer80] Werner, D. Probleme der Geothermik im Bereich der Schweizer Zentralalpen. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 73:513– 525, 1980.
- [Wer86] Werner, D. Paleotemperatures in the central alps. - an attempt at interpretation. *Lecture notes in Earth Sciences*, 5, 1986.
- [Wie66] Wieland, H. *Zur Geologie und Petrographie der Valle Isorno (Novara, Italien)*. Dissertation, Universität Basel, 1966.
- [WK69] Wenk, E. and Keller, F. Isograde in Amphibolitserien der Zentralalpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 49:157– 198, 1969.
- [WKHR76] Werner, D., Köppel, V., Hännly, R., and Rybach, L. Cooling Models for the Lepontine Area (Central Swiss Alps). *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 56:661– 667, 1976.
- [WO89] Werner, D. and Okaya, N. Thermische und dynamische Modelle zur Hebungsgeschichte der Alpen. [abstract]. *NFP 20, Bulletin*, 8, 1989.
- [WRJ77] Wagner, G., Reimer, G., and Jäger, E. Cooling ages by apatite fission track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the central alps. *Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova*, 30, 1977.
- [WS91] Wessel, P. and Smith, W. Free software helps map and display data. *EOS Trans. AGU*, 72:445– 446, 1991.
- [WSHS63] Wenk, E., Schwander, H., Hunziker, J., and Stern, W. Zur Mineralchemie von Biotit in den Tessiner Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 43:435– 463, 1963.
- [WWW74] Wenk, H., Wenk, E., and Wallace, J. Metamorphic Mineral Assemblages in Pelitic Rocks of the Bergell Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 54:507– 554, 1974.
- [Wys29] Wyss, R. *Petrographisch-geologische Untersuchungen westlich der Grimsel im Finsteraarhorn-Lauteraarhorngebiet. Ein Beitrag zur Petrographie und Geologie des westlichen Aarmassivs*. Dissertation, Universität Bern, 1929.
- [Zeh87] Zehnder, C. *Informationssysteme und Datenbanken*. VdF an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken, 4 edition, 1987.
- [Zgr75] Zraggen, P. *Petrographische Untersuchungen im Altkristallin der Lauchernalp (NW Aarmassiv, Lötschental), insbesondere an Serpentiniten und verwandten Gesteinen*. Lizentiatsarbeit, Universität Bern, 1975.
- [Zin79] Zingg, A. J. *Metamorphose und Strukturen der Cima Lunga Serie*. Diplomarbeit, ETH Zürich, 1979.
- [ZW85] Zeitler, P. and Wijbrans, J. A reassessment appraised: comment on “hornblende K-Ar ages and the climax of tertiary metamorphism in the lepontine alps (south central switzerland): an old problem reassessed” by A. Deutsch and R.H. Steiger. *Earth and Planetary Science Letters*, 76:390– 392, 1985.



**Teil IV**  
**Anhang**



# Anhang A

## Tabellen

### A.1 Bisherige Temperaturabschätzungen

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik	
Gruf, Bergell					
[BND83]	Gruf-Komplex, östl. Penninische Alpen	600 - 650	3 - 4	T: Grt-Bt, Grt-Crd, 2 Feldspäte; P: An-Grs, Crd = Alm + Sil + Qtz, Opx-Grt	
[DBN84]	Gruf Komplex, SE Chiavenna		> 7	verschiedene Etappen auf P-T-Pfad; T: Grt-Bt, Sa-hAb-Solvus; P: Grt-Opx, Gleichgewichtsthermodynamik; in Granulit	
			830 ± 70		10 ± 2
			750 ± 100		5 ± 1
[Reu87]	Bergeller Tonalit		7.5 ± 1	Al-in-Hbl-Barometer im Tonalit	

Tab. A.1: Mesoalpine Metamorphose: Gruf, Bergell

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
Lukmaniergebiet				
[ACR75]	Lukmanierpassregion	515 ± 25	4.3	Piezobirefringent Halos von Quarzeinschlüssen in Granat
[Fis86, Fis88]	Bohrung, Sta. Maria, Lukmanierpass	460	5	Paragenese Mrg + Qtz + Cal + Czo + Pl, Kalkschiefer
		528 - 602 ± 50	5	Grt-Bt, Kalkschiefer
		547 - 566 ± 30	5	Cal-Dol, Kalkschiefer
[Fox74, Fox75, Fre75, Fre78]	Lukmanierpass, Piora-Mulde	500 - 550	5 (- 5.5)	verschiedene kalibrierte Mineralreaktionen und andere petrographische Daten, Piezobirefringent Halos von Quarzeinschlüssen in Granat
[Fre69]	Lukmaniergebiet	500 - 550		verschiedene kalibrierte Mineralreaktionen und andere petrographische Daten
[Obe85, Obe87]	südl. Aarmassiv, nördl. Gotthardmassiv, Penninische Decken		4 - 5	P: Phengitkomponente im Hellglimmer; T aus Frey et al. (1980); in Lamprophyren
	nördl. Aarmassiv, Ränder der Phengite aus Penninikum		2 - 3	
[SO91]	Lucomagno-Komplex	500 - 560	6 - 8	T: Grt-Bt; P: An-Grs
		500		T: Sauerstoffisotopen (Qtz-Bt/Qtz-Ms/Bt-Grt/Bt-Ms)
		680 - 730		T <sub>max</sub> : Sauerstoffisotopen (Qtz-Ilm/Qtz-Grt)
[Wab86]	nordwestl. Lukmanier-Decke	580	4.5 - 6	T: Grt-Bt P: verschiedene kalibrierte Mineralreaktionen
Olivone-nördl. V. Mesolcina (nördwestliche und mittlere Adula)				
[Bau82]	Alp de Confin	530	5	Meta-Ultrabasite und Granat-Diopsid-Kalzitmarmore
[BL83a]	Alp de Confin, mittlere Adula-Decke	530	5	Isobar invariante Paragenese Cal + Czo + Qtz + Pl + Di + Tr in Metamergeln
[Deu79]	Cima Sgiu, NW Adula-Decke	530	4.5 - 5	T: Fehlen von Fo + Tr (Reaktion: 5 Ant + 2 Di = Tr + 6 Fo + 9 H <sub>2</sub> O) und Koexistenz von St und Cld; P = Minimaldruck aus Auftreten von Disthen und Anwesenheit von Margarit + Quarz innerhalb der Staurolithzone; Serpentine und Rodingite
[Kle76b]	Olivone, oberstes Hinterrheintal-Olivone	500 - 550	> 5	Verschwinden von Chloritoid; Auftreten von Staurolith und Margarit innerhalb des Staurolithfeldes
[Lö81]	Alp d'Arbeola, westl. San Bernadino	540	5.1	verschiedene Mineralreaktionen

Tab. A.2: Mesoalpine Metamorphose: Lukmaniergebiet und Olivone-nördl. V. Mesolcina (nördwestliche und mittlere Adula)

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
Nufenen- und Bedrettoregion				
[Gru70]	Val Torta, westl. Pzo. di Naret	600		Cal-Dol-Thermometer
[GSS76]	Maggia-Lappen, südl. Gotthardmassiv	550 - 600	4 - 5	Mitt. Dr. M. Frey
[Kam92]	südlichstes Gotthardmassiv, Nufenenzone	470 ± 10	5.2 ± 0.2	Gleichgewichtsdiagramme, verschiedene Thermo- und Barometer; in Granatschiefern, Hornblendegarbenschiefern und Marmoren
	Cornoschuppe, nördlichste Bedrettozone	530 ± 10	6 ± 0.15	
[KBN87]	Nufenenpassgebiet	500	5 - 6	T: Grt-Bt, Bt-Ms-Chl-Qtz; P: An-Grs; in Metapeliten
	Morasco, südl. Nufenenpass	600	7 - 8	
[Kla80]	nördliche Maggia-Zone	550	4	T: Grt-Bt, P: An-Grs
[Kla82]	Cristallina, Naret, Bedretto	560 ± 40	6 - 7	T: Grt-Bt, Cal-Dol; P: An-Grs; in Marmoren, Kalkglimmerschiefern
[Kla85, Kla86]	Nufenenzone, Nufenenpassregion	450	5	T: Grt-Bt, Cal-Dol; P: Hbl + Ky, An-Grs, Bt + Ms + Chl
	nördl. Bedrettozone	480 - 520	6	
	südl. Bedrettozone	550 - 600	6.5 - 8	
Campolungo, Alpe Sponda, Leventina				
[ET74]	Guglia, Val d'Efra	600	< 7	Phasenübergang Tlc + En → Ath
[FBFM80]	Campo Tencia-Pizzo Forno	600 - 650	6 - 7	Paragenese Ms + Pg + Sil (Iroushchek, 1978), Sauerstoffisotopenthermometrie (Hoernes & Friedrichsen, 1980) und Stresseffekte um Quarzeinschlüsse in Granat (Rosenfeld, 1969; Adams et al., 1975)
[His77, His78]	Leventina Gneiss	550 - 650		chemisches und kristallstrukturelles Feldspatthermometer, homogenisierter Alkalifeldspat und röntgenographisch ermittelter Chemismus
[Iro83]	Alpe Sponda, Biasca	600 - 650	6 - 10	T: Grt-Bt; P: An-Grs
[Mer79, Mer82]	Campolungo	500	1.5	T: Cal-Dol; P: nach Abkühlmodell von Werner et al. (1976)
[Ros69]	Campolungo	600	8	Stresseffekte um Quarzeinschlüsse in Granat
[TSU85]	Campolungo	500		Halit- und Sylviteinschlüsse
[Wal83]	Campolungo	500	3.25	T: Cal-Dol; P: Zusammensetzung und Dichte von Flüssigkeitseinschlüssen; metasomatische Reaktionszonen im Dolomit

Tab. A.3: Mesoalpine Metamorphose: Nufenen- und Bedrettoregion, Campolungo, Alpe Sponda, Leventina

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
V. Calanca, südl. V. Mesolcina, V. Bodengo				
[ABLM85]	Soazza, V. Mesolcina	550 - 600	6 - 8	Paragenese Amp + Pl + Ep
[Bla72]	Valle Bodengo, Garzelli dome	670 ± 70		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Ms in Zweiglimmergneiss
	Valle Bodengo, Garzelli dome	400 ± 50		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Kfs im Biotit-Andesinschiefer
	Valle Bodengo, Soè-dome	650 ± 100		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Kfs im Zweiglimmergneiss
	Valle Bodengo	400 ± 50		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Kfs im Biotitgneiss
	Valle Bodengo	600 ± 100		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Kfs im Zweiglimmergranit
	Valle Bodengo	690 ± 80		Sauerstoffisotopen-Temperatur, Qtz-Ms im Zweiglimmergranit
[Koc82]	Rossa, Val Calanca	599 ± 35		T: Grt-Bt; P: An-Grs
	P. di Strega	595 ± 26		
	Torrone Alto	664 ± 33	9.5	
	Lostallo (V. Mesolcina)	643 ± 35	8.4	
	V. Bodengo	597 ± 22		
	V. Grono	645 ± 28	7.2	
	V. di Darenzo	631 ± 44	6.5	
[TE69]	Promegn, Val Cama, GR, östliche Lepontische Alpen	600 - 650	4	Magnetit-Chlorit-Enstatit-Forsterit- Schiefer
[Teu82]	nördl. Mesocco	500 - 550	6 ± 1	verschiedene Mineralreaktionen in peliti- schen Bündnerschiefern
	Passo della Forcola	600 - 660	6.8 ± 1	T: Grt-Bt, Cal-Dol; P: An-Grs; in peliti- schen Bündnerschiefern
[Tho76b]	Val Mesolcina	525 - 650	4 - 6	St-, Sil- und And-Isograde
[WWW74]	Val Bodengo, Zone von Bellinzona	650	6	verschiedene Mineralreaktionen
Region Bellinzona				
[Bü80, Bü81]	Corno di Gesero, Zone von Bellinzona	690		Grt-Bt; in Gneissen
[Ern77]	Alpe Arami	600 - 650	6 - 7	Phasengleichgewichte in Metapeliten und mafischen Gesteinen um Alpe Arami, sym- plektische und amphibolitische Paragenese im Eklogit
[Hei75]	Zone von Bellinzona, ca. 20 km östlich von Bellinzona	670 - 700	3.5 - 5	beginnende Anatexis, Kfs + Sil; in Metape- liten und granitoiden Gneissen
[Sch88, Sch89b]	Ganna Rossa, Zone von Bellinzona	690 - 730	6.5 - 8.5	T: Chl-Breakdown in Peridotit-Rodingit- Blackwall und Grt-Bt-Thermometer in Peridotit-Amphibolit-Blackwall, P: Auf- tauchen von Sil ± Ky

Tab. A.4: Mesoalpine Metamorphose: V. Calanca, südl. V. Mesolcina, V. Bodengo, Region Bellinzona

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
Doldenhorn, Aarmassiv				
[BB80, BB82a, BB82b]	verläuft parallel zum Aarmassiv, nördlich von Göschenen	450		Mc-Sa-Transformationsisograd
[Mor85]	West- und Südrand des Aarmassivs (Leukerbad-Ausserberg)	350 ± 30	≤ 3.5	T: Cal-Dol; P: Lws-Lmt-Übergang, tektonische Überdeckung
[Mul79]	Doldenhornregion	260 (T <sub>min</sub> )	1 - 2	Fluid inclusions in Fissure Quartz
[PSW74]	zentrales und südliches Aarmassiv	430	2.5-2.8	Fluid inclusions in alpinen Spaltenquarzen; Minimaldrucke
Brig, Simplon, Verampio, Binnental				
[BNFF83]	Simplonpass	480	4	Mrg-Qtz-Cal-out-Isograd in Bündnerschiefern
		520	7	
	5 km SE Simplonpass	520	4	Mrg-Qtz-out-Isograd in Bündnerschiefern
		590	7	
Bosco	620	7	Mrg-out-Isograd in quarz- und kalzitfreien Gesteinen	
[Fra79b]	Brig	400	3 - 4	T: Ms-Pg
	Steintal	450 - 480	4 - 5	T: Tr-Cal-Isograde, Ms-Pg; Druckabschätzung nach der Stabilität des Phengites in den granitischen Gneissen
	Kaltwasserpass	500 - 530	5 - 6	Erreichen der St-Isograde; Paragenese: Pg + Ky + Ab + Qtz; Stabilität von Mrg + Qtz
	Cairasca-Verampio	550 - 580	6	Kfs-Isograde; Instabil werden von Mrg + Qtz
[Fra83]	Simplonpass	520 - 550	6.5	Mrg-Qtz-Cal-out-Isograd in Bündnerschiefern; 4-Phasenparagenese Pg + Ky + Ab + Qtz; Grt-Bt
	Brig	400 - 420	2 - 3	T: Ms-Pg, Cal-Do; P: aus Poty et al. (1974)
	Crevola	580 - 620	6 - 8	verschiedene Thermo- und Barometer
[FS79]	Brig	400	2 - 4	verschiedene Thermo- und Barometer (Mineralreaktionen)
	Verampio	580 - 600	5 - 7	
[Hü88]	Binnental, Lerchtelinizone	500 - 520		Grt-Bt
[Keu72b, Keu72a]	Geisspfad-Ultramafitit	500 - 550	5	Grenze Grünschiefer-Amphibolitfazies, Di-sthenvorkommen

Tab. A.5: Mesoalpine Metamorphose: Doldenhorn, Aarmassiv, Brig, Simplon, Verampio, Binnental

Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
gesamtes Lepontin				
[Col88]	Antronapiana	550		Ti-Gehalt in Amp, Grt-Bt
	Locarno-Cardada	700		
	Bannio/Valle Anzasca	500		
	Arcegno-Locarno	600		
[Ham85]	südl. Aarmassiv	320 - 415		T: Grt-Bt, Grt-Phg, Mag-Ilm, 2-Feldspat; P: Si im Hgl, Paragenese Pl + Ms + Bt + Grt
	Berisal-Serie, Simplon	420 - 550	7 - 8	
	V. Vigizzo - V. Onsernone - Locarno	600 - 660	6.5 - 7.5	
	SE Adula-Decke	620 - 670	4	
[HF80]	Göschenen, Andermatt	460 - 530		Sauerstoffisotopen-Temperatur (Qtz-Bt-Paar, Qtz-Mag-Paar)
	Tremolaserie, südl. Gotthardmassiv	532 - 562 (550 ± 10)		Sauerstoffisotopen-Temperaturen
	Campo Blenio	450 - 490		
	Campolungogebiet	500 - 680 (630)		
	Alpe Sponda	660 - 670		
	Molare, Val Leventina	570 - 600		
	Val di Peccia	530 - 620		
	Val Antigorio	410 - 500		
	Visletto, Val Maggia	454 - 500		
	nördl. Rossa, Val Calanca	590 - 620		
	Val di Mera, Somaggia	700		
[Rin92]	Averser Bündnerschiefer/Surretta-Decke, nördl. Tambo-Decke	400	2 - 3	T: Auftauchen von Bt in Metagraniten; P: Si-Gehalt von Phg
	Valser Bündnerschiefer	450	5 - 6	Amp-, Chl- und Pl-Zusammensetzung
	nordöstl. Simano-Decke	550 - 700	5 - 8	T: Grt-Bt; P: Pl-Bt-Grt-Mst
[Tro66b]	Simplon	> 450		bekannte Gleichgewichtsdaten
	Zentrales Lepontin	550 - 600		
	Bergeller Alpen	700		
		570 - 620	3 - 5	Di-Cal-Isograd

Tab. A.6: Mesoalpine Metamorphose: gesamtes Lepontin

eoalpine Metamorphose				
Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
[Wab86]	nordwestl. Lukmanier-Decke	450 - 540	9 - 11	T,P: Reaktion $Mrg + Qtz = Ky1 + Zo + H_2O$ und $Mrg + Qtz = Ky + Zo$ , Si-Gehalt im Hgl, kein St
[Pet68]	Totalserpentinit, Davos	900 - 1400	10 - 20	Mg-Fe-Verteilung und Ca/Ca+Mg Verhältnisse von Ol, Cpx und Opx
[PS87]	Totalp Peridotit	830 - 975	$10 \pm 3$	T: Pyroxensolvus, Al-Gehalt von Opx in Lherzolithen; P: Al-Gehalt von Opx koexistierend mit Grt
[CD73]	Allalingabbro	500 - 700	10 - 15	Kristallisationsbedingungen; frühalpine eklogitische Paragenesen: $Ky + Chl + Tlc$ und $Zo + Ky + Qtz$
[Obe80]	Zermatt-Saas	400 - 700	10 - 16	T: Grt-Cpx, P: Jd-Komponente im Omp in Eklogiten und Glaukophaniten der Ophiolite
[ET78]	Cima di Gagnone	$800 \pm 50$	$> 20$	T: Pyroxensolvus; Fe-Mg-Austauschgleichgewichte zwischen Grt, Cpx, Opx und Ol in Granatlherzolith
[ETR79]	Cima di Gagnone	800	$\approx 25$	T: Grt-Cpx in Eklogiten, Metarodingiten
[Ern77]	Alpe Arami	965 - 1000	30 - 50	Grt-Cpx, 2-Pyroxene, Mineralphasengleichgewichte; in Eklogit
[Ern78]	Alpe Arami	$966 \pm 78$	$40 \pm 10$	T: verschiedene 2-Pyroxen-Thermometer; P: Lherzolitische petrogenetisches Grid, $Al_2O_3^{cpx}$ und $Al_2O_3^{opx}$ Isoplethen; in Lherzolith
[Lö86, Lö87]	nördl. Adula-Decke	380 - 450	6 - 8	Sorraeda, prograd
		470 - 540	12 - 15	Zapport 1, zunehmende Temperatur (Grt-Phng, Grt-Amp, Amp-Pl, Zo-An-Grs, Na[M4] in Amp)
		500	12 - 8	Zapport 2, isothermal (Grt-Phg, Grt-Amp, Amp-Pl, Zo-An-Grs, Na[M4] in Amp)
		500	7	Leis (Grt-Phg, Grt-Amp, Amp-Pl, Zo-An-Grs, Na[M4] in Amp)

Tab. A.7: Eoalpine Metamorphose

eoalpine Metamorphose				
Publ.	Lokalität	T °C	P [kbar]	Methodik
[Hei82]	Vals	450 - 550	9 - 13	T: Grt-Cpx; P: Jd-Gehalt des Cpx koexistierend mit Qtz, Al-Gehalt im Opx; in Eklogiten
	Trescolmen	> 550	> 15	
	Gagnone	> 650	> 15	
	Arami	> 800	> 20	
[Hei83]	Vals	450 - 550	11 - 13	
	Trescolmen, Confin	500 - 650	14 - 22	
	Gagnone	650 - 750	17 - 27	
	Arami, Duria	800 - 900	20 - 35	
[Hei86a]	Vals	450 - 550	10 - 13	
	Confin	450 - 550	12 - 22	
	Trescolmen	550 - 650	15 - 22	
	Gagnone	600 - 700	15 - 25	
	Arami, Duria	750 - 900	18 - 35	
[BLM85]	Groduno, westl. Bellinzona	720	16	T: Ordnungsgrad Cpx, Grt-Cpx; P: Omp-Gehalt im Cpx
[ABLM85]	Soazza, Val Mesolcina	≈ 675	10 - 13	verschiedene Etappen auf P-T-Pfad; T: Grt-Cpx; P: Jd-Gehalt im Cpx; in Eklogiten
		≈ 770 - ~700	≥ 15 - 10	
[Rin92]	Averser Bündnerschiefer	350 - 400	9 - >12	T: Grt-Phg; P: Celadonit-Substitution in Phg, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Gehalt von blauem Amp
	Suretta-Decke	380 - 420	8 - >10	
	nördl. Tambo-Decke	400 - 480	8 - 10	T: Grt-Phg, Grt-Hbl; P: Phg-Zusammensetzung in der Paragenese Bt + Kfs + Qtz + Phg
	Valser Bündnerschiefer	460 - 560	> 12	T: Grt-Hbl, Grt-Phg; P: Si-Gehalt im Phg

Tab. A.8: Eoalpine Metamorphose

## A.2 Verwendete Handstücke

Ref#	Probe	Gesteinsname	Koordinaten
Fis86	<b>MF1746</b>	Laminierter Schiefer	704.350/160.700
Fis86	<b>MF1755</b>	Laminierter Schiefer	704.350/160.700
IZ83	<b>AI349</b>	Cordieritgestein mit Paragonit	702.900/142.700
IZ83	<b>AI378</b>	Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer	702.200/143.300
IZ83	<b>AI405</b>	Granatfels	703.300/141.500
IZ83	<b>AI518</b>	Staurolith-Disthen-Glimmerschiefer mit Sillim.	708.800/137.200
KBN87	<b>183</b>	Biotit-reicher Granatschiefer	672.000/146.000
Kla82	<b>Fus46</b>	Hellglimmerschiefer	689.490/149.205
Kla82	<b>Fus70</b>	Kalkglimmerschiefer	689.490/149.200
Kla82	<b>Fus80b</b>	Plagioklasschiefer	690.700/149.200
Teu82	<b>RT140</b>	pelitischer Bündnerschiefer	742.800/132.125
Teu82	<b>RT150</b>	kalkiger Bündnerschiefer	743.120/131.860
Teu82	<b>RT159</b>	pelitischer Bündnerschiefer	743.950/131.560
Wab86	<b>NW142</b>	Biotit-Granat-Gneis	698.330/154.730
Wab86	<b>NW158</b>	Biotit-Gneis	698.330/154.730
Wab86	<b>NW33</b>	Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer	698.330/154.730
Wab86	<b>NW76</b>	Granat-Glimmer-Gneis	698.335/154.735
Wab86	<b>NW77</b>	Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer	698.335/154.735
Wab86	<b>NW79</b>	Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer	698.335/154.735
Wab86	<b>NW80</b>	Staurolith-Disthen-Granat-Glimmerschiefer	698.330/154.730
Kla85	<b>Nuf179</b>	Granat-Glimmerschiefer	670.500/146.300
Kla85	<b>Nuf189</b>	Granat-Glimmerschiefer	671.800/146.200
Kla85	<b>Nuf237</b>	Granat-Glimmerschiefer	671.100/142.700
Kla85	<b>Nuf242</b>	Granat-Glimmerschiefer	671.900/143.000
Kla85	<b>Nuf243</b>	Granat-Glimmerschiefer	672.600/143.300
Kla85	<b>Nuf244</b>	Granat-Glimmerschiefer	671.900/141.000
Kla85	<b>Nuf27</b>	Kalkglimmerschiefer	671.400/145.600
Tho90	<b>TT337</b>	Granat-Glimmerschiefer	707.050/155.750
Tho90	<b>TT379</b>	Granat-Glimmerschiefer	709.050/153.500
Tho90	<b>TT416</b>	Granat-Glimmerschiefer	706.850/154.150
Tho90	<b>TT479</b>	Granat-Glimmerschiefer	708.250/153.950
Tho90	<b>TT480</b>	Granat-Glimmerschiefer	708.250/153.950
Tho90	<b>TT513</b>	Granat-Glimmerschiefer	707.450/154.050
Koc82	<b>B367</b>	Glimmerschiefer	734.900/121.600
Koc82	<b>EK45</b>	granatführender Glimmerschiefer	744.500/116.800
Koc82	<b>EK50</b>	Granat-Disthen-Glimmerschiefer	746.400/126.600
Koc82	<b>KI185</b>	granatführender Glimmerschiefer	725.500/140.300
Koc82	<b>KI264</b>	Granat-Glimmerschiefer	729.700/151.800
Koc82	<b>KI285</b>	Granat-Glimmerschiefer	731.800/144.400
Koc82	<b>KI437</b>	Glimmerschiefer	724.800/133.300
Koc82	<b>KI98</b>	Granat-Glimmerschiefer	732.700/135.900
Koc82	<b>Th46</b>	Glimmerschiefer	736.800/130.300

Tab. A.9: Handstücke aus **PARADIS** mit lepontischen Paragenesen

Ref#	Probe	Gesteinsname	Koordinaten
Sch93	<b>DS10a</b>	Muscovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss	723.700/121.300
Sch93	<b>DS4</b>	Granat-Sillimanit-Biotit-Muscovit-Gneiss	729.700/122.230
Sch93	<b>DS5</b>	Granat-Disthen-Muscovit-Biotit-Gneiss	729.850/122.250
Sch93	<b>DS6</b>	Granat-Muscovit-Disthen-Biotit-Gneiss	729.350/133.350
Sch93	<b>DS7</b>	Granat-Disthen-Staurolith-Glimmerschiefer	702.775/142.200
Sch93	<b>DS8</b>	Disthen-Staurolith-Granat-Glimmerschiefer	703.525/142.038
Sta91	<b>10</b>	Metapelit	708.500/150.800
Sta91	<b>12</b>	Metapelit	708.100/151.900
Sta91	<b>121a</b>	Metapelit	695.500/156.100
Sta91	<b>133</b>	Metapelit	694.700/154.300
Sta91	<b>14</b>	Metapelit	707.700/152.500
Sta91	<b>25</b>	Metapelit	707.400/153.700
Sta91	<b>38</b>	Metapelit	695.000/154.200
Sta91	<b>59</b>	Metapelit	709.100/150.000
Sta91	<b>77</b>	Metapelit	694.900/152.800

Tab. A.10: Handstücke aus **BRADIS** mit lepontischen Paragenesen

Ref#	Probe	Gesteinsname	Koordinaten
Kam92	<b>BGR 2</b>	Hornblendegarbenschiefer, Nufenenzone	672.330/146.100
Kam92	<b>BGR 6</b>	Granat-Plagioklas-Quarz-Fels, Cornoschuppe	672.310/145.730
Kam92	<b>BGR 17</b>	Granat-Glimmergneis, Gotthardmassiv	672.910/147.310
Kam92	<b>BGR 19</b>	Granat-Glimmergneis, Gotthardmassiv	673.240/148.065
Kam92	<b>BGR 30</b>	Marg-Gr-Mu-Plag-Schiefer, Nufenenzone	672.250/146.135
Kam92	<b>BGR 36</b>	Hornblendegarbenschiefer, Nufenenzone	672.145/146.040
Kam92	<b>BGR 39</b>	Hornblendegarbenschiefer, Bedrettozone	671.330/145.005
Kam92	<b>BGR 55</b>	Para-Granat-Dolomitmarmor, Cornoschuppe	671.970/145.450
Kam92	<b>BGR 61</b>	Bündnerschiefer s.s., Bedrettozone	671.000/144.910
Kam92	<b>BGR 73</b>	Granatschiefer, Nufenenzone	672.190/146.595
Fra79	<b>EF 165</b>	Bündnerschiefer	652.100/128.900
Fra79	<b>EF 273</b>	Bündnerschiefer	648.800/122.710
Fra79	<b>EF 660</b>	Bündnerschiefer	660.981/119.402
Fra79	<b>EF 736</b>	Bündnerschiefer	652.260/117.550
Fra79	<b>EF 853</b>	Bündnerschiefer	649.912/115.260
Fra79	<b>EF 869</b>	Bündnerschiefer	668.905/119.702
Fra79	<b>EF 870</b>	Bündnerschiefer	668.904/119.702
Fra79	<b>EF 876</b>	Bündnerschiefer	668.905/119.700
Fra79	<b>EF 922</b>	Bündnerschiefer	666.931/113.101
Fra79	<b>EF 806</b>	Bündnerschiefer	655.641/125.310

Tab. A.11: Handstücke aus der Literatur mit lepontischen Paragenesen

### A.3 Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Resultate

Probe	T (Lit)	P (Lit)	T	P	$X_{H_2O}$	Kommentar
<b>MF1746</b>	510 ± 40		576	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>MF1755</b>	513 ± 35		566	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>AI518</b>	622 - 655	6500 - 9000	650	7893		Grt-Bt, An-Grs
<b>AI378</b>	595 ± 27	6800 - 9900	597	6500		Grt-Bt, P angenommen
<b>AI349</b>			560	6922	0.73	3 lin. unabh. R.
<b>AI405</b>	470 - 640		593	7089	0.80	3 (2) lin. unabh. R.
<b>183</b>	450 - 550	5000 - 6000	515	7535	0.70	3 (2) lin. unabh. R.
<b>Fus46</b>	560	6800	495	6946		Grt-Bt, An-Grs
<b>Fus70</b>	560	5400	625	6992		3 lin. unabh. R.
<b>Fus80b</b>	560	6800	569	6752		Grt-Bt, An-Grs
<b>RT140</b>	622		637	5585	0.93	3 (2) lin. unabh. R.
<b>RT159</b>	627	6800 ± 1000	610	6621	0.83	3 lin. unabh. R.
<b>RT150</b>	513		477	7000		Grt-Bt, P angenommen
<b>NW142</b>	481		574	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>NW158</b>			618	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>NW33</b>	577		591	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>NW76</b>			571	5835		3 lin. unabh. R.
<b>NW77</b>			578	8862		3 lin. unabh. R.
<b>NW79</b>	558		571	7039	0.59	3 (2) lin. unabh. R.
<b>NW80</b>			564	4793		Grt-Bt u. An-Grs
<b>Nuf179</b>	414 ± 27		498	5566		2 lin. unabh. R.
<b>Nuf189</b>	468		537	6405	0.80	3 (2) lin. unabh. R.
<b>Nuf237</b>	451 ± 30	8095 ± 591	468	6470		3 lin. unabh. R.
<b>Nuf242</b>	493 ± 30	5104 ± 645	536	5971		3 lin. unabh. R.
<b>Nuf243</b>	536 ± 43	7031 ± 445	589	7469		Grt-Bt, An-Grs
<b>Nuf244</b>	599 ± 35	5993 ± 34	633	7496		Grt-Bt, An-Grs
<b>Nuf27</b>	410 ± 25		517	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>TT416</b>			554	6348	0.67	3 lin. unabh. R.
<b>TT379</b>			577	8735	0.70	3 lin. unabh. R.
<b>TT337</b>			543	5971	0.68	4 (3) lin. unabh. R.
<b>TT480</b>			554	6859	0.71	3 lin. unabh. R.
<b>TT479</b>			555	7095	0.71	3 lin. unabh. R.
<b>TT513</b>			590	6431	0.78	3 lin. unabh. R.
<b>EK45</b>	631 ± 44	6500	620	4559		3 lin. unabh. R.
<b>EK50</b>	597 ± 22		789	7000		Grt-Bt, P angenommen
<b>Kl437</b>	664 ± 33	9500	663	8634		3 lin. unabh. R.
<b>Kl264</b>			626	6000		Grt-Cld, P angenommen
<b>Kl285</b>			639	6464		2 lin. unabh. R.
<b>Th46</b>	643 ± 35	8400	598	7897	0.79	3 lin. unabh. R.
<b>B367</b>	645 ± 28	7200	706	7020		3 lin. unabh. R.
<b>Kl185</b>	595 ± 26	7300	601	6362	0.65	5 (4) lin. unabh. R.
<b>Kl198</b>	599 ± 35		492	7871	0.60	4 (3) lin. unabh. R.

Tab. A.12: Gegenüberstellung der Drucke [bar] und Temperaturen [°C] aus der Literatur (Lit) und den mit PTAX berechneten inklusive  $X_{H_2O}$

Probe	T (Lit)	P (Lit)	T	P	$X_{H_2O}$	Kommentar
<b>DS4</b>			724	5500		Grt-Bt, P angenommen
<b>DS5</b>			696	5328	0.90	3 lin. unabh. R.
<b>DS7</b>			603	6363	0.75	3 lin. unabh. R.
<b>DS8</b>			608	5580	0.75	3 lin. unabh. R.
<b>DS6</b>			618	7404	0.66	3 lin. unabh. R.
<b>DS10a</b>			671	5594		3 lin. unabh. R.
<b>38</b>	450 - 540	10100 - 13800	561	9382	0.68	5 lin. unabh. R.
<b>133</b>	540		545	6000		Grt-Bt, P angenommen
<b>25</b>	561	7900	575	7829	0.68	3 lin. unabh. R.
<b>77</b>	535 - 577	6700 - 7500	570	7727	0.68	3 lin. unabh. R.
<b>12</b>	457		527	7793	0.54	3 lin. unabh. R.
<b>10</b>	478		504	7921		2 lin. unabh. R.
<b>121a</b>			526	4560	0.47	3 (2) lin. unabh. R.
<b>59</b>	504 - 532	7500 - 7800	544	7910		Grt-Bt u. An-Grs
<b>14</b>	570		615	5593		2 lin. unabh. R.

Tab. A.13: Gegenüberstellung der Drucke [bar] und Temperaturen [°C] aus der Literatur (Lit) und den mit PTAX berechneten inklusive  $X_{H_2O}$

Probe	Koordinaten	T	P	Kommentar
<b>BGR 2</b>	672.330/146.100	530	5300	2 lin. unabh. R.
<b>BGR 6</b>	672.310/145.730	515	6000	2 lin. unabh. R.
<b>BGR 17</b>	672.910/147.310	460	5500	3 lin. unabh. R.
<b>BGR 19</b>	673.240/148.065	475	5000	3 lin. unabh. R.
<b>BGR 30</b>	672.250/146.135	470	5000	Ms-Pg, P angenommen
<b>BGR 36</b>	672.145/146.040	520	6000	P angenommen
<b>BGR 39</b>	671.330/145.005	520	6000	2 lin. unabh. R.
<b>BGR 55</b>	671.970/145.450	520		Grt-Chl
<b>BGR 61</b>	671.000/144.910	520	6000	
<b>BGR 73</b>	672.190/146.595	510	5700	2 lin. unabh. R.
<b>EF165</b>	652.100/128.900	511		Grt-Bt
<b>EF273</b>	648.800/122.710	555	6430	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF660</b>	660.981/119.402	605		Grt-Bt
<b>EF736</b>	652.260/117.550	578	6320	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF853</b>	649.912/115.260	566	6540	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF869</b>	668.905/119.702	513	6530	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF870</b>	668.904/119.702	602	5940	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF876</b>	668.905/119.700	604		Grt-Bt
<b>EF922a</b>	666.931/113.101	556	7500	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF922b</b>	666.931/113.101	604	7500	Grt-Bt, An-Grs
<b>EF806</b>	655.641/125.310		6070	An-Grs

Tab. A.14: Zusätzlich verwendete Drucke [bar] und Temperaturen [°C] von Proben aus der Literatur

## A.4 Beschreibung der neuen Proben

<b>DS4</b>	Koord: 729.700/122.230/0 m.ü.M. unmittelbar an der Strasse nach Roverdo; von Lumino aus ca. 200 m nach älterer Steinbrücke;
<b>Granat-Sillimanit-Biotit-Muskovit-Gneiss</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	
<i>Beschreibung:</i>	feinkörniges, gleichkörniges Gestein, das makroskopisch eine undeutliche Lagenbildung, aber deutliche Schieferung aufweist.
<i>Gefüge:</i>	Deutliche Schieferung; isolierte Quarz-Faltenscharniere in der Schieferung; Crenulationsfalten sind mikroskopisch erkennbar.
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Turmalin: (<1%)	akzessorisch; in der Schieferung eingeregelt, idiomorphe, grüne Stengel;
Apatit: (<1%)	akzessorisch;
Zirkon: (<1%)	eingeschlossen;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixminerale; Mineralien der Hauptschieferung; posttektonisch, da die Mineralien wohl eine Crenulation abzeichnen, selber aber nicht deformiert sind.
Granat: ( 3%)	xenomorph; kleiner Modalanteil; auf den Spaltflächen etwas chloritisiert;
Biotit: (10%)	liegt mit Muskovit zusammen in der Schieferung und bildet undeutliche Lagen; z.T. etwas chloritisiert; E: Zirkon
Muskovit: (30%)	macht den grössten Anteil am Glimmer aus; liegt mit Biotit zusammen in der Schieferung und bildet undeutliche Lagen; undeformiert;
Plagioklas: (10%)	serizitisiert; polysynthetische Zwillinge;
Sillimanit: ( 3%)	fibrolithische Varietät; kommt zusammen mit Biotit und Granat vor; relativ geringer Modalanteil;
Quarz: (40%)	in den helleren Partien der Lagen angeordnet; Quarz formt isolierte, reliktsche Faltscharniere, die in der Hauptschieferung liegen und von der Crenulationsschieferung verbogen werden;
Disthen: ( 2%)	kleiner Modalanteil; kommt zusammen mit Biotit und Granat vor; poikilitisch; stark zersetzt;

Tab. A.15: DS4, Granat-Sillimanit-Biotit-Muskovit-Gneiss

<b>DS5</b>	Koord: 729.850/122.250/0 m.ü.M. oberhalb der Strasse, im Weinberg;
<b>Granat-Disthen-Muskovit-Biotit-Gneiss</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	
<i>Beschreibung:</i>	feinkörniges, gleichkörniges Gestein, das eine deutliche Schieferung aufweist.
<i>Gefüge:</i>	deutlich geschiefert; alternierende dunkle (Biotit, Granat, Disthen, Muskovit) und helle (Quarz, Feldspat, Muskovit) Lagen;
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Opake: (<1%)	akzessorisch;
Apatit: (<1%)	akzessorisch;
Turmalin: (<1%)	akzessorisch; in der Schieferung eingeregelt, idiomorphe, grüne Stengel;
Zirkon: (<1%)	eingeschlossen; erzeugt pleochroitische Höfe im Biotit;
Quarz:	eingeschlossen;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixminerale; Minerale der Hauptschieferung;
Plagioklas: (25%)	polysynthetische Zwillinge sind selten;
Granat: ( 5%)	z.T. hypidiomorph, zeigt jedoch Reaktionsbuchten; tritt zusammen mit Disthen, Sillimanit, Biotit und Plagioklas auf; z.T. vollständig zersetzt;
Biotit: (12%)	feinkörnig; rotbraun; bildet mit Muskovit zusammen die Schieferung ab; E: Zirkon
Muskovit: (10%)	frisch; zusammen mit Biotit in der Schieferung eingeregelt;
Disthen: ( 5%)	kleine, völlig zersetzte Körner mit vielen Einschlüssen; E: Quarz
Sillimanit: (<1%)	sehr geringer Modalanteil; tritt zusammen mit Biotit auf;
Quarz: (40%)	in hellen Lagen angereichert;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	grünschiefer/?
<i>Textur:</i>	Mineralien ersetzen die Matrixminerale z.T. in Form von Pseudomorphosen;
Chlorit: (<1%)	sehr selten; aus Biotit entstanden;

Tab. A.16: DS5, Granat-Disthen-Muskovit-Biotit-Gneiss

<b>DS6</b>	Koord: 729.350/133.350/0 m.ü.M. unmittelbar an der Strasse im Val Calanca, nördlich von Cauco;
<b>Granat-Muskovit-Disthen-Biotit-Gneiss</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	Simano-Decke
<i>Beschreibung:</i>	dunkles stark geschiefertes Gestein mit hellen und dunklen Lagen; Disthen und Granat sind makroskopisch sichtbar.
<i>Gefüge:</i>	Deutliches s und eine Lineation, in die Biotit, Muskovit, Disthen und Staurolith eingeregelt sind;
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Pyrit: (<1%)	akzessorisch; xenomorph;
Apatit: (<1%)	akzessorisch; eingeschlossen;
Granat:	eingeschlossen; chloritisiert;
Biotit:	eingeschlossen;
Quarz:	eingeschlossen;
Opake: (<1%)	eingeschlossen;
Plagioklas: (15%)	eingeschlossen;
Zirkon: (<1%)	eingeschlossen; erzeugt pleochroitische Höfe im Biotit;
Staurolith: (<1%)	nur ein Korn; xenomorph und chloritisiert;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixmineralien; Mineralien der Hauptschieferung;
Granat: ( 3%)	relativ klein, schmutzig und oft hypidiomorph; kommt lagenweise vor, auch in Quarz-Lagen;
Biotit: (25%)	bildet mit Muskovit zusammen die Schieferung ab; verbogen und stellenweise gekinkt; ganz wenig randlich chloritisiert; E: Zirkon
Muskovit: (10%)	relativ feinkörnig; zusammen mit Biotit in der Schieferung eingere- gelt;
Disthen: (10%)	grosse Stengel; relativ stark poikiloblastisch zersetzt; gekinkt oder zerbrochen; E: Granat, Biotit, Quarz, Apatit, Opake, Plagioklas
Plagioklas: (15%)	polysynthetische Zwillinge;
Quarz: (35%)	undulöse Auslöschung; gleichkörnig; kommt vorwiegend in den hellen Lagen vor, wo er etwas grobkörniger ist;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	grünschiefer/?
<i>Textur:</i>	Mineralien ersetzen die Matrixmineralien pseudomorph oder über- wachsen sie.
Chlorit: (<1%)	aus Biotit entstanden, diesen pseudomorph ersetzend oder quer überwachsend;
Chlorit:	aus Staurolith entstanden, diesen pseudomorph ersetzend oder quer überwachsend;

Tab. A.17: DS6, Granat-Muskovit-Disthen-Biotit-Gneiss

<b>DS7</b>	Koord: 702.775/142.200/2230 m.ü.M. links neben Bachrinne;
<b>Granat-Disthen-Staurolith-Glimmerschiefer</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	Simano-Decke
<i>Beschreibung:</i>	Lagenbildung durch Trennung von hellen Gemengteilen (Plagioklas, Quarz) und dunklen Gemengteilen (Granat, Staurolith, Biotit, Muskovit, Disthen). Fast alle Mineralien sind makroskopisch erkennbar.
<i>Gefüge:</i>	lagig; deutlich geschiefert durch Einregelung von Glimmern.
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Granat:	eingeschlossen; Zum Teil sind die Granate sehr frisch;
Chlorit:	eingeschlossen;
Biotit:	eingeschlossen;
Opake: (<1%)	eingeschlossen;
Zirkon: (<1%)	
Apatit: (<1%)	
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixmineralien; Mineralien der Hauptschieferung;
Biotit: (15%)	bildet zusammen mit Muskovit die Hauptschieferung ab; entlang von Chlorit-Muskovit-Bahnen gekinkt und etwas chloritisiert;
Granat: ( 3%)	xenomorphe, kleine und z.T. zersetzte Körner;
Muskovit: (15%)	liegt mit Biotit zusammen in der Hauptschieferung und ist eng mit diesem verwachsen;
Plagioklas: (20%)	polysynthetische Zwillinge sind selten; serizitisiert;
Staurolith: ( 8%)	idiomorphe, relativ grosse Körner; z.T. etwas chloritisiert; E: Granat, Chlorit
Disthen: ( 4%)	xenomorphe, relativ kleine Körner; geringer Modalanteil; E: Granat, Biotit, Opake
Ilmenit: (<1%)	kommt akzessorisch in der Matrix vor;
Quarz: (30%)	Mosaikkörner; kommt überwiegend in den hellen Lagen des Gesteins vor und zeigt die übliche Undulöse Auslöschung;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	grünschiefer/?
<i>Textur:</i>	Mineralien ersetzen die Matrixmineralien z.T. in Form von Pseudomorphosen oder überwachsen die Matrixmineralien quer, eine neue Schieferung bildend;
Chlorit: ( 3%)	aus Biotit oder Staurolith entstanden; quer zu Biotit und Muskovit gewachsen; z.T. garbenförmiges Erscheinungsbild;
Muskovit:	überwächst z.T. den Biotit quer und bildet dadurch eine zweite Schieferung ab!

Tab. A.18: DS7, Granat-Disthen-Staurolith-Glimmerschiefer

<b>DS8</b>	Koord: 703.525/142.038/0 m.ü.M. Moncucco, Alpe Sponda
<b>Disthen-Staurolith-Granat-Glimmerschiefer</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	Simano-Decke
<i>Beschreibung:</i>	Lagenbildung durch Trennung von hellen Gemengteilen (Plagioklas, Quarz) und dunklen Gemengteilen (Granat, Staurolith, Biotit, Muskovit, Disthen). Fast alle Mineralien sind makroskopisch erkennbar.
<i>Gefüge:</i>	lagig; deutlich geschiefert durch die Einregelung von Biotit und Muskovit;
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Zirkon: (<1%)	eingeschlossen; erzeugt pleochroitische Höfe im Biotit
Apatit: (<1%)	akzessorisch;
Granat:	eingeschlossen;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixmineralien; Mineralien der Hauptschieferung;
Plagioklas: (20%) Staurolith: ( 5%)	serizitisiert; keine polysynthetischen Zwillinge; hypidiomorph; zeigt im Kopfbild die typische Spaltbarkeit; parallel zur Lineation und in die Schieferung eingeregelt; in Biotitlagen; entlang der zweiten Schieferung z.T. etwas serizitisiert; E: Granat
Muskovit: (14%)	zeichnet zusammen mit Biotit die Hauptschieferung ab und ist in der Regel mit Biotit verwachsen;
Granat: ( 5%)	z.T. entlang der zweiten Schieferung vollständig chloritisiert; manchmal noch reliktsch vorhanden;
Biotit: (14%)	bildet die Hauptschieferung ab; parallel zur zweiten Schieferung, die durch Muskovite gezeichnet wird, chloritisiert; E: Zirkon
Disthen: ( 2%)	poikiloblastisch;
Ilmenit: (<1%)	kleine Körnchen; akzessorisch in der Matrix;
Quarz: (35%)	Mosaikkörner; in den hellen Lagen angereichert;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	grünschiefer/?
<i>Textur:</i>	Mineralien ersetzen die Matrixmineralien z.T. in Form von Pseudomorphosen oder überwachsen die Matrixmineralien quer, eine neue Schieferung bildend;
Chlorit: ( 5%)	bildet Garben quer zu Muskovit und Biotitlagen; ersetzt Biotit, Granat oder Staurolith;
Muskovit:	pseudomorph nach Staurolith gewachsen, diesen ersetzend; sehr feinkörnig;
Muskovit:	überwächst z.T. den Biotit quer und bildet dadurch eine zweite Schieferung ab!

Tab. A.19: DS8, Disthen-Staurolith-Granat-Glimmerschiefer

<b>DS10a</b>	Koord: 723.700/121.300/0 m.ü.M. Castione; Steinbruch Ambrosini;
<b>Muskovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss</b>	
<i>Klasse:</i>	Metapelit
<i>Tekton. Einheit:</i>	Simano-Decke
<i>Beschreibung:</i>	dunkles, deutlich geschieferter Metapelit; Granat ist relativ selten;
<i>Gefüge:</i>	deutliche Lagenbildung durch Separation von hellen und dunklen Gemengteilen; im mm-Bereich geschiefert;
<i>Paragenesenzugehörigkeit unbekannt:</i>	
Zirkon: (<1%)	eingeschlossen; winzige Einschlüsse im Biotit; erzeugt pleochroitische Höfe im Biotit;
Turmalin: (<1%)	idiomorphe, grüne Kristalle mit opaken Einschlüssen im Zentrum;
Sillimanit:	eingeschlossen;
Quarz:	eingeschlossen;
Biotit:	eingeschlossen;
Rutil: (<1%)	eingeschlossen; Einschluss im Biotiteinschluss eines Granates
Apatit: (<1%)	akzessorisch;
Pyrit: (<1%)	eingeschlossen;
Opake: ( 1%)	eingeschlossen;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	amphibolit/lepontisch
<i>Textur:</i>	Matrixminerale; Mineralien der Hauptschieferung;
Granat: (10%)	stark xenomorph, z.T. sehr stark zersetzt und nur noch reliktsch vorhanden; viele Einschlüsse; E: Biotit, Sillimanit, Quarz, Rutil, Pyrit
Biotit: (15%)	relativ frisch und nur stellenweise etwas chloritisiert; verbogen; eingeregelt in Schieferung; E: Zirkon
Quarz: (30%)	bildet eigene Lagen; oft zusammen mit Muskovit;
Muskovit: ( 5%)	kommt vorwiegend in Quarzlagen vor, jedoch auch zusammen mit Biotit; am grössten in Quarz-Lagen; verbogen;
Disthen: (15%)	grosse, mit vielen Einschlüssen durchsetzte Poikiloblasten; hypidiomorph; stengelig; in die Schieferung eingeregelt; E: Biotit, Quarz, Opake
Plagioklas: (20%)	serizitisiert; polysynthetische Zwillinge sind häufig; E: Biotit
Sillimanit: ( 2%)	vermutlich jünger als der Disthen; vorwiegend fibrolithisch; tritt allerdings nur untergeordnet auf;
<i>Paragenese:</i>	
<i>Fazies/Alter:</i>	grünschiefer/?
<i>Textur:</i>	Mineralien ersetzen die Mineralien der Hauptschieferung oder wachsen in deren Druckschatten;
Chlorit: ( 1%)	aus Biotit entstanden;
Opake:	ersetzt zusammen mit Muskovit den Biotit;
Muskovit:	ersetzt zusammen mit Opaken den Biotit oder kommt in den Druckschatten der Granate und Disthene vor;

Tab. A.20: DS10a, Muskovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss

## A.5 Abkürzungen

Act	Aktinolith	Fs	Ferrosilit	Opx	Orthopyroxen
Ab	Albit	Fts	Ferrotschermakit	Pg	Paragonit
hAb	Hochalbit	Fl	Fluorit	Prg	Pargasit
Aln	Allanit	Fo	Forsterit	Per	Periklas
Amp	Amphibol	Gn	Galenit	Phg	Phengit
And	Andalusit	Grt	Granat	Phl	Phlogopit
Adr	Andradit	Gh	Gehlenit	Pgt	Pigeonit
Ann	Annit	Gln	Glaukophan	Pl	Plagioklas
An	Anorthit	Gt	Göthit	Prh	Prehmit
Atg	Antigorit	Gr	Graphit	Pen	Protoenstatit
Ath	Anthophyllit	Grs	Grossular	Pmp	Pumpellyit
Ap	Apatit	Hl	Halit	Py	Pyrit
Arg	Aragonit	Hs	Hastingsit	Prp	Pyrop
Aug	Augit	Hd	Hedenbergit	Po	Pyrophyllit
Brl	Beryll	Hem	Hämatit	Prl	Pyrrhotin
Bt	Biotit	Hgl	Hellglimmer	Qtz	Quarz
Brc	Brucit	Hc	Herzynit	Rbk	Riebeckit
Cam	Klinoamphibol	Hul	Heulandit	Rds	Rhodochrosit
Cpx	Klinopyroxen	Hbl	Hornblende	Rdn	Rhodonit
Cal	Kalzit	Hu	Humit	Rt	Rutil
Chl	Chlorit	Ill	Illit	Sa	Sanidin
Cld	Chloritoid	Ilm	Ilmenit	Spr	Sapphirin
Chr	Chromit	Jd	Jadeit	Scp	Skapolith
Ctl	Chrysotil	Kls	Kalsilit	Srp	Serpentin
Cen	Klinoenstatit	Kln	Kaolinit	Sil	Sillimanit
Cfs	Klinoferrosilit	Kfs	Kalifeldspat	Sps	Spessartin
Czo	Klinozoisit	Ky	Disthen	Spn	Sphen
Chu	Klinohumit	Lmt	Laumontit	Spl	Spinell
Crd	Cordierit	Lws	Lawsonit	St	Staurolith
Crn	Korund	Lpd	Lepidolit	Stp	Stilpnomelan
Cv	Covellin	Lm	Limonit	Tlc	Talk
Crs	Cristoballit	Mgs	Magnesit	Ttn	Titanit
Cum	Cummingtonit	Mag	Magnetit	Toz	Topaz
Dsp	Diaspor	Mnz	Monazit	Tur	Turmalin
Di	Diopsid	Mrg	Margarit	Tr	Tremolit
Dol	Dolomit	Mc	Mikroklin	Trd	Tridymit
Ed	Edenit	Ms	Muscovit	Ts	Tschermakit
En	Enstatit	Ol	Olivin	Usp	Ulvöspinell
Ep	Epidot	Omp	Omphazit	Ves	Vesuvian
Fa	Fayalit	Oam	Orthoamphibol	W	Wasser
Fac	Ferroaktinolit	Opk	Opake	Wo	Wollastonit
Fed	Ferroedenit	Or	Orthoklas	Zrn	Zirkon

Tab. A.21: Mineralsymbole, modifiziert nach KRETZ (1983)

## A.6 Sondenstandards

El	Standard	Xtal	Mineral
K	orth88	PET	Orthoklas
Na	albi3	TAP	Plagioklas
Al	anor81	TAP	Plagioklas
Si	qtz5	TAP	Quarz
Mg	fors15	TAP	Olivin
Fe	ilme25	LIF	Ilmenit
Mn	teph44	LIF	Tephroit
Cr	spin33	LIF	Spinell
Zn	zn	LIF	Zink
Ca	anor81	PET	Plagioklas
Ti	ilme25	PET	Ilmenit
F	phlo35	PC1	Phlogopit

Tab. A.22: Verwendete EMS-Standards

## Anhang B

# INGRES kurz vorgestellt

Der Name INGRES stand ursprünglich für *Interactive Graphics and Retrieval System*. INGRES ist ein relationales Datenbankmanagementsystem (kurz relationales DBMS), das in den Jahren 1973–1983 an der University of California Berkeley entwickelt wurde (STONE, 1986). Von 1981 an wurde INGRES als kommerzielles Produkt von Relational Technology Inc. vertrieben. Im Jahre 1990 hat die Relational Technology Inc. umfirmiert in INGRES Corp. und somit den Namen ihres Hauptproduktes angenommen. Im gleichen Jahr noch wurde die INGRES Corp. von ASK aufgekauft und somit Tochtergesellschaft von ASK. Das DBMS INGRES läuft auf den verschiedensten Rechnern und unter den verschiedensten Betriebssystemen. Im Moment ist bereits Release 6.4 auf dem Markt.

### B.1 INGRES, ein relationales DBMS

INGRES ist ein relationales DBMS; mit anderen Worten, es ist ein System, das relationale Datenbanken verwaltet und beliebig vielen Benutzern (Endbenutzern wie Anwendungsprogrammierern) den Zugang zu den Datenbanken ermöglicht, und zwar mit Hilfe einer relationalen Sprache. DATE (1987) umschreibt die Minimalanforderungen für ein relationales System folgendermassen:

In einem relationalen System

- werden die Daten vom Benutzer als Tabellen (und nur als Tabellen) wahrgenommen.
- können die Operatoren, die dem Benutzer zur Verfügung stehen, nur neue Tabellen aus den bereits bestehenden generieren. (Beispielsweise kann eine Menge von Zeilen oder Spalten, die von einem Operator aus einer bestehenden Tabelle extrahiert wird, wieder als Tabelle angesehen werden.)

Im CHIP SPECIAL werden noch weitere Regeln aufgeführt, denen ein Datenbanksystem genügen sollte, damit man es mit Recht «relational» nennen darf. Darauf soll an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen werden.

#### B.1.1 Relationale Datenbanken

Eine relationale Datenbank besteht *nur* aus einer Sammlung von Tabellen (formaler auch Relationen genannt).

Eine Tabelle (Relation) besteht aus einem Kopf und einem Körper. Der Kopf besteht aus einer festen Menge von Spaltenüberschriften (Attributen), die die Wertebereiche (Domänen)

der Daten in den jeweiligen Spalten bezeichnen. Der Körper besteht aus einer zeitlich veränderlichen Liste von Werten (Tupeln).

Eine genaue, formale Beschreibung des relationalen Modells folgt in Kapitel C auf Seite 181.

### B.1.2 Relationale Sprachen

INGRES ermöglicht dem Benutzer den Zugang zu den Datenbanken mit Hilfe der beiden relationalen Sprachen QUEL (Query Language) und SQL (Structured Query Language). Relationale Operationen – Operationen, welche Daten sowohl definieren als auch manipulieren – können in beiden Sprachen formuliert werden. QUEL ist eine INGRES-spezifische Sprache, SQL hat sich jedoch als internationaler Standard durchsetzen können.

Relationale Sprachen decken vier Aufgabenbereiche ab:

**Queries:** Fragen an die Datenbank.

**DDL:** Data Definition Language, dient zum Erstellen von Tabellen.

**DML:** Data Manipulation Language, dient zur Manipulation der Daten (hinzufügen, verändern, löschen).

**DCL:** Data Control Language, dient zur Vergabe von Privilegien an die verschiedenen Benutzer einer Datenbank (Datenschutz und Datensicherheit).

Relationale Sprachen sind mengenorientierte Sprachen, d.h. mit einem Befehl wird nicht nur ein einziger Datensatz betroffen, sondern eine Menge von Datensätzen.

Mengenorientierte Sprachen werden oft auch als nichtprozedurale oder deskriptive Sprachen bezeichnet, weil der Benutzer sagt, *was* er will und nicht *wie*. Das *Wie*, die Art und Weise des Zugriffsweges, wird automatisch vom DBMS besorgt. Diese Sprachen bewegen sich folglich auf einem höheren Abstraktionsniveau als die herkömmlichen Programmiersprachen wie z.B. Pascal, Fortran usw. Dadurch kommen sie jedoch der natürlichen Sprache bedeutend näher, sind somit sehr benutzerfreundlich und auch von Nichtinformatikern leicht zu erlernen.

QUEL- wie SQL-Befehle können sowohl interaktiv mit Hilfe des TERMINAL MONITORS (vgl. Kapitel B.2.2 auf Seite 179) eingegeben als auch in Anwendungsprogrammen eingebettet werden, die in einer herkömmlichen Programmiersprache abgefasst sind. In diesen Fällen spricht man von EQUQL (Embedded QUEL) bzw. Embedded SQL. Die Anwendungsprogramme können somit über die eingebetteten Befehle direkt auf Daten in der Datenbank zugreifen.

## B.2 System-Struktur

Das Datenbanksystem INGRES besteht im wesentlichen aus zwei Komponenten:

**dem Backend:** dem Datenbankmanager oder Server,

**den Frontends:** der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Beide werden im folgenden kurz vorgestellt.

### B.2.1 Das Backend

Beim Backend handelt es sich um das eigentliche relationale DBMS. Es stellt sämtliche grundlegenden Funktionen eines Datenbanksystems zur Verfügung. So muss es alle Kommandos der relationalen Sprachen unterstützen und ist für die richtige Verarbeitung und den eigentlichen Datenzugriff verantwortlich. Queries – sie können interaktiv über den TERMINAL MONITOR eingegeben worden sein oder von einem Anwendungsprogramm (beides Frontends, vgl. Kapitel B.2.2 auf Seite 179) stammen – werden dem Backend zur weiteren Verarbeitung übergeben. Die Query-Verarbeitung im Backend stellt im Detail einen äusserst komplexen Prozess dar, der sich grob jedoch in vier Schritte unterteilen lässt:

**Parser:** Zuerst wird die Query auf ihre Syntax untersucht. Falls keine Fehler vorliegen, erzeugt der Parser den «Query-Tree», eine INGRES-interne Darstellung der ursprünglichen Query.

**Query Modifikation:** Anschliessend wird der Query modifiziert, indem er um alle vorhandenen Datenschutz- und Integritätsbedingungen erweitert wird, die für die einbezogenen Tabellen vorliegen.

**Optimierung:** Im nächsten Schritt sucht das Backend aufgrund der auszugehenden Tabellenspalten die optimale Zugriffsstrategie für den Query. Ebenso wird versucht, sowohl die Plattenzugriffe als auch die CPU-Zeit möglichst in Grenzen zu halten. INGRES generiert dann einen Query-Ausführungs-Plan aufgrund der gewählten Zugriffsstrategie.

**Ausführung:** Erst jetzt wird der Plan ausgeführt und die Daten aus der Datenbank geholt.

Anschliessend werden die Daten an die fragende Stelle (Frontend) zurückgereicht.

Die Informationen, die zur Optimierung der Queries notwendig sind, speichert INGRES in einem speziellen Set von Tabellen, dem INGRES Data Dictionary.

Wie bereits oben erwähnt, enthalten die QUEL- oder SQL-Befehle keinerlei Andeutungen, *wie* ein Query ausgeführt werden soll; sie sagen nur, *was* der Benutzer will, und überlassen die Erarbeitung des Zugriffsweges dem DBMS. Dadurch erhält das System einen hohen Grad an *physischer Datenunabhängigkeit*: die Benutzer und Anwendungsprogramme sind unabhängig von der physischen Datenstruktur! Folglich kann die physische Datenstruktur verändert werden, ohne dass die Anwendungsprogramme beeinflusst werden.

### B.2.2 Die Frontends

INGRES beschränkt sich nicht nur auf die Bereitstellung eines mächtigen Datenverwaltungssystems, sondern stellt zusätzlich ein *Anwendungsentwicklungs-System* zur Verfügung: die Frontends. Die Frontends bestehen aus einer Reihe von vollständig aufeinander abgestimmten Softwarewerkzeugen (Subsysteme), die sowohl dem Endbenutzer als auch dem Anwendungsprogrammierer zur Verfügung stehen. Dabei verwenden Endbenutzer wie Programmierer die gleiche, integrierte Benutzeroberfläche. Die meisten dieser Subsysteme werden über Bildschirmmasken (Bildschirmformulare) bedient:

**INGRES/TABLES:** definieren, überprüfen von Tabellen, manipulieren von Daten und schreiben von Reporten.

**INGRES/FORMS:** definieren und editieren von Bildschirmformularen.

**INGRES/REPORTS:** definieren und schreiben von Reporten.

**INGRES/APPLICATIONS:** Entwicklung von Anwendungen.

**INGRES/QUERY:** abfragen, verändern, eingeben von Daten.

**TERMINAL MONITOR:** interaktive Eingabe von QUEL- oder SQL-Befehlen.

Diese Subsysteme können individuell vom Betriebssystem aus oder insgesamt über eine integrierte Anwendung namens INGRES/MENU aufgerufen werden. Anwendungen, die z.B. mit Hilfe von INGRES/APPLICATIONS erstellt wurden, können ihrerseits wieder als Frontends bezeichnet werden.

### B.2.3 Verteilte Datenbanken

Normalerweise unterhält ein Unternehmen mehrere Computer, so dass die Daten des Unternehmens auf mehrere Maschinen verteilt abgespeichert sein können. Oft ist es zudem notwendig, dass Benutzer der einen Maschine auf eine Datenbank einer anderen Maschine zugreifen müssen.

INGRES unterstützt das Konzept der verteilten Datenbanken mit INGRES/NET und INGRES/STAR; der Zugriff auf die Daten bleibt trotz der Verteilung transparent (Der Benutzer benötigt keinerlei Kenntnisse über den Ort der Speicherung!), und die relationale Sicht auf alle Daten des Rechnernetzes bleibt gewährleistet.

Eine neue Gateway-Technologie erlaubt sogar den Einbezug von fremden Datenbanken und Fremddateisystemen in eine verteilte INGRES-Datenbank.

# Anhang C

## Das relationale Modell

Das relationale Modell beschreibt *die Art und Weise, wie Daten zu sehen sind*. Es handelt sich um eine Vorschrift, wie Daten zu repräsentieren sind und wie ihre Repräsentation zu manipulieren ist. Das relationale Modell betrifft drei Aspekte der Daten: die Datenstruktur, die Datenintegrität und die Datenmanipulation.

Vor der genauen Erläuterung dieser drei Aspekte folgen jedoch zunächst noch einige Definitionen, die für das weitere Verständnis unerlässlich sind.

### C.1 Definition der Konstruktionselemente

In diesem Kapitel werden die Konstruktionselemente eingeführt, mit deren Hilfe sich die Realität in einer hardware- und softwareunabhängigen Weise beschreiben lässt. Sie bilden die grundlegenden Bausteine eines Datenmodells.

Der besseren Verständlichkeit halber werden zuerst die Konstruktionselemente erläutert, die zur Darstellung von Einzelfällen dienen. Diese Konstruktionselemente betreffen exemplarspezifische Feststellungen z.B. folgender Art: «Das Mineral mit dem Namen X kommt im Handstück Y vor».

Die folgenden Definitionen stammen alle aus VETTER (1990), DATE (1987) oder ZEHNDER (1987). Illustriert werden sie mit Beispielen aus der Geologie.

**Entität:** Eine Entität ist ein individuelles und identifizierbares Exemplar von Dingen, Personen oder Begriffen der realen oder der Vorstellungswelt.

*Beispiele: eine Publikation, ein Handstück, ein Mineral, ...*

**Eigenschaft:** Eine Eigenschaft wird Entitäten zugeordnet und ermöglicht damit deren Charakterisierung, Klassierung und Identifizierung. Eine Eigenschaft hat einen Namen und einen, eventuell mehrere *Eigenschaftswerte*.

*Beispiele für die Entität «Mineral»: NAME, HÄRTE, FARBE, BRUCH, ...*

**Faktum:** Ein Faktum ist eine Behauptung, derzufolge eine Entität für eine Eigenschaft einen bestimmten Eigenschaftswert aufweist.

*Beispiele für die Entität «Mineral»: NAME/Granat, HÄRTE/7, FARBE/rot, ...*

**Beziehung:** Eine Beziehung verknüpft wechselseitig zwei oder mehr Entitäten.

*Beispiele: <Handstück, Mineral>; <Publikation, Autor>; ...*

Eine Abbildung der Realität mit Konstruktionselementen zur Darstellung von Einzelfällen ist jedoch äusserst mühsam und kommt deshalb in der Praxis nicht zur Anwendung. Man

verwendet Konstruktionselemente, die stellvertretend für viele Einzelfälle stehen können, denn damit lassen sich allgemeingültige Aussagen der folgenden Art formulieren: «Ein Mineral hat einen Namen und kommt in einem Handstück vor».

**Entitätsmenge:** Eine Entitätsmenge ist eine eindeutig benannte Sammlung von Entitäten, die aufgrund gleicher Eigenschaften (nicht aufgrund gleicher Eigenschaftswerte!) charakterisiert werden.

*Beispiel: Alle Mineralien werden aufgrund der gleichen Eigenschaften charakterisiert und können folglich als Entitätsmenge namens «Mineral» gelten.*

**Domäne:** Eine Domäne ist eine eindeutig benannte Sammlung der zulässigen Eigenschaftswerte (Wertebereich) einer Eigenschaft.

*Beispiel: die Domäne «WERT» der Eigenschaft «HÄRTE»: 1, 2, 3,..., 10.*

**Entitätsattribut:** Ein Entitätsattribut ist die Menge aller Fakten, die durch Zuordnung von Eigenschaftswerten einer bestimmten Domäne (möglicherweise mehrerer Domänen) zu den Entitäten einer Entitätsmenge zustande kommen.

Anders ausgedrückt: Ein Entitätsattribut stellt die Beziehung zwischen einer Entitätsmenge und einer Domäne dar.

*Beispiel: «HÄRTE»: Beziehung zwischen der Entitätsmenge «Mineral» und der Domäne «WERT».*

**Beziehungsmenge:** Eine Beziehungsmenge ist eine eindeutig benannte Sammlung von Beziehungselementen des gleichen Typs. In der Regel sind an einem Beziehungselement zwei Entitäten von zwei Entitätsmengen beteiligt.

*Beispiel: An den Beziehungselementen der Beziehungsmenge «Schreibt» sind Entitäten der Entitätsmengen «Publikation» und «Autor» beteiligt. So kommt zum Ausdruck, welcher Autor welche Publikation schreibt.*

**Beziehungsattribut:** Ein Beziehungsattribut ist die Menge aller Fakten, die durch Zuordnung von Eigenschaftswerten einer bestimmten Domäne (möglicherweise mehrerer Domänen) zu den Beziehungselementen einer Beziehungsmenge zustande kommen.

Anders ausgedrückt: Ein Beziehungsattribut stellt die Beziehung zwischen einer Beziehungsmenge und einer Domäne dar.

*Beispiel: Die Beziehungsmenge «Schreibt» enthält das Beziehungsattribut «REIHENFOLGE», wodurch zum Ausdruck kommt, in welcher Reihenfolge die Autoren aufzuführen sind.*

Tabelle C.1 veranschaulicht in einer Gegenüberstellung diese Konstruktionselemente.

Konstruktionselemente	
den Einzelfall betreffend	viele Einzelfälle betreffend
Entität	Entitätsmenge
Beziehung	Beziehungsmenge
Eigenschaft mit Eigenschaftswert(en)	Domäne (oder auch Wertebereich)
Faktum	Attribut (Entitäts- oder Beziehungsattribut)

Tab. C.1: Gegenüberstellung der Konstruktionselemente

Den Entitäts- wie auch den Beziehungsattributen können verschiedene *Arten von Beziehungen*, sogenannte *Assoziationstypen*, zugrunde liegen. Man unterscheidet:

**Einfache Assoziation (Typ 1):** Eine einfache Assoziation liegt vor, wenn jedes Element der Menge A jederzeit mit einem Element der Menge B in Beziehung steht.

*Beispiel: Menge A: Mineral, Menge B: Name. (Jedes Mineral weist genau einen Namen auf.)*

**Konditionelle Assoziation (Typ C):** Eine konditionelle Assoziation liegt vor, wenn ein Element in A höchstens mit einem, möglicherweise auch keinem Element in B in Beziehung steht.

*Beispiel: A: Mineral, B: Modalanteil. (Jedes Mineral stellt seinen Volumen-Anteil an den Modalbestand. Vielleicht ist der Modalanteil jedoch noch nicht abgeschätzt worden.)*

**Komplexe Assoziation (Typ M):** Eine komplexe Assoziation liegt dann vor, wenn ein Element in A mit beliebig vielen (also auch null oder nur einem) Element(en) in B in Beziehung steht.

*Beispiel: A: Mineral, B: Mineraleinschlüsse.*

Von Bedeutung ist auch das Prinzip der Abbildung. Abbildungen liegen den Beziehungsmengen zugrunde:

**Abbildung:** Eine Abbildung, die die Mengen A und B involviert, besteht aus einer Assoziation von A nach B und der dazu inversen Assoziation. Analog zu den verschiedenen Assoziationstypen unterscheidet man die Typen (1:1), (1:C), (1:M), (C:1), (C:C), (C:M), (M:1), (M:C), (M:M).

*Beispiel: An den Beziehungselementen der Beziehungsmenge «Schreibt» sind Entitäten der Entitätsmengen «Publikation» und «Autor» beteiligt. «Schreibt» ist vom Typ (M:M), da ein Autor bei mehreren Publikationen mitgewirkt haben kann und eine Publikation von mehreren Autoren verfasst worden sein kann.*

## C.2 Relationale Datenstruktur

Auf der Basis dieser Definitionen kann nun der Begriff Relation definiert werden.

**Relation:** Eine Relation ist eine Menge von Tupeln. (Ein Tupel ist eine Liste von Werten.) Normalerweise ordnet man die Tupel tabellenförmig an, so dass jede Tabellenzeile einem Tupel entspricht und jede Kolonne Werte ein und derselben Domäne aufweist.

Eine Relation wird folgendermassen charakterisiert:

- Sie weist einen eindeutigen Namen auf.
- Sie hat 0 – n Tupel (Tabellenzeilen). Im Gegensatz zu einer Tabelle ist die Reihenfolge der Tupel jedoch bedeutungslos, denn die Tupel werden aufgrund von Werten, nicht aufgrund einer Position angesteuert.
- Sie weist 0 – m Attribute (Kolonnen) auf. Auch die Reihenfolge der Attribute ist bedeutungslos, da sie aufgrund eines Attributnamens und nicht aufgrund einer Position angesteuert werden.
- Die Attributswerte, die ein bestimmtes Attribut enthält, stammen alle aus der gleichen Domäne und sind folglich vom gleichen Typ.

- Jedes Attribut hat einen eindeutigen Namen, der mit dem Namen der Domäne übereinstimmt.
- Eine Relation hat mindestens einen Schlüssel (vgl. Kapitel C.3).

## C.3 Relationale Datenintegrität

### C.3.1 Die Integritätsregeln des relationalen Modells

In einer Menge kann ein Tupel nur einmal vorkommen, eine Relation darf deshalb keine doppelten Tupel aufweisen. Ein Tupel ist mit Hilfe eines *Schlüssels* eindeutig zu identifizieren. Angenommen eine Relation  $R$  enthalte die Attribute  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Das Set der Attribute  $K = (A_i, A_j, \dots, A_k)$  gilt dann und nur dann als *Schlüsselkandidat* der Relation  $R$ , wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

**Einmaligkeit:** Zu keiner Zeit weist die Relation  $R$  zwei Tupel mit der gleichen Attributkombination  $K$  auf.

**Minimalität:** Keines der Attribute aus  $K$  kann aus  $R$  entfernt werden, ohne die Einmaligkeit des Tupels zu zerstören.

Jede Relation weist einen Schlüsselkandidaten auf, denn mindestens alle ihre Attribute zusammen erfüllen die obigen Bedingungen. Ein geeigneter Schlüsselkandidat wird zum *Primärschlüssel* der Relation gewählt und zur Identifikation der Tupel verwendet.

Kommt in einer Relation  $R$  ein Attribut (oder eine Attributkombination) vor, die in einer anderen Relation als Primärschlüssel in Erscheinung tritt, so nennt man dieses Attribut *Fremdschlüssel* der Relation  $R$ .

Die beiden Integritätsregeln des relationalen Modells lauten wie folgt:

**Entitätsintegrität (Entity integrity):** Kein Attribut, das Teil des Primärschlüssels ist, darf Nullwerte enthalten<sup>1</sup>.

**Beziehungsintegrität (Referential integrity):** Enthält eine Relation  $R_2$  einen Fremdschlüssel  $FS$ , der einem Primärschlüssel  $PS$  einer anderen Relation  $R_1$  entspricht, so muss dieser Fremdschlüssel  $FS$  entweder

1. den gleichen Wert aufweisen wie  $PK$  in einem Tupel von  $R_1$  oder
2. gleich Null sein.

### C.3.2 Erhalt der Integrität bei Löschung

Damit die zweite Integritätsregel erfüllt bleibt, muss beim Löschen (oder Modifizieren) eines Primärschlüsselwertes dem entsprechenden Fremdschlüssel besondere Beachtung geschenkt werden. Es gibt die folgenden drei Möglichkeiten:

**Weitergabe der Löschung (abgekürzt: *wl*):** Falls Tupel existieren, deren Fremdschlüsselwert dem gelöschten Primärschlüsselwert entsprechen, so werden diese ebenfalls gelöscht.

---

<sup>1</sup>Ein *Nullwert* (englisch: *Null Value*) bedeutet «nicht existent» und darf nicht verwechselt werden mit einem *numerischen 0-Wert* (englisch: *zero*).

**Bedingte Löschung (abgekürzt: *bl*):** Die Löschung wird gar nicht akzeptiert, solange noch Fremdschlüssel existieren, die dem zu löschenden Primärschlüssel entsprechen.

**Nullsetzung bei Löschung (abgekürzt: *nl*):** Falls für den Fremdschlüssel Nullwerte zugelassen sind, werden alle Fremdschlüssel, die dem zu löschenden Primärschlüssel entsprechen, auf Null gesetzt.

## C.4 Relationale Datenmanipulation

Sämtliche zur Verfügung stehenden Operatoren der *relationalen Algebra* können nur neue Relationen aus bereits bestehenden generieren. Das System ist abgeschlossen. Jeder Operator benötigt entweder eine oder zwei Relationen als Eingabe und produziert eine neue Relation als Ausgabe. Beispiele für Operatoren sind: Vereinigung, Schnitt, Differenz von Relationen usw.



# Tabellenverzeichnis

2.1	Definition der Entitätsmengen . . . . .	16
2.2	Beziehungsmengen und deren Abbildungstyp . . . . .	17
2.3	Elementarrelationen . . . . .	18
2.4	Speicherstrukturen . . . . .	22
3.1	Relationen «author», «writes», «publication» und «references» . . . . .	28
3.2	Relationen «sample», «mineral» und «mineralgroup» . . . . .	28
3.3	Relationen «emsanalysis» und «emsprofile» . . . . .	29
3.4	Relationen «paragenesis», «ptinterpretation» und «baseson» . . . . .	30
3.5	Relationen, die ein Diagramm beschreiben . . . . .	31
3.6	Relationen «flincassociation», «flincphase» und «flinccomposition» . . . . .	32
4.1	Evaluationskriterien für Literaturquellen . . . . .	38
4.2	Fehlerquellen . . . . .	39
4.3	Evaluierte Literatur . . . . .	40
4.4	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	41
4.5	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	42
4.6	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	43
4.7	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	44
4.8	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	45
4.9	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	46
4.10	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	47
4.11	Evaluierte Literatur (Fortsetzung) . . . . .	48
6.1	Was findet sich in <b>PARADIS</b> ? . . . . .	64
7.1	Resultate für Nuf189, Nuf183 . . . . .	70
7.2	Resultate für Fus46, Nuf243, Nuf244, Fus80b, Nuf27 . . . . .	71
7.3	Resultate für Fus70, Nuf242, Nuf237, Nuf179 . . . . .	73
8.1	Resultate für DS5, DS6 . . . . .	76
8.2	Resultate für RT159, Th46 . . . . .	79
8.3	Resultate für DS10a, B367, EK45, Kl437 . . . . .	81
8.4	Resultate für Kl185 . . . . .	84
8.5	Resultate für RT140, RT150, DS4, Kl264, EK50 . . . . .	87
8.6	Resultate für Kl198, Kl285 . . . . .	89
9.1	Resultate für 25 . . . . .	93
9.2	Resultate für 12 . . . . .	95
9.3	Resultate für TT513 . . . . .	96

9.4	Resultate für 77, NW76, NW77 . . . . .	100
9.5	Resultate für TT379 . . . . .	101
9.6	Resultate für TT480 . . . . .	103
9.7	Resultate für TT416, TT479 . . . . .	106
9.8	Resultate für 38 . . . . .	107
9.9	Reaktionen für 38 . . . . .	108
9.10	Resultate für TT337 . . . . .	110
9.11	Resultate für 133, 59, NW80, NW142, NW158, NW33, MF1755, 1746 . . . . .	113
9.12	Resultate für NW79, 121a, 14, 10 . . . . .	116
10.1	Resultate für DS8 . . . . .	118
10.2	Resultate für DS7 . . . . .	119
10.3	Resultate für AI349, AI405, AI378, AI518 . . . . .	123
A.1	Mesoalpine Metamorphose: Gruf, Bergell . . . . .	157
A.2	Mesoalpine Metamorphose: Lukmaniergebiet und Olivone–nördl. V. Mesolcina (nördwestliche und mittlere Adula) . . . . .	158
A.3	Mesoalpine Metamorphose: Nufenen- und Bedretto-region, Campolungo, Alpe Sponda, Leventina . . . . .	159
A.4	Mesoalpine Metamorphose: V. Calanca, südl. V. Mesolcina, V. Bodengo, Region Bellinzona . . . . .	160
A.5	Mesoalpine Metamorphose: Doldenhorn, Aarmassiv, Brig, Simplon, Verampio, Binntal . . . . .	161
A.6	Mesoalpine Metamorphose: gesamtes Lepontin . . . . .	162
A.7	Eoalpine Metamorphose . . . . .	163
A.8	Eoalpine Metamorphose . . . . .	164
A.9	Handstücke aus <b>PARADIS</b> mit lepontischen Paragenesen . . . . .	165
A.10	Handstücke aus <b>PARADIS</b> mit lepontischen Paragenesen . . . . .	166
A.11	Handstücke aus der Literatur mit lepontischen Paragenesen . . . . .	166
A.12	Gegenüberstellung der Drucke [bar] und Temperaturen [°C] aus der Literatur (Lit) und den mit PTAX berechneten inklusive $X_{H_2O}$ . . . . .	167
A.13	Gegenüberstellung der Drucke [bar] und Temperaturen [°C] aus der Literatur (Lit) und den mit PTAX berechneten inklusive $X_{H_2O}$ . . . . .	168
A.14	Zusätzlich verwendete Drucke [bar] und Temperaturen [°C] von Proben aus der Literatur . . . . .	168
A.15	DS4, Granat-Sillimanit-Biotit-Muskovit-Gneiss . . . . .	169
A.16	DS5, Granat-Disthen-Muskovit-Biotit-Gneiss . . . . .	170
A.17	DS6, Granat-Muskovit-Disthen-Biotit-Gneiss . . . . .	171
A.18	DS7, Granat-Disthen-Stauroolith-Glimmerschiefer . . . . .	172
A.19	DS8, Disthen-Stauroolith-Granat-Glimmerschiefer . . . . .	173
A.20	DS10a, Muskovit-Granat-Disthen-Biotit-Gneiss . . . . .	174
A.21	Mineralsymbole, modifiziert nach KRETZ (1983) . . . . .	175
A.22	Verwendete EMS-Standards . . . . .	176
C.1	Gegenüberstellung der Konstruktionselemente . . . . .	182

# Figurenverzeichnis

2.1	Datenarchitektur . . . . .	15
2.2	Konzeptionelles Strukturdiagramm . . . . .	19
2.3	Zugriffspfadmatrix . . . . .	20
2.4	Abfolge der Frames in der Anwendung UNIVERSAL . . . . .	23
2.5	Abfolge der Frames in der Anwendung SPOUT . . . . .	24
5.1	Zusammenstellung bisheriger P-T-Abschätzungen . . . . .	53
6.1	Datenflussdiagramm . . . . .	62
6.2	Verarbeitung . . . . .	63
7.1	Diagramme für Nuf183, Nuf189 . . . . .	69
7.2	Diagramme für Fus46, Nuf243, Nuf244, Nuf80b, Nuf27 . . . . .	72
7.3	Diagramme für Fus70, Nuf242, Nuf237, Nuf179 . . . . .	74
8.1	Diagramme für DS5, DS6 . . . . .	77
8.2	Diagramme für RT159, Th46 . . . . .	80
8.3	Diagramme für DS10a, B367, EK45, Kl437 . . . . .	82
8.4	Diagramme für Kl185 . . . . .	83
8.5	Diagramme für RT140, RT150, DS4, Kl264, EK50 . . . . .	86
8.6	Diagramme für Kl198, Kl285 . . . . .	88
9.1	Diagramme für 25 . . . . .	92
9.2	Diagramme für 12 . . . . .	94
9.3	Diagramme für TT513 . . . . .	97
9.4	Diagramme für 77, NW76, NW77 . . . . .	99
9.5	Diagramme für TT379, TT480 . . . . .	102
9.6	Diagramme für TT416, TT479 . . . . .	105
9.7	Diagramme für TT337, 38 . . . . .	109
9.8	Diagramme für 133, NW80, 59, NW142, NW158, NW33, MF1755, MF1746 . . . . .	112
9.9	Diagramme für NW79, 121, 14, 10 . . . . .	115
10.1	Diagramme für DS7, DS8 . . . . .	120
10.2	Diagramme für AI349, AI405, AI378, AI518 . . . . .	122
11.1	Temperaturvergleich (°C), Histogramm . . . . .	126
11.2	Druckvergleich (bar), Histogramm . . . . .	128
12.1	Isothermenkarte der mesoalpiner Metamorphose . . . . .	132
12.2	Isobarenkarte der mesoalpiner Metamorphose . . . . .	134

## Curriculum vitae

### Persönliche Daten:

Name: Schmatz  
Vornamen: Dirk Rainer  
Geburtsdatum: 27. September 1962  
Geburtsort: Luzern  
Nationalität: deutsch  
Zivilstand: ledig  
Studienadresse: Mühledorfstrasse 28  
3018 Bern  
Wohnsitz: Biregghang 2  
6005 Luzern

### Ausbildung:

1969 - 1975: Primarschule in Horw.  
1975 - 1982: Kantonsschule Luzern; Abschluss mit Matura Typus C (Realgymnasium).  
1982 - 1983: halbjähriger Aufenthalt in den USA zur Verbesserung der englischen Sprache.  
1983 - 1988: Geologiestudium an der ETH Zürich; Abschluss mit Diplom als Naturwissenschaftler; Diplomarbeit in Italien mit dem Thema: Strukturen und Metamorphose der Metapelite in der Ivrea-Zone.  
1988 - 1993: Dissertation an der Universität Bern

### Anstellungen:

1986 - 1988: Hilfsassistent am Institut für Mineralogie und Petrographie der ETH Zürich.  
1988 - 1993: Assistentenarbeit am Mineralogisch-petrographischen Institut der Universität Bern; Dissertationsprojekt vom Schweizerischen Nationalfonds.