

**CHARAKTERISIERUNG UND QUANTIFIZIERUNG
THERMISCHER UND DIAGENETISCHER PROZESSE IM
KARBONISCHEN AKKRETIONSPRISMA IN NORDCHILE**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät
der
Ruprecht-Karls-Universität
Heidelberg

vorgelegt von:
Dipl.-Chem. Roswitha Marioth
aus Wallscheid

- 2001 -

1. Gutachter: Prof. Dr. Heinrich Bahlburg

2. Gutachter: PD Dr. Ronald Bakker

Datum der Promotion: 23.02.2001

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde innerhalb des DFG-Graduiertenkollegs „Einwirkung fluider Phasen auf Locker- und Festgesteine“ durchgeführt, für die Gewährung des Stipendiums möchte ich der DFG danken.

Meinem Betreuer Heinrich Bahlburg vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Münster danke ich für das interessante und herausfordernde Thema, seine Unterstützung im Gelände, bei der Durchführung und vor allem Fertigstellung der Arbeit – und für die umfassende Einführung in die Musik der 70er Jahre bei Rotwein auf der Hotelveranda in Chañaral.

Ronald Bakker vom Mineralogischen Institut der Universität Leoben/Österreich möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und seine stetige Hilfsbereitschaft danken. Er ermöglichte und begleitete die Raman-Messungen in Leoben und brachte die Arbeit so manches Mal in Schwung.

Die Geländearbeiten wurden in Nordchile durchgeführt. Hans Wilke von der Universität Antofagasta möchte ich für die Unterstützung bei der Organisation meiner Aufenthalte danken, Andrea Decker aus Münster für ihre Hilfe bei der Geländearbeit.

Für die Hilfe bei der Probenaufbereitung danke ich Karl-Heinz Diehl, Aung Moe, Luca Nano, Karen Riedelsberger, Bernd Wagner und Odile Wallerath. Rolf Koch, Klaus Will und Roland Gullasch sei Dank für ihre Hilfe bei grafischen und fotografischen Arbeiten.

Heiko Hofmann, Laurence Warr und Oliver Rügner danke ich für die Beratung und Hilfe bei der Durchführung und Interpretation der röntgendiffraktometrischen Messungen. Für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Mikrosondenanalytik danke ich Sonja Nicolaisen, Hans-Peter Meyer und Thomas Ludwig am Mineralogischen Institut in Heidelberg sowie Frank Tomaschek und Chris Ballhaus am Mineralogischen Institut in Münster. Hans-Joachim Massonne vom Institut für Mineralogie und Kristallchemie der Universität Stuttgart danke ich für seine Diskussionsbereitschaft. Ernst Burke von der Freien Universität in Amsterdam danke ich für das Ermöglichen der Raman-Messungen und seine Unterstützung dabei.

Vor allem Udo Zimmermann, Nils Sappok und Marion Göttert erleichterten mir durch viele hilfreiche Diskussionen und aufmunternde Gespräche den Anfang in Heidelberg und den Einstieg in die Geologie. Joe Grimmer und Marta Gasparini danke ich für die nette Atmosphäre im gemeinsamen Arbeitszimmer, ihre Geduld und Unterstützung (nicht nur) bei der Fertigstellung der Dissertation. Francis Cueto löste so manches Problem – nicht nur am Computer. Bei ihm konnte ich immer Trost und Rat und Gummibärchen finden! Sonja Nicolaisen, Udo Zimmermann, Carlo Dietl, Laurence Warr und Agnes Kontny danke ich für's Korrekturlesen und dafür, dass ich ihnen, wie auch Helga de Wall und Heiko Hofmann, immer Löcher in den Bauch fragen konnte. Sonja Nicolaisen, Karen Riedelsberger und Christian Scholz danke ich für viele gute Gespräche und erholsame Kaffeepausen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Geologisch-Paläontologischen Institutes, im Sekretariat, in der Bibliothek und allen, die ich vielleicht vergessen habe ist es zu verdanken, dass ich immer gerne dort gearbeitet habe.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern für ihre Unterstützung und vor allem Eric für's Durchhalten, Ablenken und Antreiben danken.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die quantitative Charakterisierung der p-T-Bedingungen der metamorphen Entwicklung der Chañaral-Mélange. Diese p-T-Bedingungen wurden bisher nur qualitativ als niedrig-gradige Metamorphose im Bereich der Grünschieferfazies beschrieben. Im Verlauf dieser Studie wurden Untersuchungen an Metapeliten sowie Metabasiten bezüglich Tonmineralkristallinität, Phengitbarometrie, b-Parameter, Mineralparagenesen sowie Chloritthermometrie durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden mit Fluideinschlussuntersuchungen in syntektonischen Quarzadern kombiniert.

Die Chañaral-Mélange liegt am Rande der Atacama-Wüste in der nordchilenischen Küstenkordillere und wird als Teil eines Akkretionsprismas interpretiert, das durch eine nach N und NO gerichtete Subduktion gebildet wurde. Charakteristisch für die Chañaral-Mélange sind Sandstein-Blöcke in pelitischer Matrix. Die Blöcke sind durch eine duktile Deformation boudiniert worden und weisen mit Quarz gefüllte syntektonische Extensionsrisse auf. In die Mélange eingeschaltet finden sich Metabasite.

Die Werte der Tonmineralkristallinität liegen in der Oberen Anchizone, die mit einer Metamorphose unter Pumpellyit-Aktinolith-faziellen Bedingungen bei Temperaturen von 250-350°C korreliert werden können. Die Bildungstemperaturen der Chlorite aus den Metapeliten der Chañaral-Mélange liegen im Mittel bei 300°C. Chlorite aus einer Quarzader ergeben Bildungstemperaturen von 350-400°C, diese zeigen evtl. eine hydrothermale Überprägung der Gesteine an. Die Temperaturinformationen aus den Metapeliten korrelieren gut mit Chloritbildungstemperaturen aus in die Mélange eingeschalteten Metabasiten (T = 300°C). Der an K-Hellglimmern der Metapelite aus der Chañaral-Mélange bestimmte b-Parameter liegt im Mittel bei 9,01 Å und somit im Bereich von Vergleichsproben mit intermediärem Druck. Für Temperaturen von 300-350°C ergeben sich Drücke von 2,2-2,85 kbar; daraus lässt sich ein Gradient von ca. 35°C/km errechnen. Durch Phengit-Barometrie konnten an Metapeliten für einen mittleren Si-Gehalt von 3,2 bei Temperaturen von 300-350°C Mindestdrücke von 0,5 bis 1,5 kbar abgeleitet werden, dem maximalen Si-Gehalt von 3,46 entsprechen Drücke von 4-5 kbar.

Somit konnten erstmals die metamorphen Bedingungen der Chañaral-Mélange mit 300-350°C bei 2,2-2,8 kbar entsprechend einer maximalen Versenkung von 8-10 km bestimmt werden. Daraus ergibt sich ein geothermischer Gradient von ca. 30-40°C/km.

Durch die Untersuchung unterschiedlicher Fluideinschlussgenerationen in syntektonischen Quarzadern konnten verschiedene Phasen von Fluidtätigkeit unterschieden werden. Das älteste System sind CH₄-reiche Einschlüsse mit Spuren von weiteren Kohlenwasserstoffen, die prograd gebildet wurden. Das peak-metamorphe Fluid ist ein H₂O-CO₂-NaCl-dominiertes Fluid mit CH₄±H₂S. Ein H₂O-NaCl-Fluid war eventuell gleichzeitig aktiv und es gibt Anzeichen dafür, dass es über weite Bereiche der p-T-Geschichte der Chañaral-Mélange aktiv war. Als Zeugen eines jüngeren Systems werden Einschlüsse mit CO₂-CH₄±H₂S±N₂ angesehen.

Die Chañaral-Mélange repräsentiert ein mittleres Niveau eines Akkretionsprismas und wurde vermutlich durch Unterplattung gebildet. Sie ist ein Beispiel für ein Akkretionsprisma, das nicht die bisher als für Subduktionsumgebungen typisch geltende Hochdruck-Niedrigtemperatur-Metamorphose aufweist. Weitere Beispiele dieses Typs stellen das Kodiak Akkretionsprisma in Alaska und der Shimanto-Komplex in Japan dar.

Abstract

Aim of this study is the quantitative characterisation of the p-T-conditions of the metamorphic development of the Chañaral-Mélange, which were so far only qualitatively described as low-grade metamorphism under greenschist facies conditions. During this work metapelites and metabasites were investigated concerning clay mineral crystallinity, phengite barometry, b-parameter, mineral paragenesis and chlorite thermometry. The results were combined with fluid inclusion analysis in syntectonic quartz veins.

The Chañaral-Mélange is situated on the edge of the Atacama Desert in the coastal cordillera in northern Chile. It is interpreted to be part of an accretionary prism, which developed during subduction towards the N and NE. The Mélange is characterised by blocks of sandstone in a pelitic matrix. These blocks underwent ductile deformation with formation of boudins, which show syntectonic extension veins filled with quartz. The metapsammopelitic schists are intercalated with metabasites.

Clay mineral crystallinity data show values in the Upper Anchizone, corresponding to metamorphism under pumpellyite-actinolite facies conditions, which can be correlated with temperatures of 250-350°C. Chlorite formation temperatures from metapelites show mean values of 300°C. Chlorites crystallised in a quartz vein reveal temperatures of 350-400°C probably indicating a hydrothermal overprint of the mélange rocks. The temperatures derived from chlorites in the metapelites correspond well with mean chlorite formation temperatures in metabasites ($T = 300^\circ\text{C}$). The b-parameter, which was determined from K-white mica in metapelites, shows mean values of 9,01 Å lying in the range of comparative samples with intermediate pressure. A pressure of 2,2-2,85 kbar can be derived from the b-parameter for temperatures between 300 and 350°C. This leads to a thermobaric gradient of approximately 35°C. The investigation of phengites in metapelites results in minimum pressures of 0,5-1,5 kbar for mean Si-contents of 3,2 pfu and 300-350°C; a maximum Si-value of 3,46 pfu corresponds to 4-5 kbar.

For the first time the metamorphic conditions of the Chañaral-Mélange could thus be determined quantitatively as 300-350°C at 2,2-2,8 kbar, leading to thermobaric gradients between 30 and 40°C.

Investigation of several fluid inclusion types in syntectonic quartz veins showed different phases of fluid activity. The oldest system is represented by CH₄-rich, hydrocarbon-bearing inclusions, which were formed during prograde metamorphism. An H₂O-CO₂-NaCl-dominated fluid with CH₄±H₂S is considered to represent peak-metamorphic conditions. Probably contemporaneously an aqueous saline fluid with NaCl was present; there is indication that this fluid was active for a prolonged period during the p-T-history of the Chañaral-Mélange. Gaseous inclusions with CO₂-CH₄±H₂S±N₂ are considered to be the youngest fluid generation.

The Chañaral-Mélange represents an intermediate level of an accretionary prism and was probably formed by underplating. It is an example for an accretionary prism, which does not follow the typical low pressure-high temperature p-T-path normally assumed for subduction zones. Further examples of this type are the Kodiak accretionary prism in Alaska and the Shimanto complex in Japan.

Inhalt

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG | 1 |
| 2 | REGIONALE GEOLOGIE | 2 |
| 2.1 | Geologischer Rahmen..... | 2 |
| 2.1.1 | Die Las Tórtolas Formation..... | 7 |
| 2.1.2 | Die Chañaral-Mélange | 7 |
| 2.1.2.1 | Deformationsstrukturen..... | 8 |
| 2.2 | Probenauswahl..... | 9 |
| 2.3 | Probenbeschreibung | 12 |
| 2.3.1 | Metapelite der Lokalitäten Punta Animas, Playa Hippie und Quebrada Vegas Quemadas | 12 |
| 2.3.2 | Metapelite aus dem kontaktnahen Bereich der Mélange (Lokalität Bahía Las Animas)..... | 12 |
| 2.3.3 | Metapelite aus der Las Tórtolas Formation (Lokationen Quebrada Las Animas und Quebrada Los Infieles) | 12 |
| 2.3.4 | Quarzadern (Lokalitäten Punta Animas und Playa Hippie)..... | 12 |
| 2.3.5 | El Barquito-Pluton..... | 13 |
| 2.3.6 | Metabasite aus der Quebrada Vegas Quemadas..... | 13 |
| 3 | NIEDRIGGRADIGE METAMORPHOSE IN DER CHANARAL-MÉLANGE | 15 |
| 3.1 | Mineralogie und Tonmineralkristallinität der Tonfraktion der Metapelite | 15 |
| 3.1.1 | Zur Röntgendiffraktometrie | 16 |
| 3.1.2 | Probenaufbereitung | 16 |
| 3.1.3 | Mineralogie der Tonfraktion | 18 |
| 3.1.4 | Tonmineralkristallinität..... | 21 |
| 3.2 | Korrelation der Tonmineralkristallinitätsdaten mit fazieskritischen Mineralparagenesen zur Ableitung von p-T-Bedingungen..... | 29 |
| 3.3 | Druckabschätzung anhand des b-Parameters von K-Hellglimmern in Metapeliten | 29 |
| 3.4 | Mineralchemie in Metapeliten und Metabasiten | 32 |
| 3.4.1 | Chlorit..... | 32 |
| 3.4.1.1 | Kristallchemie, chemische Zusammensetzung und Klassifikation der Chlorite | 34 |
| 3.4.2 | Abschätzung der Bildungstemperaturen der Chlorite | 39 |
| 3.4.3 | Phengit | 42 |
| 3.4.3.1 | Kristallchemie und chemische Zusammensetzung der Phengite | 42 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.4.4 | Phengitbarometrie | 45 |
| 3.4.5 | Amphibole, Pumpellyit und Titanit | 47 |
| 3.4.5.1 | Amphibole | 47 |
| 3.4.5.2 | Pumpellyit | 49 |
| 3.4.5.3 | Titanit | 50 |
| 3.5 | Zusammenfassung der p-T-Informationen | 51 |
| 4 | UNTERSUCHUNGEN ZU ZUSAMMENSETZUNG UND DICHTEN VON FLUIDEN IN EINSCHLÜSSEN AUS SYNTEKTONISCHEN QUARZADERN | 52 |
| 4.1 | Mikroskopische Beobachtungen in den untersuchten quarzverfüllten Klüften | 53 |
| 4.2 | Mikrothermometrie | 55 |
| 4.2.1 | Grundlagen | 55 |
| 4.2.1.1 | Wasser-Salz-Systeme | 55 |
| 4.2.1.2 | Wasser-Gas- und Wasser-Gas-Salz-Systeme | 57 |
| 4.2.2 | Messmethode | 58 |
| 4.3 | Raman-Spektroskopie zur Analyse des Einschlussinhaltes..... | 60 |
| 4.3.1 | Grundlagen | 60 |
| 4.3.2 | Analyse von Typ 1-Einschlüssen..... | 60 |
| 4.3.3 | Qualitative und quantitative Bestimmung der Gaskomponenten in Typ 2- und Typ 3- Einschlüssen..... | 61 |
| 4.4 | Mikrothermometrische Analyse der Fluideinschlüsse | 64 |
| 4.4.1 | Einschlüsse des Typs 1..... | 64 |
| 4.4.2 | Einschlüsse des Typs 2..... | 65 |
| 4.4.3 | Einschlüsse des Typs 3..... | 65 |
| 4.5 | Zusammenfassung, Interpretation und Diskussion der Ergebnisse aus Mikrothermometrie und Raman-Spektroskopie | 67 |
| 4.5.1 | Einschlüsse des Typs 1..... | 70 |
| 4.5.2 | Einschlüsse der Typen 2 und 3..... | 73 |
| 4.5.3 | Vergleich mit Einschlüssen aus dem Barquito-Pluton | 76 |
| 5 | DISKUSSION..... | 78 |
| 5.1 | Ursprung der Fluide in Fluideinschlüssen der Chañaral-Mélange..... | 78 |
| 5.1.1 | Ursprung des wässrigen Fluids in Typ 1-Einschlüssen | 78 |
| 5.1.2 | Ursprung der Typ 2- und Typ 3a-Fluidsysteme | 79 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2 | Fluidentwicklung in der Chañaral-Mélange | 80 |
| 5.3 | p-T-Entwicklung der Mélange | 85 |
| 5.3.1.1 | Konstruktion eines p-T-Pfades | 89 |
| 5.4 | Strukturgeologische Interpretation der Chañaral-Mélange und der Las Tórtolas- Formation | 90 |
| 5.5 | Vergleich mit dem Chonos-Komplex in Südchile zwischen 44° und 46°S | 93 |
| 5.6 | Schlussfolgerungen | 93 |
| 6 | LITERATUR | 95 |
| 7 | ANHANG | 106 |
| 7.1 | Messparameter | 106 |
| 7.1.1 | Röntgendiffraktometrie | 106 |
| 7.1.2 | Elektronenstrahlmikrosonde | 106 |
| 7.1.3 | Ramanspektroskopie | 106 |
| 7.2 | Röntgendiffraktometrie | 107 |
| 7.2.1 | Daten | 107 |
| 7.2.2 | stellvertretende Röntgendiffraktogramme | 111 |
| 7.3 | Mikrosondendaten | 114 |
| 7.4 | Raman- und Mikrothermometrie-Daten | 134 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|-------|
| Abbildung 2.1: Blick auf die Küstenkordillere entlang der Pazifikküste nach Süden, ca. 10 km südwestlich von Chañaral | 4 |
| Abbildung 2.2: Metaturbidite der Las Tórtolas Formation, Lokalität Quebrada Las Animas..... | 4 |
| Abbildung 2.3: Chañaral-Mélange, Lokalität Punta Animas | 4 |
| Abbildung 2.4: Helle mesozoische Monzogranite bei El Barquito in scharfem Kontakt zu dunklen Metasedimenten | 4 |
| Abbildung 2.5: Geologische Karte des Arbeitsgebiets (modifiziert nach GODOY ET AL. 1999 und MERCADO 1978)..... | 5 |
| Abbildung 2.6: Zusammenfassende Übersicht über Stratigraphie, Magmatismus, Metamorphose und Tektonik im Arbeitsgebiet..... | 6 |
| Abbildung 2.7: NW-SO-Profil durch die Quebrada Vegas Quemadas (aus BELL 1987) | 8 |
| Abbildung 2.8: geologische Karte mit eingetragenen Probenpunkten und Profilen | 10 |
| Abbildung 2.9: Probe PH 21 (Lokalität Playa Hippie), rechts mit gekreuzten Nichols. Kurze Seite 1 mm.... | 12 |
| Abbildung 2.10: Quarzader der Probe PuA 51 | 14 |
| Abbildung 3.1: Regressionsgerade zur Kalibrierung der Tonmineralkristallinitätsdaten nach Warr & Rice (1994)..... | 17 |
| Abbildung 3.2: Röntgenspektrum der Probe QA3 aus der Quebrada Las Animas, Vergleich luftgetrocknetes mit glykolisiertem Präparat, Erklärung s. Text..... | 19 |
| Abbildung 3.3: Röntgenspektrum der Probe PuA 16 des luftgetrockneten sowie des glykolisierten Präparates. | 20 |
| Abbildung 3.4: Kristallinität des Illit-(001)-Peaks bei ca. 10 Å für alle gemessenen Proben..... | 23 |
| Abbildung 3.5: Kristallinität des Illit-(002)-Peaks bei ca. 5 Å für alle gemessenen Proben..... | 24 |
| Abbildung 3.6: Veränderung der Illitkristallinität entlang verschiedener Profile (vgl. Kapitel 2.2) | 26 |
| Abbildung 3.7 a und b: Kombinationen zwischen den Kristallinitäten verschiedener Illit- und Chlorit-Basisreflexe. | 27/28 |
| Abbildung 3.8: b-Parameter von K-Hellglimmern, dargestellt als kumulierte Häufigkeit in %..... | 30 |
| Abbildung 3.9: Qualitativer Plot von b-Parametern von Muskovit im Vergleich zu einigen wichtigen Reaktionen in pelitischen Gesteinen (nach GUIDOTTI & SASSI 1986 sowie darin zitierter Literatur)..... | 31 |
| Abbildung 3.10 BSE-Bild der Probe BA 4 mit Chlorit (hellste Phase, Chl), Phengit (hellgraue Phase, Phe) und Quarz (dunkelste Phase, Qz.) | 32 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3.11: BSE-Bild der Proben QV 2 (a+b; b ist Ausschnitt aus a, s. Kasten) und QVQ 9 (c) (Abkürzungen: Amph-Amphibol, Chl-Chlorit)..... | 33 |
| Abbildung 3.12: Klassifikation der gemessenen Chlorite nach Foster (1962) über das Verhältnis des Fe ²⁺ -Gehaltes zur Substitution auf den Tetraederplätzen | 38 |
| Abbildung 3.13: Chlorit-Zusammensetzungen in der Vektordarstellung nach Wiewiora & Weiss (1990) (verändert nach Hillier & Velde 1991) mit Si und R ²⁺ auf den orthogonalen Achsen, Al(total) und die Besetzung der Oktaederplätze (Σ Okt) sind als Isolinien eingetragen | 39 |
| Abbildung 3.14: Korrelation des Si-Gehaltes in Chloriten mit der Temperatur in Abhängigkeit vom Gehalt an Al, hier ausgedrückt als Anteil des hypothetischen Endgliedes „Al-Chlorit“ (nach DE CARITAT ET AL. 1993), Gleichungen der Regressionsgeraden s. Tabelle 3-5..... | 40 |
| Abbildung 3.15: graphische Darstellung der Beziehungen zwischen Muskovit und Celadonit, Al-Celadonit sowie einem hypothetischen Ferrimuskovit mit den dazugehörigen Substitutionen (zusammengestellt aus GUIDOTTI & SASSI 1998) | 43 |
| Abbildung 3.16: Si+Fe+Mg-Altotal-Diagramm (Al-cel: Al-Celadonit, ms: Muskovit, ferri ms: "Ferrimuskovit") für verschiedene metapelitische Proben aus der Mélange. Die Linie zeigt die Tschermak-Substitution an (s. Text). | 45 |
| Abbildung 3.17: Si-Isoplethen von Phengit im Gleichgewicht mit Quarz, K-Feldspat, Phlogopit und H ₂ O nach MASSONNE & SZPURKA (1997)..... | 46 |
| Abbildung 3.18: Klassifikation der gemessenen Ca-Amphibole in Metabasiten nach LEAKE ET AL. (1997)... | 47 |
| Abbildung 3.19: Al ₂ O ₃ gegen FeO ^{total} in Pumpellyiten | 49 |
| Abbildung 3.20: Ti-Gehalt von Titanit gegen Al+Fe ³⁺ . Eingetragen ist die Substitutionslinie von (Al,Fe) ³⁺ + OH ⁻ ↔ Ti ⁴⁺ + O ²⁻ | 50 |
| Abbildung 4.1: schematische Darstellung der p-T-Entwicklung eines hypothetischen Einschlusses mit dem Volumen V _m bzw. der Dichte ρ. | 53 |
| Abbildung 4.2: maßstabsgetreue Zeichnung einiger in den untersuchten Proben vorkommender Einschlusstypen..... | 54 |
| Abbildung 4.3: Ermittlung der Regressionsgeraden zur Korrektur der gemessenen Temperaturen am Linkam THM 600 | 59 |
| Abbildung 4.4: Raman-Spektrum von Hydrohalit, Probe PuA 41. Das Spektrum wurde bei -40°C aufgenommen..... | 61 |
| Abbildung 4.5: Raman-Spektrum eines Einschlusses mit CO ₂ | 62 |
| Abbildung 4.6: Vergleich des CH ₄ - und CO ₂ -Gehaltes der nichtwässrigen Phase der Typ 2-Einschlüsse mit den Typ 3a-Einschlüssen..... | 63 |
| Abbildung 4.7: Raman-Spektrum eines Einschlusses mit Methan, Ethan und Propan (kein CO ₂ , H ₂ O)..... | 64 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4.8: konstruierte Isopyknen für einen Einschluss mit $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ für verschiedene hypothetische Clathrat-Schmelztemperaturen (Daten s. Tabelle 4-10)..... | 69 |
| Abbildung 4.9: Auftragung der Dichte von Typ 1-Einschlüssen mit $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ gegen die Konzentration..... | 70 |
| Abbildung 4.10: Auftragung der Konzentration (a) bzw. der Homogenisierungstemperatur (b) getrennt nach Typ 1-Einschlüssen in Clustern und auf Bahnen..... | 72 |
| Abbildung 4.11: Isopyknen für $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ -Einschlüsse der Probe PuA 29 für maximale ($\rho = 0,97 \text{ g/cm}^3$) und minimale ($\rho = 0,90 \text{ g/cm}^3$) Dichte, eingezeichnet sind zusätzlich Isopyknen der Probe PuA 41.... | 73 |
| Abbildung 4.12: Zusammensetzung der Typ 2-Einschlüsse, salzfrei, H_2S wurde vernachlässigt | 74 |
| Abbildung 4.13: Vergleich der Dichte der Gasphase mit der Gesamtdichte für Typ 2-Einschlüsse. Für Typ 3a-Einschlüsse ist die Dichte der Gasphase gleich der Gesamtdichte, daher liegen diese Punkte auf der Winkelhalbierenden. | 75 |
| Abbildung 4.14: Isopyknen für Einschlüsse des Typs 2 (schraffierte Felder) und des Typs 3a (gepunktetes Feld) | 75 |
| Abbildung 4.15: Auftragung der Dichte gegen die Konzentration von Einschlüssen des Barquito-Plutons mit $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ bzw. $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$ (vgl. mit Abbildung 4.9)..... | 77 |
| Abbildung 5.1: Vergleich der Isopyknen zweier hypothetischer Einschlüsse mit H_2O -Salz und Gas..... | 83 |
| Abbildung 5.2: Isopyknen für Typ 1- und Typ 2-Einschlüsse der Probe PuA 51 (eingezeichnet: Isotherme der Chloritbildung. $T_F(\text{Chlorit})=360^\circ\text{C}$)..... | 85 |
| Abbildung 5.3: thermische Struktur eines Akkretionsprismas (modifiziert nach UNDERWOOD ET AL. 1993a) | 86 |
| Abbildung 5.4: Vergleich der p-T-Bedingungen der Chañaral-Mélange mit verschiedenen anderen fossilen Akkretionsprismen | 88 |
| Abbildung 5.5: Schema der p-T-Entwicklung der Chañaral-Mélange anhand von p-T-Daten aus mineralogischen Untersuchung des Rahmengesteins sowie aus Fluideinschlüssen in syntektonischen Quarzadern..... | 90 |
| Abbildung 5.6: schematisches Modell, das mögliche Zonen der Metamorphose und typische begleitende Strukturen innerhalb eines Akkretionsprismas zeigt (nach DiTULLIO & HADA 1993)..... | 91 |
| Abbildung 7.1: Röntgenspektrum einer Probe mit Calcit (Probe PH 21). | 111 |
| Abbildung 7.2: Röntgenspektrum einer Probe mit Aragonit (Probe PH 13)..... | 112 |
| Abbildung 7.3: Röntgenspektrum einer Probe mit Goethit (Probe QI 14)..... | 113 |

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Akkretionsprismen entstehen während des Subduktionsprozesses am Rand der überreitenden Platte durch Abschaben (1) ozeanischer Sedimente von der abtauchenden ozeanischen Platte sowie (2) der vom magmatischen Bogen stammenden klastischen ‚trench‘-Sedimente. Im marinen Milieu bilden sie sich unter Einbeziehung Wasser-gesättigter Lockersedimente. Daher ist ihre Entwicklung von Volumen und Zusammensetzung sowohl des mit den Sedimenten inkorporierten Meerwassers als auch der aus den Komponenten der Sedimente im Einfluss steigender Drücke und Temperaturen freigesetzten Fluide abhängig (z.B. KASTNER ET AL. 1991, MARTIN ET AL. 1995).

Moderne Akkretionsprismen sind in den vergangenen Jahren vor allem innerhalb verschiedener internationaler Bohrprogramme zum Gegenstand intensiver Erforschung geworden (vgl. TARNEY ET AL. 1991, KASTNER & LE PICHON 1992 sowie darin enthaltene Zitate). Insbesondere die große Bedeutung der Fluide als Transportmedium sowohl für Wärme als auch chemischer Bestandteile innerhalb der Akkretionsprismen und durch sie hindurch wird in den entsprechenden Untersuchungen betont.

Die Untersuchung eines fossilen Akkretionsprismas, wie es mit der hier bearbeiteten Chañaral-Mélange in Nordchile gegeben ist, ist notwendig, um kleinräumige Prozesse aus tieferen Niveaus von Akkretionskeilen (v.a. aus Tiefen unterhalb der maximalen Tiefe von Bohrungen an aktiven Kontinentalrändern) zu verstehen. Dabei stellten sich allgemein Fluideinschlüsse in syntektonischen Adern als sehr nützlich heraus, um die Fluidentwicklung in verschiedenen tektonischen Settings zu untersuchen (z.B. VROLIJK 1990). Fluideinschlüsse sind deshalb wertvoll, weil Fluide untereinander viel schneller ein thermodynamisches Gleichgewicht erreichen als feste Phasen und sich somit schneller auf p-T-Veränderungen einstellen.

Die Chañaral-Mélange liegt am Rande der Atacama-Wüste in der nordchilenischen Küstenkordillere. Bedingt durch das aride Wüstenklima liegen hier sehr gute Aufschlussverhältnisse vor. Die Mélange ist durch Sandstein-Blöcke in pelitischer Matrix charakterisiert. Die Blöcke sind durch eine duktile Deformation boudiniert worden und weisen mit Quarz gefüllte syntektonische Extensionsrisse auf. In die Mélange eingeschaltet finden sich Metabasite.

Gegenstand dieser Arbeit sind Untersuchungen an Metapeliten sowie Metabasiten bezüglich Tonmineral-kristallinität, Phengitbarometrie, b-Parameter, Mineralparagenesen sowie Chloritthermometrie. Die Verbindung mit Fluideinschlussuntersuchungen in den syntektonischen Quarzadern erlaubt eine quantitative Charakterisierung der p-T-Bedingungen der metamorphen Entwicklung der Chañaral-Mélange. Diese p-T-Bedingungen wurden bisher nur qualitativ als niedriggradige Metamorphose im Bereich der Grünschieferfazies beschrieben (DAMM & PICHOWIAK 1981, BELL 1984).

2 Regionale Geologie

2.1 Geologischer Rahmen

Paläozoische Sedimente, Vulkanite und Plutonite sind in Nordchile v.a. zwischen 25° und 29°S aufgeschlossen (Abbildung 2.1), einem Gebiet, das im Osten durch das Atacama-Störungssystem und das Längstal begrenzt ist und im Westen durch den Pazifischen Ozean. Die hier vorgestellte Arbeit konzentriert sich auf das Gebiet südlich von Chañaral zwischen 26°20' und 26°30'S mit einer N-S-Ausdehnung von 20 km und einer W-O-Ausdehnung von 20 km. Die nordchilenische Küstenkordillere erhebt sich hier steil auf 500 m und gewinnt nach Osten kontinuierlich an Höhe (bis 1400 m). Die Bergrücken werden von mit Konglomeratfächern ausgefüllten Trockentälern (Quebradas) durchschnitten.

Das Gebiet wird dominiert von wechselnden pelitischen und psammitischen Abfolgen, die über mehrere Hundert Meter zu verfolgen sind (Las Tórtolas Formation nach ULRIKSEN 1979, s. Abbildung 2.2). Die Psammite und Pelite wurden von einem kontinentalen magmatischen Bogen ähnlich dem der heutigen Anden erodiert und durch Turbiditströme im äußeren Bereich eines Tiefseefächers und auf einer Beckenebene abgelagert (BAHLBURG & BREITKREUZ 1993), wobei im Liefergebiet u.a. Gesteine eines Alters von mehr als 2,5 Ga erodiert wurden (BERG & BAUMANN 1985).

Zur Küste hin sind die Gesteine zunehmend deformiert, hier wird das Bild von klastischen Serien aus stark deformierten, chaotisch erscheinenden dunklen Metapeliten und helleren Metapsammiten bestimmt. BELL (1982, 1984, 1987) erkannte die intensiv zerscherten Gesteine als deformiertes Äquivalent der Las Tórtolas Fm. und bezeichnet sie als "Chañaral-Mélange" (s. Abbildung 2.3). Aufgrund der Deformationsmuster und des Vorhandenseins einer tektonischen Mélange mit eingeschalteten basischen Laven interpretiert er diesen Komplex als Teil eines Akkretionsprismas, das durch nach N und NO gerichtete Subduktion gebildet wurde.

In die Sedimente eingeschaltet sind auffällig grün erscheinende Vulkanoklastite, die teilweise als Kissenlaven ausgebildet oder als Tuffe abgelagert worden sind (BELL 1982). Diese Metabasite zeigen geochemische Charakteristika von Intraplatten-Ozeaninsel-Alkalibasalten, wie sie bei submarinen Eruptionen entstehen. Die Tatsache, dass die Metabasite mit den Turbiditen wechsellagern, legt den Schluss nahe, dass Eruption und Ablagerung gleichzeitig nahe der Quelle der Sedimente erfolgten (BELL 1987, BREITKREUZ ET AL. 1989).

Das stratigraphische Alter der Las Tórtolas-Formation wird durch rare Fossilfunde angezeigt. MILLER (1970) stuft die Gesteine auf Grund des Fundes von *Lophoctenium comosum* R. RICHTER ins Devon ein. COVACEVICH (in BELL 1982) spricht ihnen auf Grund der Spurenfossilassoziaton (*Laevicyclus* sp., *Lophoctenium* spp., *Nereites* sp., *Paleodictyon* sp., *Planolites* spp., *Rusophycus* sp., *Scalarituba* Sp., *Scolicia* spp.) ein ordovizisch-devonisches Alter zu. BÄHLBURG (1987a) erwähnt Conodontenfunde (*Gnathodus* sp.) innerhalb der Las Tórtolas Formation, die ins Karbon einzuordnen sind. Diese Information wird von BELL (1987) ergänzt, der Spiriferiden und Bryozoen aus einem Karbonatblock aus der Mélange beschreibt, die ein mögliches karbonisches bis permisches Alter aufweisen. BERG &

BAUMANN (1985) leiten über die Rb-Sr-Verhältnisse in den Metasedimenten ein maximales Ablagerungsalter von 380 ± 59 Ma ab. Diese Informationen lassen darauf schließen, dass die Sedimentation der Turbidite vom Oberen Devon bis zum Ende des Karbons andauerte.

In diese Sedimente intrudierten verschiedene Plutonite mit scharfen Kontakten, wie sie z.B. bei El Barquito südwestlich von Chañaral aufgeschlossen sind (Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5). Die ältesten dieser Plutonite stammen aus dem Oberkarbon und Perm und sind nördlich von Chañaral aufgeschlossen (Cerro del Vetado als Teil des Albayay-Plutons, Abbildung 2.5). Die Intrusionsdaten liefern einen weiteren wichtigen Anhaltspunkt für das Alter der Las Tórtolas Fm., die somit älter als ≈ 292 Ma ist (s. Tabelle 2-1).

Die exakte stratigraphische Position der Chañaral-Mélange ist aufgrund des Fehlens radiometrischer Daten nicht genau bestimmt. Eine indirekte Altersangabe könnten die für die Las Tórtolas Fm. bestimmten Metamorphosealter sein. Zwei Gesamtgesteins-Isochronen ergeben ein Metamorphosealter der Unteren bis Mittleren Trias (245-235 Ma) (BERG & BAUMANN 1985), während BROOK & PANKHURST (1986) anhand von Phylliten südöstlich von Chañaral auf der Basis von Strontiumisotopien eine Metamorphose ins Obere Karbon bzw. Untere Perm datieren (280 ± 15 Ma).

Im Unteren Jura intrudierten kalkalkaline Tonalite und Granitoide des I-Typs in das Gebiet südlich von Chañaral (Barquito-Pluton, Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5, BERG & BREITKREUZ 1983, BERG & BAUMANN 1985). Dadurch kam es zu einer intensiven kontaktmetamorphen Überprägung der Sedimente, angezeigt durch die Ausbildung von Chiastolith in einer schmalen Kontaktaureole (ca. 200 m, BERG & BREITKREUZ 1983).

Die Datierung der magmatischen, metamorphen und tektonischen Ereignisse ist zusammen mit der Stratigraphie in Abbildung 2.6 dargestellt, die zugehörigen Daten finden sich in Tabelle 2-1.

BAHLBURG & HERVÉ (1997) deuten die verfügbaren Informationen zum Paläozoikum bei Chañaral dahingehend, dass der paläozoische Kontinentalrand Nordchiles im Verlauf des Karbons eine Umwandlung von einem passiven in einen aktiven Rand erfuhr. Dabei wurden die im Devon und Karbon abgelagerten und zum Teil noch nicht verfestigten Turbidite deformiert, was zu einer Auflösung des Schichtverbandes führte. Während des sog. El Toco-Ereignisses (führte zur Intrusion des Albayay-Plutons, BAHLBURG & BREITKREUZ 1991) kam es zu einer nachfolgenden tektonischen Deformation. Diese Kombination aus synsedimentärer und tektonischer Deformation führte zur Bildung der Chañaral-Mélange (s. Kapitel 2.1.2).



Abbildung 2.1: Blick auf die Küstenkordillere entlang der Pazifikküste nach Süden, ca. 10 km südwestlich von Chañaral



Abbildung 2.2: Metaturbidite der Las Tórtolas Formation, Lokalität Quebrada Las Animas



Abbildung 2.3: Chañaral-Mélange, Lokalität Punta Animas.



Abbildung 2.4: Helle mesozoische Monzogranite bei El Barquito in scharfem Kontakt zu dunklen Metasedimenten

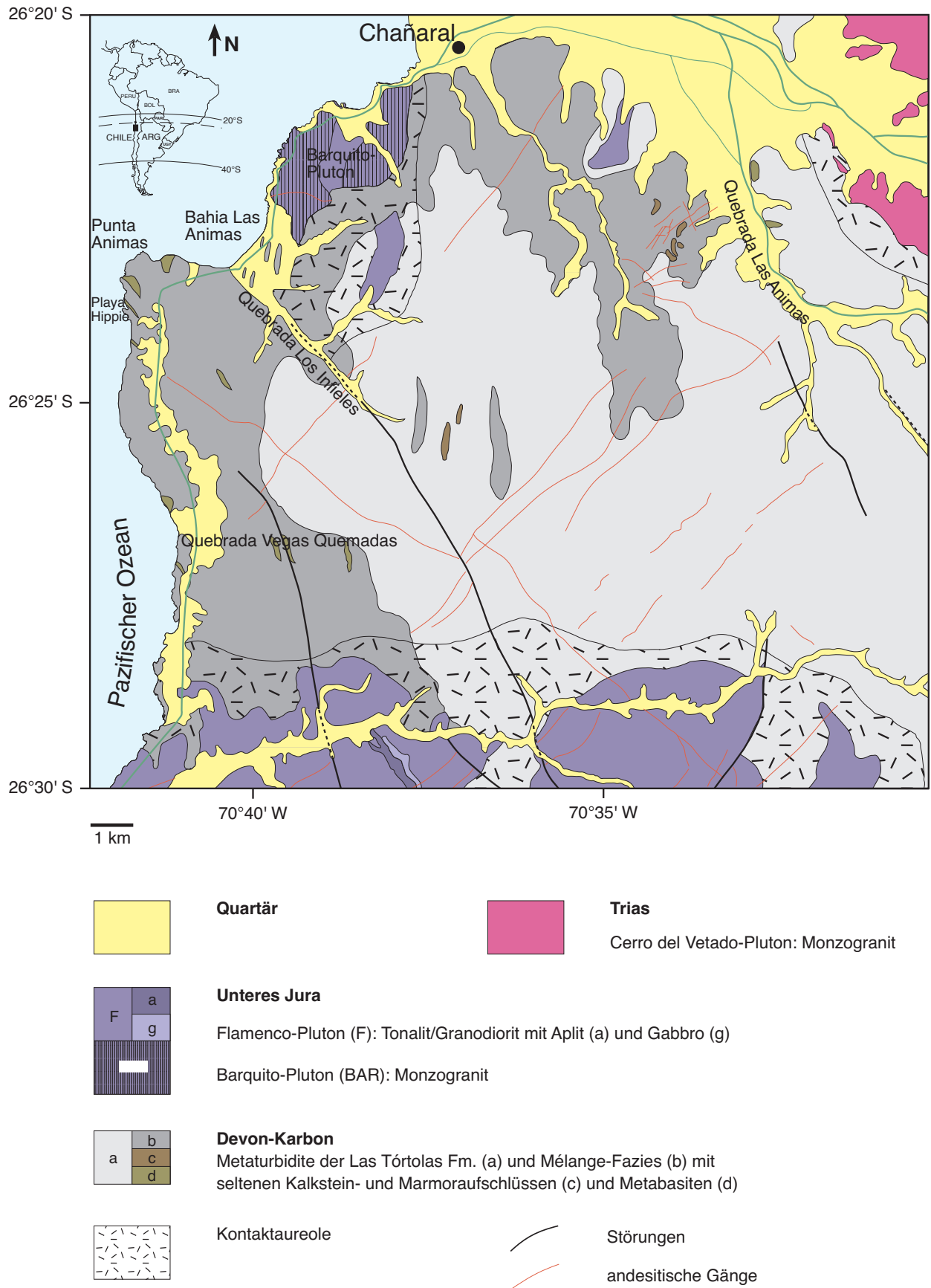


Abbildung 2.5: Geologische Karte des Arbeitsgebiets (modifiziert nach GODOY ET AL. 1999 und MERCADO 1978)

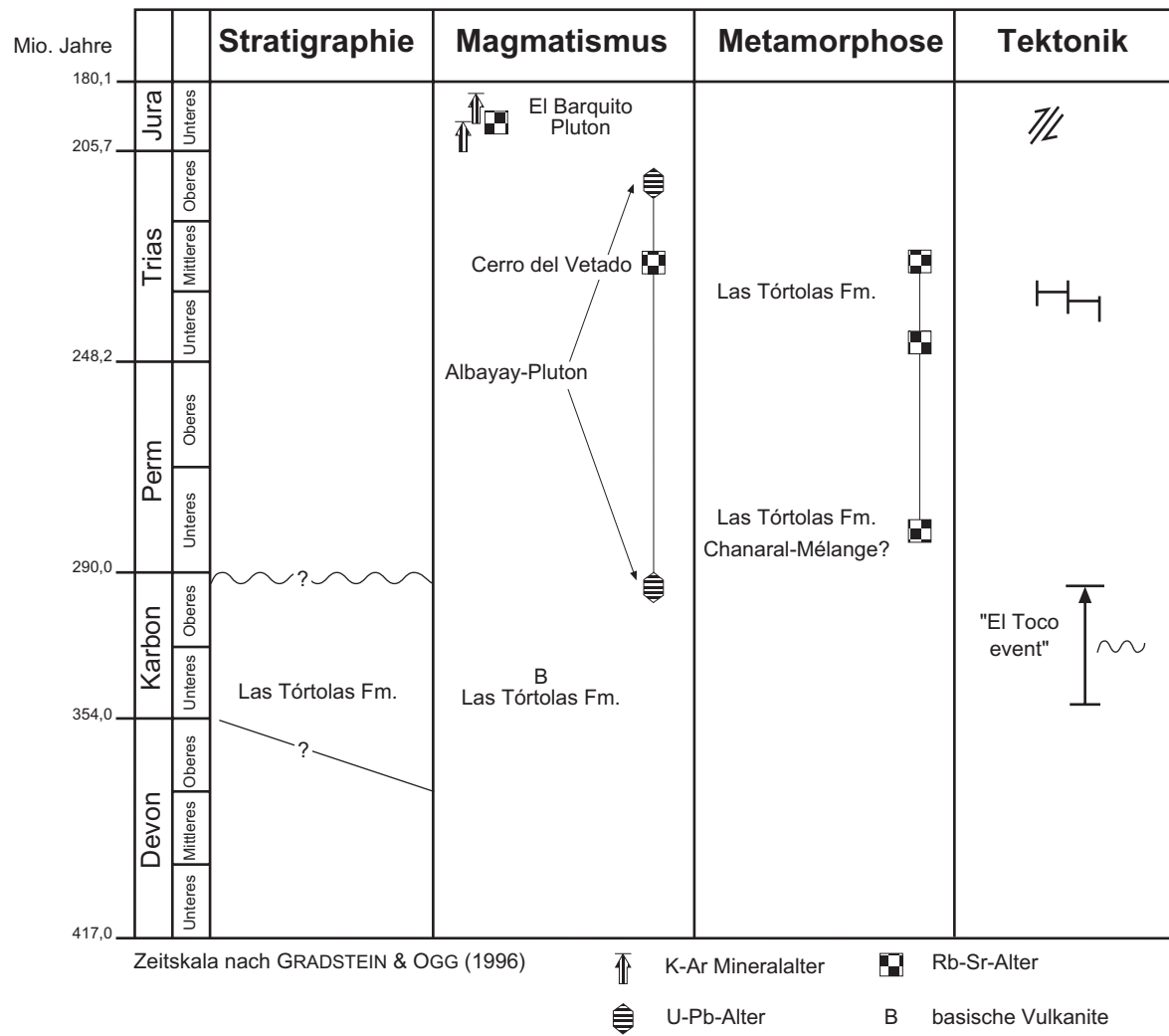


Abbildung 2.6: Zusammenfassende Übersicht über Stratigraphie, Magmatismus, Metamorphose und Tektonik im Arbeitsgebiet

Tabelle 2-1: Radiometrische Daten zu Abbildung 2.6:

| Einheit u. Lithologie | Alter (Ma) | Methode | Quelle |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| <u>Barquito-Pluton</u> | | | |
| Monzogranit | 193±3 | K-Ar, Biotit | FARRAR ET AL. (1970) |
| | 198,9±3,2 | Rb-Sr, Gesamtgestein/Biotit | BERG & BREITKREUZ (1983) |
| | 204±4 | K-Ar, Biotit | DÍAZ (1986) |
| <u>Albayay-Pluton</u> | | | |
| Granit | 217±12 | U-Pb, Zirkon | BERG & BAUMANN (1985) |
| Cerro del Vetado Granit | 236±3 | Rb-Sr, Gesamtgestein | BROOK & PANKHURST (1986) |
| Granit | 292±14 | U-Pb, Zirkon | BERG ET AL. (1983) |
| <u>Las Tórtolas Fm</u> | | | |
| Quarzit + Phyllit | 245-235 | Rb-Sr, Gesamtgestein | BERG & BAUMANN (1985) |
| Turbiditschiefer | 280±15 | Rb-Sr, Gesamtgestein | BROOK & PANKHURST (1986) |

2.1.1 Die Las Tórtolas Formation

Die Las Tórtolas Formation (Signatur (a) in Abbildung 2.5) ist gekennzeichnet durch rhythmisch wechselnde, dünnbankige Pelit/Psammit-Serien (s. Abbildung 2.2). Die Metapelite setzen sich überwiegend aus Illit, Chlorit, Quarz und detritischem Muskovit zusammen. Die Psammite bestehen aus Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Gesteinsbruchstücken, Hellglimmer und akzessorisch Biotit. Fast die Hälfte der Quarzpopulation besteht aus polykristallinem Quarz. Die Psammite zeigen einen Matrixgehalt von 10-30 %, wobei die aus Quarz, Illit, Chlorit und Serizit zusammengesetzte Matrix sekundär gebildet wurde. Daher erfolgt ihre Benennung als lithische Arenite (BELL 1982, BAHLBURG 1987a). Strömungsmarken zeigen nach BELL (1982) einen Transport nach SO bis SW, im Mittel nach SSO an. BAHLBURG ET AL. (1986) beschreiben dagegen eine große Variation der Schüttungsrichtungen zwischen Schüttungen nach NNO und SW, die im Durchschnitt aus SO kamen.

2.1.2 Die Chañaral-Mélange

Im Süden und Südosten der Stadt Chañaral sind in Küstennähe zerscherte Gesteine aufgeschlossen, deren Zusammensetzung den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Gesteinen entspricht, die jedoch durch Auflösung des in der Las Tórtolas Formation erkennbaren Schichtverbandes charakterisiert sind. Der gesamte Aufschluss wirkt dabei äußerst chaotisch und zeigt nur in wenigen Bereichen Strukturen in den Sediment- oder magmatischen Gesteinen, die eine stratigraphische Orientierung zulassen. Dabei wirkten die Pelite als Gleitschichten, auf denen die kompetenteren Gesteine über- und häufig als Fakoide in die pelitische Matrix eingeschoben wurden (Abbildung 2.3). Diese Einheit wurde von BELL (1982) als Chañaral-Mélange (Signatur (b) in Abbildung 2.5) benannt und im Zusammenhang mit einer jungpaläozoischen Subduktionszone interpretiert.

Der Kontakt zwischen der Chañaral-Mélange und der Las Tórtolas Formation ist graduell und somit schwer zu definieren. Es ist ein Übergang mit zunehmend durchmischten Bereichen aufgeschlossen, in die immer wieder Turbidit-Schichten eingeschaltet sind (Abbildung 2.7).

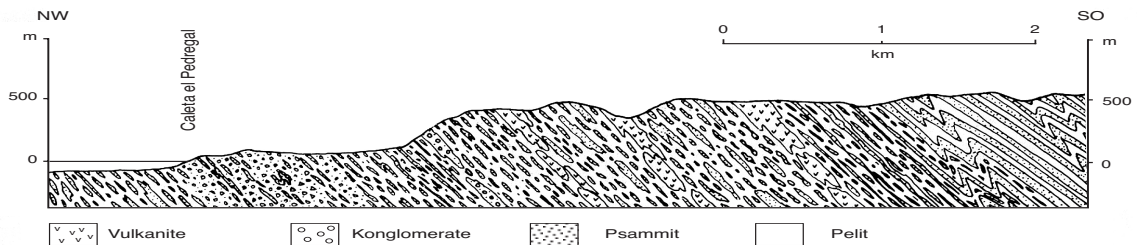


Abbildung 2.7: NW-SO-Profil durch die Quebrada Vegas Quemadas (aus BELL 1987)

Die Größe der Sandsteinblöcke oder Fakoide variiert zwischen wenigen Millimetern und mehreren Metern (Abbildung 2.3). Die Blöcke sind unregelmäßig geformt, teilweise auch gut gerundet und gewöhnlich kissen- oder spindelförmig. Meist haben sie scharfe Grenzen zur Matrix, andere gehen diffus in die Matrix über. Das Sandstein/Matrix-Verhältnis variiert dabei von 20% Sandstein südöstlich von Bahia Las Animas bis zu 90% östlich von Caleta el Pedregal im Bereich der Quebrada Vegas Quemadas.

Einige der Strukturen in der Mélange weisen auf "soft-sediment-deformation" hin. So beinhalten die Sandsteinblöcke zum Teil aufgearbeitete Tonklasten. Einige der Blöcke werden zum Rand hin immer pelitischer. Die Mélange wurde wahrscheinlich durch das mechanische Zusammenbrechen und Durchmischen sowohl unverfestigter als auch teilweise verfestigter (kohärenter aber plastischer) Sedimente gebildet.

2.1.2.1 Deformationsstrukturen

Die Mélange war drei Deformationsphasen ausgesetzt (BELL 1984 und 1987). Die früheste (D_1) zerscherte und zerstörte den Schichtverband, wodurch die Mélange entstand. Diese Strukturen (infolge von Dehnung ausgelängte und abgeflachte Blöcke: "Boudins") sind sehr gut in den kompetenten sandigen Lagen erhalten, die an der Küste südlich von Las Animas aufgeschlossen sind. In den meisten Fällen sind die Boudins durch die pelitische Matrix getrennt. Dort, wo sie zu Lagen verbunden sind, definieren sie ein planares S_1 -Gefüge, dessen Flächen NW-SO streichen und nach NO einfallen. Die ellipsoide Form der Klasten und deren Anordnung in Lagen resultiert aus einem Auseinanderreißen der ursprünglichen Sandstein-Schichten. Dabei treten alle Stadien von leichter Abschnürung ("necking down") der Schichten bis zur kompletten Trennung des Sedimentgesteines in individuelle Klasten auf. Mineral-verfüllte Extensionsklüfte sind besonders in den Sandsteinblöcken sehr verbreitet, seltener in der pelitischen Matrix. Es zeigt sich im Aufschluss eine Orientierung der Klüfte senkrecht zu der durch die Längsachse der Boudins definierten Extensionsrichtung.

Spätere Deformationsphasen (D_2 und D_3) produzierten Strukturen ("slaty cleavage" sowie Krenulationsschieferung), die sowohl in der Las-Tórtolas-Formation als auch in der Chañaral-Mélange zu finden sind (BELL 1984). In vielen Bereichen werden die D_1 -Strukturen von dem durch diese späteren Deformationsphasen hervorgerufenen starken tektonischen Gefüge überprägt. Die Ausbildung der D_2 - und D_3 -Strukturen gehen in diesem Fall mit einer niedriggradigen Metamorphose einher. Aus der Orientierung und Asymmetrie dieser Strukturen folgert BELL (1984, 1987), dass sie durch NO-gerichtetes Unterschieben in den Akkretionskeil hervorgerufen wurden.

2.2 Probenauswahl

Bei der Beprobung der Mélange konzentrierte ich mich auf das Gebiet zwischen dem Barquito-Pluton im Norden und Playa Hippie im Süden (Abbildung 2.5 sowie Abbildung 2.8). Für die Fluideinschluss-Untersuchungen wurden Sandsteinklasten beprobt, die Klüfte aufwiesen. Diese Klüfte waren auf die Klasten beschränkt und können der ersten, synsedimentären Deformationsphase zugeordnet werden (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Mit einer Probe aus einem Sandsteinklast wurde, wenn möglich, auch eine Probe aus der umgebenden pelitischen Matrix entnommen. Um Veränderungen beim Übergang von der Mélange in die Metaturbidite der Las Tórtolas Fm. und ebenso innerhalb der Mélange zu erfassen, wurden Proben entlang mehrerer Profile senkrecht zum Streichen der S_1 -Gefüge genommen (in Quebrada Los Infieles, Quebrada Vegas Quemadas, Playa Hippie). Außerdem wurden die in die Mélange eingeschalteten Metabasite beprobt.

Zum Vergleich der gewonnenen Daten und deren Einordnung dienen Proben aus dem Barquito-Pluton, dessen Kontaktbereich und der Las Tórtolas Fm. (Quebrada Las Animas, Quebrada Los Infieles). In Abbildung 2.8 sind die Orte der Probennahme, die beprobten Profile sowie die Anzahl der Proben dargestellt (s. auch Tabelle 2-2).

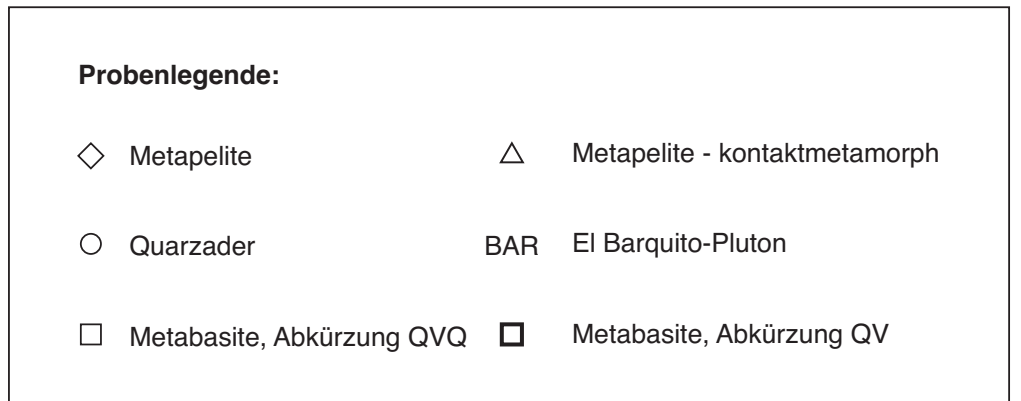
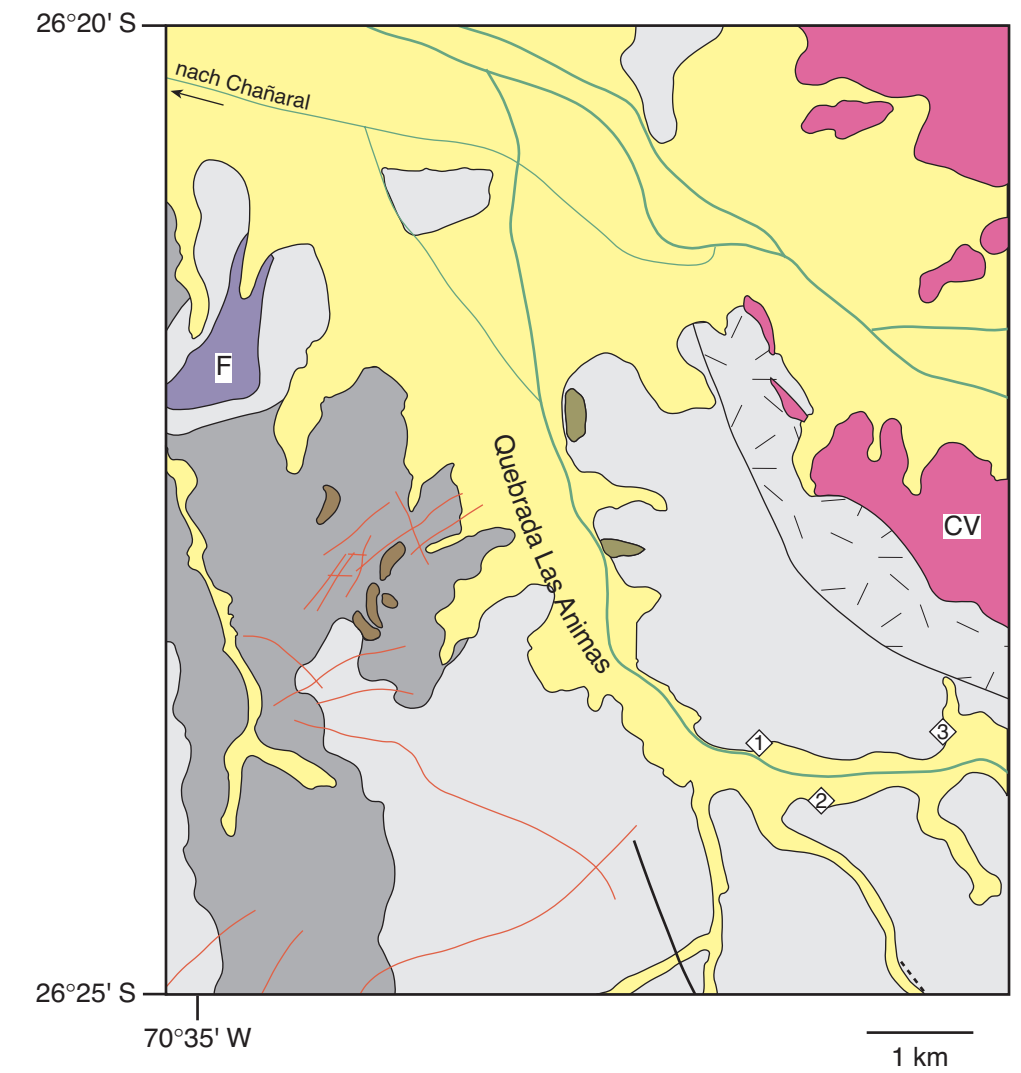
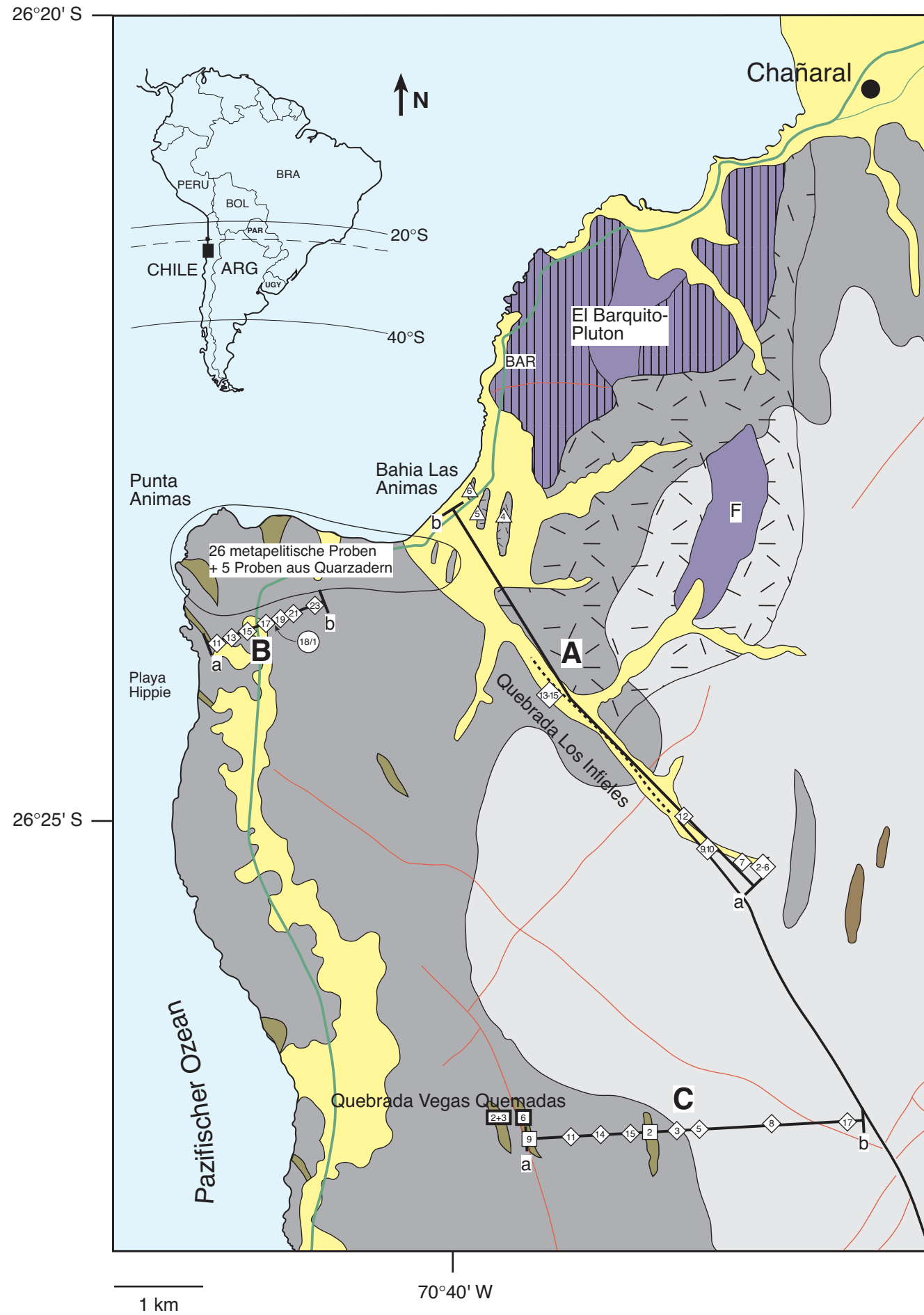


Abbildung 2.8: Probenkarte mit eingetragenen Probenpunkten und Profilen (Legende s. Abbildung 2.5)

Tabelle 2-2: Übersicht über die angewandten Methoden und die Probenlokalitäten (vgl. Abbildung 2.8)

| Probenlokalität Kürzel | | Probenart | Röntgendiffraktometrie | | Mikrosonde | Mikrothermometrie |
|---------------------------|-----------|------------------------|--|--|---------------------------|---------------------|
| | | | Tonmineral kristallinität | b-Parameter | | |
| El Barquito | BAR | Monzogranit | | | | BAR |
| Bahia Las Animas | BA | Metapelite, kontaktnah | 4, 5, 6 | | 4, 5, 6. | |
| Punta Animas | PuA | Metapelite | 5, 7, 12, 16B, 18, 20, 22, 24, 24-2, 26, 28, 30A, 30B, 33, 36B, 38, 40, 42, 44, 46, 50, 52, 56, 57, 58, 60 | 5, 7, 12, 16B, 18, 20, 22, 24, 28, 30A, 30B, 33, 36B | 7, 16, 20, 22, 24, 40, 50 | |
| | | Quar zadern | | | 51 | 41, 51, 29, 17, 21a |
| Playa Hippie | PH | Metapelite | 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 | 13, 15, 21, 23 | 15, 21 | |
| | | Quar zadern | | | | 18/1 |
| Quebrada Los Infieles | QI | Metapelite | 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 12, 13, 14 | | | |
| Quebrada Las Animas | QA | Metapelite | Aufschluss 1: 1, 2, 3, Aufschluss 2: 9, 10, 11, Aufschluss 3: 13, 14, 15 | | | |
| Quebrada Vegas Quemadas | QVQ | Metapelite | 3, 5, 8, 11, 14, 15, 17 | | | |
| | QV QVQ | Metabasite | | | 2, 3, 6, 2, 9 | |

2.3 Probenbeschreibung

2.3.1 Metapelite der Lokalitäten Punta Animas, Playa Hippie und Quebrada Vegas Quemadas

Die pelitischen Proben (Abbildung 2.9) sind sehr feinkörnig ausgebildet. Als Komponenten sind mikroskopisch Quarz (in Adern und in der Matrix), Tonminerale, Hellglimmer, Chlorit, Zirkone, Calcit (in Adern), Plagioklas, opake Phasen und selten Gesteinsbruchstücke zu erkennen. Die detritischen Plagioklase zeigen z.T. eine Verzwillingung nach dem Albitgesetz mit einem hohen Anorthitgehalt (erkennbar an den breiten Lamellen). Detritische Hellglimmer treten nur sehr vereinzelt auf.

Zum Teil definiert die Ausrichtung der Hellglimmer zwei Gefüge im Winkel von ca. 120° zueinander. In den meisten Schliffen sind Drucklösungsflächen ausgebildet sowie eine Fältelung senkrecht dazu. Sandstein-Klasten sind z.T. als σ -Klasten ausgebildet und werden von tonigem Material umflossen.

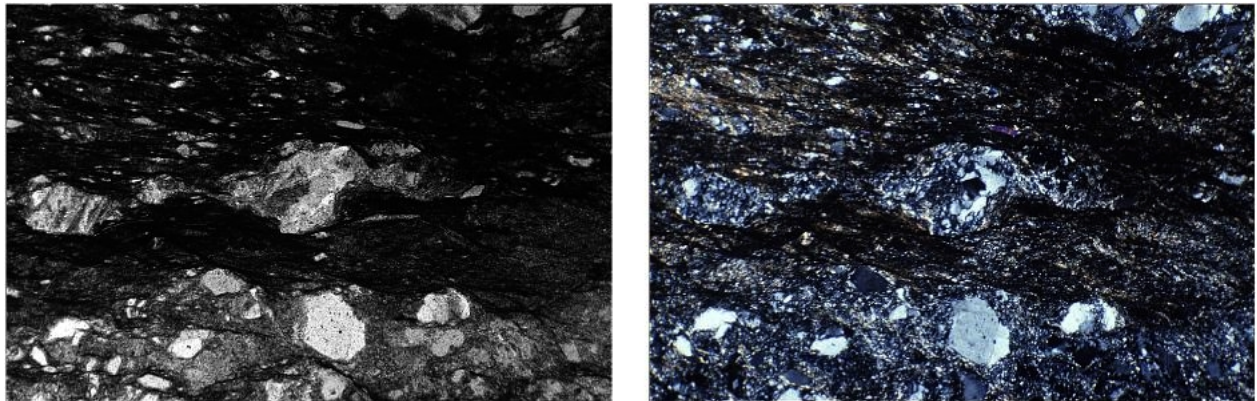


Abbildung 2.9: Probe PH 21 (Lokalität Playa Hippie), rechts mit gekreuzten Nichols. Kurze Seite 1 mm.

2.3.2 Metapelite aus dem kontaktnahen Bereich der Mélange (Lokalität Bahía Las Animas)

Diese Proben entsprechen im Wesentlichen den oben beschriebenen Metapeliten. Am Handstück erkennbare schwarze „Knoten“ bestehen aus Hellglimmern, in Probe BA 5 ist weiterhin Biotit enthalten. Chiasolith, wie er von BERG & BREITKREUZ (1983) beschrieben wurde, konnte nicht beobachtet werden.

2.3.3 Metapelite aus der Las Tórtolas Formation (Lokationen Quebrada Las Animas und Quebrada Los Infieles)

Diese aus den tonigen Bereichen der Metaturbidite entnommenen Proben sind zusammengesetzt aus Quarz, Tonmineralen, detritischem Muskovit und Chlorit. Proben aus dem Übergangsbereich zur Mélange (QI 13-15) zeigen zunehmend die charakteristischen Strukturen, wie sie in den Kapiteln 2.1.2 und 2.3.1 beschrieben wurden.

2.3.4 Quarzadern (Lokalitäten Punta Animas und Playa Hippie)

Wie erwähnt, wurden solche Adern beprobt, die sich auf die Sandsteinklasten beschränkten. Es wurden nur Quarzadern für die mikrothermometrischen Untersuchungen herangezogen. Weitere in den Quarzadern auftretende Minerale sind Calcit, Chlorit, Ankerit, Feldspat und selten opake Phasen. Es

zeigte sich, dass die untersuchten Adern aufgrund ihres Erscheinungsbildes in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

PuA 41, PuA 51 (Abbildung 2.10):

Diese Adern bestehen aus großen gestreckten Kristallen deren Korngrenzen gerade sind. Es ist kein Schersinn erkennbar; die Korngröße nimmt vom Rand der Adern zur Mitte hin zu. Die Quarzkörner zeigen undulöse Auslöschung und beginnende Subkornbildung sowie z.T. rekristallisierte Bereiche. Fluideinschlüsse in diesen Bereichen sind kleiner als in den weniger beeinflussten Körnern. Die feinkörnigen Quarzkörner am Rand der Ader sind klar und frei von Fluideinschlüssen. An den Korngrenzen sind teilweise dunkle Säume zu erkennen, die aus Rutil bestehen. In Probe PuA 51 sind schuppenartig ausgebildete Chlorite ausgefallen.

Zwei Generationen von Deformationsbändern liegen schräg zur Wachstumsrichtung mit einem Winkel von 120° zueinander. Die Fluidbahnen liegen schräg dazu und gehen über Korngrenzen hinweg.

PuA 29, PuA 17, PH 18/1, PuA 21a:

Quarzadern dieser Proben zeigen eine Palisadenstruktur aus schmalen gestreckten Kristallen mit überwiegend stark suturierten, teilweise aber auch geraden Korngrenzen. Ansonsten finden sich in diesen Adern dieselben Merkmale wie in den Proben PuA 41 und PuA 51. Bei PuA 17 sind im Zentrum der Ader schon makroskopisch Fluidbahnen erkennbar, die über die Korngrenzen hinweg zu verfolgen sind, z.T. enden sie an Korngrenzen.

2.3.5 El Barquito-Pluton

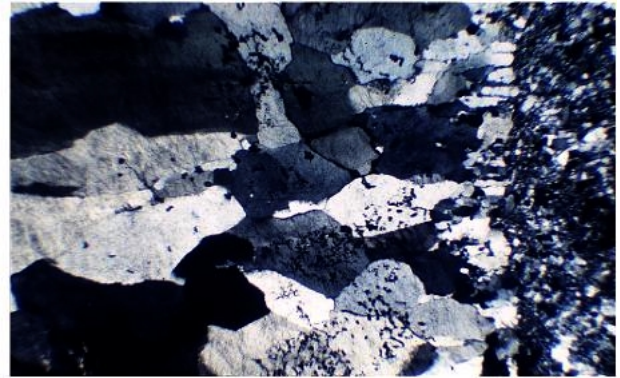
Beim El-Barquito-Pluton handelt es sich um einen hellen, häufig vergreisten Plutonkörper, der nach STRECKEISEN (1976) als Monzogranit klassifiziert werden kann (BERG & BREITKREUZ 1983). Im Dünnschliff erkennt man Quarz, verzwillingten Plagioklas (teilweise zonar gebaut), sericitisierten Kalifeldspat, Biotit, der teilweise in Chlorit umgewandelt wurde sowie Hornblende.

2.3.6 Metabasite aus der Quebrada Vegas Quemadas

Bei diesen im Gelände auffällig grün erscheinenden Gesteinen handelt es sich um pyroklastische Ablagerungen, die magmatische Bruchstücke, Glasfragmente sowie tonige Klaster enthalten. Die Metabasite sind zusammengesetzt aus verschiedenen Amphibolen (Mg-Hornblende, Aktinolit), Quarz, Zoisit, Hellglimmer, Epidot, Titanit, Rutil, Ilmenit, Albit, Pumpellyit und unterschiedlichen opaken Mineralen (u.a. Magnetit). Biotit und Chlorit sind als Umwandlungsprodukte primärer Pyroxene/Hornblendens vorhanden. Hohlräume in den Metabasiten sind häufig vorhanden und teilweise mit Chlorit verfüllt. In einigen Proben konnte eine Neubildung von Calcit beobachtet werden, in anderen Limonit und Epidot. In den Dünnschliffen ist weder eine Schieferung noch eine Einregelung der metamorphen Minerale erkennbar.



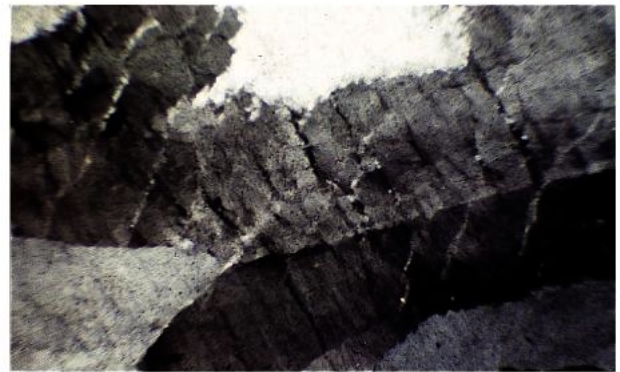
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Abbildung 2.10: Quarzader der Probe PuA 51. Die Bilder a) und b) zeigen die beiden gegenüberliegenden Kluftwände, in c) sind in der rechten Hälfte Kluftwand-parallele Fluidbahnen zu erkennen. Bild d) zeigt zwei Generationen von Deformationsbändern, die einen Winkel von ca. 120° bilden. Die Bilder b) sowie e) und f) (Ausschnitt von b im Hell- bzw. Dunkelfeld) zeigen in der Ader ausgefallene, schuppenförmig ausgebildete Chlorite, im Hellfeld deutlich an der grünen Farbe zu erkennen. (Alle außer c) und e) mit gekreuzten Nichols, kurze Seite in a) – e) jeweils 1,1 mm; in e) und f): 0,2 mm).

3 Niedriggradige Metamorphose in der Chañaral-Mélange

Metapelite und Metabasite stellen wichtige metamorphe Gesteine dar, da deren Minerale empfindlich auf Änderungen der p-T-Bedingungen reagieren. Sie sind daher gute Anzeiger der metamorphen Geschichte eines Gesteines (SPEAR 1993). Ein Problem bei der Anwendung von Geothermo- und -barometern stellt in niedrigmetamorphen Gesteinen, wie sie hier vorliegen, die mangelnde Gleichgewichtseinstellung in den Gesteinen dar, die erst ab grünschieferfaziellen Bedingungen erreicht wird (ESSENE & PEACOR 1995). Es sind jedoch etliche Methoden entwickelt worden, um die p-T-Entwicklung anhand der Untersuchung von Tonmineralumwandlungen zu charakterisieren (FREY & ROBINSON 1999 und darin zitierte Literatur). Solche Umwandlungen umfassen strukturelle und chemische Parameter wie die Kristallinität, Polytypien oder die Zusammensetzung der Oktaederschicht. Dabei wurden hauptsächlich Chlorite und K-Hellglimmer untersucht, die die häufigsten Minerale bei diagenetischen bis niedrigmetamorphen Bedingungen darstellen.

In den folgenden Kapiteln soll die Metamorphose der Mélange-Gesteine durch Kombination der Ergebnisse aus röntgenographischen Untersuchungen an Tonmineralen (Illit- und Chloritkristallinität, b-Parameter) sowie der Mineralogie der Chlorite und K-Hellglimmer charakterisiert werden.

3.1 Mineralogie und Tonmineralkristallinität der Tonfraktion der Metapelite

Die Messung der Tonmineralkristallinität ist eine empirische Methode, die zur Bestimmung der Diagenesebedingungen sowie der schwachen Metamorphose in tonführenden Gesteinen benutzt wird (FREY & ROBINSON 1999 sowie darin zitierte Literatur). Das Konzept basiert auf kinetisch kontrollierten, kontinuierlichen strukturellen und chemischen Umwandlungen z.B. während der prograden Illit-Muskovit-Entwicklung. Diese Abläufe werden als eine kontinuierliche Reihe metastabiler Phasenumwandlungen betrachtet (Ostwaldsches Stufengesetz, z.B. EBERL ET AL. 1990). Neben der Temperatur, die als wichtigste physikalische Einflussgröße für die Kristallinität angesehen wird, werden eine Reihe von weiteren Einflussfaktoren wie Fluiddruck, tektonische Spannungen, Zeit und Gesteinszusammensetzung genannt (FREY 1987).

Zur Bestimmung der Tonmineralkristallinität wird die Form der Basisreflexe im Röntgenspektrum vor allem der Minerale Illit und Chlorit analysiert. Von besonderem Interesse ist die jeweilige Breite der (00 λ)-Reflexe, die sich mit abnehmender Kristallitgröße (MERRIMAN ET AL. 1990), zunehmendem Anteil von Smektit-Zwischenlagen (NIETO & SANCHEZ-NAVAS 1994) sowie durch Gitterdeformation parallel zur (001)-Kristallgitterebene (ÁRKAI ET AL. 1996) vergrößert.

Die am häufigsten angewandte Methode ist die Messung der Illitkristallinität, die in der Regel als Halbwertsbreite des 001-Reflexes bei ca. 10 Å in Einheiten von $\Delta^{\circ}2\theta$ angegeben wird (KÜBLER 1967, KISCH 1980). Durch Bestimmung der Illitkristallinität ist die Einstufung von metapelitischen Gesteinen in den diagenetischen, anchizonalen und epizonalen Bereich möglich. Neben der Illitkristallinität kann auch die Chloritkristallinität für die Bestimmung metamorpher Grade herangezogen werden (ÁRKAI ET AL. 1995,

WARR 1996). Dabei kann vor allem die Kombination mit der Illitkristallinität mikrostrukturelle Beziehungen aufzeigen und Informationen über Wachstumsprozesse der Tonmineralphasen liefern (WARR 1997).

3.1.1 Zur Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometrie wird zur Strukturaufklärung und zur Identifikation u.a. von Mineralen benutzt. Grundlage ist die BRAGGSche Bedingung $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$, wobei λ die Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes (hier $\text{CuK}\alpha$ -Strahlung mit $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$), d der Abstand der Gitterebenen und θ der sogenannte Glanzwinkel ist (ATKINS 1987). Der Probenstrahl fällt mit dem Winkel θ , der in einem vorgegebenen Bereich variiert wird, auf die Probe ein; bei solchen Winkeln, für die die BRAGGSche Bedingung erfüllt ist, treten Intensitätsmaxima auf, so dass sich für verschiedene Minerale entsprechend der unterschiedlichen Strukturen charakteristische Röntgenspektren ergeben. Aus dem Winkel θ , der einem Intensitätsmaximum entspricht, kann man die Abstände d zwischen den Gitterebenen errechnen. Die Messparameter finden sich in Kapitel 7.1.1 im Anhang.

3.1.2 Probenaufbereitung

Die pelitischen Proben wurden in einem Mörser zu ca. erbsengroßen Bruchstücken zerstoßen und in destilliertem Wasser 45 min im Ultraschallbad bei 35 kHz behandelt. Die Fraktion $> 2 \mu\text{m}$ wurde durch Zentrifugieren (4 min bei 1000 U/min) und Dekantieren abgetrennt und die Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ im Überstand durch Zugabe einer 1 M CaCl_2 -Lösung mit Ca^{2+} -Ionen gesättigt (EBERL ET AL. 1987). Dieses Vorgehen führt dazu, dass Ca^{2+} als dominierendes Kation in die Zwischenschichten von evtl. vorhandenem Smektit eingelagert und somit dessen Schichtdicke auf 15 \AA festgelegt wird. Dadurch ist eine eindeutige Identifikation von Smektit möglich.

Nach dem Absedimentieren und viermaligem Waschen der Tonfraktion mit destilliertem Wasser wurde die Suspension auf Objektträger pipettiert, wobei auf eine möglichst konstante Probendicke geachtet wurde (ca. $1\text{-}3 \text{ mg/cm}^2$). Durch diese Vorgehensweise erhält man basisflächenorientierte Texturpräparate, die nach dem Lufttrocknen analysiert werden können. Zur Identifizierung quellfähiger Tonminerale wurden die Proben teilweise mit Ethylenglykol für mindestens 24 h im Exsikkator behandelt (MOORE & REYNOLDS 1989).

Die Indizes für die Tonmineralkristallinität erhält man aus dem Röntgenspektrum durch Fitten der entsprechenden Peaks über den FWHM-Parameter ("Full Width Half Maximum": Halbwertsbreite) des FIT-Programmes der DIFFRAC-AT Software (s. Kapitel 7.1.1 im Anhang). Dabei wurden für Illit die (001)- und (002)-Peaks (bei ca. 10 \AA bzw. 5 \AA) und für Chlorit die (001)-, (002)- und (003)-Peaks (bei ca. 14 \AA , 7 \AA bzw. $4,7 \text{ \AA}$) ausgewertet.

Alle hier vorgestellten Daten wurden nach dem von WARR & RICE (1994) vorgeschlagenen "Crystallinity Index Standard" (CIS) kalibriert, der eingeführt wurde, um Kristallinitätsdaten zwischen verschiedenen Labors auch bei unterschiedlicher Probenaufbereitung vergleichbar zu machen.

Dazu werden vier Standards (Beschreibung s. WARR & RICE 1994), die den gesamten Kristallinitätsbereich von Diagenese bis zur Epizone abdecken, gleichzeitig mit den zu messenden

Proben aufbereitet und die Illit-(001)- sowie Chlorit-(002)-Reflexe gemessen. Zusammen mit den Daten der glykolisierten Präparate erhält man 32 Datenpunkte für die Kalibrierung. Die CIS-Literaturdaten werden gegen die unkalibrierten Daten aufgetragen, durch lineare Regression erhält man eine Gleichung zur Umrechnung der eigenen Daten. Dabei wurde eine gute Korrelation der gemessenen Standards mit den CIS-Daten festgestellt ($r^2=0.94$). Abbildung 3.1 zeigt die Kalibrierung und die Regressionsgleichung, die dazugehörigen Daten sind in Tabelle 3-1 aufgeführt.

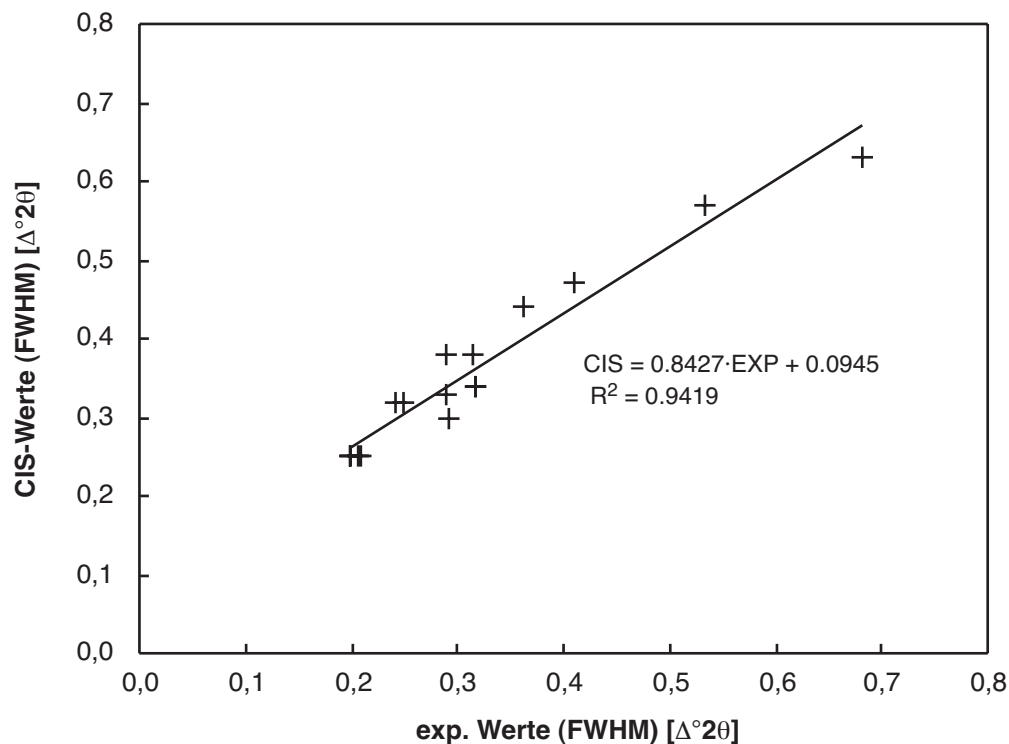


Abbildung 3.1: Regressionsgerade zur Kalibrierung der Tonmineral kristallinitätsdaten nach WARR & RICE (1994)

Tabelle 3-1: Daten zu Abbildung 3.1 (EXP: experimentell ermittelte Daten; CIS: Soll-Werte nach WARR & RICE 1994)

| Probe | ILLIT (001) [Δ°2θ] | | | | CHLORIT (002) [Δ°2θ] | | | |
|-------|--------------------|------|--------------|------|----------------------|------|--------------|------|
| | | | glykolisiert | | | | glykolisiert | |
| | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS |
| SW1 | 0,68 | 0,63 | 0,53 | 0,57 | 0,32 | 0,34 | 0,32 | 0,34 |
| SW2 | 0,41 | 0,47 | 0,36 | 0,44 | 0,29 | 0,30 | 0,29 | 0,33 |
| SW4 | 0,32 | 0,38 | 0,29 | 0,38 | 0,25 | 0,32 | 0,24 | 0,32 |
| SW6 | 0,21 | 0,25 | 0,20 | 0,25 | 0,21 | 0,25 | 0,20 | 0,25 |

3.1.3 Mineralogie der Tonfraktion

Die Tonfraktion der untersuchten Proben enthält die Minerale Quarz-Muskovit/Illit-Chlorit-Albit (mit wenigen Ausnahmen) \pm K-Feldspat \pm Calcit \pm Aragonit (Mineralogie aller Proben in Tabelle 7-1 im Anhang). In einigen Proben der Lokationen Quebrada Animas, Quebrada Los Infieles und Quebrada Vegas Quemadas konnte Goethit identifiziert werden, der durch die Verwitterung von Pyrit entstehen kann (MOORE & REYNOLDS 1989).

Die Auswertung der Spektren der glykolisierten Präparate gibt Hinweise auf das Auftreten von Smektit, Kaolinit, Illit-Smektit- und Chlorit-Smektit-Wechsellagen. Die folgende Auswertung beruht, wenn nicht anders angegeben, auf MOORE & REYNOLDS (1989).

Hinweise auf Kaolinit sowie auf Chlorit-Smektit-Wechsellagen konnten in keiner Probe gefunden werden.

Bei einigen Proben (z.B. QA3, Abbildung 3.2) treten nach dem Glykolisieren der Präparate neue Peaks bei ca. $5-6^{\circ}2\theta$ sowie bei $9-11$ und $16-17,7^{\circ}2\theta$ auf. Diese weisen auf Illit/Smektit-Wechsellagen hin. Die Position des Peaks zwischen $5-6^{\circ}2\theta$ weist auf die Art der Wechsellagerung hin, in diesem Fall eine statistische Verteilung (Peak nahe $5,2^{\circ}2\theta$). Zwischen 16 und $17,7^{\circ}2\theta$ liegt der (002)/(003)-Peak, dessen Position Aufschluss über den Anteil an Illit an den Illit/Smektit-Wechselschichten liefert. In diesem Beispiel befindet sich der Peak bei $15,88^{\circ}2\theta$ bzw. $5,58 \text{ \AA}$, was einem Illit-Gehalt von 20% entspricht.

Bei der überwiegenden Zahl der Proben kam es durch die Glykolisierung der Präparate zu keiner Verschiebung der Illit-Peaks, es war teilweise eine leichte Peakverschärfung zu beobachten. Dies bedeutet, dass der Gehalt an quellfähigen Mineralen $<10\%$ ist. Die Analyse des Illitspektrums hinsichtlich eines Gehaltes an Smektit anhand der Intensitätsverhältnisse der (001)- und (003)-Peaks wie von SRODON (1984) vorgeschlagen, ist hier wegen der Überlagerung des (003)-Peaks von Illit bei $26,68^{\circ}2\theta$ bzw. $3,34 \text{ \AA}$ durch den Quarz-(101)-Peak nicht möglich.

In Abbildung 3.3 ist das Röntgenspektrum der Probe PuA 16 dargestellt als typisches Beispiel für die Proben der Chañaral-Mélange. Im Anhang finden sich weitere stellvertretende Beispiele für Proben mit Calcit, Aragonit und Goethit (Abbildung 7.1-Abbildung 7.3 im Anhang).

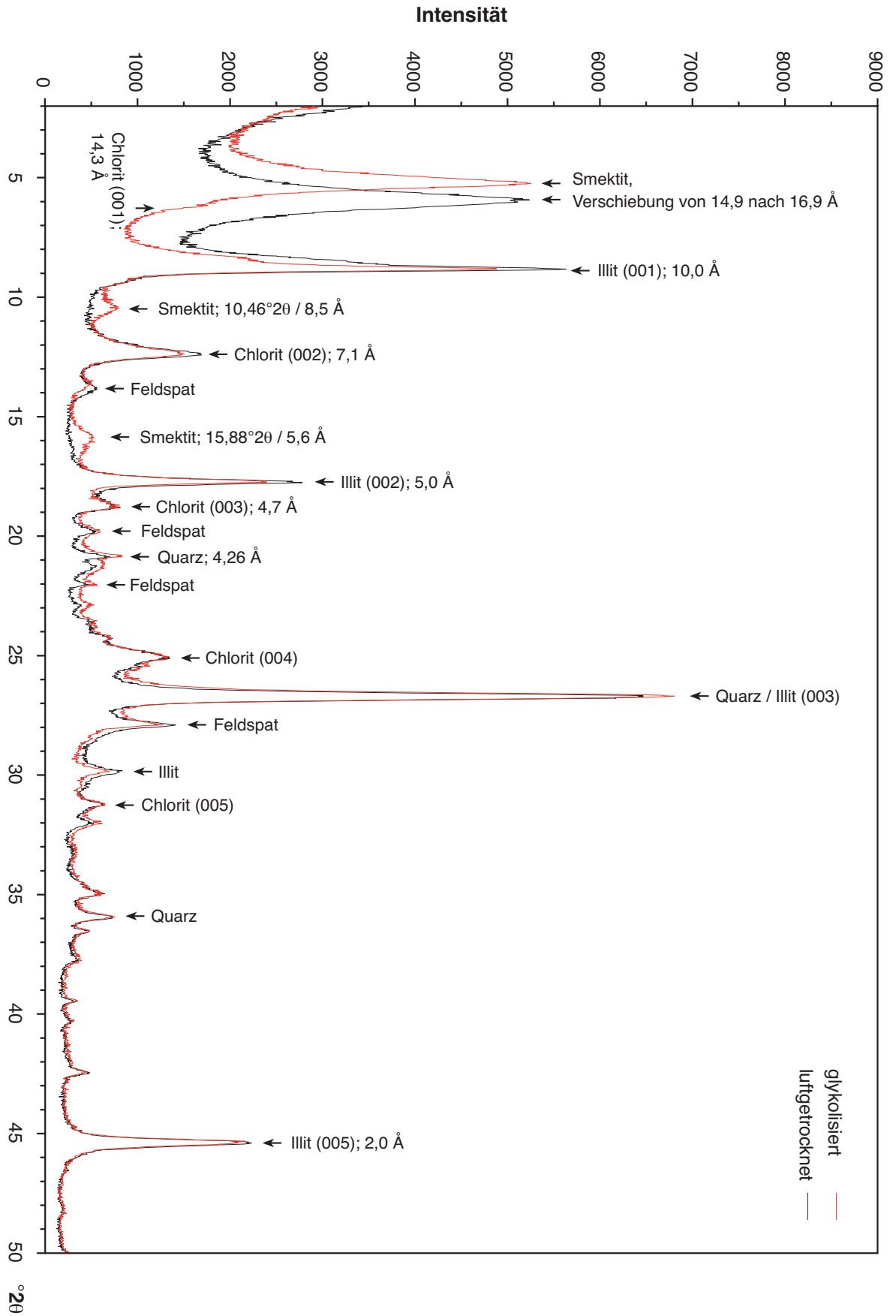


Abbildung 3.2: Röntgenspektrum der Probe QA 3 aus der Quebrada Las Animas, Vergleich luftgetrocknetes mit glykolisiertem Präparat

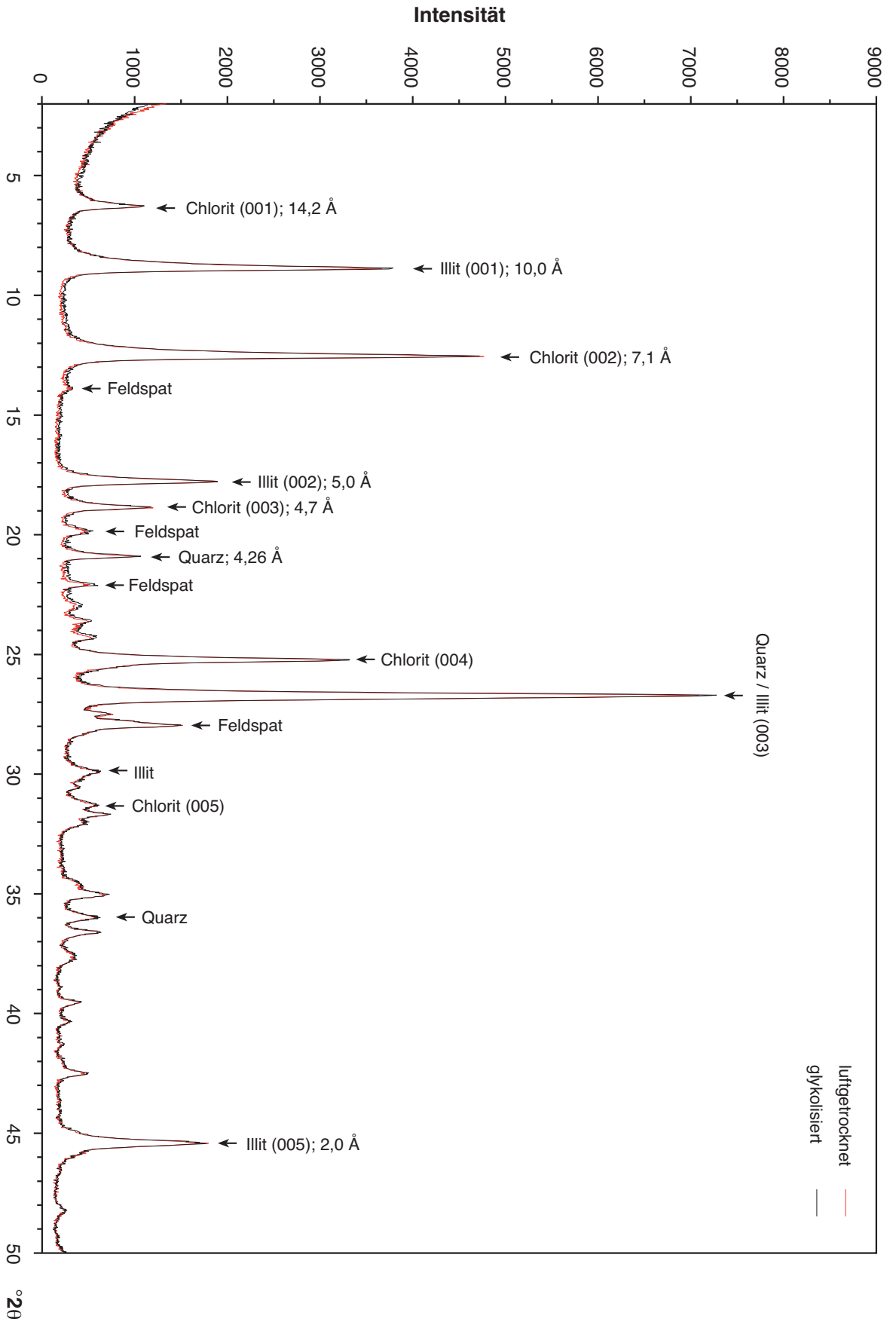


Abbildung 3.3: Röntgenspektrum der Probe PUA 16 des luftgetrockneten sowie des glykolisierten Präparates

3.1.4 Tonmineralkristallinität

Der Illit-(001)-Peak (luftgetrocknet) wird, den Arbeiten Küblers folgend, traditionell für Untersuchungen zur Kristallinität benutzt (KÜBLER 1967, 1968, 1984, 1990). Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird dieser Peak jedoch bei Anwesenheit von zwischengelagertem Smektit stark verbreitert. Daher wird von mehreren Autoren der Illit-(002)-Peak von Ca^{2+} -gesättigten, luftgetrockneten Präparaten analysiert (EBERL & BLUM 1993, NIETO & SANCHEZ-NAVAS 1994, WARR 1996 und 1998). Zur Bestimmung der Chloritkristallinität wird üblicherweise der intensivste Reflex, der (002)-Reflex bei 7 \AA ausgewertet. Dieser Peak wird jedoch durch Kaolinit überlagert ((001)-Reflex bei 7 \AA). In solchen Fällen ist dann die Verwendung des Chlorit-(003)-Peaks vorzuziehen (WARR 1996 und 1998). Der Illit-(002)- und der Chlorit-(003)-Peak werden nicht von den Reflexen anderer Minerale überlagert, ihre Breite hängt also nur von der Kristallitgröße ab. In dieser Arbeit wurden alle vier der genannten Peaks ausgewertet, um die Aussagen über die Tonmineralkristallinität jeweils anhand der unbeeinflussten Peaks zu überprüfen.

Wie erwähnt lässt sich über die Analyse der Tonmineralkristallinität der Metamorphosegrad in metapelitischen Gesteinen feststellen. Dabei erfolgt eine Einteilung in verschiedene Zonen (Diagenesezone, Anchizone, Epizone). WARR ET AL. (1996) teilen die Anchizone weiter in Obere und Untere Anchizone ein, wobei die Grenze für den Illit-(001)-Wert bei $0,335 \Delta^{\circ}2\theta$ liegt.

Die genaue Festlegung der Grenzen zwischen den einzelnen Zonen erweist sich aufgrund der fehlenden Standardisierung der Daten als schwierig (Tabelle 3-2). Unterschiedliche Messparameter, verschiedene Auswertungsmethoden und vor allem eine nicht einheitliche Probenaufbereitung führen zu großen Abweichungen der Messdaten einzelner Labors. Wie oben beschrieben, wurden die in dieser Arbeit vorgestellten Daten nach dem „Crystallinity Index Standard“ (CIS) nach WARR & RICE (1994) kalibriert. Da bei dieser Methode die Standardproben zusammen mit den Proben zur Bestimmung der Kristallinität aufbereitet und gemessen werden, werden diese Einflussfaktoren ausgeglichen. Dadurch werden die Daten unterschiedlicher Labors direkt vergleichbar (ausführliche Betrachtung der Problematik s. WARR 1998). In dieser Arbeit werden die von KÜBLER (1967) eingeführten und von BLENKINSOP (1988) empfohlenen Grenzen verwendet (vgl. Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Vergleich der Kristallinitätszonen-Grenzen verschiedener Autoren (alle Angaben in $\Delta^{\circ}2\theta$).

| Peak | Autor | Grenze | |
|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| | | Epizone-Anchizone | Anchizone-Diagenesezone |
| Illit 001 | KÜBLER (1967) | 0,25 | 0,42 |
| | WARR (1998) | 0,25-0,27 | 0,32-0,51 |
| Illit 002 | WARR (1996) | 0,23 | 0,36 |
| Chlorit 001 | ÁRKAI ET AL. (1995) | 0,26 | 0,37 |
| Chlorit 002 | KÜBLER (1967) | 0,25 | 0,42 |
| | ÁRKAI ET AL. (1995) | 0,24 | 0,30 |
| | WARR (1996) | 0,27 | 0,39 |
| | WARR (1998) | 0,24-0,31 | 0,35-0,44 |
| Chlorit 003 | WARR (1996) | 0,23 | 0,36 |

Die Tonminerkristallinitätsdaten (Rohdaten und kalibrierte Daten) für Illit und Chlorit finden sich in den Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 im Anhang. Die Auswertung des Illit-(001)-Peaks der Spektren der luftgetrockneten Präparate zeigt, dass die Werte der überwiegenden Zahl der Proben (92%) zwischen 0,28 und $0,41\Delta^{\circ}2\theta$ liegen (vgl. Abbildung 3.4). Sie sind somit alle der Anchizone nach Kübler (vgl. Tabelle 3-2) zuzuordnen. Dabei liegen 66% der Werte im Bereich der Oberen Anchizone, 34% im Bereich der Unteren Anchizone.

Werte $>0,42\Delta^{\circ}2\theta$ sind durch Überlagerung durch Smektit- bzw. Illit/Smektit begründet. So zeigt sich bei Auswertung des Illit-(002)-Peaks ein einheitlicheres Bild. Nahezu alle Werte liegen im Bereich der Anchizone (mit den Grenzen nach WARR 1996), wobei die Werte der Proben der Lokalitäten Quebrada Las Animas, Quebrada Los Infielos und Quebrada Vegas Quemadas tendenziell etwas höher sind (vgl. Abbildung 3.5). Dieser Trend zeigt sich, wenn auch undeutlicher, ebenfalls in den Illit-(001)-Daten (Abbildung 3.4).

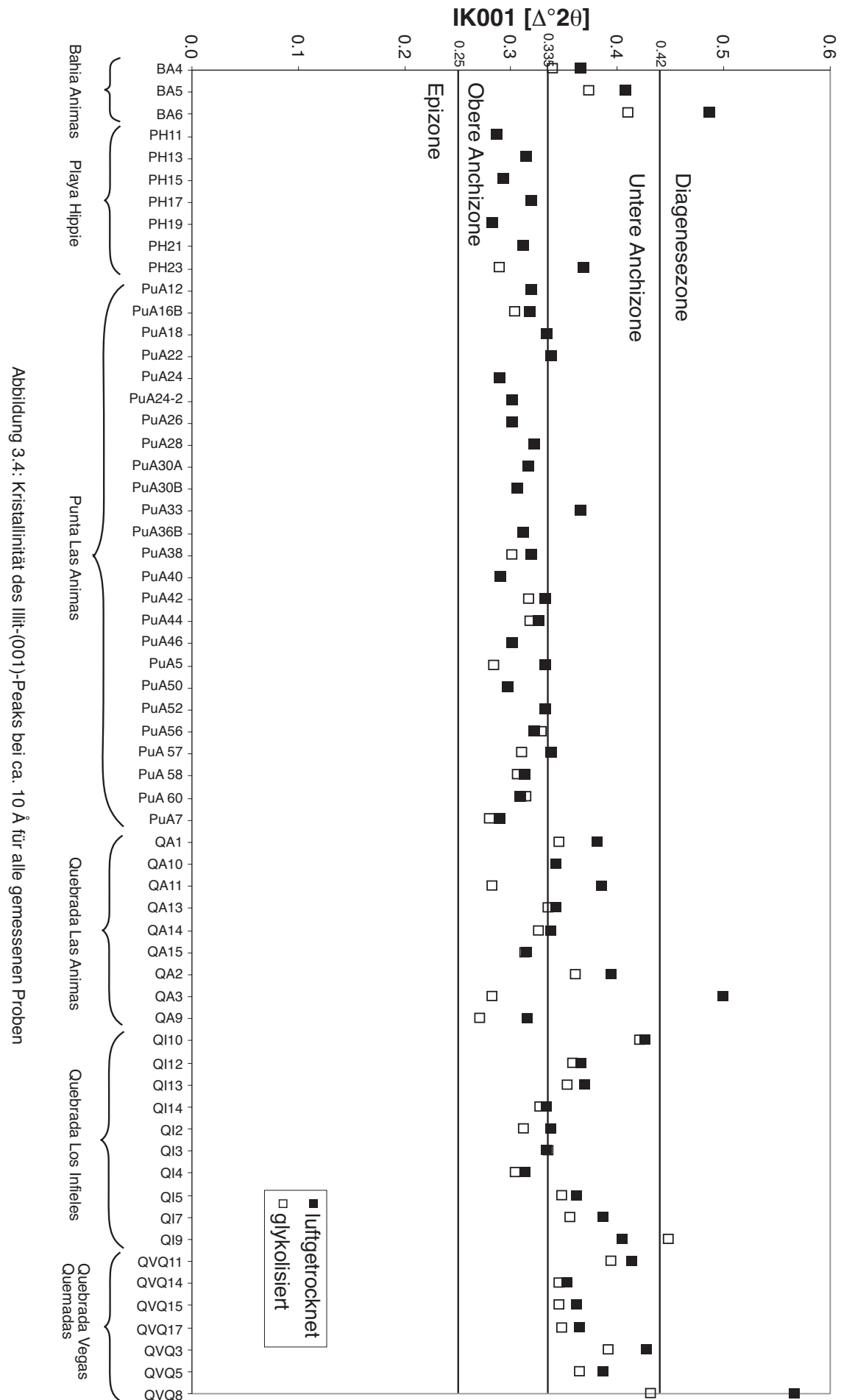


Abbildung 3.4: Kristallinität des Illit-(001)-Peaks bei ca. 10 Å für alle gemessenen Proben

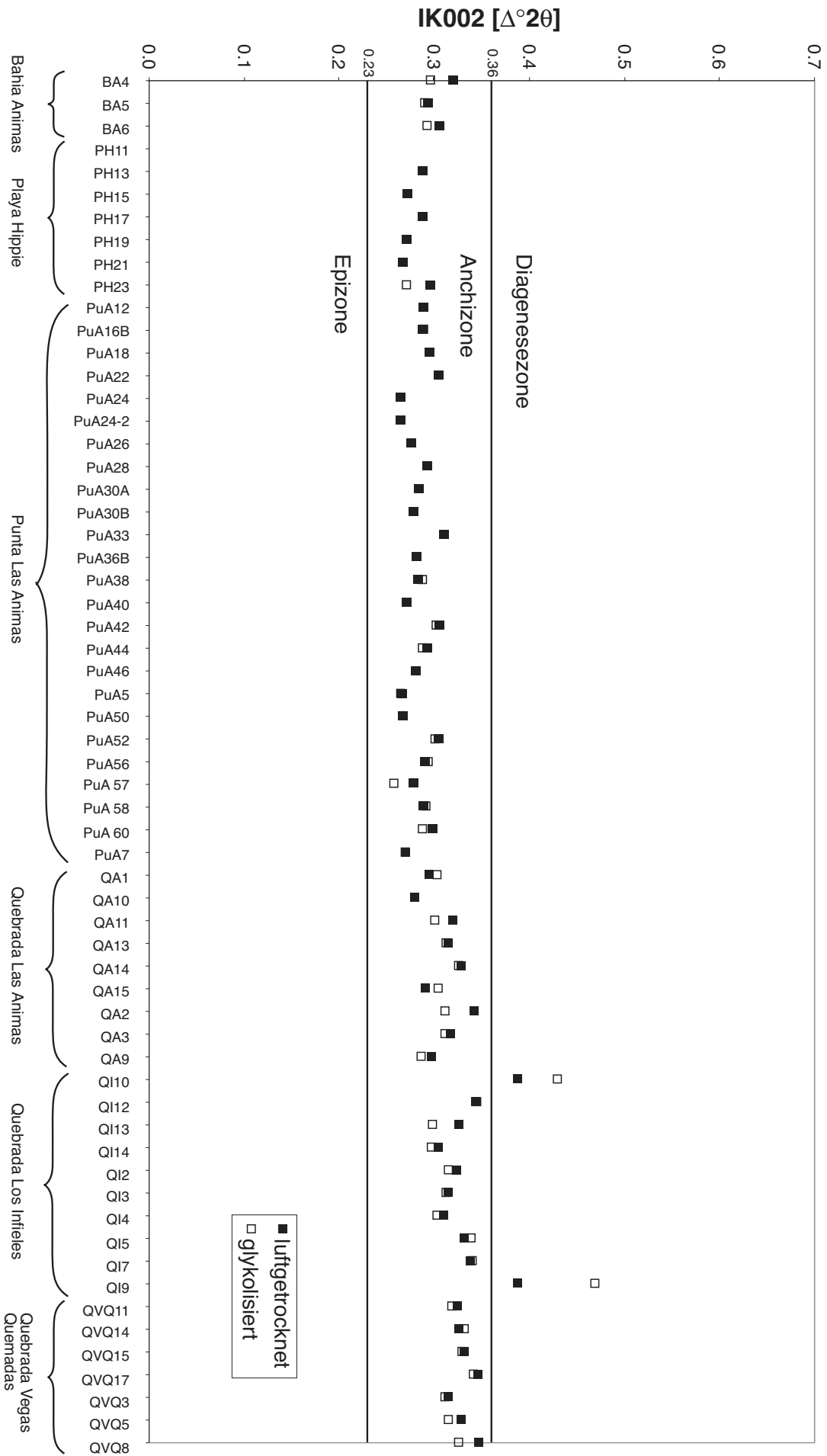


Abbildung 3.5: Kristallinität des Illit-(002)-Peaks bei ca. 5 Å für alle gemessenen Proben

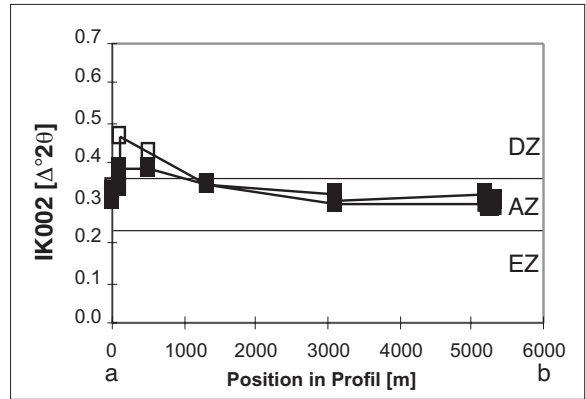
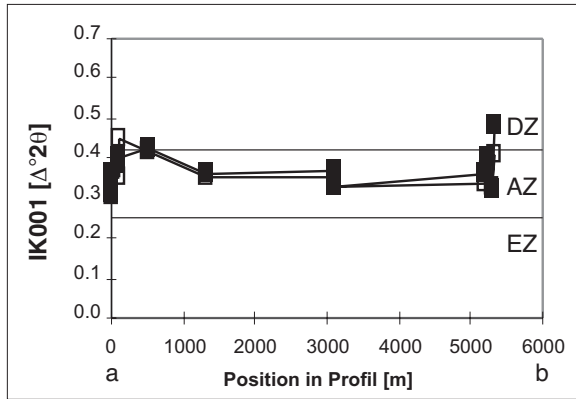
Um Unterschiede in der Tonmineralkristallinität innerhalb der Chañaral-Mélange und zwischen den Gesteinen der Chañaral-Mélange und der Las Tórtolas-Formation zu erkennen, wurden drei Profile aufgenommen (s. Kapitel 2.2). In Abbildung 3.6 ist die Illitkristallinität in Abhängigkeit von der Position der Probe innerhalb des Profils aufgetragen. In keinem der drei Profile ist ein Trend zu erkennen. Weder im Profil "Playa Hippie", das senkrecht zum Streichen der S_1 -Gefüge innerhalb der Mélange beprobt wurde, noch in den beiden anderen Profilen, die von der Mélange in die Las Tórtolas Fm. hineinreichen, sind signifikante Veränderungen zu erkennen. Unterschiede in den Kristallinitäten sind auf das Vorhandensein von Smektit oder Smektit-Illit-Wechselagerungen zurückzuführen und somit auf den Verwitterungsgrad der Proben (vgl. Kapitel 3.1.3). Dies zeigt sich im Vergleich der Illit-(001)- mit den Illit-(002)-Werten. Letztere zeigen einen wesentlich flacheren Verlauf. Ein weiterer Beleg für diese Deutung ist der Vergleich der Daten für die Kristallinitäten der glykolisierten mit denen der luftgetrockneten Präparate. Für den Illit-(001)-Peak verlaufen die Kurven der Daten der glykolisierten Präparate wesentlich flacher, da der Einfluss von quellfähigen Mineralen quasi "herausgefiltert" wurde.

Abbildung 3.7 a und b zeigen verschiedene Kombinationen von Illit- und Chlorit-Basisreflexen. Für keine der Peakkombinationen zeigt sich eine eindeutige Korrelation, d.h. dass das Wachstum der beiden Minerale unabhängig während unterschiedlicher Phasen erfolgte.

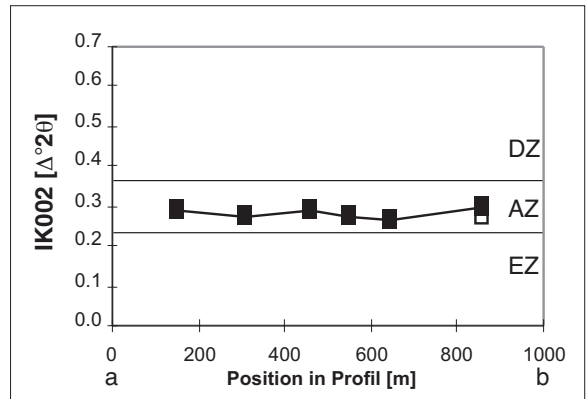
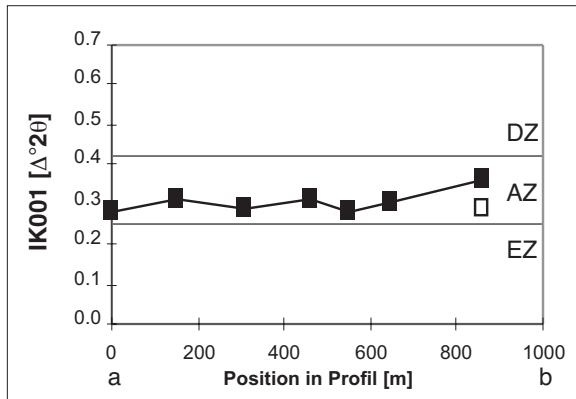
Man kann lediglich erkennen, dass die Chloritkristallinitäten weniger streuen, wenn man zu niedrigeren Werten für die Illitkristallinität übergeht. Nach FREY (1987) sind die Gründe hierfür noch nicht genau bekannt, es könnte jedoch auf die zunehmende chemische Homogenität der Chlorite aufgrund verbesserter Gleichgewichtseinstellung und Rekristallisation zurückzuführen sein.

Weiterhin sind die Chloritpeaks hier meist breiter als die Illitpeaks. Nach FREY & ROBINSON (1999) sind beide Phänomene darauf zurückzuführen, dass sich eine Beanspruchung unterschiedlich auf beide Minerale auswirkt. So bleiben in anchi- bis epizonalen Peliten mehr Fehlstellen in Chloriten erhalten, wodurch die Kristallitgröße im Vergleich zu derjenigen der Hellglimmer reduziert wird und in der Folge die Peaks breiter sind. Daher findet man vor allem in Gebieten hoher tektonischer Beanspruchung, wie es in der hier bearbeiteten Chañaral-Mélange der Fall ist, eine schlechte Korrelation zwischen Illit- und Chloritkristallinität.

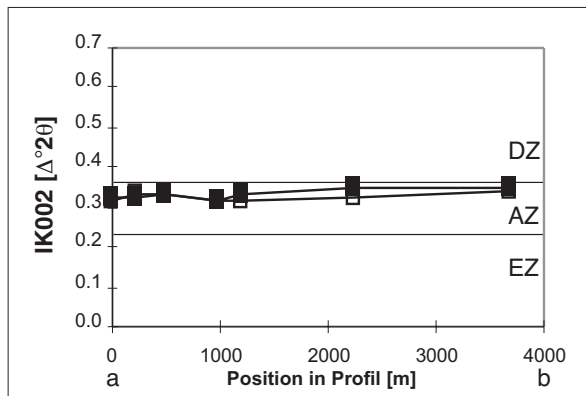
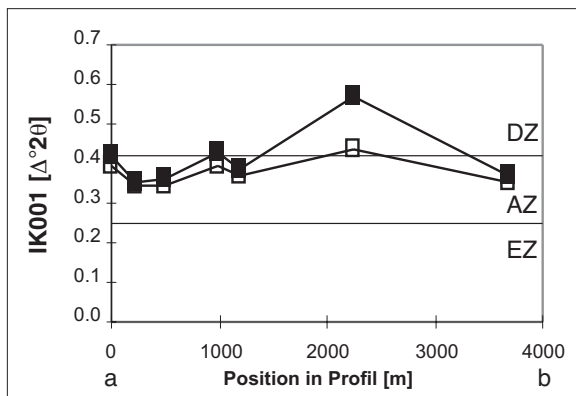
Profil A
Quebrada Los Infielos



Profil B
Playa Hippie



Profil C
Quebrada Vegas Quemadas



■ luftgetrocknet □ glykolisiert

DZ: Diagenesezone
AZ: Anchizone
EZ: Epizone

Abbildung 3.6.: Veränderung der Illitkristallinität entlang verschiedener Profile (vgl. Kapitel 2.2)

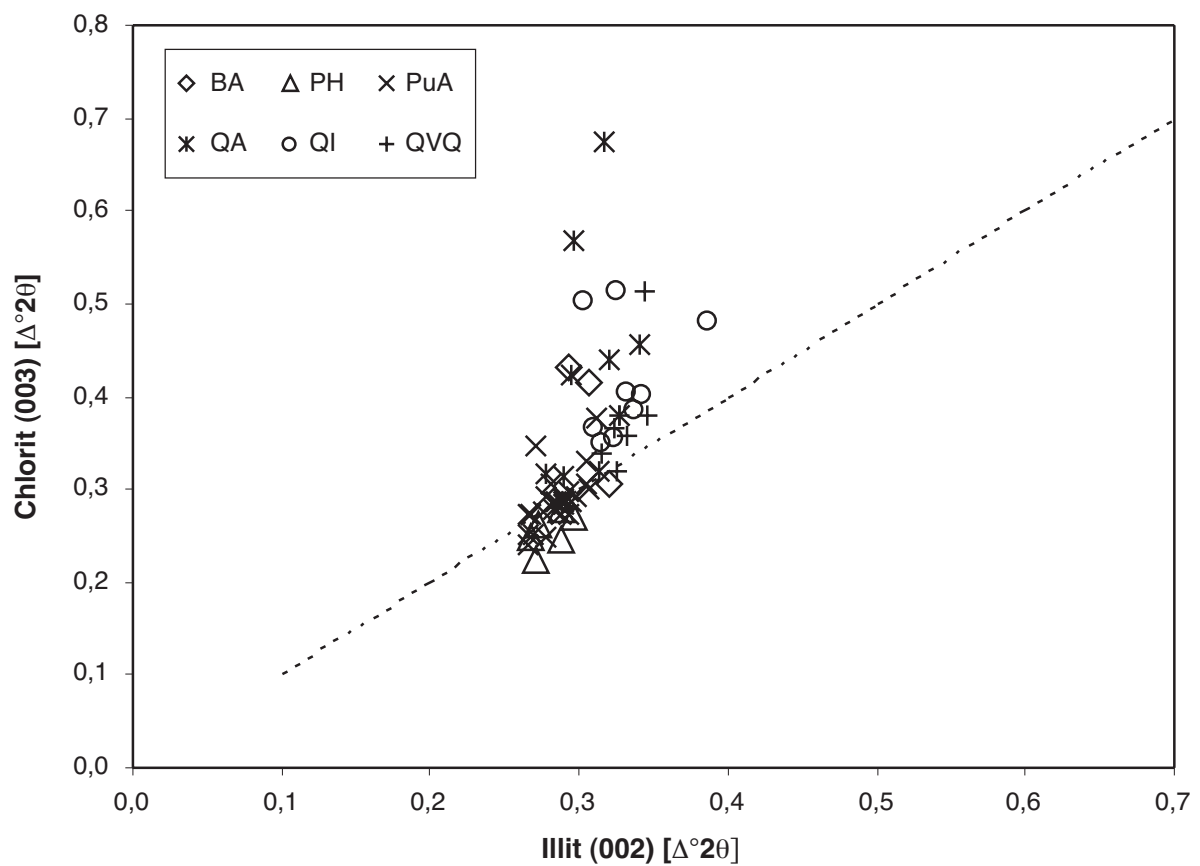
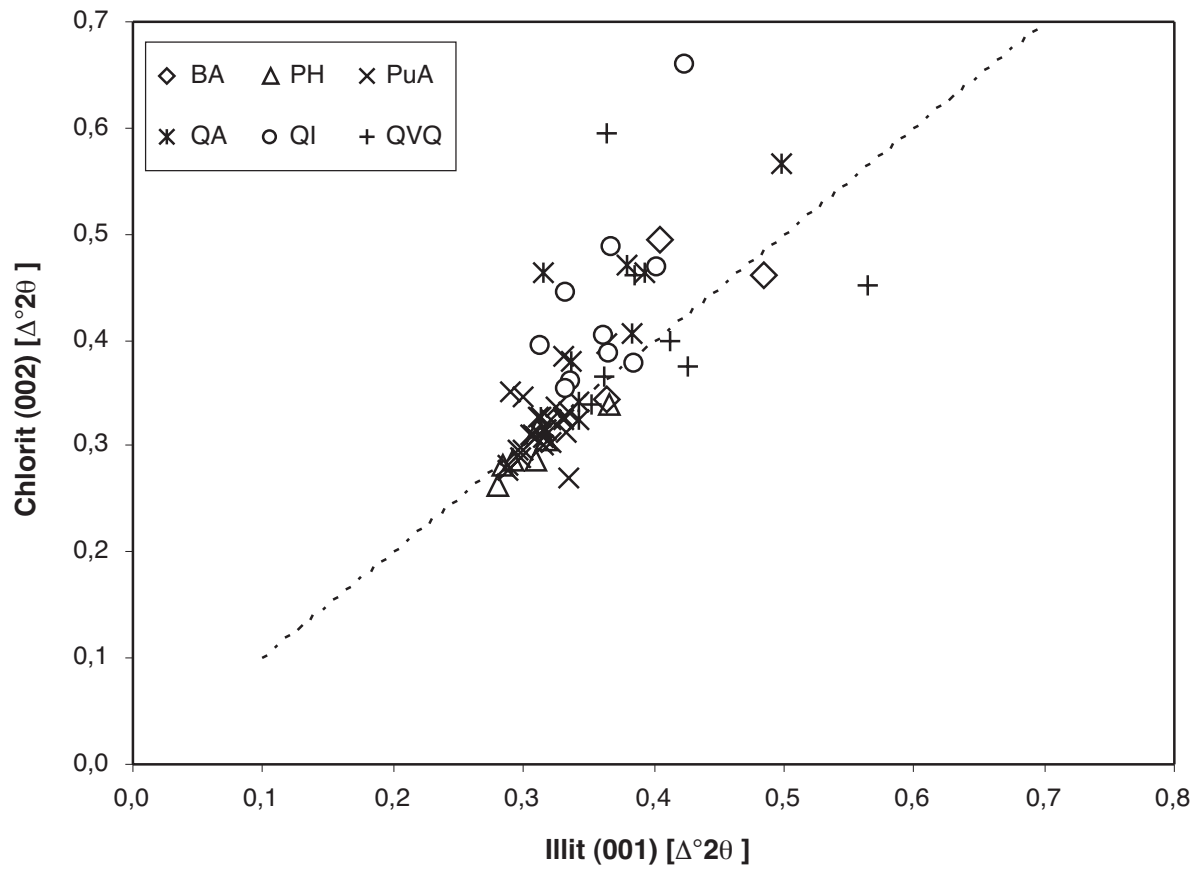


Abbildung 3.7 a: Kombinationen zwischen den Kristallinitäten verschiedener Illit- und Chlorit-Basisreflexe, luftgetrocknete Präparate.

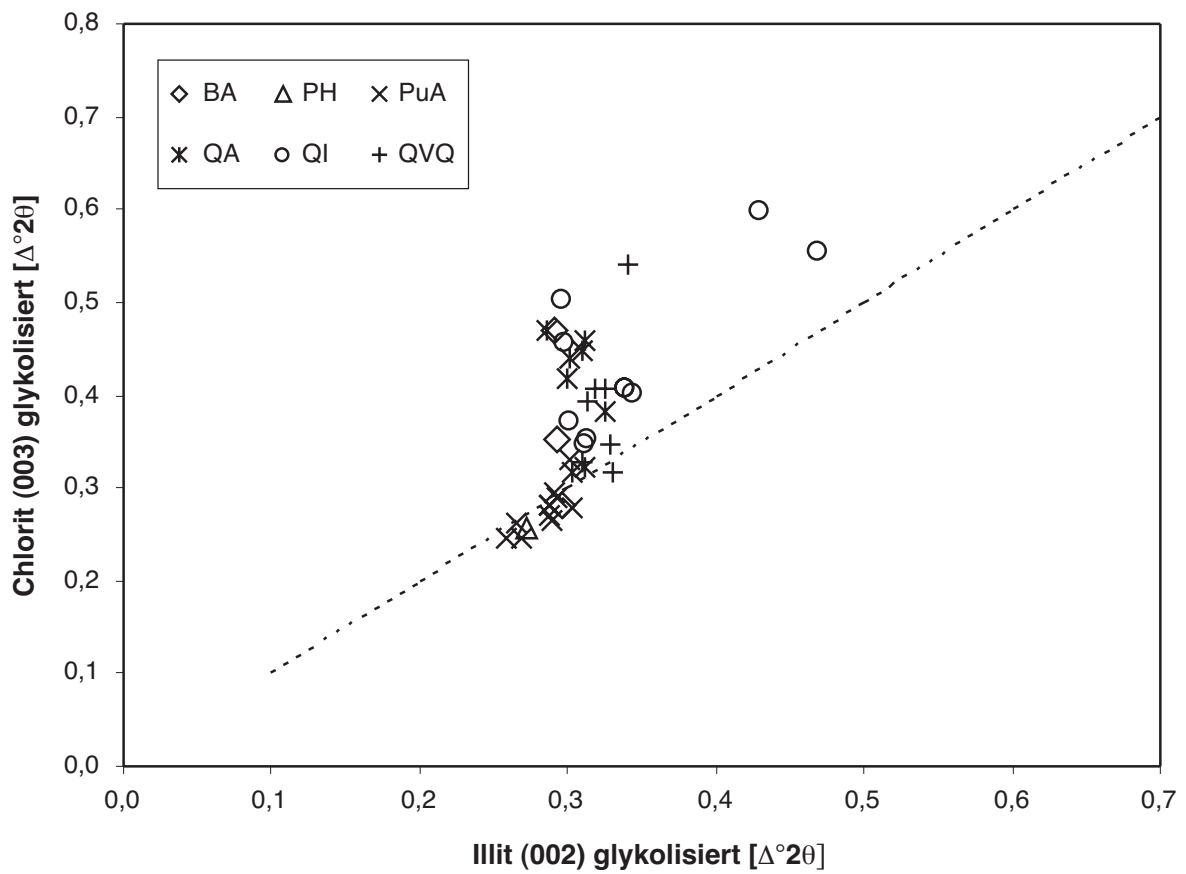
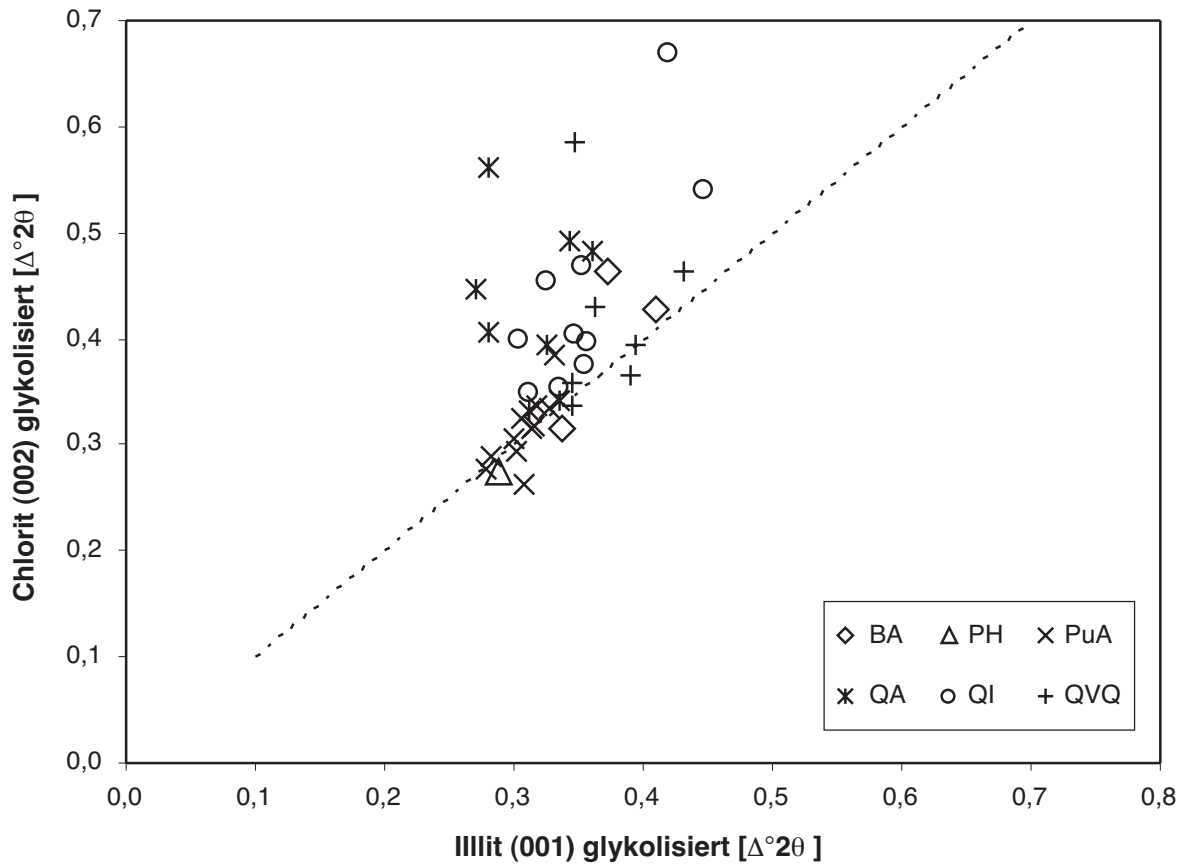


Abbildung 3.7 b: Kombinationen zwischen den Kristallinitäten verschiedener Illit- und Chlorit-Basisreflexe, glykolisierte Präparate

3.2 Korrelation der Tonmineralkristallinitätsdaten mit fazieskritischen Mineralparagenesen zur Ableitung von p-T-Bedingungen

Schwach metamorphe Gesteine werden anhand der Präsenz kritischer Minerale unterteilt, die sich in basischen Gesteinen (Metabasiten) mit Zunahme von Druck und Temperatur entwickeln. Diese Minerale werden benutzt, um die Zeolith-, Prehnit-Pumpellyit-, Pumpellyit-Aktinolith- und die Grünschiefer-Fazies im p-T-Diagramm zu definieren (s. Einteilung von FREY ET AL. 1991). Im Gegensatz zur Ableitung metamorpher Bedingungen aus Tonmineralkristallinitätsdaten beruht dieser Ansatz auf thermodynamischen Gesetzen. Dennoch scheint eine Korrelation zwischen diesen beiden Konzepten möglich, so dass sich aus der Bestimmung der Tonmineralkristallinität metamorphe Fazies und somit p-T-Bedingungen für die untersuchten Gesteine ableiten lassen (KÜBLER 1967, ÁRKAI 1991, WARR 1996 und 1998). Tabelle 3-3 zeigt die Zuordnung der Mineralfazieszonen zu Tonmineralkristallinitätsdaten nach WARR (1998).

Tabelle 3-3: Mittelwerte der Tonmineralkristallinitäten in verschiedenen Mineralfazieszonen aus Neuseeland (aus WARR 1998) (alle Angaben als Halbwertsbreite in $\Delta^{\circ}2\theta$)

| Mineralfazieszonen | Illit-(002)-Peak | Chlorit-(003)-Peak |
|------------------------------|------------------|--------------------|
| Zeolithfazies | 0,57 ± 0,46 | 0,50 ± 0,23 |
| Prehnit-Pumpellyit-Fazies | 0,32 ± 0,17 | 0,34 ± 0,22 |
| Pumpellyit-Aktinolith-Fazies | 0,25 ± 0,13 | 0,26 ± 0,14 |
| Grünschieferfazies | 0,19 ± 0,10 | 0,19 ± 0,10 |

Wie man aus Tabelle 3-3 und den in Kapitel 3.1.4 präsentierten Daten ersehen kann, können aufgrund der Illit-(002)-Werte die Proben der Lokaltäten Bahia Las Animas, Punta Animas sowie Playa Hippie eher der unteren Pumpellyit-Aktinolith-Fazies, die Proben der Lokaltäten Quebrada Las Animas, Quebrada Los Infielos und Quebrada Vegas Quemadas eher der Prehnit-Pumpellyit-Fazies zugeordnet werden. Nach FREY ET AL. (1991) werden die p-T-Bedingungen für die Prehnit-Pumpellyit-Fazies mit 175 bis 280°C bei 0,5 bis 4,5 kbar abgeschätzt. Das p-T-Feld der Pumpellyit-Aktinolith-Fazies hat eine Breite von 80°C bei einem sehr großen Druckbereich von 1,5-9,5 kbar. Dabei liegt die obere Temperaturgrenze zwischen 300 und 350°C (bei 2 bis 8 kbar). Diese Temperaturen stimmen gut mit dem von KISCH (1987) angegebenen Temperaturbereich für die Anchizone (200-300°C) überein.

3.3 Druckabschätzung anhand des b-Parameters von K-Hellglimmern in Metapeliten

Veränderungen des sogenannten b-Parameters von K-Hellglimmern werden häufig zur empirischen Druckabschätzung in niedriggradigen metapelitischen Gesteinen benutzt (FREY & ROBINSON 1999 und darin zitierte Literatur). Die Ermittlung dieses Parameters erfolgt diffraktometrisch (zur Methode s. Kapitel 3.1.1, Messparameter s. Kapitel 7.1.1 im Anhang) über den d(060)-Wert von Muskovit mit dem Quarz(211)-Peak bei 1,541 Å als internem Standard. Das sechsfache des d(060)-Wertes liefert dann den sog. b-Parameter. Der d(060)-Wert und somit der b-Parameter werden durch zwei Substitutionen in der Oktaederschicht beeinflusst (GUIDOTTI ET AL. 1989):

- $(\text{Mg,Fe}^{2+})^{\text{VI}} + \text{Si}^{\text{IV}} \leftrightarrow \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Al}^{\text{IV}}$ (Tschermak - Substitution)
- $(\text{Fe}^{3+})^{\text{VI}} \leftrightarrow \text{Al}^{\text{VI}}$

Das Ausmaß an Substitution ist bei konstanter Temperatur und $x_{\text{Na}}/(x_{\text{Na}}+x_{\text{K}}) \leq 0,15$ vor allem vom Druck abhängig (GUIDOTTI & SASSI 1986). Die graphische Darstellung erfolgt üblicherweise als kumulative Häufigkeit in % und dient zur Unterscheidung zwischen Niedrig-, Intermediär- und Hochdruckfazies-Serien mit niedriggradiger Metamorphose (SASSI ET AL. 1976, GUIDOTTI & SASSI 1986). Die Methode basiert auf der Untersuchung grünschieferfazieller Muskovite innerhalb des Al-reichen Bereiches der AKNa-Paragenese Muskovit-Albit. Die Anwendung der Methode setzt die Anwesenheit einer koexistierenden Fe-Mg-Phase wie Chlorit oder Biotit voraus sowie eher reduzierende Bedingungen, wie sie durch die opake Paragenese angezeigt werden (z.B. Graphit \pm Ilmenit) (GUIDOTTI & SASSI 1998, 1976).

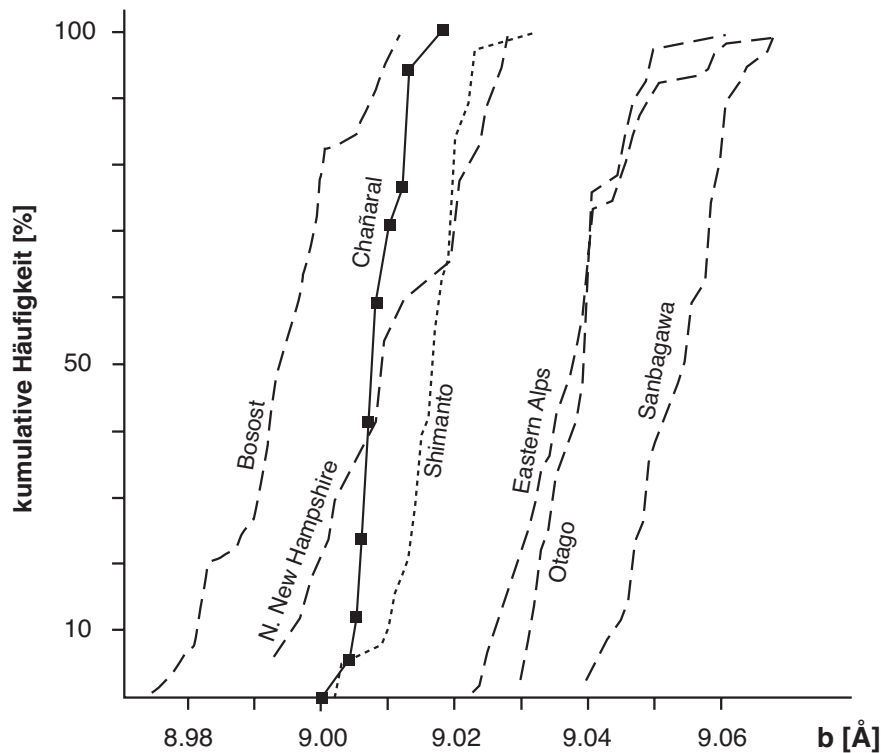


Abbildung 3.8: b-Parameter von K-Hellglimmern, dargestellt als kumulierte Häufigkeit in %. Zum Vergleich sind Daten aus GUIDOTTI & SASSI (1986) und aus dem Shimanto Belt, Japan (UNDERWOOD ET AL. 1993b) dargestellt

Aus den metapelitischen Proben (vgl. Kapitel 3.1) wurden 17 Proben der Lokationen Punta Las Animas sowie Playa Hippie ausgewählt, die den höchsten Metamorphosegrad aufwiesen (Obere Anchizone) und in ihrer Paragenese (Mus-Ab-Qz-Chl) den oben genannten Bedingungen entsprachen. Von diesen Proben wurden Pulverpräparate gefertigt, die in speziellen, seitlich offenen Probenhaltern so in das Diffraktometer eingebracht wurden, dass eine Messung senkrecht zur Probenoberfläche möglich war. Diese Methode dient dazu, den (060)-Peak zu verstärken und Interferenzen durch den $(\bar{3}31)$ -Reflex zu unterdrücken (WARR ET AL. 1996).

Die b-Parameter liegen für die gemessenen 17 Proben zwischen 9,005 und 9,018 Å bei einem Mittelwert von $9,01 \pm 0,004$ Å (s. Tabelle 7-4 im Anhang). Verglichen mit von GUIDOTTI & SASSI (1986) publizierten Daten liegt das in Abbildung 3.8 dargestellte Profil im Bereich solcher Proben mit intermediärem Druck. Dieser Druckfazies entsprechen geothermische Gradienten von 25-35°C/km (FREY & ROBINSON 1999).

GUIDOTTI & SASSI veröffentlichten 1986 ein qualitatives p-T-b-Diagramm, durch das es möglich wurde, durch Bestimmung des b-Parameters für bekannte Temperaturen den Versenkungsdruck zu ermitteln und somit p-T-Gradienten abzuleiten. Sie konstruierten dieses Diagramm um die Stabilitätsfelder der Al_2SiO_5 -Phasen herum. Das Diagramm reicht nicht in die Subgrünschieferfazies hinein, die untere Temperaturgrenze ist durch die Stabilität von Kaolinit gegeben und liegt bei ca. 320-380°C (Abbildung 3.9). Zur Druckermittlung für die hier gemessenen Proben muss daher das Diagramm nur leicht in den Subgrünschieferbereich extrapoliert werden. Diese Extrapolation ist dann problematisch, wenn in den Peliten signifikante Mengen an detritischem Muskovit, quellfähige Smektitlagen oder ein hoher Anteil an organischem Material auftreten (UNDERWOOD ET AL. 1993b). Da dies in den untersuchten Metapeliten nicht der Fall ist, scheint die Extrapolation vertretbar. Somit ergeben sich für einen b-Parameter von 9,01 Å und Temperaturen von 300-350°C Drücke von 2,2 bzw. 2,85 kbar, entsprechend einer Versenkungstiefe von 8-10,4 km. Daraus ergibt sich ein geothermischer Gradient von ca. 35°C/km.

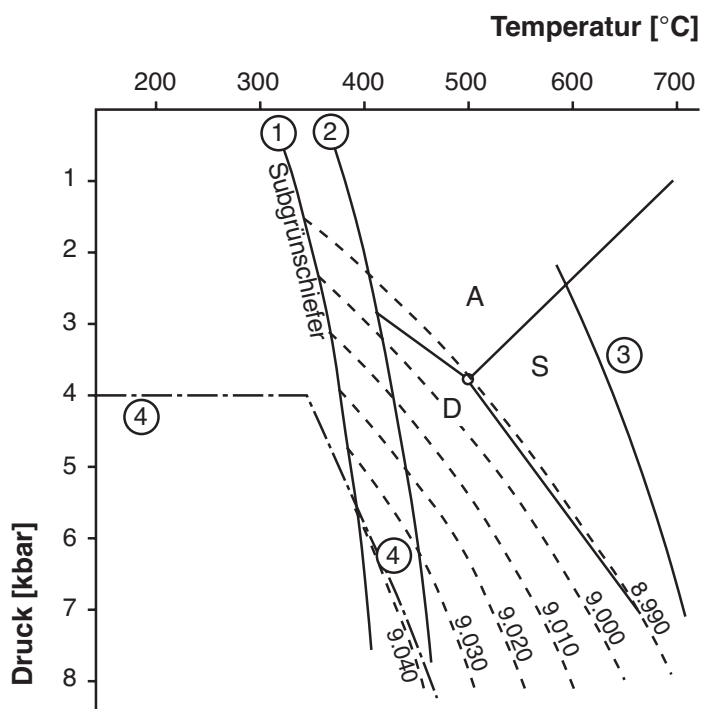


Abbildung 3.9: Qualitativer Plot von b-Parametern von Muskovit im Vergleich zu einigen wichtigen Reaktionen in pelitischen Gesteinen (nach Guidotti & Sassi 1986 sowie darin zitierte Literatur). (gestrichelte Linien: b-Isolinien; durchgezogene Linien: Phasenlinien des Al_2SiO_5 -Systems; A: Andalusit, D: Disthen, S: Sillimanit).

- Reaktionen:
- 1: Kaolinit + Quarz = Pyrophyllit + H_2O
 - 2: Pyrophyllit = Al-Silikat + Quarz + H_2O
 - 3: Staurolith + Quarz + Muskovit = Al-Silikat + Biotit + H_2O
 - 4: obere Stabilitätsgrenze von Glaukophan

3.4 Mineralchemie in Metapeliten und Metabasiten

Da sowohl die Metapelite als auch die Metabasite überwiegend sehr feinkörnig sind, war eine Identifizierung der Minerale oft nur durch Mikrosondenuntersuchungen möglich. Durch diese Untersuchungen erhält man zusätzlich wertvolle Informationen über Variationen in der chemischen Zusammensetzung, die bei Mineralen wie Chlorit oder Phengit von Bildungsdruck oder -temperatur abhängt. In den Metapeliten wurden Chlorite und Phengite untersucht, um anhand der Zusammensetzung Temperatur- und Druckinformationen zu erhalten. In den Metabasiten wurden neben Chlorit noch Amphibole, Pumpellyite und Titanit gemessen. Im Folgenden sollen die Chlorite und Phengite ausführlich, die weiteren Minerale kurz beschrieben werden. Die Mikrosondenuntersuchungen wurden am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg sowie am Mineralogischen Institut der Universität Münster durchgeführt (Messparameter s. Kapitel 7.1.2 im Anhang).

3.4.1 Chlorit

Chlorit ist ein weitverbreitetes Mineral, das in metamorphen Peliten, felsischen und intermediären, mafischen, alumino-kalksilikatischen und ultramafischen Gesteinen vorkommt. Es ist über einen großen p-T-a(H₂O)-Bereich, von diagenetischen bis hin zu granulit- und eklogitfaziellen Bedingungen stabil. Es kommt jedoch speziell in sehr niedrig- bis niedrigmetamorphen Gesteinen vor, die unterhalb von 400°C und bei einem Druck von wenigen Kilobar gebildet wurden (DEER ET AL. 1992). Es ist das Hauptmineral der metamorphen Chlorit-Zone. Chlorite sind ein typischer Bestandteil magmatischer Gesteine, wobei sie durch hydrothermale Alteration primärer Fe-Mg-haltiger Minerale wie Pyroxen, Amphibol und Biotit entstanden sind. Dabei ist die Zusammensetzung der entstehenden Chlorite oft mit derjenigen der Ausgangsminerale korrelierbar. In Sedimenten kommen Chlorite sowohl als detritische als auch als authigene Komponente, oft als "mixed-layer"-Mineral zusammen mit z.B. Vermiculit vor.

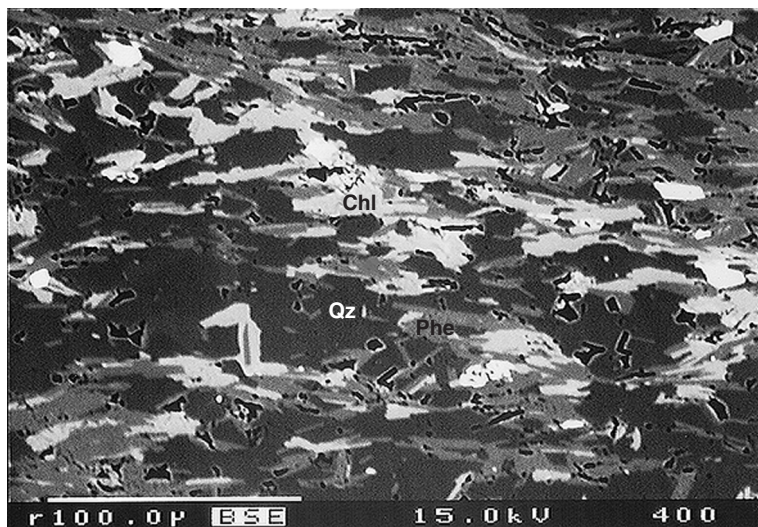


Abbildung 3.10: BSE-Bild der Probe BA 4 mit Chlorit (hellste Phase, Chl), Phengit (hellgraue Phase, Phe) und Quarz (dunkelste Phase, Qz.)

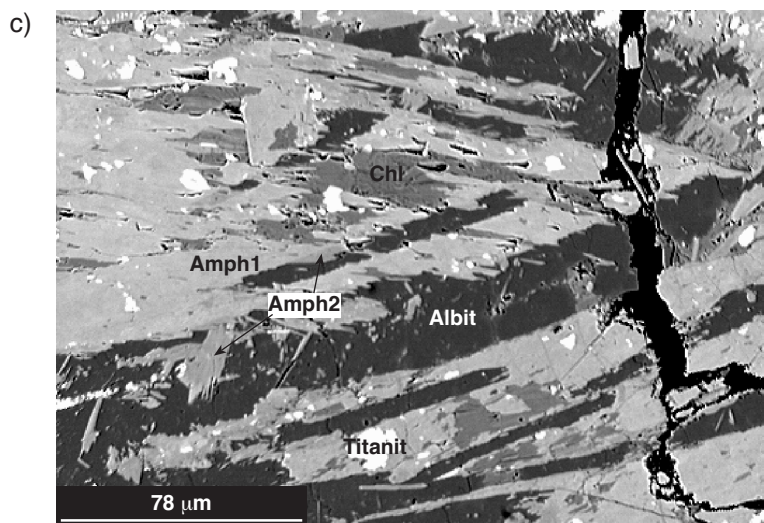
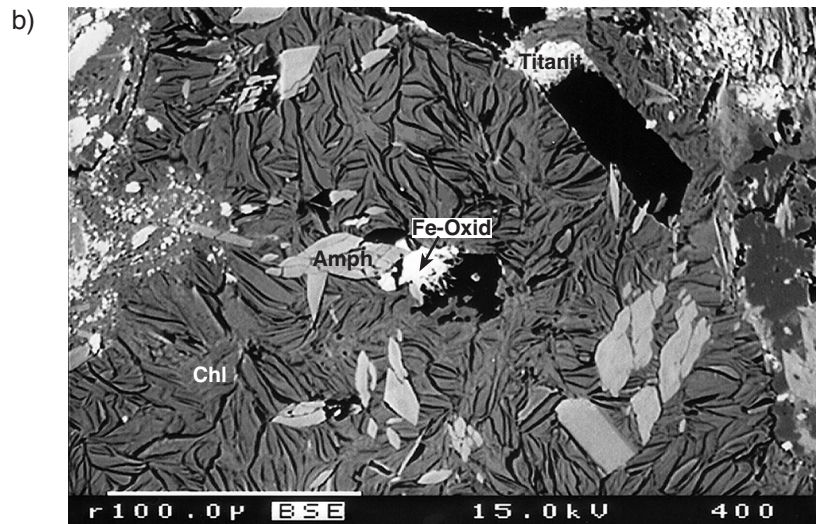


Abbildung 3.11: BSE-Bild der Proben QV 2 (a+b; b ist Ausschnitt aus a, s. Kasten) und QVQ 9 (c) (Abkürzungen: Amph-Amphibol, Chl-Chlorit)

Für metapelitische Gesteine der Chlorit-Zone ist folgende Mineralparagenese charakteristisch: Chlorit + Plagioklas + Muskovit + Calcit + Quarz + Ilmenit (DEER ET AL. 1992). Albit - Chlorit - Epidot (Klinozoisit) - Aktinolith ± Calcit ± Quarz-Paragenesen sind typisch für Metabasite (WIMMENAUER 1985).

Diese Mineralparagenesen stimmen weitgehend mit den in den Metapeliten und Metabasiten dieser Arbeit beobachteten überein. Die Chlorite in den Quarzadern sind hydrothermal durch Lösungs-/Ausfällungsprozesse gebildet worden und zeigen die für solche Chlorite typische Ausprägung als Ketten aus schuppenartig aneinandergereihten Chloriten (PICHLER & SCHMITT-RIEGRAF 1987). In den Metapeliten liegen die Chlorite in einem Gemenge zusammen mit Phengit in einer Matrix aus Quarz vor (Abbildung 3.10). In den Metabasiten tritt Chlorit zusammen mit Amphibolen oder Biotit als Hohlräumfüllung (Abbildung 3.11 a und b) sowie als Umwandlungsprodukt (Abbildung 3.11 c) auf.

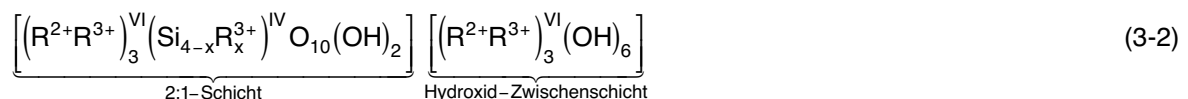
3.4.1.1 Kristallchemie, chemische Zusammensetzung und Klassifikation der Chlorite

Die Chlorite zählen zu den tri- und dioktaedrischen Vierschicht-Mineralen, deren Struktur aus negativ geladenen, Talk-ähnlichen alternierenden Tetraeder- und Oktaeder-Schichten (2:1-Schichten) besteht ($Y_3Z_4O_{10}(OH)_2$) sowie aus positiv geladenen, Brucit-ähnlichen Hydroxid-Zwischenschichten des Typs $Y_3(OH)_6$. Y und Z stehen hierbei für Oktaeder- bzw. Tetraederplätze. Die Schichtdicke beträgt ca. 14,3 Å (DEER ET AL. 1992).

Die meisten Chlorit-Zusammensetzungen können durch die Formel in Gleichung 3-1 beschrieben werden:



bzw. unter Berücksichtigung der verschiedenen Schichten:



mit: VI = Oktaederlücken; IV = Tetraederlücken; R^{2+} = Mg, Fe, Mn; R^{3+} = Al, Fe, Cr; $x \approx 1-3$ (im allgemeinen)

Mittlere Zusammensetzungen der untersuchten Chlorite aus den Metapeliten der Mélange, Metabasiten sowie einer Quarzader aus einem Sandstein-Boudin (Probe PuA 51) sind in Tabelle 3-4 dargestellt, in Tabelle 7-5 im Anhang erfolgt die Auflistung aller gemessenen Chlorit-Daten. Die Berechnung der Strukturformel erfolgt auf der Basis von 14 Sauerstoff-Atomen, d.h. der halben Elementarzelle. Analysen, bei denen die Summe an Zwischenschicht-Kationen ($x_K + x_{Na} + x_{Ca}$) > 0,05 war, wurden wegen wahrscheinlicher Kontamination mit anderen Schichtsilikaten wie Biotit oder Muskovit verworfen. Das tetraedrische Al wird unter der Voraussetzung berechnet, dass Si und Al^{IV} sich auf der Tetraederposition substituieren und insgesamt 4 Kationen ausmachen. Das verbleibende Al wird zu Al^{VI} auf den Oktaederplätzen verrechnet. Mg^{2+} kann durch Fe^{2+} und Mn^{2+} in der Oktaederschicht ersetzt werden. Ideale trioktaedrische Chlorite besitzen 6 Kationen auf den Oktaederplätzen sowie annähernd gleiche Verteilung des Aluminiums auf die Tetraeder- und Oktaederplätze.

Wird auf den Tetraederplätzen Si durch Al substituiert, erfolgt ein Ladungsausgleich in der Oktaederschicht durch Al^{VI} oder Fe^{3+} . Das $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis kann durch Mikrosondenuntersuchungen oder Röntgendiffraktometrie nicht bestimmt werden, der Fe^{3+} -Gehalt wird in der Literatur für Chlorite als sehr gering angegeben (weniger als 5% des Gesamtgehaltes an Eisen; z.B. FOSTER 1962).

Für die Berechnungen der Strukturformel der Chlorite in dieser Arbeit wurde alles Fe als Fe^{2+} angenommen. Diese Annahme wird dadurch unterstützt, dass die Summe der Kationen in den Oktaederlücken \sum_{Okt} mit nur wenigen Ausnahmen <6 und $\text{Al}^{\text{IV}} < \text{Al}^{\text{VI}}$, wenn alles Eisen als Fe^{2+} gerechnet wird. Beide Kriterien weisen nach FOSTER (1962) darauf hin, dass nur sehr wenig Eisen als Fe^{3+} vorliegt.

Die Klassifikationen von Chloriten beruhen im wesentlichen auf den zwei wichtigsten Substitutionsreihen:

- Substitution des Si durch Al auf den Tetraederplätzen
- Substitution von Mg durch überwiegend Fe^{2+} auf den Oktaederplätzen

Nach FOSTER (1962) werden die Chlorite über das Verhältnis der Si-Substitution auf den Tetraederplätzen zur Mg-Substitution auf den Oktaederplätzen zum einen eingeteilt in:

- Mg-reiche Chlorite mit $\text{Fe}^{2+}/\text{R}^{2+} < 0,25$
- intermediäre Chlorite mit $0,25 > \text{Fe}^{2+}/\text{R}^{2+} > 0,75$
- Fe^{2+} -reiche Chlorite mit $\text{Fe}^{2+}/\text{R}^{2+} > 0,75$

Eine weitere Unterteilung der Chlorite erfolgt bei Si-Gehalten von 2,75 und 3,1 (Abbildung 3.12).

Eine neuere und einfachere Klassifikation folgt den Empfehlungen des AIPEA Nomenklatur-Komitees für Chlorite (BAILEY 1980). Danach werden die tri-oktaedrischen Chlorite je nach dem dominierenden zweiwertigen Kation als Clinochlor $(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_8$, Chamosit $(\text{Fe}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_8$, Nimit $(\text{Ni}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_8$ oder Pennantit $(\text{Mn}_5\text{Al})(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_8$ bezeichnet. Sind von einem weiteren oktaedrisch koordinierten zweiwertigen Kation mehr als 0,75 (bezogen auf 14 O-Atome) vorhanden, so wird der Name des Kations als Präfix vor den Namen gestellt. Ersetzen mehr als 1,5 Al^{3+} das Si pro vier Tetraederplätze, so wird auch Al als Vorsilbe verwendet.

Tabelle 3-4: Mittlere Zusammensetzungen von Chloriten aus Metapeliten, kontaktnahen Metapeliten, Metabasiten und aus einer Quarzader. Die Berechnung der Strukturformel erfolgte auf der Basis von 14 Sauerstoff-Atomen. Abkürzungen: R²⁺: Summe aller zweiwertigen Kationen in Oktaederlücken; F^{VI}: Anzahl an oktaedrischen Fehlstellen.

| | kontaktnahe Metapelite (n=6) | | | | Metapelite (n=50) | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|--------|-------|
| | Ø | σ | max | min | Ø | σ | max | min |
| SiO₂ | 25,01 | 0,82 | 26,19 | 24,09 | 24,97 | 1,03 | 28,11 | 23,58 |
| TiO₂ | 0,08 | 0,02 | 0,10 | 0,05 | 0,12 | 0,20 | 1,49 | 0,01 |
| Al₂O₃ | 20,61 | 1,24 | 22,20 | 19,10 | 21,20 | 0,72 | 22,39 | 19,10 |
| Cr₂O₃ | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,07 | 0,00 |
| FeO | 27,16 | 1,28 | 29,34 | 25,98 | 29,30 | 1,99 | 31,61 | 20,18 |
| MnO | 0,23 | 0,07 | 0,29 | 0,11 | 0,25 | 0,08 | 0,48 | 0,01 |
| MgO | 12,40 | 0,96 | 13,56 | 11,00 | 10,37 | 1,55 | 18,51 | 8,80 |
| CaO | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,10 | 0,00 |
| Na₂O | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,08 | 0,00 |
| K₂O | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,29 | 0,00 |
| H₂O | 10,97 | 0,04 | 11,01 | 10,91 | 10,95 | 0,22 | 11,47 | 10,42 |
| Summe | 96,55 | 0,30 | 96,83 | 96,08 | 97,27 | 1,90 | 100,68 | 91,79 |
| Si | 2,734 | 0,098 | 2,878 | 2,623 | 2,733 | 0,086 | 3,022 | 2,620 |
| Ti | 0,006 | 0,002 | 0,008 | 0,004 | 0,010 | 0,017 | 0,124 | 0,000 |
| Al | 2,656 | 0,153 | 2,849 | 2,474 | 2,736 | 0,095 | 2,923 | 2,422 |
| Al^{IV} | 1,266 | 0,098 | 1,377 | 1,122 | 1,267 | 0,086 | 1,380 | 0,978 |
| Al^{VI} | 1,390 | 0,063 | 1,473 | 1,335 | 1,470 | 0,084 | 1,730 | 1,293 |
| Cr | 0,002 | 0,002 | 0,005 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,006 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 2,484 | 0,124 | 2,697 | 2,374 | 2,684 | 0,189 | 2,943 | 1,765 |
| Mn | 0,021 | 0,007 | 0,027 | 0,010 | 0,024 | 0,008 | 0,044 | 0,001 |
| Mg | 2,021 | 0,153 | 2,209 | 1,802 | 1,692 | 0,235 | 2,886 | 1,438 |
| Ca | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,012 | 0,000 |
| Na | 0,004 | 0,003 | 0,007 | 0,000 | 0,004 | 0,005 | 0,017 | 0,000 |
| K | 0,006 | 0,003 | 0,009 | 0,002 | 0,006 | 0,010 | 0,040 | 0,000 |
| OH | 8,000 | 0,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 0,000 | 8,000 | 8,000 |
| Σ Okt | 5,925 | 0,032 | 5,943 | 5,869 | 5,880 | 0,069 | 5,980 | 5,599 |
| F^{VI} | 0,071 | 0,031 | 0,125 | 0,052 | 0,120 | 0,069 | 0,401 | 0,020 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,549 | 0,031 | 0,598 | 0,516 | 0,611 | 0,045 | 0,660 | 0,379 |

Tabelle 3-4 (Forts.):

| | Quarzader (n=34) | | | | Metabasite (n=24) | | | |
|---------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | Ø | σ | max | min | Ø | σ | max | min |
| SiO₂ | 23,80 | 0,35 | 24,80 | 22,78 | 29,64 | 1,18 | 32,14 | 27,67 |
| TiO₂ | 0,05 | 0,03 | 0,11 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,14 | 0,00 |
| Al₂O₃ | 21,07 | 0,27 | 21,52 | 20,51 | 17,51 | 1,16 | 19,72 | 15,11 |
| Cr₂O₃ | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,00 | 0,14 | 0,18 | 0,66 | 0,00 |
| FeO | 31,63 | 0,50 | 32,76 | 30,75 | 15,56 | 0,88 | 17,00 | 14,16 |
| MnO | 0,14 | 0,03 | 0,23 | 0,09 | 0,20 | 0,04 | 0,25 | 0,09 |
| MgO | 9,36 | 0,26 | 9,95 | 8,94 | 22,69 | 0,63 | 23,75 | 20,76 |
| CaO | 0,05 | 0,04 | 0,23 | 0,00 | 0,16 | 0,10 | 0,37 | 0,03 |
| Na₂O | 0,01 | 0,02 | 0,14 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,00 |
| K₂O | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | 0,08 | 0,05 | 0,21 | 0,01 |
| H₂O | 10,75 | 0,08 | 10,96 | 10,51 | 11,80 | 0,10 | 11,99 | 11,63 |
| Summe | 96,89 | 0,62 | 98,36 | 95,33 | 97,83 | 0,71 | 99,57 | 96,63 |
| Si | 2,654 | 0,026 | 2,738 | 2,600 | 3,012 | 0,099 | 3,222 | 2,853 |
| Ti | 0,004 | 0,002 | 0,009 | 0,000 | 0,004 | 0,003 | 0,010 | 0,000 |
| Al | 2,769 | 0,034 | 2,836 | 2,669 | 2,099 | 0,151 | 2,396 | 1,786 |
| Al^{IV} | 1,346 | 0,026 | 1,400 | 1,262 | 0,988 | 0,099 | 1,147 | 0,778 |
| Al^{VI} | 1,423 | 0,019 | 1,477 | 1,382 | 1,111 | 0,065 | 1,249 | 1,005 |
| Cr | 0,001 | 0,001 | 0,006 | 0,000 | 0,011 | 0,015 | 0,053 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 2,951 | 0,049 | 3,053 | 2,859 | 1,323 | 0,079 | 1,451 | 1,204 |
| Mn | 0,014 | 0,003 | 0,022 | 0,008 | 0,017 | 0,003 | 0,022 | 0,008 |
| Mg | 1,557 | 0,039 | 1,662 | 1,494 | 3,438 | 0,080 | 3,555 | 3,191 |
| Ca | 0,006 | 0,005 | 0,028 | 0,000 | 0,017 | 0,010 | 0,040 | 0,003 |
| Na | 0,003 | 0,005 | 0,030 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,008 | 0,000 |
| K | 0,001 | 0,001 | 0,006 | 0,000 | 0,010 | 0,007 | 0,027 | 0,002 |
| OH | 8,000 | 0,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 0,000 | 8,000 | 8,000 |
| Σ Okt | 5,949 | 0,015 | 5,990 | 5,919 | 5,905 | 0,045 | 5,986 | 5,823 |
| F^{VI} | 0,051 | 0,015 | 0,081 | 0,010 | 0,095 | 0,045 | 0,177 | 0,014 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,653 | 0,009 | 0,669 | 0,634 | 0,277 | 0,015 | 0,312 | 0,253 |

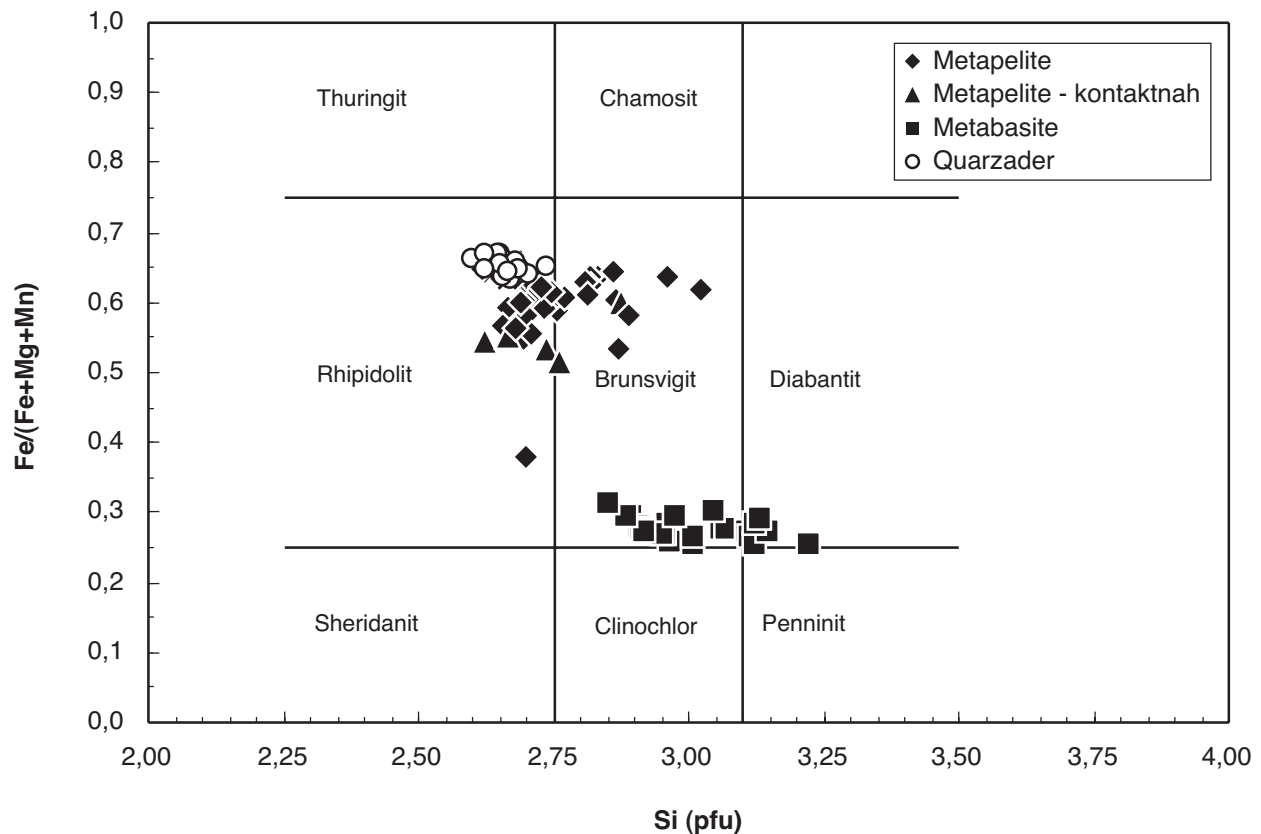


Abbildung 3.12: Klassifikation der gemessenen Chlorite nach FOSTER (1962) über das Verhältnis des Fe^{2+} -Gehaltes zur Substitution auf den Tetraederplätzen

Nach der Klassifikation von FOSTER (1962) (Abbildung 3.12) sind die Chlorite aus den Metapeliten, den kontaktnahen Metapeliten sowie aus der Quarzader intermediäre Chlorite, die überwiegend als Rhipidolite, z.T. als Brunsvigit klassifiziert werden können, wobei die Chlorite aus den kontaktnahen Metapeliten etwas Fe-ärmer sind. Nach der Nomenklatur von BAILEY (1980) sind alle Chlorite als Mg-Chamosite zu bezeichnen. Im Unterschied dazu sind die Chlorite aus den Metabasiten entsprechend ihres niedrigeren Fe-Mg-Verhältnisses intermediäre bis Mg-reiche Chlorite, die im Diagramm nach FOSTER (1962) überwiegend an der Grenze Brunsvigit/Clinochlor plotten, z.T. zwischen Diabantit und Penninit. Nach BAILEY (1980) können diese Chlorite als Fe-Clinochlore bezeichnet werden.

In Abbildung 3.13 sind die Chlorit-Analysen der verschiedenen Gesteine in der trioktaedrischen Hälfte der Vektordarstellung von Chlorit-Zusammensetzungen nach WIEWIORA & WEISS (1990) (verändert nach HILLIER & VELDE 1991) dargestellt. Diese Darstellungsweise ist gut geeignet, um die Verhältnisse zwischen Si, R^{2+} , Al und $\sum\text{Okt}$ zu verdeutlichen. $\sum\text{Okt}$ ist bei nahezu allen analysierten Chloriten $>5,75$, der Al-Gehalt liegt zwischen 2 und 3 Al-Atome pro Formeleinheit, wobei die Chlorite aus den Metabasiten etwas Al-ärmer sind ($\text{Al} < 2,5$).

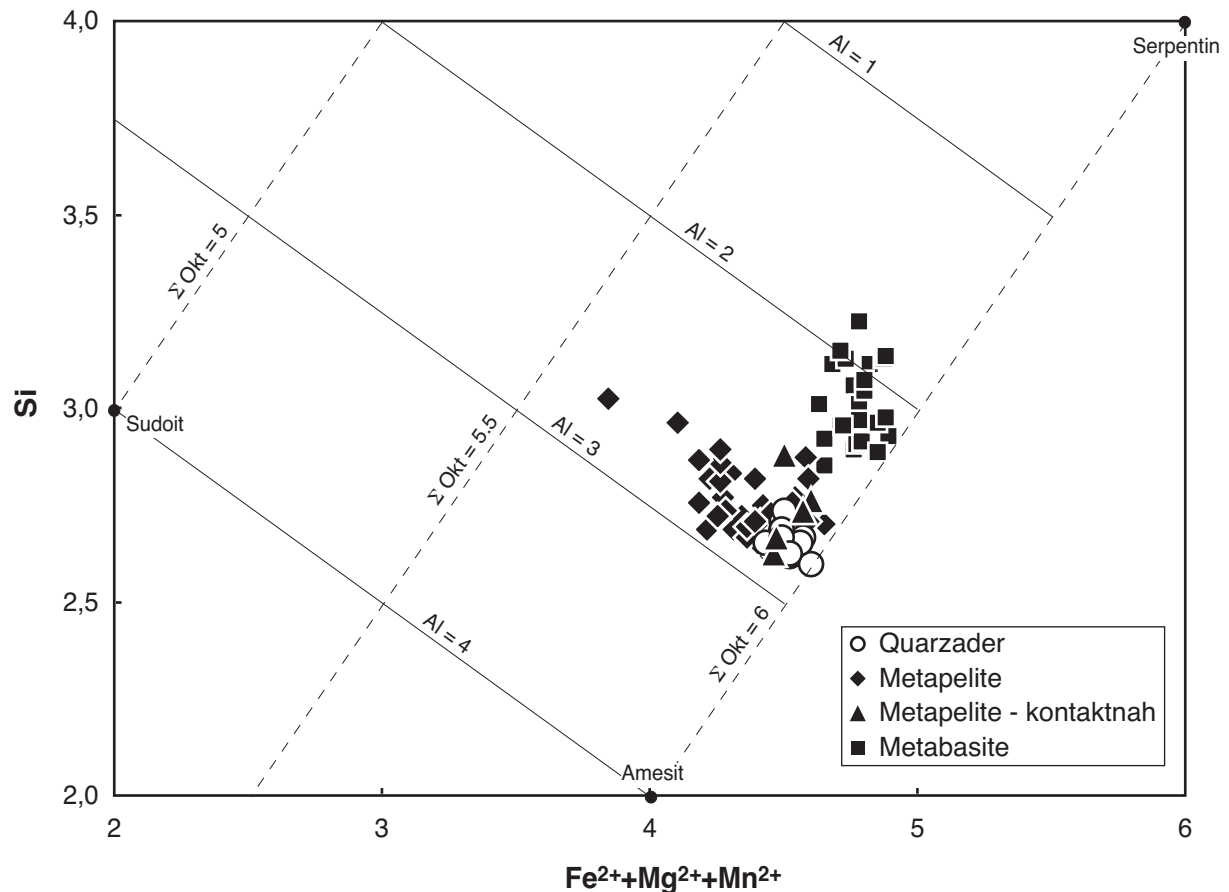


Abbildung 3.13: Chlorit-Zusammensetzungen in der Vektordarstellung nach WIEWIORA & WEISS (1990) (verändert nach HILLIER & VELDE 1991) mit Si und R^{2+} auf den orthogonalen Achsen, Al(total) und die Besetzung der Oktaederplätze (ΣOkt) sind als Isolinien eingetragen

3.4.2 Abschätzung der Bildungstemperaturen der Chlorite

Chlorite haben das Potential, wertvolle Informationen über ihre Bildungsbedingungen zu speichern. So führen hydrothermale Alteration sowie eine Erhöhung der Versenkungstiefe oder des Metamorphosegrades zu einer Abreicherung an Si^{IV} und Al^{VI} , einer Erniedrigung der Anzahl oktaedrischer Fehlstellen (F^{VI}), einer Anreicherung an Al^{IV} und (Fe+Mg) und eine Erhöhung der oktaedrischen Besetzung (ΣOkt) (DE CARITAT ET AL. 1993).

In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, diese Variationen in der Zusammensetzung von Chloriten als Geothermometer zu nutzen. Ein empirischer Ansatz stammt von CATHELINÉAU & NIEVA (1985) und CATHELINÉAU (1988), die den Gehalt an Al^{IV} in Chloriten mit gemessenen Temperaturen in Geothermalsystemen in Beziehung setzten ($T (^{\circ}C) = -61,93 + 321,98 \cdot Al^{IV}$). Dieses Thermometer sollte in diagenetischen, hydrothermalen und metamorphen Settings anwendbar sein, da der Al^{IV} -Gehalt unabhängig von der Gesteins- und Fluidzusammensetzung sei. Modifikationen dieses Ansatzes wurden von KRANDIOTIS & MACLEAN (1987) sowie von JOWETT (1991) vorgeschlagen, die Variationen im Fe-Mg-Verhältnis berücksichtigen.

Eine Übersichtsstudie von DE CARITAT ET AL. (1993) kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass keines dieser empirischen Chloritthermometer genaue Temperaturen über einen genügend großen Temperaturbereich liefert. Sie untersuchten Chlorite, die bei Temperaturen zwischen 25°C und 322°C gebildet wurden. Die Bildungstemperaturen der Chlorite wurden durch die verschiedenen Thermometer im Bereich zwischen 100 und 200°C um bis zu 230°C zu hoch berechnet, im Bereich über 200°C wurden die Temperaturen um bis zu 150°C zu niedrig berechnet. SHAU ET AL. (1990), JIANG ET AL. (1994) oder auch SCHMIDT ET AL. (1999) zeigten durch TEM-Untersuchungen, dass chemische Analysen von feinkörnigen Chloriten, wie sie sich bei sehr niedriggradigen Bedingungen bilden, oft durch z.B. Corrensit verunreinigt sind. Solche Daten repräsentieren demnach keine thermodynamisch stabilen Phasen, wie sie für die Anwendung von Geothermometern vorausgesetzt werden.

DE CARITAT ET AL. (1993) fanden eine gute Korrelation zwischen der Temperatur und dem Si^{IV} -Gehalt der Chlorite, sofern Proben mit ähnlichem Aluminium-Anteil (hier ausgedrückt als Anteil des hypothetischen Al-Endglied $\text{Al}_{12}\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ „Al-Chlorit“) verglichen werden. Sie kamen zu dem Schluss, dass der Si^{IV} -Gehalt und somit der Al^{IV} -Gehalt von Chloriten nicht nur von der Temperatur sondern auch vom Gesamtgehalt an Al und damit von der Gesteinszusammensetzung abhängt. Für unterschiedliche Al-Gehalte erhielten sie unterschiedliche Korrelationen, die in Abbildung 3.14 aufgeführt sind (zugehörige Gleichungen s. Tabelle 3-5). LEONI ET AL. (1998) bestätigen diese Korrelation anhand von Untersuchungen an Chloriten aus 17 metapelitischen Proben. Da die Datensätze der beiden Studien aus Proben unterschiedlicher Druckfazies stammen (<1 kbar bei DE CARITAT ET AL. 1993, 2-7 kbar bei LEONI ET AL. 1998) und die Ergebnisse dennoch übereinstimmen, scheint der Druckeinfluss auf den Si^{IV} -Gehalt in Chloriten eher niedrig oder sogar vernachlässigbar zu sein.

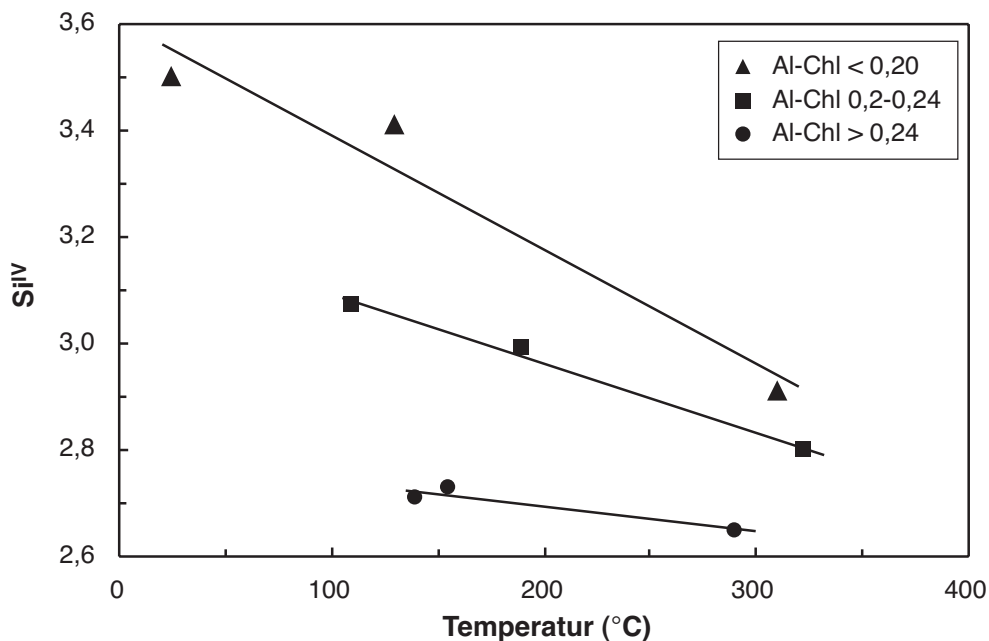


Abbildung 3.14: Korrelation des Si-Gehaltes in Chloriten mit der Temperatur in Abhängigkeit vom Gehalt an Al, hier ausgedrückt als Anteil des hypothetischen Endglied „Al-Chlorit“ (nach DE CARITAT ET AL. 1993), Gleichungen der Regressionsgeraden s. Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Gleichungen der den Berechnungen der Chlorit-Bildungstemperatur zugrunde liegenden Regressionsgeraden aus Abbildung 3.14

| Anteil "Al-Chlorit" | Regression | Genauigkeit |
|---------------------|--|----------------|
| <0,2 | $\text{Si}^{\text{IV}} = -0,0021 \cdot T + 3,6061$ | $R^2 = 0,9477$ |
| 0,2-0,24 | $\text{Si}^{\text{IV}} = -0,0013 \cdot T + 3,2208$ | $R^2 = 0,9919$ |
| >0,24 | $\text{Si}^{\text{IV}} = -0,0005 \cdot T + 2,7895$ | $R^2 = 0,8929$ |

Aus den hier gemessenen Chloriten wurden solche Chlorite ausgesucht, deren Si^{IV} bzw. F^{VI} -Gehalt möglichst gering ist, da sie den höchsten Temperaturen entsprechen sollten (s.o.). Als willkürliche Grenzen wurden dabei ein Si-Gehalt von 2,7 (bzw. 3,0 für Metabasite) und ein Anteil an Fehlstellen von 0,1 gewählt.

Für die hier gemessenen Chlorite aus Metabasiten, Metapeliten und einer Quarzader erhält man die in Tabelle 3-6 angegebenen "Al-Chlorit"-Gehalte und kann - nach Anwendung der diesem Gehalt entsprechenden Gleichung - die in Tabelle 3-6 angegebenen Temperaturen ermitteln (alle Daten in Tabelle 7-6 im Anhang). Zum Vergleich wurden die nach CATHELINEAU (1988) berechneten Temperaturen aufgenommen.

Tabelle 3-6: Chloritbildungstemperaturen nach DE CARITAT ET AL. (1993) und nach CATHELINEAU (1988)

| Chlorite | "Al-Chlorit" | berechnete Temperatur (°C) | | | |
|------------------------------------|--------------|-------------------------------|------------|-------------------------|------------|
| | | nach DE CARITAT ET AL. (1993) | | nach CATHELINEAU (1988) | |
| | | T_{max} | Mittelwert | T_{max} | Mittelwert |
| aus Metabasiten (n=11) | 0,18-0,20 | 338,3 | 303,7±38,5 | 307,5 | 283,7±11,7 |
| aus Metapeliten (n=17) | 0,22-0,25 | 414,2 | 304,4±78,0 | 382,4 | 366,7±8,4 |
| aus kontaktnahen Metapeliten (n=2) | 0,23-0,25 | 371,0 | 312,5±55,6 | 381,3 | 345,6±31,5 |
| aus Quarzader (n=29) | 0,23-0,25 | 477,7 | 357,9±87,7 | 388,9 | 372,8±6,7 |

Die in Tabelle 3-6 gezeigten Ergebnisse für die Berechnungen nach DE CARITAT ET AL. (1993) zeigen Abweichungen von bis zu 25%. Dies liegt daran, dass die Geraden im Si-T-Feld sehr flach verlaufen (Abbildung 3.14), so dass schon geringste Unterschiede im Si-Gehalt zu großen Unterschieden in der daraus berechneten Temperatur führen.

Aus den Werten in Tabelle 3-6 ist ersichtlich, dass die Chlorite in den Metapeliten und Metabasiten gleiche Bildungstemperaturen zeigen, die Temperaturen, die für Chlorite aus den kontaktnahen Metapeliten ermittelt wurden, liegen nur geringfügig höher. Da jedoch nur zwei Messwerte aus den kontaktnahen Metapeliten in die Auswertung einbezogen werden konnten, ist diese Temperatur nur wenig aussagekräftig. Für Chlorite, die in einer Quarzader auskristallisierten, wurden Temperaturen um 360°C ermittelt, was ca. 50°C höher ist als für die übrigen Probengruppen.

Die Temperaturen, die nach CATHELINEAU (1988) berechnet wurden, liegen außer für Metabasite im Rahmen der nach DE CARITAT (1993) berechneten Temperaturen. Die niedrigeren Temperaturen für Metabasite beruhen auf deren erwartungsgemäß geringeren Al-Gehalten, die die Grundlage für die Temperaturberechnung nach CATHELINEAU (1988) bilden. Der Vorteil der Berechnung nach DE CARITAT ET AL. (1993) liegt darin, dass diese Unterschiede bei der T-Berechnung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Chlorite in den Quarzadern bei deutlich höheren Temperaturen gebildet wurden als die Chlorite in den Metapeliten und -basiten. Bei den in den Quarzadern gemessenen Chloriten handelt es sich um hydrothermale Neubildungen, während die Chlorite in den Metapeliten und -basiten durch Mineralumwandlungen entstanden sind. Die Tatsache, dass die Chemie der Chlorite in der Quarzader der Chemie der Chlorite aus dem Metapeliten entspricht, (Abbildung 3.12 bzw. Abbildung 3.13) lässt darauf schließen, dass sie durch lokale Fluidzirkulation aus dem Nebengestein gebildet wurden und nicht etwa durch großräumige Fluidzirkulation, wie sie z.B. mit der Platznahme von Granit verbunden ist.

3.4.3 Phengit

Als Phengite werden die Mischphasen zwischen den beiden K-Hellglimmern Muskovit und Al-Celadonit bezeichnet. K-Hellglimmer sind in metamorphen Gesteinen weitverbreitet. Sie kommen hauptsächlich in Metagraniten und Metasedimenten wie Metapeliten oder auch Metagrauwacken bei niedrigem bis mittlerem Metamorphosegrad vor. In Metabasiten treten sie auch bei hohen Drücken auf. In einer niedriggradig metamorphen Umgebung wird Muskovit aus Illiten und anderen Tonmineralen gebildet, was zur Entstehung z.B. von Albit-Chlorit-Serizit-Schiefern führt. Bei Al-reichen Ausgangssedimenten ist Muskovit oft mit Chlorit oder Chloritoiden assoziiert. Oberhalb amphibolitfazieller Bedingungen zerfällt Muskovit unter Bildung von K-Feldspat und Al-Silikaten.

Die in den Metapeliten gemessenen Phengite treten meist in einem Gemenge zusammen mit Chlorit in einer Quarz-Matrix auf (s. Abbildung 3.10).

3.4.3.1 Kristallchemie und chemische Zusammensetzung der Phengite

Das hauptsächliche Strukturelement von Glimmern ist eine zusammengesetzte Lage, in der eine Schicht oktaedrisch koordinierter Y-Kationen zwischen zwei identischen Schichten miteinander verknüpfter (Si, Al)O₄-Tetraeder liegt. Diese Lagen sind negativ geladen, zum Ladungsausgleich sind annähernd 12-fach koordinierte X-Kationen (K, Na, usw.) in einer Zwischenschicht eingebaut. Der Abstand zwischen zweien solcher Zwischenschichten beträgt ungefähr 10 Å bzw. ein Vielfaches davon (DEER ET AL. 1992).

Glimmer können im allgemeinen durch folgende Formel beschrieben werden:



mit: X = K, Na, Ca; Y = Al, Mg, Fe (hauptsächlich) oder auch Mn, Cr, Ti; Z = Si, Al oder auch Fe³⁺, Ti

Die Glimmer können je nach oktaedrischer Besetzung in di-oktaedrische und tri-oktaedrische Glimmer eingeteilt werden (Anzahl Y-Ionen = 2 bzw. 3). Der Si-Gehalt von K-Hellglimmern ist aufgrund der

Tschermak-Substitution $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})^{\text{VI}} + \text{Si}^{\text{IV}} \leftrightarrow \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Al}^{\text{IV}}$ sehr variabel (s. auch Kapitel 3.3). In Muskovit wird demnach tetraedrisches Al durch Si ersetzt mit gleichzeitigem Ladungsausgleich durch die Substitution von oktaedrischem Al durch Mg und/oder Fe^{2+} (Abbildung 3.15). Dabei liegen Phengite mit ihrer Zusammensetzung zwischen den beiden di-oktaedrischen Endgliedern Muskovit $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ und Al-Celadonit $\text{K}[(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Al}](\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$. Die in Abbildung 3.15 dargestellte Ferrimuskovit-Substitution ist hypothetisch, da es kein bekanntes Endglied $\text{K}(\text{Fe}^{3+}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2)$ gibt. Dennoch ist sie in natürlichen Muskoviten von Bedeutung; GUIDOTTI ET AL. (1994) geben für das $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{\text{total}}$ -Verhältnis Mindestwerte von 0,28 an, während in höher oxidierten Gesteinen wie Hämatit-Magnetit-Ilmenit-Metapeliten dieser Wert bis zu 0,82 betragen kann. Andere Autoren wie STÖCKHERT ET AL. (1997) nehmen zur Abschätzung des Fe^{3+} -Gehaltes eine oktaedrische Besetzung von 2,05 an. Da durch Mikrosondenmessungen nicht zwischen Fe^{2+} und Fe^{3+} unterschieden werden kann, wurde in dieser Arbeit für die gemessenen K-Hellglimmer zunächst alles Eisen als Fe^{2+} berechnet. Trägt man die Mikrosonden-Daten in ein $\text{Si}+\text{Fe}+\text{Mg}-\text{Al}^{\text{total}}$ -Diagramm ein (Abbildung 3.16), sieht man, dass die K-Hellglimmer-Zusammensetzungen der meisten Proben entlang der Tschermak-Linie zwischen Al-Celadonit und Muskovit plotten und dass der "Ferrimuskovit"-Anteil klein ist. Die Annahme, dass alles Eisen als Fe^{2+} vorliegt, ist somit gerechtfertigt.

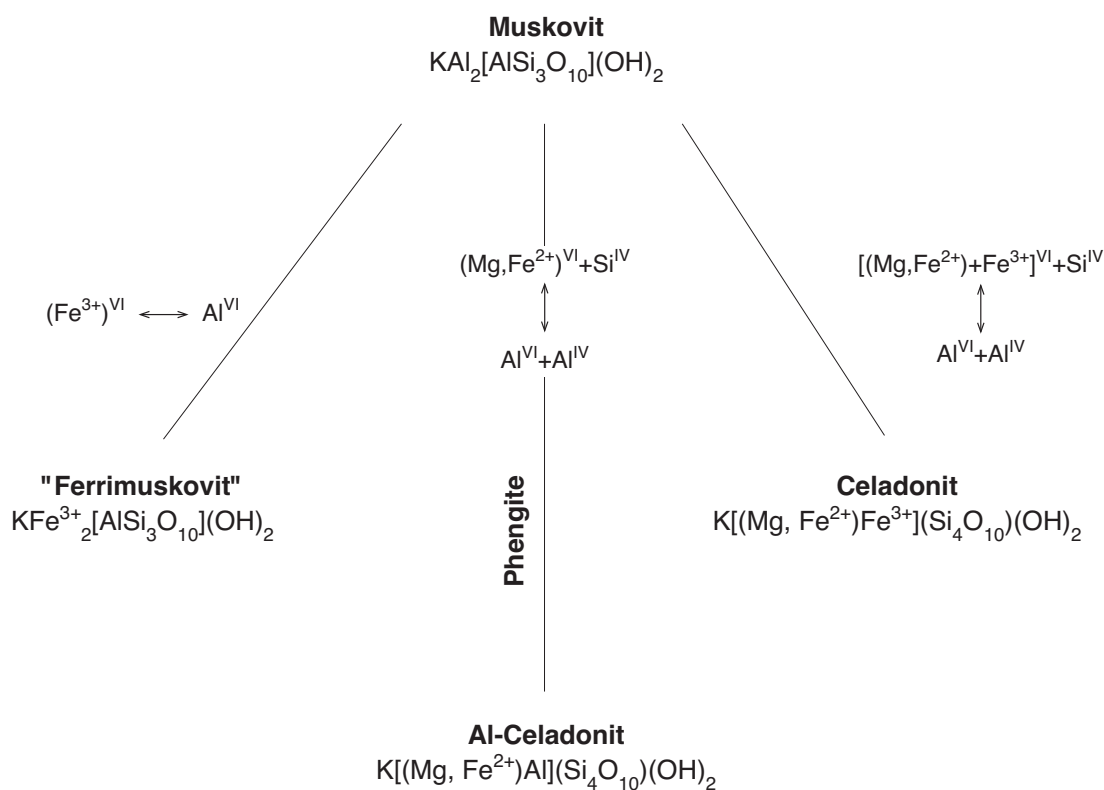


Abbildung 3.15: graphische Darstellung der Beziehungen zwischen Muskovit und Celadonit, Al-Celadonit sowie einem hypothetischen Ferrimuskovit mit den dazugehörigen Substitutionen (zusammengestellt aus GUIDOTTI & SASSI 1998)

Typische chemische Zusammensetzungen und Strukturformeln von Phengiten aus den metapelitischen Gesteinen der Mélange sind in Tabelle 3-7 dargestellt, die kompletten Daten finden sich in Tabelle 7-7 im Anhang. Die Berechnung der Strukturformel erfolgt auf der Basis von 11 Sauerstoff-Atomen. Das tetraedrische Al wird unter der Voraussetzung berechnet, dass Si und Al^{IV} sich auf der Tetraederposition substituieren und insgesamt vier Kationen ausmachen. Das verbleibende Al wird zu Al^{VI} auf den Oktaederplätzen verrechnet. Mg²⁺ kann durch Fe²⁺ und Mn²⁺ in der Oktaederschicht ersetzt werden. Um kontaminierte Phengit-Analysen auszusortieren, wurden nur Analysen in die Auswertung einbezogen, die die folgenden Bedingungen erfüllten (GUIDOTTI & SASSI 1998):

- $3 \leq \text{Si} \leq 4$
- $\text{Ca} < 0.005$
- $\text{Na} + \text{K} \geq 0.8$

Tabelle 3-7: Mittlere Zusammensetzungen von Phengiten aus den metapelitischen Gesteinen der Mélange. Die Berechnung der Strukturformel erfolgte auf der Basis von 11 Sauerstoff-Atomen.

| | kontaktnahe Metapelite (n=19) | | | | Metapelite (n=199) | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|------|--------|-------|--------------------|------|--------|-------|
| | Ø | σ | max | min | Ø | σ | max | min |
| SiO₂ | 46.97 | 1.83 | 50.64 | 44.27 | 47.62 | 1.45 | 52.81 | 42.72 |
| TiO₂ | 0.32 | 0.24 | 0.77 | 0.00 | 0.39 | 0.59 | 6.37 | 0.06 |
| Al₂O₃ | 32.73 | 2.53 | 36.29 | 27.10 | 31.73 | 1.93 | 34.90 | 24.19 |
| Cr₂O₃ | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.17 | 0.00 |
| FeO | 2.79 | 2.30 | 7.71 | 0.86 | 2.63 | 1.16 | 8.62 | 0.89 |
| MnO | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.21 | 0.00 |
| MgO | 1.49 | 0.86 | 2.98 | 0.50 | 1.39 | 0.49 | 3.07 | 0.29 |
| CaO | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.00 |
| Na₂O | 0.55 | 0.22 | 0.95 | 0.17 | 0.29 | 0.23 | 1.64 | 0.08 |
| K₂O | 9.72 | 0.43 | 10.26 | 8.86 | 9.48 | 0.57 | 10.90 | 7.09 |
| H₂O | 4.46 | 0.09 | 4.59 | 4.26 | 4.43 | 0.08 | 4.58 | 4.03 |
| Summe | 99.09 | 1.07 | 100.87 | 96.14 | 98.02 | 1.73 | 101.52 | 90.53 |
| Si | 3.16 | 0.08 | 3.34 | 3.07 | 3.22 | 0.08 | 3.59 | 3.04 |
| Al^{IV} | 0.84 | 0.08 | 0.93 | 0.66 | 0.78 | 0.08 | 0.96 | 0.41 |
| Al^{VI} | 1.75 | 0.14 | 1.91 | 1.45 | 1.75 | 0.09 | 1.91 | 1.36 |
| Ti | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.34 | 0.00 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Fe²⁺ | 0.16 | 0.13 | 0.45 | 0.05 | 0.15 | 0.07 | 0.51 | 0.05 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Mg | 0.15 | 0.09 | 0.31 | 0.05 | 0.14 | 0.05 | 0.30 | 0.03 |
| Ca | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Na | 0.07 | 0.03 | 0.12 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.21 | 0.01 |
| K | 0.83 | 0.03 | 0.89 | 0.78 | 0.82 | 0.05 | 0.93 | 0.60 |
| ∑Okt | 2.08 | 0.08 | 2.26 | 2.01 | 2.06 | 0.04 | 2.19 | 1.94 |

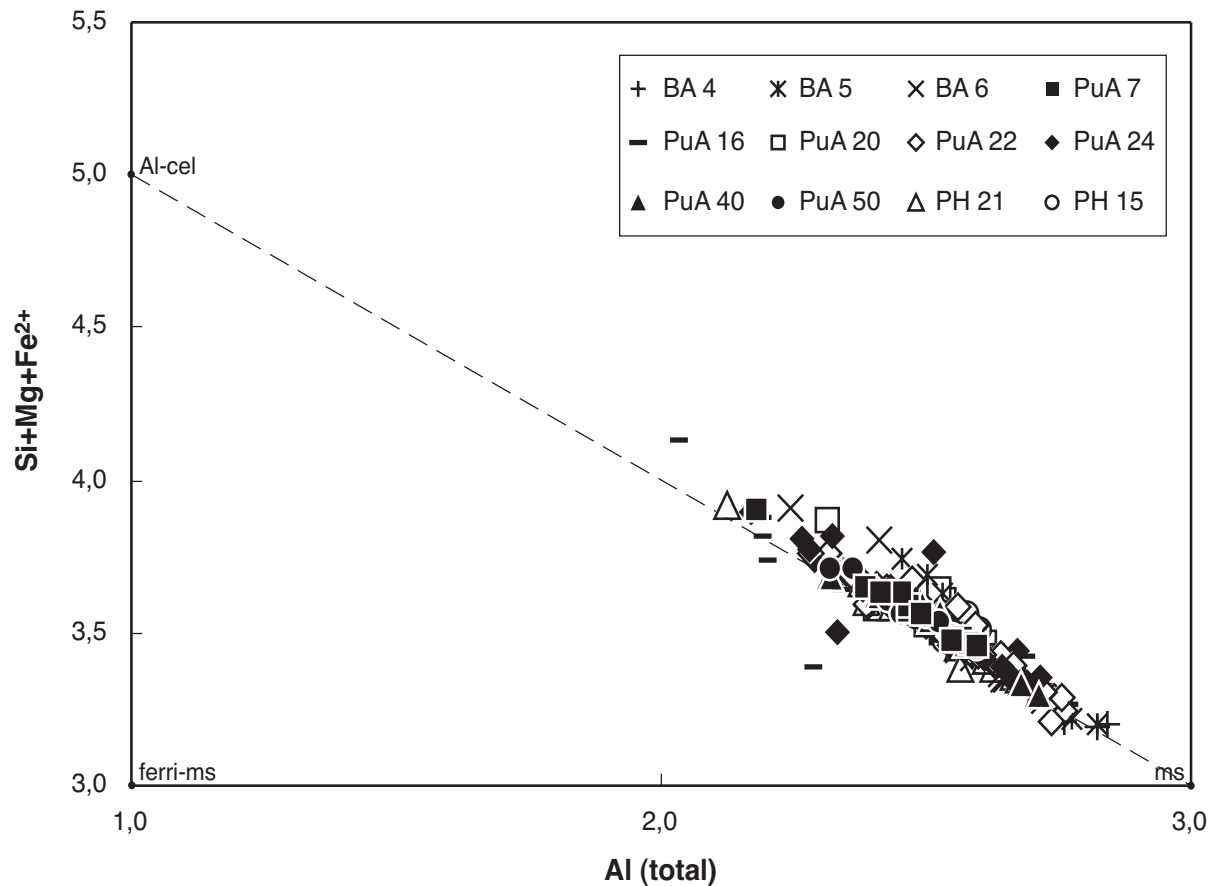


Abbildung 3.16: Si+Fe+Mg-Al^{total}-Diagramm (Al-cel: Al-Celadonit, ms: Muskovit, ferri ms: "Ferrimuskovit") für verschiedene metapelitische Proben aus der Mélangé. Die Linie zeigt die Tschermak-Substitution an (s. Text).

3.4.4 Phengitbarometrie

Experimentelle Daten von VELDE (1965) zeigten, dass der Anteil an Phengit-Komponente in Muskovit hauptsächlich eine Funktion des Druckes ist. Dies bedeutet, dass Si-Gehalte zwischen 3 und 4 pro Formeleinheit ein Maß für die inverse Tschermak-Substitution ($\text{Mg}^{\text{VI}}\text{Si}^{\text{IV}}\text{Al}^{\text{VI}}_{-1}\text{Al}^{\text{IV}}_{-1}$) sind. Mit steigendem Druck wird der Si-Gehalt ansteigen, da Al^{IV} nicht bevorzugt eingebaut wird (MASSONNE & SCHREYER 1987, CARSWELL & HARLEY 1990). Das Barometer wurde von MASSONNE & SCHREYER (1987, 1989) u.a. für folgende Reaktion kalibriert und von MASSONNE & SZPURKA (1997) ergänzt:



Mit Hilfe von experimentellen Daten und thermodynamischen Berechnungen konstruierten die Autoren Si-Isoplethen im p-T-Feld (Abbildung 3.17), anhand welcher bei bekannter Temperatur der Druck graphisch abgegriffen werden kann.

Die Anwendung der in Gleichung 3-4 aufgeführten Reaktion zur Druckbestimmung sollte nach ESSENE (1989) von drei entscheidenden Faktoren abhängen:

- Verfügbarkeit von experimentellen Daten für Fe-haltige Phasen und für die Rückreaktionen stabiler Phasen
- Genaue Aktivitätsmodelle der festen Lösungen der Komponenten

- Überprüfung, ob in den Gesteinen, für die das Phengit-Barometer angewendet werden soll, die Pufferphasen unter Gleichgewichtsbedingungen vorliegen, d.h. dass K-Feldspat vorhanden sein muss. Fehlt K-Feldspat, so liefert dieses Barometer nur Mindestdrücke.

Die Si-Gehalte für die hier gemessenen Phengite liegen zwischen 3 und 3,46 bei einem Mittelwert von 3,2. Dabei gibt es keinen Unterschied zwischen kontaktnahen und anderen Metapeliten. Für einen mittleren Si-Gehalt von 3,2 ergeben sich anhand Abbildung 3.17 für Temperaturen von 300-350°C Drücke von 0,5 bis 1,5 kbar. Dem maximalen Si-Gehalt von 3,46 entspricht ein Druck von 4-5 kbar. Da die Mineralparagenese (Phengit+Chlorit+Quarz+Albit) nicht mit der geforderten Paragenese übereinstimmt, liefert die Auswertung nur Mindestdrücke. Das große Spektrum an Si-Gehalten ist auf die mangelnde Gleichgewichtseinstellung, vielleicht aber auch auf eine Änderung der p-T-Bedingungen zurückzuführen (pers. Mitt. H.-J. MASSONNE, Stuttgart). Es ist daher denkbar, dass die Phengite mit dem höchsten Si-Gehalt die maximalen Drücke (hier 4-5 kbar) wiedergeben.

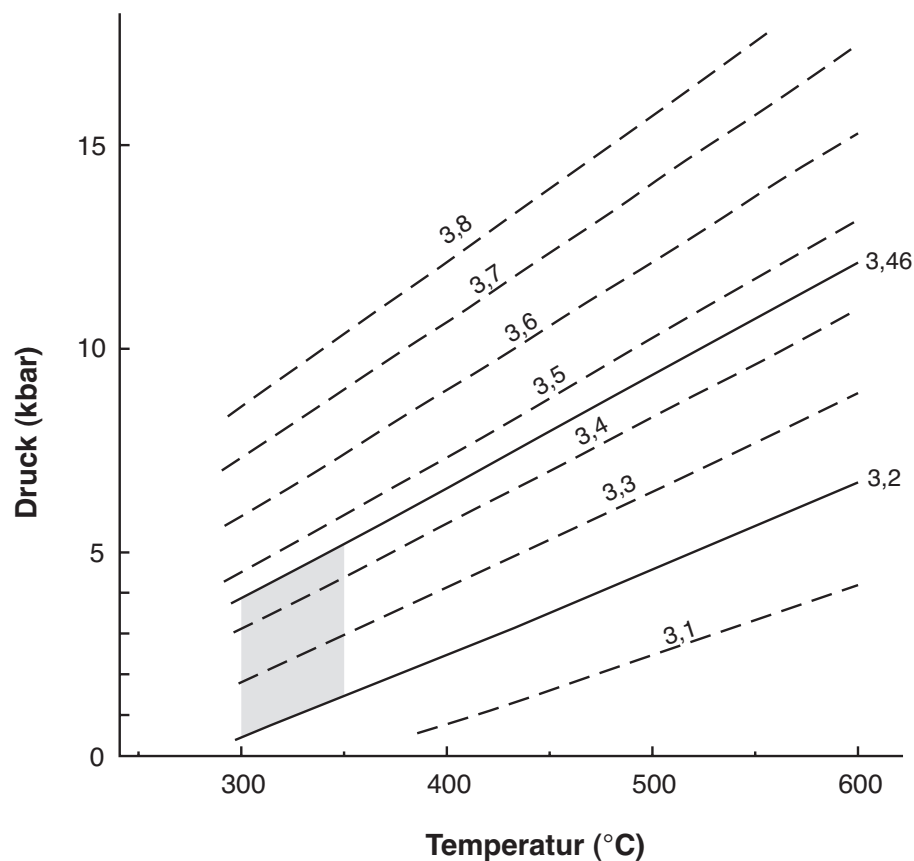


Abbildung 3.17: Si-Isoplethen von Phengit im Gleichgewicht mit Quarz, K-Feldspat, Phlogopit und H₂O nach MASSONNE & SZPURKA (1997). Durchgezogene Linien entsprechen den in dieser Arbeit ermittelten Si-Gehalten von 3,2 bzw. 3,46 pro Formeleinheit. Grau unterlegt ist der für Temperaturen von 300 bis 350°C ermittelte p-T-Bereich (s. Text).

3.4.5 Amphibole, Pumpellyit und Titanit

Tabelle 3-8 zeigt eine Übersicht über die mittleren chemischen Zusammensetzungen der beschriebenen Minerale, in den Tabellen 7-8 bis 7-10 im Anhang finden sich die vollständigen Daten.

3.4.5.1 Amphibole

Eine allgemeine Strukturformel für Amphibole kann folgendermaßen geschrieben werden:



mit: A = Na, K; B = Na, Ca, Mg, Fe²⁺, Mn, Li; C = Mg, Fe²⁺, Al, Fe³⁺, Mn, Zn, Cr, Ti, Li; T = Si, Al

Die Strukturformel der Amphibole wurde auf der Basis von 23 Sauerstoff-Atomen berechnet mit zusätzlich zwei OH-Gruppen. Alles Fe wurde als Fe²⁺ angenommen.

Je nach dominierendem Kation auf der B-Position werden die Amphibole unterteilt in Ca-Amphibole, Alkali-Amphibole, Na-Ca-Amphibole, Fe-Mg-Mn-Amphibole. Nach der Klassifikation von LEAKE ET AL. (1997) liegen hier nur Ca-Amphibole der Zusammensetzung Aktinolith und Mg-Hornblende vor. $x_{Mg^{2+}}$

$\left(= \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Fe^{2+}} \right)$ liegt zwischen 0,81 und 0,57. Innerhalb einer Probe variiert der Si-Gehalt und somit die Zusammensetzung der Amphibole stark (Abbildung 3.18), was auf eine mangelnde Gleichgewichtseinstellung zurückzuführen ist.

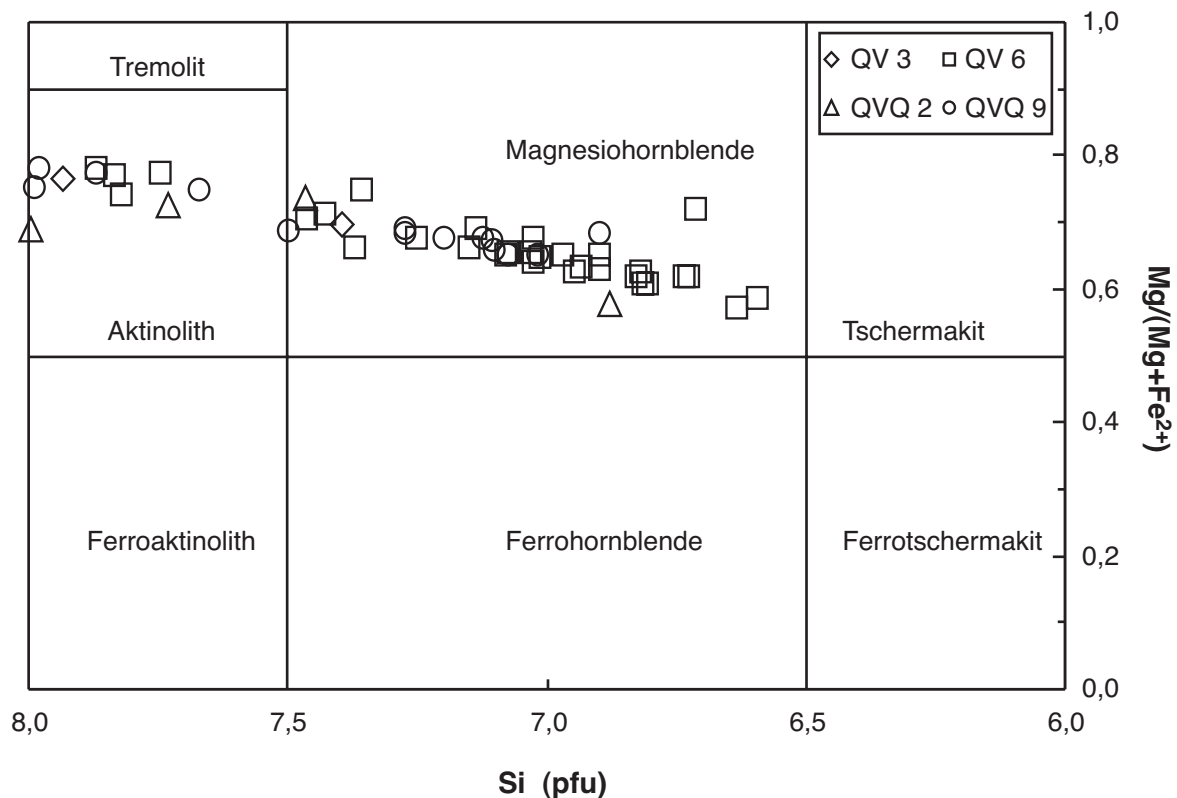


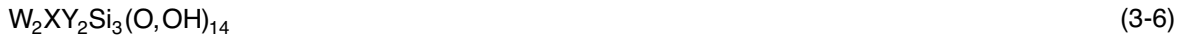
Abbildung 3.18: Klassifikation der gemessenen Ca-Amphibole in Metabasiten nach LEAKE ET AL. (1997)

Tabelle 3-8: Mittlere chemische Zusammensetzungen von Amphibolen, Pumpellyit und Titanit in Metabasiten.

| | Amphibole (n=54) | | | | Pumpellyite (n=22) | | | | Titanit (n=24) | | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|---------------|---------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | Ø | σ | min | max | Ø | σ | min | max | Ø | σ | min | max | |
| SiO₂ | 49,34 | 3,93 | 43,36 | 56,66 | 36,19 | 1,80 | 32,48 | 38,33 | SiO₂ | 30,84 | 0,91 | 30,03 | 33,69 |
| TiO₂ | 0,25 | 0,26 | 0,01 | 1,80 | 0,32 | 1,06 | 0,04 | 5,07 | TiO₂ | 35,35 | 2,79 | 26,88 | 38,24 |
| Al₂O₃ | 6,07 | 3,40 | 0,46 | 18,54 | 19,82 | 2,61 | 15,27 | 24,09 | Al₂O₃ | 1,59 | 0,85 | 0,63 | 4,15 |
| Cr₂O₃ | 0,14 | 0,17 | 0,00 | 0,64 | 0,08 | 0,14 | 0,00 | 0,50 | Cr₂O₃ | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 0,22 |
| FeO | 12,42 | 1,71 | 9,05 | 16,05 | 14,02 | 1,76 | 9,77 | 17,30 | Fe₂O₃ | 2,14 | 1,07 | 1,08 | 4,95 |
| MnO | 0,25 | 0,05 | 0,14 | 0,35 | 0,12 | 0,08 | 0,01 | 0,38 | MnO | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 0,14 |
| MgO | 15,03 | 1,99 | 11,73 | 18,89 | 0,06 | 0,11 | 0,00 | 0,47 | MgO | 0,66 | 1,08 | 0,00 | 4,98 |
| CaO | 11,54 | 1,71 | 0,66 | 12,77 | 21,02 | 2,88 | 15,12 | 23,32 | CaO | 27,04 | 1,58 | 21,06 | 28,52 |
| Na₂O | 1,22 | 0,67 | 0,23 | 3,94 | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 0,24 | Na₂O | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,11 |
| K₂O | 0,16 | 0,08 | 0,03 | 0,49 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | K₂O | 0,13 | 0,26 | 0,00 | 0,82 |
| H₂O | 2,04 | 0,04 | 1,97 | 2,13 | 3,29 | 0,23 | 2,86 | 3,50 | H₂O | 1,16 | 0,01 | 1,14 | 1,17 |
| Summe | <u>98,47</u> | <u>0,92</u> | <u>95,17</u> | <u>100,36</u> | 94,95 | <u>5,93</u> | <u>83,77</u> | <u>99,54</u> | Summe | <u>99,03</u> | <u>0,79</u> | <u>97,49</u> | <u>100,35</u> |
| Si | 7,238 | 0,430 | 6,464 | 8,018 | 3,307 | 0,083 | 3,146 | 3,475 | Si | 4,003 | 0,111 | 3,879 | 4,340 |
| Ti | 0,027 | 0,029 | 0,001 | 0,198 | 0,022 | 0,070 | 0,003 | 0,335 | Ti | 3,450 | 0,271 | 2,604 | 3,709 |
| Al | 1,061 | 0,598 | 0,077 | 3,179 | 2,123 | 0,154 | 1,862 | 2,430 | Al | 0,243 | 0,130 | 0,096 | 0,631 |
| Cr | 0,016 | 0,020 | 0,000 | 0,075 | 0,006 | 0,010 | 0,000 | 0,035 | Cr | 0,007 | 0,006 | 0,000 | 0,023 |
| Fe²⁺ | 1,527 | 0,245 | 0,906 | 2,012 | 1,084 | 0,215 | 0,699 | 1,505 | Fe³⁺ | 0,209 | 0,104 | 0,105 | 0,480 |
| Mn | 0,031 | 0,006 | 0,016 | 0,043 | 0,009 | 0,006 | 0,001 | 0,033 | Mn | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,015 |
| Mg | 3,284 | 0,378 | 2,658 | 4,110 | 0,008 | 0,014 | 0,000 | 0,061 | Mg | 0,127 | 0,209 | 0,000 | 0,957 |
| Ca | 1,817 | 0,271 | 0,103 | 1,982 | 2,045 | 0,157 | 1,674 | 2,194 | Ca | 3,761 | 0,224 | 2,907 | 4,029 |
| Na | 0,350 | 0,193 | 0,063 | 1,111 | 0,004 | 0,008 | 0,000 | 0,039 | Na | 0,005 | 0,006 | 0,000 | 0,027 |
| K | 0,031 | 0,016 | 0,006 | 0,095 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | K | 0,022 | 0,042 | 0,000 | 0,135 |
| OH | 2,000 | 0,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 0,000 | 2,000 | 2,000 | OH | 1,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 |
| Summe | <u>15,382</u> | <u>0,234</u> | <u>14,812</u> | <u>15,744</u> | <u>8,609</u> | <u>0,039</u> | <u>8,523</u> | <u>8,675</u> | Summe | <u>11,831</u> | <u>0,078</u> | <u>11,762</u> | <u>12,073</u> |

3.4.5.2 Pumpellyit

Die allgemeine Formel für Pumpellyite (Gleichung 3-6) zeigt die möglichen Substitutionen. Dennoch weisen die meisten Pumpellyite nur eine enge Bandbreite in ihrer chemischen Zusammensetzung auf. Eine der häufigsten auftretenden Substitutionen ist die Ersetzung von Al durch Fe^{3+} .



mit: W = Ca, Na, K; X = Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg, Mn, Al; Y = Fe^{3+} , Al, Ti

Die Pumpellyit-Analysen wurden auf der Basis von 13 Sauerstoff-Atomen mit zwei OH-Gruppen berechnet, wobei alles Fe als Fe^{2+} angenommen wurde. Die gemessenen Pumpellyite sind sehr Fe-reich

mit $x_{\text{Fe}^{2+}} \left(= \frac{\text{Fe}^{2+}}{\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}} \right)$ zwischen 0,94 und 1. Eine reziproke Korrelation zwischen Al_2O_3 und $\text{FeO}_{\text{total}}$

(Abbildung 3.19) lässt vermuten, dass signifikante Mengen des Fe als Fe^{3+} vorliegen, da Fe^{3+} für Al eingebaut werden kann (SCHMIDT ET AL. 1997).

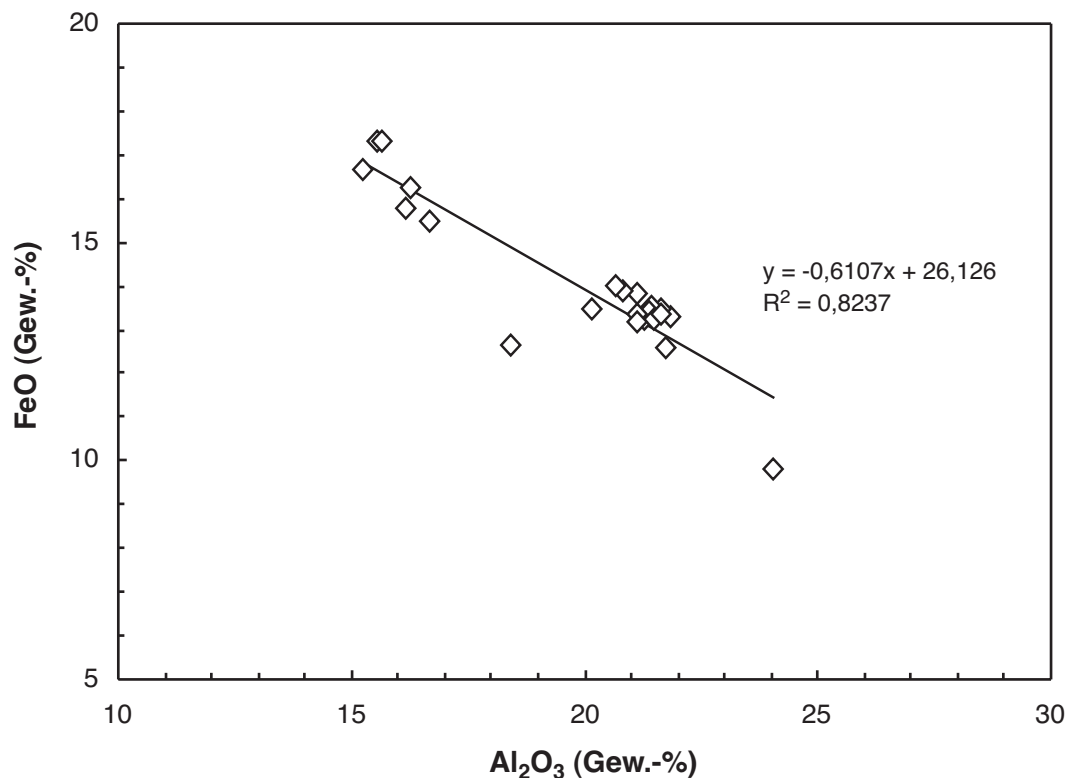


Abbildung 3.19: Al_2O_3 gegen $\text{FeO}_{\text{total}}$ in Pumpellyiten

Pumpellyit kommt in verschiedenen metamorphen Gesteinen sowohl sedimentären als auch magmatischen Ursprungs vor. Dabei wurde mit ansteigendem Metamorphosegrad eine Abnahme des Fe-Gehaltes beobachtet. Dieser Trend geht vermutlich mit abnehmender Sauerstoff-Fugazität einher, wobei das Eisen in koexistierenden Chlorit oder Aktinolith eingebaut wird (DEER ET AL. 1992).

3.4.5.3 Titanit

Die Titanit-Formel ($\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O},\text{OH})$) wurde auf der Basis von 19,5 Sauerstoff-Atomen plus einer OH-Gruppe berechnet. Dabei wurde alles Fe als Fe^{3+} berechnet. Die wichtigste Substitution in Titanit ist $(\text{Al},\text{Fe})^{3+} + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{Ti}^{4+} + \text{O}^{2-}$. Bei der Auftragung von Ti gegen $\text{Al}+\text{Fe}^{3+}$ (Abbildung 3.20) erkennt man eine lineare Korrelation mit $r^2=0,939$, die die Annahme rechtfertigt, dass alles Fe als Fe^{3+} vorliegt. Die Titanit-Zusammensetzung hängt u.a. vom Metamorphosegrad ab und verändert sich mit steigender Temperatur zu höheren Ti-Gehalten und niedrigeren Gehalten an $\text{Al}+\text{Fe}^{3+}$. SCHMIDT ET AL. (1997) untersuchten u.a. die Mineralogie von Metagrauwacken unterschiedlichen Metamorphosegrades aus der Taveyenne Formation in der Westschweiz. Vergleicht man die Titanit-Zusammensetzungen dieser Arbeit mit ihren Ergebnissen, so liegen die Ti-Gehalte im Bereich von Titanit aus Proben der Pumpellyit-Aktinolith- und Grünschieferfazies.

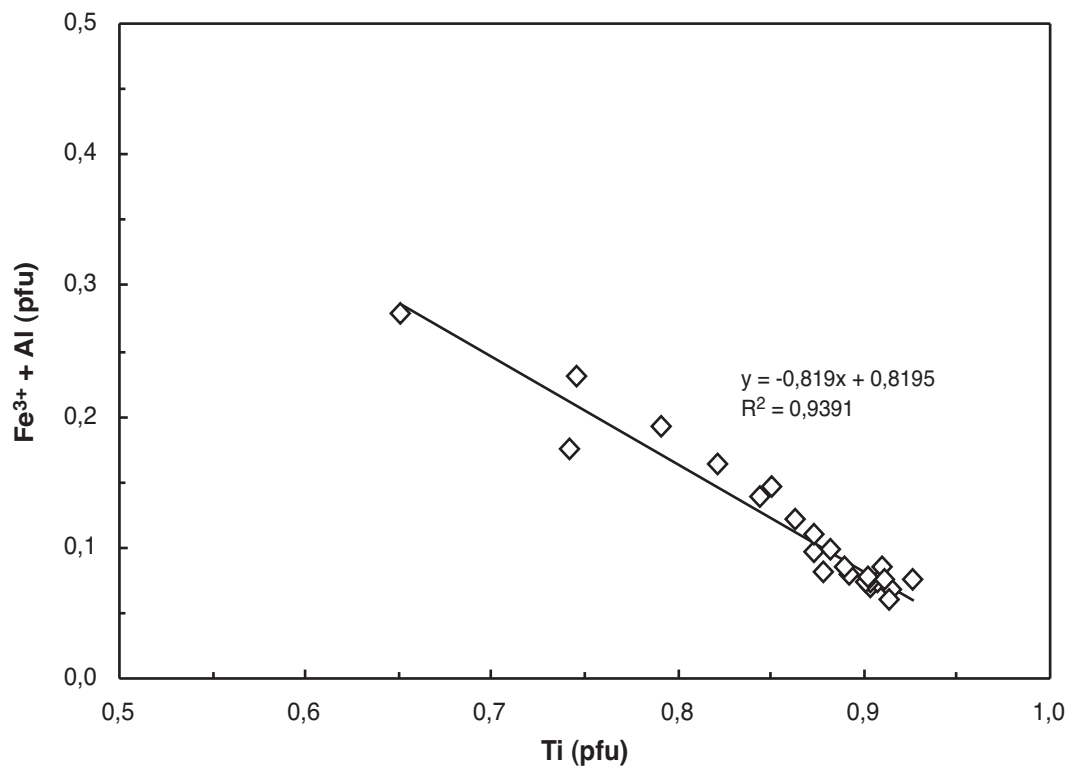


Abbildung 3.20: Ti-Gehalt von Titanit gegen $\text{Al}+\text{Fe}^{3+}$. Eingetragen ist die Substitutionslinie von $(\text{Al},\text{Fe})^{3+} + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{Ti}^{4+} + \text{O}^{2-}$

3.5 Zusammenfassung der p-T-Informationen

Die Werte der Tonminerkristallinität liegen für die Chañaral-Mélange in der Oberen Anchizone, die mit einer Metamorphose unter Pumpellyit-Aktinolith-faziellen Bedingungen bei Temperaturen von 250-350°C korreliert werden können. Die Las Tórtolas Fm. war einer etwas schwächeren Metamorphose unter Bedingungen der Unteren Anchizone bzw. der Prehnit-Pumpellyit-Fazies bei Temperaturen von 175 bis 280°C ausgesetzt. Die Bildungstemperaturen der Chlorite aus den Metapeliten der Chañaral-Mélange liegen im Mittel bei 300°C. Chlorite aus einer Quarzader ergeben Bildungstemperaturen von 350-400°C, diese zeigen evtl. eine hydrothermale Überprägung der Gesteine an. Die Temperaturinformationen aus den Metapeliten korrelieren gut mit Chloritbildungstemperaturen aus in die Mélange eingeschalteten Metabasiten (T = 300°C, Tabelle 3-6).

Der an K-Hellglimmern der Metapelite aus der Chañaral-Mélange bestimmte b-Parameter liegt im Mittel bei 9,01 Å und somit im Bereich von Vergleichsproben mit intermediärem Druck. Für Temperaturen von 300-350°C ergeben sich Drücke von 2,2-2,85 kbar; es wurde ein Gradient von ca. 35°C/km ermittelt.

Durch die Phengit-Barometrie konnten für einen mittleren Si-Gehalt von 3,2 für Temperaturen von 300-350°C Mindestdrücke von 0,5 bis 1,5 kbar abgeleitet werden, dem maximalen Si-Gehalt von 3,46 entsprechen Drücke von 4-5 kbar.

Die chemische Zusammensetzung der metamorphen Minerale in den Metabasiten entspricht den für Metabasite der Subgrünschiefer- bis Grünschieferfazies erwarteten Werten.

In Tabelle 3-9 sind die verfügbaren p-T-Informationen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-9: Übersicht über die p-T-Informationen aus der Chañaral-Mélange und der Las Tórtolas Fm.

| Methode | Chañaral-Mélange | Las Tórtolas Fm. |
|--|--|---|
| Tonminerkristallinität und Korrelation mit Mineralfazies | Obere Anchizone (300-350°C), Pumpellyit-Aktinolith-Fazies | Untere Anchizone (175-280°C), Prehnit-Pumpellyit-Fazies |
| Chloritthermometrie | 300°C (Metapelite und Metabasite) 350-400°C (Quarzader) | |
| b-Parameter | intermediärer Druck (2,2-2,85 kbar) | |
| Phengit-Barometrie | Minstdruck: 0,5-1,5 kbar maximaler Druck: 4-5 kbar? | |

4 Untersuchungen zu Zusammensetzung und Dichte von Fluiden in Einschlüssen aus syntektonischen Quarzadern

Fluideinschlüsse in Mineralen sind laut LEEDER ET AL. (1987) definiert als "hermetisch abgeschlossene und stofflich selbständige Körper in natürlichen oder technischen Aggregaten, die während deren Entstehung und/oder nachfolgender Prozesse eingeschlossen wurden und Phasengrenzen gegen das einschließende Medium besitzen". Diese Definition berücksichtigt nur die prinzipiellen gemeinsamen Eigenschaften und erlaubt eine eindeutige Abgrenzung gegenüber anderen Erscheinungen inhomogenen Materialaufbaus wie z.B. Gitterfehler. Hinsichtlich Größe, Form, Anzahl, Phasenverhältnisse sowie Entstehung sind Fluideinschlüsse sehr unterschiedlich (ROEDDER 1984, SHEPHERD ET AL. 1985, GOLDSTEIN ET AL. 1994, DE VIVO ET AL. 1994).

Während des Einschlussprozesses wird eine bestimmte Menge an fluider Phase vom Wirtsmaterial umwachsen und verschlossen. Der Einschluss steht danach zwar im thermischen, aber nicht im stofflichen Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Im Einschluss herrscht konstantes Volumen und der Druck stellt sich entsprechend der herrschenden Temperatur d.h. des geothermischen Gradienten ein (Abbildung 4.1). Ändert sich diese Temperatur z.B. bei Abkühlen des Gesteins, so verändert sich der Druck längs der Isochoren (d.h. Kurve konstanten Volumens) im zum System gehörenden p-V-T-Diagramm. Wird nach weiterem Abkühlen die Siedekurve des Systems erreicht, so geht das System in den Zweiphasenzustand über, es bilden sich eine Dampfblase (V „vapour“) und eine die Einschlusswand benetzende flüssige Phase (L „liquid“). Bei Raumtemperatur liegt schließlich ein Zweiphaseneinschluss mit charakteristischem Füllgrad ϕ_L vor (Definition s. Gleichung 4-1). In Mehrkomponentensystemen kann es weiterhin beim Abkühlen des Gesteins zur Entmischung in zwei nicht mischbare Flüssigkeiten (z.B. im System H₂O-CO₂) oder zur Sättigung an einer oder mehreren gelösten Komponenten und zur Bildung von Tochtermineralen kommen.

Der Füllgrad ϕ_L ist definiert als das Volumen, das die flüssige Phase L im Verhältnis zum Gesamtvolumen bei Raumtemperatur einnimmt:

$$\phi_L = \frac{V_L}{V_L + V_V} \quad \left(\text{analog: } \phi_V = \frac{V_V}{V_L + V_V} \right) \quad (4-1)$$

Da in einem Einschluss Masse und Volumen seit der Einschlussbildung konstant bleiben, kann man an Stelle des Volumens als konstantem Parameter auch die Dichte einsetzen; das System wandert bei Änderung der äußeren Parameter im homogenen Bereich entlang Kurven konstanter Dichte, den Isopyknen (Abbildung 4.1).

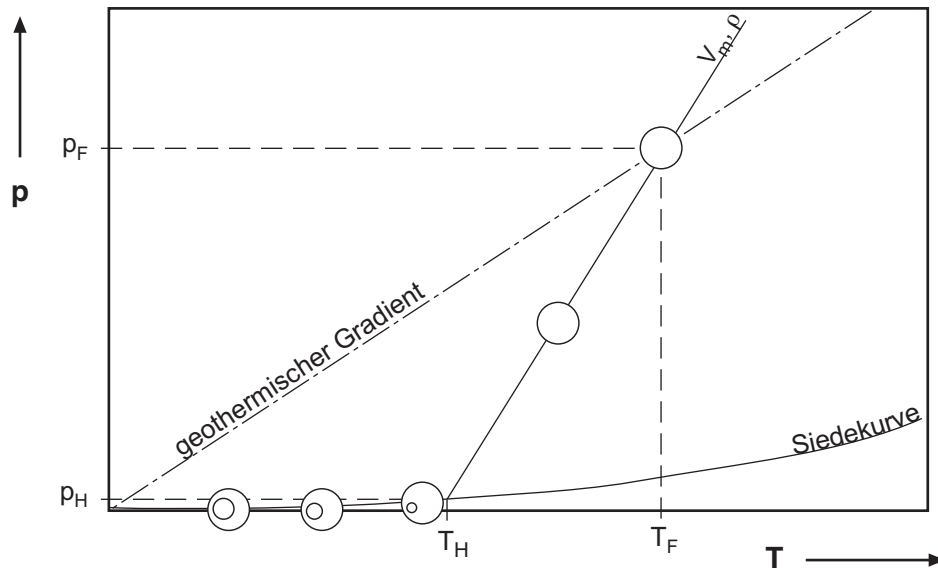


Abbildung 4.1: schematische Darstellung der p-T-Entwicklung eines hypothetischen Einschlusses mit dem Volumen V_m bzw. der Dichte ρ .

4.1 Mikroskopische Beobachtungen in den untersuchten quarzverfüllten Klüften

Die beprobten Adern erwiesen sich als sehr unterschiedlich bezüglich ihrer Mikrostrukturen sowie des Fluidinventars (Häufigkeit der Fluideinschlüsse, Erscheinungsform) (s. Kapitel 2.3). Die beobachteten Fluideinschlüsse können in drei verschiedene Gruppen eingeteilt werden:

Typ 1: zweiphasige Einschlüsse, entweder in Gruppen (Clustern) oder in Bahnen angeordnet. Solche in Clustern sind bis zu $15 \mu\text{m}$ groß, wogegen in Bahnen angeordnete Fluideinschlüsse nur $3 \mu\text{m}$ als längste Ausdehnung erreichen. Der Füllgrad der Einschlüsse liegt, unabhängig von der Anordnung, zwischen 0,8 und 0,9. Vereinzelt treten Cluster aus vier bis fünf Einschlüssen mit einer negativen Kristallform auf (Abbildung 4.2 a). Ansonsten zeigen die Einschlüsse in Clustern eine flach erscheinende, leicht unregelmäßige bis ausgefranste Form.

Typ 2: zweiphasige Einschlüsse, häufig mit dunkler Blase. Beim Abkühlen nukleiert im Inneren der Blase eine weitere Blase, es handelt sich um ein System aus zwei nicht-mischbaren flüssigen Phasen und einer Gasphase. Diese Einschlüsse sind überwiegend auf Bahnen parallel (z.B. Probe PuA 51), mitunter auf Bahnen schräg ($\pm 60^\circ$) zur Klüftwand angeordnet (z.B. Probe PuA 41).

Sie zeigen eine amöbenartige Form, selten negative Kristallform. Vereinzelt treten Dekrepitationsstrukturen und Abschnürung von Einschlüssen auf, wie in Abbildung 4.2 b und c gezeigt wird.

Sie erreichen Längen von bis zu $20 \mu\text{m}$, diejenigen mit negativer Kristallform sind kleiner (bis $5 \mu\text{m}$).

Der Füllgrad variiert von 0,03 bis 0,81. Mitunter sind Fluideinschlüsse mit unterschiedlichen Füllgraden und unterschiedlichen Typs (Typ 1 mit $\rho > 0,8$ und Typ 2) direkt nebeneinander zu beobachten (Abbildung 4.2 d), wobei solche mit kleinem Füllgrad größer sind (größte Länge ca. $13 \mu\text{m}$) als solche mit hohem Füllgrad (bis ca. $5 \mu\text{m}$).

Zum Teil treten einzelne Einschlüsse dieses Systems isoliert in rekristallisierten Quarzkörnern auf, nebeneinanderliegende Einschlüsse zeigen dabei unterschiedliche Füllgrade (Abbildung 4.2 e).

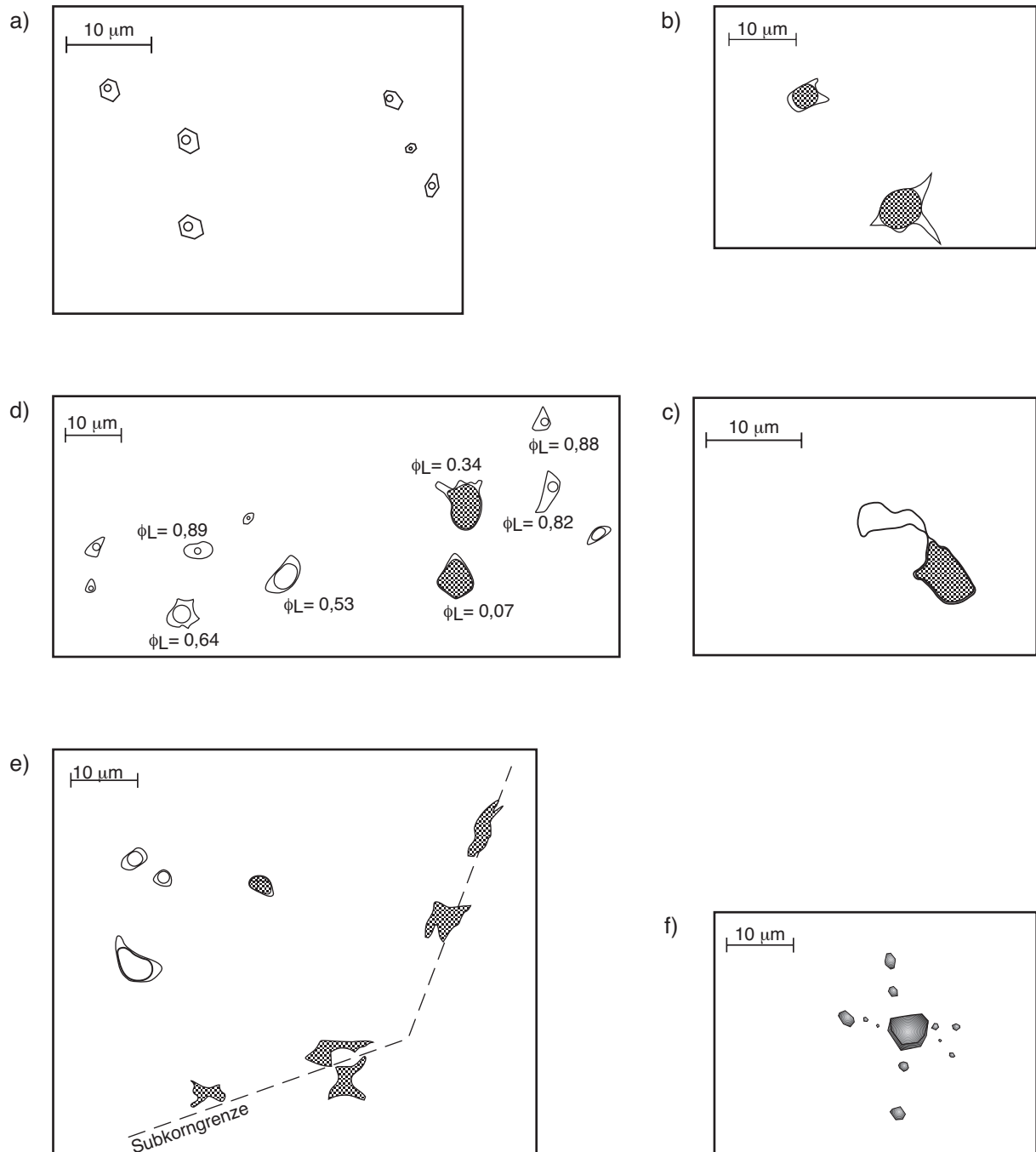


Abbildung 4.2: maßstabgetreue Zeichnung einiger in den untersuchten Proben vorkommender Einschlusstypen. Beschreibung siehe Text.

Typ 3a: einphasige Einschlüsse, in denen z.T. beim Abkühlen Blasen nukleieren. Es handelt sich um Gaseinschlüsse. Diese treten in Ebenen auf, die schräg zur Kluftwand sowie zu Typ 2-Einschlussebenen orientiert sind. In Probe PuA 41 sind diese Ebenen z.T. parallel zur Schliffoberfläche angeordnet. Mitunter erscheinen einphasige Einschlüsse auf Bahnen an Subkorn Grenzen (Abbildung 4.2 e). Die Form dieser einphasigen Einschlüsse ist eher unregelmäßig, sie erreichen Längen von 10-15 μm .

Typ 3b: einphasige, dunkle Einschlüsse, die eine sehr regelmäßige, dreidimensionale Form haben. Beim Abkühlen zeigen sich keine Phasenänderungen. Sie treten isoliert auf, teilweise auf Bahnen. In Abbildung 4.2 f ist ein Beispiel für letztere gezeichnet, wobei auffällt, dass Bahnen mit kleineren Einschlüssen radial um einen größeren Einschluss im Zentrum angeordnet sind.

4.2 Mikrothermometrie

4.2.1 Grundlagen

Die Mikrothermometrie basiert auf der Beobachtung und Erkennung von reproduzierbaren Phasenreaktionen im Mikrosystem während des Einfrierens und Aufheizens der Proben. Wichtige Voraussetzung für die korrekte Interpretation von mikrothermometrischen Messdaten ist die Annahme, dass bei und nach der Einschlussbildung keine stofflichen Veränderungen der fluiden Phase (z.B. durch selektive Adsorption an Oberflächen) und kein Stoffaustausch mit der Umgebung, z.B. durch Diffusion aus dem Einschluss heraus oder in den Einschluss hinein, stattfindet. Die Einschlüsse verhalten sich somit nach der Entstehung wie geschlossene Systeme. Irreversible Änderungen wie Leckagen und Abschnürung einzelner Einschlüsse müssen durch genaue Beobachtung ausgeschlossen werden.

4.2.1.1 Wasser-Salz-Systeme

Der Gehalt an Salzkomponente kann durch Einfrieren und wieder Aufheizen ("Kühlzyklus") des Einschlusses bestimmt werden, indem man die Temperatur T_m der Klarschmelze bestimmt. Die Klarschmelze stellt die Temperatur dar, bei der das Abschmelzen des letzten Eiskriställchens (bzw. des Salzhydrates bei Konzentrationen über der eutektischen Konzentration) beobachtet wird. Die Gefrierpunktserniedrigung des Lösungsmittels (hier Wasser) ist dabei direkt proportional zur darin enthaltenen Menge an Salz (ATKINS 1987). Einen weiteren wichtigen Messpunkt im Kühlzyklus stellt der eutektische Punkt dar, erkennbar am ersten Erscheinen von Schmelzphase. Der eutektische Punkt stellt einen invarianten Punkt des Systems dar, wenn die festen Phasen der Komponenten keine Mischkristalle bilden. Die Lage des Eutektikums hängt von den enthaltenen Komponenten ab; sie stellt ein Kriterium zur qualitativen Bestimmung der Zusammensetzung des Einschlussinhaltes dar. Dies ist deshalb möglich, weil die Eutektika hydrothermaler Wasser-Salz-Systeme genügend weit auseinander liegen, so dass eine Zuordnung eindeutig möglich ist (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Eutektika einiger häufiger Wasser-Salz-Systeme und der auftretenden Festphasen (zusätzlich vorhanden: L + V); (SHEPHERD ET AL. 1985); eutektische Temperaturen nach BORISENKO (1977), Werte in Klammern aus HOLLISTER & CRAWFORD (1981)

| System | eutektische Temperatur [°C] | feste Phasen |
|---|-----------------------------|--|
| H ₂ O-NaCl-CaCl ₂ | -55 (-52) | Eis + CaCl ₂ ·6 H ₂ O + NaCl·2 H ₂ O |
| H ₂ O-CaCl ₂ | -49,5 | Eis + CaCl ₂ ·6 H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-MgCl ₂ | -35 | Eis + MgCl ₂ ·12 H ₂ O + NaCl·2 H ₂ O |
| H ₂ O-MgCl ₂ | -33,6 | Eis + MgCl ₂ ·12 H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl-KCl | -23,5 (-22,9) | Eis + NaCl·2 H ₂ O + KCl·n H ₂ O |
| H ₂ O-NaCl | -21,2 (-20,8) | Eis + NaCl·2 H ₂ O |
| H ₂ O-KCl | -10,6 | Eis + KCl·n H ₂ O |

In ternären Systemen bestimmen drei Messpunkte den Salzgehalt der Lösung: Am eutektischen Punkt schmilzt die erste Salzhydratphase (z.B. CaCl₂·6 H₂O), erste flüssige Phase tritt auf und zwei Festphasen verbleiben im Einschluss. T_{m_1} , der Schmelzpunkt der zweiten Festphase (Eis oder das zweite Salzhydrat), legt das Verhältnis der beiden Salzkomponenten zueinander fest, und die Temperatur, bei der die letzte Festphase verschwindet (T_{m_2}), ergibt die Gesamtsalinität der Lösung.

Da die Beobachtung des eutektischen Punktes oft schwierig ist und es zusätzlich an geeigneten Systemdaten für komplexere Systeme mangelt, werden Wasser-Salz-Systeme häufig als NaCl-Lösungen ausgewertet (Gew.-% NaCl äq.), da für dieses System ausreichend p-V-T-x-Daten vorhanden sind. Bei Beobachtung von Schmelze unterhalb von -21,2°C erscheint je nach beobachteter Temperatur die Angabe in Gew.-% CaCl₂ bzw. MgCl₂ äq. als sinnvoller, da, wie aus Tabelle 4-1 ersichtlich, NaCl nicht die einzige Salzkomponente sein kann.

Die Messung der Homogenisierungstemperatur ("Heizzyklus") stellt gewissermaßen die Umkehrung der Einschlussentwicklung nach dessen Bildung dar. Die Probe wird erhitzt, bis auf der Siedekurve der Einschluss homogen wird (Homogenisierungstemperatur T_H). Dabei erreicht man je nach Dichte die Homogenisierung in die flüssige ($\rho > \rho_{krit}$) oder in die Gasphase ($\rho < \rho_{krit}$) bei der Homogenisierungstemperatur T_H . Die Homogenisierung eines Einschlusses mit kritischer Dichte zeichnet sich durch ein Verschwinden der Phasengrenze bei konstant bleibenden Phasenverhältnissen aus. Die Homogenisierungstemperatur stellt die niedrigstmögliche Bildungstemperatur des Einschlusses dar, wenn man davon ausgeht, dass die Einschlussbildung aus einem homogenen Fluid erfolgte. Die Einschlussbildung erfolgte auf der Isopyknen des Systems, die bei T_H aus der Siedekurve ins p-T-Feld austritt. Wenn sich Bildungsdruck oder -temperatur eines Gesteines zur Zeit der Einschlussbildung unabhängig durch Hinzuziehen eines Geothermometers oder -barometers festlegen lassen, können anhand des Schnittpunktes der Isothermen bzw. Isobaren mit der ermittelten Isopykne die p-T-Bedingungen der Einschlussbildung festgelegt werden.

4.2.1.2 Wasser-Gas- und Wasser-Gas-Salz-Systeme

Bei Raumtemperatur oder auch erst beim Abkühlen treten in Wasser-Gas- oder Wasser-Gas-Salz-Einschlüssen drei Phasen auf, wobei es sich um zwei nicht mischbare flüssige Phasen und eine Gasphase handelt. Bei Einkomponenten-Systemen kann die Gasspezies über ihren Tripelpunkt identifiziert werden, der - ähnlich wie der eutektische Punkt bei Wasser-Salz-Systemen - charakteristisch für das System ist. In Tabelle 4-2 sind die Tripelpunkte und die kritischen Punkte einiger in Einschlüssen häufig auftretender Gase aufgeführt.

Tabelle 4-2: Systemdaten einiger in Fluideinschlüssen häufig auftretender Gase (SHEPHERD ET AL. 1985)

| Spezies | Tripelpunkt | | kritischer Punkt | |
|------------------|-------------|-----------------------|------------------|---------|
| | T (°C) | p (bar) | T (°C) | p (bar) |
| N ₂ | -210,0 | 0,1 | -146,9 | 34,0 |
| CH ₄ | -182,5 | 0,1 | -82,6 | 46,0 |
| CO ₂ | -56,6 | 5,2 | 31,1 | 73,8 |
| H ₂ S | -87,5 | 0,2 | 100,0 | 89,4 |
| H ₂ O | +0,015 | 6,11·10 ⁻³ | 374,1 | 221,2 |

Bei Mischsystemen kann die dominierende Spezies häufig anhand der Lage des Schmelzpunktes der festen Phase im Gas-Subsystem abgeschätzt werden. Bei Wasser-Gas-Systemen verhält sich das Gas-Subsystem aus nicht-wässriger Phase und Gasphase aufgrund der geringen Löslichkeit der beiden Phasen ineinander wie ein Gassystem. Zusätzlich kann sich bei niedrigen Temperaturen an der Grenzfläche zwischen der wässrigen und der nicht-wässrigen Phase ein Gashydrat (Clathrat) ausbilden, welches z.B. im Binärsystem H₂O-CO₂ in Gegenwart von flüssigem und gasförmigem CO₂ bei +10°C zusammenbricht.

Durch die Anwesenheit von Salzen wird die Clathrat-Stabilität in Abhängigkeit von der Salzkonzentration erniedrigt, so dass die Konzentration durch Messung dieser Zusammenbruchtemperatur ($T_{m,Clathrat}$) bestimmt werden kann (SHEPHERD ET AL. 1985, BAKKER ET AL. 1996). Ein weiterer Messpunkt bei Wasser-Gas±Salz-Systemen stellt die Temperatur der Homogenisierung der Gasphase dar ($T_{H,Gas}$). Diese erfolgt wie oben beschrieben abhängig von der Dichte in die flüssige, in die Gasphase oder unter kritischem Verhalten. Liegt nur eine Gaskomponente vor, kann durch Beobachtung der Homogenisierung die Dichte des Gas-Subsystems bestimmt werden. Zur Ermittlung der Dichte des gesamten Einschlusses wird die Temperatur der totalen Homogenisierung gemessen ($T_{H,tot}$). Im Allgemeinen kann jedoch gesagt werden, dass es für H₂O-Gas-Systeme keine zuverlässigen thermodynamischen Zustandsgleichungen gibt, um die Gesamtdichte aus der Temperatur der totalen Homogenisierung zu berechnen, weshalb eine Abschätzung von ρ_v eine bessere Berechnung der Gesamtdichte liefert (BAKKER, pers. Mitt.). BAKKER & DIAMOND (2000) veröffentlichten ein V-x-Diagramm, das es nun ermöglicht, durch Kombination von $T_{H,Gas}$ und $T_{H,tot}$ die Dichte in Einschlüssen des binären Systems H₂O-CO₂ graphisch zu ermitteln.

Tabelle 4-3 zeigt zusammenfassend eine Übersicht über die auftretenden Phasenübergänge mit den dazugehörigen Messpunkten und Abkürzungen, die im folgenden verwendet werden.

Tabelle 4-3: Übersicht über die in verschiedenen Systemen auftretenden Phasenübergänge mit den dazugehörigen Messpunkten und Abkürzungen, die im folgenden verwendet werden

| System | Phasenübergänge und Messpunkte | Abkürzungen |
|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Wasser-Salz | eutektische Schmelze | T_E |
| | Klarschmelze | $T_{m, Eis}$ bzw. $T_{m, Hydrat}$ |
| | Homogenisierung | T_H |
| Wasser-Gas±Salz | Tripelpunkt des Gas-Subsystems | T_T |
| | eutektische Schmelze | T_E |
| | Zusammenfallen des Clathrates | $T_{m, Clathrat}$ |
| | Homogenisierung des Gas-Subsystems | $T_{H, Gas}$ |
| | totale Homogenisierung | $T_{H, tot}$ |

4.2.2 Messmethode

Die mikrothermometrischen Messungen wurden an einem auf ein OLYMPUS-BH-2-Mikroskop aufgebrachten LINKAM THM600-Heizkühltisch (Temperaturregeleinheit TMS91, Videobildbearbeitungseinheit VTO232) vorgenommen.

Zur Korrektur der gemessenen Werte wurde nicht von der Möglichkeit der internen Kalibrierung des Heizkühltes Gebrauch gemacht, sondern ca. ein Mal wöchentlich für das benutzte Objektiv eine Kalibrierung vorgenommen, um evtl. zeitliche Schwankungen zu erfassen. Dazu dienten im Kühlzyklus synthetische H₂O- und CO₂-Einschlüsse, in Heizzyklus erfolgte die Kalibrierung mit Phenantren, Silbernitrat und Natriumnitrat. Die chemischen Substanzen zur Kalibrierung bei höheren Temperaturen zeigten aufgrund von Verunreinigungen keinen exakten Schmelzpunkt, sondern einen sich über mehrere Grade erstreckenden Schmelzbereich. Daher wurde die Temperatur gemessen, bei der der letzte Kristall innerhalb der schon flüssigen Phase verschwindet. Es wird angenommen, dass diese Temperatur eine gute Annäherung an den wirklichen Schmelzpunkt des reinen Materials ist.

In Tabelle 4-4 sind beispielhaft die Messwerte einer Kalibrierung für die verschiedenen Kalibrierungsproben aufgeführt. Von diesen Messwerten wurde jeweils der Mittelwert berechnet und diese gegen die Sollwerte aufgetragen (s. Tabelle 4-4). Die lineare Regression ergibt eine Geradengleichung, mittels derer die späteren Messwerte korrigiert werden. Die Genauigkeit der Messungen (bestimmt durch 3-5 Wiederholungsmessungen) kann für Temperaturen im Bereich des Tripelpunktes von CO₂ mit 1,5°C, für Temperaturen um den Gefrierpunkt von Wasser mit 0,1°C und für die Messungen im Heizzyklus (> 50°C) mit 2,5°C angegeben werden.

Tabelle 4-4: Daten zur Kalibrierung des Linkam THM 600 (Beispiel)

| Messpunkt | T _{ist} [°C] | T _{soll} [°C] |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| T _m (CO ₂) | -57,3 | -56,6 |
| T _m (H ₂ O) | 0,2 | 0,0 |
| T _m (Phenantren) | 99,6 | 100,5 |
| T _m (AgNO ₃) | 215,9 | 212,0 |
| T _m (NaNO ₃) | 314,2 | 306,8 |

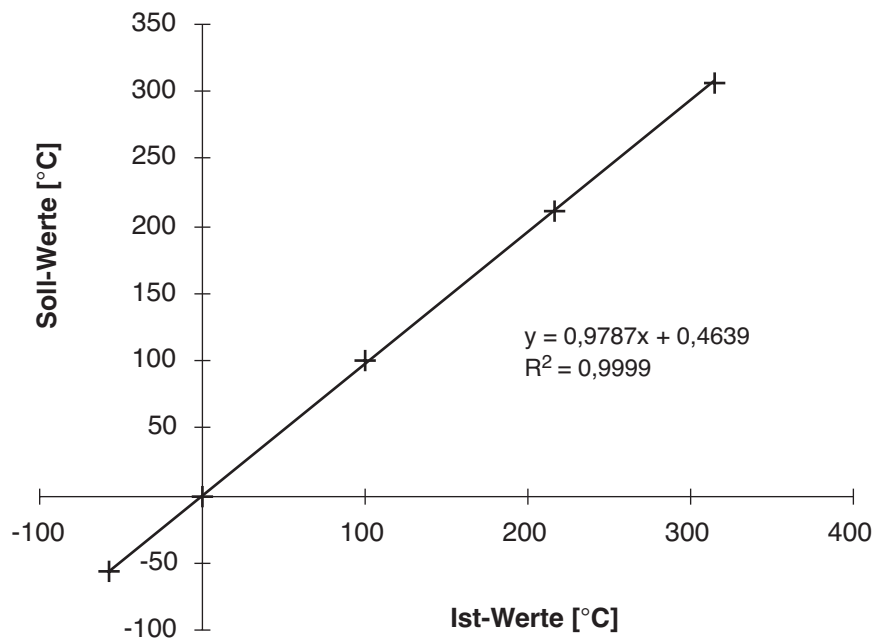


Abbildung 4.3: Ermittlung der Regressionsgeraden zur Korrektur der gemessenen Temperaturen am Linkam THM 600

Vor den Messungen wurden von den einzelnen Einschlüssen mit der Videobildbearbeitungseinheit Fotos angefertigt. Mittels einer Grafiksoftware (z.B. NIH Image) können die Füllgrade der Einschlüsse über das Oberflächenverhältnis bestimmt werden. Bei fünf Wiederholungsmessungen lag die Genauigkeit bei ca. 3% Abweichung. Das Oberflächenverhältnis liefert vor allem bei flachen Einschlüssen eine gute Näherung für den Füllgrad, der wie in Gleichung 4-1 angegeben als ein Volumenverhältnis definiert ist. Abweichungen der graphisch bestimmten Füllgrade von den aus den mikrothermometrischen Daten berechneten Füllgraden betragen $\pm 5\%$.

Die Messungen wurden folgendermaßen durchgeführt: Zur Übersicht wurde jede Probe zuerst bis -196°C abgekühlt und zur Beobachtung der auftretenden Phasenübergänge relativ schnell ($30\text{-}40^\circ\text{C}/\text{min}$) auf Zimmertemperatur aufgeheizt. Da in Fluideinschlüssen beim Einfrieren metastabile Unterkühlung auftritt, müssen alle Messdaten stets beim Aufheizen der Probe, d.h. Schmelzen der festen Phase erfaßt werden. Zur genauen Erfassung der Temperaturen der Phasenübergänge wurde mit einer Rate von $1^\circ\text{C}/\text{min}$ aufgeheizt.

Nachdem alle Messungen im Kühlzyklus durchgeführt waren, wurden die Homogenisierungstemperaturen gemessen. Dazu wurde mit 10°C/min in 10°C-Schritten aufgeheizt. Wenn eine Homogenisierung von Einschlüssen beobachtet wurde, wurde sofort bis zur Blasenbildung abgekühlt und der Phasenübergang mit einer Rate von 2°C/min genau gemessen.

Proben, bei denen während der mikrothermometrischen Messungen Gaseinschlüsse identifiziert werden konnten, wurden zunächst nicht homogenisiert, da diese Einschlüsse aufgrund des hohen Innendruckes beim Homogenisieren leicht dekrepitieren und eine Analyse des Inhaltes mit z.B. Raman-Spektroskopie dann nicht mehr möglich ist.

4.3 Raman-Spektroskopie zur Analyse des Einschlussinhaltes

4.3.1 Grundlagen

Die Raman-Spektroskopie macht sich den sogenannten Raman-Effekt zunutze, der die inelastische Streuung von Licht an Molekülen beschreibt (ATKINS 1987). Dabei wird monochromatisches Licht auf ein Molekül eingestrahlt (Primärstrahl) und unter Energieabgabe (Stokessche Strahlung, gegenüber Primärstrahl zu niedrigeren Frequenzen verschoben) bzw. -aufnahme (Anti-Stokessche Strahlung, Verschiebung zu höheren Frequenzen) gestreut. Ursache für diese Energieänderungen sind dabei Änderungen der Rotations- und Schwingungszustände des Moleküls. Das gestreute Licht besitzt bezüglich der Primärstrahlung verschobene Frequenzen, wobei die höherfrequente Anti-Stokessche Strahlung weniger intensiv ist und daher oft nicht beobachtet wird. Aufgrund der nur geringen Verschiebung und der geringen Intensität der Streustrahlung werden monochromatische, energiereiche Laserstrahlen zur Anregung benutzt. Das in der Regel analysierte Stokes-Raman-Spektrum wird in einem Diagramm als Strahlungsintensität gegen die Energieverschiebung (in Wellenzahlen, cm^{-1}) relativ zur Primärstrahlung dargestellt ($\Delta\bar{\nu}$, Raman-Verschiebung). Die Peaks im Raman-Spektrum entsprechen den Energien der Schwingungszustände der verschiedenen Spezies in einer Probe. Durch Akkumulation der Spektren wird das Signal/Rauschen-Verhältnis verbessert, eine verlängerte Messdauer erhöht die Empfindlichkeit der Messung und somit die Intensität der Peaks.

Die Raman-Messungen wurden mit Dr. Ronald Bakker am Mineralogischen Institut der Montanuniversität Leoben / Österreich sowie mit Dr. Ernst Burke im Labor für Mikroanalyse der Freien Universität Amsterdam durchgeführt (Messparameter s. Kapitel 7.1.3 im Anhang).

4.3.2 Analyse von Typ 1-Einschlüssen

Die Kationen und Anionen in wässrigen Lösungen können nur dann durch Raman-Analyse identifiziert werden, wenn sie beim Einfrieren Salzhydrate bilden und genügend große Kristalle nukleieren (BURKE 1994). Referenzdaten wurden z.B. von DUBESSY ET AL. (1982) an synthetischen Salzhydraten und synthetischen Fluideinschlüssen ermittelt. Durch Kombination eines Linkam-Heizkühltesches mit dem Mikroskop des Raman-Spektrometers war die Untersuchung der Einschlüsse v.a. bei tiefen Temperaturen möglich. Zum Teil konnte kein Salzhydrat bestimmt werden. Das kann daran liegen, dass keine genügend großen Kristalle nukleieren. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich bei

Anwesenheit verschiedener Kationen Mischhydrate bilden, die kein eindeutiges Spektrum ergeben. Dort, wo ein Salzhydrat gemessen werden konnte, handelte es sich um Hydrohalit ($\text{NaCl} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Das dazugehörige Spektrum ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

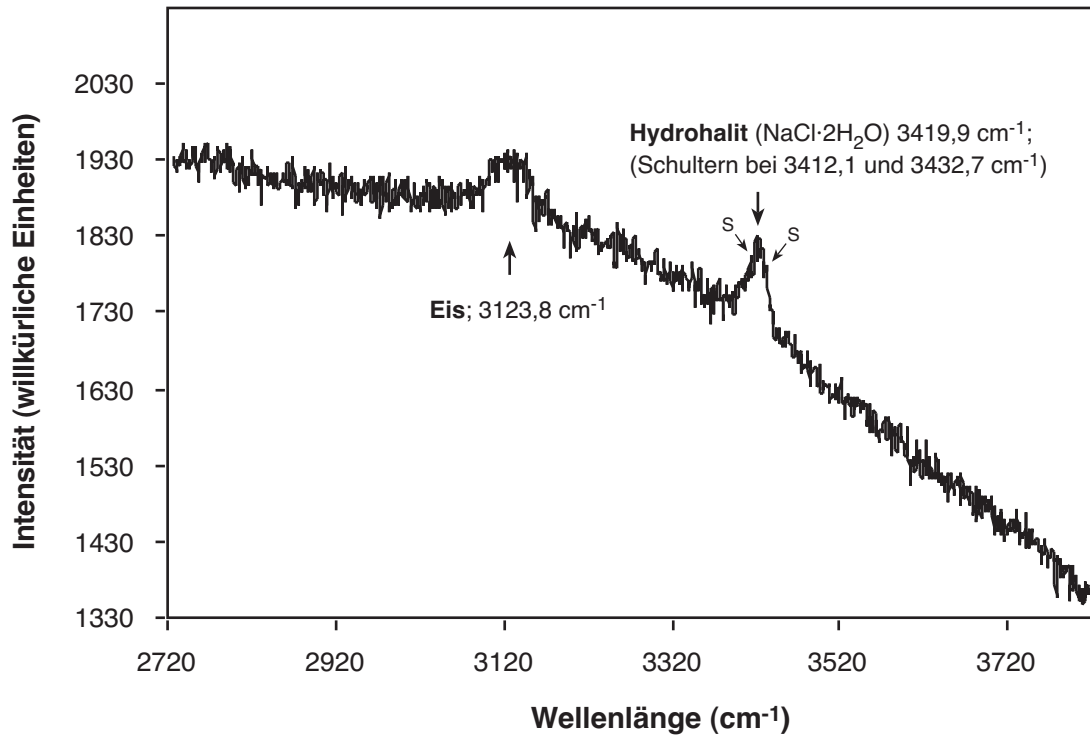


Abbildung 4.4: Raman-Spektrum von Hydrohalit, Probe PuA 41. Das Spektrum wurde bei -40°C aufgenommen.

4.3.3 Qualitative und quantitative Bestimmung der Gaskomponenten in Typ 2- und Typ 3-Einschlüssen

Sind in einem Einschluss verschiedene Gasspezies vorhanden, kann man deren relatives Verhältnis über die Flächen der Peaks nach folgender Gleichung bestimmen (BURKE 1994):

$$X_A = \frac{\frac{A_a}{\sigma_A \cdot \zeta_A \cdot t}}{\sum_i \frac{A_i}{\sigma_i \cdot \zeta_i \cdot t}} \tag{4-2}$$

- mit $X_{A,i}$: Molenbruch
- $A_{A,i}$: Peakfläche
- $\sigma_{A,i}$: Streuquerschnitt
- $\zeta_{A,i}$: instrumenteller Faktor, hier $\zeta_i = 1$
- t: Anregungsdauer

Die Peakflächen erhält man nach einer Basislinienkorrektur über die "Peak-Fit"-Funktion des Raman-Programmes Labspec (Dilor), wobei die Peaks durch eine Kombination von Gauss- und Lorentz-Funktionen angepasst werden.

Eine Besonderheit stellt CO_2 dar, das sich im Raman-Spektrum durch die Überlagerung verschiedener Schwingungen entstehende sogenannte Fermi-Dublett, d.h. zwei Peaks bei ca. 1285 cm^{-1}

(ν_1 -Schwingung) und 1388 cm^{-1} ($2\nu_2$ -Schwingung), auszeichnet (s. Abbildung 4.5). Dabei variiert das Intensitätsverhältnis beider Peaks mit der Dichte, wogegen die Summe der beiden Flächen konstant bleibt (BURKE 1994). Daher wird zur Berechnung der Molenbrüche die Summe beider Peakflächen verwendet und durch die Summe ihrer Streuquerschnitte ($\sigma_{\nu_1} + \sigma_{2\nu_2} = 2,5$) geteilt. In Tabelle 4-5 sind die Peak-Positionen und Streuquerschnitte der in den gemessenen Einschlüssen vorkommenden Gasspezies aufgeführt.

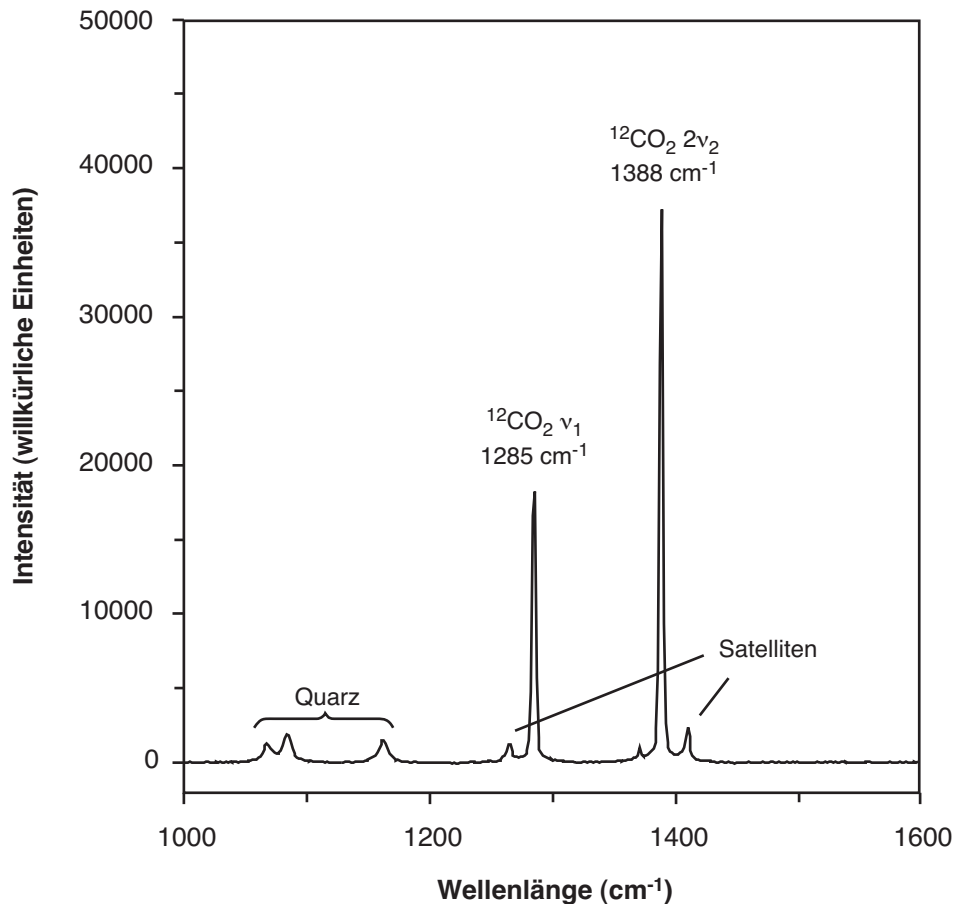


Abbildung 4.5: Raman-Spektrum eines Einschlusses mit CO₂.

In dieser Arbeit wurden alle Spektren unter den gleichen Bedingungen aufgenommen, daher ist eine Normalisierung der Spektren bezüglich der Anregungsdauer nicht nötig. In der Regel geht jedoch in Gleichung 4-2 die Anregungsdauer im Nenner ein, da die Intensität der Peaks außer von der Dichte auch von der Anregungsdauer abhängt. Wasser kann bei der quantitativen Auswertung der Raman-Spektren nicht berücksichtigt werden, da der H₂O-Peak sehr breit ist und eine Integration zur Bestimmung seiner Fläche nicht möglich ist. Das Gleiche gilt, wenn verschiedene Kohlenwasserstoffe in einem Einschluss vorkommen, da deren Peaks sich überlagern und nicht integriert werden können.

Tabelle 4-5: Raman-Verschiebungen ($\Delta\bar{\nu}$ in cm^{-1}) und Streuquerschnitte verschiedener Spezies (nach BURKE 1994)

| Spezies | $\Delta\bar{\nu}$ | σ |
|----------------------------------|-------------------|----------|
| $^{12}\text{CO}_2 \nu_1$ | 1285 | 1,0 |
| $^{12}\text{CO}_2 2\nu_2$ | 1388 | 1,5 |
| $^{13}\text{CO}_2$ | 1370 | 1,5 |
| N_2 | 2331 | 1,0 |
| H_2S | 2611 | 6,4 |
| C_3H_8 (Propan) | 2890 | |
| CH_4 | 2917 | 7,5 |
| C_2H_6 (Ethan) | 2954 | |
| H_2O (flüssig) | 3219* | |
| H_2O (gasförmig) | 3657* | |

*mehrere Hundert cm^{-1} breite Banden

Abbildung 4.6 zeigt, dass die Gasphase nahezu aller Typ 2- und Typ 3-Einschlüsse CO_2 -dominiert ist ($> 87\% \text{ CO}_2$). Sie enthalten zusätzlich bis zu 12,3 % Methan, meistens Spuren von Schwefelwasserstoff (bis 0,3 %), Stickstoff macht bis zu 3,5 % in einigen wenigen Einschlüssen des Typs 3 aus (s. Tabelle 7-11 im Anhang).

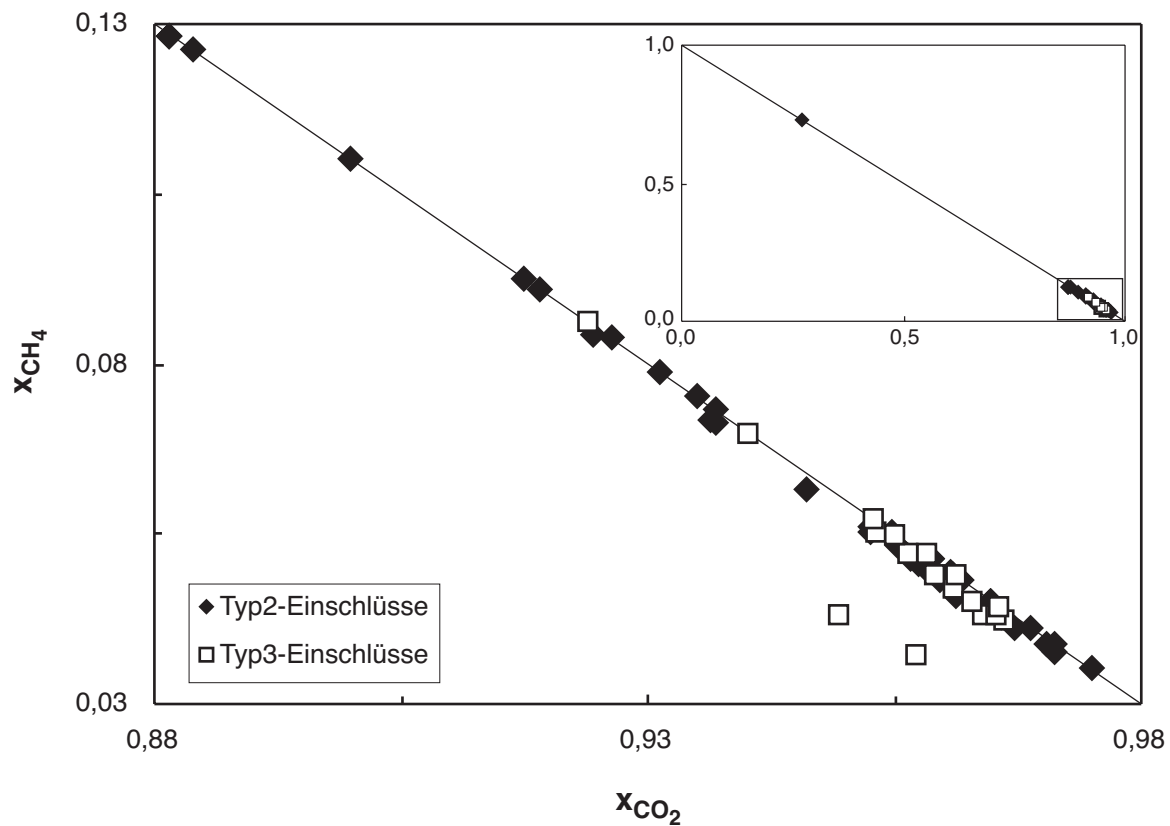


Abbildung 4.6: Vergleich des CH_4 - und CO_2 -Gehaltes der nichtwässrigen Phase der Typ 2-Einschlüsse mit den Typ 3a-Einschlüssen. Abweichungen von der eingezeichneten binären Linie kommen durch H_2S und N_2 .

In Probe PuA 41 finden sich Einschlüsse des Typs 3b, die überwiegend Methan enthalten. In diesen Einschlüssen, die in Abbildung 4.2 f dargestellt sind, konnte neben Methan noch Ethan und Propan nachgewiesen werden (Abbildung 4.7), sie beinhalten ein Gemisch aus leichteren Kohlenwasserstoffen.

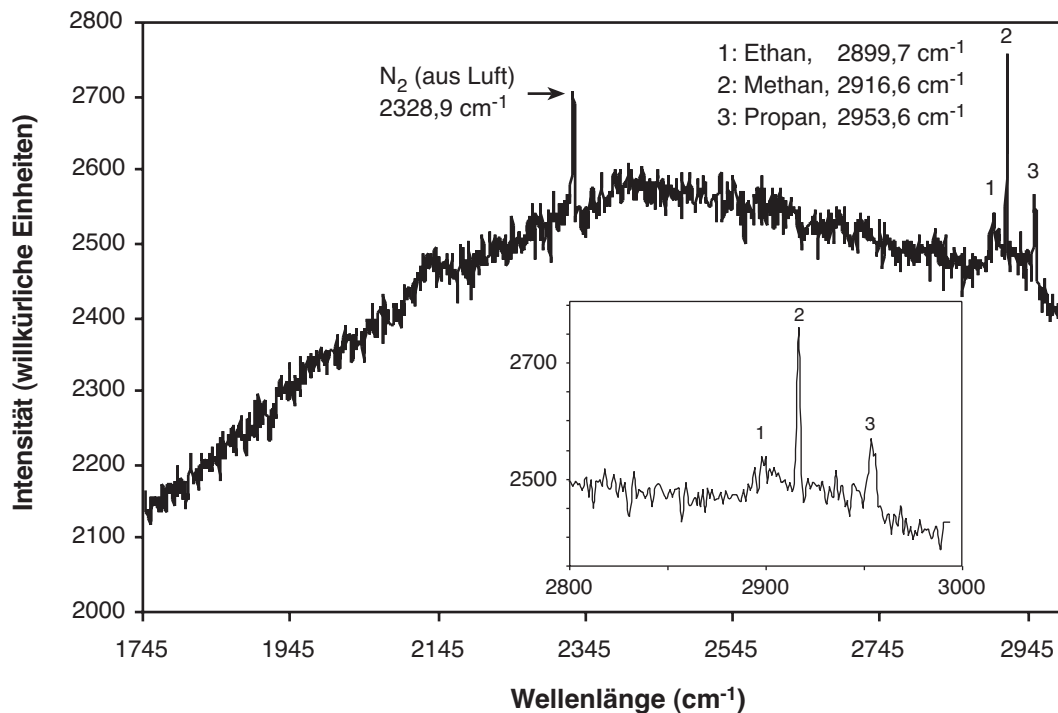


Abbildung 4.7: Raman-Spektrum eines Einschlusses mit Methan, Ethan und Propan (kein CO₂, kein H₂O)

In Typ 3a-Einschlüssen auf Korngrenzen (s. Abbildung 4.2 e) konnten keine Gaskomponenten nachgewiesen werden, das Spektrum zeigte eine starke Fluoreszenz und einen breiten Peak bei 2900 cm⁻¹, der dem Kleber zugeordnet werden konnte. Sie scheinen durch die Präparation geöffnet worden zu sein. In Einschlüssen des Typs 1, die direkt neben Typ 2-Einschlüssen liegen, konnten Spuren von CO₂ nachgewiesen werden. Zum Teil konnten keine Salzhydrate identifiziert werden, was den Schluss nahelegt, dass die Temperatur der Klarschmelze nicht auf das Schmelzen von Eis sondern eines Gashydrates zurückzuführen ist. Eine Homogenisierungstemperatur des Gas-Subsystems konnte aufgrund der geringen Größe der Blase nicht gemessen werden.

4.4 Mikrothermometrische Analyse der Fluideinschlüsse

4.4.1 Einschlüsse des Typs 1

Einschlüsse des Typs 1 konnten als H₂O-Salz-Einschlüsse identifiziert werden. Die erste Schmelze trat dort, wo sie beobachtet werden konnte, zwischen -20 und -22,8°C auf. Es handelt sich folglich um NaCl-dominierte wässrige Fluide, evtl. mit KCl (vgl. Tabelle 4-1). Die Temperaturen der Klarschmelze lagen zwischen -14 und -2,5°C (vgl. Tabelle 4-6).

In drei Einschlüssen der Probe PuA 21a war schon unter -30°C deutlich das Vorhandensein von flüssiger Phase zu beobachten, diese Einschlüsse können als Salzkomponente CaCl₂ oder Mischungen mit NaCl

enthalten. Sie wurden über das binäre $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$ -System ausgewertet. Die Temperaturen der Klarschmelze lagen bei $-10,4$ und $-3,9^\circ\text{C}$.

Die Homogenisierung erfolgte bei allen Einschlüssen in die flüssige Phase, wobei die Homogenisierungstemperaturen zwischen 105 und 251°C lagen, unabhängig vom Salztyp. Die Tatsache, dass Einschlüsse, die neben Einschlüssen des Typs 2 liegen, bei der Bestimmung der totalen Homogenisierung dekrepitierten, weist auf die Anwesenheit einer Gaskomponente hin (s. Kapitel 4.5.1).

4.4.2 Einschlüsse des Typs 2

Wie schon beschrieben, lagen diese Einschlüsse bei Raumtemperatur teilweise dreiphasig vor, sie wurden schon mikroskopisch dem System $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\text{-Gas}\pm\text{Salz}$ zugeordnet. Im Kühlzyklus zeigte sich ein Schmelzen einer festen Phase im Gas-Subsystem zwischen $-58,5$ und -57°C . Diese Temperatur liegt knapp unterhalb des Tripelpunktes von reinem CO_2 (vgl. Tabelle 4-2). Die Erniedrigung ist auf das Vorhandensein einer oder mehrerer zusätzlicher Gaskomponenten zurückzuführen. Der Schmelzpunkt von Eis konnte nicht beobachtet werden. Dort, wo der Schmelzpunkt des Gashydrates (Clathrat) gemessen werden konnte, lag die Temperatur bei allen Proben zwischen $7,2$ und $9,6^\circ\text{C}$. Die Homogenisierung des Gassubsystems erfolgte bei der überwiegenden Zahl der Einschlüsse in die flüssige Phase, selten in die Gasphase oder mit kritischem Verhalten. Die Homogenisierungstemperaturen lagen zwischen $3,5$ und 28°C (vgl. Tabelle 4-6).

Die totale Homogenisierung wurde wegen der Gefahr der Dekrepitation nicht bei allen Proben und Einschlüssen gemessen. Dort, wo sie gemessen wurde, erfolgte sie sowohl in die flüssige als auch in die Gasphase sowie unter kritischem Verhalten. Die Temperaturen der totalen Homogenisierung lagen zwischen 170 und 322°C . Bei Probe PuA 41 wurden die Messungen bei 285°C abgebrochen, da viele Einschlüsse dekrepitierten. Zu diesem Zeitpunkt waren die Einschlüsse noch nicht alle homogen ($T_H > 285^\circ\text{C}$).

4.4.3 Einschlüsse des Typs 3

Einschlüsse des Typs 3a liegen bei Raumtemperatur einphasig vor, beim Abkühlen nukleiert eine Blase. Es handelt sich um Gaseinschlüsse. Die Schmelztemperatur des festen CO_2 lag zwischen $-58,5$ und $-57,1^\circ\text{C}$, neben CO_2 als Hauptkomponente sind somit noch weitere Gaskomponenten vorhanden. Die Homogenisierungstemperatur dieser Einschlüsse lag zwischen $-14,3$ und $+27,2^\circ\text{C}$ und erfolgte bei allen Einschlüssen in die flüssige Phase (vgl. Tabelle 4-6).

In Typ 3b-Einschlüssen konnten weder beim Abkühlen bis -196°C noch beim Wiederaufheizen Phasenveränderungen beobachtet werden.

Tabelle 4-6: Überblick über die mikrothermometrischen Daten für die verschiedenen im Text beschriebenen Fluideinschluss-Typen (Rohdaten s. Tabellen 7-12 und 7-13 im Anhang).
 Homogenisierung, falls nicht anders angegeben, in die flüssige Phase. L, C, V: Homogenisierung in die flüssige Phase (liquid), unter kritischem Verhalten (critical), in die Gasphase (vapour). sonstige Abkürzungen s. Tabelle 4-3.

Typ 1 – zweiphasige Fluideinschlüsse (H₂O-Salz)

| | T _E (°C) | T _{m, Eis} (°C) | T _H (°C) | φ _L ·100 (%) |
|---------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| PuA 21a | -22,8 <-30 | -8,7 -10,4/-3,9 | 183 120/174 | 86 87/88 |
| PuA 29 | -22.9 | -4,7/-9,3 | 105/210 | 85/90 |
| PuA 41 | -20/-21,7 | -14/-2,7 | <140/251 | 81/90 |
| PuA 51 | -22 | -6,6/-2,5 | 151/241 | 83/95 |

Typ 2 - zweiphasige Fluideinschlüsse (H₂O-Gas-Salz)

| | T _T (°C) | T _{m, Clathrat} (°C) | T _{H, Gas} (°C) | T _{H, tot} (°C) | φ _L ·100 (%) |
|---------|---------------------|-------------------------------|--|--|-------------------------|
| PuA 17 | -57,3 | 8,6 | 26,8/28 (L, C, V) | n.b. | 3/65 |
| PuA 21a | -58,4/-57,7 | 7,9/9,1 | 18,1/26,4 (L, C, V) | 170-322 (L, C, V) | 35 |
| PuA 29 | n.b. | 9,6 | 13,1/26,3 | n.b. | 15/60 |
| PuA 41 | -58,5/-57,1 | 7,6/9 | 16,7 23,1/27,7 (ein FI in V, sonst L) | >285 meist >285 (L, V), bei einigen Dekrepitation | 10/81 |
| PuA 51 | -58,3/-57 | 7,2/9,5 | 3,5/28 | 260/285 (V) | 10/55 |
| PH 18/1 | -58 | n.b. | 21.2/23,1 | n.b. | 41/51 |

Typ 3a - einphasige Fluideinschlüsse (CO₂+Gas)

| | T _T (°C) | T _{H, Gas} (°C) |
|--------|---------------------|--------------------------|
| PuA 29 | n.b. | 27,2 |
| PuA 41 | -57,4/-57,1 | 19,5/26,7 |
| PuA 51 | -58,3 | -14,3/4,6 |

4.5 Zusammenfassung, Interpretation und Diskussion der Ergebnisse aus Mikrothermometrie und Raman-Spektroskopie

Die durch die mikrothermometrischen und die Raman-Messungen gewonnenen Daten ($T_{m, \text{Eis}}$, $T_{m, \text{Clathrat}}$, $T_{H, \text{Gas}}$, $T_{H, \text{tot}}$, ρ_V , Zusammensetzung der Gasphase) wurden nach der Korrektur mittels verschiedener von Dr. Ronald Bakker zur Verfügung gestellter Programme ausgewertet. Eine ausführliche Beschreibung der Programme findet sich bei BAKKER (1997, 1999). Als Ausgabeparameter liegen dann je nach System die Konzentration, die Dichte, die Zusammensetzung der wässrigen, der Gasphase sowie des totalen Einschlusses vor. Mit diesen Daten können dann Isopyknen berechnet werden. Tabelle 4-7 zeigt eine Auflistung der verschiedenen verwendeten Programme und Zustandsgleichungen. Entsprechend der in Kapitel 4.2.2 angegebenen Messfehler kann man die daraus resultierenden Abweichungen für Konzentration und Dichte berechnen (s. Tabelle 4-8). Die Ergebnisse der Berechnungen von Konzentration und Dichte sind für alle Einschlusstypen in Tabelle 4-9 aufgeführt. Es wurden nur solche Einschlüsse der Typen 2 und 3 ausgewertet, für die Raman-Analysen durchgeführt wurden.

Tabelle 4-7: Übersicht über die zur Auswertung der Fluideinschlussdaten verwendeten Programme und Zustandsgleichungen

| Einschlusstyp | Programme | Zustandsgleichungen |
|--|-----------|---|
| Typ 1: | homogen | ARCHER (1990, 1992), HOLMES (1997), ZHANG & FRANTZ (1987) |
| H ₂ O-NaCl, H ₂ O-CaCl ₂ | isochor | ZHANG & FRANTZ (1987) |
| Typ 2: | q2 | DUAN ET AL. (1992a, b) |
| H ₂ O+CO ₂ +CH ₄ (±H ₂ S)-NaCl | isochor | BAKKER (1999), BOWERS & HELGESON (1983) |
| Typ 3a: | homogen | BAKKER (1999), BOWERS & HELGESON (1983) |
| CO ₂ +CH ₄ ±H ₂ S±N ₂ | isochor | DUAN ET AL. (1992c, 1996) |

Tabelle 4-8: Fehler in den für die Auswertung relevanten Messpunkten und daraus resultierende Abweichungen in Konzentration und Dichte für die verschiedenen Einschlusstypen

| Einschlusstyp | Messfehler | Abweichungen | |
|---|--|-----------------------------|-----------------------------------|
| | | Salinität (Gew.-% NaCl äq.) | Dichte (g/cm ³) |
| <u>H₂O-Salz</u> , 5 Gew.-% NaCl äq. | $T_m \pm 0,1^\circ\text{C}$ $T_H \pm 2,5^\circ\text{C}$ | $\pm 0,16$ | $\pm 0,004$ |
| <u>H₂O-Salz</u> , 10 Gew.-% NaCl äq. | | $\pm 0,11$ | $\pm 0,002$ |
| <u>CO₂+CH₄±H₂S±N₂</u> | $T_{H, \text{Gas}} \pm 0,1^\circ\text{C}$ | | $\rho_{\text{Gas}}: \pm 0,001$ |
| <u>H₂O+CO₂+CH₄(±H₂S)-NaCl</u> | $\phi \pm 5\%$ | | $\rho_{\text{gesamt}}: \pm 0,020$ |

Tabelle 4-9: Auswertung der mikrothermometrischen und Raman-Messungen. Angegeben sind die niedrigsten/höchsten berechneten Werte (Ausgangsmessdaten s. Tabellen 7-12 und 7-13 im Anhang).

Typ 1 – zweiphasige Fluideinschlüsse (H₂O-Salz)

| | dominierende Spezies | Salinität (Gew.-% äq.) | Dichte (g/cm ³) |
|---------|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| PuA 21a | NaCl | 12,5 | 0,93 |
| | CaCl ₂ | 7,4/14,5 | 0,95/1,03 |
| PuA 29 | NaCl | 7,0/13,2 | 0,89/0,97 |
| PuA 41 | NaCl | 4,5/17,8 | 0,84/0,97 |
| PuA 51 | NaCl | 4,2/10,0 | 0,84/0,97 |

Typ 2 - zweiphasige Fluideinschlüsse (H₂O-CO₂-CH₄±H₂S-NaCl)

| | Salinität (Gew.-% NaCl äq.) | Dichte der Gasphase (g/cm ³) | Gesamtdichte (g/cm ³) |
|---------|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| PuA 17 | 4,2/7,1 | 0,27/0,61 | 0,29/0,82 |
| PuA 21a | 5,2/7,9 | 0,61/0,62 | 0,74/0,71 |
| PuA 29 | 4,5/6,7 | 0,19/0,2 | 0,32/0,67 |
| PuA 41 | 3,6/8,9 | 0,56/0,64 | 0,65/0,85 |
| PuA 51 | 4,8/8,1 | 0,23/0,71 | 0,45/0,85 |
| PH 18/1 | 5,2/5,8 | 0,55/0,56 | 0,72/0,76 |

Typ 3a - einphasige Fluideinschlüsse (CO₂-CH₄±H₂S±N₂)

| | Dichte der Gasphase (g/cm ³) |
|--------|--|
| PuA 29 | n.b. |
| PuA 41 | 0,68/0,74 |
| PuA 51 | 0,69/0,91 |

Die Berechnung der Systemparameter der Typ 2-Einschlüsse erfordert die Eingabe von $T_{m, Clathrat}$. Wie Abbildung 4.8 (dazugehörige Werte s. Tabelle 4-10) zeigt, ist bei niedrigen Salzgehalten bis zu 10 Gew.-% NaCl äq. die Lage der Isopyknen bei Wasser-Gas-Systemen unabhängig vom Salzgehalt, die Gesamtdichte variiert lediglich innerhalb der in Tabelle 4-8 angegebenen Fehlergrenzen. Daher wurde bei Einschlüssen, für die $T_{m, Clathrat}$ nicht gemessen wurde, die Messwerte von Einschlüssen derselben Generation übertragen bzw. pauschal $T_{m, Clathrat} = 10^{\circ}\text{C}$ angenommen. Bei Vernachlässigung aufgelöster Salze liegt $T_{m, Clathrat}$ für das H₂O-CO₂-System bei +10°C, wenn bei dieser Temperatur flüssiges und gasförmiges CO₂ vorhanden sind. Für das System H₂O-CO₂-CH₄ liegt diese Temperatur bei +14°C (BAKKER 1998).

Für Typ 2-Einschlüsse mit H₂S (bis zu 0,3%) liegen keine Daten zur Berechnung der Clathratstabilität vor, so dass in diesen Einschlüssen H₂S vernachlässigt werden musste.

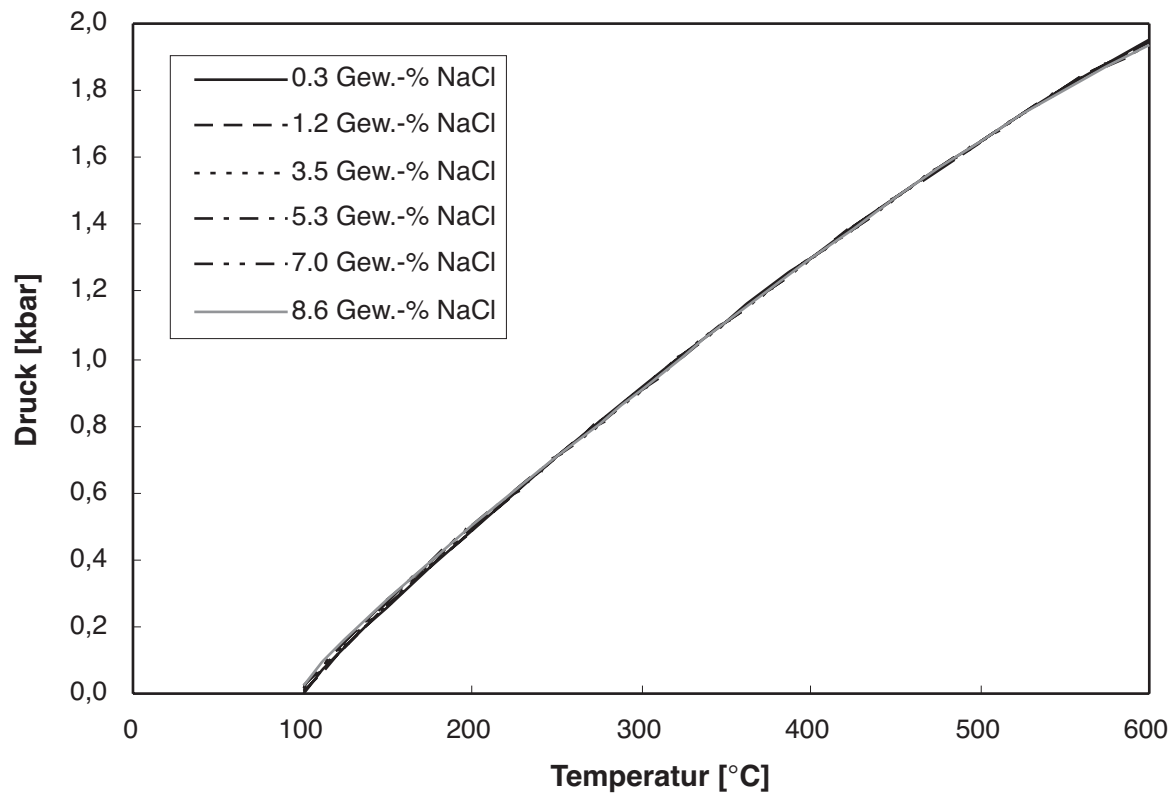


Abbildung 4.8: konstruierte Isopyknen für einen Einschluss mit $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ für verschiedene hypothetische Clathrat-Schmelztemperaturen (Daten s. Tabelle 4-10)

Tabelle 4-10: Vergleich der Berechnungen für einen Typ 2-Einschluss für verschiedene hypothetische Clathrat-Schmelztemperaturen, zugehörige Isopyknen s. Abbildung 4.8 (Zusammensetzung der Gasphase: 94,9% CO_2 und 5,1% CH_4 , $T_{\text{H, Gas}}=25,4^\circ\text{C}$, $\phi_{\text{L}} = 0,115$, $\rho_{\text{Gas}} = 0,61 \text{ g/cm}^3$)

| $T_{\text{m, Clathrat}} (^\circ\text{C})$ | $x_{\text{H}_2\text{O}}$ | x_{CO_2} | x_{CH_4} | Gew.-% NaCl | $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$ |
|---|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|
| 12 | 0.318 | 0.647 | 0.034 | 0.3 | 0.652 |
| 11 | 0.316 | 0.647 | 0.034 | 1.2 | 0.652 |
| 10 | 0.313 | 0.646 | 0.034 | 3.5 | 0.650 |
| 9 | 0.309 | 0.646 | 0.034 | 5.3 | 0.649 |
| 8 | 0.306 | 0.645 | 0.034 | 7.0 | 0.647 |
| 7 | 0.303 | 0.645 | 0.034 | 8.6 | 0.646 |

4.5.1 Einschlüsse des Typs 1

Wie Tabelle 4-9 zeigt, variieren die Salinitäten in H_2O -NaCl-Einschlüssen zwischen 4,2 und 17,8 Gew.-% NaCl äq. mit Dichten zwischen 0,84 und 0,97 g/cm^3 , für H_2O - CaCl_2 -Einschlüsse liegen sie zwischen 7,4 und 14,5 Gew.-% CaCl_2 äq. bei Dichten zwischen 0,95 und 1,03 g/cm^3 . In Abbildung 4.9 ist die Dichte in den Einschlüssen gegen die Konzentration aufgetragen. Dies erfolgte nur für Einschlüsse mit H_2O -NaCl, da nur vier Einschlüsse mit H_2O - CaCl_2 gefunden wurden. Eine Auftragung wie in Abbildung 4.9 ermöglicht neben der Darstellung der Daten einzelner Fluideinschlüsse die Interpretation evtl. vorhandener Korrelationen zwischen Konzentration und Dichte.

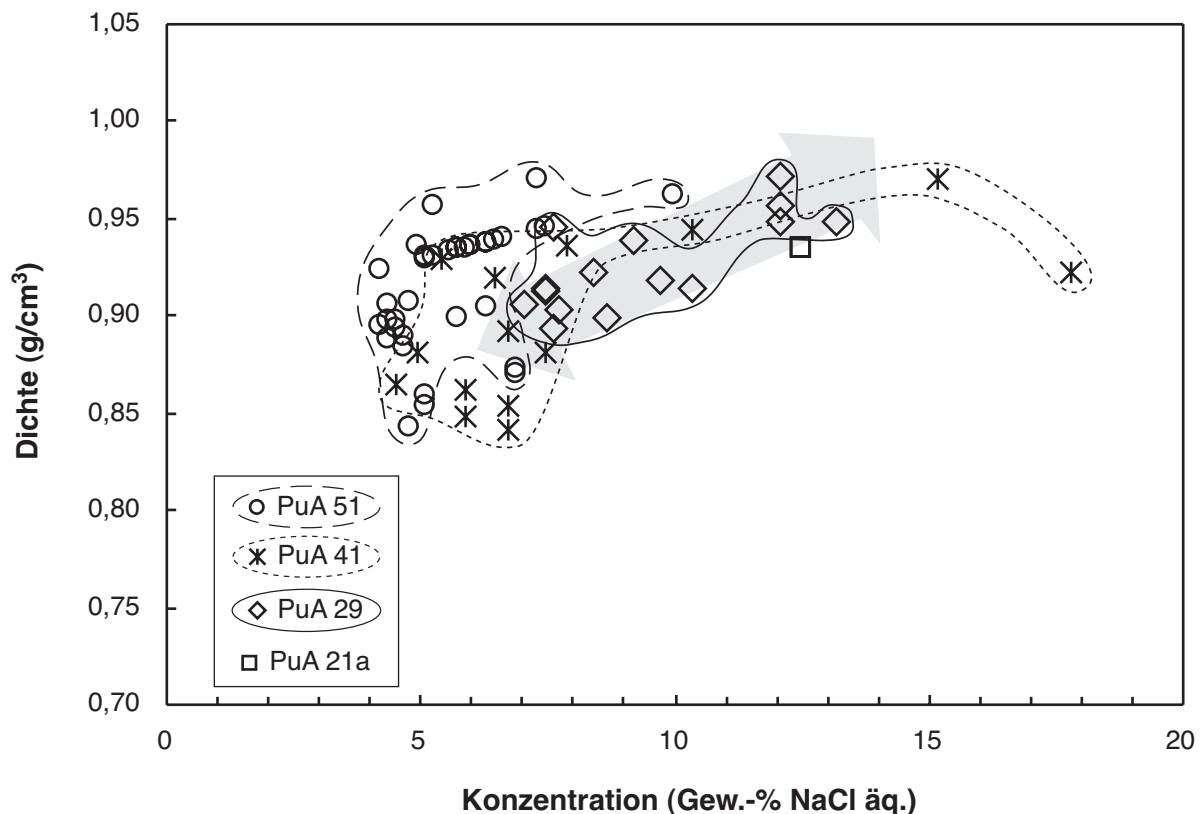


Abbildung 4.9: Auftragung der Dichte von Typ 1-Einschlüssen mit H_2O -NaCl gegen die Konzentration

In Probe PuA 41 wurden für Typ 1-Einschlüsse, die direkt neben Einschlüssen des Typs 2 liegen, Salinitäten bis zu 17,8 Gew.-% NaCl äq. bestimmt. Es ist vorstellbar, dass in diesen Einschlüssen Gase übersehen wurden, teilweise konnten sie in geringen Konzentrationen in der Blase des Einschlusses gemessen werden. Wenn Gase übersehen werden, kann die berechnete Salinität sehr viel zu hoch sein, wenn am Schmelzpunkt des Eises noch nicht erkanntes Clathrat vorhanden ist, in dem Wasser gebunden ist. Weiterhin verursacht in Wasser gelöstes Gas eine zusätzliche Gefrierpunktserniedrigung von 2-3°C (DIAMOND 1994).

Weiterhin konnte in einem dieser Einschlüsse mit der Raman-Spektroskopie keine Salzkomponente bestimmt werden, obwohl sie anhand der beobachteten Phasenübergänge ($T_{m, \text{Eis}}$ sowie die totale Homogenisierung) als H_2O -Salz-Einschlüsse eingestuft wurden. In H_2O -NaCl-Einschlüssen niedriger Salinität treten dieselben Phasenübergänge auf wie bei H_2O - CO_2 -Einschlüssen mit sehr geringer CO_2 -

Konzentration ($x_{\text{CO}_2} < 0,015$) und $T_{\text{m, Eis}} \approx -1,5^\circ\text{C}$ (DIAMOND 1994). Da im Raman geringe Mengen an CO_2 nachgewiesen wurden, erfolgte die Auswertung als $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -Einschlüsse.

Es gibt keine deutliche Korrelation zwischen Konzentration und Dichte außer bei Probe PuA 29. Für Einschlüsse der Probe PuA 29 ergibt sich in Abbildung 4.9 ein deutlicher Trend von niedriger Konzentration und Dichte hin zu höherer Konzentration und Dichte (oder umgekehrt, s. Pfeil in Abbildung 4.9).

Für beide Abfolgen gibt es plausible Erklärungen:

- a) Eine Erhöhung von Konzentration und Dichte kann durch das Vermischen mit einer konzentrierteren Lösung oder durch Eindampfen der Lösung nach erneutem Öffnen der Einschlüsse und starker Aufheizung erfolgen, wie es etwa bei einer prograden Metamorphose denkbar wäre.
- b) Eine Verdünnung ist möglich bei Vermischung mit einer Lösung mit Meerwasserkonzentration oder noch geringerer Konzentration (meteorische Lösung).

Es konnten mehrere unterschiedliche Einschlussgenerationen mit H_2O -Salz identifiziert werden (s. Kapitel 4.1), sie treten entweder in Clustern oder auf Bahnen orientiert auf. Trägt man die Messergebnisse nach Einschlüssen in Clustern und auf Bahnen getrennt auf, sieht man, dass die Homogenisierungstemperatur solcher in Bahnen am oberen Ende und die Konzentration am unteren Ende des Temperaturspektrums der Einschlüsse in Clustern liegen. Dies spricht dafür, dass das System mit niedriger Konzentration und Dichte das jüngere System darstellt.

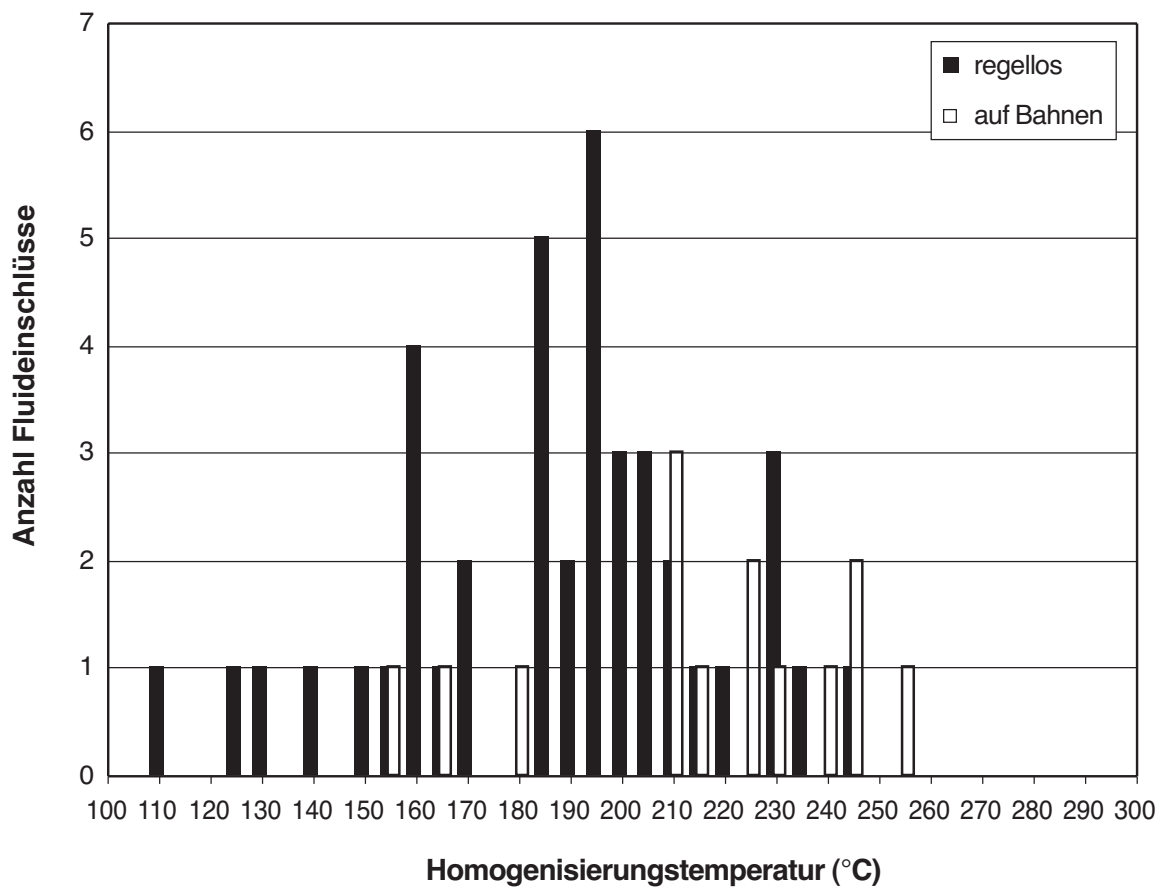
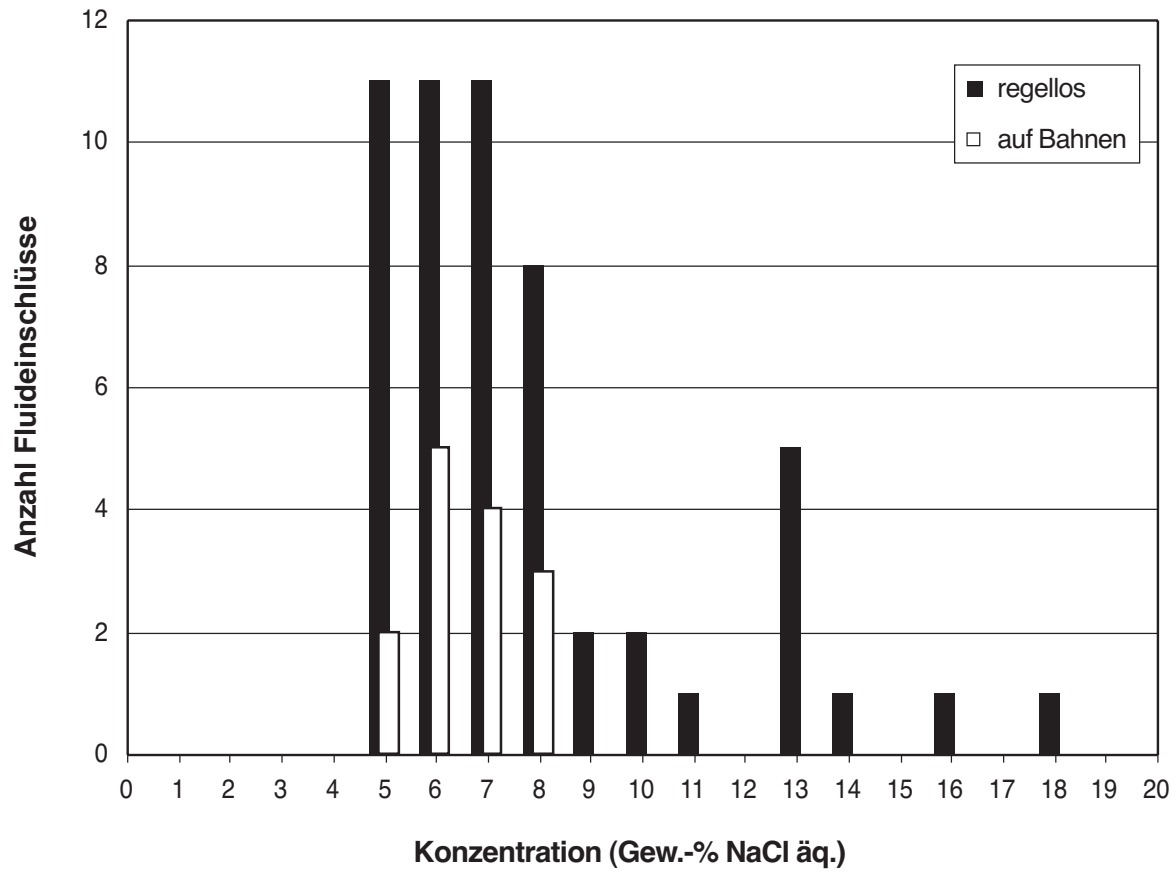


Abbildung 4.10: Auftragung der Konzentration (a) bzw. der Homogenisierungstemperatur (b) getrennt nach Typ 1-Einschlüssen in Clustern und auf Bahnen

Konstruiert man für die Probe PuA 29 die Isopyknen für die Einschlüsse mit der höchsten Dichte und diejenige für die niedrigste Dichte, so ergibt sich das in Abbildung 4.11 dargestellte Bild. Die Isopyknen aller anderen Einschlüsse der Probe PuA 29 sowie auch die meisten Einschlüsse der übrigen Proben liegen innerhalb des durch diese beiden Isopyknen begrenzten Feldes (gepunktet). Isopyknen von Einschlüssen aus der Probe PuA 41 liegen z.T. unterhalb des eben beschriebenen Bereiches. Es handelt sich dabei um Einschlüsse aus parallel verlaufenden Bahnen, die eine Größe von $<8 \mu\text{m}$ und regelmäßige Form besitzen. Ihre Konzentrationen liegen mit 4,5-7,5 Gew.-% NaCl äq. im Bereich der restlichen Einschlüsse, sie besitzen aber eine geringere Dichte. Dies stützt die Annahme, dass die Konzentration des wässrigen Fluids mit der Zeit abnahm.

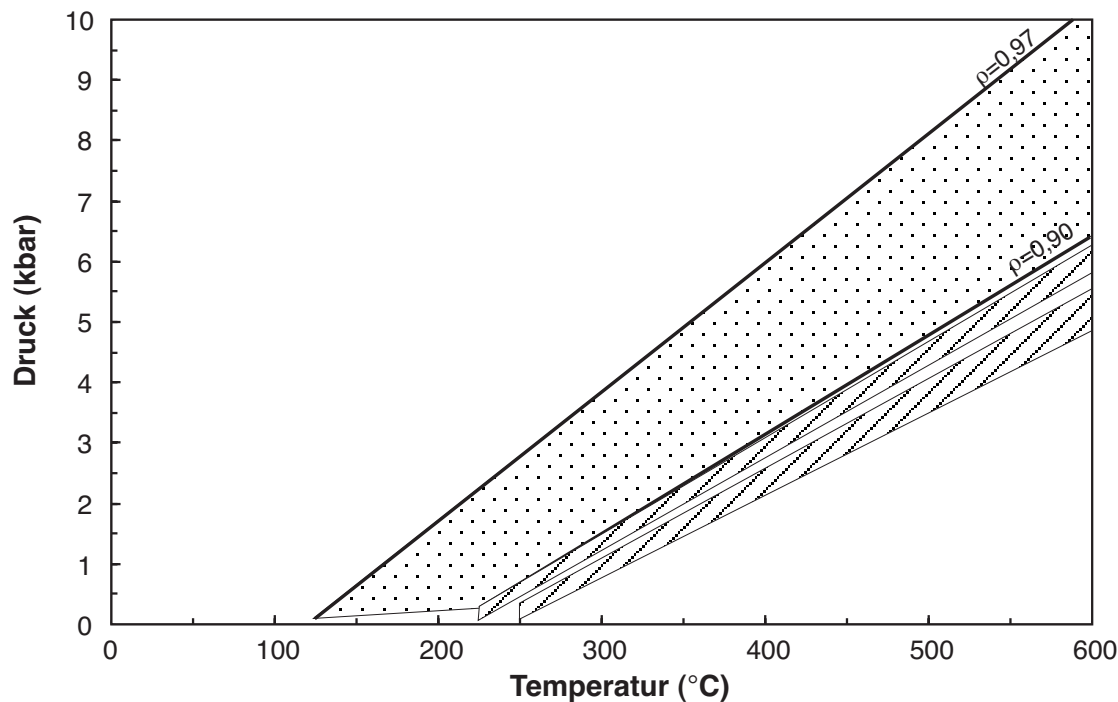


Abbildung 4.11: Isopyknen für H_2O -NaCl-Einschlüsse der Probe PuA 29 für maximale ($\rho = 0,97 \text{ g/cm}^3$) und minimale ($\rho = 0,90 \text{ g/cm}^3$) Dichte, eingezeichnet sind zusätzlich Isopyknen der Probe PuA 41. Erläuterungen s. Text.

4.5.2 Einschlüsse der Typen 2 und 3

Die Zusammensetzung der Typ 2-Einschlüsse ist in Abbildung 4.12 für das salzfreie System unter Vernachlässigung von H_2S und NaCl dargestellt. Mit Wasser-Anteilen zwischen 0,188 und 0,936 ist die Zusammensetzung sehr unterschiedlich, jedoch hat der überwiegende Teil der Einschlüsse (75%) einen Wasseranteil von über 0,55. Wie aus Tabelle 4-9 ersichtlich, liegen die für H_2O - CO_2 - $\text{CH}_4 \pm \text{H}_2\text{S}$ -NaCl-Einschlüsse ermittelten Salinitäten zwischen 3,6 und 8,9 Gew.-% NaCl äq.. Die Gesamtdichten variiert zwischen $0,29$ und $0,85 \text{ g/cm}^3$, wobei die überwiegende Zahl der gemessenen Einschlüsse Dichten zwischen $0,65$ und $0,85 \text{ g/cm}^3$ aufweist. Tabelle 4-9 zeigt ebenfalls, dass für Einschlüsse des Typs 3a mit CO_2 - $\text{CH}_4 \pm \text{H}_2\text{S} \pm \text{N}_2$ die Dichten mit Werten zwischen $0,68$ und $0,91 \text{ g/cm}^3$ z.T. deutlich höher sind als die Dichten der Gasphase der überwiegenden Zahl an Typ 2-Einschlüssen. Dies wird auch in Abbildung 4.13 deutlich. Dort ist auch erkennbar, dass Einschlüsse der Proben PuA 29 und PuA 17 sowie eines Einschlusses der Probe PuA 51 eine sehr geringe Dichte der Gasphase aufweisen bei zum Teil ähnlich

geringer Gesamtdichte. Gründe dafür könnte ein Auslaufen der Einschlüsse durch Deformation oder Rekristallisation und damit verbundenem H_2O -Verlust sein. Die zu Typ 2- und Typ 3a-Einschlüssen gehörenden Isopyknen sind in Abbildung 4.14 dargestellt.

Wie oben beschrieben und in Abbildung 4.2 d dargestellt, liegen Einschlüsse der Typen 1 und 2 direkt nebeneinander und weisen sehr unterschiedliche Füllgrade auf. Die große Varianz der Füllgrade wird in der Literatur häufig dahingehend interpretiert, dass die Bildung dieser Einschlüsse aus einem entmischten Fluid erfolgte. Dann sollten die Homogenisierungstemperaturen der Einschlüsse mit den höchsten bzw. niedrigsten Füllgraden gleich sein, die Homogenisierungstemperaturen der Einschlüsse mit intermediären Füllgraden sollten höher liegen. Ausserdem müssten in beiden Einschlusstypen die gleichen Komponenten vorhanden sein. Da jedoch die gasreichen Einschlüsse vor der Homogenisierung dekrepitierten, konnte diese Interpretation nicht bestätigt werden. Die Daten, die gemessen werden konnten, weisen dagegen darauf hin, dass die unterschiedlichen Füllgrade und Dichten nicht in der Bildung aus einem heterogenen Fluid begründet sind, sondern ein Reequilibrierungsphänomen darstellen.

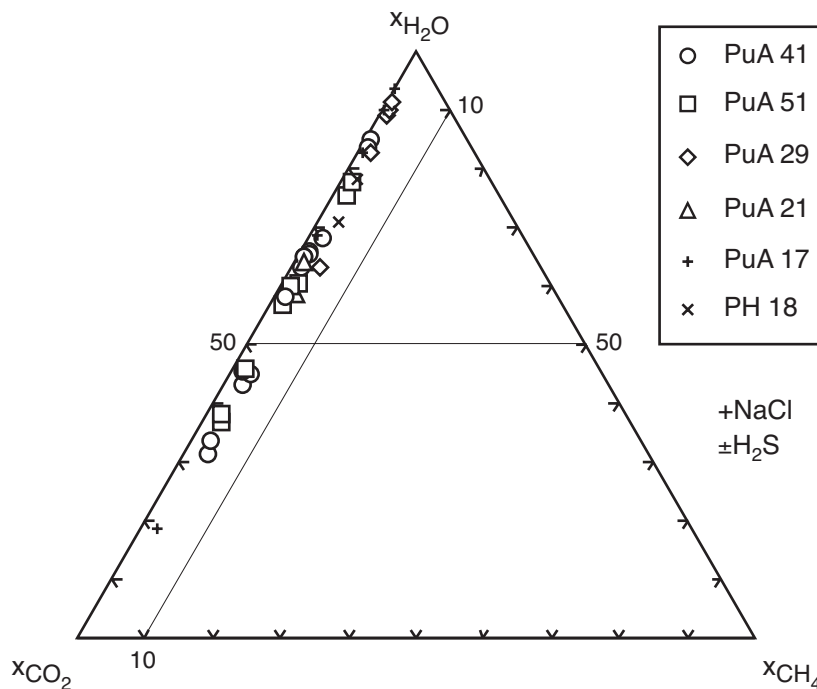


Abbildung 4.12: Zusammensetzung der Typ 2-Einschlüsse, salzfrei, H_2S wurde vernachlässigt

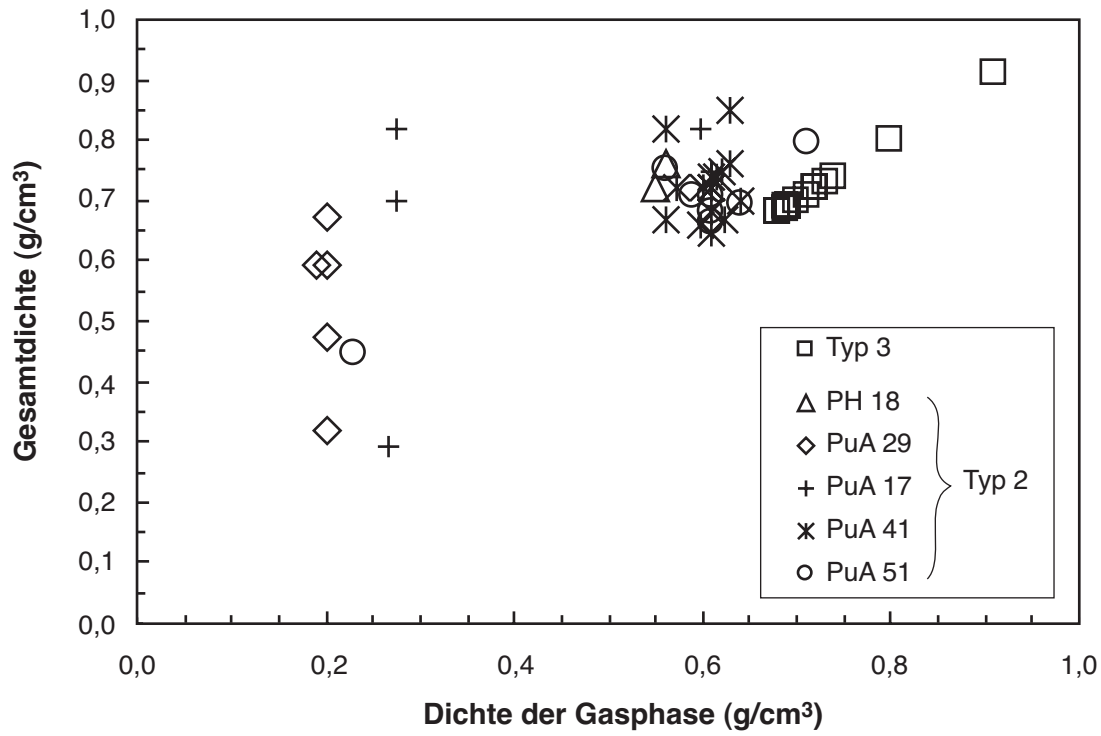


Abbildung 4.13: Vergleich der Dichte der Gasphase mit der Gesamtdichte für Typ 2-Einschlüsse. Für Typ 3a-Einschlüsse ist die Dichte der Gasphase gleich der Gesamtdichte, daher liegen diese Punkte auf der Winkelhalbierenden.

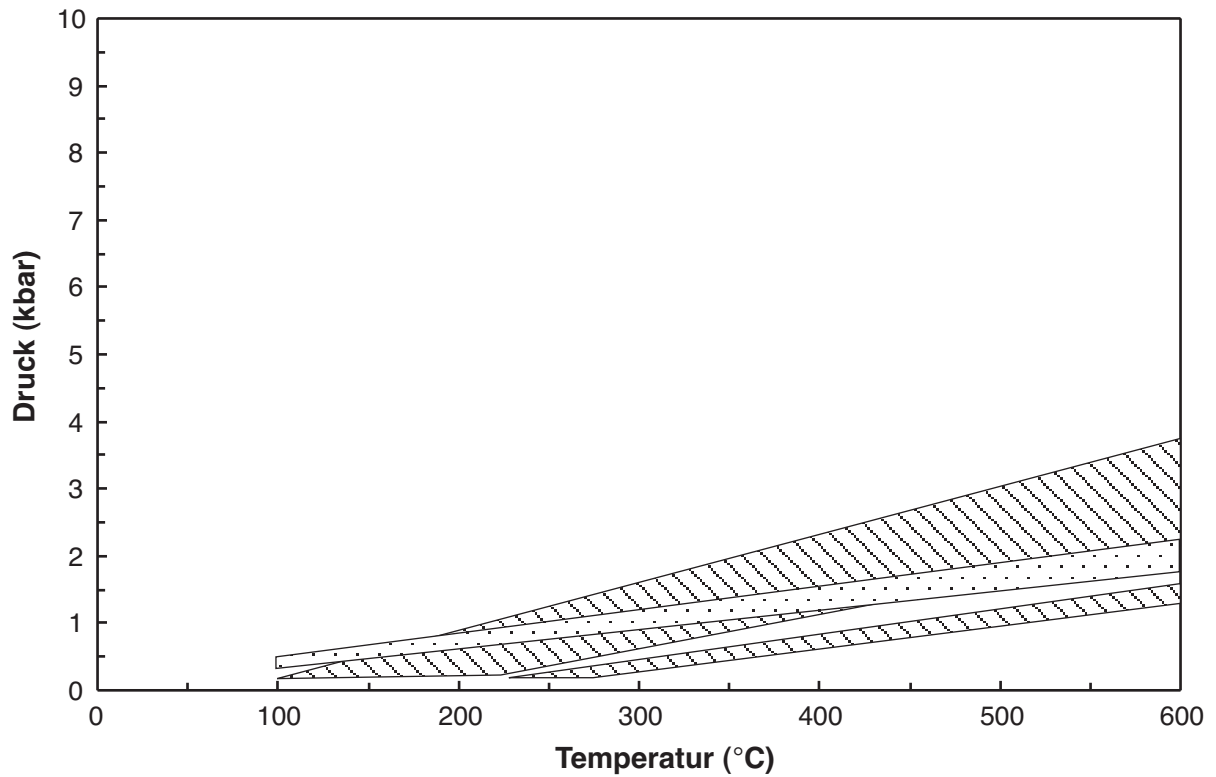


Abbildung 4.14: Isopyknen für Einschlüsse des Typs 2 (schraffierte Felder) und des Typs 3a (gepunktetes Feld)

4.5.3 Vergleich mit Einschlüssen aus dem Barquito-Pluton

In die paläozoischen Sedimente intrudierten granodioritische Plutone wie der Barquito-Pluton (s. Abbildung 2.5). Dieser wurde ebenfalls beprobt, um das Fluidinventar des Plutons mit den aus bis zu 20 km entfernt stammenden Proben der Chañaral-Mélange zu vergleichen.

In den Quarzen des Plutons wurden nur Typ 1-Einschlüsse gefunden, Gasspezies konnten weder mikrothermometrisch noch durch Raman-Spektroskopie nachgewiesen werden. Die Typ 1-Einschlüsse sind sowohl auf Bahnen orientiert als auch regellos verteilt. Sie zeigen eutektische Schmelzen bei ca. -50°C (d.h. CaCl_2 -dominiertes System) sowie bei ca. -20°C (NaCl -dominiertes System). Die Ergebnisse der Berechnungen aus den Messdaten sind in Tabelle 4-11 aufgeführt und in Abbildung 4.15 dargestellt.

Einschlüsse mit 100 % Füllgrad zeigten metastabile Phänomene, die reproduzierbar waren: Bei ca. -35 bis -45°C kommt es unabhängig von der Abkühlrate zu einem partiellen Einfrieren, flüssiges H_2O konnte via Raman-Spektroskopie noch bei Temperaturen von -160°C nachgewiesen werden. In der festen Phase konnte kein Salzhydrat nachgewiesen werden, evtl. vorhandene Salze sind daher vermutlich in der Restflüssigkeit konzentriert. Weiterhin konnte kein CO_2 in der flüssigen Phase nachgewiesen werden. Bei Einschlüssen, die zu 100 % gefüllt sind, erwartet man beim Einfrieren ein Stretching der Einschlüsse, so dass nach dem ersten Einfrieren eine Blase nukleieren sollte. Dies konnte in diesen Einschlüssen nur teilweise beobachtet werden, sie zeigten aber weiterhin auch bei vorhandener Blase das oben beschriebene Verhalten. Eine Erklärung für dieses Verhalten konnte in der Literatur nicht gefunden werden. ROEDDER (1984) schreibt, dass beim Abkühlen die Viskosität der Lösung soweit erhöht wird, dass eine Nukleierung sowie das Wachstum der Kristalle stark verlangsamt wird. Er beschreibt weiterhin Einschlüsse mit gesättigten Salzlösungen, worin sich beim Abkühlen ein Glas ausbildet. Es könnte sich auch um Einschlüsse mit reinem Wasser mit hohen Dichten handeln. In solchen Einschlüssen sollte sich nicht das "normale" Eis I sondern Eis V oder Eis Ih ausbilden, beide nur bei hohen Drücken stabil (pers. Mitt. ROBERT DARLING sowie I-MING CHOU). Dies konnte aber im Raman-Spektrum nicht nachgewiesen werden. Somit konnte keine zufriedenstellende Erklärung für dieses Phänomen gefunden werden. Da darüberhinaus die Interpretation der in diesen Einschlüssen gemessenen "Schmelzpunkte" ($T_m = -7^{\circ}\text{C}$) bezüglich der Salinität fraglich ist, werden diese Einschlüsse im Folgenden nicht weiter betrachtet.

H_2O - CaCl_2 -Einschlüsse sind in den Mélange-Gesteinen nur sehr vereinzelt vorhanden, daher ist ein Vergleich mit denjenigen aus dem Barquito-Pluton nur schwer möglich. In Abbildung 4.15 zeigt sich, dass sowohl die Konzentrationen als auch die Dichten für H_2O - NaCl -Einschlüsse ähnlich sind wie für Proben aus den Mélange-Gesteinen. Man kann einen wenn auch undeutlichen Trend wie für Probe PuA 29 von niedrigen zu höheren Konzentrationen und Dichten erkennen. Vertikale Trends, wie sie sowohl für H_2O - NaCl -Einschlüsse als auch für H_2O - CaCl_2 -Einschlüsse erkennbar sind, könnten auf eine Dichtereduktion (und somit eine Erhöhung der Homogenisierungstemperatur) durch Dehnung oder Dekrepitation der Einschlüsse während der Hochtemperaturmessungen zurückzuführen sein.

Tabelle 4-11: Auswertung der mikrothermometrischen und Raman-Messungen für Einschlüsse aus Quarzen des Barquito-Plutons. Angegeben sind die niedrigsten/höchsten ermittelten Werte (Ausgangsmessdaten s. Tabelle 7-15 im Anhang).

zweiphasige Fluideinschlüsse (H₂O-Salz)

| dominierende Spezies | Salinität (Gew.-% äq.) | Dichte (g/cm ³) |
|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| NaCl | 5.4 / 16.4 | 0.81 / 0.94 |
| CaCl ₂ | 8.5 / 9.6 | 0.86 / 0.96 |

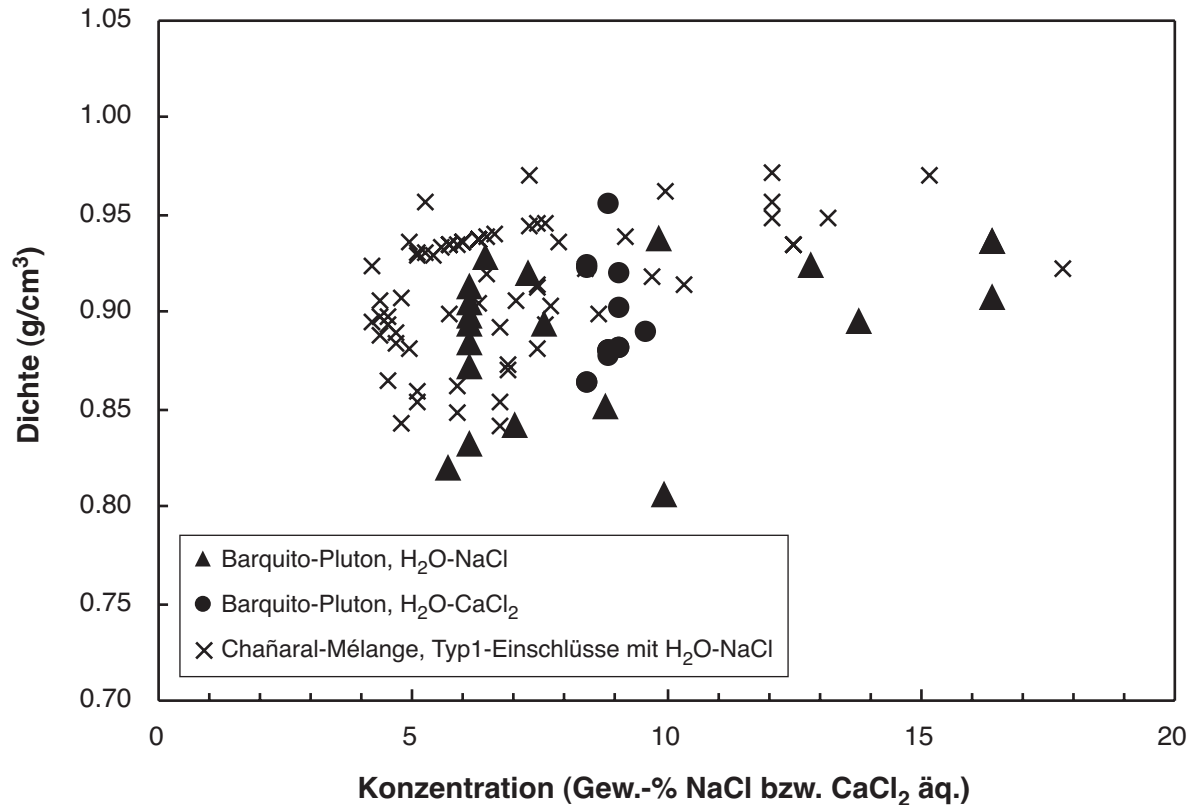


Abbildung 4.15: Auftragung der Dichte gegen die Konzentration von Einschlüssen des Barquito-Plutons mit H₂O-NaCl bzw. H₂O-CaCl₂ (vgl. mit Abbildung 4.9)

Der große Unterschied zwischen dem Fluidinventar des Plutons und den in den Mélange-Gesteinen beobachteten Systemen ist das Fehlen von gasförmigen Spezies in den Quarzen des Plutons. Dies ist jedoch kein Beweis dafür, dass die Systeme mit CO₂-CH₄±H₂O (Typen 2 und 3a) nicht doch mit der Intrusion zusammenhängen. Jedoch lassen sich mit den hier zur Verfügung stehenden Informationen keine Aussagen über einen Zusammenhang zwischen den Fluiden des Plutons und denen im Rahmengestein ableiten. Allgemein ist es jedoch so, dass Plutone hochsaline z.T. übersättigte Fluide mit vielen unterschiedlichen Kationenspezies mit sich bringen (ROEDDER 1984).

5 Diskussion

5.1 Ursprung der Fluide in Fluideinschlüssen der Chañaral-Mélange

Fluide spielen eine zentrale Rolle in der thermischen, geochemischen und Deformationsgeschichte von aktiven Kontinentalrändern (VON HUENE 1984). Wichtige Fluidquellen sind dabei:

1. Porenfluide aus den Sedimenten und der ozeanischen Kruste: Diese sind in allen Tiefen präsent und werden durch Porositätsreduktion freigesetzt und entlang von Störungs- oder Überschiebungsbahnen in höherliegende Niveaus transportiert.

Die Porosität pelagischer Sedimente liegt zwischen 10 und 50%, wogegen diejenige von niedriggradigen Metasedimenten nur noch <5 bis 10% ausmacht (PEACOCK 1990). Die Porosität von Sedimenten in Akkretionskeilen kann auf bis zu 5% sinken, wenn Tiefen von 3-4 km erreicht wurden (BRAY & KARIG 1985).

2. Diagenetische und metamorphe Umwandlungsreaktionen wie die Dehydratisierung wasserhaltiger Minerale oder die Dekarbonisierung kalkiger Phasen (Freisetzung von CO₂ aus z.B. Karbonaten):

Die Umwandlung von Opal-A, der Hauptkomponente pelagischer Sedimente, zu Quarz während der Diagenese setzt 5-10 Gew.-% H₂O frei. Tonminerale beginnen bei 50 bis über 150°C, sich umzuwandeln und H₂O freizusetzen. Die wichtigste Reaktion dabei ist die Umwandlung von Smektit (KASTNER ET AL. 1991): $\text{Smektit} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Illit} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

3. Der biogene oder thermogene Abbau von organischem Material:

Thermogenes CH₄ wird durch den Abbau von Kohlenwasserstoffen bei Temperaturen von 60-150°C gebildet. Bei niedrigeren Temperaturen entstehen aus Kohlenwasserstoffen, Tonmineralen und Karbonaten COH-Fluide (H₂O, CO₂ und CH₄).

4. Externe Quellen wie der Transport von meteorischem Wasser sowie das Mischen mit Meerwasser durch seismisches Pumpen oder durch eine durch Dichteinversion induzierte Konvektion.

5.1.1 Ursprung des wässrigen Fluids in Typ 1-Einschlüssen

Die in dieser Arbeit vorgestellten Salinitäten sind mit Werten von bis zu 13 Gew.-% NaCl äq. deutlich höher als die Salinität von Meerwasser (3,3 Gew.-% NaCl äq., SMITH & YARDLEY 1999) und die Salinität sehr niedrigmetamorpher Fluide (2 bis 6 Gew.-% NaCl äq., MULLIS 1987). Gründe für diese Erhöhung der Salinität könnten z.B. sein:

- Subaerisches Eindampfen von Meerwasser sowie Auflösung von Evaporiten und Vermischung mit den dadurch entstehenden hochsalinen Wässern.
- Wasserentnahme durch Bildung von Gashydraten.
- Wasserverlust aus dem Fluid durch Hydratisierungsreaktionen (z.B. Diagenese vulkanischer Aschen unter Bildung von z.B. Zeolithen und Smektit)

Porenfluide in Bohrungen vor der Küste Perus (9-13°S) mit Cl⁻-Konzentrationen über denjenigen von Meerwasser wurden durch Vermischung von Meerwasser mit einem von Norden einfließenden, durch

subaerische Aufkonzentration hochsalinen Fluid unbekanntem Ursprungs erklärt (MARTIN ET AL. 1995). Diese Prozesse werden allgemein in Gebieten erwartet, die durch eingeschlossene Becken, arides Klima sowie permeable Sedimente charakterisiert sind und gewöhnlicherweise nicht an konvergenten Plattenrändern (KASTNER ET AL. 1991).

Wenn Gashydrate gebildet werden, werden gelöste Stoffe aus der Struktur der Gashydrate ausgeschlossen, was zu einer Entnahme von Wasser aus dem Porenfluid mit damit einhergehender Erhöhung der Salinität im residualen Fluid führt. Gashydrate erscheinen in seismischen Profilen häufig als "bottom-simulating reflector (BSR)", welche mit der Basis des Gashydratstabilitätsfeldes korrespondieren (ca. 500-1000 km unter dem Meeresboden). Obwohl BSRs und Gashydrate in konvergenten Umgebungen bzw. deren Sedimenten verbreitet sind, konnte ein Zusammenhang mit salzhaltigen Fluiden nicht nachgewiesen werden.

Hydratisierungsreaktionen vulkanischer Aschen oder von Vulkanoklastiten, die in Sedimenten konvergenter Plattenränder weitverbreitet sind, verbrauchen Wasser bei niedrigen bis mittleren Temperaturen zur Bildung von z.B. Zeolithen und Smektit. Smektit kann z.B. bis zu 20% an Wasser in die Struktur einbauen. Dadurch können ebenfalls höhersaline Restfluide entstehen. Dieser Prozess wird von MARTIN ET AL. (1995) als wichtigster Prozess für die Aufkonzentrierung von Fluiden angesehen und könnte auch in der Chañaral-Mélange eine Rolle spielen, da Vulkanite in die Metapelite eingeschaltet sind.

Nur aus den Ergebnissen der mikrothermometrischen Untersuchungen ist es schwierig, Aussagen über die Ursachen für eine Erhöhung der Salinität in Fluideinschlüssen der Chañaral-Mélange zu treffen.

5.1.2 Ursprung der Typ 2- und Typ 3a-Fluidsysteme

Typ 2-Einschlüsse enthalten eine Mischung aus $H_2O+NaCl$, CO_2 , CH_4 und H_2S . H_2O ist ursprünglich als Porenfluid vorhanden und wird während der Kompaktion des Sediments als erstes freigesetzt. Der Hauptteil des CH_4 wird nach dieser Phase der Porositätsreduktion unter Temperaturbedingungen freigesetzt, bei denen es sich nicht mit Wasser mischt, sondern als eigenständiges Fluid existiert. CO_2 -Fluide gewinnen an Bedeutung, wenn kohlige Materialien unter oxidierenden Bedingungen zersetzt und wenn Karbonate unter grünschieferfaziellen Bedingungen umgewandelt werden. H_2S entsteht durch Umwandlung von Pyrit, aus Evaporiten durch Sulfatreduktion oder auch aus organischem Material. Insgesamt spricht die Zusammensetzung des Typ 2-Fluids für einen metamorphen Ursprung.

Reines Wasser ist dann vollständig mit unpolaren Fluiden wie CO_2 und CH_4 mischbar, wenn Temperaturen der Grünschieferfazies erreicht werden (ca. $400^\circ C$, YARDLEY 1997). Bei niedrigeren Temperaturen oder bei Anwesenheit von Salzen bilden sich entmischte Fluide. Da wie oben beschrieben kein deutlicher Anhaltspunkt für die Bildung der Einschlüsse aus einem entmischten Fluid gefunden wurde, müssen die Typ 2-Einschlüsse bei Temperaturen gebildet worden sein, die grünschieferfaziellen Bedingungen entsprechen (die Temperatur der totalen Homogenisierung T_H und somit die Mindestbildungstemperatur lag bei über $285^\circ C$, bei einigen dieser Einschlüsse betrug sie $322^\circ C$). Die Anwesenheit von Salzen lassen noch höhere Bildungstemperaturen vermuten, da die Position des

Solvus' des $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ -Systems abhängig von der Salinität der wässrigen Phase und vom Druck während der Einschlussbildung ist. Ansteigende Salinität vergrößert die Mischungslücke, während eine Druckerhöhung den gegenteiligen Effekt hat (SHEPHERD ET AL. 1985).

Wenn ein CO_2 -reiches Fluid (hier Typ 3a-Einschlüsse mit $\text{CO}_2+\text{CH}_4\pm\text{H}_2\text{S}\pm\text{N}_2$) nicht dem ursprünglich eingeschlossenen Fluid entspricht, kann es durch Modifikation eines $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -Fluides gebildet werden. Zum Einen kann H_2O nach der Einschlussbildung verloren gehen. Dieses Entweichen könnte das Resultat von Versetzungen, mobilen Korngrenzen und/oder Dekrepitation während der dynamischen Rekristallisation von Quarz sein (STERNER & BODNAR 1989, HOLLISTER 1990, BAKKER & JANSEN 1991, JOHNSON & HOLLISTER 1995). Ist dies der Fall, sollten zum einen textuelle Merkmale sowohl an den Einschlüssen als auch im Wirtsmaterial erkennbar sein. Zum anderen sollte die selektive Abreicherung von H_2O ein Spektrum von Zusammensetzungen bewirken; so sollten auch H_2O -reiche Einschlüsse in unmittelbarer Nähe der CO_2 -dominierten Einschlüsse vorhanden sein. Des Weiteren fehlen schlüssige experimentelle Beweise dafür, dass H_2O vollständig aus $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -Einschlüssen entweicht und sich CO_2 -dominierte Einschlüsse daraus bilden (z.B. BAKKER & JANSEN 1991, 1993).

Zusätzlich könnte es zu einer Abreicherung von H_2O in den einsickernden Fluiden kommen. Progressive Hydratisierungsreaktionen im Wirtsgestein während der Sericitisierung würden H_2O aus dem mineralisierenden Fluid entfernen und das verbleibende CO_2 im Fluid anreichern. Wechselwirkungen des mineralisierenden Fluids mit kohligem Material des Wirtsgesteines könnte gemäß der Reaktion $2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ ebenfalls zur Anreicherung des CO_2 beitragen. Dann müssten signifikante Mengen an CH_4 vorhanden sein (XAVIER 1999)

Die in dieser Arbeit gemessenen CO_2 -dominierten Typ 3a-Einschlüsse zeigen einen sehr begrenzten Dichtebereich zwischen 0,68 und 0,74 g/cm^3 für Probe PuA 41 und stammen aus nicht beanspruchten Bereichen der Quarzader. Weiterhin liegen die durch die Einschlüsse definierten Ebenen schräg zu den Bahnen mit Typ-2-Einschlüssen und es finden sich keine Einschlüsse mit H_2O neben Typ 3a-Einschlüssen. Dies zusammengenommen legt den Schluss nahe, dass es sich bei den beiden Systemen in Typ 2- und Typ 3a-Einschlüssen um verschiedene Fluide handelt; jedes repräsentiert ein Fluid, das während unterschiedlicher Deformationsphasen präsent war.

5.2 Fluidentwicklung in der Chañaral-Mélange

Neben der quantitativen Bestimmung der Zusammensetzung in den Einschlüssen ist deren genetische Abfolge für ihre Interpretation von Interesse. Primäre Einschlüsse werden in Bezug zum Wirtsmaterial anhand von Wachstumszonen, Kristallflächen etc. datiert, pseudosekundäre anhand von angewachsenem Material. In metamorphen Gesteinen sind jedoch meist -wie hier- nur sekundäre Einschlüsse erhalten. Einige Kriterien zur relativen zeitlichen Einstufung sekundärer Einschlüsse sind im Folgenden zusammengefasst (nach ROEDDER 1984, MULLIS 1987):

1. "Isolierte" Einschlüsse sind in der Regel älter als Einschlüsse auf deutlichen Bahnen. Viele Autoren interpretieren regellos verteilte isolierte Einschlüsse als die ältesten.

2. Einschlüsse auf Korngrenzen rekristallisierter Quarzkörner bzw. auf Subkorngrenzen sind früher gebildet worden als Fluideinschlüsse auf Bahnen, die diese Korngrenzen durchschlagen. Isolierte, primär erscheinende Einschlüsse innerhalb rekristallisierter Quarzkörner sind meist sehr frühe pseudosekundäre Einschlüsse oder "Relikte" nach der Rekristallisation.
3. Wässrige Fluideinschlüsse mit negativer Kristallform sind gewöhnlich früher und bei höheren Temperaturen gebildet worden als große, unregelmäßig geformte Einschlüsse. Dies gilt jedoch nicht immer für gasreiche Einschlüsse, die gleichzeitig oder später gebildet worden sein können.
4. Schnittbeziehungen:
 - a) Eine frühere Bahn wird durch eine spätere durchschlagen und versetzt.
 - b) Eine frühere Bahn wird durch eine spätere durchschlagen, wobei Fluideinschlüsse auf dem Schnittpunkt geöffnet und mit dem jüngeren Fluid wieder aufgefüllt werden.
5. Es wird angenommen, dass durch Druckdifferenz dekrepitierte Einschlüsse älter sind als alle Einschlüsse, deren Isopyknen im p-T-Feld steiler verlaufen. Diese Annahme muss jedoch nicht zutreffen, da Dekrepitation auch durch eine starke Aufheizung des Einschlusses durch z.B. eine nahe Intrusion erfolgen kann.
6. Der Reifegrad des Einschlussinhaltes repräsentiert verschiedene Stadien der Fluidentwicklung. Mit steigendem Druck und Temperatur entwickeln sich die Fluide von der Kohlenwasserstoffzone über die Methan- und Wasserzone (MULLIS 1987) bis zur CO₂-Zone (TOURET 1977).

Es ist schwierig, mit den hier vorliegenden Informationen über die Fluideinschlüsse eine Abfolge aufzustellen, da z.B. Schnittbeziehungen fehlen. Die Fluidbahnen zeigen zwar unterschiedliche Orientierungen bezüglich der Klüftwand, aber eine Beziehung relativ zueinander konnte nicht abgeleitet werden. Dennoch sind unter Anwendung der oben angeführten Kriterien einige Aussagen möglich und sollen anhand der Probe PuA 41 verdeutlicht werden.

- Die ältesten Einschlüsse dieser Probe sind mutmaßlich die Einschlüsse des Typs 3b mit CH₄±KW (Abbildung 4.2 f), die typische Dekrepitationsstrukturen (radial zum ursprünglichen Einschluss angeordnete Fluidbahnen mit neugebildeten "Tochtereinschlüssen") zeigen. Sie wurden vermutlich auf dem prograden Ast der Metamorphose gebildet und im Verlauf der p-T-Entwicklung des Gesteins zerstört.
- Typ 1-Einschlüsse, die regellos verteilt sind und z.T. negative Kristallform aufweisen (Abbildung 4.2 a) sollten älter sein als unregelmäßig geformte und auf Bahnen orientierte Typ 1-Einschlüsse. Zum Teil zeigt sich dies auch in den geringeren Dichten und dem damit einhergehenden flacheren Verlauf der Isopyknen (s. Abbildung 4.11). Wie sich in der Gesamtheit aller Proben zeigt (s. Kapitel 4.5.1), erfolgte eine Verdünnung der ursprünglichen höher konzentrierten wässrigen Lösung durch eine Vermischung mit einem niedrigsalinen, evtl. meteorischen Fluid.
- Die Typ 2-Einschlüsse werden als älter als die Typ 3a-Einschlüsse angesehen, da sie eine regelmäßigeren Einschlussform zeigen und ihre Isopyknen im p-T-Feld steiler verlaufen (Abbildung 4.14). Ein weiterer Hinweis darauf ist die Tatsache, dass Typ 3a-Einschlüsse auf Ebenen liegen, die keinen Bezug zur Klüftwand zeigen. Typ 2-Fluideinschlüsse liegen auf Ebenen parallel bis subparallel zur Klüftwand, andere schräg zur Klüftwand mit einem Winkel von ca. 60°.

- Dekrepitationsstrukturen, wie sie in Abbildung 4.2 b dargestellt sind, können auf weitgehend isotherme Druckentlastung, aber auch auf eine starke Aufheizung zurückgeführt werden. Die Isopyknen von Gaseinschlüssen verlaufen im Vergleich zu Isopyknen von H₂O-Salz-Einschlüssen sehr flach. Dies führt dazu, dass bei einer Temperaturerhöhung der Druck in Gaseinschlüssen wesentlich langsamer ansteigt als in wässrigen Einschlüssen, somit sind Gaseinschlüsse unempfindlicher gegenüber einer Temperaturerhöhung (s. Abbildung 5.1). Eine Dekrepitation aufgrund von Druckdifferenzen erscheint daher für die Gaseinschlüsse wahrscheinlicher.
- Die in Abbildung 4.2 e dargestellten isolierten Einschlüsse, die innerhalb eines rekristallisierten Quarzkornes erhalten sind, stellen ältere Relikteinschlüsse dar, die durch die Rekristallisation verändert wurden. Diese Einschlüsse sind Typ 2-Einschlüsse mit H₂O-NaCl-CO₂-CH₄ und erfüllen aufgrund ihres Erscheinungsbildes die klassischen Kriterien für primäre Einschlüsse (z.B. ROEDDER 1984). Sie sind jedoch lediglich primär bezüglich einer retrograden Rekristallisation, die nach der Peak-Metamorphose stattfand. Sie beinhalten somit Informationen zum Exhumierungspfad der Probe. KÜSTER & STÖCKHERT (1997) sowie JOHNSON & HOLLISTER (1995) geben für quarzreiche Gesteine eine kritische Isotherme des spröd-duktil Überganges bei ca. 300°C an und leiten mittels der zu den rekristallisierten Einschlüssen gehörigen Isothermen Druckbedingungen für den spröd-duktil-Übergang ab. Dieser Ansatz ist jedoch umstritten und soll daher hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

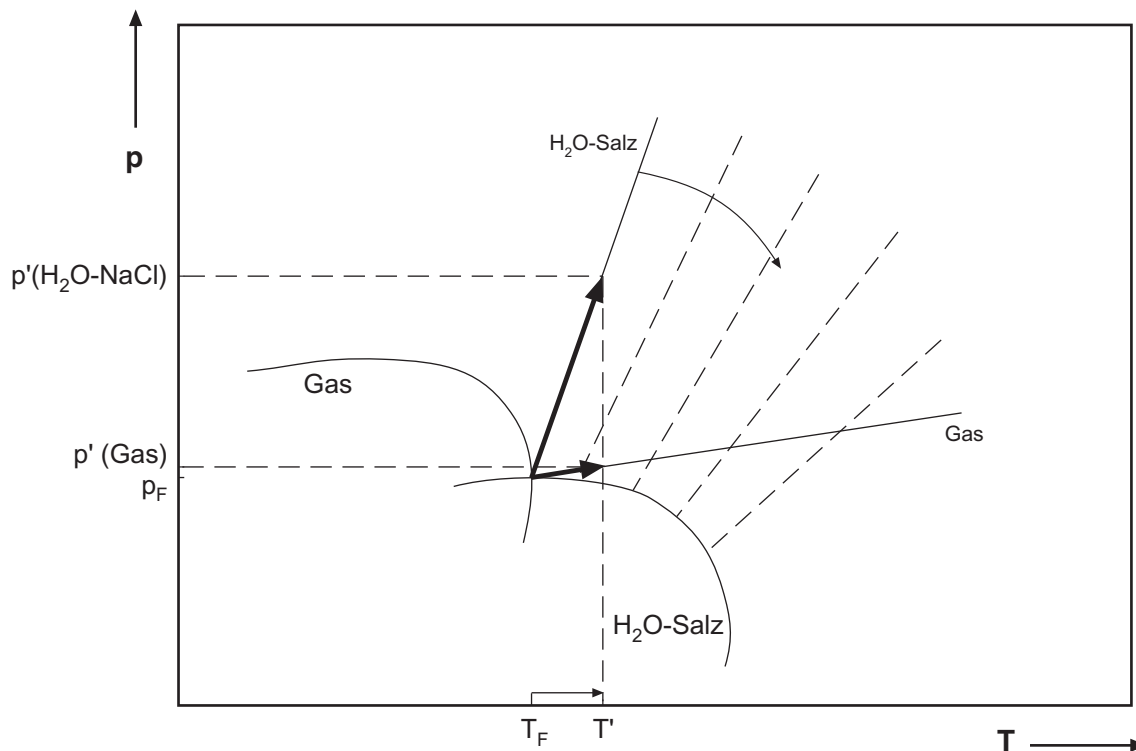


Abbildung 5.1: Vergleich der Isopyknen zweier hypothetischer Einschlüsse mit H₂O-Salz und Gas. Bei einer Temperaturerhöhung nach T' erhöht sich der Druck in den Einschlüssen entsprechend der Steigung der zugehörigen Isopyknen (dicke Pfeile). Aufgrund der großen Druckzunahme kann der H₂O-Salz-Einschluss reequilibrieren unter Erniedrigung der Dichte (Verschiebung der Isopyknen zu höheren Temperaturen, dünner Pfeil) und somit Erhöhung der Homogenisierungstemperatur. Hier dargestellt ist der Spezialfall der Bildung von Einschlüssen aus einem entmischten Fluid (Isopyknen beginnen am Schnittpunkt der Siedekurven der beiden Systeme, d.h. in diesem Fall ist T_H gleichzeitig der Bildungstemperatur T_F).

Wie in Kapitel 2 und 4 beschrieben, sind in einer ca. 2,5 cm dicken Quarzader (Probe PuA 51) Chlorite vorhanden. Diese Ader soll im Folgenden gesondert betrachtet werden, da sie die einzige ist, wo zu den Fluideinschlussinformationen unabhängig Temperaturinformationen (aus den Chloriten) vorliegen. Die genaue petrologische Beschreibung erfolgte bereits in Kapitel 2, die Chlorite und Fluideinschlüsse sind in Kapitel 3 bzw. 4 beschrieben worden.

Die Ader ist symmetrisch aufgebaut mit einem feinkörnigen Randbereich aus klarem Faserquarz, der frei von Fluideinschlüssen ist. In den grobkörnigen Quarzkristallen in der Adermitte finden sich Typ 2-Fluideinschlüsse auf Klufwand-parallelen Bahnen sowie regellos orientierte Typ 1-Einschlüsse mit einer Salinität von 4-8 Gew.-% NaCl äq. Als dritter Typ liegen in Ebenen schräg zur Klufwand angeordnete Typ 3a-Einschlüsse. Da diese Generation als jüngste Generation angesehen wird, soll sie in die folgenden Überlegungen nicht einbezogen werden.

Die Zusammensetzung der Chlorite in dieser Quarzader entspricht derjenigen in den umgebenden Metapeliten (s. Kapitel 3.4.1), so dass die Bildung der Chlorite in der Ader vermutlich aus einem lokal zirkulierenden Fluid erfolgte. Als Bildungstemperatur ergibt sich für die Chlorite im Mittel 360°C.

Die Frage ist nun, wie die vorliegenden Informationen zusammenpassen und wie sich die Ader entwickelte. Entsprechend den oben erwähnten Kriterien sollten die regellos orientierten Einschlüsse des Typs 1 älter sein als die Typ 2-Einschlüsse auf Bahnen. Die Mindestbildungstemperaturen der Typ 1-Einschlüsse liegen bei 150-240°C. Wie erwähnt, erfolgte die Chloritausfällung vermutlich während einer Phase der hydrothermalen Überprägung, die Bildungstemperaturen könnten also eine Temperaturobergrenze für die Einschlussbildung darstellen. Der Schnittpunkt zwischen der Isothermen der Chloritbildung bei 360°C und den zu den Einschlüssen gehörenden Isopyknen (Abbildung 5.2) sollte den Bildungsdruck ergeben, wenn die Fluideinschlüsse gleichzeitig mit den Chloriten gebildet wurden bzw. entsprechend eine obere Druckgrenze. In diesem Fall ergibt sich für Typ 1-Einschlüsse ein Druck von 2,4-3 kbar, für Typ 2-Einschlüsse 1,1-1,7 kbar. Eine retrograde Entwicklung von einem Typ 1-Fluid zu einem Typ 2-Fluid ist also denkbar. Man kann jedoch nicht sagen, wann genau die Chlorite ausgefallen sind.

Für die Fluidentwicklung in dieser Ader sind noch weitere Szenarien denkbar:

Nach PASSCHIER & TROUW (1997) werden kluftwand-parallele Fluideinschlussbahnen in Faserquarz häufig dahingehend interpretiert, dass sie die Oberfläche des Kristallwachstums während der Deformation nachzeichnen. Sie wären dann per Definition als primäre Einschlüsse zu bezeichnen. Die Untersuchung der Einschlüsse ergab keine kontinuierliche Dichtezu- oder -abnahme von außen nach innen. Dies spricht dafür, dass die p-T-Bedingungen während ihrer Bildung konstant waren. Da die Typ 1-Einschlüsse keine Beziehung zum Kristall- oder Kluftwachstum aufweisen, könnte es sein, dass diese Einschlüsse später gebildet wurden. Betrachtet man die Isopyknen der Einschlüsse (Abbildung 5.2), so wäre eine Entwicklung von Typ 1- nach Typ 2-Einschlüssen bei einem p-T-Pfad im Uhrzeigersinn mit einer Temperatur- und Druckerhöhung verbunden. Dabei wäre jedoch zu erwarten, dass die gasreichen Einschlüsse dekrepitieren, wofür jedoch keine Anzeichen gefunden wurden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Bildung der beiden Einschlussgruppen aus einem entmischten Fluid. Dann sollte der Schnittpunkt ihrer Isopyknen die Bildungsbedingungen der Fluideinschlüsse ergeben. Dieser Schnittpunkt liegt bei 210-260°C und 0,3-1 kbar. Bei dieser Möglichkeit bleibt die Frage, wie sich die unterschiedlichen Anordnungen in Bahnen bzw. Clustern bei gleichzeitiger Bildung der Einschlüsse erklären. Ausserdem sollte bei einer Bildung aus einem entmischten Fluid die Zusammensetzung der Einschlüsse qualitativ übereinstimmen. Es konnten aber keine Hinweise auf Gase in den Typ 1-Einschlüssen dieser Probe gefunden werden.

Daher erscheint die zuerst genannte Variante sowohl am leichtesten erklärbar als auch am wahrscheinlichsten.

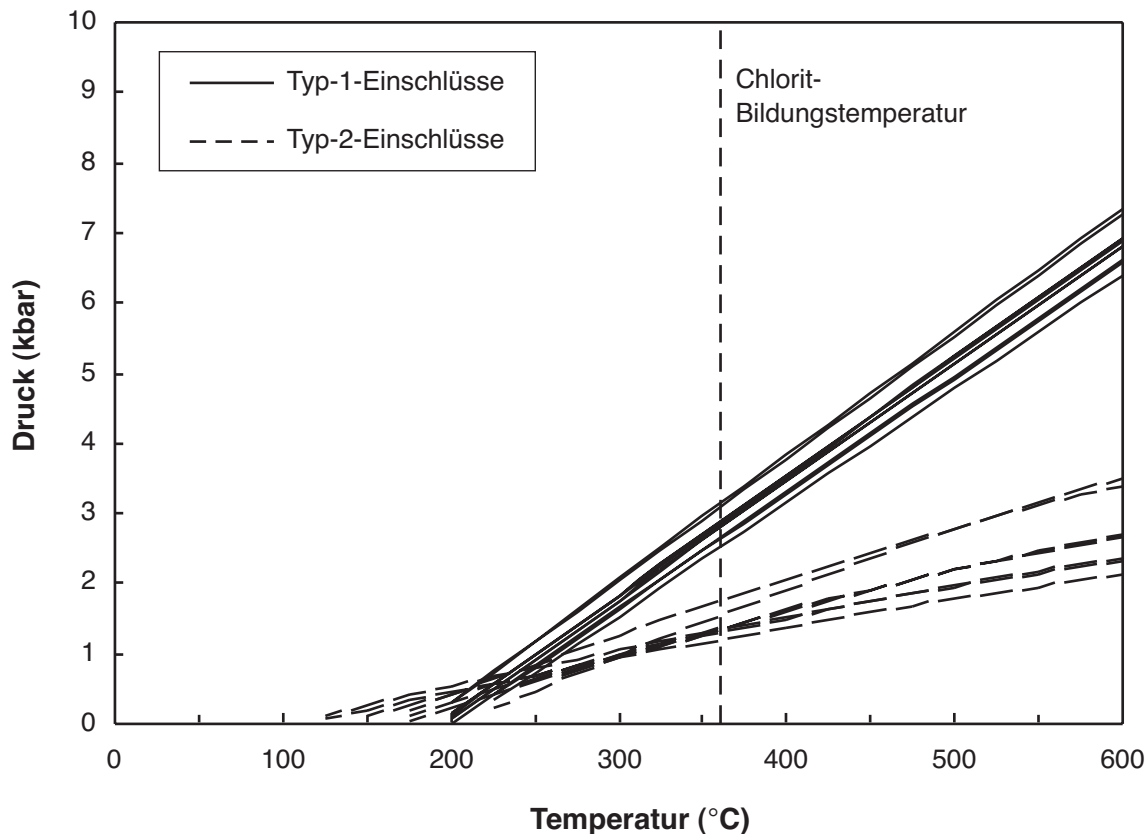


Abbildung 5.2: Isopyknen für Typ 1- und Typ 2-Einschlüsse der Probe PuA 51 (eingezeichnet: Isotherme der Chloritbildung, $T_F(\text{Chlorit})=360^\circ\text{C}$).

5.3 p-T-Entwicklung der Mélange

Durch Untersuchung der Tonmineralokristallinität, des b-Parameters und der Mineralogie von Chlorit und Phengit konnten die metamorphen Bedingungen des metapelitischen Rahmengesteins auf 300-350°C und 2,2-2,85 kbar eingeschränkt werden. Die ermittelten Drücke entsprechen einer Versenkungstiefe von 8-10 km (bei einer Gesteinsdichte von 2,8 g/cm³).

Die Ausbildung von Biotit in Proben aus dem Kontaktbereich zum Barquito-Pluton weist auf höhere Temperaturen hin, die sich nicht zwangsläufig in einer Erniedrigung der Tonmineralokristallinitätswerte niederschlägt, da in Kontaktbereichen der Einfluss der Temperatur durch andere Einflüsse überlagert wird.

Der b-Parameter der K-Hellglimmer in den Metapeliten liegt im Bereich der Werte solcher Proben, die aus Gebieten mit einem Gradienten von 25-35°C/km stammen. Aus den metamorphen Bedingungen lässt sich als Untergrenze für 300°C und 2,85 kbar ein Gradient von 29°C/km ableiten. Als Obergrenze des Gradienten kann man 44°C/km (für 350°C und einen Druck von 2,2 kbar) angeben. Im Kontaktbereich zu den Plutonen war der Gradient wahrscheinlich größer. Da jedoch weder Intrusionsniveau noch der Wärmeeintrag der Plutone im Arbeitsgebiet bekannt sind, kann wenig über den Gradienten der Kontaktmetamorphose gesagt werden. In der Literatur finden sich z.B. für den Shimanto Belt Gradienten von 80-110°C/km in der Nachbarschaft eines Granitoids (HIBBARD ET AL. 1993).

Die angegebenen Gradienten erscheinen im Vergleich zu normalen Gradienten in Subduktionsumgebungen recht hoch. Nach dem klassischen Modell kommt es durch die Subduktion kalter ozeanischer Kruste zu einer Kompression der Isothermen entlang des Décollements (Abbildung 5.3). Zusammen mit der tiefen Versenkung von Material bilden sich die typischen blauschieferfaziellen niedrigtemperierten Hochdruckgesteine mit Gradienten von 5-10°C/km, wie z.B. in der Franciscan Mélange (MARUYAMA & LIOU 1985).

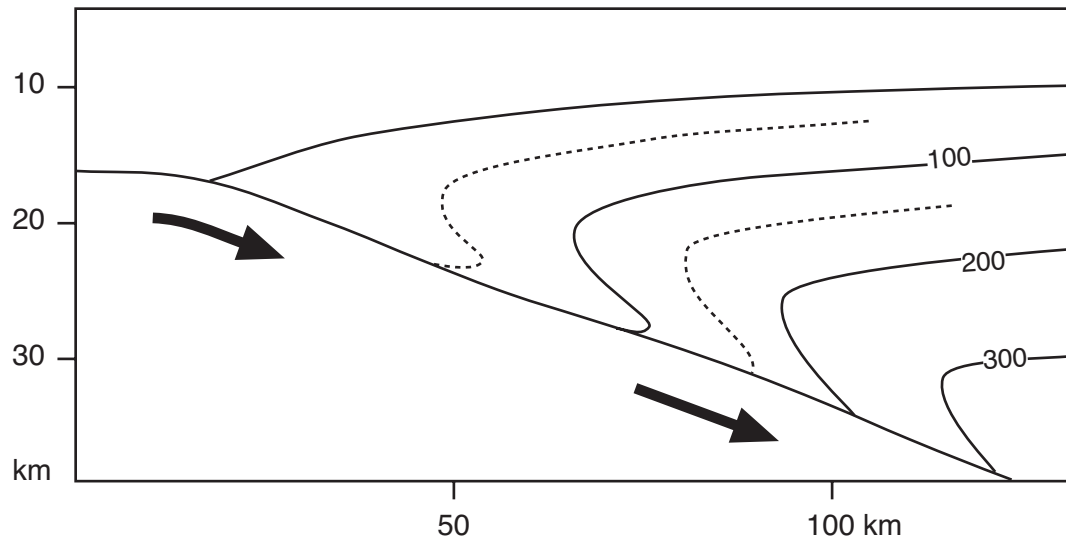


Abbildung 5.3: thermische Struktur eines Akkretionsprismas (modifiziert nach UNDERWOOD ET AL. 1993a)

Als Ursache für eine Veränderung der „klassischen“ thermischen Struktur in Akkretionskeilen kommen viele verschiedene Einflussfaktoren in Frage. So berechnete PEACOCK (1991) anhand von 2-D-Wärmeübertragungsmodellen p-T-t-Pfade in Subduktionszonen, basierend auf Berechnungen fossiler Subduktionszonen. Es ergab sich, dass der p-T-t-Pfad bzw. der Gradient abhängen von:

- dem Alter der abtauchenden ozeanischen Kruste (je älter desto kälter die Kruste und umso flacher der Gradient)
- der Menge an vorher subduzierter Kruste (je mehr desto flacher der Gradient)
- der Position des betrachteten Gesteinsfragmentes innerhalb der Subduktionszone (ob an der Basis oder am Top der ozeanischen Kruste oder im Mantel)
- dem Ausmaß an induzierter Konvektion (Wärmefluss)

Weitere wichtige Einflussfaktoren auf den p-T-Pfad in Subduktionszonen sind die Konvergenzrate sowie die Keilgeometrie.

Das Modell der Niedrigtemperatur-Hochdruckmetamorphose ist nicht auf alle Subduktionszonen universell anwendbar. In oberen strukturellen Niveaus von fossilen Akkretionsprismen und in modernen Akkretionsprismen wurden Gradienten bis zu 134°C/km beobachtet (HIBBARD ET AL. 1993), Gradienten zwischen 30 und 40°C/km wurden in tieferen Niveaus fossiler Akkretionsprismen beobachtet (Tabelle 5-1, vgl. auch Abbildung 5.4).

Tabelle 5-1: Zusammenstellung geothermischer Gradienten für fossile Akkretionsprismen

| Lokalität | Gradient (°C/km) | Literatur |
|-------------------------------------|------------------|--|
| Shimanto Belt (Muroto-Halbinsel) | 33-40 | UNDERWOOD ET AL. (1993b), LAUGHLAND & UNDERWOOD (1993) |
| Sambagawa Belt, Japan | 15-20 | NAKAJIMA ET AL. (1977), LIOU ET AL. (1987), BANNO & SAKAI (1989), TATASU (1989), WALLIS & BANNO (1990) |
| Kodiak Island, Alaska | 20-30 | SAMPLE & MOORE (1987), VROLIJK ET AL. (1988) |
| Chugach Komplex, SO-Alaska | 20-30 | SISSON ET AL. (1989) |

Im Fall der Chañaral-Mélange könnten für die erhöhten Gradienten verschiedene Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, intrudierten in die Mélange mehrere Plutone, die zu einer weiträumigen thermischen Überprägung der Mélange-Gesteine geführt haben könnten. Zum anderen sind Mélanges Wegsamkeiten für aufsteigende heisse Fluide, die ebenfalls zu einem erhöhten Wärmefluss führen können (VROLIJK ET AL. 1988, UNDERWOOD ET AL. 1988).

Der Unterschied im thermischen Gradienten schlägt sich auch in der Natur der untersuchten Fluide nieder. VROLIJK (1987) sowie DALLA TORRE ET AL. (1996) fanden CH₄ als dominierende Gasspezies in Gesteinen der Kodiak Fm. bzw. der Franciscan Mélange. Da in der Chañaral-Mélange die Temperaturen höher waren (in der Franciscan Mélange z.B. werden maximale Temperaturen von 250°C angegeben), sind H₂O- oder CO₂-dominierte Fluide stabil. In der Chañaral-Mélange wurden vereinzelte Einschlüsse mit CH₄ als die ältesten Einschlüsse identifiziert, die vermutlich prograd bei einem flacheren Gradienten entstanden sind.

Die p-T-Bedingungen der Chañaral-Mélange stimmen weitgehend mit den im tertiären Shimanto Belt beobachteten Daten überein (Abbildung 5.4). Dort werden die hohen Gradienten auf die Subduktion relativ junger ozeanischer Kruste in der Kreide zurückgeführt (LAUGHLAND & UNDERWOOD 1993). Da für die Chañaral-Mélange nichts über Alter und Temperatur der ozeanischen Kruste im Karbon bekannt ist, kann diese Möglichkeit weder bestätigt noch widerlegt werden.

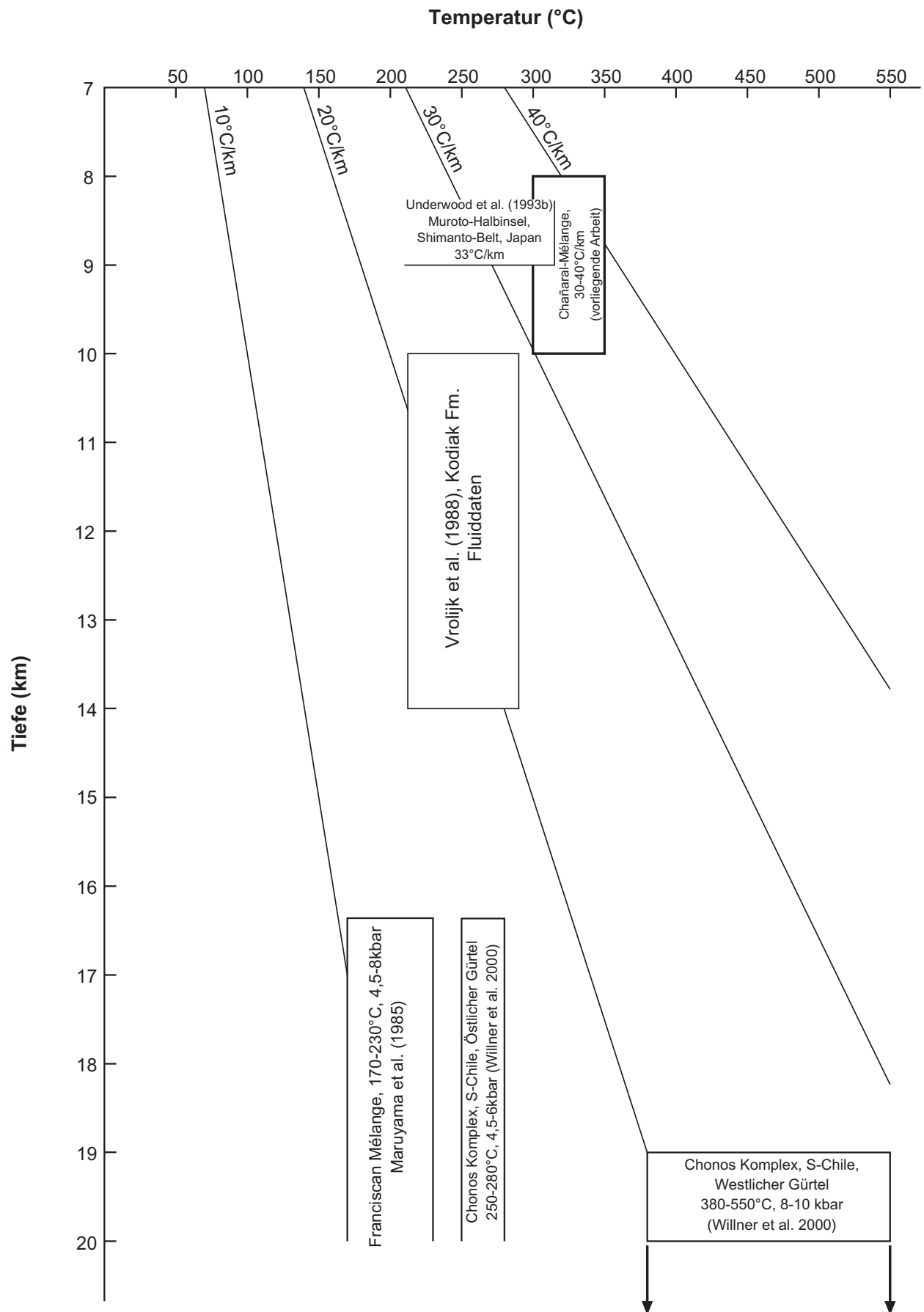


Abbildung 5.4: Vergleich der p-T-Bedingungen der Chañaral-Mélange mit verschiedenen anderen fossilen Akkretionsprismen

5.3.1.1 Konstruktion eines p-T-Pfades

Anhand der mineralogischen Untersuchungen konnten die peak-metamorphen Rahmenbedingungen der Chañaral-Mélange eingegrenzt werden. Durch Fluideinschlüsse in syntektonischen Quarzadern konnten verschiedene Ereignisse der prograden und retrograden Entwicklung der Fluide beleuchtet werden. Der nächste Schritt ist nun die Verknüpfung dieser Informationen zu einem p-T-Pfad, der in Subduktionsumgebungen in der Regel im Uhrzeigersinn verläuft (FREY & ROBINSON 1999, s. auch Tabelle 5-2).

- a) Die ältesten Einschlüsse sind wie erwähnt Einschlüsse mit $\text{CH}_4 \pm \text{KW}$. Da diese jedoch nicht quantitativ gemessen werden konnten, können keine Isopyknen und somit keine genauen p-T-Bedingungen abgeleitet werden.
- b) In den Typ 1-Einschlüssen mit $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ ist eine Verdünnung eines ursprünglich salineren Fluids (bis 13 Gew.-% NaCl und Dichten bis 0.97 g/cm^3) mit einem meteorischen Fluid oder auch durch Meerwasser zu beobachten. Diesem Vorgang entspricht im p-T-Feld eine Druckentlastung, ob isotherm oder unter Temperaturänderung, bleibt ungeklärt.
- c) Die Zusammensetzung des Typ 2-Fluids sowie die Tatsache, dass die Isopyknen dieses Systems durch das durch mineralogische Untersuchungen eingegrenzte p-T-Feld von $300-350^\circ\text{C}$ und $2-5 \text{ kbar}$ laufen, führen zur Interpretation dieses Fluids als (peak-)metamorphes Fluid.
- d) Als Anhaltspunkt für die retrograde Entwicklung könnten die erwähnten reequilibrierten Einschlüsse in einem rekristallisierten Quarzkorn dienen, die $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{NaCl}$ enthalten. Die von KÜSTER & STÖCKHERT (1997) sowie JOHNSON & HOLLISTER (1995) angegebene Temperatur des spröde-duktil-Überganges von 300°C ist hier nur zur Orientierung eingetragen, der Schnittpunkt der Isothermen mit den Isopyknen der Fluideinschlüsse soll keinesfalls als p-T-Punkt aufgefasst werden.
- e) Zusätzlich angedeutet ist eine evtl. thermische Überprägung durch die Intrusion des Barquito-Plutons, die jedoch nicht quantitativ gefasst werden konnte.

Diese Informationen sind vereinfacht in Abbildung 5.5 zusammengefasst.

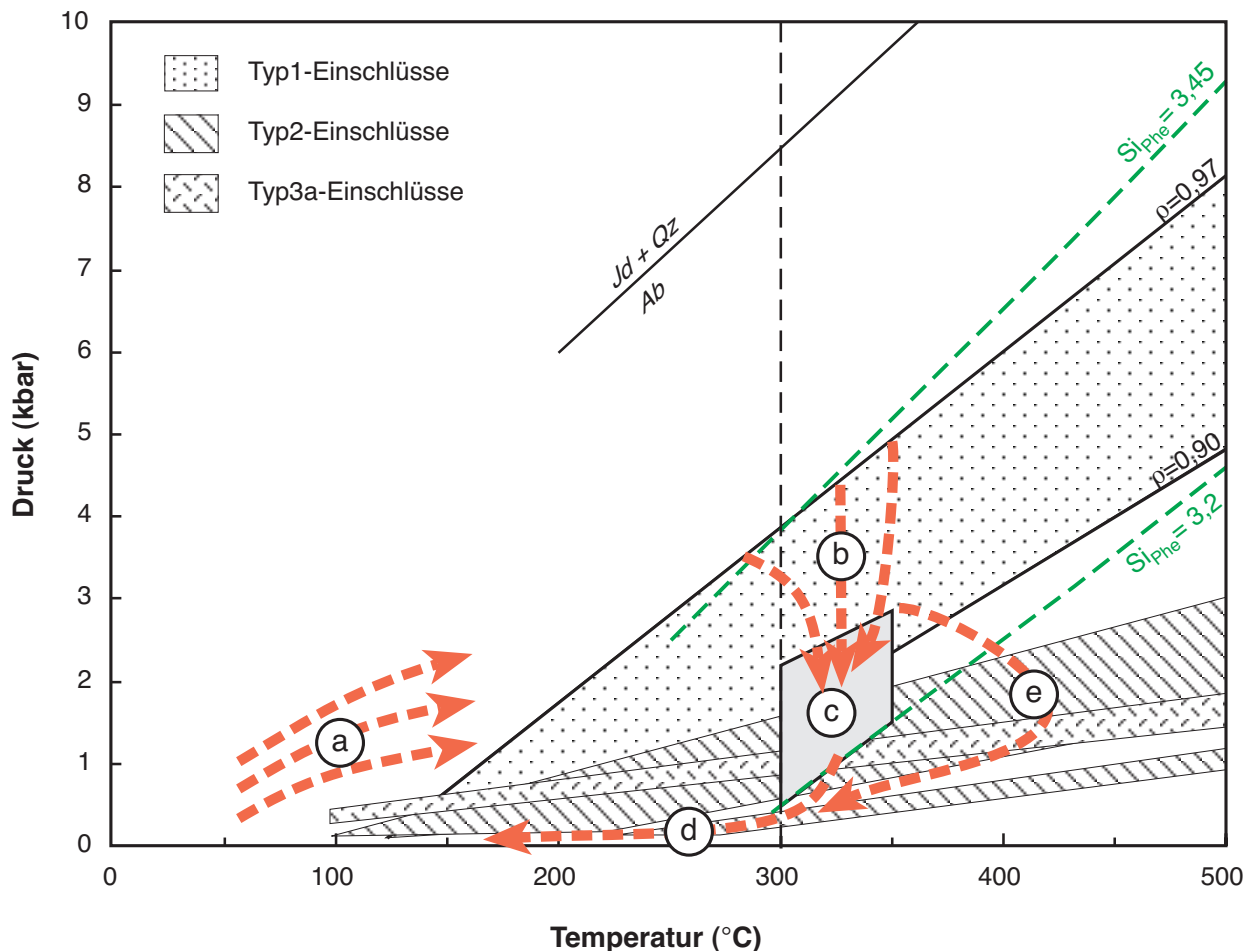


Abbildung 5.5: Schema der p-T-Entwicklung der Chañaral-Mélange anhand von p-T-Daten aus mineralogischen Untersuchung des Rahmengesteins sowie aus Fluideinschlüssen in syntektonischen Quarzadern. Eingetragen sind Isoplethen für Si-Gehalt in Phengiten nach MASSONNE & SZPURKA 1997, Albit-Stabilität nach HOLLAND (1983). Nummerierung gemäß Text.

5.4 Strukturgeologische Interpretation der Chañaral-Mélange und der Las Tórtolas-Formation

Die Illitkristallinitätsdaten sowie die strukturellen Beziehungen der Chañaral-Mélange weisen darauf hin, dass Deformation und Metamorphose der Gesteine in mittleren Niveaus eines Akkretionsprismas in Tiefen <15 km, evtl. am Décollement, erfolgten, wenn man die Daten mit Kriterien von DiTULLIO & HADA (1993) vergleicht (Abbildung 5.6, s. auch Zusammenstellung in Tabelle 5-2).

Nach diesem Schema ist die Basis des Prismas durch einfache Scherung und duktiles Verhalten der Schichten dominiert. In flacheren Niveaus (wenig oder keine Metamorphose) wird Duktilität durch nicht-verfestigte, womöglich unter Überdruck geratene Sedimente geliefert. Höhere Drücke und Temperaturen führen in tieferen Niveaus zu Deformation mit kristalliner plastischer Deformation, die ein tektonisches Gefüge hervorruft. Mittlere Niveaus sind charakterisiert durch anchizonale Bedingungen und einen höheren Grad der reinen Scherung, der sich in Faltung, Schieferung sowie landwärts gerichtete Rotation ausdrückt. Weitere typische Strukturen sind ein steiles Fallen der Schichten und Drucklösung. Die Sedimente in der Décollement-Zone an der Basis des Prismas sind intensiver Scherung und Schichtparalleler Extension ausgesetzt, es kommt zur Ausbildung von Mélanges. An der Oberfläche des Prismas

können sich "slope basins" entwickeln, die umgehend einer Verkürzung ("shortening") unterworfen werden. Instabile Hänge können auch Ablagerungen von Olisthoströmen hervorrufen, die evtl. die Tiefseerinne erreichen und dort akkumulieren.

Die Chañaral-Mélange zeigt im Vergleich zu den Turbiditen der Las Tórtolas Fm. leicht erhöhte maximale Temperaturen (vgl. Chañaral-Mélange: Obere Anchizone, Las Tórtolas Fm.: Untere Anchizone bis Obere Diagenesezone). Diese Unterschiede könnten in der Unterplattung der Mélange unter die Basis der Turbidite begründet liegen, denn nach HASEBE ET AL. (1993) werden Mélanges, die aus pelagischen Sedimenten und Ozeanbasalten bestehen, vermutlich durch Unterplattungsprozesse gebildet.

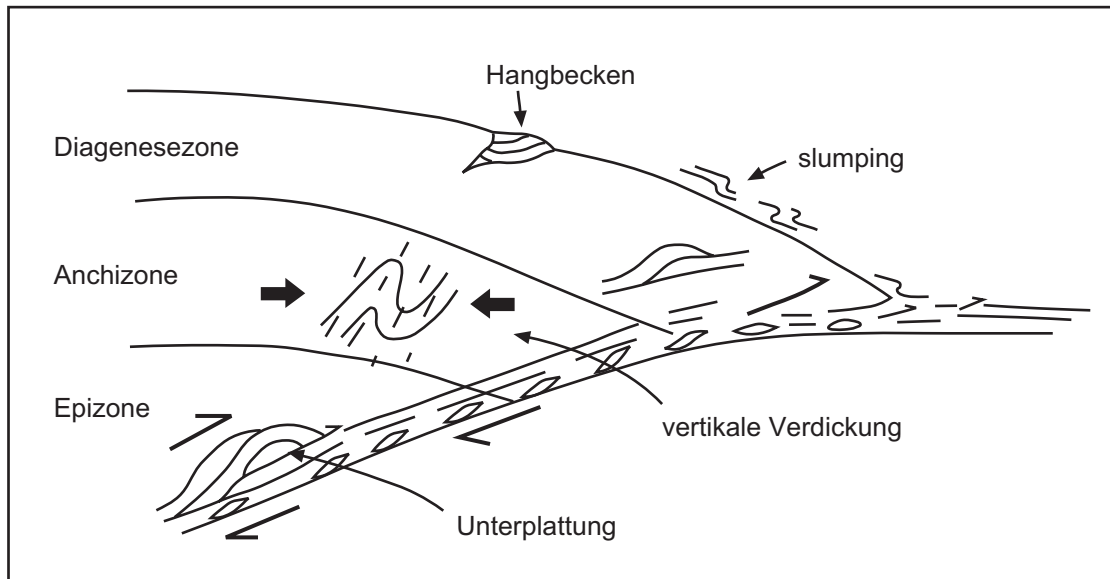


Abbildung 5.6: schematisches Modell, das mögliche Zonen der Metamorphose und typische begleitende Strukturen innerhalb eines Akkretionsprismas zeigt (nach DiTULLIO & HADA 1993)

Tabelle 5-2: Übersicht über einige Charakteristika von geotektonischen Settings mit niedriggradiger Metamorphose (nach FREY & ROBINSON 1999 und DITULLIO & HADA 1993) und Vergleich mit Ergebnissen aus der Chañaral-Mélange

| | Kollisionsorogen | Akkreionskeil | Chañaral-Mélange |
|--------------------------------|---|--|---|
| typische Lithologien | Turbidit Sandstein und Schiefer, Flachwasserkalke | Turbidit-Sandstein + Siltstein, Tonstein/Schiefer, Chert, Kissenbasalte, Kalke, Mn-Knollen, Mélange | Sandsteinblöcke in pelitischer Matrix, Metabasite, Kalke, Kissenlaven, Mélange |
| tektonometamorpher Ablauf | langlebiger Kontraktionszustand, polyphase Metamorphose mit thermischer Überprägung verbreitet | Ablagerung, Versenkungsmetamorphose und Deformation sind ein kontinuierliches Ereignis; nur geringe thermische Überprägung | Deformation nicht-verfestigter Sedimente, nachfolgend zwei Deformationsepisoden assoziiert mit niedriggradiger Metamorphose, nur leichte thermische Überprägung |
| p-T-t-Pfad | im Uhrzeigersinn | im Uhrzeigersinn | vermutl. im Uhrzeigersinn |
| struktureller Stil | externe Falten- und Überschiebungs-Gürtel zeigen intensive Schieferung im allochthonen und schwache Schieferung in autochthonen Deckeneinheiten | aufgeschuppte Schichten, steil verfalltet; variable Entwicklung von Schieferung; Schieferung und Schichtung subparallel in untergeplatteten Schiefergürteln, Drucklösung; in der Décollement-Zone an der Basis des Prismas intensive Scherung und Schicht-parallele Extension, Boudins | Schicht-parallele Extension, Boudins, Drucklösung Falten sind wahrscheinlich abgeschert |
| typische metapelitische Muster | obere Diagenese- bis Anchizone im Autochthon, obere Anchizone bis Epizone im Allochthon; inverse metamorphe Muster verbunden mit Überschiebung | Anchizone in untergeplatteten Schiefergürteln; Epizone in Bereichen hoher Beanspruchung; akkretionäre Versenkungsmuster | Obere Anchizone landeinwärts Untere Anchizone |
| b-Parameter von K-Hellglimmern | 9,00-9,03 Å | 9,02-9,05 Å | 9,01-9,02 Å |

5.5 Vergleich mit dem Chonos-Komplex in Südchile zwischen 44° und 46°S

Der metamorphe Chonos-Komplex bildet einen Teil eines Gürtels aus niedrig metamorphen Gesteinen innerhalb der chilenischen Küstenkordillere und beinhaltet metapsammopelitische Schiefer, Metabasite und Metaeisensteine, die in zwei gegensätzlichen Einheiten vorkommen. Der Östliche Gürtel umfasst metamorphe Gesteine der Pumpellyit-Aktinolith-Fazies, die einen geringen Deformationsgrad bei gut erhaltenen sedimentären und magmatischen Strukturen aufweisen. Maximale p-T-Bedingungen werden von WILLNER ET AL. (2000) mit 250-280°C und 5,5 kbar angegeben. Die Gesteine des Westlichen Gürtels sind charakterisiert durch Grünschiefer- bis Albit-Epidot-Amphibolit-fazielle metamorphe Bedingungen. Maximale p-T-Bedingungen variieren zwischen 8-10 kbar und 350-500°C bei Überschreitung der Stilpnomelan + Phengit-Stabilität. Die hohen Drücke werden durch regional verteilte Phengite mit hohen Si-Gehalten von bis zu 3,5 pro Formeleinheit bestätigt. Beide Gürtel sind Teil eines Subduktionssystems. Die auffälligen p-T-Unterschiede zwischen den beiden Einheiten resultieren aus ihrer Nebeneinanderstellung ("juxtaposition") während der Exhumierung. Nach WILLNER ET AL. (2000) wurde der Östliche Gürtel nicht sehr tief subduziert und stellt den Übergang zum Widerlager ("backstop system") des im Westlichen Gürtel repräsentierten Akkretionsprismas dar.

Es ist denkbar, dass die Las Tórtolas Fm. in Nordchile das Äquivalent oder die Verlängerung des Östlichen Gürtels im Chonos Komplex darstellt. Die stärker deformierte Chañaral-Mélange liegt von den Temperaturen her genau zwischen Östlichem und Westlichem Gürtel (Abbildung 5.4), sie nimmt wahrscheinlich innerhalb des Akkretionsprismas eine ebensolche Zwischenstellung ein. Höhermetamorphe Gesteine wie etwa im Westlichen Gürtel des Chonos-Komplexes sind vermutlich wegerodiert. Die nördlichsten Aufschlüsse solcher Blauschiefer finden sich bei etwa 36°S.

5.6 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit konnten erstmals die metamorphen Bedingungen der Chañaral-Mélange in Nordchile an Metapeliten und Metabasiten mit 300-350°C bei 2,2-2,8 kbar entsprechend einer maximalen Versenkung von 8-10 km bestimmt werden. Daraus ergibt sich ein geothermischer Gradient von ca. 30-40°C/km.

Durch die Untersuchung unterschiedlicher Fluideinschlussgenerationen in syntektonischen Quarzadern konnten verschiedene Phasen von Fluidtätigkeit unterschieden werden. Das älteste System sind CH₄-reiche Einschlüsse mit Spuren von Kohlenwasserstoffen, die prograd gebildet wurden. Das peak-metamorphe Fluid ist ein H₂O-CO₂-NaCl-dominiertes Fluid mit CH₄±H₂S, ein H₂O-NaCl-Fluid war evtl. gleichzeitig aktiv, es gibt Anzeichen dafür, dass es über weite Bereiche der p-T-Geschichte der Chañaral-Mélange aktiv war. Als jüngstes System werden Einschlüsse mit CO₂-CH₄±H₂S±N₂ angesehen.

Eine thermische Überprägung durch jüngere Intrusionen ist wahrscheinlich, konnte aber im Rahmen der Arbeit nicht quantitativ erfasst werden, da Informationen über den Wärmeeintrag oder das Intrusionsniveau der Plutonite fehlen. Ein Zusammenhang zwischen den Fluidsystemen der Chañaral-Mélange und dem Fluidinventar des in die Sedimente intrudierten Barquito-Plutons konnte nicht hergeleitet werden.

Einige Fragen bezüglich der Herkunft der Fluide und der genauen Abfolge der einzelnen Einschlussgenerationen bleiben jedoch offen, da sie nicht allein durch mikrothermometrische und petrologische Argumente geklärt werden können.

Um die verschiedenen Fluideinschlussgenerationen einzelnen Deformationsphasen zuordnen zu können, wäre eine struktureologische Untersuchung der Kluftsysteme in Verbindung mit Fluideinschlussuntersuchungen hilfreich. Durch genaues Einmessen verschiedener Fluideinschlussebenen ("fluid inclusion planes") können diese evtl. den im Gelände beobachteten Strukturen und Deformationsphasen zugeordnet werden. Eine Kombination mit Kathodolumineszenz und Fluideinschlussuntersuchungen könnte zusätzlich wertvolle Informationen liefern. Die bisher untersuchten Adern zeigten jedoch keine Lumineszenz.

Detailliertere Aussagen über die Herkunft der Fluide wären durch die Untersuchung der stabilen Isotope (z.B. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{D}$) sowie der Anionenzusammensetzung, speziell des Verhältnisses Cl^-/Br^- möglich.

Die Chañaral-Mélange repräsentiert ein mittleres Niveau eines Akkretionsprismas und wurde vermutlich durch Unterplattung gebildet. Sie ist ein Beispiel für ein Akkretionsprisma, das nicht die bisher als für Subduktionsumgebungen typisch geltende Hochdruck-Niedrigtemperatur-Metamorphose aufweist. Weitere Beispiele dieses Typs stellen das Kodiak Akkretionsprisma in Alaska und der Shimanto-Komplex in Japan dar.

6 Literatur

- ARCHER D.G. (1992) Thermodynamic properties of the NaCl-H₂O system II: thermodynamic properties of NaCl (aq), NaCl·2 H₂O (cr), and phase equilibria. *Journal of Physical Chemistry Reference Data* 21(4), 793-829.
- ARKAI P. (1991) Chlorite crystallinity: an empirical approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Palaeozoic and Meozoic rocks of northeast Hungary. *Journal of metamorphic Geology* 9, 723-734.
- ARKAI P., MERRIMAN R.J., ROBERTS B., PEACOR D.R. UND TOTH M. (1996) Crystallinity, crystallite size and lattice strain of illite-muscovite and chlorite; comparison of XRD and TEM data for diagenetic to epizonal pelites. *European Journal of Mineralogy* 8(5), 1119-1137.
- ARKAI P., SASSI F.P. UND SASSI R. (1995) Simultaneous measurements of chlorite and illite crystallinity: a more reliable tool for monitoring low- to very low grade metamorphisms in metapelites. A case study from the Southern Alps (NE Italy). *European Journal of Mineralogy* 7, 1115-1128.
- ATKINS P.W. (1987) *Physikalische Chemie*. Wiley-VCh, Weinheim.
- BAHLBURG H. (1987a) Sedimentology, petrology and geotectonic significance of the Paleozoic flysch in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Neues Jahrbuch der Geologie und Paläontologie, Monatshefte*, 527-559.
- BAHLBURG H. (1987b) Geochemical features of Devonian / Carboniferous flysch greywackes of the North Chilean Coastal Cordillera. *Zentralblatt der Geologie und Paläontologie Teil I*(7/8), 893-904.
- BAHLBURG H. UND BREITKREUZ C. (1991) Paleozoic evolution of active margin basins in the southern Central Andes (northwestern Argentina and northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences* 4(3), 171-188.
- BAHLBURG H. UND BREITKREUZ C. (1993) Differential response of a Devonian-Carboniferous platform-deeper basin system to sea-level change and tectonics, N. Chilean Andes. *Basin Research* 5, 21-40.
- BAHLBURG H. UND HERVÉ F. (1997) Geodynamic evolution and tectonostratigraphic terranes of northwestern Argentina and northern Chile. *GSA Bulletin* 109(7), 869-884.
- BAHLBURG H., BREITKREUZ C. UND ZEIL W. (1986) Paläozoische Sedimente Nordchiles. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A*, 66, 147-168.
- BAILEY S.W. (1980) Summary of recommendations of AIPEA nomenclature committee. *Clay Minerals* 15, 85-93.
- BAKKER R.J. (1997) Clathrates: computer programs to calculate fluid inclusion V-x-properties using clathrate melting temperatures. *Computers & Geosciences* 23(1), 1-18.

- BAKKER R.J. (1998) Improvements in clathrate modeling II: the H₂O-CO₂-CH₄-N₂-CH₄ fluid system. In: HENRIET J.-P. UND MIENERT J. (Hsg.) Gas Hydrates: relevance to world margin stability and climate change. Geological Society of London, Special Publication 137, 75-105.
- BAKKER R.J. (1999) Adaptation of the Bowers and Helgeson (1983) equation of state to the H₂O-CO₂-CH₄-N₂-NaCl system. *Chemical Geology* 154(1-4), 225-236.
- BAKKER R.J. UND DIAMOND L.W. (2000) Determination of the composition and molar volume of H₂O-CO₂ fluid inclusions by microthermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64(10), 1753-1764.
- BAKKER R.J., DUBESSY J. UND CATHELINÉAU M. (1996) Improvements in clathrate modelling I: The H₂O-CO₂ system with various salts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60(10), 1657-1681.
- BAKKER R.J. UND JANSEN J.B.H. (1991) Experimental post-entrapment water loss from synthetic CO₂-H₂O inclusions in natural quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55(8), 2215-2230.
- BAKKER R.J. UND JANSEN J.B.H. (1993) Calculated fluid evolution path versus fluid inclusion data in the COHN system as exemplified by metamorphic rocks from Rogaland, South-west Norway. *Journal of metamorphic Geology* 11(3), 357-370.
- BANNO S. UND SAKAI C. (1989) Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. In: DALY J.S., CLIFF R.A. UND YARDLEY B.W.D. (Hsg.) Evolution of metamorphic belts. Geological Society of London, Special Publication 43, 519-532.
- BELL M.C. (1982) The lower Paleozoic metasedimentary basement of the coastal ranges of Chile between 25°30' and 27°S. *Revista Geológica de Chile* 17, 21-29.
- BELL M.C. (1984) Deformation produced by the subduction of a paleozoic turbidite sequence in northern Chile. *Journal of the Geological Society, London* 141, 339-347.
- BELL M.C. (1987) The origin of the upper paleozoic Chañaral mélange of N Chile. *Journal of the Geological Society of London* 144(4), 599-610.
- BERG K. UND BAUMANN A. (1985) Plutonic and metasedimentary rocks from the Coastal Range of northern Chile: Rb-Sr and U-Pb isotopic systems. *Earth and Planetary Science Letters* 75, 101-115.
- BERG K. UND BREITKREUZ C. (1983) Mesozoische Plutone in der nordchilenischen Küstenkordillere: Petrogenese, Geochronologie, Geochemie und Geodynamik mantelbetonter Magmatite. *Geotektonische Forschungen* 66, 1-107.
- BERG K., BREITKREUZ C., DAMM K.W., PICHOWIAK S. UND ZEIL W. (1983) The North-Chilean coast range; an example for the development of an active continental margin. *Geologische Rundschau* 72(2), 715-731.
- BLENKINSOP T.G. (1988) Definition of low-grade metamorphic zones using illite crystallinity. *Journal of metamorphic Geology* 6(5), 623-636.
- BORISENKO A.S. (1977) Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Soviet Geology and Geophysics* 18(8), 11-18.

- BOWERS T. UND HELGESON H. (1983) Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geological systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47, 1247-1275.
- BRAY C.J. UND KARIG D.E. (1985) Porosity of sediments in accretionary prisms and some implications for dewatering processes. *Journal of Geophysical Research* 90(B1), 768-778.
- BREITKREUZ C., BAHLBURG H., DELAKOWITZ B. UND PICHOWIAK S. (1989) Volcanic events in the Paleozoic central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 2, 171-189.
- BROOK M., PANKHURST R.J., SHEPHERD T.J. UND SPIRO B. (1986) Andchron. Andean geochronology and metallogensis. Overseas Development Agency, Open File Report, 1-83.
- BURKE E.A.J. (1994) Raman microspectrometry of fluid inclusions. In: DE VIVO B. UND FREZZOTTI M.L. (Hsg.) *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Working Group "Inclusions in Minerals" (IMA), Short Course, 25-44.
- CARITAT P.D., HUTCHEON I. UND WALSHE J.L. (1993) Chlorite geothermometry: a review. *Clays and Clay Minerals* 41(2), 219-239.
- CARSWELL D.A. UND HARLEY S.L. (1990) Mineral barometry and thermometry. In: CARSWELL D.A. (Hsg.) *Eclogite facies rocks*. Blackie, Glasgow, 83-110.
- CATHELINEAU M. (1988) Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Minerals* 23, 471-485.
- CATHELINEAU M. UND IZQUIERDO G. (1985) A chlorite solid solution geothermometer The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 91, 235-244.
- DALLA TORRE M., DE CAPITANI C. ET AL. (1996) Very low-temperature metamorphism of shales from the Diablo Range, Franciscan Complex, California: New constraints on the exhumation paths. *GSA Bulletin* 108(5), 578-601.
- DAMM K.W. UND PICHOWIAK S. (1981) Geodynamik und Magmengenese in der Küstenkordillere Nordchiles zwischen Taltal und Chanaral. *Geotektonische Forschungen* 61, 166.
- DAMM K.W. UND PICHOWIAK S. (1981) Petrologie, Geochronologie und Geochemie der Magmatite im Küstenkordillereensegment Taltal-Chanaral (Nordchile). *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I*(3-4), 319-332.
- DAMM K.W., PICHOWIAK S. UND ZEIL W. (1981) The plutonism in the North Chilean coast-range and its geodynamic significance. *Geologische Rundschau* 70(3), 1054-1076.
- DE VIVO B. UND FREZZOTTI M.L. (Hsg.) (1994) *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Short Course, Working Group "Inclusions in Minerals" (IMA).
- DEER W.A., HOWIE R.A. UND ZUSSMAN J. (1992) *An introduction to the rock-forming minerals*. Longman, Essex.

- DÍAZ F. (1986) Hoja Salvador, borradores de terreno (unveröffentl.). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- DI TULLIO L. UND HADA S. (1993) Regional and local variations in the thermal history of the Shimanto Belt, Southwest Japan. In: UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 103-114.
- DUAN Z., MØLLER N. UND WEARE J.H. (1992a) An equation of state for the CH₄-CO₂-H₂O system I: Pure systems from 0 to 1000°C and 0 to 8000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56(7), 2605-2617.
- DUAN Z., MØLLER N. UND WEARE J.H. (1992b) An equation of state for the CH₄-CO₂-H₂O II: Mixtures from 50 to 1000°C and 0 to 1000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56(7), 2619-2631.
- DUAN Z., MØLLER N. UND WEARE J.H. (1992c) Molecular dynamics simulation of PVT properties of geological fluids and a general equation of state of nonpolar and weakly polar gases up to 2000 K and 20.000 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56(10), 3839-3845.
- DUAN Z., MØLLER N. UND WEARE J.H. (1996) A general equation of state for supercritical fluid mixtures and molecular dynamics simulation of mixture PVTX-properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 1209-1216.
- DUBESSY J., AUDEOUD D., WILKINS R. UND KOSZTOLANYI C. (1982) The use of the Raman microprobe MOLE in the determination of the electrolytes dissolved in the aqueous phase of fluid inclusions. *Chemical Geology* 37(1-2), 137-150.
- EBERL D.D. UND BLUM A. (1993) Illite crystallite thickness by X-ray diffraction. In: REYNOLDS R.C. UND WALKER J.R. (Hsg.) Computer applications to X-ray powder diffraction analysis of clay minerals. The Clay Minerals Society, Evergreen, CO, United States, CMS Workshop Lectures 5, 124-153.
- EBERL D.D., SRODÓN J., KRÁLIK M., TAYLOR B.E. UND PETERMAN Z.E. (1990) Ostwald ripening of clays and metamorphic minerals. *Science* 248, 474-477.
- EBERL D.D., SRODON J., LEE M., NADEAU P.H. UND NORTHROP H.R. (1987) Sericite from the Silverton Caldera, Colorado; correlation among structure, composition, origin, and particle thickness. *American Mineralogist* 72(9-10), 914-934.
- ESSENE E.J. (1989) The current status of thermobarometry in metamorphic rocks. In: DALY J.S., CLIFF R.A. UND YARDLEY B.W.D. (Hsg.) Evolution of metamorphic belts. Geological Society of London, Special Publication 43, 1-44.
- ESSENE E.J. UND PEACOR D.R. (1995) Clay mineral thermometry - a critical perspective. *Clays and Clay Minerals* 43(5), 540-553.
- FARRAR E., CLARK A. ET AL. (1970) K-Ar evidence for the post-Paleozoic migration of granitic intrusion foci in the Andes of northern Chile. *Earth and Planetary Science Letters* 10, 60-66.
- FOSTER M.D. (1962) Interpretation of the composition and a classification of the chlorites.

- FREY M. (1987) Low-temperature metamorphism. Blackie and Son Ltd., Glasgow.
- FREY M., DE CAPITANI C. UND LIU J.G. (1991) A new petrogenetic grid for low-grade metabasites. *Journal of metamorphic Geology* 9, 497-509.
- FREY M. UND ROBINSON D. (Hsg.) (1999) Low-grade metamorphism, Blackwell Science Ltd., Oxford, 313 S.
- GODOY P.-B. E. UND LARA P. L. (1998) Mapas geológicos, Hojas Chañaral y Diego de Almagro, No. 5-6. Servicio Nacional de Geología y Minería, 1:100.000
- GOLDSTEIN R.H. UND REYNOLDS T.J. (1994) Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course*, 31, 198 S.
- GRADSTEIN F.M. UND OGG J. (1996) A Phanerozoic time scale. *Episodes* 19(1&2), 3.
- GUIDOTTI C.V. UND SASSI F.P. (1976) Muscovite as a petrogenic indicator mineral in pelitic schists. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen* 127(2), 97-142.
- GUIDOTTI C.V. UND SASSI F.P. (1986) Classification and correlation of metamorphic facies series by means of muscovite b0 data from low-grade metapelites. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen* 153(3), 363-380.
- GUIDOTTI C.V. UND SASSI F.P. (1998) Petrogenetic significance of Na-K white mica mineralogy: recent advances for metamorphic rocks. *European Journal of Mineralogy* 10, 815-854.
- GUIDOTTI C.V., SASSI F.P. UND BLENCOE J.G. (1989) Compositional controls on the a and b cell dimensions of 2M₁ muscovite. *European Journal of Mineralogy* 1, 71-84.
- GUIDOTTI C.V., YATES M.G., DYAR M.D. UND TAYLOR M.E. (1994) Petrogenetic implications of the Fe³⁺ content of muscovite in pelitic schists. *American Mineralogist* 79, 793-795.
- HASEBE N., TAGAMI T. UND NISHIMURA S. (1993) Evolution of the Shimanto accretionary complex; a fission-track thermochronologic study. In: UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 121-136.
- HIBBARD J.P., LAUGHLAND M.M., KANG S.M. UND KARIG D. (1993) The thermal imprint of spreading ridge subduction on the upper structural levels of an accretionary prism, Southwest Japan. In: UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 83-101.
- HILLIER S. UND VELDE B. (1991) Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites. *Clay Minerals* 26, 149-268.
- HOLLAND T.J.B. (1983) The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic paroxenes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 82, 214-220.

- HOLLISTER L.S. (1990) Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. *Journal of Structural Geology* 12(7), 895-901.
- HOLLISTER L.S. UND CRAWFORD M.L. (Hsg.) (1981) Fluid inclusions, applications to petrology. Mineralogical Society of Canada, Short Course Handbook 6, 304 S.
- HOLMES H.F., SIMONSON J.M. UND MESMER R.E. (1997) Additions and corrections: Aqueous solutions of the alkaline earth metal chlorides. Corrected constants for the ion-interaction model. *Journal of Chemical Thermodynamics* 29, 1363-1373.
- JIANG W.T., PEACOR D.R. UND BUSECK P.R. (1994) Chlorite geothermometry? Contamination and apparent octahedral vacancies. *Clays and Clay Minerals* 42(5), 593-605.
- JOHNSON E.L. UND HOLLISTER L.S. (1995) Syndeformational fluid trapping in quartz; determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO₂ fluid inclusions during grain-boundary migration. *Journal of metamorphic Geology* 13(2), 239-249.
- JOWETT E.C. (1991) Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Program and Abstracts 16, A62.
- KASTNER M., ELDERFIELD H. UND MARTIN J.B. (1991) Fluids in convergent margins: what do we know about their composition, origin, role in diagenesis and importance for oceanic chemical fluxes? In: TARNEY J., PICKERING K.T., KNIPE R.J. UND DEWEY J.F. (Hsg.) *The behaviour and influence of fluids in subduction zones*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Special Issue 335(1638), 243-259.
- KASTNER M. UND LE PICHON X. (1992) Fluids in convergent margins. *Earth and Planetary Science Letters* 109(3-4), 275-504.
- KISCH H.J. (1980) Incipient metamorphism of Cambro-Silurian clastic rocks from the Jämtland Supergroup, central Scandinavian Caledonides, western Sweden: illite crystallinity and 'vitrinite' reflectance. *Journal of the Geological Society, London* 137, 271-288.
- KISCH H.J. (1987) Correlation between indicators of very low-grade metamorphism. In: FREY M. (Hsg.) *Low temperature metamorphism*. Blackie & Son Ltd., Glasgow, 227-300.
- KRANIDIOTIS P. UND MACLEAN W.H. (1987) Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology* 82, 1898-1911.
- KÜBLER B. (1967) La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. *Colloques de Neuchâtel 1966, Etages tectoniques*, 105-121.
- KÜBLER B. (1968) Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. *Centre de Recherches de Pau (SNPA) Bulletin* 2, 385-397.
- KÜBLER B. (1984) Les indicateurs de transformations physiques et chimiques dans la diagenèse, température et calorimétrie. In: LAGACHE M. (Hsg.) *Thermométrie et barométrie géologiques*. Société Française de Minéralogie et Cristallographie, 489-596.

- KÜBLER B. (1990) "Cristallinité" de l'illite et mixed-layers; brève révision. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 70/1, 89-93
- KÜSTER M. UND STÖCKHERT B. (1997) Density changes of fluid inclusions in high-pressure low-temperature metamorphic rocks from Crete: A thermobarometric approach based on the creep strength of the host mineral. Lithos 41, 151-167.
- LAUGHLAND M.M. UND UNDERWOOD M.B. (1993) Vitrinite reflectance and estimates of paleotemperature within the upper Shimanto Group, Muroto Peninsula, Shikoku, Japan. In: UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 25-43.
- LEAKE B.E., WOOLLEY A.R. ET AL. (1997) Nomenclature of amphiboles - Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. European Journal of Mineralogy 9, 623-651.
- LEEDER O., THOMAS R. UND KLEMM W. (1987) Einschlüsse in Mineralen. Enke-Verlag, Stuttgart.
- LEONI L., SARTORI F. UND TAMPONI M. (1998) Composition variation in K-white micas and chlorites coexisting in Al- saturated metapelites under late diagenetic to low-grade metamorphic conditions (Internal Liguride Units, Northern Apennines, Italy). European Journal of Mineralogy 10(6), 1321-1339.
- LIU J.G., MARUYAMA S. UND CHO M. (1987) Very low-grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks - mineral assemblages and mineral facies. In: FREY M. (Hsg.) Low temperature metamorphism. Blackie & Son Ltd., Glasgow, 59-113.
- MARTIN J.B., KASTNER M. UND EGEBERG P.K. (1995) Origins of saline fluids at convergent margins. In: Active margins and marginal basins of the western Pacific. Geophysical Monograph 88, 219-240.
- MARUYAMA S. UND LIU J.G. (1985) Low-temperature recrystallization of Franciscan greywackes from Pacheco Pass, California. Mineralogical Magazine 49, 345-355.
- MASSONNE H.-J. UND SZPURKA Z. (1997) Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the systems K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O and K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O . Lithos 41(1-3), 229-250.
- MASSONNE H.J. UND SCHREYER W. (1987) Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz. Contributions to Mineralogy and Petrology 96(2), 212-224.
- MASSONNE H.J. UND SCHREYER W. (1989) Stability field of the high-pressure assemblage, talc + phengite and two new phengite barometers. European Journal of Mineralogy 1(3), 391-410.
- MERCADO W. M. (1978) Carta geologica de Chile, Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera, No. 27. Instituto de Investigaciones Geologicas, 1:100.000.
- MERRIMAN R.J., ROBERTS B. UND PEACOR D.R. (1990) A transmission electron microscope study of white mica crystallite size distribution in a mudstone to slate transitional sequence, North Wales, UK. Contributions to Mineralogy and Petrology 106(1), 27-40.

- MILLER H. (1970) Vergleichende Studien an prämesozoischen Gesteinen Chiles unter besonderer Berücksichtigung ihrer Kleintektonik. *Geotektonische Forschungen* 36, 1-64.
- MOORE D.M. UND REYNOLDS R.C. (1989) *X-ray Diffraction and Identification of Clay Minerals*. Oxford University Press, Oxford.
- MULLIS J. (1987) Fluid inclusion studies during very low-grade metamorphism. In: FREY M. (Hsg.) *Low-temperature metamorphism*. Blackie and Son Ltd., Glasgow, 163-199.
- NAKAJIMA T., BANNO S. UND SUZUKI T. (1977) Reactions leading to the disappearance of pumpellyite in low-grade metamorphic rocks of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Journal of Petrology* 18(2), 263-284.
- NIETO F. UND SÁNCHEZ-NAVAS A. (1994) A comparative XRD and TEM study of the physical meaning of the white mica 'crystallinity' index. *European Journal of Mineralogy* 6, 611-621.
- PASSCHIER C.W. UND TROUW R.A.J. (1998) *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin, 289 S.
- PEACOCK S.M. (1990) Fluid processes in subduction zones. *Science* 24, 329-337.
- PEACOCK S.M. (1991) Numerical simulation of subduction zone pressure-temperature-time paths; constraints on fluid production and arc magmatism. In: TARNEY J., PICKERING K.T., KNIPE R.J. UND DEWEY J.F. (Hsg.) *The behaviour and influence of fluids in subduction zones*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Special Issue 335(1638)*, 341-353.
- PEACOCK S.M. (1996) Thermal and petrologic structure of subduction zones. In: BEBOUT G.E., SCHOLL D.W., KIRBY S.H. UND PLATT J.P. (Hsg.) *Subduction top to bottom*. *Geophysical Monograph* 96, 119-133.
- PICHLER H. UND SCHMITT-RIEGRAF C. (1987) *Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 230 S.
- ROEDDER E. (1984) Fluid Inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy* 12, 644 S.
- SAMPLE J.C. UND MOORE J.C. (1987) Structural style and kinematics of an underplated slate belt, Kodiak and adjacent islands, Alaska. *GSA Bulletin* 99(1), 7-20.
- SASSI F.P., KRÄUTNER H.G. UND ZIRPOLI G. (1976) Recognition of pressure character in greenschist facies metamorphism. *Schweizerische mineralogische petrographische Mitteilungen* 56, 427-434.
- SCHMIDT D. UND LIVI K.J.T. (1999) HRTEM and SAED investigations of polytypism, stacking disorder, crystal growth, and vacancies in chlorites from subgreenschist facies outcrops. *American Mineralogist* 84(1-2), 160-170.
- SCHMIDT D., SCHMIDT S.T., MULLIS J., MAHLMANN R.F. UND FREY M. (1997) Very low grade metamorphism of the Taveyanne formation of western Switzerland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 129(4), 385-403.

- SHAU Y.-H., PEACOR D.R. UND ESSENE E.J. (1990) Corrensite and mixed-layer chlorite/corrensite in metabasalt from northern Taiwan: TEM/AEM, EMPA, XRD and optical studies. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 105, 123-142.
- SHEPHERD T.J., RANKIN A.H. UND ALDERTON D.H.M. (1985) A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie & Son Limited, Glasgow, 239 S..
- SISSON V.B., HOLLISTER L.S. UND ONSTOTT T.C. (1989) Petrologic and age constraints on the origin of a low-pressure/ high-temperature metamorphic complex, southern Alaska. *Journal of Geophysical Research* 94(B4), 4392-4410.
- SMITH M.P. UND YARDLEY B.W.D. (1999) Fluid evolution during metamorphism of the Otago Schist, New Zealand: (I) Evidence from fluid inclusions. *Journal of metamorphic Geology* 17, 173-186.
- SPEAR F.S. (1993) Metamorphic phase equilibria and P-T-t-paths.
- SRODON J. (1984) X-ray powder diffraction identification of illitic materials. *Clays and Clay Minerals* 32(5), 337-349.
- STERNER S.M. UND BODNAR R.J. (1989) Synthetic fluid inclusions - VII. Re-equilibration of fluid inclusions in quartz during laboratory-simulated metamorphic burial and uplift. *Journal of metamorphic Geology* 7, 243-260.
- STÖCKHERT B., MASSONNE H.-J. UND NOWLAN E.U. (1997) Low differential stress during high-pressure metamorphism; the microstructural record of a metapelite from the Eclogite Zone, Tauern Window, Eastern Alps. *Lithos* 41(1-3), 103-118.
- STRECKEISEN A. (1976) To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews* 12(1), 1-33.
- TARNEY J., PICKERING K.T., KNIPE R.J. UND DEWEY J.F. (Hsg.) (1991) The behaviour and influence of fluids in subduction zones. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Special Issue* 335(1638), 192 S.
- TATASU A. (1989) P-T-histories of peridotite and amphibolite tectonic blocks in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. In: DALY J.S., CLIFF R.A. UND YARDLEY B.W.D. (Hsg.) *Evolution of metamorphic belts*. Geological Society of London, Special Publication 43, 535-538.
- TOURET J. (1977) The significance of fluid inclusions in metamorphic rocks. *NATO ASI Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences* 30, 203-227.
- TOURET J. (1977) Utilisation thermobarométrique du CO₂ en pétrographie (reaction cordierite-grenat). *Bulletin de la Société Géologique de France, Supplement* 19(5), 280-283.
- ULRIKSEN C.E. (1979) Regional geology, geochronology and metallogeny of the coastal cordillera of Chile between 20°30' and 26° S. Master's, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada, 221 S.
- UNDERWOOD M.B., HIBBARD J.P. UND DI TULLIO L. (1993a) Geological summary and conceptual framework for the study of thermal maturity within the Eocene-Miocene Shimanto Belt, Shikoku, Japan. In:

- UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 1-24.
- UNDERWOOD M.B., LAUGHLAND M.M. UND KANG S.M. (1993b) A comparison among organic and inorganic indicators of diagenesis and low-temperature metamorphism, Tertiary Shimanto Belt, Shikoku, Japan. In: UNDERWOOD M.B. (Hsg.) Thermal evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan; an example of ridge-trench interaction. Geological Society of America, Special Paper 273, 45-61.
- UNDERWOOD M.B., O L.J.D. UND STRONG R.H. (1988) Contrasts in thermal maturity within terranes and across terrane boundaries of the Franciscan Complex, Northern California. *Journal of Geology* 96(4), 399-415.
- VELDE B. (1965) Phengite micas; synthesis, stability, and natural occurrence. *American Journal of Science* 263(10), 886-913.
- VON HUENE R. (1984) Tectonic processes along the front of modern convergent margins; research of the past decade. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 12, 359-381.
- VROLIJK P. (1987) Tectonically driven fluid flow in the Kodiak accretionary complex, Alaska. *Geology* 15(5), 466-469.
- VROLIJK P. UND G. M. (1990) Fluid pressure history in subduction zones; evidence from fluid inclusions in the Kodiak accretionary complex, Alaska. In: BREDEHOEFT J.D. (Hsg.) The role of fluids in crustal processes. *Studies in Geophysics*, 148-157.
- VROLIJK P., MYERS G. UND MOORE J.C. (1988) Warm fluid migration along tectonic melanges in the Kodiak accretionary complex, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 93(B9), 10,313-10,324.
- WALLIS S. UND BANNO S. (1990) The Sambagawa Belt; trends in research. *Journal of metamorphic Geology* 8(4), 393-399.
- WARR L.N. (1996a) Standardized clay mineral crystallinity data from the very low-grade metamorphic facies rocks of southern New Zealand. *European Journal of Mineralogy* 8, 115-127.
- WARR L.N. (1998) Tonmineralkristallinität und Kristallitgröße als Indikatoren für die Bedingungen der Diagenese und der niedrigtemperierten Metamorphose in tonführenden Gesteinen. Habilitation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Heidelberg.
- WARR L.N., GREILING R.O. UND ZACHRISSON E. (1996b) Thrust-related very low grade metamorphism in the marginal part of an orogenic wedge, Scandinavian Caledonides. *Tectonics* 15(6), 1213-1229.
- WARR L.N. UND RICE A.H.N. (1994) Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. *Journal of metamorphic Geology* 12, 141-152.
- WIEWIORA A. UND WEISS Z. (1990) Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition; II, The chlorite group. *Clay Minerals* 25(1), 83-92.

- WILLNER A.P., HERVÉ F. UND MASSONNE H.-J. (2000) Mineral chemistry and pressure-temperature evolution of two contrasting high-pressure-low-temperature belts in the Chonos Archipelago, Southern Chile. *Journal of Petrology* 41(3), 309-330.
- WIMMENAUER W. (1985) *Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine*. Enke, Stuttgart, 382 S.
- XAVIER R.P. UND FOSTER R.P. (1999) Fluid evolution and chemical controls in the Fazenda Maria Preta (FMP) gold deposit, Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil. *Chemical Geology* 154(1-4), 133-154.
- YARDLEY B.W. (1997) The evolution of fluids through the metamorphic cycle. In: YARDLEY B.W. UND JAMTVEIT B. (Hsg.) *Fluid flow and transport in rocks*. Chapman & Hall, London, 99-121.
- ZHANG Y.G. UND FRANTZ J.D. (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology* 64(3-4), 335-350.

7 Anhang

7.1 Messparameter

7.1.1 Röntgendiffraktometrie

Die röntgenographischen Analysen wurden mit einem Bragg-Brentano-Einkreisdiffraktometer (Siemens D500) bei 40 kV und 30 mA $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -Strahlung durchgeführt (Aperturblenden alle 1° , Detektorblende $0,15^\circ$).

Messparameter zur Bestimmung der Tonmineralkristallinität (Kap. 3.1.4):
Winkelbereich von 2° bis $50^\circ 2\theta$; Schrittweite $0.02^\circ 2\theta$; Zählrate 2.0 s (d.h. Scanrate $0,6^\circ 2\theta/\text{min}$).

Messparameter zur Bestimmung der b-Parameter (Kap. 3.3):
Die Proben wurden im Bereich zwischen 58° und $64^\circ 2\theta$ mit einer Geschwindigkeit von $0,06^\circ 2\theta/\text{min}$ gemessen.

Die Röntgenprofile wurden mit dem Softwareprogramm Siemens DIFFRAC-AT (Version 3.0) und mit dem Programm MACDIFF (Version 4.07, programmiert von Dr. Rainer Petschik, Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Frankfurt) weiterbearbeitet. Die $^\circ 2\theta$ -Werte wurden jeweils auf Quarz als internen Standard korrigiert. Die gemessenen Peaks wurden durch ein mathematisches Reflexanpassungsverfahren mit einer Split Pearson VII Funktion modelliert ("Peak-Fitting").

7.1.2 Elektronenstrahlmikrosonde

Die Mikrosondenuntersuchungen wurden an mit Kohlenstoff bedampften polierten Dünnschliffen durchgeführt. Berechnung der Formelgehalte für die jeweiligen Elemente aus den Oxidgehalten erfolgte mittels des Excelprogrammes FORMELCALC von H.-P. Meyer, Mineralogisches Institut der Universität Heidelberg (mit eigenen Ergänzungen).

Messparameter Heidelberg (CAMECA SX51):

Strahlstrom $20 \mu\text{A}$, Beschleunigungsspannung 15 kV, PAP-Matrixkorrektur, Messdauer: 10s Peak, 5s Hintergrund
Standards: Albit (Na), MgO (Mg), Wollastonit (Ca, Si), Fe_2O_3 (Fe), Cr_2O_3 (Cr), TiO_2 (Ti), Al_2O_3 (Al), Orthoklas (K), Rhodonit (Mn)

Messparameter Münster (JEOL JEM8600):

Strahlstrom $15 \mu\text{A}$, Beschleunigungsspannung 15 kV, ZAF-Matrixkorrektur, Messdauer: 20s Peak, 5s Hintergrund
Standards: Jadeit (Na, Al), Diopsid (Mg, Ca, Si), Hämatit (Fe), Cr_2O_3 (Cr), TiO_2 (Ti), Sanidin (K), Rhodonit (Mn)

7.1.3 Ramanspektroskopie

Messparameter Leoben:

Labram der Firma Isa (Dilor-JobinYvon-Spex). Auswertung mit Software Labspec der Firma Dilor; externer grüner Feststofflaser (532,2 nm, Anregungsenergie 56 mW, Aperturblende 100, Konfokalblende 1000), Messdauer 20s, fünffache Akkumulation der Spektren.

Messparameter Amsterdam:

Microdil-28 der Firma Dilor. Auswertung vor Ort von Dr. Burke; externer Ar-Ionen-Laser (1500 mW Energie, 514 nm), Messdauer 5 s, zehnfache Akkumulation der Spektren.

7.2 Röntgendiffraktometrie

7.2.1 Daten

Tabelle 7-1: Zusammensetzung der Tonmineralfraktion. Ill: Illit, Sm: Smektit, arag: Aragonit, goe: Goethit, hem: Hämatit, in Klammern gekennzeichnet sind geringe Gehalte.

| Probe | Smektit | Illit | Ill/Sm, %Ill | Chlorit | Quarz | Calcit | Plagioklas | K-Feldspat | Sonstiges |
|---------|---------|-------|--------------|---------|-------|--------|------------|------------|--------------|
| BA 4 | (x) | x | | x | x | | x | | |
| BA 5 | x | x | | x | x | | x | | |
| BA 6 | | x | x | x | x | | x | | |
| PH 11 | | x | | | x | x | | | arag |
| PH 13 | | x | | x | x | x | x | | arag |
| PH 15 | | x | | x | x | x | | x | |
| PH 17 | | x | | x | x | x | x | | |
| PH 19 | | x | | x | x | x | x | | |
| PH 21 | | x | | x | x | x | x | | |
| PH 23 | (x) | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 5 | (x) | x | | x | x | | x | | |
| PuA 7 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 9 | | x | | x | x | | | | |
| PuA 12 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 16B | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 18 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 20 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 22 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 24 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 26 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 28 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 30A | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 30B | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 33 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 36B | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 38 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 40 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 42 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 44 | (x) | x | | x | x | | x | | |
| PuA 46 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 50 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 52 | (x) | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 56 | | x | | x | x | | x | | |
| PuA 57 | | x | | x | x | | x | x | |
| PuA 58 | (x) | x | | x | x | | x | | |
| PuA 60 | | x | | x | x | | x | | |
| QA 1 | x | x | | x | x | | x | x | |
| QA 2 | x | x | ≈30 | x | x | | x | | |
| QA 3 | | x | ≈20 | x | x | | x | (x) | |
| QA 9 | x | x | | x | x | | x | | hem |
| QA 10 | x* | x | | x | x | | x | | |
| QA 11 | | x | 50-60 | x | x | | x | (x) | |
| QA 13 | | x | ≈20 | x | x | | x | x | |
| QA 14 | | x | ≈30 | x | | | | | goe? |
| QA 15 | x | x | | x | x | | x | | |
| QI 2 | (x) | x | | x | x | | x | | (goe) |
| QI 3 | | x | | x | x | | x | | goe |
| QI 4 | | x | | x | x | | (x) | | (goe), (hem) |
| QI 5 | (x) | x | | x | x | | x | | goe |
| QI 7 | | x | | x | x | | x | | goe? |
| QI 9 | | x | | x | | | (x) | | goe |
| QI 10 | | x | | x | (x) | | | | goe |
| QI 12 | x | x | | x | x | | (x) | | goe |
| QI 13 | x | x | | x | x | | x | | goe |
| QI 14 | x | x | | x | x | | x | | goe |
| QVQ 3 | (x) | x | | x | x | | x | | |
| QVQ 5 | x | x | | x | x | | x | | |
| QVQ 8 | x | x | | x | x | | x | | (goe) |
| QVQ 11 | x | x | | x | x | | x | | |
| QVQ 14 | (x) | x | | x | x | | | | (goe) |
| QVQ 15 | (x) | x | | x | (x) | | | | |
| QVQ 17 | x | x | ≈75 | x | (x) | | | | goe |

Tabelle 7-2: Rohdaten (EXP) und kalibrierte Daten (CIS) für die Halbwertsbreite der verschiedenen Illit-Peaks (alle Angaben in $\Delta^{\circ}2\theta$)

| Probe | Illit 001 | | | | Illit 002 | | | | Illit 005 | | | |
|---------|----------------|------|--------------|------|----------------|------|--------------|------|----------------|------|--------------|------|
| | luftgetrocknet | | glykolisiert | | luftgetrocknet | | glykolisiert | | luftgetrocknet | | glykolisiert | |
| | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS |
| BA 4 | 0,32 | 0,36 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,32 | 0,24 | 0,30 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,31 |
| BA 5 | 0,37 | 0,41 | 0,33 | 0,37 | 0,24 | 0,29 | 0,23 | 0,29 | 0,22 | 0,28 | 0,21 | 0,27 |
| BA 6 | 0,46 | 0,48 | 0,37 | 0,41 | 0,25 | 0,31 | 0,24 | 0,29 | 0,26 | 0,31 | 0,28 | 0,33 |
| PH 11 | 0,23 | 0,28 | | | | | | | | | | |
| PH 13 | 0,26 | 0,31 | | | 0,24 | 0,29 | | | | | | |
| PH 15 | 0,24 | 0,29 | | | 0,22 | 0,27 | | | 0,21 | 0,27 | | |
| PH 17 | 0,27 | 0,32 | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PH 19 | 0,23 | 0,28 | | | 0,22 | 0,27 | | | | | | |
| PH 21 | 0,26 | 0,31 | | | 0,21 | 0,27 | | | 0,28 | 0,32 | | |
| PH 23 | 0,33 | 0,37 | 0,24 | 0,29 | 0,25 | 0,30 | 0,22 | 0,27 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,30 |
| PuA 5 | 0,29 | 0,33 | 0,23 | 0,28 | 0,21 | 0,27 | 0,21 | 0,26 | 0,23 | 0,28 | 0,23 | 0,28 |
| PuA 7 | 0,24 | 0,29 | 0,23 | 0,28 | 0,22 | 0,27 | 0,22 | 0,27 | 0,25 | 0,30 | 0,25 | 0,30 |
| PuA 12 | 0,27 | 0,32 | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 16B | 0,27 | 0,32 | 0,25 | 0,30 | 0,24 | 0,29 | 0,24 | 0,29 | 0,29 | 0,33 | 0,26 | 0,31 |
| PuA 18 | 0,29 | 0,33 | | | 0,25 | 0,30 | | | 0,28 | 0,33 | | |
| PuA 22 | 0,29 | 0,34 | | | 0,26 | 0,30 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 24 | 0,24 | 0,29 | | | 0,21 | 0,27 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 24 | 0,25 | 0,30 | | | 0,21 | 0,27 | | | 0,24 | 0,29 | | |
| PuA 26 | 0,25 | 0,30 | | | 0,22 | 0,28 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 28 | 0,27 | 0,32 | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,30 | 0,34 | | |
| PuA 30A | 0,27 | 0,31 | | | 0,23 | 0,28 | | | 0,29 | 0,33 | | |
| PuA 30B | 0,26 | 0,30 | | | 0,23 | 0,28 | | | 0,24 | 0,29 | | |
| PuA 33 | 0,32 | 0,36 | | | 0,26 | 0,31 | | | 0,30 | 0,35 | | |
| PuA 36B | 0,26 | 0,31 | | | 0,23 | 0,28 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 38 | 0,27 | 0,32 | 0,25 | 0,30 | 0,23 | 0,28 | 0,24 | 0,29 | 0,27 | 0,32 | 0,27 | 0,31 |
| PuA 40 | 0,24 | 0,29 | | | 0,22 | 0,27 | | | 0,24 | 0,29 | | |
| PuA 42 | 0,28 | 0,33 | 0,26 | 0,32 | 0,25 | 0,31 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,34 | 0,28 | 0,33 |
| PuA 44 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,32 | 0,24 | 0,29 | 0,23 | 0,29 | 0,28 | 0,33 | 0,25 | 0,31 |
| PuA 46 | 0,24 | 0,30 | | | 0,22 | 0,28 | | | 0,26 | 0,32 | | |
| PuA 50 | 0,24 | 0,30 | | | 0,21 | 0,27 | | | 0,25 | 0,30 | | |
| PuA 52 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,25 | 0,30 | 0,25 | 0,30 | 0,26 | 0,31 | 0,24 | 0,30 |
| PuA 56 | 0,27 | 0,32 | 0,28 | 0,33 | 0,23 | 0,29 | 0,24 | 0,29 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 |
| PuA 57 | 0,29 | 0,34 | 0,25 | 0,31 | 0,22 | 0,28 | 0,19 | 0,26 | | | 0,46 | 0,48 |
| PuA 58 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,31 | 0,23 | 0,29 | 0,23 | 0,29 | 0,26 | 0,32 | 0,27 | 0,32 |
| PuA 60 | 0,25 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,24 | 0,30 | 0,23 | 0,29 | 0,28 | 0,33 | 0,26 | 0,31 |
| QA 1 | 0,34 | 0,38 | 0,30 | 0,34 | 0,24 | 0,29 | 0,25 | 0,30 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,30 |
| QA 2 | 0,35 | 0,39 | 0,32 | 0,36 | 0,29 | 0,34 | 0,26 | 0,31 | 0,33 | 0,37 | 0,33 | 0,37 |
| QA 3 | 0,48 | 0,50 | 0,22 | 0,28 | 0,26 | 0,32 | 0,26 | 0,31 | 0,29 | 0,33 | 0,28 | 0,33 |
| QA 9 | 0,26 | 0,32 | 0,21 | 0,27 | 0,24 | 0,30 | 0,23 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,31 | 0,36 |
| QA 10 | 0,29 | 0,34 | | | 0,22 | 0,28 | | | 0,29 | 0,34 | | |
| QA 11 | 0,34 | 0,38 | 0,22 | 0,28 | 0,27 | 0,32 | 0,24 | 0,30 | 0,32 | 0,36 | 0,33 | 0,37 |
| QA 13 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,33 | 0,26 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,31 | 0,35 | 0,30 | 0,35 |
| QA 14 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,27 | 0,33 | 0,33 | 0,37 | 0,32 | 0,37 |
| QA 15 | 0,26 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,23 | 0,29 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,34 | 0,29 | 0,33 |
| QI 2 | 0,29 | 0,34 | 0,26 | 0,31 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,31 | 0,30 | 0,34 | 0,36 | 0,40 |
| QI 3 | 0,28 | 0,33 | 0,29 | 0,33 | 0,26 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,32 | 0,36 | 0,34 | 0,38 |
| QI 4 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,30 | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,30 | 0,33 | 0,37 | 0,33 | 0,37 |
| QI 5 | 0,32 | 0,36 | 0,30 | 0,35 | 0,28 | 0,33 | 0,29 | 0,34 | 0,34 | 0,38 | 0,35 | 0,39 |
| QI 7 | 0,35 | 0,39 | 0,31 | 0,35 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,42 | 0,45 | 0,41 | 0,44 |
| QI 9 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,45 | 0,35 | 0,39 | 0,44 | 0,47 | 0,40 | 0,43 | 0,48 | 0,50 |
| QI 10 | 0,39 | 0,42 | 0,39 | 0,42 | 0,35 | 0,39 | 0,40 | 0,43 | 0,36 | 0,40 | 0,34 | 0,38 |
| QI 12 | 0,32 | 0,37 | 0,31 | 0,36 | 0,30 | 0,34 | 0,30 | 0,34 | 0,40 | 0,43 | 0,39 | 0,42 |
| QI 13 | 0,33 | 0,37 | 0,31 | 0,35 | 0,27 | 0,33 | 0,24 | 0,30 | 0,26 | 0,32 | 0,25 | 0,30 |
| QI 14 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,25 | 0,30 | 0,24 | 0,30 | 0,25 | 0,31 | 0,24 | 0,30 |
| QVQ 3 | 0,39 | 0,43 | 0,35 | 0,39 | 0,26 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,36 | 0,40 | 0,35 | 0,39 |
| QVQ 5 | 0,35 | 0,39 | 0,32 | 0,36 | 0,28 | 0,33 | 0,26 | 0,31 | 0,37 | 0,40 | 0,36 | 0,40 |
| QVQ 8 | 0,56 | 0,56 | 0,40 | 0,43 | 0,30 | 0,35 | 0,27 | 0,32 | 0,39 | 0,43 | 0,39 | 0,42 |
| QVQ 11 | 0,38 | 0,41 | 0,36 | 0,39 | 0,27 | 0,32 | 0,27 | 0,32 | 0,41 | 0,44 | 0,39 | 0,42 |
| QVQ 14 | 0,31 | 0,35 | 0,30 | 0,34 | 0,27 | 0,32 | 0,28 | 0,33 | 0,32 | 0,36 | 0,31 | 0,35 |
| QVQ 15 | 0,32 | 0,36 | 0,30 | 0,34 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,34 | 0,38 | 0,34 | 0,38 |
| QVQ 17 | 0,32 | 0,36 | 0,30 | 0,35 | 0,30 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,36 | 0,40 |

Tabelle 7-3: Rohdaten (EXP) und kalibrierte Daten (CIS) für die Halbwertsbreite der verschiedenen Chlorit-Peaks
(alle Angaben in $\Delta^{\circ}2\theta$)

| Probe | Chlorit 001 | | | | Chlorit 002 | | | | Chlorit 003 | | | |
|---------|----------------|------|--------------|------|----------------|------|--------------|------|----------------|------|--------------|------|
| | luftgetrocknet | | glykolisiert | | luftgetrocknet | | glykolisiert | | luftgetrocknet | | glykolisiert | |
| | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS | EXP | CIS |
| BA 4 | 0,32 | 0,36 | 0,29 | 0,34 | 0,30 | 0,34 | 0,26 | 0,32 | 0,25 | 0,31 | 0,22 | 0,28 |
| BA 5 | 0,55 | 0,56 | 0,45 | 0,47 | 0,48 | 0,50 | 0,44 | 0,46 | 0,40 | 0,43 | 0,45 | 0,47 |
| BA 6 | 0,50 | 0,52 | 0,52 | 0,53 | 0,44 | 0,46 | 0,40 | 0,43 | 0,38 | 0,42 | 0,31 | 0,35 |
| PH 11 | | | | | 0,23 | 0,28 | | | | | | |
| PH 13 | 0,24 | 0,29 | | | 0,27 | 0,32 | | | 0,19 | 0,24 | | |
| PH 15 | 0,26 | 0,31 | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,21 | 0,26 | | |
| PH 17 | 0,26 | 0,31 | | | 0,26 | 0,31 | | | 0,23 | 0,28 | | |
| PH 19 | | | | | 0,21 | 0,26 | | | 0,16 | 0,22 | | |
| PH 21 | 0,25 | 0,30 | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,19 | 0,25 | | |
| PH 23 | 0,32 | 0,36 | 0,24 | 0,29 | 0,30 | 0,34 | 0,22 | 0,27 | 0,22 | 0,27 | 0,20 | 0,26 |
| PuA 5 | 0,29 | 0,34 | 0,23 | 0,28 | 0,28 | 0,33 | 0,24 | 0,29 | 0,22 | 0,27 | 0,21 | 0,26 |
| PuA 7 | | | 0,22 | 0,28 | 0,23 | 0,28 | 0,22 | 0,28 | 0,20 | 0,25 | 0,19 | 0,25 |
| PuA 12 | | | | | 0,27 | 0,31 | | | 0,23 | 0,28 | | |
| PuA 16B | | | 0,26 | 0,31 | 0,25 | 0,30 | 0,24 | 0,29 | 0,22 | 0,27 | 0,21 | 0,26 |
| PuA 18 | | | | | 0,27 | 0,31 | | | 0,23 | 0,29 | | |
| PuA 22 | | | | | 0,29 | 0,33 | | | 0,26 | 0,30 | | |
| PuA 24 | 0,22 | 0,27 | | | 0,22 | 0,28 | | | 0,18 | 0,24 | | |
| PuA 24 | | | | | 0,24 | 0,29 | | | 0,19 | 0,25 | | |
| PuA 26 | | | | | 0,25 | 0,30 | | | 0,22 | 0,28 | | |
| PuA 28 | | | | | 0,25 | 0,30 | | | 0,22 | 0,27 | | |
| PuA 30A | | | | | 0,26 | 0,31 | | | 0,23 | 0,29 | | |
| PuA 30B | | | | | 0,26 | 0,31 | | | 0,24 | 0,29 | | |
| PuA 33 | | | | | 0,36 | 0,40 | | | 0,34 | 0,38 | | |
| PuA 36B | | | | | 0,26 | 0,31 | | | 0,23 | 0,28 | | |
| PuA 38 | | | 0,25 | 0,30 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,31 | 0,23 | 0,29 | 0,23 | 0,28 |
| PuA 40 | | | | | 0,31 | 0,35 | | | 0,31 | 0,35 | | |
| PuA 42 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,33 | 0,27 | 0,32 | 0,24 | 0,30 | 0,22 | 0,28 |
| PuA 44 | 0,33 | 0,37 | 0,35 | 0,39 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,24 | 0,30 | 0,22 | 0,28 |
| PuA 46 | 0,32 | 0,36 | | | 0,30 | 0,35 | | | 0,25 | 0,31 | | |
| PuA 50 | 0,26 | 0,31 | | | 0,24 | 0,30 | | | 0,21 | 0,27 | | |
| PuA 52 | 0,37 | 0,40 | 0,34 | 0,38 | 0,34 | 0,38 | 0,34 | 0,38 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 |
| PuA 56 | 0,30 | 0,35 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,32 | 0,29 | 0,33 | 0,23 | 0,29 | 0,23 | 0,29 |
| PuA 57 | 0,23 | 0,28 | 0,22 | 0,28 | 0,21 | 0,27 | 0,20 | 0,26 | 0,18 | 0,25 | 0,18 | 0,25 |
| PuA 58 | 0,29 | 0,34 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,27 | 0,32 | 0,23 | 0,29 | 0,24 | 0,30 |
| PuA 60 | 0,27 | 0,32 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,31 | 0,26 | 0,31 | 0,23 | 0,29 | 0,21 | 0,27 |
| QA 1 | 0,49 | 0,51 | 0,55 | 0,56 | 0,45 | 0,47 | 0,47 | 0,49 | 0,39 | 0,42 | 0,41 | 0,44 |
| QA 2 | 0,84 | 0,80 | 0,44 | 0,46 | 0,44 | 0,46 | 0,46 | 0,48 | 0,43 | 0,46 | 0,42 | 0,45 |
| QA 3 | 0,92 | 0,87 | | | 0,56 | 0,57 | 0,55 | 0,56 | 0,69 | 0,67 | 0,43 | 0,46 |
| QA 9 | 0,74 | 0,72 | 0,63 | 0,62 | 0,44 | 0,46 | 0,42 | 0,45 | 0,56 | 0,57 | 0,44 | 0,47 |
| QA 10 | 0,28 | 0,33 | | | 0,27 | 0,33 | | | 0,27 | 0,32 | | |
| QA 11 | 0,92 | 0,87 | | | 0,37 | 0,41 | 0,37 | 0,41 | 0,41 | 0,44 | 0,38 | 0,42 |
| QA 13 | | | 0,27 | 0,32 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,32 | 0,27 | 0,32 |
| QA 14 | 0,82 | 0,79 | 0,35 | 0,39 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,40 | 0,34 | 0,38 | 0,34 | 0,38 |
| QA 15 | 0,52 | 0,54 | 0,32 | 0,37 | 0,28 | 0,33 | 0,28 | 0,33 | 0,26 | 0,32 | 0,26 | 0,32 |
| QI 2 | 0,32 | 0,37 | 0,30 | 0,34 | 0,32 | 0,36 | 0,30 | 0,35 | 0,31 | 0,36 | 0,31 | 0,35 |
| QI 3 | 0,34 | 0,38 | 0,31 | 0,35 | 0,31 | 0,35 | 0,31 | 0,35 | 0,30 | 0,35 | 0,30 | 0,35 |
| QI 4 | 0,36 | 0,39 | 0,33 | 0,37 | 0,36 | 0,40 | 0,36 | 0,40 | 0,32 | 0,37 | 0,33 | 0,37 |
| QI 5 | 0,40 | 0,43 | 0,40 | 0,43 | 0,37 | 0,40 | 0,37 | 0,40 | 0,37 | 0,40 | 0,37 | 0,41 |
| QI 7 | 0,41 | 0,44 | 0,38 | 0,41 | 0,34 | 0,38 | 0,33 | 0,38 | 0,35 | 0,39 | 0,37 | 0,41 |
| QI 9 | 0,47 | 0,49 | 0,53 | 0,54 | 0,44 | 0,47 | 0,53 | 0,54 | 0,46 | 0,48 | 0,54 | 0,55 |
| QI 10 | 0,65 | 0,64 | | | 0,67 | 0,66 | 0,68 | 0,67 | | | 0,60 | 0,60 |
| QI 12 | 0,56 | 0,57 | 0,36 | 0,39 | 0,35 | 0,39 | 0,36 | 0,40 | 0,36 | 0,40 | 0,36 | 0,40 |
| QI 13 | 0,53 | 0,54 | 0,44 | 0,46 | 0,47 | 0,49 | 0,44 | 0,47 | 0,50 | 0,51 | 0,43 | 0,46 |
| QI 14 | 0,46 | 0,48 | | | 0,42 | 0,44 | 0,43 | 0,45 | 0,48 | 0,50 | 0,48 | 0,50 |
| QVQ 3 | 0,50 | 0,51 | 0,29 | 0,34 | 0,33 | 0,38 | 0,32 | 0,37 | 0,29 | 0,34 | 0,28 | 0,33 |
| QVQ 5 | 0,51 | 0,52 | 0,32 | 0,36 | 0,43 | 0,46 | 0,40 | 0,43 | 0,34 | 0,38 | 0,35 | 0,39 |
| QVQ 8 | 0,73 | 0,71 | | | 0,42 | 0,45 | 0,44 | 0,46 | 0,34 | 0,38 | 0,37 | 0,41 |
| QVQ 11 | 0,48 | 0,50 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,40 | 0,36 | 0,39 | 0,32 | 0,37 | 0,37 | 0,41 |
| QVQ 14 | 0,35 | 0,39 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,29 | 0,34 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,32 |
| QVQ 15 | 0,37 | 0,41 | 0,32 | 0,37 | 0,32 | 0,37 | 0,31 | 0,36 | 0,31 | 0,36 | 0,30 | 0,35 |
| QVQ 17 | 0,90 | 0,85 | 0,44 | 0,47 | 0,60 | 0,60 | 0,58 | 0,59 | 0,50 | 0,51 | 0,53 | 0,54 |

Tabelle 7-4: Daten zur Bestimmung der b-Parameter (alle Angaben in Å)

| Probe | Quarz | | K-Hellglimmer | | |
|----------------|---------|---|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | d (221) | Verschiebung Δ = $d(\text{exp}) - 1,5406$ | d(060) exp. | d(060) korr. = $d(060) - \Delta$ | b-Parameter = $6 \cdot d(060)$ |
| PH 13 | 1,545 | 0,005 | 1,506 | 1,501 | 9,005 |
| PH 15 | 1,543 | 0,002 | 1,503 | 1,501 | 9,004 |
| PH 21 | 1,543 | 0,003 | 1,505 | 1,502 | 9,013 |
| PH 23 | 1,543 | 0,002 | 1,504 | 1,502 | 9,012 |
| PuA 5 | 1,544 | 0,004 | 1,506 | 1,502 | 9,013 |
| PuA 7 | 1,544 | 0,003 | 1,507 | 1,503 | 9,018 |
| PuA 12 | 1,543 | 0,003 | 1,504 | 1,501 | 9,007 |
| PuA 16B | 1,544 | 0,004 | 1,505 | 1,501 | 9,006 |
| PuA 18 | 1,544 | 0,003 | 1,505 | 1,501 | 9,008 |
| PuA 20 | 1,545 | 0,004 | 1,505 | 1,501 | 9,007 |
| PuA 22 | 1,542 | 0,001 | 1,502 | 1,501 | 9,006 |
| PuA 24 | 1,544 | 0,003 | 1,504 | 1,501 | 9,007 |
| PuA 28 | 1,545 | 0,004 | 1,506 | 1,502 | 9,010 |
| PuA 30A | 1,544 | 0,003 | 1,505 | 1,501 | 9,008 |
| PuA 30B | 1,544 | 0,004 | 1,504 | 1,501 | 9,005 |
| PuA 33 | 1,544 | 0,003 | 1,505 | 1,502 | 9,013 |
| PuA 36B | 1,545 | 0,004 | 1,506 | 1,501 | 9,008 |

7.2.2 stellvertretende Röntgendiffraktogramme

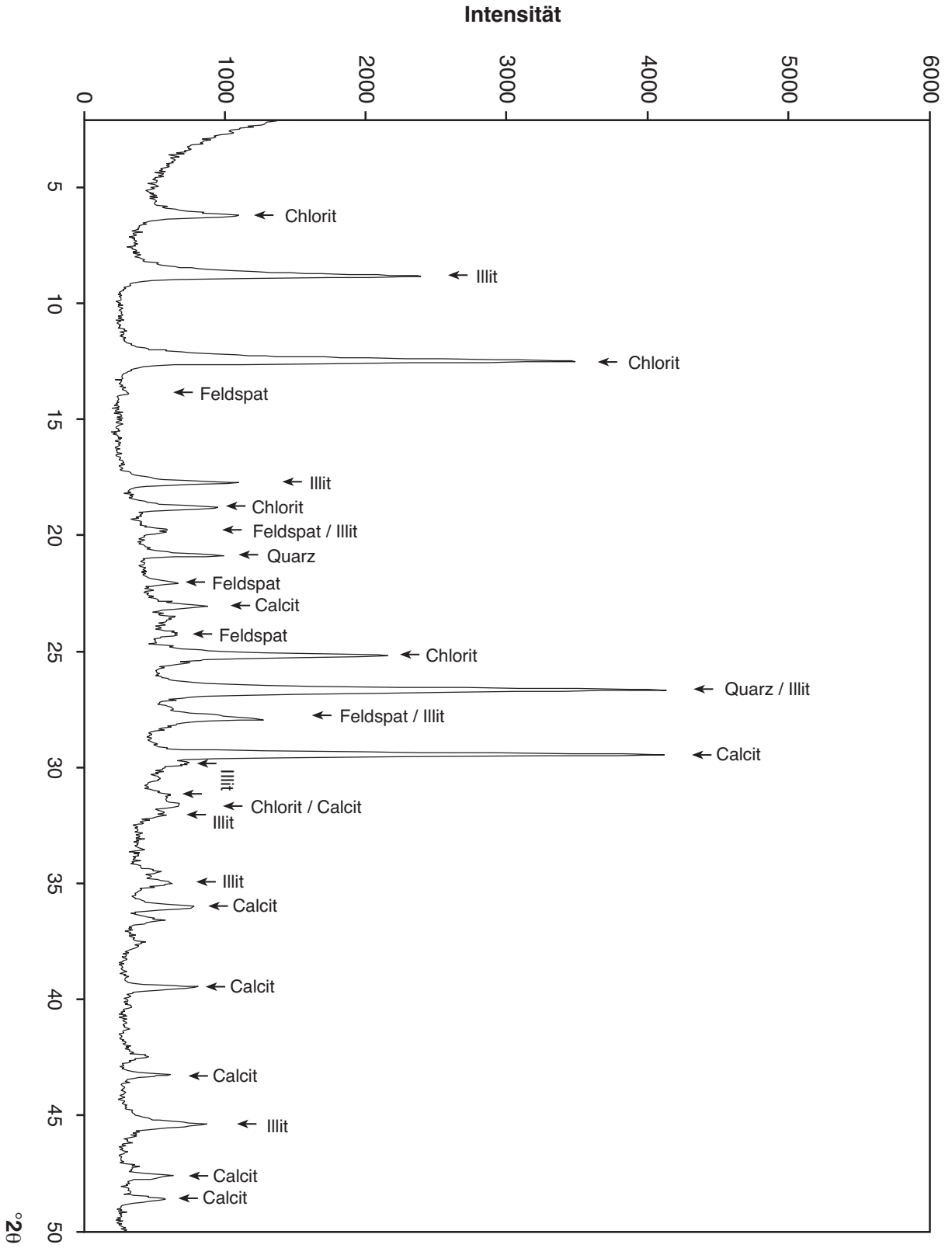


Abbildung 7.1: Röntgenspektrum einer Probe mit Calcit (Probe PH 21)

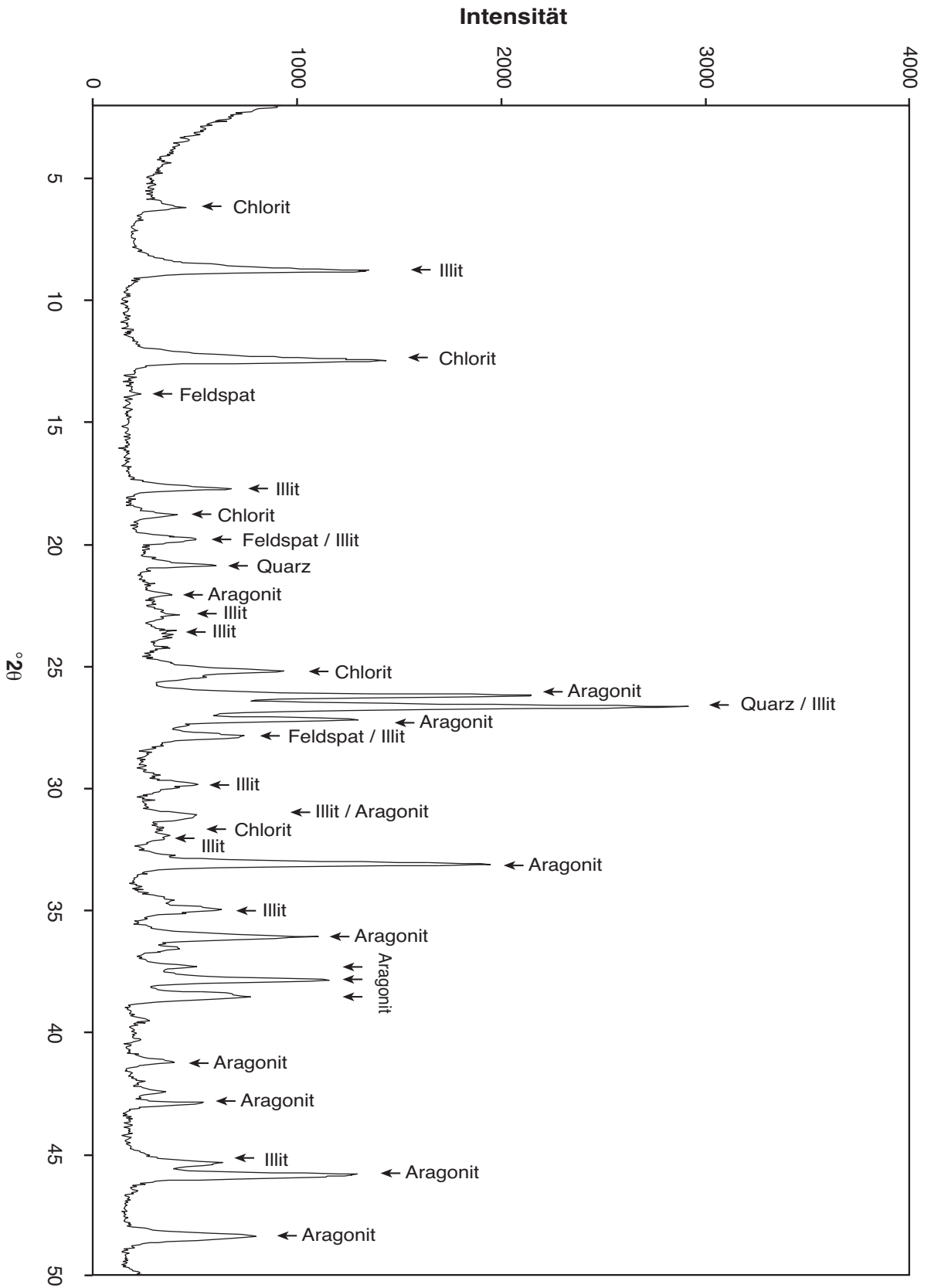


Abbildung 7.2: Röntgenspektrum einer Probe mit Aragonit (Probe PH 13)

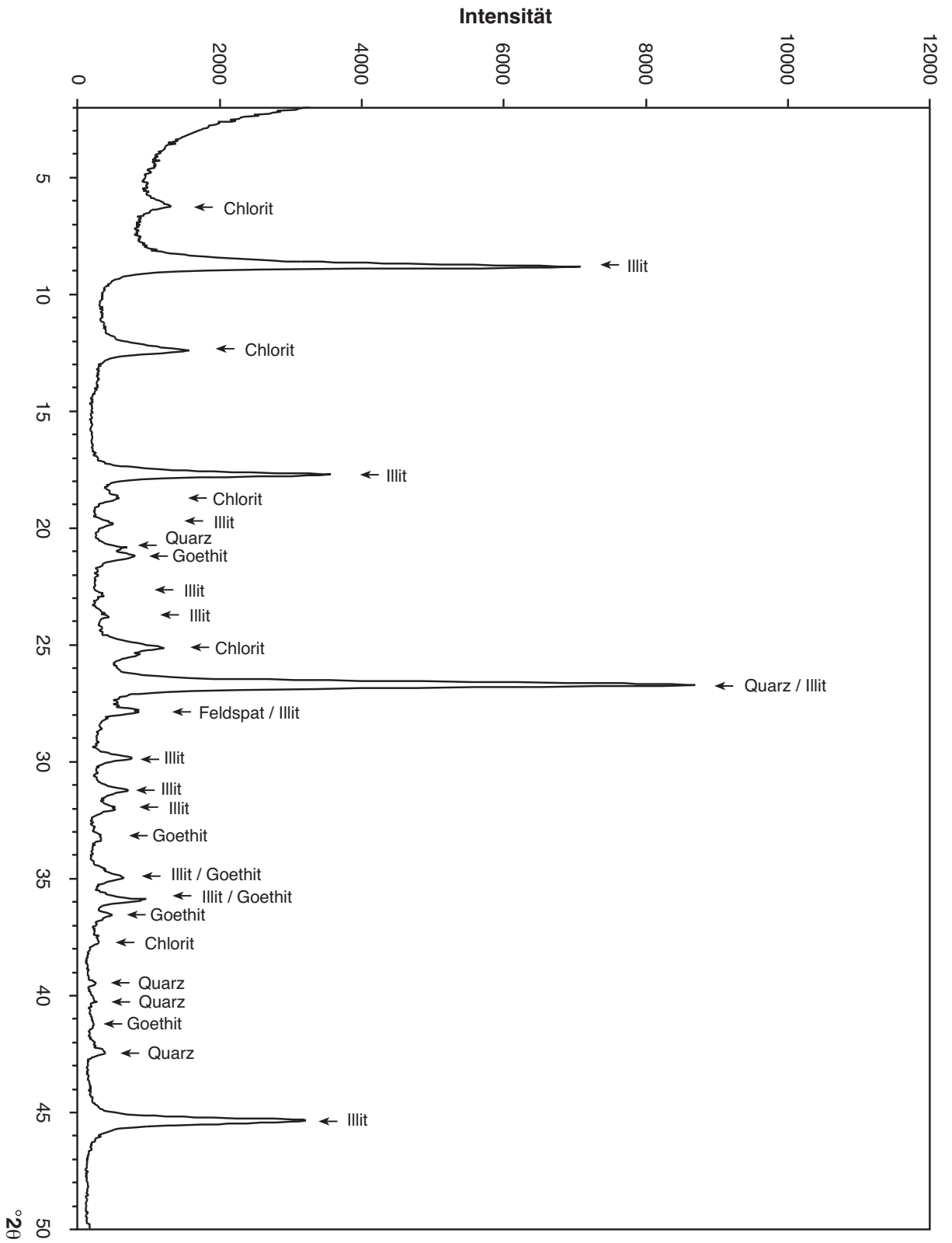


Abbildung 7.3: Röntgenspektrum einer Probe mit Goethit (Probe Q1 14)

7.3 Mikrosondendaten

Tabelle 7-5: Ergebnisse der Mikrosondenmessungen von **Chlorit** in kontaktnahen Metapeliten (BA4), Metapeliten (PuA7, PuA16, PuA20, PuA22, PuA24, PuA40, PuA50, PH15, PH21), Metabasiten (QV6, QVQ3, QVQ9) und in einer Quarzader (PuA 51). Die Berechnung der Formel erfolgte auf der Basis von 14 O-Atomen, alles Fe als Fe²⁺.

| Probe Nr. | BA4 | | | | | PuA 7 | | | | | | | PuA 16 | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b2-2 | b1-11 | b1-9 | b1-1 | b2-4 | 1-12 | 1-10 | 1-15 | 2-7 | 1-3 | 2-5 | 1-7 | 5-8 | 5-3 | 4-11 | 4-23 | 3-5 | 2-5 | 2-9 | 2-14 | 1-5 | 4-2 | 1-2 |
| SiO₂ | 24,09 | 24,39 | 25,08 | 25,29 | 26,19 | 25,00 | 25,22 | 24,83 | 25,14 | 25,37 | 25,40 | 27,42 | 24,24 | 24,30 | 24,34 | 24,84 | 23,89 | 24,08 | 24,83 | 24,70 | 26,36 | 27,56 | 28,11 |
| TiO₂ | 0,07 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,10 | 0,32 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,10 | 0,15 | 0,12 | 1,49 | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,07 | 0,15 | 0,15 |
| Al₂O₃ | 22,20 | 21,52 | 20,28 | 19,96 | 19,10 | 21,46 | 21,60 | 21,30 | 21,86 | 21,55 | 20,51 | 21,92 | 21,99 | 21,30 | 20,96 | 20,87 | 20,76 | 22,20 | 22,00 | 21,70 | 20,31 | 20,72 | 21,38 |
| Cr₂O₃ | 0,01 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| FeO | 26,75 | 26,97 | 26,78 | 25,98 | 29,34 | 30,11 | 30,49 | 29,37 | 29,99 | 30,21 | 29,50 | 28,83 | 31,06 | 29,93 | 29,80 | 30,22 | 31,10 | 28,56 | 28,70 | 27,38 | 27,05 | 28,99 | 26,48 |
| MnO | 0,29 | 0,27 | 0,26 | 0,21 | 0,11 | 0,31 | 0,25 | 0,31 | 0,27 | 0,27 | 0,33 | 0,34 | 0,23 | 0,26 | 0,31 | 0,18 | 0,26 | 0,29 | 0,26 | 0,27 | 0,18 | 0,26 | 0,17 |
| MgO | 12,32 | 12,18 | 12,97 | 13,56 | 11,00 | 10,92 | 11,22 | 10,86 | 10,42 | 10,76 | 11,34 | 10,51 | 9,73 | 9,81 | 9,71 | 10,17 | 9,44 | 9,15 | 9,79 | 9,65 | 10,81 | 9,22 | 9,10 |
| CaO | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Na₂O | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 |
| K₂O | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 |
| H₂O | 11,01 | 10,97 | 10,98 | 10,97 | 10,91 | 11,15 | 11,24 | 11,01 | 11,13 | 11,18 | 11,06 | 11,47 | 10,97 | 10,82 | 10,77 | 10,91 | 10,89 | 10,73 | 10,93 | 10,75 | 10,94 | 11,15 | 11,15 |
| Summe | 96,78 | 96,52 | 96,54 | 96,08 | 96,83 | 99,30 | 100,11 | 97,79 | 98,87 | 99,46 | 98,24 | 100,68 | 98,28 | 96,58 | 96,10 | 97,35 | 97,92 | 95,10 | 96,69 | 94,57 | 95,79 | 98,05 | 96,72 |
| Si | 2,623 | 2,667 | 2,738 | 2,764 | 2,878 | 2,688 | 2,691 | 2,705 | 2,710 | 2,721 | 2,755 | 2,867 | 2,649 | 2,693 | 2,711 | 2,730 | 2,631 | 2,690 | 2,724 | 2,757 | 2,890 | 2,964 | 3,022 |
| Ti | 0,005 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,008 | 0,026 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,007 | 0,005 | 0,003 | 0,008 | 0,013 | 0,010 | 0,124 | 0,006 | 0,011 | 0,008 | 0,006 | 0,012 | 0,012 |
| Al^{total} | 2,849 | 2,774 | 2,611 | 2,571 | 2,474 | 2,721 | 2,717 | 2,735 | 2,777 | 2,724 | 2,622 | 2,701 | 2,832 | 2,782 | 2,752 | 2,703 | 2,695 | 2,923 | 2,844 | 2,853 | 2,624 | 2,626 | 2,709 |
| Al^{IV} | 1,377 | 1,333 | 1,262 | 1,236 | 1,122 | 1,312 | 1,309 | 1,295 | 1,290 | 1,279 | 1,245 | 1,133 | 1,351 | 1,307 | 1,289 | 1,270 | 1,369 | 1,310 | 1,276 | 1,243 | 1,110 | 1,036 | 0,978 |
| Al^{VI} | 1,473 | 1,441 | 1,349 | 1,335 | 1,352 | 1,409 | 1,408 | 1,440 | 1,487 | 1,445 | 1,377 | 1,568 | 1,481 | 1,475 | 1,463 | 1,432 | 1,326 | 1,613 | 1,568 | 1,610 | 1,515 | 1,590 | 1,730 |
| Cr | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| Fe²⁺ | 2,436 | 2,467 | 2,446 | 2,374 | 2,697 | 2,708 | 2,721 | 2,676 | 2,704 | 2,709 | 2,676 | 2,521 | 2,838 | 2,774 | 2,777 | 2,777 | 2,864 | 2,669 | 2,633 | 2,555 | 2,480 | 2,607 | 2,381 |
| Mn | 0,027 | 0,025 | 0,024 | 0,019 | 0,010 | 0,029 | 0,022 | 0,029 | 0,025 | 0,025 | 0,030 | 0,030 | 0,022 | 0,024 | 0,029 | 0,016 | 0,025 | 0,028 | 0,024 | 0,025 | 0,017 | 0,023 | 0,016 |
| Mg | 2,001 | 1,985 | 2,111 | 2,209 | 1,802 | 1,750 | 1,785 | 1,765 | 1,675 | 1,720 | 1,833 | 1,639 | 1,585 | 1,620 | 1,613 | 1,667 | 1,550 | 1,524 | 1,601 | 1,606 | 1,767 | 1,479 | 1,458 |
| Ca | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,001 |
| Na | 0,000 | 0,007 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,010 | 0,000 | 0,001 |
| K | 0,002 | 0,008 | 0,003 | 0,005 | 0,009 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,022 |
| OH | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| ΣOkt | 5,943 | 5,929 | 5,943 | 5,941 | 5,869 | 5,923 | 5,942 | 5,918 | 5,896 | 5,908 | 5,924 | 5,769 | 5,930 | 5,903 | 5,895 | 5,905 | 5,889 | 5,840 | 5,839 | 5,807 | 5,784 | 5,710 | 5,599 |
| Fehlstellen | 0,057 | 0,071 | 0,057 | 0,059 | 0,131 | 0,077 | 0,058 | 0,082 | 0,104 | 0,092 | 0,076 | 0,231 | 0,070 | 0,097 | 0,105 | 0,095 | 0,111 | 0,160 | 0,161 | 0,193 | 0,216 | 0,290 | 0,401 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,546 | 0,551 | 0,534 | 0,516 | 0,598 | 0,604 | 0,601 | 0,599 | 0,614 | 0,608 | 0,590 | 0,602 | 0,638 | 0,628 | 0,628 | 0,623 | 0,645 | 0,632 | 0,618 | 0,610 | 0,582 | 0,634 | 0,618 |

Tabelle 7-5 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA 20 | | | PuA 22 | | | | | | | PuA 24 | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | b1-4 | b2-2 | b1-1 | 1-3 | 3-7 | 3-9 | 1-21 | 1-5 | 2-1 | 1-10 | b3a-3 | 1-3 | b3-4 | b3-2 | b1-7 | b2a-2 | b1-3 | b1-13 |
| SiO ₂ | 23,58 | 23,90 | 24,35 | 24,56 | 24,10 | 24,54 | 25,00 | 24,53 | 25,40 | 26,31 | 23,89 | 24,40 | 24,68 | 25,44 | 25,07 | 25,81 | 26,39 | 26,10 |
| TiO ₂ | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,07 | 0,09 | 0,19 | 0,07 | 0,10 | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,04 | 0,08 | 0,21 | 0,08 | 0,12 | 0,10 |
| Al ₂ O ₃ | 21,31 | 21,41 | 21,52 | 21,62 | 21,44 | 22,13 | 22,39 | 22,09 | 19,17 | 20,76 | 21,95 | 22,17 | 20,91 | 20,13 | 21,63 | 20,42 | 21,03 | 21,42 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | 0,05 | 0,06 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,00 |
| FeO | 31,46 | 30,89 | 30,75 | 29,18 | 31,13 | 31,53 | 31,37 | 31,08 | 30,93 | 30,15 | 31,61 | 30,73 | 30,04 | 30,21 | 30,26 | 29,49 | 30,49 | 29,74 |
| MnO | 0,16 | 0,22 | 0,20 | 0,44 | 0,33 | 0,48 | 0,44 | 0,33 | 0,35 | 0,40 | 0,16 | 0,31 | 0,18 | 0,25 | 0,19 | 0,26 | 0,26 | 0,19 |
| MgO | 9,08 | 9,43 | 9,11 | 11,12 | 9,13 | 9,02 | 9,19 | 8,80 | 10,23 | 9,20 | 9,59 | 9,81 | 10,87 | 10,88 | 9,78 | 10,34 | 9,67 | 9,46 |
| CaO | 0,07 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,02 |
| Na ₂ O | 0,06 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,03 |
| K ₂ O | 0,16 | 0,11 | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,16 | 0,20 | 0,04 | 0,11 | 0,29 |
| H ₂ O | 10,72 | 10,79 | 10,85 | 11,03 | 10,82 | 11,03 | 11,14 | 10,94 | 10,81 | 11,02 | 10,94 | 11,03 | 10,96 | 11,01 | 11,05 | 10,99 | 11,17 | 11,10 |
| Summe | 96,67 | 96,90 | 97,15 | 98,04 | 97,12 | 98,99 | 99,61 | 97,95 | 96,96 | 97,91 | 98,34 | 98,57 | 97,76 | 98,27 | 98,52 | 97,55 | 99,29 | 98,44 |
| Si | 2,638 | 2,655 | 2,693 | 2,669 | 2,673 | 2,667 | 2,693 | 2,689 | 2,817 | 2,862 | 2,620 | 2,653 | 2,701 | 2,772 | 2,721 | 2,817 | 2,834 | 2,820 |
| Ti | 0,005 | 0,007 | 0,009 | 0,005 | 0,007 | 0,016 | 0,005 | 0,008 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,003 | 0,006 | 0,017 | 0,007 | 0,009 | 0,008 |
| Al^{total} | 2,810 | 2,804 | 2,805 | 2,769 | 2,802 | 2,835 | 2,842 | 2,853 | 2,507 | 2,662 | 2,836 | 2,841 | 2,697 | 2,585 | 2,767 | 2,626 | 2,661 | 2,728 |
| Al^{IV} | 1,362 | 1,345 | 1,307 | 1,331 | 1,327 | 1,333 | 1,307 | 1,311 | 1,183 | 1,138 | 1,380 | 1,347 | 1,299 | 1,228 | 1,279 | 1,183 | 1,166 | 1,180 |
| Al^{VI} | 1,448 | 1,459 | 1,498 | 1,438 | 1,475 | 1,502 | 1,534 | 1,542 | 1,324 | 1,524 | 1,456 | 1,494 | 1,397 | 1,357 | 1,487 | 1,443 | 1,494 | 1,548 |
| Cr | 0,001 | 0,001 | 0,004 | 0,000 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 2,943 | 2,871 | 2,844 | 2,652 | 2,887 | 2,867 | 2,825 | 2,849 | 2,870 | 2,743 | 2,899 | 2,794 | 2,749 | 2,752 | 2,747 | 2,691 | 2,738 | 2,687 |
| Mn | 0,015 | 0,020 | 0,019 | 0,040 | 0,031 | 0,044 | 0,040 | 0,031 | 0,033 | 0,037 | 0,015 | 0,029 | 0,017 | 0,023 | 0,018 | 0,024 | 0,023 | 0,017 |
| Mg | 1,515 | 1,562 | 1,501 | 1,801 | 1,509 | 1,461 | 1,475 | 1,438 | 1,692 | 1,491 | 1,568 | 1,589 | 1,773 | 1,768 | 1,583 | 1,682 | 1,548 | 1,524 |
| Ca | 0,008 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,002 |
| Na | 0,012 | 0,005 | 0,008 | 0,006 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,010 | 0,002 | 0,001 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,011 | 0,009 | 0,015 | 0,007 | 0,006 |
| K | 0,023 | 0,015 | 0,022 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,003 | 0,023 | 0,028 | 0,006 | 0,015 | 0,040 |
| OH | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| ΣOkt | 5,926 | 5,921 | 5,875 | 5,937 | 5,913 | 5,895 | 5,881 | 5,869 | 5,923 | 5,800 | 5,944 | 5,916 | 5,942 | 5,908 | 5,855 | 5,849 | 5,814 | 5,783 |
| Fehlstellen | 0,074 | 0,079 | 0,125 | 0,063 | 0,087 | 0,105 | 0,119 | 0,131 | 0,077 | 0,200 | 0,056 | 0,084 | 0,058 | 0,092 | 0,145 | 0,151 | 0,186 | 0,217 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,658 | 0,645 | 0,652 | 0,590 | 0,652 | 0,656 | 0,651 | 0,660 | 0,625 | 0,642 | 0,647 | 0,633 | 0,606 | 0,606 | 0,632 | 0,612 | 0,635 | 0,636 |

Tabelle 7-5 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA 40 | | | PuA 50 | | | PH 15 | PH21 | | | | | | QVQ 9 | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 40-32 | 40-34 | 40-28 | 1-2 | 1-6 | 1-1 | b1-2 | b1-3 | b2-7 | b2-9 | b2-12 | b2-13 | b2-2 | p2-3 | p2-10 | p1-4 | p1-20 | p2-18 | p1-18 |
| SiO ₂ | 24,57 | 23,77 | 24,93 | 23,92 | 23,64 | 23,89 | 23,76 | 24,46 | 24,68 | 24,95 | 25,82 | 24,99 | 26,69 | 29,20 | 29,05 | 28,77 | 28,60 | 29,49 | 29,52 |
| TiO ₂ | 0,06 | 0,04 | 0,09 | 0,09 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,09 | 0,01 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,05 |
| Al ₂ O ₃ | 20,90 | 20,82 | 20,53 | 20,69 | 20,58 | 19,97 | 21,83 | 21,75 | 21,22 | 21,26 | 21,26 | 20,70 | 19,10 | 18,08 | 18,56 | 18,28 | 19,11 | 17,67 | 18,33 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,20 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 27,32 | 26,31 | 28,45 | 28,01 | 26,88 | 28,26 | 31,22 | 27,77 | 28,13 | 27,54 | 20,18 | 28,16 | 27,17 | 14,61 | 14,98 | 14,78 | 14,89 | 14,16 | 14,31 |
| MnO | 0,21 | 0,27 | 0,27 | 0,26 | 0,24 | 0,20 | 0,26 | 0,15 | 0,21 | 0,20 | 0,01 | 0,21 | 0,18 | 0,24 | 0,19 | 0,17 | 0,23 | 0,22 | 0,22 |
| MgO | 10,03 | 10,09 | 9,29 | 10,82 | 10,68 | 9,85 | 9,61 | 11,92 | 12,12 | 12,57 | 18,51 | 12,51 | 13,25 | 23,29 | 22,62 | 22,43 | 22,09 | 23,38 | 22,34 |
| CaO | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,15 | 0,19 | 0,03 | 0,16 |
| Na ₂ O | 0,04 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,12 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,07 | 0,16 | 0,07 | 0,21 | 0,08 | 0,16 | 0,03 | 0,15 |
| H ₂ O | 10,64 | 10,43 | 10,65 | 10,65 | 10,49 | 10,42 | 10,87 | 11,03 | 11,04 | 11,11 | 11,47 | 11,07 | 11,15 | 11,80 | 11,79 | 11,68 | 11,75 | 11,76 | 11,76 |
| Summe | 93,78 | 91,79 | 94,40 | 94,46 | 92,71 | 92,67 | 97,64 | 97,37 | 97,58 | 97,86 | 97,38 | 97,84 | 97,91 | 97,48 | 97,51 | 96,63 | 97,18 | 96,83 | 96,85 |
| Si | 2,769 | 2,733 | 2,808 | 2,693 | 2,702 | 2,749 | 2,622 | 2,659 | 2,682 | 2,693 | 2,701 | 2,708 | 2,872 | 2,967 | 2,955 | 2,953 | 2,921 | 3,008 | 3,011 |
| Ti | 0,005 | 0,003 | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,006 | 0,004 | 0,007 | 0,000 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,010 | 0,005 | 0,004 |
| Al^{total} | 2,776 | 2,822 | 2,726 | 2,745 | 2,772 | 2,708 | 2,840 | 2,787 | 2,718 | 2,705 | 2,621 | 2,644 | 2,422 | 2,165 | 2,226 | 2,212 | 2,300 | 2,123 | 2,203 |
| Al^{IV} | 1,231 | 1,267 | 1,192 | 1,307 | 1,298 | 1,251 | 1,378 | 1,341 | 1,318 | 1,307 | 1,299 | 1,292 | 1,128 | 1,033 | 1,045 | 1,047 | 1,079 | 0,992 | 0,989 |
| Al^{VI} | 1,546 | 1,555 | 1,533 | 1,438 | 1,474 | 1,458 | 1,462 | 1,446 | 1,400 | 1,398 | 1,322 | 1,353 | 1,293 | 1,132 | 1,181 | 1,165 | 1,220 | 1,131 | 1,214 |
| Cr | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,016 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 2,575 | 2,530 | 2,679 | 2,637 | 2,569 | 2,719 | 2,881 | 2,524 | 2,557 | 2,486 | 1,765 | 2,552 | 2,444 | 1,242 | 1,274 | 1,269 | 1,272 | 1,208 | 1,221 |
| Mn | 0,020 | 0,026 | 0,026 | 0,024 | 0,023 | 0,019 | 0,024 | 0,013 | 0,019 | 0,018 | 0,001 | 0,020 | 0,016 | 0,020 | 0,017 | 0,015 | 0,020 | 0,019 | 0,019 |
| Mg | 1,685 | 1,730 | 1,560 | 1,817 | 1,819 | 1,690 | 1,581 | 1,932 | 1,963 | 2,023 | 2,886 | 2,021 | 2,126 | 3,529 | 3,431 | 3,433 | 3,363 | 3,555 | 3,397 |
| Ca | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,008 | 0,006 | 0,003 | 0,016 | 0,020 | 0,003 | 0,017 |
| Na | 0,009 | 0,000 | 0,010 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,003 | 0,009 | 0,002 | 0,002 | 0,008 | 0,017 | 0,008 | 0,003 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,003 |
| K | 0,002 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,016 | 0,010 | 0,009 | 0,006 | 0,010 | 0,023 | 0,009 | 0,027 | 0,010 | 0,021 | 0,004 | 0,020 |
| OH | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| ΣOkt | 5,831 | 5,849 | 5,807 | 5,925 | 5,892 | 5,890 | 5,952 | 5,924 | 5,945 | 5,937 | 5,980 | 5,952 | 5,885 | 5,931 | 5,909 | 5,903 | 5,886 | 5,919 | 5,855 |
| Fehlstellen | 0,169 | 0,151 | 0,193 | 0,075 | 0,108 | 0,110 | 0,048 | 0,076 | 0,055 | 0,063 | 0,020 | 0,048 | 0,115 | 0,069 | 0,091 | 0,097 | 0,114 | 0,081 | 0,145 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,602 | 0,590 | 0,628 | 0,589 | 0,582 | 0,614 | 0,642 | 0,565 | 0,563 | 0,549 | 0,379 | 0,556 | 0,533 | 0,259 | 0,270 | 0,269 | 0,273 | 0,253 | 0,263 |

Tabelle 7-5 (Forts.):

| Probe Nr. | QV 6 | | | | | | | | | | | | QVQ2 | | | | | | PuA 51 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | p4-1 | p8-8 | p1-14 | p8-11 | p5-2 | p7-6 | p1-1 | p2-9 | p7-4 | p7-11 | p7-8 | p6-9 | p2-9 | p2-5 | p2-13 | p3-1 | p1-5 | p2-12 | p3-1 | p2-9 | p2-13 | p2-8 | p3-4 | p3-10 | p2-15 | p2-4 | p2-6 |
| SiO ₂ | 28,84 | 28,95 | 28,22 | 28,57 | 28,58 | 30,19 | 30,70 | 30,60 | 31,03 | 30,86 | 31,49 | 32,14 | 27,67 | 28,15 | 28,89 | 29,96 | 30,97 | 30,82 | 22,78 | 23,39 | 23,49 | 23,53 | 23,48 | 23,61 | 23,50 | 23,64 | 23,75 |
| TiO ₂ | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,10 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,13 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,08 |
| Al ₂ O ₃ | 18,01 | 17,66 | 18,60 | 18,56 | 18,45 | 17,12 | 16,57 | 16,10 | 16,69 | 17,04 | 16,43 | 15,11 | 19,72 | 18,47 | 17,28 | 16,92 | 15,80 | 15,66 | 20,69 | 21,27 | 21,31 | 21,25 | 21,52 | 21,25 | 21,20 | 21,39 | 21,26 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,04 | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,52 | 0,05 | 0,66 | 0,28 | 0,04 | 0,05 | 0,29 | 0,36 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,15 | 0,07 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | |
| FeO | 15,99 | 16,17 | 16,42 | 15,57 | 15,78 | 15,45 | 15,86 | 15,01 | 14,30 | 15,14 | 15,34 | 14,51 | 16,84 | 16,57 | 16,74 | 17,00 | 16,39 | 16,62 | 31,98 | 32,00 | 31,77 | 32,54 | 31,37 | 32,75 | 31,50 | 31,39 | 31,99 |
| MnO | 0,22 | 0,19 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,19 | 0,12 | 0,22 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,14 | 0,16 | 0,09 | 0,23 | 0,12 | 0,15 | 0,16 | 0,10 | 0,13 | 0,11 | 0,17 | 0,21 |
| MgO | 23,28 | 22,68 | 21,80 | 22,63 | 22,50 | 22,73 | 23,25 | 23,34 | 23,43 | 22,55 | 22,88 | 23,75 | 20,76 | 22,37 | 22,29 | 22,09 | 23,13 | 22,85 | 8,99 | 9,08 | 9,34 | 9,04 | 9,26 | 9,02 | 9,36 | 9,38 | 9,12 |
| CaO | 0,03 | 0,12 | 0,05 | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,13 | 0,21 | 0,33 | 0,34 | 0,37 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,24 | 0,19 | 0,22 | 0,12 | 0,06 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 0,03 |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| K ₂ O | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,05 | 0,10 | 0,13 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,10 | 0,07 | 0,05 | 0,18 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| H ₂ O | 11,82 | 11,72 | 11,69 | 11,75 | 11,79 | 11,83 | 11,99 | 11,79 | 11,91 | 11,89 | 11,99 | 11,96 | 11,63 | 11,71 | 11,64 | 11,79 | 11,88 | 11,79 | 10,51 | 10,70 | 10,74 | 10,76 | 10,73 | 10,78 | 10,71 | 10,76 | 10,78 |
| Summe | 98,30 | 97,54 | 97,56 | 97,61 | 98,15 | 98,00 | 99,57 | 97,45 | 97,99 | 98,22 | 99,07 | 98,51 | 97,24 | 97,76 | 97,17 | 98,37 | 98,78 | 98,12 | 95,33 | 96,65 | 96,91 | 97,41 | 96,54 | 97,67 | 96,54 | 96,81 | 97,26 |
| Si | 2,927 | 2,963 | 2,896 | 2,916 | 2,908 | 3,061 | 3,071 | 3,112 | 3,124 | 3,112 | 3,150 | 3,222 | 2,853 | 2,884 | 2,977 | 3,047 | 3,126 | 3,134 | 2,600 | 2,621 | 2,622 | 2,622 | 2,625 | 2,626 | 2,631 | 2,636 | 2,643 |
| Ti | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,003 | 0,008 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,010 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,005 | 0,004 | 0,002 | 0,004 | 0,005 | 0,003 | 0,007 |
| Al ^{total} | 2,155 | 2,130 | 2,249 | 2,232 | 2,212 | 2,046 | 1,953 | 1,930 | 1,980 | 2,024 | 1,937 | 1,786 | 2,396 | 2,230 | 2,099 | 2,029 | 1,879 | 1,877 | 2,783 | 2,810 | 2,803 | 2,792 | 2,836 | 2,785 | 2,797 | 2,811 | 2,789 |
| Al ^{IV} | 1,073 | 1,037 | 1,104 | 1,084 | 1,092 | 0,939 | 0,929 | 0,888 | 0,876 | 0,888 | 0,850 | 0,778 | 1,147 | 1,116 | 1,023 | 0,953 | 0,874 | 0,866 | 1,400 | 1,379 | 1,378 | 1,378 | 1,375 | 1,374 | 1,369 | 1,364 | 1,357 |
| Al ^{VI} | 1,081 | 1,093 | 1,145 | 1,148 | 1,120 | 1,106 | 1,024 | 1,042 | 1,104 | 1,136 | 1,086 | 1,008 | 1,249 | 1,113 | 1,075 | 1,076 | 1,005 | 1,011 | 1,383 | 1,432 | 1,426 | 1,414 | 1,461 | 1,411 | 1,428 | 1,447 | 1,432 |
| Cr | 0,003 | 0,000 | 0,034 | 0,000 | 0,042 | 0,004 | 0,053 | 0,022 | 0,003 | 0,004 | 0,023 | 0,028 | 0,000 | 0,011 | 0,000 | 0,012 | 0,006 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 1,357 | 1,384 | 1,410 | 1,329 | 1,343 | 1,310 | 1,327 | 1,277 | 1,204 | 1,276 | 1,283 | 1,216 | 1,451 | 1,419 | 1,442 | 1,446 | 1,384 | 1,413 | 3,053 | 3,000 | 2,966 | 3,033 | 2,933 | 3,046 | 2,949 | 2,927 | 2,978 |
| Mn | 0,019 | 0,016 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,022 | 0,016 | 0,010 | 0,019 | 0,019 | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,018 | 0,015 | 0,012 | 0,013 | 0,008 | 0,022 | 0,012 | 0,014 | 0,015 | 0,009 | 0,013 | 0,010 | 0,016 | 0,020 |
| Mg | 3,523 | 3,460 | 3,335 | 3,443 | 3,412 | 3,435 | 3,467 | 3,539 | 3,517 | 3,389 | 3,412 | 3,549 | 3,191 | 3,416 | 3,423 | 3,350 | 3,480 | 3,463 | 1,529 | 1,517 | 1,554 | 1,502 | 1,543 | 1,496 | 1,561 | 1,558 | 1,514 |
| Ca | 0,004 | 0,013 | 0,005 | 0,022 | 0,019 | 0,020 | 0,021 | 0,015 | 0,022 | 0,036 | 0,036 | 0,040 | 0,010 | 0,009 | 0,006 | 0,026 | 0,021 | 0,024 | 0,014 | 0,007 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,001 | 0,004 |
| Na | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,007 | 0,003 | 0,000 | 0,005 | 0,002 | 0,003 | 0,000 | 0,004 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,006 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 0,002 | 0,008 | 0,002 | 0,002 | 0,004 |
| K | 0,004 | 0,007 | 0,009 | 0,006 | 0,013 | 0,016 | 0,009 | 0,010 | 0,012 | 0,013 | 0,008 | 0,006 | 0,023 | 0,005 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,005 | 0,002 |
| OH | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| ΣOkt | 5,986 | 5,954 | 5,947 | 5,940 | 5,937 | 5,881 | 5,893 | 5,891 | 5,851 | 5,828 | 5,824 | 5,823 | 5,916 | 5,981 | 5,960 | 5,900 | 5,897 | 5,899 | 5,990 | 5,963 | 5,966 | 5,969 | 5,948 | 5,968 | 5,957 | 5,952 | 5,950 |
| Fehlstellen | 0,014 | 0,046 | 0,053 | 0,060 | 0,063 | 0,119 | 0,107 | 0,109 | 0,149 | 0,172 | 0,176 | 0,177 | 0,084 | 0,019 | 0,040 | 0,100 | 0,103 | 0,101 | 0,010 | 0,037 | 0,034 | 0,031 | 0,052 | 0,032 | 0,043 | 0,048 | 0,050 |
| Fe ²⁺ /R ²⁺ | 0,277 | 0,285 | 0,296 | 0,277 | 0,281 | 0,275 | 0,276 | 0,265 | 0,254 | 0,272 | 0,272 | 0,254 | 0,312 | 0,292 | 0,295 | 0,301 | 0,284 | 0,289 | 0,663 | 0,662 | 0,654 | 0,667 | 0,654 | 0,669 | 0,652 | 0,650 | 0,660 |

Tabelle 7-5 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA 51 (Forts.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | p2-2 | p1-14 | p3-7 | p2-5 | p2-10 | p1-6 | p3-3 | p3-6 | p2-14 | p1-11 | p1-12 | p2-7 | p2-12 | p3-2 | p3-8 | p3-5 | p1-9 | p1-8 | p1-13 | p1-10 | p2-1 | p2-3 |
| SiO₂ | 23,91 | 23,61 | 24,00 | 23,90 | 23,66 | 23,91 | 23,68 | 23,64 | 23,81 | 23,78 | 23,99 | 23,82 | 23,74 | 23,82 | 23,98 | 24,08 | 24,01 | 24,11 | 24,55 | 24,03 | 24,32 | 24,80 |
| TiO₂ | 0,01 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,06 | 0,07 | 0,00 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,01 |
| Al₂O₃ | 21,37 | 20,83 | 21,31 | 21,08 | 21,02 | 21,35 | 21,38 | 20,66 | 21,08 | 21,15 | 21,39 | 21,22 | 20,86 | 20,54 | 20,91 | 20,95 | 20,87 | 20,84 | 21,30 | 20,81 | 20,73 | 20,51 |
| Cr₂O₃ | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 |
| FeO | 32,17 | 32,42 | 31,97 | 32,76 | 31,29 | 31,07 | 31,23 | 31,65 | 31,28 | 31,41 | 30,88 | 31,87 | 31,79 | 30,98 | 31,43 | 31,77 | 31,69 | 31,60 | 31,44 | 31,16 | 30,94 | 31,73 |
| MnO | 0,12 | 0,16 | 0,17 | 0,11 | 0,14 | 0,15 | 0,13 | 0,11 | 0,18 | 0,16 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,17 | 0,11 | 0,11 |
| MgO | 9,27 | 8,94 | 9,47 | 9,03 | 9,43 | 9,69 | 8,98 | 9,50 | 9,57 | 9,35 | 9,74 | 9,01 | 9,36 | 9,95 | 9,53 | 9,52 | 9,21 | 9,39 | 9,85 | 9,41 | 9,71 | 9,54 |
| CaO | 0,05 | 0,10 | 0,02 | 0,08 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,06 | 0,06 |
| Na₂O | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| K₂O | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,00 |
| H₂O | 10,84 | 10,69 | 10,87 | 10,81 | 10,70 | 10,82 | 10,70 | 10,68 | 10,76 | 10,74 | 10,83 | 10,75 | 10,71 | 10,70 | 10,77 | 10,81 | 10,75 | 10,78 | 10,96 | 10,73 | 10,78 | 10,86 |
| Summe | 97,79 | 96,82 | 97,91 | 97,85 | 96,32 | 97,09 | 96,24 | 96,38 | 96,78 | 96,72 | 97,14 | 96,95 | 96,64 | 96,24 | 96,89 | 97,32 | 96,82 | 97,01 | 98,36 | 96,41 | 96,66 | 97,64 |
| Si | 2,645 | 2,648 | 2,649 | 2,651 | 2,651 | 2,652 | 2,653 | 2,654 | 2,654 | 2,654 | 2,656 | 2,657 | 2,658 | 2,669 | 2,671 | 2,673 | 2,680 | 2,684 | 2,686 | 2,687 | 2,706 | 2,738 |
| Ti | 0,001 | 0,003 | 0,007 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,007 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,005 | 0,006 | 0,000 | 0,003 | 0,006 | 0,003 | 0,004 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,001 |
| Al^{total} | 2,787 | 2,754 | 2,772 | 2,756 | 2,776 | 2,790 | 2,824 | 2,734 | 2,769 | 2,782 | 2,791 | 2,790 | 2,752 | 2,713 | 2,744 | 2,740 | 2,745 | 2,733 | 2,747 | 2,742 | 2,718 | 2,669 |
| Al^{IV} | 1,355 | 1,352 | 1,351 | 1,349 | 1,349 | 1,348 | 1,347 | 1,346 | 1,346 | 1,346 | 1,344 | 1,343 | 1,342 | 1,331 | 1,329 | 1,327 | 1,320 | 1,316 | 1,314 | 1,313 | 1,294 | 1,262 |
| Al^{VI} | 1,432 | 1,402 | 1,421 | 1,407 | 1,427 | 1,442 | 1,477 | 1,388 | 1,423 | 1,436 | 1,447 | 1,446 | 1,410 | 1,382 | 1,415 | 1,413 | 1,424 | 1,417 | 1,432 | 1,429 | 1,424 | 1,407 |
| Cr | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,006 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 |
| Fe²⁺ | 2,976 | 3,041 | 2,951 | 3,040 | 2,933 | 2,881 | 2,926 | 2,972 | 2,916 | 2,932 | 2,859 | 2,973 | 2,976 | 2,903 | 2,928 | 2,949 | 2,957 | 2,942 | 2,876 | 2,914 | 2,879 | 2,929 |
| Mn | 0,012 | 0,015 | 0,016 | 0,011 | 0,014 | 0,014 | 0,013 | 0,010 | 0,017 | 0,015 | 0,017 | 0,014 | 0,011 | 0,015 | 0,015 | 0,014 | 0,012 | 0,014 | 0,018 | 0,016 | 0,010 | 0,010 |
| Mg | 1,529 | 1,496 | 1,558 | 1,494 | 1,576 | 1,601 | 1,500 | 1,589 | 1,590 | 1,556 | 1,608 | 1,498 | 1,561 | 1,662 | 1,583 | 1,574 | 1,532 | 1,558 | 1,607 | 1,569 | 1,610 | 1,570 |
| Ca | 0,006 | 0,012 | 0,002 | 0,010 | 0,000 | 0,001 | 0,005 | 0,003 | 0,005 | 0,010 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,007 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,007 | 0,007 |
| Na | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,007 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| K | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,000 |
| OH | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| ΣOkt | 5,951 | 5,957 | 5,954 | 5,956 | 5,955 | 5,945 | 5,922 | 5,968 | 5,950 | 5,941 | 5,938 | 5,937 | 5,962 | 5,965 | 5,947 | 5,953 | 5,932 | 5,940 | 5,935 | 5,933 | 5,925 | 5,919 |
| Fehlstellen | 0,049 | 0,043 | 0,046 | 0,044 | 0,045 | 0,055 | 0,078 | 0,032 | 0,050 | 0,059 | 0,062 | 0,063 | 0,038 | 0,035 | 0,053 | 0,047 | 0,068 | 0,060 | 0,065 | 0,067 | 0,075 | 0,081 |
| Fe²⁺/R²⁺ | 0,659 | 0,668 | 0,652 | 0,669 | 0,649 | 0,641 | 0,659 | 0,650 | 0,645 | 0,651 | 0,638 | 0,663 | 0,654 | 0,634 | 0,647 | 0,650 | 0,657 | 0,652 | 0,639 | 0,648 | 0,640 | 0,650 |

Tabelle 7-6: Aus den in Tabelle 7-5 dargestellten Ergebnissen berechnete Temperaturen (in °C) nach DE CARITAT (1993) (T(dC93)) und CATHELINÉAU (1988) (T(C88)).

| Probe Nr. | BA4 | | PuA 7 | | PuA 16 | | PuA 20 | | PuA 22 | | PuA 24 | | | PuA 50 | PH 15 | PH21 | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b2-2 | b1-11 | 1-12 | 1-10 | 5-8 | 5-3 | b1-4 | b2-2 | 1-3 | 3-7 | b3a-3 | 1-3 | b3-4 | 1-2 | b1-2 | b1-3 | b2-7 | b2-9 | b2-12 |
| AI-Chl | 0,249 | 0,245 | 0,240 | 0,238 | 0,251 | 0,251 | 0,245 | 0,248 | 0,244 | 0,251 | 0,246 | 0,254 | 0,236 | 0,244 | 0,247 | 0,245 | 0,236 | 0,237 | 0,221 |
| T(dC93) | 332,0 | 244,2 | 202,7 | 407,2 | 280,8 | 193,0 | 302,9 | 268,1 | 241,2 | 233,5 | 339,2 | 273,2 | 400,2 | 193,2 | 334,7 | 260,8 | 414,2 | 406,0 | 399,7 |
| T(C88) | 381,3 | 367,1 | 360,5 | 359,4 | 373,0 | 358,9 | 376,6 | 371,0 | 366,7 | 365,4 | 382,4 | 371,8 | 356,5 | 358,9 | 381,7 | 369,8 | 362,3 | 358,9 | 356,3 |

| Probe Nr. | PuA 51 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | p3-1 | p2-9 | p2-13 | p2-8 | p3-4 | p3-10 | p2-15 | p2-4 | p2-6 | p2-2 | p1-14 | p3-7 | p2-5 | p2-10 | p1-6 | p3-3 | p3-6 | p2-14 | p1-11 |
| AI-Chl | 0,232 | 0,241 | 0,240 | 0,238 | 0,246 | 0,237 | 0,240 | 0,244 | 0,242 | 0,241 | 0,236 | 0,240 | 0,237 | 0,240 | 0,243 | 0,250 | 0,233 | 0,240 | 0,242 |
| T(dC93) | 477,7 | 336,1 | 460,4 | 460,3 | 328,5 | 457,6 | 317,1 | 307,0 | 293,6 | 288,1 | 440,9 | 439,7 | 438,4 | 276,0 | 275,7 | 272,7 | 436,1 | 270,9 | 270,8 |
| T(C88) | 388,9 | 381,9 | 381,7 | 381,6 | 380,7 | 380,5 | 378,9 | 377,2 | 375,1 | 374,2 | 373,5 | 373,0 | 372,5 | 372,3 | 372,2 | 371,7 | 371,5 | 371,4 | 371,4 |
| Nr. | p1-12 | p2-7 | p2-12 | p3-2 | p3-8 | p3-5 | p1-9 | p1-8 | p1-13 | p1-10 | | | | | | | | | |
| AI-Chl | 0,245 | 0,244 | 0,237 | 0,232 | 0,239 | 0,238 | 0,241 | 0,239 | 0,242 | 0,242 | | | | | | | | | |
| T(dC93) | 267,7 | 265,6 | 433,1 | 424,4 | 423,1 | 421,5 | 219,6 | 413,3 | 208,0 | 205,4 | | | | | | | | | |
| T(C88) | 370,9 | 370,6 | 370,2 | 366,6 | 366,0 | 365,4 | 363,2 | 361,9 | 361,3 | 360,9 | | | | | | | | | |

| Probe Nr. | QV 6 | | | | | QVQ2 | | | QVQ 9 | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | p4-1 | p8-8 | p1-14 | p8-11 | p5-2 | p2-9 | p2-5 | p2-13 | p2-3 | p2-10 | p1-4 |
| AI-Chl | 0,181 | 0,184 | 0,194 | 0,194 | 0,191 | 0,212 | 0,187 | 0,181 | 0,192 | 0,201 | 0,199 |
| T(dC93) | 323,5 | 306,4 | 338,3 | 328,8 | 332,4 | 283,2 | 344,0 | 299,7 | 304,3 | 204,4 | 310,8 |
| T(C88) | 283,6 | 272,0 | 293,6 | 287,2 | 289,7 | 307,5 | 297,5 | 267,5 | 270,6 | 274,5 | 275,1 |

Tabelle 7-7: Ergebnisse der Mikrosondenmessungen von **Phengit** in kontaktnahen Metapeliten (BA4, BA5, BA6) und sonstigen Metapeliten (PuA7, PuA16, PuA20, PuA22, PuA24, PuA40, PuA50, PH15, PH21). Die Berechnung der Formel erfolgte auf der Basis von 11 O-Atomen, alles Fe als Fe²⁺.

| Probe Nr. | BA4 | | | BA5 | | | | | BA6 | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b1-12 | b2-3 | b2-6 | b1-1 | b1-8 | b1-13 | b1-15 | b1-16 | b1a-3 | b1a-5 | b1b-2 | b1b-8 | b1c-1 | b2-3 | b2-4 | b2-5 | b2-10 | b2-11 | b2-12 |
| SiO₂ | 46,70 | 46,19 | 45,94 | 45,02 | 45,18 | 47,19 | 45,83 | 46,24 | 47,27 | 48,28 | 46,86 | 48,78 | 48,40 | 44,27 | 44,89 | 45,59 | 50,52 | 50,64 | 48,62 |
| TiO₂ | 0,49 | 0,06 | 0,09 | 0,00 | 0,04 | 0,35 | 0,16 | 0,16 | 0,37 | 0,36 | 0,69 | 0,53 | 0,24 | 0,77 | 0,49 | 0,73 | 0,13 | 0,16 | 0,33 |
| Al₂O₃ | 34,00 | 36,29 | 35,59 | 30,87 | 30,29 | 35,56 | 31,70 | 36,09 | 33,64 | 33,05 | 34,72 | 34,43 | 33,92 | 29,51 | 30,75 | 27,10 | 30,61 | 30,98 | 32,72 |
| Cr₂O₃ | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| FeO | 1,25 | 1,41 | 0,95 | 5,72 | 6,13 | 0,86 | 5,24 | 1,31 | 1,58 | 1,41 | 1,45 | 1,22 | 1,17 | 7,71 | 4,15 | 6,67 | 1,78 | 1,39 | 1,61 |
| MnO | 0,06 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| MgO | 0,83 | 0,53 | 0,51 | 2,63 | 2,80 | 0,50 | 2,27 | 0,61 | 0,97 | 1,33 | 0,81 | 1,02 | 1,06 | 2,85 | 1,76 | 2,98 | 1,87 | 1,70 | 1,33 |
| CaO | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,00 |
| Na₂O | 0,51 | 0,65 | 0,66 | 0,17 | 0,28 | 0,56 | 0,18 | 0,56 | 0,78 | 0,68 | 0,95 | 0,59 | 0,79 | 0,55 | 0,85 | 0,30 | 0,40 | 0,36 | 0,71 |
| K₂O | 10,09 | 9,93 | 10,07 | 10,12 | 10,11 | 10,03 | 10,26 | 10,24 | 9,75 | 9,80 | 9,19 | 9,67 | 9,63 | 8,86 | 8,89 | 9,27 | 9,69 | 9,69 | 9,48 |
| H₂O | 4,46 | 4,51 | 4,46 | 4,36 | 4,36 | 4,53 | 4,43 | 4,52 | 4,48 | 4,51 | 4,51 | 4,59 | 4,54 | 4,33 | 4,29 | 4,26 | 4,53 | 4,54 | 4,52 |
| Summe | 98,41 | 99,63 | 98,30 | 98,91 | 99,23 | 99,57 | 100,11 | 99,81 | 98,96 | 99,46 | 99,23 | 100,87 | 99,75 | 98,91 | 96,14 | 96,95 | 99,55 | 99,49 | 99,34 |
| Si | 3,141 | 3,068 | 3,089 | 3,096 | 3,105 | 3,124 | 3,103 | 3,070 | 3,162 | 3,207 | 3,117 | 3,184 | 3,196 | 3,066 | 3,135 | 3,205 | 3,343 | 3,345 | 3,228 |
| Al^{IV} | 0,859 | 0,932 | 0,911 | 0,904 | 0,895 | 0,876 | 0,897 | 0,930 | 0,838 | 0,793 | 0,883 | 0,816 | 0,804 | 0,934 | 0,865 | 0,795 | 0,657 | 0,655 | 0,772 |
| Al^{VI} | 1,836 | 1,909 | 1,910 | 1,598 | 1,559 | 1,898 | 1,633 | 1,894 | 1,815 | 1,793 | 1,838 | 1,832 | 1,835 | 1,475 | 1,665 | 1,451 | 1,731 | 1,756 | 1,788 |
| Ti | 0,025 | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,002 | 0,017 | 0,008 | 0,008 | 0,018 | 0,018 | 0,035 | 0,026 | 0,012 | 0,040 | 0,026 | 0,039 | 0,007 | 0,008 | 0,016 |
| Cr | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| Fe²⁺ | 0,070 | 0,078 | 0,053 | 0,329 | 0,353 | 0,047 | 0,296 | 0,073 | 0,088 | 0,078 | 0,081 | 0,066 | 0,065 | 0,446 | 0,243 | 0,392 | 0,099 | 0,077 | 0,089 |
| Mn | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 0,083 | 0,052 | 0,052 | 0,270 | 0,287 | 0,050 | 0,229 | 0,060 | 0,096 | 0,131 | 0,081 | 0,100 | 0,104 | 0,294 | 0,184 | 0,312 | 0,184 | 0,168 | 0,132 |
| Ca | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |
| Na | 0,066 | 0,083 | 0,086 | 0,023 | 0,037 | 0,072 | 0,023 | 0,072 | 0,101 | 0,087 | 0,122 | 0,075 | 0,101 | 0,073 | 0,115 | 0,041 | 0,051 | 0,046 | 0,091 |
| K | 0,866 | 0,841 | 0,864 | 0,888 | 0,886 | 0,847 | 0,887 | 0,868 | 0,832 | 0,830 | 0,779 | 0,805 | 0,811 | 0,783 | 0,792 | 0,831 | 0,818 | 0,816 | 0,803 |
| Σ Okt | 2,020 | 2,045 | 2,020 | 2,197 | 2,202 | 2,013 | 2,169 | 2,039 | 2,022 | 2,023 | 2,037 | 2,026 | 2,017 | 2,259 | 2,120 | 2,196 | 2,020 | 2,009 | 2,027 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA7 | | | | | | | | | | | PuA16 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1-2 | 1-5 | 1-9 | 1-11 | 1-13 | 1-16 | 2-2 | 2-6 | 2-8 | 2-9 | 2-12 | 1-3 | 2-1 | 2-10 | 2-11 | 2-12 | 2-13 | 2-15 | 2-16 | 2-18 | 2-2 | 2-3 | 2-6 | 2-7 | 3-10 | 3-15 | 3-17 | 3-18 |
| SiO ₂ | 49,39 | 49,33 | 48,55 | 48,75 | 48,42 | 47,14 | 49,33 | 49,48 | 49,50 | 48,24 | 47,85 | 48,74 | 49,36 | 47,46 | 47,62 | 49,00 | 46,37 | 48,83 | 47,57 | 48,28 | 47,26 | 49,01 | 47,48 | 50,13 | 48,60 | 47,53 | 47,60 | 50,81 |
| TiO ₂ | 0,62 | 0,16 | 0,19 | 0,23 | 0,32 | 0,33 | 0,16 | 0,30 | 0,31 | 0,40 | 0,25 | 0,38 | 0,18 | 0,20 | 0,28 | 0,28 | 0,27 | 0,20 | 0,22 | 0,42 | 0,49 | 0,14 | 0,17 | 0,30 | 0,26 | 0,21 | 0,24 | 0,19 |
| Al ₂ O ₃ | 27,28 | 31,32 | 32,60 | 33,12 | 31,08 | 30,15 | 32,73 | 30,19 | 30,74 | 31,33 | 32,86 | 32,14 | 31,60 | 30,83 | 32,46 | 32,41 | 32,76 | 32,37 | 34,57 | 29,61 | 33,79 | 31,08 | 33,92 | 30,82 | 31,65 | 24,19 | 33,03 | 29,43 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 4,68 | 2,28 | 1,83 | 2,15 | 2,49 | 3,17 | 1,70 | 2,64 | 2,76 | 2,71 | 2,04 | 2,17 | 1,88 | 3,56 | 1,88 | 1,61 | 2,56 | 1,87 | 0,90 | 2,82 | 1,98 | 2,21 | 1,40 | 2,10 | 1,71 | 8,62 | 1,59 | 1,91 |
| MnO | 0,06 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,06 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| MgO | 2,75 | 1,38 | 1,32 | 1,20 | 1,82 | 1,87 | 1,16 | 1,78 | 1,76 | 1,48 | 1,24 | 1,50 | 1,38 | 2,06 | 1,29 | 1,04 | 1,47 | 1,44 | 0,66 | 2,08 | 0,96 | 1,53 | 0,98 | 0,95 | 0,92 | 2,17 | 1,02 | 1,02 |
| CaO | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Na ₂ O | 0,13 | 0,22 | 0,20 | 0,40 | 0,15 | 0,19 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,20 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,22 | 0,16 | 0,27 | 0,13 | 0,22 | 0,17 | 0,25 | 0,21 | 0,21 | 0,58 | 0,24 | 0,33 |
| K ₂ O | 9,10 | 9,28 | 9,12 | 9,12 | 9,18 | 8,83 | 9,40 | 9,36 | 9,19 | 9,20 | 9,31 | 9,16 | 9,79 | 9,24 | 9,89 | 9,73 | 9,07 | 9,43 | 9,47 | 9,52 | 9,98 | 9,79 | 9,31 | 9,16 | 8,95 | 8,17 | 9,55 | 9,09 |
| H ₂ O | 4,41 | 4,48 | 4,48 | 4,53 | 4,45 | 4,34 | 4,53 | 4,46 | 4,49 | 4,44 | 4,47 | 4,50 | 4,50 | 4,41 | 4,44 | 4,50 | 4,40 | 4,50 | 4,49 | 4,40 | 4,49 | 4,46 | 4,47 | 4,48 | 4,42 | 4,21 | 4,45 | 4,45 |
| Summe | 98,44 | 98,46 | 98,29 | 99,58 | 97,97 | 96,05 | 99,33 | 98,38 | 98,97 | 98,06 | 98,23 | 98,83 | 98,91 | 97,94 | 98,04 | 98,86 | 97,14 | 98,83 | 98,22 | 97,31 | 99,23 | 98,44 | 98,01 | 98,15 | 96,72 | 95,68 | 97,72 | 97,21 |
| Si | 3,354 | 3,301 | 3,246 | 3,225 | 3,265 | 3,254 | 3,265 | 3,324 | 3,304 | 3,254 | 3,212 | 3,249 | 3,292 | 3,226 | 3,214 | 3,265 | 3,160 | 3,253 | 3,177 | 3,293 | 3,156 | 3,292 | 3,184 | 3,354 | 3,295 | 3,387 | 3,210 | 3,426 |
| Al ^{IV} | 0,646 | 0,699 | 0,754 | 0,775 | 0,735 | 0,746 | 0,735 | 0,676 | 0,696 | 0,746 | 0,788 | 0,751 | 0,708 | 0,774 | 0,786 | 0,735 | 0,840 | 0,747 | 0,823 | 0,707 | 0,844 | 0,708 | 0,816 | 0,646 | 0,705 | 0,613 | 0,790 | 0,574 |
| Al ^{VI} | 1,538 | 1,771 | 1,815 | 1,808 | 1,736 | 1,707 | 1,817 | 1,713 | 1,722 | 1,746 | 1,812 | 1,775 | 1,775 | 1,695 | 1,795 | 1,810 | 1,791 | 1,795 | 1,898 | 1,674 | 1,815 | 1,753 | 1,865 | 1,784 | 1,823 | 1,419 | 1,835 | 1,764 |
| Ti | 0,032 | 0,008 | 0,010 | 0,011 | 0,016 | 0,017 | 0,008 | 0,015 | 0,016 | 0,020 | 0,013 | 0,019 | 0,009 | 0,010 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,010 | 0,011 | 0,022 | 0,025 | 0,007 | 0,008 | 0,015 | 0,013 | 0,011 | 0,012 | 0,009 |
| Cr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 0,266 | 0,128 | 0,102 | 0,119 | 0,140 | 0,183 | 0,094 | 0,148 | 0,154 | 0,153 | 0,115 | 0,121 | 0,105 | 0,202 | 0,106 | 0,090 | 0,146 | 0,104 | 0,050 | 0,161 | 0,111 | 0,124 | 0,079 | 0,118 | 0,097 | 0,514 | 0,089 | 0,108 |
| Mn | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 0,279 | 0,137 | 0,132 | 0,118 | 0,183 | 0,192 | 0,114 | 0,179 | 0,175 | 0,149 | 0,124 | 0,149 | 0,137 | 0,209 | 0,129 | 0,104 | 0,149 | 0,143 | 0,065 | 0,212 | 0,096 | 0,154 | 0,098 | 0,094 | 0,093 | 0,231 | 0,102 | 0,102 |
| Ca | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 |
| Na | 0,016 | 0,028 | 0,025 | 0,051 | 0,019 | 0,026 | 0,032 | 0,020 | 0,019 | 0,029 | 0,027 | 0,025 | 0,026 | 0,018 | 0,023 | 0,029 | 0,029 | 0,021 | 0,035 | 0,017 | 0,029 | 0,022 | 0,033 | 0,027 | 0,027 | 0,080 | 0,032 | 0,043 |
| K | 0,788 | 0,792 | 0,778 | 0,770 | 0,789 | 0,777 | 0,794 | 0,802 | 0,783 | 0,792 | 0,797 | 0,779 | 0,833 | 0,801 | 0,851 | 0,827 | 0,788 | 0,801 | 0,807 | 0,828 | 0,850 | 0,839 | 0,796 | 0,782 | 0,774 | 0,743 | 0,821 | 0,782 |
| Σ Okt | 2,118 | 2,045 | 2,059 | 2,060 | 2,079 | 2,100 | 2,036 | 2,056 | 2,069 | 2,069 | 2,062 | 2,065 | 2,028 | 2,118 | 2,044 | 2,021 | 2,100 | 2,054 | 2,029 | 2,070 | 2,049 | 2,040 | 2,051 | 2,011 | 2,027 | 2,175 | 2,039 | 1,983 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA16 (Forts.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 3-2 | 3-20 | 3-22 | 3-23 | 3-24 | 3-25 | 3-26 | 3-27 | 3-3 | 3-4 | 3-8 | 3-9 | 4-1 | 4-12 | 4-13 | 4-14 | 4-16 | 4-17 | 4-19 | 4-20 | 4-24 | 4-25 | 4-3 | 4-4 | 4-5 | 4-7 | 4-8 | 4-9 |
| SiO ₂ | 47,25 | 46,91 | 47,80 | 43,00 | 48,59 | 46,09 | 48,55 | 47,71 | 45,10 | 48,06 | 46,45 | 47,18 | 47,17 | 47,84 | 48,21 | 46,55 | 46,25 | 46,81 | 47,42 | 47,19 | 45,59 | 45,90 | 46,36 | 46,54 | 47,06 | 51,53 | 46,41 | 45,99 |
| TiO ₂ | 0,11 | 0,16 | 0,72 | 6,37 | 0,27 | 0,36 | 0,39 | 0,25 | 0,32 | 0,28 | 0,25 | 0,27 | 0,39 | 0,18 | 2,07 | 0,55 | 0,18 | 0,32 | 0,20 | 0,27 | 0,21 | 0,26 | 0,21 | 0,23 | 0,21 | 0,46 | 0,38 | 0,23 |
| Al ₂ O ₃ | 33,75 | 32,47 | 28,13 | 27,15 | 26,75 | 34,80 | 31,22 | 29,07 | 31,67 | 31,30 | 32,92 | 31,79 | 31,17 | 33,83 | 27,33 | 31,42 | 33,57 | 32,34 | 34,67 | 32,10 | 33,43 | 31,42 | 33,10 | 32,64 | 33,69 | 27,94 | 32,49 | 32,64 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,01 | 0,05 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 1,03 | 1,60 | 3,18 | 3,06 | 5,15 | 1,42 | 2,51 | 4,17 | 3,34 | 1,64 | 1,90 | 2,22 | 2,48 | 1,12 | 3,71 | 1,95 | 1,85 | 2,49 | 1,62 | 2,37 | 3,13 | 3,81 | 2,00 | 2,16 | 1,46 | 3,93 | 2,17 | 2,07 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 |
| MgO | 0,72 | 0,89 | 2,19 | 1,22 | 1,88 | 0,69 | 1,54 | 2,03 | 1,70 | 0,79 | 0,87 | 1,27 | 1,19 | 0,78 | 2,22 | 1,43 | 0,67 | 1,25 | 0,71 | 1,07 | 1,32 | 0,97 | 0,92 | 1,17 | 0,86 | 1,66 | 0,96 | 1,01 |
| CaO | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Na ₂ O | 0,24 | 0,29 | 0,13 | 0,78 | 1,42 | 1,00 | 0,33 | 0,15 | 0,22 | 0,27 | 0,26 | 0,19 | 0,32 | 0,23 | 0,17 | 0,33 | 0,33 | 0,17 | 0,31 | 0,20 | 0,23 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,27 | 1,64 | 0,22 | 0,25 |
| K ₂ O | 9,14 | 9,18 | 9,20 | 8,12 | 7,62 | 8,31 | 9,52 | 9,25 | 8,92 | 9,09 | 9,30 | 9,19 | 8,97 | 9,23 | 10,08 | 9,73 | 8,71 | 9,20 | 9,16 | 9,46 | 9,06 | 9,23 | 9,38 | 9,01 | 9,19 | 7,09 | 9,40 | 8,76 |
| H ₂ O | 4,42 | 4,37 | 4,32 | 4,20 | 4,32 | 4,44 | 4,46 | 4,35 | 4,30 | 4,38 | 4,38 | 4,38 | 4,36 | 4,47 | 4,39 | 4,35 | 4,38 | 4,40 | 4,50 | 4,40 | 4,39 | 4,32 | 4,38 | 4,38 | 4,43 | 4,50 | 4,37 | 4,34 |
| Summe | 96,68 | 95,94 | 95,77 | 94,04 | 96,09 | 97,14 | 98,56 | 96,98 | 95,62 | 95,85 | 96,34 | 96,51 | 96,07 | 97,69 | 98,20 | 96,31 | 95,98 | 97,01 | 98,60 | 97,23 | 97,37 | 96,20 | 96,58 | 96,48 | 97,24 | 98,90 | 96,43 | 95,33 |
| Si | 3,202 | 3,218 | 3,319 | 3,071 | 3,376 | 3,115 | 3,262 | 3,285 | 3,141 | 3,293 | 3,182 | 3,228 | 3,244 | 3,209 | 3,296 | 3,205 | 3,168 | 3,192 | 3,161 | 3,214 | 3,111 | 3,185 | 3,171 | 3,185 | 3,182 | 3,432 | 3,184 | 3,179 |
| Al ^{IV} | 0,798 | 0,782 | 0,681 | 0,929 | 0,624 | 0,885 | 0,738 | 0,715 | 0,859 | 0,707 | 0,818 | 0,772 | 0,756 | 0,791 | 0,704 | 0,795 | 0,832 | 0,808 | 0,839 | 0,786 | 0,889 | 0,815 | 0,829 | 0,815 | 0,818 | 0,568 | 0,816 | 0,821 |
| Al ^{VI} | 1,897 | 1,843 | 1,620 | 1,356 | 1,567 | 1,887 | 1,735 | 1,644 | 1,741 | 1,821 | 1,840 | 1,791 | 1,771 | 1,884 | 1,498 | 1,755 | 1,878 | 1,792 | 1,885 | 1,791 | 1,800 | 1,754 | 1,840 | 1,817 | 1,866 | 1,625 | 1,812 | 1,838 |
| Ti | 0,006 | 0,008 | 0,038 | 0,342 | 0,014 | 0,018 | 0,020 | 0,013 | 0,017 | 0,014 | 0,013 | 0,014 | 0,020 | 0,009 | 0,106 | 0,028 | 0,009 | 0,016 | 0,010 | 0,014 | 0,011 | 0,014 | 0,011 | 0,012 | 0,011 | 0,023 | 0,020 | 0,012 |
| Cr | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 0,058 | 0,092 | 0,185 | 0,183 | 0,299 | 0,080 | 0,141 | 0,240 | 0,194 | 0,094 | 0,109 | 0,127 | 0,143 | 0,063 | 0,212 | 0,112 | 0,106 | 0,142 | 0,090 | 0,135 | 0,179 | 0,221 | 0,114 | 0,124 | 0,082 | 0,219 | 0,125 | 0,119 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,004 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 0,072 | 0,091 | 0,227 | 0,130 | 0,195 | 0,070 | 0,155 | 0,208 | 0,176 | 0,081 | 0,089 | 0,130 | 0,122 | 0,078 | 0,226 | 0,147 | 0,068 | 0,127 | 0,071 | 0,109 | 0,134 | 0,100 | 0,094 | 0,119 | 0,087 | 0,165 | 0,098 | 0,104 |
| Ca | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,004 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,003 |
| Na | 0,031 | 0,038 | 0,018 | 0,109 | 0,191 | 0,130 | 0,044 | 0,020 | 0,029 | 0,036 | 0,034 | 0,025 | 0,043 | 0,030 | 0,023 | 0,045 | 0,044 | 0,022 | 0,040 | 0,026 | 0,030 | 0,028 | 0,029 | 0,031 | 0,035 | 0,211 | 0,029 | 0,034 |
| K | 0,790 | 0,803 | 0,815 | 0,740 | 0,676 | 0,717 | 0,816 | 0,813 | 0,792 | 0,795 | 0,813 | 0,802 | 0,787 | 0,790 | 0,879 | 0,854 | 0,761 | 0,800 | 0,779 | 0,821 | 0,788 | 0,817 | 0,819 | 0,786 | 0,793 | 0,603 | 0,823 | 0,773 |
| Σ Okt | 2,034 | 2,037 | 2,073 | 2,016 | 2,077 | 2,056 | 2,051 | 2,105 | 2,131 | 2,012 | 2,051 | 2,063 | 2,056 | 2,034 | 2,043 | 2,042 | 2,064 | 2,079 | 2,056 | 2,056 | 2,123 | 2,091 | 2,060 | 2,076 | 2,050 | 2,038 | 2,054 | 2,074 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA16 (Forts.) | | | | | | | | | PuA20 | | | | | | | | | | PuA22 | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 5-10 | 5-12 | 5-13 | 5-2 | 5-4 | 5-5 | 5-6 | 5-7 | 5-9 | b1-2 | b1-3 | b1-5 | b1-7 | b1-9 | b1-9 | b2-4 | b2-6 | b2-9 | b2-10 | b2-11 | 1-1 | 1-4 | 1-6 | 1-7 | 1-8 | 1-9 | 1-12 | 1-16 |
| SiO ₂ | 47,61 | 45,56 | 45,76 | 46,32 | 45,93 | 46,86 | 47,06 | 46,05 | 46,52 | 47,42 | 45,37 | 47,26 | 45,76 | 48,57 | 47,33 | 48,10 | 50,55 | 48,47 | 47,16 | 47,51 | 47,93 | 47,22 | 49,85 | 47,45 | 46,65 | 47,81 | 47,03 | 48,13 |
| TiO ₂ | 0,40 | 0,12 | 0,86 | 0,25 | 0,28 | 0,26 | 0,16 | 0,32 | 0,17 | 0,35 | 0,45 | 0,19 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,18 | 0,33 | 0,41 | 0,23 | 0,34 | 0,47 | 0,54 | 0,07 | 0,21 | 0,33 | 0,25 | 0,38 | 0,21 |
| Al ₂ O ₃ | 32,76 | 30,94 | 32,30 | 33,32 | 32,52 | 32,99 | 33,05 | 32,39 | 33,60 | 31,98 | 31,18 | 28,77 | 31,27 | 31,81 | 31,65 | 33,45 | 30,88 | 30,63 | 33,11 | 32,67 | 33,68 | 33,33 | 29,73 | 31,20 | 34,66 | 32,61 | 29,74 | 33,58 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 1,95 | 3,27 | 2,93 | 1,82 | 1,73 | 2,56 | 1,56 | 2,65 | 1,57 | 3,85 | 4,70 | 7,03 | 4,71 | 2,22 | 2,18 | 1,58 | 1,97 | 2,09 | 2,72 | 2,24 | 2,31 | 2,29 | 2,17 | 3,19 | 0,89 | 2,41 | 3,29 | 1,55 |
| MnO | 0,01 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,09 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 0,07 | 0,02 | 0,04 |
| MgO | 0,98 | 1,29 | 1,08 | 0,96 | 0,97 | 1,24 | 0,87 | 1,33 | 0,83 | 0,93 | 2,03 | 2,31 | 2,26 | 1,59 | 1,41 | 1,26 | 1,27 | 1,96 | 1,54 | 1,35 | 0,94 | 0,99 | 2,34 | 1,65 | 0,48 | 1,35 | 1,94 | 1,19 |
| CaO | 0,07 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,00 |
| Na ₂ O | 0,22 | 0,84 | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,17 | 0,29 | 0,19 | 0,30 | 0,14 | 0,21 | 1,32 | 0,17 | 0,36 | 0,21 | 0,20 | 0,49 | 0,26 | 0,20 | 0,45 | 0,19 | 0,40 | 0,14 | 0,19 | 0,67 | 0,16 | 0,18 | 0,17 |
| K ₂ O | 9,38 | 7,87 | 9,29 | 9,39 | 9,90 | 9,48 | 9,27 | 9,61 | 9,18 | 10,90 | 8,96 | 7,41 | 8,96 | 9,96 | 9,96 | 10,31 | 9,64 | 8,92 | 9,85 | 10,10 | 9,79 | 9,76 | 9,55 | 9,03 | 8,88 | 9,23 | 9,10 | 9,66 |
| H ₂ O | 4,45 | 4,27 | 4,37 | 4,39 | 4,34 | 4,43 | 4,40 | 4,37 | 4,40 | 4,46 | 4,35 | 4,39 | 4,37 | 4,49 | 4,40 | 4,51 | 4,53 | 4,43 | 4,48 | 4,47 | 4,52 | 4,48 | 4,47 | 4,40 | 4,44 | 4,47 | 4,33 | 4,51 |
| Summe | 97,83 | 94,26 | 96,88 | 96,76 | 95,93 | 98,03 | 96,66 | 96,90 | 96,56 | 100,08 | 97,38 | 98,85 | 97,83 | 99,28 | 97,48 | 99,59 | 99,69 | 97,21 | 99,29 | 99,17 | 99,86 | 99,02 | 98,47 | 97,41 | 97,05 | 98,39 | 96,04 | 99,02 |
| Si | 3,211 | 3,200 | 3,142 | 3,162 | 3,173 | 3,168 | 3,204 | 3,159 | 3,171 | 3,188 | 3,128 | 3,226 | 3,137 | 3,243 | 3,222 | 3,195 | 3,342 | 3,284 | 3,158 | 3,185 | 3,178 | 3,163 | 3,343 | 3,231 | 3,150 | 3,211 | 3,256 | 3,202 |
| Al ^{IV} | 0,789 | 0,800 | 0,858 | 0,838 | 0,827 | 0,832 | 0,796 | 0,841 | 0,829 | 0,812 | 0,872 | 0,774 | 0,863 | 0,757 | 0,778 | 0,805 | 0,658 | 0,716 | 0,842 | 0,815 | 0,822 | 0,837 | 0,657 | 0,769 | 0,850 | 0,789 | 0,744 | 0,798 |
| Al ^{VI} | 1,815 | 1,762 | 1,756 | 1,842 | 1,820 | 1,797 | 1,855 | 1,778 | 1,870 | 1,721 | 1,661 | 1,540 | 1,663 | 1,747 | 1,762 | 1,814 | 1,748 | 1,730 | 1,771 | 1,766 | 1,810 | 1,795 | 1,692 | 1,736 | 1,908 | 1,791 | 1,683 | 1,834 |
| Ti | 0,020 | 0,007 | 0,044 | 0,013 | 0,014 | 0,013 | 0,008 | 0,016 | 0,009 | 0,017 | 0,023 | 0,010 | 0,014 | 0,013 | 0,014 | 0,009 | 0,016 | 0,021 | 0,012 | 0,017 | 0,023 | 0,027 | 0,003 | 0,011 | 0,017 | 0,012 | 0,020 | 0,011 |
| Cr | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 0,110 | 0,192 | 0,168 | 0,104 | 0,100 | 0,145 | 0,089 | 0,152 | 0,090 | 0,217 | 0,271 | 0,401 | 0,270 | 0,124 | 0,124 | 0,088 | 0,109 | 0,119 | 0,152 | 0,125 | 0,128 | 0,128 | 0,122 | 0,182 | 0,050 | 0,135 | 0,190 | 0,086 |
| Mn | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,004 | 0,001 | 0,002 |
| Mg | 0,098 | 0,136 | 0,111 | 0,097 | 0,099 | 0,125 | 0,088 | 0,136 | 0,084 | 0,093 | 0,208 | 0,235 | 0,231 | 0,158 | 0,143 | 0,124 | 0,125 | 0,198 | 0,154 | 0,135 | 0,093 | 0,099 | 0,234 | 0,167 | 0,049 | 0,135 | 0,200 | 0,118 |
| Ca | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,000 |
| Na | 0,029 | 0,115 | 0,032 | 0,032 | 0,033 | 0,022 | 0,038 | 0,025 | 0,039 | 0,018 | 0,028 | 0,174 | 0,022 | 0,046 | 0,028 | 0,026 | 0,062 | 0,034 | 0,026 | 0,059 | 0,025 | 0,052 | 0,019 | 0,025 | 0,087 | 0,020 | 0,024 | 0,021 |
| K | 0,807 | 0,705 | 0,814 | 0,818 | 0,872 | 0,817 | 0,805 | 0,841 | 0,798 | 0,934 | 0,788 | 0,646 | 0,784 | 0,848 | 0,865 | 0,874 | 0,813 | 0,771 | 0,841 | 0,864 | 0,828 | 0,834 | 0,817 | 0,785 | 0,764 | 0,790 | 0,803 | 0,820 |
| Σ Okt | 2,044 | 2,099 | 2,082 | 2,059 | 2,036 | 2,082 | 2,040 | 2,082 | 2,052 | 2,051 | 2,169 | 2,194 | 2,181 | 2,043 | 2,045 | 2,036 | 2,000 | 2,070 | 2,089 | 2,045 | 2,055 | 2,049 | 2,058 | 2,098 | 2,025 | 2,079 | 2,095 | 2,051 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA22 (Forts.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1-17 | 1-18 | 1-19 | 1-20 | 1-22 | 1-23 | 1-24 | 1-25 | 1-26 | 1-27 | 1-28 | 1-29 | 1-30 | 2-2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 2-6 | 2-7 | 2-8 | 2-9 | 2-10 | 2-11 | 2-12 | 2-13 | 2-14 | 2-15 |
| SiO ₂ | 48,44 | 47,66 | 46,37 | 49,42 | 47,31 | 46,92 | 48,44 | 48,61 | 49,45 | 48,35 | 48,30 | 46,73 | 47,68 | 45,79 | 47,83 | 46,68 | 46,86 | 45,45 | 47,31 | 46,25 | 46,33 | 46,32 | 47,65 | 47,73 | 48,32 | 46,21 | 50,04 |
| TiO ₂ | 0,22 | 0,10 | 0,61 | 0,21 | 0,15 | 0,24 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,18 | 0,23 | 0,06 | 0,21 | 1,90 | 0,27 | 0,06 | 0,08 | 0,21 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,42 | 0,18 | 0,39 | 0,12 | 0,58 | 0,18 |
| Al ₂ O ₃ | 29,98 | 33,64 | 34,03 | 33,48 | 32,97 | 32,68 | 31,39 | 29,99 | 29,31 | 32,41 | 32,56 | 34,83 | 32,45 | 34,66 | 32,37 | 34,90 | 34,46 | 30,06 | 33,52 | 33,23 | 33,78 | 32,15 | 32,80 | 32,44 | 32,08 | 32,00 | 29,89 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 3,04 | 1,61 | 1,49 | 1,76 | 1,88 | 4,06 | 3,18 | 2,78 | 3,67 | 1,76 | 2,21 | 2,47 | 2,22 | 1,59 | 2,35 | 2,23 | 1,11 | 4,75 | 2,18 | 3,85 | 3,75 | 3,58 | 2,31 | 2,01 | 1,80 | 4,03 | 1,81 |
| MnO | 0,05 | 0,21 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 |
| MgO | 1,75 | 0,58 | 1,05 | 1,05 | 1,01 | 1,39 | 1,55 | 2,63 | 2,38 | 1,52 | 1,43 | 0,29 | 1,43 | 0,53 | 1,16 | 0,40 | 1,02 | 2,13 | 0,91 | 0,90 | 0,85 | 1,04 | 1,14 | 1,59 | 1,51 | 0,94 | 0,99 |
| CaO | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Na ₂ O | 0,20 | 0,16 | 0,28 | 0,22 | 0,21 | 0,56 | 0,13 | 0,18 | 0,09 | 0,14 | 0,15 | 0,23 | 0,14 | 0,27 | 0,21 | 1,08 | 0,21 | 0,15 | 0,23 | 0,68 | 0,65 | 0,46 | 0,21 | 0,30 | 0,13 | 0,22 | 0,22 |
| K ₂ O | 8,96 | 9,40 | 9,47 | 9,89 | 9,70 | 8,51 | 9,57 | 10,44 | 9,54 | 9,86 | 9,77 | 10,48 | 9,61 | 9,69 | 9,75 | 8,73 | 10,30 | 9,03 | 9,71 | 9,73 | 9,76 | 10,01 | 9,87 | 9,82 | 9,60 | 9,55 | 9,33 |
| H ₂ O | 4,40 | 4,46 | 4,44 | 4,58 | 4,43 | 4,45 | 4,47 | 4,47 | 4,47 | 4,48 | 4,50 | 4,49 | 4,45 | 4,48 | 4,46 | 4,48 | 4,47 | 4,29 | 4,47 | 4,45 | 4,48 | 4,40 | 4,46 | 4,47 | 4,46 | 4,39 | 4,42 |
| Summe | 97,06 | 97,84 | 97,79 | 100,61 | 97,65 | 98,83 | 99,09 | 99,56 | 99,30 | 98,74 | 99,21 | 99,64 | 98,25 | 98,93 | 98,46 | 98,58 | 98,52 | 96,14 | 98,64 | 99,45 | 100,01 | 98,40 | 98,62 | 98,78 | 98,04 | 97,96 | 96,88 |
| Si | 3,303 | 3,206 | 3,129 | 3,237 | 3,200 | 3,158 | 3,247 | 3,262 | 3,315 | 3,234 | 3,221 | 3,123 | 3,211 | 3,065 | 3,218 | 3,126 | 3,143 | 3,175 | 3,175 | 3,117 | 3,103 | 3,155 | 3,202 | 3,201 | 3,250 | 3,158 | 3,390 |
| Al ^{IV} | 0,697 | 0,794 | 0,871 | 0,763 | 0,800 | 0,842 | 0,753 | 0,738 | 0,685 | 0,766 | 0,779 | 0,877 | 0,789 | 0,935 | 0,782 | 0,874 | 0,857 | 0,825 | 0,825 | 0,883 | 0,897 | 0,845 | 0,798 | 0,799 | 0,750 | 0,842 | 0,610 |
| Al ^{VI} | 1,712 | 1,874 | 1,836 | 1,823 | 1,829 | 1,751 | 1,726 | 1,633 | 1,631 | 1,789 | 1,781 | 1,866 | 1,786 | 1,800 | 1,785 | 1,881 | 1,867 | 1,649 | 1,825 | 1,756 | 1,769 | 1,736 | 1,799 | 1,764 | 1,792 | 1,735 | 1,777 |
| Ti | 0,011 | 0,005 | 0,031 | 0,010 | 0,008 | 0,012 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,009 | 0,012 | 0,003 | 0,011 | 0,096 | 0,014 | 0,003 | 0,004 | 0,011 | 0,015 | 0,017 | 0,018 | 0,021 | 0,009 | 0,020 | 0,006 | 0,030 | 0,009 |
| Cr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 0,173 | 0,091 | 0,084 | 0,097 | 0,106 | 0,228 | 0,178 | 0,156 | 0,206 | 0,098 | 0,123 | 0,138 | 0,125 | 0,089 | 0,132 | 0,125 | 0,062 | 0,278 | 0,122 | 0,217 | 0,210 | 0,204 | 0,130 | 0,113 | 0,101 | 0,230 | 0,103 |
| Mn | 0,003 | 0,012 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 |
| Mg | 0,178 | 0,058 | 0,105 | 0,102 | 0,102 | 0,140 | 0,154 | 0,263 | 0,237 | 0,151 | 0,143 | 0,029 | 0,143 | 0,053 | 0,116 | 0,039 | 0,102 | 0,221 | 0,091 | 0,090 | 0,085 | 0,105 | 0,115 | 0,159 | 0,152 | 0,096 | 0,100 |
| Ca | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| Na | 0,027 | 0,020 | 0,037 | 0,028 | 0,027 | 0,073 | 0,017 | 0,024 | 0,012 | 0,018 | 0,019 | 0,030 | 0,018 | 0,035 | 0,027 | 0,140 | 0,028 | 0,020 | 0,030 | 0,088 | 0,085 | 0,060 | 0,028 | 0,039 | 0,017 | 0,030 | 0,029 |
| K | 0,780 | 0,806 | 0,815 | 0,827 | 0,837 | 0,731 | 0,818 | 0,894 | 0,816 | 0,841 | 0,831 | 0,893 | 0,826 | 0,827 | 0,837 | 0,746 | 0,881 | 0,805 | 0,831 | 0,837 | 0,834 | 0,870 | 0,846 | 0,840 | 0,823 | 0,832 | 0,806 |
| Σ Okt | 2,076 | 2,039 | 2,058 | 2,032 | 2,045 | 2,131 | 2,077 | 2,076 | 2,095 | 2,050 | 2,061 | 2,040 | 2,067 | 2,038 | 2,052 | 2,048 | 2,036 | 2,161 | 2,054 | 2,083 | 2,085 | 2,068 | 2,053 | 2,057 | 2,052 | 2,093 | 1,989 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA22 (Forts.) | | | | | | | | | PuA24 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | 3-2 | 3-3 | 3-4 | 3-5 | 3-10 | 3-12 | 3-13 | 3-14 | 3-15 | b1-1 | b1-2 | b1-5 | b1-6 | b1-10 | b1-12 | b2-3 | b2a-1 | b2a-3 | b2a-5 | b2a-6 | b3-3 | b3a-1 | b3a-2 | b3a-4 | 1-2 | 1-5 |
| SiO ₂ | 47,06 | 48,31 | 48,05 | 46,06 | 48,05 | 48,64 | 48,40 | 48,00 | 49,51 | 49,69 | 47,32 | 48,82 | 49,27 | 47,77 | 48,96 | 47,36 | 48,67 | 47,69 | 49,05 | 46,79 | 44,96 | 45,33 | 47,58 | 49,30 | 49,46 | 48,08 |
| TiO ₂ | 0,38 | 0,18 | 0,13 | 0,34 | 0,60 | 0,19 | 0,29 | 0,44 | 0,41 | 0,12 | 0,31 | 0,28 | 0,42 | 0,42 | 0,48 | 0,64 | 0,56 | 0,28 | 0,27 | 0,30 | 0,51 | 0,41 | 0,35 | 0,34 | 0,18 | 0,19 |
| Al ₂ O ₃ | 31,54 | 32,05 | 31,78 | 31,84 | 29,52 | 33,26 | 33,38 | 31,08 | 28,53 | 27,19 | 30,62 | 30,61 | 28,74 | 33,76 | 29,41 | 32,85 | 30,74 | 34,19 | 32,50 | 33,57 | 33,61 | 31,91 | 32,98 | 32,25 | 31,47 | 33,73 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,00 |
| FeO | 3,76 | 1,86 | 1,44 | 4,82 | 4,26 | 1,87 | 1,99 | 4,41 | 1,95 | 4,65 | 2,85 | 3,40 | 4,38 | 1,63 | 4,60 | 1,86 | 2,76 | 1,90 | 2,20 | 1,90 | 4,68 | 4,65 | 2,63 | 1,93 | 2,35 | 1,44 |
| MnO | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| MgO | 1,64 | 1,41 | 1,50 | 1,65 | 1,89 | 1,07 | 1,13 | 1,41 | 2,80 | 2,51 | 1,69 | 1,82 | 1,55 | 1,14 | 1,72 | 1,21 | 1,82 | 0,94 | 1,32 | 1,02 | 1,31 | 1,18 | 1,15 | 1,63 | 1,68 | 1,06 |
| CaO | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Na ₂ O | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,20 | 0,28 | 0,18 | 0,10 | 0,12 | 0,33 | 0,47 | 0,21 | 0,47 | 0,26 | 0,28 | 0,24 | 0,29 | 0,23 | 0,46 | 1,10 | 0,57 | 0,25 | 0,26 | 0,21 | 0,26 |
| K ₂ O | 9,10 | 9,31 | 10,03 | 9,09 | 10,05 | 9,93 | 9,47 | 9,99 | 9,17 | 10,49 | 9,61 | 9,36 | 10,11 | 9,97 | 10,51 | 10,25 | 10,45 | 10,06 | 10,16 | 10,16 | 9,07 | 9,73 | 9,77 | 10,35 | 9,76 | 9,77 |
| H ₂ O | 4,42 | 4,45 | 4,43 | 4,40 | 4,42 | 4,53 | 4,52 | 4,47 | 4,41 | 4,42 | 4,38 | 4,48 | 4,43 | 4,52 | 4,47 | 4,47 | 4,48 | 4,52 | 4,54 | 4,46 | 4,44 | 4,37 | 4,48 | 4,55 | 4,52 | 4,51 |
| Summe | 98,04 | 97,75 | 97,50 | 98,37 | 99,03 | 99,72 | 99,54 | 100,06 | 96,99 | 99,20 | 97,13 | 99,29 | 99,09 | 99,71 | 100,44 | 99,01 | 99,76 | 99,92 | 100,35 | 98,72 | 99,74 | 98,20 | 99,27 | 100,66 | 99,63 | 99,02 |
| Si | 3,196 | 3,254 | 3,253 | 3,140 | 3,258 | 3,222 | 3,208 | 3,219 | 3,363 | 3,373 | 3,240 | 3,270 | 3,333 | 3,170 | 3,283 | 3,176 | 3,255 | 3,160 | 3,240 | 3,148 | 3,037 | 3,114 | 3,183 | 3,246 | 3,283 | 3,199 |
| Al ^{IV} | 0,804 | 0,746 | 0,747 | 0,860 | 0,742 | 0,778 | 0,792 | 0,781 | 0,637 | 0,627 | 0,760 | 0,730 | 0,667 | 0,830 | 0,717 | 0,824 | 0,745 | 0,840 | 0,760 | 0,852 | 0,963 | 0,886 | 0,817 | 0,754 | 0,717 | 0,801 |
| Al ^{VI} | 1,720 | 1,798 | 1,790 | 1,697 | 1,617 | 1,818 | 1,815 | 1,676 | 1,647 | 1,547 | 1,712 | 1,687 | 1,625 | 1,810 | 1,607 | 1,773 | 1,678 | 1,831 | 1,770 | 1,811 | 1,712 | 1,697 | 1,782 | 1,748 | 1,745 | 1,844 |
| Ti | 0,019 | 0,009 | 0,006 | 0,018 | 0,030 | 0,010 | 0,015 | 0,022 | 0,021 | 0,006 | 0,016 | 0,014 | 0,021 | 0,021 | 0,024 | 0,032 | 0,028 | 0,014 | 0,014 | 0,015 | 0,026 | 0,021 | 0,018 | 0,017 | 0,009 | 0,009 |
| Cr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |
| Fe ²⁺ | 0,214 | 0,105 | 0,082 | 0,275 | 0,242 | 0,103 | 0,110 | 0,247 | 0,110 | 0,264 | 0,163 | 0,191 | 0,248 | 0,091 | 0,258 | 0,104 | 0,154 | 0,105 | 0,121 | 0,107 | 0,265 | 0,267 | 0,147 | 0,106 | 0,131 | 0,080 |
| Mn | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 0,166 | 0,142 | 0,151 | 0,168 | 0,191 | 0,105 | 0,111 | 0,141 | 0,283 | 0,254 | 0,173 | 0,181 | 0,156 | 0,113 | 0,172 | 0,121 | 0,182 | 0,093 | 0,129 | 0,102 | 0,132 | 0,121 | 0,115 | 0,160 | 0,166 | 0,106 |
| Ca | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |
| Na | 0,015 | 0,017 | 0,018 | 0,020 | 0,022 | 0,025 | 0,035 | 0,023 | 0,013 | 0,015 | 0,044 | 0,061 | 0,027 | 0,061 | 0,034 | 0,036 | 0,031 | 0,037 | 0,030 | 0,061 | 0,144 | 0,076 | 0,033 | 0,033 | 0,027 | 0,033 |
| K | 0,788 | 0,800 | 0,866 | 0,790 | 0,870 | 0,839 | 0,801 | 0,855 | 0,794 | 0,908 | 0,840 | 0,800 | 0,872 | 0,844 | 0,899 | 0,877 | 0,892 | 0,850 | 0,856 | 0,872 | 0,782 | 0,852 | 0,834 | 0,869 | 0,826 | 0,829 |
| Σ Okt | 2,119 | 2,057 | 2,029 | 2,158 | 2,084 | 2,038 | 2,054 | 2,091 | 2,066 | 2,072 | 2,065 | 2,076 | 2,050 | 2,035 | 2,063 | 2,035 | 2,043 | 2,045 | 2,038 | 2,037 | 2,137 | 2,109 | 2,066 | 2,033 | 2,051 | 2,038 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA24 (Forts.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | PuA40 | | | | | |
|--------------------------------|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1-8 | 1-9 | 1-10 | 1-12 | 1-14 | 1-15 | 1-16 | 1-18 | 1-19 | 1-22 | 1-25 | 1-27 | 1-28 | 1-30 | 1-31 | 2-3 | 2-6 | 2-7 | 3-2 | 3-3 | 3-4 | 40-2B | 40-5 | 40-14 | 40-15 |
| SiO ₂ | 52,81 | 48,03 | 47,65 | 47,16 | 47,42 | 49,47 | 48,46 | 49,01 | 46,61 | 47,37 | 48,56 | 47,57 | 48,14 | 48,50 | 48,41 | 49,46 | 43,03 | 48,58 | 48,32 | 49,51 | 48,35 | 46,57 | 49,01 | 47,28 | 47,71 |
| TiO ₂ | 0,40 | 0,14 | 0,20 | 0,64 | 0,32 | 0,12 | 0,84 | 0,31 | 0,30 | 0,80 | 0,59 | 0,47 | 0,39 | 0,36 | 0,36 | 0,67 | 5,06 | 0,27 | 0,29 | 0,12 | 0,51 | 0,13 | 0,18 | 0,29 | 0,18 |
| Al ₂ O ₃ | 27,63 | 29,11 | 28,96 | 34,10 | 33,92 | 28,62 | 32,84 | 31,06 | 34,45 | 32,07 | 28,63 | 34,55 | 30,52 | 32,48 | 31,03 | 30,44 | 27,95 | 32,26 | 32,51 | 33,86 | 32,87 | 31,04 | 28,38 | 30,66 | 29,58 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,17 | 0,04 | 0,05 | 0,08 | 0,00 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,01 |
| FeO | 4,16 | 6,24 | 6,05 | 1,93 | 2,24 | 4,66 | 1,01 | 2,42 | 2,91 | 2,01 | 4,15 | 1,63 | 3,60 | 1,95 | 4,26 | 2,88 | 3,70 | 2,77 | 2,48 | 1,49 | 1,60 | 1,82 | 2,04 | 3,12 | 2,46 |
| MnO | 0,01 | 0,16 | 0,14 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,01 |
| MgO | 1,88 | 2,13 | 2,17 | 1,08 | 0,75 | 2,18 | 2,16 | 1,62 | 0,68 | 1,46 | 2,48 | 0,98 | 1,58 | 1,04 | 1,85 | 1,94 | 2,13 | 1,57 | 1,57 | 0,90 | 1,35 | 1,12 | 1,57 | 1,47 | 1,72 |
| CaO | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| Na ₂ O | 0,20 | 0,08 | 0,12 | 0,36 | 1,06 | 0,10 | 0,17 | 0,16 | 0,47 | 0,44 | 0,12 | 0,43 | 0,28 | 0,39 | 0,22 | 0,20 | 0,17 | 0,33 | 0,14 | 0,47 | 0,42 | 0,20 | 0,19 | 0,43 | 0,18 |
| K ₂ O | 9,79 | 10,33 | 9,78 | 10,24 | 9,22 | 10,17 | 10,20 | 9,58 | 8,70 | 9,35 | 10,24 | 9,21 | 9,11 | 9,23 | 10,20 | 9,92 | 8,78 | 9,47 | 9,42 | 9,18 | 9,67 | 8,75 | 9,26 | 9,00 | 9,47 |
| H ₂ O | 4,58 | 4,44 | 4,40 | 4,52 | 4,50 | 4,46 | 4,56 | 4,47 | 4,48 | 4,44 | 4,43 | 4,53 | 4,42 | 4,48 | 4,51 | 4,51 | 4,23 | 4,52 | 4,50 | 4,58 | 4,51 | 4,29 | 4,32 | 4,37 | 4,33 |
| Summe | 101,52 | 100,67 | 99,49 | 100,14 | 99,47 | 99,85 | 100,41 | 98,66 | 98,77 | 98,04 | 99,22 | 99,45 | 98,06 | 98,49 | 100,86 | 100,04 | 95,12 | 99,82 | 99,31 | 100,11 | 99,33 | 93,97 | 94,96 | 96,75 | 95,67 |
| Si | 3,460 | 3,243 | 3,244 | 3,129 | 3,157 | 3,328 | 3,188 | 3,285 | 3,122 | 3,197 | 3,288 | 3,150 | 3,263 | 3,244 | 3,222 | 3,286 | 3,050 | 3,226 | 3,218 | 3,242 | 3,212 | 3,258 | 3,399 | 3,245 | 3,304 |
| Al ^{IV} | 0,540 | 0,757 | 0,756 | 0,871 | 0,843 | 0,672 | 0,812 | 0,715 | 0,878 | 0,803 | 0,712 | 0,850 | 0,737 | 0,756 | 0,778 | 0,714 | 0,950 | 0,774 | 0,782 | 0,758 | 0,788 | 0,742 | 0,601 | 0,755 | 0,696 |
| Al ^{VI} | 1,594 | 1,558 | 1,567 | 1,796 | 1,818 | 1,597 | 1,735 | 1,738 | 1,842 | 1,748 | 1,572 | 1,846 | 1,701 | 1,804 | 1,655 | 1,669 | 1,385 | 1,750 | 1,769 | 1,856 | 1,787 | 1,817 | 1,719 | 1,725 | 1,717 |
| Ti | 0,020 | 0,007 | 0,010 | 0,032 | 0,016 | 0,006 | 0,041 | 0,016 | 0,015 | 0,040 | 0,030 | 0,023 | 0,020 | 0,018 | 0,018 | 0,034 | 0,270 | 0,013 | 0,015 | 0,006 | 0,025 | 0,007 | 0,009 | 0,015 | 0,009 |
| Cr | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,009 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 |
| Fe ²⁺ | 0,228 | 0,352 | 0,345 | 0,107 | 0,125 | 0,262 | 0,055 | 0,136 | 0,163 | 0,114 | 0,235 | 0,090 | 0,204 | 0,109 | 0,237 | 0,160 | 0,219 | 0,154 | 0,138 | 0,082 | 0,089 | 0,106 | 0,118 | 0,179 | 0,143 |
| Mn | 0,001 | 0,009 | 0,008 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,000 |
| Mg | 0,183 | 0,215 | 0,220 | 0,107 | 0,075 | 0,219 | 0,211 | 0,161 | 0,068 | 0,147 | 0,250 | 0,096 | 0,160 | 0,104 | 0,184 | 0,192 | 0,225 | 0,156 | 0,155 | 0,088 | 0,134 | 0,117 | 0,162 | 0,150 | 0,177 |
| Ca | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |
| Na | 0,025 | 0,011 | 0,016 | 0,047 | 0,137 | 0,013 | 0,022 | 0,021 | 0,061 | 0,058 | 0,015 | 0,055 | 0,037 | 0,051 | 0,028 | 0,026 | 0,023 | 0,042 | 0,018 | 0,060 | 0,054 | 0,027 | 0,025 | 0,057 | 0,024 |
| K | 0,818 | 0,890 | 0,849 | 0,867 | 0,783 | 0,873 | 0,856 | 0,819 | 0,744 | 0,805 | 0,885 | 0,778 | 0,788 | 0,788 | 0,866 | 0,841 | 0,794 | 0,802 | 0,800 | 0,767 | 0,820 | 0,780 | 0,819 | 0,788 | 0,836 |
| Σ Okt | 2,029 | 2,142 | 2,151 | 2,047 | 2,035 | 2,086 | 2,052 | 2,053 | 2,095 | 2,053 | 2,088 | 2,060 | 2,085 | 2,037 | 2,095 | 2,054 | 2,103 | 2,075 | 2,081 | 2,031 | 2,036 | 2,048 | 2,009 | 2,075 | 2,048 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PuA40 (Forts.) | | | | | | | PuA50 | | | | | | | | PH15 | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | 40-19 | 40-20 | 40-21 | 40-24 | 40-27 | 40-31 | 40-33 | 1-3 | 1-5 | 1-8 | 1-9 | 1-10 | 1-11 | 1-12 | 1-13 | 1-14 | b1-3 | b1-5 | b1-6 | b2-1 | b2-2 | b2-3 | b2-4 | b2-6 |
| SiO ₂ | 46,83 | 46,29 | 42,72 | 46,23 | 46,46 | 44,75 | 45,41 | 45,33 | 48,13 | 46,84 | 46,73 | 46,71 | 47,04 | 45,99 | 46,30 | 46,73 | 49,96 | 48,59 | 47,05 | 48,07 | 45,60 | 48,41 | 46,32 | 47,90 |
| TiO ₂ | 0,30 | 0,29 | 0,30 | 0,28 | 0,36 | 0,69 | 0,55 | 0,33 | 0,21 | 0,44 | 0,37 | 0,37 | 0,27 | 0,79 | 0,48 | 0,38 | 0,07 | 0,76 | 0,47 | 0,11 | 0,31 | 0,19 | 0,27 | 0,31 |
| Al ₂ O ₃ | 30,72 | 31,47 | 28,41 | 30,97 | 31,53 | 32,46 | 33,37 | 31,23 | 28,10 | 29,79 | 30,47 | 31,26 | 28,54 | 29,33 | 29,62 | 31,04 | 32,11 | 32,41 | 34,62 | 34,25 | 32,24 | 34,22 | 32,37 | 32,18 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,01 |
| FeO | 3,03 | 2,48 | 4,75 | 3,41 | 2,15 | 2,22 | 1,86 | 2,24 | 2,43 | 2,37 | 2,33 | 2,12 | 3,66 | 3,34 | 2,26 | 2,59 | 1,92 | 1,79 | 1,56 | 1,42 | 3,60 | 1,40 | 4,12 | 1,74 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| MgO | 1,22 | 1,23 | 1,07 | 1,62 | 1,15 | 0,69 | 0,50 | 1,12 | 1,84 | 1,39 | 1,51 | 1,32 | 1,82 | 1,64 | 1,65 | 1,51 | 1,67 | 1,46 | 0,93 | 1,00 | 1,72 | 1,21 | 1,94 | 1,36 |
| CaO | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Na ₂ O | 0,18 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,18 | 0,47 | 0,86 | 0,21 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | 0,21 | 0,19 | 0,22 | 0,12 | 0,21 | 0,19 | 0,20 | 0,29 | 0,22 | 0,23 | 0,19 | 0,16 |
| K ₂ O | 9,42 | 9,53 | 9,00 | 8,96 | 9,21 | 9,08 | 8,75 | 9,05 | 9,12 | 9,10 | 8,85 | 9,24 | 8,66 | 9,56 | 9,70 | 9,35 | 9,99 | 9,84 | 10,35 | 9,92 | 9,39 | 9,89 | 9,35 | 9,69 |
| H ₂ O | 4,33 | 4,33 | 4,03 | 4,33 | 4,33 | 4,28 | 4,34 | 4,25 | 4,28 | 4,28 | 4,30 | 4,34 | 4,27 | 4,27 | 4,26 | 4,35 | 4,57 | 4,52 | 4,51 | 4,53 | 4,37 | 4,56 | 4,44 | 4,44 |
| Summe | 96,05 | 95,81 | 90,53 | 95,98 | 95,46 | 94,77 | 95,65 | 93,78 | 94,31 | 94,41 | 94,75 | 95,54 | 94,54 | 95,12 | 94,52 | 96,10 | 100,54 | 99,55 | 99,77 | 99,64 | 97,52 | 100,16 | 99,10 | 97,86 |
| Si | 3,240 | 3,206 | 3,182 | 3,203 | 3,217 | 3,132 | 3,135 | 3,198 | 3,371 | 3,281 | 3,255 | 3,230 | 3,306 | 3,232 | 3,255 | 3,224 | 3,281 | 3,225 | 3,126 | 3,182 | 3,125 | 3,186 | 3,129 | 3,232 |
| Al ^{IV} | 0,760 | 0,794 | 0,818 | 0,797 | 0,783 | 0,868 | 0,865 | 0,802 | 0,629 | 0,719 | 0,745 | 0,770 | 0,694 | 0,768 | 0,745 | 0,776 | 0,719 | 0,775 | 0,874 | 0,818 | 0,875 | 0,814 | 0,871 | 0,768 |
| Al ^{VI} | 1,745 | 1,775 | 1,676 | 1,731 | 1,790 | 1,809 | 1,850 | 1,795 | 1,691 | 1,739 | 1,757 | 1,778 | 1,670 | 1,660 | 1,709 | 1,748 | 1,766 | 1,760 | 1,836 | 1,853 | 1,729 | 1,840 | 1,705 | 1,790 |
| Ti | 0,016 | 0,015 | 0,017 | 0,015 | 0,019 | 0,036 | 0,028 | 0,017 | 0,011 | 0,023 | 0,019 | 0,019 | 0,014 | 0,041 | 0,025 | 0,020 | 0,003 | 0,038 | 0,023 | 0,006 | 0,016 | 0,009 | 0,014 | 0,016 |
| Cr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 |
| Fe ²⁺ | 0,175 | 0,144 | 0,296 | 0,197 | 0,124 | 0,130 | 0,108 | 0,132 | 0,142 | 0,139 | 0,136 | 0,123 | 0,215 | 0,196 | 0,133 | 0,150 | 0,105 | 0,099 | 0,087 | 0,079 | 0,206 | 0,077 | 0,233 | 0,098 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Mg | 0,126 | 0,127 | 0,119 | 0,167 | 0,118 | 0,072 | 0,051 | 0,117 | 0,192 | 0,145 | 0,157 | 0,136 | 0,191 | 0,172 | 0,173 | 0,155 | 0,163 | 0,144 | 0,092 | 0,099 | 0,176 | 0,119 | 0,195 | 0,137 |
| Ca | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,002 |
| Na | 0,024 | 0,027 | 0,026 | 0,023 | 0,024 | 0,064 | 0,115 | 0,029 | 0,019 | 0,022 | 0,025 | 0,024 | 0,029 | 0,025 | 0,029 | 0,016 | 0,027 | 0,024 | 0,026 | 0,038 | 0,029 | 0,029 | 0,025 | 0,021 |
| K | 0,832 | 0,842 | 0,855 | 0,792 | 0,813 | 0,811 | 0,771 | 0,814 | 0,815 | 0,813 | 0,786 | 0,815 | 0,777 | 0,857 | 0,870 | 0,823 | 0,837 | 0,833 | 0,877 | 0,838 | 0,821 | 0,830 | 0,806 | 0,834 |
| Σ Okt | 2,062 | 2,060 | 2,109 | 2,111 | 2,056 | 2,055 | 2,037 | 2,062 | 2,039 | 2,048 | 2,069 | 2,056 | 2,092 | 2,071 | 2,042 | 2,073 | 2,039 | 2,041 | 2,043 | 2,038 | 2,127 | 2,047 | 2,151 | 2,044 |

Tabelle 7-7 (Forts.):

| Probe Nr. | PH 21 | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | b1-6 | b2-1 | b2-6 | b2-10 | b3-1 | b3-4 | b3-5 | b3-8 | b4-5 | b4a-1 | b4a-3 | b4a-5 | b4a-6 |
| SiO₂ | 46,19 | 48,97 | 47,22 | 48,80 | 46,75 | 50,52 | 46,38 | 46,94 | 49,25 | 51,98 | 47,43 | 48,09 | 47,69 |
| TiO₂ | 0,83 | 0,72 | 0,48 | 0,37 | 0,61 | 0,10 | 0,70 | 0,22 | 0,28 | 0,11 | 0,31 | 0,20 | 0,29 |
| Al₂O₃ | 31,97 | 30,31 | 33,22 | 30,13 | 30,41 | 31,34 | 32,90 | 33,91 | 32,96 | 27,10 | 33,11 | 34,29 | 34,25 |
| Cr₂O₃ | 0,04 | 0,02 | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,08 |
| FeO | 3,44 | 1,67 | 1,42 | 2,97 | 4,43 | 1,63 | 3,35 | 2,22 | 1,00 | 2,74 | 3,15 | 1,37 | 1,42 |
| MnO | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| MgO | 1,22 | 2,43 | 1,36 | 2,27 | 1,77 | 1,63 | 0,95 | 1,12 | 0,85 | 3,07 | 1,14 | 1,09 | 1,12 |
| CaO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂O | 0,30 | 0,25 | 0,49 | 0,18 | 0,40 | 0,15 | 0,55 | 0,40 | 1,07 | 0,13 | 0,32 | 0,28 | 0,48 |
| K₂O | 10,50 | 10,60 | 10,05 | 10,44 | 10,00 | 9,71 | 10,16 | 10,37 | 9,77 | 9,76 | 10,26 | 10,31 | 9,87 |
| H₂O | 4,41 | 4,49 | 4,47 | 4,47 | 4,40 | 4,55 | 4,45 | 4,49 | 4,54 | 4,51 | 4,50 | 4,54 | 4,53 |
| Summe | 98,93 | 99,46 | 98,78 | 99,68 | 98,83 | 99,65 | 99,46 | 99,72 | 99,81 | 99,46 | 100,29 | 100,17 | 99,73 |
| Si | 3,138 | 3,271 | 3,166 | 3,270 | 3,187 | 3,333 | 3,126 | 3,134 | 3,251 | 3,458 | 3,160 | 3,173 | 3,159 |
| Al^{IV} | 0,862 | 0,729 | 0,834 | 0,730 | 0,813 | 0,667 | 0,874 | 0,866 | 0,749 | 0,542 | 0,840 | 0,827 | 0,841 |
| Al^{VI} | 1,698 | 1,658 | 1,791 | 1,649 | 1,631 | 1,769 | 1,738 | 1,803 | 1,814 | 1,584 | 1,760 | 1,839 | 1,832 |
| Ti | 0,043 | 0,036 | 0,024 | 0,018 | 0,031 | 0,005 | 0,035 | 0,011 | 0,014 | 0,006 | 0,015 | 0,010 | 0,015 |
| Cr | 0,002 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,004 |
| Fe²⁺ | 0,196 | 0,093 | 0,080 | 0,166 | 0,253 | 0,090 | 0,189 | 0,124 | 0,055 | 0,152 | 0,175 | 0,076 | 0,079 |
| Mn | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 0,124 | 0,242 | 0,136 | 0,227 | 0,179 | 0,160 | 0,095 | 0,111 | 0,083 | 0,305 | 0,113 | 0,107 | 0,111 |
| Ca | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Na | 0,040 | 0,033 | 0,064 | 0,023 | 0,053 | 0,019 | 0,071 | 0,051 | 0,137 | 0,017 | 0,042 | 0,036 | 0,062 |
| K | 0,910 | 0,904 | 0,859 | 0,892 | 0,870 | 0,817 | 0,873 | 0,883 | 0,823 | 0,829 | 0,872 | 0,868 | 0,834 |
| Σ Okt | 2,063 | 2,031 | 2,034 | 2,063 | 2,096 | 2,025 | 2,060 | 2,049 | 1,972 | 2,049 | 2,067 | 2,032 | 2,040 |

Tabelle 7-8: Ergebnisse der Mikrosondenmessungen von **Amphibolen** in Metabasiten. Die Berechnung der Formel erfolgte auf der Basis von 23 O-Atomen plus zwei OH-Gruppen, alles Fe als Fe³⁺, Abkürzungen A, B, C, D beziehen sich auf die in Kapitel 3.4.5.1 beschriebenen kristallographischen Positionen.

| Probe Nr. | QV 3 | | QV 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | p1-12 | p1-2 | p5-11 | p5-13 | p5-15 | p6-6 | p7-9 | p7-13 | p8-14 | p8-17 | p8-21 | p8-24 | p8-26 | p1-6 | p2-1 | p2-2 | p3-5 | p5-1 | p5-3 |
| SiO₂ | 56,05 | 50,47 | 55,57 | 54,65 | 54,54 | 47,68 | 50,54 | 49,82 | 47,84 | 45,02 | 54,44 | 44,44 | 51,09 | 48,25 | 51,12 | 44,76 | 45,45 | 46,78 | 46,22 |
| TiO₂ | 0,59 | 0,08 | 0,07 | 0,05 | 0,01 | 0,16 | 0,07 | 0,16 | 0,28 | 0,45 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,23 | 0,47 | 0,37 | 0,20 | 0,25 | 0,31 |
| Al₂O₃ | 0,94 | 4,62 | 1,14 | 1,66 | 1,91 | 8,29 | 5,04 | 6,16 | 7,32 | 9,73 | 2,69 | 18,54 | 4,26 | 6,60 | 4,16 | 9,16 | 8,36 | 7,47 | 8,30 |
| Cr₂O₃ | 0,00 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,01 | 0,00 | 0,17 | 0,07 | 0,17 | 0,46 | 0,06 | 0,17 | 0,11 | 0,17 | 0,06 | 0,05 | 0,25 | 0,64 | 0,52 |
| FeO | 9,57 | 12,40 | 9,27 | 9,79 | 10,53 | 13,18 | 13,45 | 12,70 | 13,12 | 14,05 | 9,75 | 11,28 | 11,90 | 12,08 | 11,66 | 14,35 | 14,62 | 13,24 | 13,29 |
| MnO | 0,31 | 0,22 | 0,24 | 0,34 | 0,21 | 0,31 | 0,22 | 0,30 | 0,27 | 0,29 | 0,20 | 0,17 | 0,27 | 0,20 | 0,30 | 0,27 | 0,33 | 0,28 | 0,22 |
| MgO | 17,66 | 16,04 | 18,24 | 18,28 | 16,83 | 13,61 | 14,62 | 14,86 | 13,81 | 12,68 | 18,52 | 14,77 | 15,97 | 14,95 | 15,97 | 12,98 | 13,20 | 13,76 | 13,90 |
| CaO | 11,89 | 11,63 | 12,77 | 11,10 | 12,54 | 11,82 | 12,18 | 12,04 | 12,09 | 11,59 | 10,71 | 0,66 | 11,70 | 11,94 | 12,30 | 12,15 | 12,02 | 12,30 | 11,44 |
| Na₂O | 0,52 | 0,67 | 0,23 | 0,45 | 0,43 | 1,86 | 1,08 | 1,20 | 1,57 | 2,08 | 0,38 | 3,94 | 1,03 | 1,31 | 0,87 | 1,92 | 1,72 | 1,51 | 1,57 |
| K₂O | 0,07 | 0,11 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,20 | 0,18 | 0,15 | 0,18 | 0,22 | 0,17 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,19 | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,19 |
| H₂O | 2,12 | 2,05 | 2,12 | 2,09 | 2,09 | 2,04 | 2,06 | 2,06 | 2,03 | 2,01 | 2,11 | 2,06 | 2,05 | 2,03 | 2,06 | 1,99 | 2,00 | 2,01 | 2,01 |
| Summe | 99,71 | 98,33 | 99,78 | 98,56 | 99,16 | 99,14 | 99,62 | 99,53 | 98,66 | 98,58 | 99,06 | 96,18 | 98,51 | 98,00 | 99,16 | 98,24 | 98,32 | 98,40 | 97,95 |
| Si | 7,932 | 7,397 | 7,836 | 7,831 | 7,818 | 7,012 | 7,369 | 7,250 | 7,071 | 6,726 | 7,746 | 6,464 | 7,462 | 7,136 | 7,427 | 6,732 | 6,827 | 6,966 | 6,898 |
| Al^{IV} | 0,068 | 0,603 | 0,164 | 0,169 | 0,182 | 0,988 | 0,631 | 0,750 | 0,929 | 1,274 | 0,254 | 1,536 | 0,538 | 0,864 | 0,573 | 1,268 | 1,173 | 1,034 | 1,102 |
| Summe T | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| Al^{VI} | 0,089 | 0,195 | 0,026 | 0,111 | 0,140 | 0,448 | 0,235 | 0,307 | 0,347 | 0,440 | 0,196 | 1,643 | 0,195 | 0,287 | 0,138 | 0,354 | 0,307 | 0,276 | 0,358 |
| Ti | 0,062 | 0,009 | 0,007 | 0,006 | 0,001 | 0,017 | 0,008 | 0,017 | 0,031 | 0,051 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,025 | 0,051 | 0,042 | 0,022 | 0,028 | 0,034 |
| Cr | 0,000 | 0,006 | 0,009 | 0,011 | 0,001 | 0,000 | 0,020 | 0,008 | 0,020 | 0,054 | 0,007 | 0,020 | 0,012 | 0,020 | 0,006 | 0,006 | 0,029 | 0,075 | 0,062 |
| Mg | 3,725 | 3,503 | 3,834 | 3,905 | 3,596 | 2,983 | 3,178 | 3,224 | 3,042 | 2,825 | 3,928 | 3,202 | 3,478 | 3,296 | 3,459 | 2,909 | 2,957 | 3,053 | 3,092 |
| Mn | 0,038 | 0,027 | 0,028 | 0,041 | 0,026 | 0,038 | 0,027 | 0,037 | 0,034 | 0,037 | 0,024 | 0,021 | 0,033 | 0,026 | 0,037 | 0,034 | 0,042 | 0,035 | 0,028 |
| Fe²⁺ | 1,086 | 1,259 | 0,906 | 0,926 | 1,236 | 1,513 | 1,532 | 1,406 | 1,526 | 1,593 | 0,840 | 0,108 | 1,278 | 1,345 | 1,308 | 1,654 | 1,643 | 1,532 | 1,426 |
| Summe C | 5,000 | 5,000 | 4,810 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 |
| Mg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 0,047 | 0,260 | 0,000 | 0,247 | 0,027 | 0,107 | 0,108 | 0,140 | 0,095 | 0,162 | 0,320 | 1,263 | 0,175 | 0,149 | 0,109 | 0,151 | 0,194 | 0,117 | 0,233 |
| Ca | 1,803 | 1,826 | 1,930 | 1,704 | 1,927 | 1,863 | 1,903 | 1,877 | 1,914 | 1,855 | 1,633 | 0,103 | 1,832 | 1,893 | 1,915 | 1,958 | 1,934 | 1,963 | 1,829 |
| Na | 0,142 | 0,000 | 0,063 | 0,049 | 0,046 | 0,030 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,047 | 0,633 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Summe B | 1,992 | 2,086 | 1,992 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,011 | 2,017 | 2,009 | 2,017 | 2,000 | 2,000 | 2,007 | 2,042 | 2,024 | 2,109 | 2,128 | 2,080 | 2,062 |
| Na | 0,000 | 0,192 | 0,000 | 0,075 | 0,073 | 0,499 | 0,304 | 0,339 | 0,450 | 0,601 | 0,058 | 0,478 | 0,292 | 0,375 | 0,244 | 0,561 | 0,500 | 0,435 | 0,453 |
| K | 0,012 | 0,020 | 0,010 | 0,010 | 0,011 | 0,038 | 0,033 | 0,028 | 0,033 | 0,042 | 0,030 | 0,018 | 0,019 | 0,047 | 0,034 | 0,044 | 0,036 | 0,032 | 0,036 |
| Summe A | 0,012 | 0,212 | 0,010 | 0,085 | 0,084 | 0,536 | 0,338 | 0,367 | 0,483 | 0,644 | 0,088 | 0,496 | 0,311 | 0,422 | 0,279 | 0,605 | 0,536 | 0,467 | 0,489 |
| Summe | 15,004 | 15,298 | 14,812 | 15,085 | 15,084 | 15,536 | 15,349 | 15,384 | 15,492 | 15,661 | 15,088 | 15,496 | 15,318 | 15,464 | 15,303 | 15,714 | 15,664 | 15,547 | 15,551 |

Tabelle 7-8 (Forts.)

| Probe Nr. | QV 6 (Forts.) | | | | | | | | | | | | | | | QVQ 2 | | | |
|------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | p5-5 | p5-10 | p5-12 | p5-14 | p6-5 | p6-10 | p6-11 | p7-1 | p7-5 | p7-7 | p7-16 | p8-13 | p8-16 | p8-18 | p8-19 | p1-9 | p2-1 | p3-14 | p1-10 |
| SiO₂ | 48,38 | 47,30 | 46,16 | 46,80 | 45,80 | 44,24 | 45,68 | 47,56 | 46,24 | 44,91 | 47,74 | 46,16 | 43,36 | 50,42 | 44,19 | 53,63 | 51,04 | 55,49 | 45,54 |
| TiO₂ | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,18 | 0,41 | 0,26 | 0,39 | 0,19 | 0,11 | 0,38 | 0,26 | 0,28 | 0,48 | 0,09 | 0,67 | 0,09 | 1,80 | 0,04 | 0,17 |
| Al₂O₃ | 6,67 | 7,10 | 8,35 | 7,46 | 8,96 | 10,01 | 8,61 | 7,12 | 8,23 | 9,08 | 7,48 | 8,20 | 10,48 | 4,85 | 8,78 | 2,02 | 3,17 | 0,57 | 8,48 |
| Cr₂O₃ | 0,05 | 0,13 | 0,51 | 0,46 | 0,04 | 0,44 | 0,55 | 0,16 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,48 | 0,08 | 0,15 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,27 |
| FeO | 12,99 | 14,13 | 13,75 | 12,75 | 14,16 | 16,05 | 14,90 | 13,32 | 14,04 | 14,29 | 12,95 | 13,79 | 14,75 | 11,31 | 12,39 | 11,34 | 10,31 | 13,10 | 15,59 |
| MnO | 0,21 | 0,27 | 0,28 | 0,23 | 0,33 | 0,25 | 0,32 | 0,18 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,17 | 0,23 | 0,28 | 0,24 | 0,17 | 0,23 | 0,19 | 0,28 |
| MgO | 14,29 | 14,05 | 13,10 | 13,59 | 13,19 | 11,99 | 12,86 | 13,82 | 13,13 | 12,33 | 15,00 | 13,18 | 11,73 | 18,89 | 17,76 | 16,96 | 16,04 | 16,32 | 11,92 |
| CaO | 12,10 | 12,10 | 12,05 | 11,98 | 11,88 | 11,91 | 11,92 | 12,04 | 11,99 | 11,82 | 11,58 | 11,99 | 11,60 | 9,10 | 7,85 | 12,30 | 12,65 | 10,63 | 12,02 |
| Na₂O | 1,35 | 1,20 | 1,70 | 1,53 | 1,93 | 1,99 | 1,80 | 1,54 | 1,55 | 1,83 | 1,24 | 1,69 | 2,28 | 0,33 | 0,66 | 0,43 | 0,55 | 0,71 | 1,52 |
| K₂O | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,13 | 0,26 | 0,26 | 0,22 | 0,24 | 0,24 | 0,20 | 0,19 | 0,20 | 0,13 | 0,49 | 0,06 | 0,12 | 0,11 | 0,27 |
| H₂O | 2,03 | 2,02 | 2,01 | 2,00 | 2,01 | 2,00 | 2,01 | 2,02 | 2,00 | 1,98 | 2,04 | 2,00 | 1,97 | 2,06 | 1,98 | 2,08 | 2,05 | 2,08 | 1,98 |
| Summe | 98,46 | 98,69 | 98,33 | 97,13 | 98,84 | 99,39 | 99,29 | 98,17 | 97,72 | 97,14 | 98,82 | 97,66 | 97,56 | 97,53 | 95,17 | 99,09 | 97,95 | 99,24 | 98,04 |
| Si | 7,148 | 7,025 | 6,895 | 7,029 | 6,815 | 6,631 | 6,805 | 7,075 | 6,943 | 6,812 | 7,024 | 6,930 | 6,591 | 7,356 | 6,709 | 7,732 | 7,465 | 7,995 | 6,880 |
| Al^{IV} | 0,852 | 0,975 | 1,105 | 0,971 | 1,185 | 1,369 | 1,195 | 0,925 | 1,057 | 1,188 | 0,976 | 1,070 | 1,409 | 0,644 | 1,291 | 0,268 | 0,535 | 0,005 | 1,120 |
| Summe T | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| Al^{VI} | 0,310 | 0,267 | 0,365 | 0,350 | 0,387 | 0,398 | 0,316 | 0,323 | 0,399 | 0,436 | 0,322 | 0,381 | 0,468 | 0,189 | 0,280 | 0,076 | 0,010 | 0,092 | 0,391 |
| Ti | 0,025 | 0,025 | 0,027 | 0,020 | 0,046 | 0,029 | 0,044 | 0,021 | 0,013 | 0,043 | 0,029 | 0,032 | 0,055 | 0,010 | 0,076 | 0,009 | 0,198 | 0,004 | 0,020 |
| Cr | 0,006 | 0,015 | 0,061 | 0,055 | 0,004 | 0,052 | 0,064 | 0,019 | 0,000 | 0,004 | 0,004 | 0,001 | 0,058 | 0,009 | 0,018 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,032 |
| Mg | 3,148 | 3,111 | 2,918 | 3,042 | 2,925 | 2,680 | 2,857 | 3,064 | 2,939 | 2,789 | 3,290 | 2,951 | 2,658 | 4,110 | 4,020 | 3,645 | 3,498 | 3,505 | 2,685 |
| Mn | 0,026 | 0,034 | 0,035 | 0,029 | 0,042 | 0,031 | 0,040 | 0,023 | 0,025 | 0,032 | 0,038 | 0,022 | 0,029 | 0,034 | 0,031 | 0,020 | 0,028 | 0,023 | 0,036 |
| Fe²⁺ | 1,485 | 1,549 | 1,595 | 1,505 | 1,595 | 1,809 | 1,679 | 1,550 | 1,624 | 1,696 | 1,319 | 1,613 | 1,733 | 0,648 | 0,575 | 1,248 | 1,260 | 1,376 | 1,836 |
| Summe C | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 4,995 | 5,000 | 5,000 |
| Mg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 0,120 | 0,206 | 0,122 | 0,096 | 0,167 | 0,203 | 0,177 | 0,108 | 0,139 | 0,117 | 0,274 | 0,118 | 0,142 | 0,732 | 0,999 | 0,119 | 0,000 | 0,203 | 0,134 |
| Ca | 1,915 | 1,925 | 1,928 | 1,928 | 1,893 | 1,913 | 1,902 | 1,919 | 1,929 | 1,922 | 1,826 | 1,929 | 1,890 | 1,422 | 1,277 | 1,901 | 1,982 | 1,642 | 1,946 |
| Na | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 0,156 | 0,000 |
| Summe B | 2,035 | 2,131 | 2,050 | 2,024 | 2,060 | 2,116 | 2,079 | 2,027 | 2,068 | 2,038 | 2,100 | 2,047 | 2,031 | 2,154 | 2,276 | 2,020 | 2,000 | 2,000 | 2,080 |
| Na | 0,387 | 0,346 | 0,491 | 0,446 | 0,556 | 0,579 | 0,520 | 0,445 | 0,451 | 0,538 | 0,355 | 0,493 | 0,672 | 0,092 | 0,195 | 0,120 | 0,136 | 0,042 | 0,446 |
| K | 0,030 | 0,035 | 0,036 | 0,033 | 0,025 | 0,049 | 0,050 | 0,043 | 0,045 | 0,047 | 0,038 | 0,037 | 0,038 | 0,025 | 0,095 | 0,012 | 0,022 | 0,020 | 0,051 |
| Summe A | 0,417 | 0,381 | 0,527 | 0,478 | 0,581 | 0,628 | 0,570 | 0,487 | 0,496 | 0,585 | 0,393 | 0,530 | 0,711 | 0,117 | 0,290 | 0,132 | 0,158 | 0,062 | 0,497 |
| Summe | 15,451 | 15,512 | 15,577 | 15,502 | 15,641 | 15,744 | 15,649 | 15,514 | 15,564 | 15,623 | 15,493 | 15,577 | 15,742 | 15,271 | 15,565 | 15,152 | 15,153 | 15,062 | 15,577 |

Tabelle 7-8 (Forts.)

| Probe Nr. | QVQ 9 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | p2-4 | p2-5 | p2-8 | p2-15 | p2-17 | p1-2 | p1-7 | p1-9 | p1-11 | p1-14 | p1-17 | p2-6 | p2-16 | p1-5 | p1-15 | p1-21 |
| SiO ₂ | 51,29 | 49,44 | 48,99 | 56,01 | 52,91 | 47,84 | 56,41 | 47,90 | 49,75 | 56,48 | 48,36 | 56,66 | 56,20 | 46,05 | 47,86 | 47,11 |
| TiO ₂ | 0,05 | 0,38 | 0,15 | 0,02 | 0,07 | 0,24 | 0,19 | 0,26 | 0,30 | 0,06 | 0,27 | 0,04 | 0,06 | 0,22 | 0,17 | 0,42 |
| Al ₂ O ₃ | 4,45 | 6,13 | 6,61 | 1,71 | 3,14 | 7,28 | 0,86 | 7,44 | 6,05 | 0,95 | 7,10 | 0,46 | 0,82 | 8,37 | 7,06 | 7,62 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,09 | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,29 | 0,07 |
| FeO | 12,22 | 12,16 | 12,54 | 9,41 | 10,23 | 12,89 | 10,46 | 13,22 | 11,88 | 9,11 | 12,33 | 9,05 | 11,01 | 12,75 | 12,50 | 13,00 |
| MnO | 0,19 | 0,35 | 0,28 | 0,23 | 0,23 | 0,25 | 0,33 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,27 | 0,14 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,33 |
| MgO | 14,99 | 14,58 | 14,55 | 18,10 | 16,90 | 13,84 | 17,72 | 13,78 | 14,86 | 18,27 | 14,39 | 18,54 | 17,24 | 15,33 | 14,24 | 13,52 |
| CaO | 12,25 | 11,61 | 12,03 | 12,21 | 11,89 | 12,02 | 10,94 | 12,10 | 12,12 | 11,83 | 12,09 | 12,04 | 10,78 | 10,54 | 12,10 | 12,30 |
| Na ₂ O | 0,86 | 1,22 | 1,28 | 0,46 | 0,52 | 1,45 | 0,55 | 1,48 | 1,30 | 0,40 | 1,40 | 0,28 | 0,56 | 1,22 | 1,33 | 1,47 |
| K ₂ O | 0,13 | 0,40 | 0,18 | 0,03 | 0,09 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,15 | 0,03 | 0,15 | 0,04 | 0,08 | 0,15 | 0,12 | 0,17 |
| H ₂ O | 2,05 | 2,04 | 2,04 | 2,13 | 2,07 | 2,02 | 2,12 | 2,03 | 2,05 | 2,12 | 2,04 | 2,12 | 2,10 | 2,00 | 2,02 | 2,01 |
| Summe | 98,52 | 98,32 | 98,65 | 100,36 | 98,04 | 98,04 | 99,77 | 98,72 | 98,73 | 99,47 | 98,47 | 99,37 | 99,10 | 96,95 | 97,93 | 98,01 |
| Si | 7,497 | 7,271 | 7,197 | 7,869 | 7,668 | 7,100 | 7,986 | 7,073 | 7,274 | 7,976 | 7,123 | 8,008 | 8,018 | 6,895 | 7,102 | 7,018 |
| Al^{IV} | 0,503 | 0,729 | 0,803 | 0,131 | 0,332 | 0,900 | 0,014 | 0,927 | 0,726 | 0,024 | 0,877 | 0,000 | 0,000 | 1,105 | 0,898 | 0,982 |
| Summe T | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 | 8,008 | 8,018 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| Al^{VI} | 0,263 | 0,334 | 0,342 | 0,151 | 0,204 | 0,374 | 0,130 | 0,368 | 0,316 | 0,134 | 0,355 | 0,077 | 0,137 | 0,373 | 0,336 | 0,355 |
| Ti | 0,006 | 0,042 | 0,017 | 0,002 | 0,008 | 0,027 | 0,020 | 0,028 | 0,032 | 0,006 | 0,030 | 0,004 | 0,007 | 0,025 | 0,019 | 0,047 |
| Cr | 0,004 | 0,001 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,006 | 0,003 | 0,011 | 0,005 | 0,002 | 0,009 | 0,002 | 0,001 | 0,007 | 0,034 | 0,008 |
| Mg | 3,267 | 3,197 | 3,187 | 3,790 | 3,650 | 3,063 | 3,740 | 3,033 | 3,238 | 3,847 | 3,160 | 3,906 | 3,666 | 3,421 | 3,150 | 3,002 |
| Mn | 0,024 | 0,043 | 0,034 | 0,028 | 0,028 | 0,032 | 0,040 | 0,031 | 0,031 | 0,024 | 0,034 | 0,016 | 0,030 | 0,032 | 0,032 | 0,041 |
| Fe²⁺ | 1,436 | 1,382 | 1,420 | 1,023 | 1,111 | 1,499 | 1,066 | 1,529 | 1,378 | 0,987 | 1,413 | 0,995 | 1,159 | 1,142 | 1,430 | 1,547 |
| Summe C | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 | 5,000 |
| Mg | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 0,059 | 0,113 | 0,121 | 0,083 | 0,129 | 0,101 | 0,172 | 0,103 | 0,074 | 0,090 | 0,105 | 0,075 | 0,154 | 0,455 | 0,120 | 0,072 |
| Ca | 1,919 | 1,830 | 1,894 | 1,837 | 1,845 | 1,910 | 1,659 | 1,914 | 1,898 | 1,791 | 1,908 | 1,823 | 1,648 | 1,692 | 1,923 | 1,963 |
| Na | 0,023 | 0,057 | 0,000 | 0,080 | 0,025 | 0,000 | 0,150 | 0,000 | 0,028 | 0,109 | 0,000 | 0,076 | 0,155 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Summe B | 2,000 | 2,000 | 2,014 | 2,000 | 2,000 | 2,011 | 1,981 | 2,017 | 2,000 | 1,989 | 2,013 | 1,975 | 1,958 | 2,146 | 2,044 | 2,035 |
| Na | 0,222 | 0,291 | 0,364 | 0,044 | 0,121 | 0,416 | 0,000 | 0,425 | 0,341 | 0,000 | 0,400 | 0,000 | 0,000 | 0,353 | 0,382 | 0,424 |
| K | 0,024 | 0,075 | 0,034 | 0,006 | 0,017 | 0,029 | 0,029 | 0,032 | 0,028 | 0,006 | 0,028 | 0,006 | 0,014 | 0,029 | 0,022 | 0,032 |
| Summe A | 0,246 | 0,366 | 0,398 | 0,050 | 0,138 | 0,445 | 0,029 | 0,457 | 0,369 | 0,006 | 0,429 | 0,006 | 0,014 | 0,382 | 0,404 | 0,455 |
| Summe | 15,246 | 15,366 | 15,413 | 15,050 | 15,138 | 15,455 | 15,009 | 15,474 | 15,369 | 14,995 | 15,442 | 14,989 | 14,991 | 15,529 | 15,448 | 15,490 |

Tabelle 7-9: Ergebnisse der Mikrosondenmessungen von **Pumpellyit** in Metabasiten. Die Berechnung der Formel erfolgte auf der Basis von 13 O-Atomen plus zwei OH-Gruppen, alles Fe als Fe²⁺.

| Probe Nr. | QV 3 | | | | | | | | | | QV 6 | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | p1-1 | p1-3 | p1-4 | p1-5 | p1-6 | p1-8 | p1-10 | p2-1 | p2-2 | | p1-8 | p1-9 | p3-3 | p3-4 | p4-2 | p4-7 | p5-18 | p6-8 | p7-12 | p7-15 | p4-3 | p4-4 | p4-6 |
| SiO₂ | 37,40 | 33,78 | 34,65 | 32,98 | 33,63 | 37,69 | 38,33 | 37,31 | 37,68 | | 35,83 | 36,70 | 37,56 | 36,59 | 36,98 | 37,14 | 37,23 | 37,95 | 37,52 | 37,30 | 32,48 | 35,81 | 33,66 |
| TiO₂ | 0,07 | 0,05 | 0,15 | 0,08 | 0,13 | 0,13 | 0,04 | 0,26 | 0,19 | | 5,07 | 0,12 | 0,10 | 0,19 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,11 |
| Al₂O₃ | 21,89 | 16,71 | 16,29 | 15,27 | 16,16 | 21,66 | 24,09 | 21,32 | 21,78 | | 18,45 | 21,46 | 21,16 | 20,83 | 20,68 | 21,40 | 21,52 | 21,16 | 21,64 | 21,15 | 15,60 | 20,17 | 15,70 |
| Cr₂O₃ | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | | 0,43 | 0,50 | 0,19 | 0,21 | 0,00 | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 13,28 | 15,44 | 16,19 | 16,64 | 15,74 | 13,42 | 9,77 | 13,19 | 12,57 | | 12,62 | 13,51 | 13,78 | 13,87 | 13,97 | 13,37 | 13,24 | 13,33 | 13,35 | 13,18 | 17,27 | 13,42 | 17,30 |
| MnO | 0,09 | 0,15 | 0,07 | 0,17 | 0,38 | 0,11 | 0,19 | 0,20 | 0,12 | | 0,11 | 0,01 | 0,09 | 0,10 | 0,06 | 0,07 | 0,14 | 0,05 | 0,15 | 0,09 | 0,06 | 0,15 | 0,07 |
| MgO | 0,01 | 0,10 | 0,05 | 0,21 | 0,05 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,08 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,47 | 0,02 | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,02 |
| CaO | 23,16 | 16,19 | 18,32 | 15,52 | 15,12 | 22,99 | 22,35 | 22,95 | 22,75 | | 23,32 | 23,07 | 22,97 | 23,11 | 22,44 | 22,59 | 22,83 | 22,44 | 22,80 | 22,01 | 16,38 | 20,95 | 18,08 |
| Na₂O | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,24 | 0,00 | 0,01 | | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| K₂O | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| H₂O | 3,45 | 2,95 | 3,04 | 2,86 | 2,90 | 3,46 | 3,50 | 3,43 | 3,44 | | 3,41 | 3,42 | 3,44 | 3,39 | 3,38 | 3,41 | 3,42 | 3,44 | 3,44 | 3,39 | 2,88 | 3,26 | 2,98 |
| Summe | 99,39 | 85,36 | 88,80 | 83,77 | 84,15 | 99,54 | 98,58 | 98,72 | 98,69 | | 99,26 | 98,80 | 99,32 | 98,31 | 97,60 | 98,08 | 98,59 | 98,93 | 99,00 | 97,31 | 84,80 | 93,88 | 87,93 |
| Si | 3,249 | 3,439 | 3,421 | 3,454 | 3,475 | 3,269 | 3,280 | 3,265 | 3,280 | | 3,146 | 3,221 | 3,274 | 3,236 | 3,283 | 3,269 | 3,261 | 3,303 | 3,270 | 3,300 | 3,385 | 3,296 | 3,388 |
| Ti | 0,005 | 0,004 | 0,011 | 0,006 | 0,010 | 0,009 | 0,003 | 0,017 | 0,012 | | 0,335 | 0,008 | 0,007 | 0,012 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,008 |
| Al | 2,241 | 2,005 | 1,895 | 1,884 | 1,969 | 2,214 | 2,430 | 2,199 | 2,234 | | 1,909 | 2,219 | 2,174 | 2,171 | 2,164 | 2,220 | 2,221 | 2,171 | 2,223 | 2,205 | 1,916 | 2,188 | 1,862 |
| Cr | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,005 | | 0,030 | 0,035 | 0,013 | 0,015 | 0,000 | 0,001 | 0,009 | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe²⁺ | 0,965 | 1,315 | 1,337 | 1,457 | 1,360 | 0,973 | 0,699 | 0,965 | 0,915 | | 0,926 | 0,991 | 1,005 | 1,026 | 1,037 | 0,984 | 0,970 | 0,970 | 0,973 | 0,975 | 1,505 | 1,033 | 1,456 |
| Mn | 0,007 | 0,013 | 0,006 | 0,015 | 0,033 | 0,008 | 0,014 | 0,015 | 0,008 | | 0,008 | 0,001 | 0,006 | 0,008 | 0,005 | 0,005 | 0,010 | 0,004 | 0,011 | 0,006 | 0,005 | 0,012 | 0,006 |
| Mg | 0,002 | 0,016 | 0,008 | 0,033 | 0,007 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,010 | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,061 | 0,002 | 0,010 | 0,009 | 0,002 | 0,003 |
| Ca | 2,155 | 1,766 | 1,938 | 1,742 | 1,674 | 2,136 | 2,050 | 2,151 | 2,121 | | 2,194 | 2,169 | 2,145 | 2,190 | 2,135 | 2,131 | 2,143 | 2,093 | 2,129 | 2,086 | 1,828 | 2,066 | 1,949 |
| Na | 0,002 | 0,000 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,039 | 0,000 | 0,001 | | 0,002 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,002 |
| K | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,001 |
| OH | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 | 2,000 |
| Summe | 8,627 | 8,555 | 8,623 | 8,597 | 8,535 | 8,617 | 8,523 | 8,618 | 8,589 | | 8,551 | 8,645 | 8,628 | 8,660 | 8,630 | 8,617 | 8,622 | 8,611 | 8,615 | 8,594 | 8,658 | 8,607 | 8,675 |

Tabelle 7-10: Ergebnisse der Mikrosondenmessungen von **Titanit** in Metabasiten. Die Berechnung der Formel erfolgte auf der Basis von 19,5 O-Atomen plus einer OH-Gruppe, alles Fe als Fe³⁺.

| Probe Nr. | QV 3 | QV 6 | | | | | | | | | | | | | | QVQ 2 | | | | QVQ 9 | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | p1-14 | p1-2 | p1-4 | p2-3 | p2-6 | p2-7 | p2-8 | p3-6 | p5-8 | p6-2 | p6-12 | p7-2 | p7-17 | p8-9 | p8-20 | p1-8 | p2-3 | p2-6 | p3-7 | p2-2 | p2-7 | p2-12 | p1-1 | p1-22 |
| SiO₂ | 30,82 | 30,53 | 30,41 | 30,22 | 30,16 | 30,18 | 31,53 | 30,96 | 30,07 | 30,41 | 30,81 | 30,69 | 30,03 | 30,49 | 33,16 | 30,06 | 33,69 | 30,66 | 30,27 | 31,14 | 31,05 | 31,73 | 30,58 | 30,55 |
| TiO₂ | 36,47 | 37,03 | 34,55 | 36,94 | 37,36 | 34,36 | 30,29 | 33,65 | 38,24 | 37,68 | 36,07 | 37,89 | 35,43 | 37,07 | 30,45 | 37,03 | 26,88 | 36,97 | 36,83 | 35,68 | 36,87 | 32,71 | 36,36 | 35,66 |
| Al₂O₃ | 1,42 | 0,88 | 2,14 | 1,03 | 1,17 | 2,19 | 3,09 | 2,22 | 0,84 | 0,63 | 1,39 | 0,90 | 1,05 | 0,99 | 2,21 | 0,92 | 4,15 | 0,96 | 1,04 | 1,69 | 1,21 | 2,72 | 1,46 | 1,89 |
| Cr₂O₃ | 0,09 | 0,16 | 0,22 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,19 | 0,12 | 0,05 | 0,08 | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,10 | 0,12 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Fe₂O₃ | 1,78 | 1,44 | 2,32 | 1,36 | 1,61 | 2,41 | 4,47 | 3,22 | 1,77 | 1,77 | 1,76 | 1,08 | 1,61 | 1,45 | 3,69 | 1,61 | 4,95 | 1,50 | 1,47 | 2,37 | 1,38 | 3,64 | 1,13 | 1,47 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,09 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,09 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,04 |
| MgO | 0,68 | 0,05 | 1,71 | 0,03 | 0,35 | 0,81 | 1,17 | 0,66 | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 0,02 | 0,08 | 0,07 | 1,62 | 0,26 | 4,98 | 0,34 | 0,17 | 0,11 | 0,01 | 1,62 | 0,00 | 0,00 |
| CaO | 27,29 | 27,86 | 26,08 | 27,74 | 27,45 | 26,26 | 25,46 | 26,94 | 27,90 | 28,10 | 27,15 | 28,44 | 28,52 | 28,00 | 25,70 | 27,31 | 21,06 | 27,41 | 27,74 | 27,63 | 28,04 | 25,08 | 28,02 | 27,89 |
| Na₂O | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| K₂O | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,12 | 0,10 | 0,68 | 0,29 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,82 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,82 | 0,01 | 0,00 |
| H₂O | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,16 | 1,14 | 1,14 | 1,15 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,17 | 1,14 | 1,16 | 1,16 | 1,15 | 1,16 | 1,16 | 1,15 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,15 | 1,15 |
| Summe | 99,72 | 99,20 | 98,63 | 98,53 | 99,45 | 97,49 | 97,93 | 99,15 | 100,15 | 99,86 | 99,71 | 100,35 | 98,05 | 99,40 | 98,30 | 98,37 | 97,79 | 99,18 | 98,81 | 99,84 | 99,90 | 99,49 | 98,73 | 98,68 |
| Si | 3,971 | 3,966 | 3,954 | 3,951 | 3,909 | 3,974 | 4,135 | 4,020 | 3,879 | 3,932 | 3,971 | 3,941 | 3,961 | 3,953 | 4,298 | 3,936 | 4,340 | 3,976 | 3,947 | 4,009 | 3,998 | 4,087 | 3,982 | 3,980 |
| Ti | 3,533 | 3,617 | 3,378 | 3,631 | 3,641 | 3,402 | 2,987 | 3,286 | 3,709 | 3,664 | 3,495 | 3,658 | 3,514 | 3,615 | 2,969 | 3,645 | 2,604 | 3,605 | 3,611 | 3,455 | 3,570 | 3,168 | 3,561 | 3,494 |
| Al | 0,215 | 0,135 | 0,327 | 0,159 | 0,179 | 0,340 | 0,478 | 0,340 | 0,128 | 0,096 | 0,211 | 0,136 | 0,162 | 0,152 | 0,338 | 0,143 | 0,631 | 0,147 | 0,160 | 0,257 | 0,183 | 0,412 | 0,224 | 0,290 |
| Cr | 0,009 | 0,017 | 0,023 | 0,000 | 0,002 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,019 | 0,012 | 0,005 | 0,009 | 0,005 | 0,002 | 0,004 | 0,011 | 0,012 | 0,005 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe³⁺ | 0,172 | 0,141 | 0,227 | 0,134 | 0,157 | 0,239 | 0,441 | 0,315 | 0,172 | 0,172 | 0,170 | 0,105 | 0,160 | 0,141 | 0,360 | 0,159 | 0,480 | 0,147 | 0,144 | 0,230 | 0,134 | 0,353 | 0,111 | 0,144 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,010 | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,010 | 0,009 | 0,015 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,010 | 0,001 | 0,001 | 0,004 |
| Mg | 0,130 | 0,010 | 0,332 | 0,005 | 0,067 | 0,158 | 0,229 | 0,127 | 0,000 | 0,000 | 0,211 | 0,004 | 0,016 | 0,014 | 0,312 | 0,051 | 0,957 | 0,066 | 0,032 | 0,020 | 0,002 | 0,312 | 0,000 | 0,000 |
| Ca | 3,766 | 3,878 | 3,634 | 3,885 | 3,811 | 3,705 | 3,578 | 3,747 | 3,856 | 3,893 | 3,748 | 3,912 | 4,029 | 3,890 | 3,569 | 3,831 | 2,907 | 3,809 | 3,875 | 3,811 | 3,868 | 3,462 | 3,910 | 3,893 |
| Na | 0,002 | 0,007 | 0,009 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,008 | 0,008 | 0,000 | 0,002 | 0,008 | 0,008 | 0,001 | 0,000 | 0,027 | 0,000 | 0,014 | 0,011 | 0,005 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,006 |
| K | 0,002 | 0,010 | 0,003 | 0,004 | 0,020 | 0,017 | 0,114 | 0,049 | 0,004 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,007 | 0,001 | 0,004 | 0,002 | 0,135 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,007 | 0,135 | 0,002 | 0,000 |
| OH | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Summe | 11,801 | 11,779 | 11,886 | 11,776 | 11,794 | 11,840 | 11,977 | 11,894 | 11,762 | 11,770 | 11,841 | 11,779 | 11,865 | 11,783 | 11,897 | 11,768 | 12,073 | 11,775 | 11,788 | 11,791 | 11,779 | 11,930 | 11,791 | 11,812 |

7.4 Raman- und Mikrothermometrie-Daten

Tabelle 7-11: Auswertung der Raman-Messungen für Typ 2-, Typ 3a- und Typ 3b-Einschlüsse. Grau unterlegte Felder bezeichnen N₂, das aus der umgebenden Luft stammt. Bei den in Amsterdam durchgeführten Messungen wurde keine Peak-Position bestimmt sondern nur die Peakfläche integriert.

| Probe | Einschluss | CO ₂ | | | | CH ₄ | | H ₂ S | | N ₂ | | Ergebnis | | | |
|-----------------------|------------|-----------------|----------|-----------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | ν ₁ | | 2ν ₂ | | Peak [cm ⁻¹] | Integral | Peak [cm ⁻¹] | Integral | Peak [cm ⁻¹] | Integral | X (CO ₂) in % | X (CH ₄) in % | X (H ₂ S) in % | X (N ₂) in % |
| PH 18/1 (Leoben) | FI 4 | 1282,5 | 15455,0 | 1386,4 | 26572,9 | 2913,4 | 14758,3 | | | | | 89,5 | 10,5 | 0,0 | 0,0 |
| | FI 3 | 1282,5 | 38584,3 | 1386,4 | 64175,7 | 2913,5 | 42510,9 | 2607,2 | 660,8 | | | 87,7 | 12,1 | 0,2 | 0,0 |
| PuA 17 (Amsterdam) | 8 | | 297,0 | | 508,0 | | 186,0 | | | | | 92,8 | 7,2 | 0,0 | 0,0 |
| | 2 | | 1245,0 | | 2390,0 | | 701,0 | | | | | 94,0 | 6,0 | 0,0 | 0,0 |
| PuA 29 (Leoben) | A4-4 | 1281,8 | 45490,9 | 1385,9 | 73369,2 | 2912,3 | 50238,9 | | | | | 87,7 | 12,3 | 0,0 | 0,0 |
| PuA 51 (Amsterdam) | Ca5-3 | | 5221,0 | | 1712,0 | | 1090,0 | | | | | 95,0 | 5,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Ca5-10 | | 2503,0 | | 6359,0 | | 2340,0 | | | | | 91,9 | 8,1 | 0,0 | 0,0 |
| | Ca4-4 | | 327,0 | | 983,0 | | 376,0 | | | | | 91,3 | 8,7 | 0,0 | 0,0 |
| | Cb1-1 | | 1862,0 | | 4667,0 | | 1357,0 | | | | | 93,5 | 6,5 | 0,0 | 0,0 |
| | A1-1 | | 1496,0 | | 3488,0 | | 1404,0 | | | | | 91,4 | 8,6 | 0,0 | 0,0 |
| | A1-5 | | 2336,0 | | 5479,0 | | 1130,0 | | | | | 95,4 | 4,6 | 0,0 | 0,0 |
| | Ba5-3 | | 1126,0 | | 3269,0 | | 962,0 | | | | | 93,2 | 6,8 | 0,0 | 0,0 |
| | E2-3 | | 1139,0 | | 2887,0 | | 1030,0 | | | | | 92,1 | 7,9 | 0,0 | 0,0 |
| E1-II | | 1602,0 | | 3766,0 | | 1395,0 | | | | | 92,0 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | |
| PuA 41 (Leoben) | B2-a | 1282,9 | 62769,9 | 1386,9 | 109064,0 | 2914,7 | 23672,9 | | | | | 95,6 | 4,4 | 0,0 | 0,0 |
| | A1a-1 | 1282,3 | 37769,9 | 1386,6 | 67431,6 | 2913,1 | 12391,3 | 2608,1 | 859,3 | 2329,0 | 903,6 | 95,9 | 3,8 | 0,3 | 0,0 |
| | A1a-3 | 1282,4 | 96626,6 | 1386,5 | 153576,0 | 2913,2 | 34942,9 | 2607,2 | 1164,7 | 2328,7 | 1829,6 | 95,4 | 4,4 | 0,2 | 0,0 |
| | A1b-1 | 1282,2 | 74229,8 | 1386,5 | 129230,0 | 2913,0 | 23408,6 | 2607,2 | 1073,6 | 2328,5 | 1074,6 | 96,1 | 3,7 | 0,2 | 0,0 |
| | A1b-2 | 1282,0 | 47314,0 | 1386,2 | 76235,1 | 2913,8 | 15487,5 | 2606,1 | 680,2 | 2327,7 | 1242,4 | 95,8 | 4,0 | 0,2 | 0,0 |
| | A1b-6 | 1282,3 | 53004,1 | 1386,5 | 95020,0 | 2913,2 | 15065,7 | 2607,3 | 594,5 | 2328,7 | 862,3 | 95,2 | 3,2 | 0,1 | 1,4 |
| | A1b-8 | 1282,5 | 58183,6 | 1386,6 | 102992,0 | 2913,4 | 18904,8 | 2607,4 | 939,4 | 2328,8 | 1349,3 | 96,0 | 3,8 | 0,2 | 0,0 |
| | A1b-9 | 1282,6 | 57421,6 | 1386,7 | 99108,5 | 2913,5 | 18773,7 | 2608,0 | 594,5 | 2328,9 | 1089,1 | 94,4 | 3,8 | 0,1 | 1,6 |
| | A2d-1 | 1282,1 | 44000,3 | 1386,2 | 65234,2 | 2913,0 | 17347,2 | 2607,1 | 639,1 | 2328,8 | 1082,1 | 94,8 | 5,0 | 0,2 | 0,0 |
| | A2e-1 | 1282,0 | 70734,4 | 1386,1 | 105860,0 | 2911,9 | 26761,6 | 2606,4 | 805,6 | 2327,7 | 1151,5 | 95,0 | 4,8 | 0,2 | 0,0 |
| | A3b-1 | 1282,1 | 130130,0 | 1386,1 | 166332,0 | 2912,3 | 63634,5 | 2606,6 | 1628,2 | 2327,8 | 1833,6 | 93,1 | 6,7 | 0,2 | 0,0 |
| A3b-2 | 1281,9 | 65045,0 | 1386,0 | 93655,7 | 2913,9 | 19885,2 | | | | | 96,0 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | |
| A4-1 | 1282,4 | 80622,9 | 1386,4 | 133905,0 | 2912,6 | 30211,5 | 2606,5 | 1041,8 | 2327,6 | 1996,5 | 95,3 | 4,5 | 0,2 | 0,0 | |

Tabelle 7-11 (Forts.):

| Probe | Einschluss | CO ₂ | | | | CH ₄ | | H ₂ S | | N ₂ | | Ergebnis | | | | | |
|--------|------------|--|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----|-----|
| | | ν ₁ | | 2ν ₂ | | Peak [cm ⁻¹] | Integral | Peak [cm ⁻¹] | Integral | Peak [cm ⁻¹] | Integral | X (CO ₂) | X (CH ₄) | X (H ₂ S) | X (N ₂) | | |
| | | Peak [cm ⁻¹] | Integral | Peak [cm ⁻¹] | Integral | | | | | | | in % | in % | in % | in % | | |
| PuA 41 | A4-2 | 1282,7 | 35288,9 | 1386,7 | 60797,3 | 2913,5 | 12691,4 | 2607,3 | 446,4 | 2329,5 | 1090,6 | 95,6 | 4,2 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A4b-1 | 1282,7 | 64574,6 | 1386,8 | 110695,0 | 2913,4 | 27771,2 | 2607,5 | 848,6 | 2329,0 | 1158,7 | 94,8 | 5,0 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A4b-2 | 1282,7 | 68759,5 | 1386,7 | 117831,0 | 2913,6 | 24566,3 | 2607,8 | 682,0 | 2329,1 | 1168,4 | 95,7 | 4,2 | 0,1 | 0,0 | | |
| | A5c-1 | 1282,6 | 81944,4 | 1386,5 | 136612,0 | 2913,7 | 56491,8 | 2607,1 | 786,9 | 2328,6 | 1193,9 | 91,9 | 7,9 | 0,1 | 0,0 | | |
| | A5c-2 | 1282,7 | 37093,2 | 1386,7 | 63451,0 | 2913,6 | 16241,1 | 2607,6 | 333,8 | 2329,1 | 1064,7 | 94,8 | 5,1 | 0,1 | 0,0 | | |
| | A5d-1 | 1282,1 | 27955,7 | 1386,4 | 46104,3 | 2911,8 | 17698,5 | | | | | 92,6 | 7,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6a-1 | 1282,0 | 30580,3 | 1386,3 | 50707,9 | 2911,9 | 13365,8 | | | 2328,0 | 1377,2 | 94,8 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6a-2 | 1282,5 | 14317,1 | 1386,5 | 23805,4 | 2912,2 | 5581,7 | | | | | 95,3 | 4,7 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6a-3 | 1282,3 | 20383,2 | 1386,4 | 33037,1 | 2912,5 | 7308,8 | | | | | 95,6 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6a-5 | 1282,4 | 19153,8 | 1386,6 | 32928,4 | 2913,2 | 8549,5 | | | | | 94,8 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6b-1 | 1282,6 | 24021,1 | 1386,7 | 41312,9 | 2913,6 | 9589,4 | 2607,3 | 325,0 | | | 95,2 | 4,7 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A6b-3 | 1282,6 | 28228,1 | 1386,7 | 48789,2 | 2913,8 | 9445,6 | | | | | 96,1 | 3,9 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6b-4 | 1282,5 | 37107,1 | 1386,6 | 63478,6 | 2913,6 | 13990,9 | 2607,7 | 452,3 | | | 95,4 | 4,4 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A6c-1 | 1282,3 | 77662,7 | 1386,4 | 130683,0 | 2912,2 | 30207,5 | 2606,9 | 1205,4 | | | 95,2 | 4,6 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A6c-2 | 1282,2 | 65045,5 | 1386,3 | 106874,0 | 2912,2 | 24628,4 | 2606,6 | 925,1 | | | 95,3 | 4,5 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A6d-1 | 1282,1 | 418,3 | 1386,1 | 1050,6 | 2917,8 | 11680,3 | | | | | 27,4 | 72,6 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A6d-2 | 1282,6 | 71522,6 | 1386,6 | 125380,0 | 2913,5 | 26709,0 | 2607,7 | 1137,4 | | | 95,5 | 4,3 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A7a-1 | 1282,3 | 13051,3 | 1386,5 | 56070,0 | 2913,0 | 7009,5 | 2606,7 | 443,9 | | | 96,5 | 3,3 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A7a-2 | 1281,8 | 25969,5 | 1386,2 | 39657,8 | 2911,3 | 8737,2 | | | | | 95,8 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A7a-3 | 1282,3 | 31756,6 | 1386,5 | 52723,8 | 2913,8 | 9014,3 | | | | | 96,6 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A7d-1 | 1282,3 | 51405,2 | 1386,4 | 81696,6 | 2912,6 | 18576,5 | | | | | 95,6 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A7e-1 | 1282,3 | 19996,7 | 1386,4 | 30649,4 | 2912,4 | 7044,1 | | | | | 95,6 | 4,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A8a-1 | 1282,9 | 24976,7 | 1386,9 | 42239,0 | 2913,1 | 12082,0 | 2607,7 | 425,7 | 2328,1 | 2071,4 | 94,1 | 5,6 | 0,2 | 0,0 | | |
| | A8b-1 | 1282,7 | 36718,3 | 1386,8 | 63014,3 | 2912,8 | 10441,0 | 2607,0 | 202,8 | 2328,6 | 822,2 | 96,6 | 3,4 | 0,1 | 0,0 | | |
| | A8c-1 | 1282,7 | 32197,6 | 1386,8 | 54270,4 | 2912,9 | 8714,5 | 2607,2 | 249,4 | 2329,4 | 713,0 | 96,6 | 3,2 | 0,1 | 0,0 | | |
| | A8d-1 | 1282,8 | 15450,3 | 1386,9 | 25356,6 | 2912,8 | 4256,2 | | | 2329,2 | 551,7 | 96,6 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | | |
| | A9a-1 | Methan + verschiedene Kohlenwasserstoffe (Peaks bei 2899,73 cm ⁻¹ , 2916,63 cm ⁻¹ und 2953,64 cm ⁻¹) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | A9a-2 | quantitative Auswertung nicht möglich | | | | | | | | | | | | | | | |
| | A9b-1 | | | | | | | 2918,1 | 1057,1 | | | 2330,5 | 635,3 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| | A9b-2 | | | | | | | 2917,7 | 15130,6 | | | | | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 |
| A9d-1 | | | | | | | 2917,8 | 13665,0 | | | | | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | |

Tabelle 7-12: Messdaten und Ergebnisse für Typ 1-Einschlüsse mit H₂O-Salz

| Probe | Bild | Nr. | T _E (°C) | T _m (°C) | Salinität (Gew.- % NaCl äq.) | T _H (°C) | V _m cm ³ /mol | ρ g/cm ³ | Füllgrad (%) |
|--------|--------|-------|------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|--|------------------------|-----------------|
| PuA 41 | A 1a | 1 | -21,0 | -3,6 | 5,86 | 229,7 | 21,33 | 0,862 | 83,1 |
| | | 2 | -21,0 | -3,6 | 5,86 | 240,2 | 21,65 | 0,849 | 81,8 |
| | A 1b | 1 | -21,0 | -4,7 | 7,45 | 222,5 | 21,04 | 0,881 | 83,8 |
| | | 2 | -21,0 | | | 238,8 | | | |
| | | 3 | -21,0 | -2,7 | 4,49 | 221,6 | 21,18 | 0,864 | 84,0 |
| | | 4 | -21,0 | -3,0 | 4,96 | 210,4 | 20,84 | 0,881 | 85,2 |
| | | 5 | -21,0 | -4,2 | 6,74 | 250,9 | 21,92 | 0,841 | 80,6 |
| | | 6 | -21,0 | -4,2 | 6,74 | 240,7 | 21,59 | 0,854 | 81,8 |
| | A 2-1c | 7 | -21,0 | -4,2 | 6,74 | 205,5 | 20,66 | 0,893 | 85,5 |
| | | 2 | <-25 | -4,1 | | | | | |
| | | 3 | | -3,6 | | | | | |
| | A2a | 5 | | -6,1 | | | | | |
| | | 6 | | -6,1 | | | | | |
| | | 2 | | -3,3 | | 160,0 | 19,76 | 0,930 | 89,8 |
| | Bild 2 | b | -21,7 | -14,0 | 17,79 | 170,0 | 19,94 | 0,922 | 89,0 |
| | | c | -21,7 | -11,2 | 15,17 | 217,5 | 20,92 | 0,922 | 81,8 |
| | A4a | | -10,0 | -5,0 | 7,86 | 140,0 | 19,68 | 0,970 | 87,6 |
| | A6e | 1 | -20,0 | -4,0 | 6,45 | 161,5 | 19,82 | 0,936 | 88,8 |
| | | 2 | -20,0 | -4,0 | 6,45 | 175,7 | 20,05 | 0,920 | 88,2 |
| | | | | | 155,0 | 19,70 | 0,936 | 89,8 | |
| PuA 51 | Cb1 | 8 | -20,0 | -6,6 | 9,98 | | 19,44 | 0,962 | 90,0 |
| | | 9 | -20,0 | -3,1 | 5,11 | | 19,73 | 0,930 | 90,0 |
| | E1 | 1 | -20,0 | -3,9 | 6,30 | 192,6 | 20,38 | 0,905 | 86,8 |
| | | 2 | -20,0 | -3,1 | 5,11 | 233,6 | 21,50 | 0,854 | 82,6 |
| | | 3 | -20,0 | -2,9 | 4,80 | 240,5 | 21,76 | 0,843 | 81,7 |
| | | 4 | -20,0 | -3,1 | 5,11 | 228,6 | 21,35 | 0,860 | 83,2 |
| | E2 | 6 | -20,0 | -4,3 | 6,88 | 226,1 | 21,16 | 0,873 | 83,4 |
| | | 7 | -20,0 | -4,3 | 6,88 | 228,6 | 21,23 | 0,870 | 83,2 |
| | E3 | 3 | -20,0 | -2,5 | 4,18 | | 19,79 | 0,924 | 90,0 |
| | E4 | 1 | -20,0 | -4,6 | 7,31 | | 19,07 | 0,971 | 92,5 |
| | | 2 | -20,0 | -3,2 | 5,26 | | 19,19 | 0,957 | 92,5 |
| | | 3 | -20,0 | -3,2 | 5,26 | | | | 92,5 |
| | | 4 | -20,0 | -3,2 | 5,26 | | | | 92,5 |
| | E6 | 1 | -20,0 | -3,7 | 6,01 | | 19,68 | 0,936 | 90,0 |
| | E7 | 1 | -20,0 | -4,6 | 7,31 | | 19,60 | 0,944 | 90,0 |
| | F1 | 1 | -20,0 | -2,5 | 4,18 | 193,0 | 20,43 | 0,895 | 87,2 |
| | | 2 | -20,0 | -2,6 | 4,34 | 201,4 | 20,63 | 0,888 | 86,3 |
| | F2 | 3 | -20,0 | -2,6 | 4,34 | 183,9 | 20,22 | 0,906 | 88,0 |
| | | 1 | -20,0 | -2,8 | 4,65 | 200,4 | 20,60 | 0,889 | 86,3 |
| | | 2 | -20,0 | -2,9 | 4,80 | 182,4 | 20,19 | 0,908 | 88,1 |
| | | 3 | -20,0 | -3,0 | 4,96 | 151,4 | 19,62 | 0,936 | 90,6 |
| | | 4 | -20,0 | -3,1 | 5,11 | 159,4 | 19,75 | 0,929 | 89,9 |
| | | 5 | -20,0 | | | 209,8 | | | |
| | F3 | 2 | -20,0 | -2,8 | 4,65 | 205,9 | 20,74 | 0,883 | 85,8 |
| | F5 | 1 | -20,0 | -2,7 | 4,49 | 195,4 | 20,48 | 0,894 | 86,9 |
| | | 2 | -20,0 | -2,7 | 4,49 | 192,3 | 20,40 | 0,897 | 87,2 |
| | | 3 | -20,0 | -2,6 | 4,34 | 192,1 | 20,41 | 0,898 | 87,2 |
| | F6 | 1 | -20,0 | -3,3 | | | | | |
| | F7 | 1 | -20,0 | -3,5 | 5,71 | 196,0 | 20,46 | 0,899 | 86,6 |
| | | 2 | -20,0 | | | 159,6 | | | |
| | Ga2 | 1 | -20,0 | -3,9 | 6,30 | | 19,66 | 0,938 | 90,0 |
| | | 2 | -20,0 | -3,4 | 5,56 | | 19,70 | 0,933 | 90,0 |
| | | 3 | -20,0 | -4,0 | 6,45 | | 19,65 | 0,939 | 90,0 |
| | | 4 | -20,0 | -3,7 | 6,01 | | 19,68 | 0,936 | 90,0 |
| | | 5 | -20,0 | -3,5 | 5,71 | | 19,69 | 0,934 | 90,0 |
| | | 6 | -20,0 | -3,6 | 5,86 | | 19,68 | 0,935 | 90,0 |
| | Ga4 | 1 | -20,0 | -3,2 | 5,26 | | 19,72 | 0,931 | 90,0 |
| | | 2 | -20,0 | -3,7 | 6,01 | | 19,68 | 0,936 | 90,0 |
| | Gb1 | 1 | -20,0 | -4,7 | 7,45 | | 19,59 | 0,945 | 90,0 |
| | Gb3 | 1 | -20,0 | -3,9 | 6,30 | | 19,66 | 0,938 | 90,0 |
| | | 2 | -20,0 | -3,9 | 6,30 | | 19,66 | 0,938 | 90,0 |
| Gb4 | 1 | -20,0 | -3,5 | 5,71 | | 19,69 | 0,934 | 90,0 | |
| | 2 | -20,0 | -3,5 | 5,71 | | 19,69 | 0,934 | 90,0 | |
| | 3 | -20,0 | -4,1 | 6,59 | | 19,64 | 0,940 | 90,0 | |

Tabelle 7-12 (Forts.):

| Probe | Bild | Nr. | T _E (°C) | T _m (°C) | Salinität (Gew.- % äq.) | | T _H (°C) | V _m cm ³ /mol | ρ g/cm ³ | Füllgrad (%) |
|---------|------|-----|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|--|------------------------|-----------------|
| | | | | | NaCl | CaCl ₂ | | | | |
| PuA 21a | A1 | 1 | -35,0 | -10,4 | | 14,46 | 120,1 | 19,12 | 1,027 | 88,4 |
| | | 1a | -35,0 | -10,4 | | 14,46 | 144,7 | 19,45 | 1,010 | 87,0 |
| | | 2 | -35,0 | -3,9 | | 7,41 | 173,8 | 19,89 | 0,945 | 87,8 |
| | D | 2a | | | | 7,41 | | | | |
| | | 1 | -22,8 | -8,7 | 12,51 | | 182,7 | 20,24 | 0,935 | 85,8 |
| | | 2 | -22,8 | -8,7 | 12,51 | | 183,5 | 20,25 | 0,934 | 85,8 |
| PuA 29 | B1 | 1 | -22,9 | -6,0 | 9,21 | | 161,1 | 19,84 | 0,939 | 88,4 |
| | | 2 | -22,9 | -8,3 | 12,05 | | 122,7 | 19,40 | 0,972 | 89,6 |
| | | 3 | -22,9 | -9,3 | 13,18 | | 165,5 | 19,99 | 0,948 | 86,7 |
| | | 4 | -22,9 | -8,3 | 12,05 | | 147,3 | 19,71 | 0,957 | 88,2 |
| | | 5 | -22,9 | -8,3 | 12,05 | | | 19,87 | 0,949 | 87,5 |
| | | 6 | -22,9 | -5,6 | 8,68 | | 210,1 | 20,72 | 0,899 | 84,8 |
| | | 7 | -22,9 | | | | 207,9 | | | |
| | | 8 | -22,9 | | | | 207,9 | | | |
| | B2 | 1 | -20,0 | -6,9 | 10,36 | | 197,8 | 20,46 | 0,914 | 85,4 |
| | | 2 | -20,0 | | | | 105,1 | | | |
| | | 3 | -20,0 | | | | 125,1 | | | |
| | C6 | 1 | -20,0 | -5,4 | 8,41 | | 181,4 | 20,16 | 0,922 | 87,2 |
| | | 2 | -20,0 | -4,9 | 7,73 | | 200,2 | 20,52 | 0,904 | 85,8 |
| | | 3 | -20,0 | -4,4 | 7,02 | | 193,8 | 20,40 | 0,906 | 86,5 |
| | C7 | 1 | -20,0 | -4,8 | 7,59 | | | 19,58 | 0,946 | 90,0 |
| | | | -20,0 | -4,8 | 7,59 | | | 20,73 | 0,894 | 85,0 |
| | | 2 | -20,0 | -4,7 | 7,45 | | 188,8 | 20,30 | 0,914 | 86,9 |
| | | 3 | -20,0 | -6,4 | 9,73 | | 191,4 | 20,35 | 0,918 | 86,1 |
| | | 4 | -20,0 | -4,7 | 7,45 | | 189,3 | 20,31 | 0,913 | 86,8 |

Tabelle 7-13: Messdaten und Kombination mit Raman-Ergebnissen für Typ 2-Einschlüsse mit H₂O-CO₂-CH₄±H₂S

| Probe | Bild | Einschluss Nr. | T _T (°C) | T _{m, Chlathrat} (°C) | T _{H, Gas} (°C) | φ ·100 (%) | T _{H, tot} (°C) | xCO ₂ | xCH ₄ | xH ₂ S | ρ _{Gasphase} (g/cm ³) | xH ₂ O | xCO ₂ | xCH ₄ | Gehalt NaCl mol/kg | Gew.-% | V _{m, gesamt} (cm ³ /mol) | ρ _{gesamt} (g/cm ³) |
|--------|------|----------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|------------------|------------------|-------------------|--|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------|---|--|
| PH18-1 | | 1 | -58,0 | | 21,2 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | -58,0 | | 21,8 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | -58,0 | -10,0 | 22,7 | 41,1 | | | | | 0,55 | 0,70 | 0,25 | 0,03 | 0,94 | 5,20 | 33,4 | 0,72 |
| | | 4 | -58,0 | -10,0 | 23,1 | 51,1 | | | | | 0,56 | 0,76 | 0,19 | 0,02 | 1,05 | 5,76 | 29,3 | 0,76 |
| PuA17 | | 1 | -57,2 | 8,6 | 26,8 | 39,9 | | 0,960 | 0,040 | | 0,61 | 0,66 | 0,29 | 0,01 | 1,31 | 7,12 | 33,32 | 0,75 |
| | | 2 | -57,4 | (8,6) | 27,6 | 61,3 | | 0,954 | 0,046 | | 0,27 | 0,88 | 0,09 | 0,00 | 0,82 | 4,56 | 28,39 | 0,70 |
| | | 3 | | (8,6) | 27,4 | 2,8 | | 0,970 | 0,030 | | 0,27 | 0,19 | 0,78 | 0,02 | 0,74 | 4,16 | 133,50 | 0,29 |
| | | 4 | -57,4 | | 27,5 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 5 | -57,4 | 8,6 | 27,1 | 60,9 | | 0,950 | 0,050 | | 0,60 | 0,80 | 0,16 | 0,01 | 1,05 | 5,79 | 26,24 | 0,82 |
| | | 6 | -57,4 | | 27,7 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 8 | -57,4 | (8,6) | 28,0 | 77,0 | | 0,964 | 0,036 | | 0,28 | 0,91 | 0,06 | 0,00 | 0,77 | 4,32 | 23,46 | 0,82 |
| PuA21a | A2 | 1 | -57,8 | 9,1 | 26,4 | 35,0 | 322,1 | 0,960 | 0,040 | | 0,62 | 0,63 | 0,34 | 0,01 | 0,95 | 5,23 | 35,59 | 0,74 |
| | | 2 | -57,8 | 7,9 | 24,6 | | 313,8 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | -57,8 | | 18,1 | | <176,2 | | | | | | | | | | | |
| | | 4 | -57,8 | 7,9 | 24,0 | 30,0 | 313,8 | 0,930 | 0,070 | | 0,61 | 0,57 | 0,37 | 0,03 | 1,46 | 7,87 | 38,23 | 0,71 |
| | | 5 | -57,8 | | | | 313,8 | | | | | | | | | | | |
| | A3 | 8 | -57,8 | 7,9 | 26,3 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 9 | | 9,2 | 26,1 | | 289,7 | | | | | | | | | | | |
| | | 10 | | 9,2 | 26,1 | | | | | | | | | | | | | |
| | B1 | 1 | | | 24,3 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | -57,7 | 8,1 | 24,4 | | 290,2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | -57,9 | | 24,4 | | | | | | | | | | | | | |
| | B2 | 4 | | | | | 290,2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | -58,4 | 8,0 | 25,3 | | 298,9 | | | | | | | | | | | |
| | | 4 | | 24,3 | | 299,9-309,6 | | | | | | | | | | | | |
| PuA29 | A1 | 3 | | | 18,0 | | | | | | | | | | | | | |
| | | A3 | 1 | | | 27,2 | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | 27,2 | | | | | | | | | | | | | |
| | A4 | 3 | | | 27,2 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | 9,6 | 15,1 | 51,0 | | 0,877 | 0,123 | | 0,20 | 0,856 | 0,095 | 0,010 | 1,234 | 6,73 | 33,42 | 0,59 |
| | | 2 | | | 26,3 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | 26,3 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 4 | | (9,6) | 15,7 | 35,0 | | | | 0,20 | 0,806 | 0,152 | 0,018 | 0,809 | 4,51 | 45,47 | 0,47 | |
| | A5 | 5 | | | 13,3 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | (9,6) | 15,7 | 15,0 | | | | 0,20 | 0,619 | 0,320 | 0,042 | 0,809 | 4,51 | 81,54 | 0,32 | |
| | | 2 | | (9,6) | 19,4 | 52,0 | | | | 0,19 | 0,865 | 0,087 | 0,009 | 1,234 | 6,73 | 33,12 | 0,59 | |
| | | 3 | | (9,6) | 14,1 | 60,0 | | | 0,20 | 0,892 | 0,075 | 0,007 | 0,809 | 4,51 | 28,95 | 0,67 | | |

Tabelle 7-13 (Forts.):

| Probe | Bild | Einschluss Nr. | T _T (°C) | T _{m, Chlathrat} (°C) | T _{H, Gas} (°C) | φ ·100 (%) | T _{H, tot} (°C) | xCO ₂ | xCH ₄ | xH ₂ S | ρ _{Gasphase} (g/cm ³) | xH ₂ O | xCO ₂ | xCH ₄ | Gehalt NaCl | | V _{m, gesamt} (cm ³ /mol) | ρ _{gesamt} (g/cm ³) | |
|--------|--------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|---|-------------------|------------------|------------------|-------------|--------|--|---|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | mol/kg | Gew.-% | | | |
| PuA 41 | A 2-1b | 1 | -57,3 | | 27,2 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | -57,3 | | 27,2 | | | | | | | | | | | | | | |
| | A 2-1c | 1 | -57,3 | 8,7 | 27,3 | 65,0 | | | | | | | | | | | | | |
| | A 2-1d | 1 | -57,3 | 7,9 | 27,3 | 30,0 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | -57,3 | 7,9 | 28,0 | 30,0 | | | | | | | | | | | | | |
| | A2a | 1 | -57,1 | 8.2-8.5 | 27,4 | 64,3 | >285 | 0,932 | 0,066 | 0,001 | 0,56 | 0,819 | 0,137 | 0,008 | 1,223 | 6,7 | 25,50 | 0,82 | |
| | | 2 | | | | 80,5 | 160,0 | | | | | | | | | | | | |
| | A2-1b | 1 | -58,1 | | 27,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | 26,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| | A2c | 1 | -57,8 | 8.2-8.5 | 27,7 | 53,4 | >285 | | | | | | | | | | | | |
| | A2d | 1 | | (8.35) | 26,5 | 17,8 | <285? | 0,948 | 0,050 | 0,002 | 0,60 | 0,424 | 0,531 | 0,027 | 1,159 | 6,3 | 47,44 | 0,66 | |
| | | 2 | | | | 26,5 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | 46,0 | | | | | | | | | | | | | |
| | A2e | 1 | | (8.35) | 26,6 | 36,2 | >285 | 0,950 | 0,048 | 0,002 | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | 42,4 | | | | | | | | | | | | | |
| | Bild 2 | a | -57,0 | 7.6 | 27,0 | 33,8 | | 0,956 | 0,044 | | 0,60 | 0,607 | 0,341 | 0,015 | 1,665 | 8,9 | 36,39 | 0,72 | |
| | | d | | | | 7,2 | | | | | | | | | | | | | |
| | A3b | 1 | | (8.35) | 26,3 | 38,1 | | 0,931 | 0,067 | 0,002 | 0,57 | 0,660 | 0,291 | 0,020 | 1,243 | 6,8 | 34,71 | 0,72 | |
| | | 2 | | (8.35) | 27,0 | 36,9 | >285 | 0,960 | 0,040 | | 0,61 | 0,638 | 0,317 | 0,013 | 1,395 | 7,5 | 34,73 | 0,74 | |
| | | 3 | | | | 26,5 | | | | | | | | | | | | | |
| | A4 | 1 | -57,3 | (8.35) | 25,8 | 36,4 | | 0,953 | 0,045 | 0,002 | 0,61 | 0,631 | 0,321 | 0,015 | 1,440 | 7,8 | 34,87 | 0,74 | |
| | | 2 | -57,3 | | 25,8 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | 25,8 | | | | | | | | | | | | | | |
| | A5c | 1 | -58,5 | 7,6 | 25,4 | 27,4 | >285 | 0,919 | 0,079 | 0,001 | 0,56 | 0,554 | 0,383 | 0,032 | 1,567 | 8,4 | 40,91 | 0,70 | |
| | | 2 | | 10,0 | 25,4 | 11,5 | | 0,948 | 0,051 | 0,001 | 0,61 | 0,313 | 0,646 | 0,034 | 0,617 | 3,5 | 53,25 | 0,65 | |
| | A5d | 1 | | (10) | 16,7 | 63,7 | >285 | 0,926 | 0,074 | | 0,63 | 0,815 | 0,151 | 0,010 | 0,828 | 4,6 | 25,20 | 0,85 | |
| | A6c | 1 | | 9,0 | 25,8 | 29,0 | >285 | 0,952 | 0,046 | 0,002 | 0,61 | 0,569 | 0,393 | 0,018 | 0,921 | 5,1 | 38,86 | 0,72 | |
| | | 2 | | 9,0 | 25,8 | ca. 30 | >285 | 0,953 | 0,045 | 0,002 | 0,61 | 0,575 | 0,382 | 0,017 | 1,206 | 6,6 | 38,23 | 0,72 | |
| | A6d | 1 | | | | | | 0,274 | 0,726 | 0,000 | | | | | | | | | |
| | | 2 | | 8,0 | 25,2 | 13,1 | | 0,955 | 0,043 | 0,002 | 0,62 | 0,330 | 0,624 | 0,028 | 1,541 | 8,3 | 50,79 | 0,67 | |
| 3 | | -58,0 | | 27,3 | | | 0,957 | 0,043 | | | | | | | | | | | |
| A7d | 1 | -58,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | -58,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A7e | 1 | -58,0 | | 26,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | -58,0 | | 26,7 | | | 0,956 | 0,044 | | | | | | | | | | | |
| A8a | 1 | | (10) | 23,7 | 19,1 | | 0,941 | 0,056 | 0,002 | 0,61 | 0,445 | 0,515 | 0,030 | 0,647 | 3,6 | 45,72 | 0,68 | | |
| | 2 | | | 23,1 | ca. 15 | 220-240 | | | | | | | | | | | | | |
| A8b | 1 | | (10) | 27,3 | 35,7 | | 0,966 | 0,034 | 0,001 | 0,62 | 0,638 | 0,333 | 0,011 | 0,777 | 4,3 | 35,20 | 0,75 | | |
| A8c | 1 | | (10) | 26,2 | 20,0 | <240 | 0,966 | 0,032 | 0,001 | 0,64 | 0,451 | 0,520 | 0,017 | 0,772 | 4,3 | 44,38 | 0,70 | | |
| A8d | 1 | | (10) | 26,1 | 36,1 | | 0,966 | 0,034 | | 0,63 | 0,637 | 0,333 | 0,011 | 0,788 | 4,4 | 34,76 | 0,76 | | |

Tabelle 7-14: Messdaten und Kombination mit Raman-Daten für Typ -3a-Einschlüsse mit CO₂-CH₄±H₂S±N₂

| Probe | Bild | Einschluss Nr. | T _T (°C) | T _{H, Gas} (°C) | xCO ₂ | xCH ₄ | xH ₂ S | xN ₂ | ρ _{gesamt} (g/cm ³) | V _{m, gesamt} (cm ³ /mol) |
|--------|------|----------------|---------------------|--------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|--|---|
| PuA 41 | A1a | 1 | -57,4 | 20,2 | 0,959 | 0,038 | 0,003 | | 0,73 | 58,46 |
| | | 2 | -57,4 | 20,2 | | | | | " | " |
| | | 3 | -57,4 | 21,2 | 0,956 | 0,042 | 0,002 | | 0,72 | 59,27 |
| | A1b | 1 | -57,4 | 19,5 | 0,961 | 0,037 | 0,002 | | 0,74 | 57,97 |
| | | 2 | -57,4 | 20,8 | 0,958 | 0,040 | 0,002 | | 0,72 | 58,91 |
| | | 3 | -57,4 | 20,8 | | | | | | |
| | | 4 | -57,4 | 21,2 | | | | | | |
| | | 5 | -57,4 | 21,8 | | | | | | |
| | | 6 | -57,4 | 22,0 | 0,952 | 0,032 | 0,001 | 0,014 | 0,72 | 59,68 |
| | | 7 | -57,4 | 22,3 | | | | | | |
| | | 8 | -57,4 | 23,1 | 0,960 | 0,038 | 0,002 | | 0,71 | 60,26 |
| | | 9 | -57,4 | 24,2 | 0,944 | 0,038 | 0,001 | 0,016 | 0,70 | 61,66 |
| | | 10 | -57,4 | 24,4 | | | | | | |
| | A1c | 1 | -57,4 | 24,7 | | | | | | |
| | | 2 | -57,4 | 23,6 | | | | | | |
| | | 3 | -57,4 | 24,4 | | | | | | |
| | A4b | 1 | -57,3 | 24,9 | 0,948 | 0,050 | 0,002 | | 0,69 | 62,33 |
| | | 2 | -57,3 | 25,2 | | | | | | |
| | A6a | 1 | | | | | | | | |
| | | 2 | | | 0,954 | 0,047 | | | | |
| | | 3 | | 26,7 | 0,956 | 0,044 | | | 0,68 | 63,22 |
| | | 4 | | <25 | | | | | | |
| | | 5 | | <25 | 0,948 | 0,052 | | | 0,69 | 62,49 |
| | | 6 | | 25,3 | | | | | | |
| | A6b | 1 | -57,1 | 25,8 | 0,952 | 0,047 | 0,002 | | 0,68 | 62,81 |
| 2 | | -57,1 | 26,6 | | | | | | | |
| 3 | | -57,1 | 26,6 | 0,961 | 0,039 | | | 0,69 | 62,80 | |
| 4 | | -57,1 | 25,1 | 0,954 | 0,044 | 0,002 | | 0,69 | 62,06 | |
| 5 | | -57,1 | 25,3 | | | | | | | |
| PuA 51 | Ca5 | 1 | -58,3 | -14,3 | | | | | | |
| | | 2 | -58,3 | -12,2 | | | | | | |
| | | 3 | -58,3 | -11,4 | 0,950 | 0,050 | | | 0,91 | 46,81 |
| | | 4 | -58,3 | -10,5 | | | | | | |
| | | 5 | -58,3 | -8,4 | | | | | | |
| | | 6 | -58,3 | -7,6 | | | | | | |
| | | 7 | -58,3 | -7,1 | | | | | | |
| | | 9 | -58,3 | -2,0 | | | | | | |
| | | 10 | -58,3 | 4,6 | 0,919 | 0,081 | | | 0,80 | 49,25 |
| | | 11 | | 4,6 | | | | | | |
| | | Ca6 | 1 | | -3,3 | | | | | |
| | 2 | | | -3,3 | | | | | | |
| | 3 | | | -1,7 | | | | | | |
| | 4 | | | -1,7 | | | | | | |
| | Cb1 | 1 | | 0,3 | | | | | | |
| -57,2 | | | 22,5 | 0,935 | 0,065 | | | 0,69 | 61,52 | |

Tabelle 7-15: Einschlüsse des Barquito-Plutons

| Bild | Einschluss Nr. | T _E (°C) | T _m | Salinität (Gew.-%) | | T _H (°C) | V _m cm ³ /mol | ρ g/cm ³ | Füllgrad (%) |
|--------------|-------------------|------------------------|----------------|--------------------|-------------------|------------------------|--|------------------------|-----------------|
| | | | | NaCl | CaCl ₂ | | | | |
| BAR a | 1 | -50,6 | -6,0 | | 9,96 | | 18,05 | | 100 |
| | 2 | -50,6 | -5,4 | | 9,23 | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -50,6 | -5,3 | | 9,10 | | 18,05 | | 100 |
| | 4 | -50,6 | -7,2 | | 11,31 | | 18,05 | | 100 |
| | 5 | -23,8 | -3,8 | 6,16 | | 181,8 | 20,16 | 0,913 | 87,8 |
| | 6 | -50,6 | -6,4 | | 10,42 | | 18,05 | | 100 |
| | 7 | -50,6 | -6,5 | | 10,53 | | 18,05 | | 100 |
| | 8 | -50,6 | -7,1 | | 11,20 | | 18,05 | | 100 |
| | 9 | -50,6 | -6,1 | | 10,07 | | 18,05 | | 100 |
| | 10 | -50,6 | -6,3 | | 10,31 | | 18,05 | | 100 |
| | 11 | -50,6 | -1,4 | | 3,08 | | 18,05 | | 100 |
| | 12 | -50,6 | -4,0 | 6,45 | | 164,2 | 19,85 | 0,928 | 89,1 |
| BAR b | 1 | -48,6 | -3,8 | 6,16 | | 201,6 | 20,58 | 0,894 | 86,0 |
| | 2 | -48,6 | -3,8 | 6,16 | | >255,1 | 22,13 | 0,831 | <79,99 |
| | 3 | -48,6 | -4,8 | | 8,46 | 255,5 | 21,94 | 0,863 | 79,2 |
| | 4 | -48,6 | -4,8 | | 8,46 | >255,1 | 21,93 | 0,863 | <79,24 |
| | 5 | -48,6 | -4,8 | | 8,46 | 202,4 | 20,48 | 0,924 | 84,8 |
| | 6 | -48,6 | -4,8 | | 8,46 | 204,5 | 20,53 | 0,922 | 84,6 |
| | 7 | -20,9 | -3,3 | 5,41 | | | | | |
| | 8 | -20,9 | -5,7 | 8,81 | | >255,1 | 21,87 | 0,851 | 80,3 |
| | 9 | -20,9 | -4,8 | 7,59 | | 209,4 | 20,73 | 0,894 | 85,0 |
| | 10 | -48,6 | | | | 222,2 | | | |
| BAR c | 1 | -48,6 | -5,1 | | 8,85 | | 18,05 | | 100 |
| | 2 | -48,6 | -4,1 | | 7,51 | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -48,6 | -4,1 | | 7,51 | | 18,05 | | 100 |
| | 4 | -48,6 | -6,1 | | 10,07 | | 18,05 | | 100 |
| | 5 | -48,6 | -6,1 | | 10,07 | | 18,05 | | 100 |
| | 6 | -19,4 | -6,6 | 9,98 | | 297,3 | 23,21 | 0,806 | 75,4 |
| | 7 | -22,3 | -4,6 | 7,31 | | <180 | 20,13 | 0,919 | >87,62 |
| | 8 | -22,3 | -6,5 | 9,86 | | 168,3 | 19,96 | 0,938 | 87,7 |
| | 9 | -22,3 | -3,5 | 5,71 | | 261,9 | 22,44 | 0,820 | 79,0 |
| | 10 | -22,3 | -4,4 | 7,02 | | 253,3 | 21,97 | 0,841 | 80,3 |
| | 11 | | -3,3 | 5,41 | | | | | 100? |
| | 12 | | -3,8 | 6,16 | | 190,9 | 20,35 | 0,904 | 87,0 |
| | 13 | | -3,8 | 6,16 | | 198,6 | 20,51 | 0,897 | 86,3 |
| | 14 | | -3,8 | 6,16 | | 212,1 | 20,83 | 0,883 | 85,0 |
| | 15 | | -3,8 | 6,16 | | 223,0 | 21,12 | 0,871 | 83,8 |
| A2 | 1 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 2 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 4a | -23,8 | -12,5 | 16,43 | | 232,4 | 21,16 | 0,907 | 81,2 |
| | 4b | -23,8 | -12,5 | 16,43 | | <194,8 | 20,51 | 0,936 | >83,73 |
| | 4c | -23,8 | -12,5 | 16,43 | | <194,8 | 20,51 | 0,936 | >83,73 |
| | 5 | -23,8 | | | | | | | |
| | 6 | -23,8 | -9,9 | 13,83 | | | 21,23 | 0,894 | |
| A3 | 1 | -23,8 | -3,7 | | | | | | |
| | 2 | -23,8 | -6,6 | | | | | | |
| | 3 | -23,8 | | | | 201,8 | | | |
| | 4 | -23,8 | -9,0 | 12,86 | | 199,1 | 20,51 | 0,924 | 85,6 |
| A4 | 1 | -52 | -6,5 | | 10,53 | | 18,05 | | 100 |
| | 2 | -52 | -6,5 | | 10,53 | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -52 | | | | | 18,05 | | 100 |
| | 4 | -52 | -7,1 | | 11,20 | | 18,05 | | 100 |
| | 5 | -52 | -4,5 | | 8,06 | | 18,05 | | 100 |
| | 6 | -52 | -5,4 | | 9,23 | | 18,05 | | 100 |
| A5 | mehrere FI | -52 | -1,5 | | 3,27 | | 18,05 | | 100 |

Tabelle 7-15 (Forts.)

| Bild | Einschluss Nr. | T _E (°C) | T _m | Salinität (Gew.- %) | | T _H (°C) | V _m cm ³ /mol | ρ g/cm ³ | Füllgrad (%) |
|-----------|-------------------|------------------------|----------------|---------------------|-------------------|------------------------|--|------------------------|-----------------|
| | | | | NaCl | CaCl ₂ | | | | |
| B1 | 1 | -35,0 | -5,7 | | 9,60 | 240,6 | 21,44 | 0,889 | 80,7 |
| | 2 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | >243,6 | 21,54 | 0,880 | <80,48 |
| | 3 | -35,0 | | | | >243,6 | | | |
| | 4 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | >243,6 | 21,54 | 0,880 | <80,48 |
| | 5 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | >243,6 | 21,54 | 0,880 | <80,48 |
| | 6 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | >243,6 | 21,54 | 0,880 | <80,48 |
| | 7 | -35,0 | | | | | | | |
| | 8 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | 171,6 | 19,84 | 0,956 | 87,4 |
| | 9 | -35,0 | -5,3 | | 9,10 | >243,6 | 21,54 | 0,902 | <80,43 |
| | 10 | -35,0 | | | | >243,6 | 21,54 | 0,000 | <80,43 |
| | 11 | -35,0 | | | | | | | |
| | 12 | -35,0 | | | (8,98) | 202,3 | (20,47) | | (88,43) |
| | 13 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | | | | |
| | 14 | -35,0 | -5,1 | | 8,85 | 245,5 | 21,61 | 0,877 | 80,3 |
| B2 | 1 | -35,0 | -5,3 | | 9,10 | >243,6 | 21,54 | 0,882 | <80,43 |
| | 2 | -35,0 | | | | | | | |
| | 3 | -35,0 | -5,3 | | 9,10 | 209,4 | 20,64 | 0,920 | 84,0 |
| | 4 | -35,0 | | | | | | | |
| | 5 | -35,0 | | | | | | | |
| | 6 | -35,0 | | | | | | | |
| B3 | 1 | -35,0 | -5,3 | | 9,10 | >243,6 | 21,54 | 0,882 | <80,43 |
| | 2 | -35,0 | -5,3 | | 9,10 | | | | |
| C1 | 3 | -35 | | | | | | | 100 |
| | 1 | -52 | | | | | | | 100 |
| | 2 | -22 | -3,9 | 6,30 | | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 4 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 5 | -52 | -3,9 | | 7,23 | | 18,05 | | 100 |
| | 6 | -52 | -3,2 | | 6,19 | | 18,05 | | 100 |
| | 7 | -22 | -4,3 | 6,88 | | | 18,05 | | 100 |
| | 8 | -52 | | | | | | | 100 |
| | 9 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| 10 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 | |
| C2 | 1 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 2 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 3 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 4 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |
| | 5 | -52 | -6,9 | | 10,98 | | 18,05 | | 100 |