

5.2. Staurolith-Zone

Die Staurolith-Zone im westlichen Gomatum-Tal ist sehr schmal und erstreckt sich über eine Breite von ca. 700 - 800 m von Pkt. 494/ 13°07,83 E bis Pkt. 476/ 13°07,48 E (Abb. 2.1 und 2.2). Sie läßt sich auch im etwa 50 km südlich gelegenen Hoanib-Tal bei Pkt. N10 (13°18,57 E/ 19°17,17 S) aushalten. Das erste Auftreten von Staurolith ist ein Ergebnis der Reaktion

Chlorit + Granat + Muskovit = Staurolith + Biotit + H₂O (KFMASH, siehe Kapitel 5.2.2.).

Staurolithbildung durch Chloritoidzerfall entsprechend der Reaktion

Chloritoid = Granat + Staurolith + Chlorit + H₂O (KFMASH)

wurde in keiner der Proben beobachtet. In keiner der untersuchten Proben tritt Chloritoid auf. Nach persönlichen Mitteilungen von Ben Goscombe (Geologischer Dienst von Namibia) wurden aber in einer seiner Proben Chloritoid einschüsse in Granat beobachtet und analysiert. Das spricht dafür, daß eine Bildung von Granat und/oder Staurolith auf Kosten von Chloritoid im Kaokogürtel möglich ist.

Im Modellsystem KFMASH ist der Staurolith-Isograd sehr scharf und nicht so stark vom Gesteinschemismus abhängig wie das erste Auftreten von Granat (Abb. 5.1). Staurolith bildet sich während der progressiven Metamorphose bei mittleren und hohen Eisen-Magnesium-Verhältnissen von $X_{Fe} = \text{ca. } 0.5 - 0.9$ in einem Temperaturbereich um 600 °C. In sehr eisenreichen Gesteinen ($X_{Fe} = \text{ca. } 0.9 - 1.0$) ist nur Granat mit Biotit, Muskovit, Quarz und Wasser und in eisenarmen Gesteinen ($X_{Fe} = 0 - \text{ca. } 0.5$) ist nur Chlorit mit Biotit, Muskovit, Quarz und Wasser stabil. Das erklärt, warum auch in der Staurolith-Zone noch staurolithfreie Granat-Glimmerschiefer neben Granat-Staurolith-Glimmerschiefern auftreten. Die Granat-Staurolith-Glimmerschiefer im mittleren Kaokogürtel weisen ein X_{Fe} von 0.40 und 0.48 auf und zeigen damit mittlere Eisen-Magnesium-Verhältnisse. Die Granat-Staurolith-Führung in den Glimmerschiefern ist jedoch auf sehr schmale, ca. 2 - 4 mm mächtige Lagen beschränkt. Diese bilden offensichtlich eisenreichere Domänen in den sonst staurolithfreien Gesteinslagen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten erstmals Granat-Staurolith-Glimmerschiefer im Kaokogürtel beobachtet werden, dabei handelt es sich um die Proben GK 96-67 (Pkt. 476) und GK 97-105 (Pkt. 494). Für die Staurolith-Zone ist das Auftreten folgender Minerale charakteristisch:

- Granat + Staurolith + Biotit + Chlorit + Muskovit + Plagioklas + Quarz + Ilmenit + Rutil + Akzessorien.

Dabei sind Granat, Staurolith, Biotit und Muskovit die fazieskritischen Minerale.

5.2.1. Petrographie

Proben GK 96-67 A+B und GK 97-105

Bei diesen Proben handelt es sich um Granat-Staurolith-Glimmerschiefer aus dem westlichen Gomatum-Tal (Pkt. 476 bzw. Pkt. 494) mit den oben genannten Mineralen.

Granat (ca. 10 Vol-%) bildet Porphyroblasten bis 2 mm in einer feinkörnigen bis sehr feinkörnigen Matrix mit ausgeprägter Parallelschieferung (S 2). Häufig zeigt er Einschlüsse von Plagioklas, Ilmenit, Rutil und Quarz; auch konnte ein prograder Chloriteinschluß identifiziert werden. Die Einschlußbahnen in Granat bilden ein parallel orientiertes Interngefüge, welches gegenüber der Hauptschieferung verlegt ist (Abb. 5.11 a). Dieses Interngefüge wird als Relikt einer älteren Schieferung (S 1) im Zuge einer ersten Deformation (D 1) angesehen. Die Granate sind in Bezug auf die Matrix rotiert und z.T. später zerbrochen. Häufig treten sie neben Staurolith auf.

Chemisch weisen die Granate ein deutliches Zonierungsmuster (Abb. 5.10 a und b) auf. Der Spessartingehalt zeigt eine typische Glockenkurve und schwankt zwischen 20 Mol-% im Granatkern und 4 Mol-% am Granatrand. Der Almandin- und der Pyropgehalt nehmen vom Kern zum Rand hin zu: Xalm von 59 bis 71 Mol-% und Xprp von 7 bis 14 Mol-%. Das Eisen-Magnesium-Verhältnis nimmt vom Kern zum Rand hin ab. Ganz am Rand des Granates ändert sich das bisher beschriebene Zonierungsmuster jedoch: der Spessartingehalt nimmt wieder etwas zu, der Pyropgehalt nimmt ab und der Almandingehalt bleibt gleich. Das Granatzonierungsmuster spiegelt damit eine prograde Wachstumszonierung unter Temperaturzunahme vom Kern zum Rand und einen randlichen Granatabbau wider. Der Grossulargehalt zeigt keine deutliche Tendenz in seinem Muster vom Kern zum Rand, er schwankt im Granatkern um 13 Mol-% und sinkt ganz am Rand auf 10 Mol-% ab. Das Ca wird wahrscheinlich in koexistierenden Plagioklas eingebaut, da dieser vom Kern zum Rand etwas anorthitreicher wird. Die Plagioklaszonierung ist jedoch sehr komplex. Die Granate sind hypidiomorph bis xenomorph (selten idiomorph) ausgebildet, sie sind z.T. zerbrochen, rotiert und die einzelnen Fragmente liegen nicht mehr nebeneinander vor. Einzelne Individuen werden am Rand zu Chlorit abgebaut. Die Granatporphyroblasten werden meist von Muskovit und Biotit umflasert.

Staurolith (ca. 8 Vol-%) bildet kurz- bis langprismatische Porphyroblasten und Poikioblasten bis 2 mm Länge (meist um 0.3 x 1 mm). Vereinzelt treten Durchkreuzungszwillinge auf. Staurolith wurde synkinematisch während der Hauptdeformation (D 2) gebildet. Die Staurolithindividuen sind z.T. rotiert und meist in die Hauptschieferung eingeregelt (Abb. 5.11 b). Dabei wurden sie häufig ausgelängt und später fragmentiert. Staurolith liegt in der Regel neben Granat vor und führt Einschlüsse von Plagioklas, Opakmineralen sowie vereinzelt Chlorit. Retrograd wird er zu Chlorit abgebaut (Abb. 5.10 e). Der Staurolith ist chemisch nicht zoniert und weist hohe Eisen-Magnesium-Verhältnisse von $X_{Fe} = 0.78 - 0.80$ sowie beachtliche Zn-Gehalte von 0.9 - 1.1 Gew.-% ZnO auf. Möglicherweise ist der Staurolith sehr schnell gewachsen und konnte deshalb keine Wachstumszonierung in der Elementverteilung entwickeln.

Biotit (ca. 34 Vol-%) bildet Lepidoblasten bis 2 mm Länge (meist um 0.5 mm) und definiert gemeinsam mit Muskovit die Hauptschieferung im Gestein. Er führt reichlich Zirkoneinschlüsse.

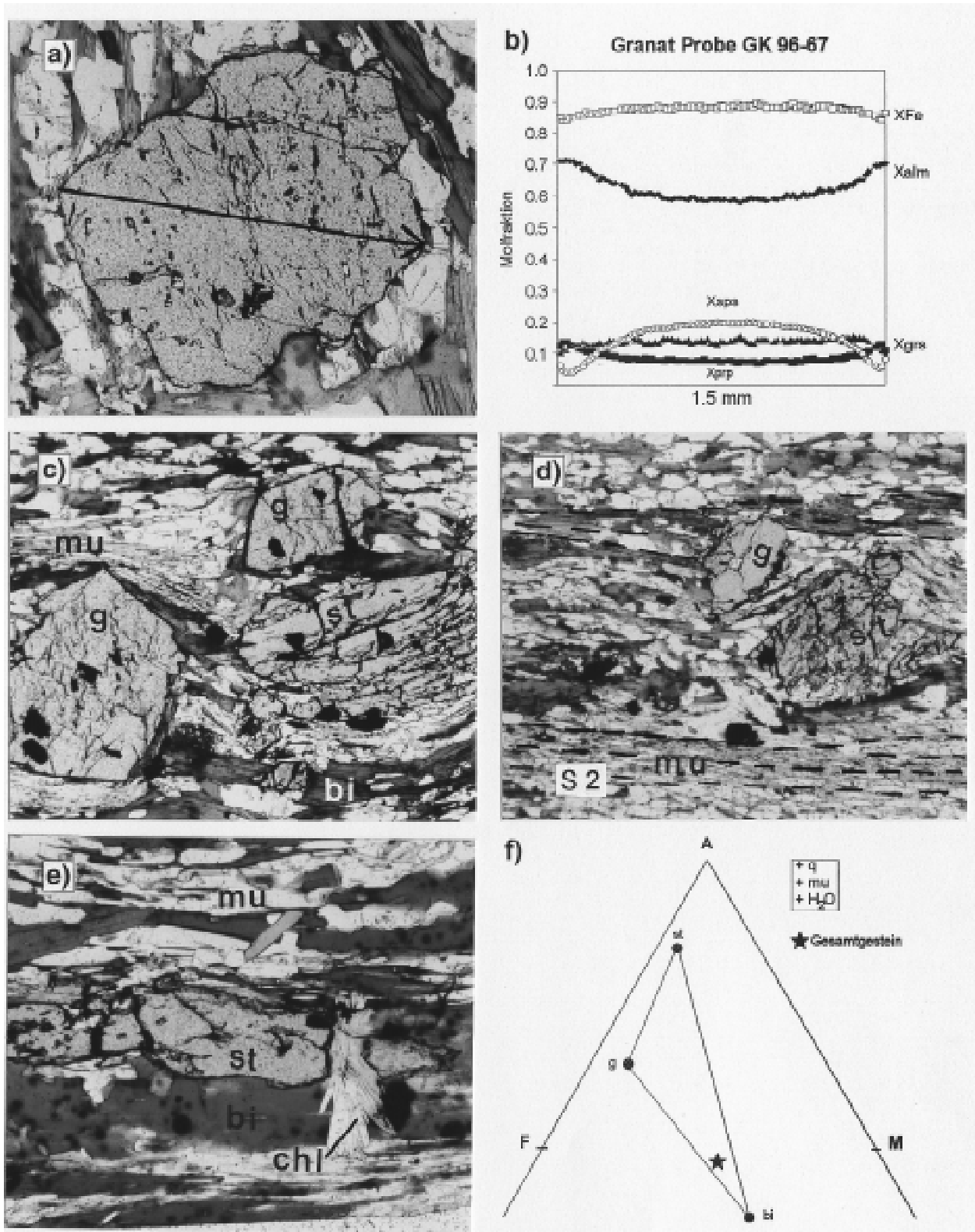


Abb. 5.10: Staurolith-Zone, Probe GK 96-67 (Pkt. 476). a) Porphyroblastischer Granat mit Markierung des gemessenen Granatprofils. Bildbreite 1.7 mm. b) Zonierungsmuster des unter a) abgebildeten Granates. c) Fazieskritische Mineralparagenese Granat - Staurolith - Biotit - Muskovit - Quarz. Bildbreite 3.5 mm. d) Granat- und Staurolithporphyroblast in feinkörniger Matrix mit ausgeprägter Hauptfoliation (S 2). Bildbreite 4.5 mm. e) Staurolithabbau zu retrogradem Chlorit. Bildbreite 1.8 mm. f) Darstellung der peakmetamorphen Mineralparagenese im AFM-Diagramm.

Bei der Staurolithbildungsreaktion (siehe oben) wird eine neue, zweite Biotitgeneration gebildet, die im Dünnschliff jedoch nicht von der ersten Biotitgeneration zu unterscheiden ist. Auch mineralchemisch sind bei den untersuchten Biotiten keine Unterschiede erkennbar (z.B. ist X_{Fe} stets 0.40). Berührungsparagenesen von Biotit und Granat zeigen bereits retrograden Eisen-Magnesium-Austausch.

Chlorit (ca. 1 Vol-%) tritt nur untergeordnet auf. Es lassen sich vier Chloritgenerationen aushalten: (i) vereinzelte winzige Chloriteinschlüsse in Granat und Staurolith, (ii) Chlorite um 0.5 mm Länge in der Matrix parallel zur Hauptschieferung, (iii) vereinzelte Querchlorite und (iv) radialblättriger Chlorit als Abbauprodukt von Staurolith (Abb. 5.10 e). Es sind somit auch noch Reste vom progradem und peakmetamorphem Chlorit erhalten. Bei den Chloriteinschlüssen der Generation 1 erbrachte nur ein Einschluß in Granat verwertbare Mikrosondenanalysen. Dieser Einschlußchlorit ist sehr eisenreich mit einem $X_{\text{Fe}} = 0.62 - 0.65$. Möglicherweise fand prograd eine kontinuierliche Reaktion statt, an der Chlorit und Granat beteiligt waren; dabei wurde der Chlorit magnesiumreicher und der Granat eisenreicher. Das korreliert mit dem zunehmenden Eisengehalt im Granat vom Kern zum Rand.

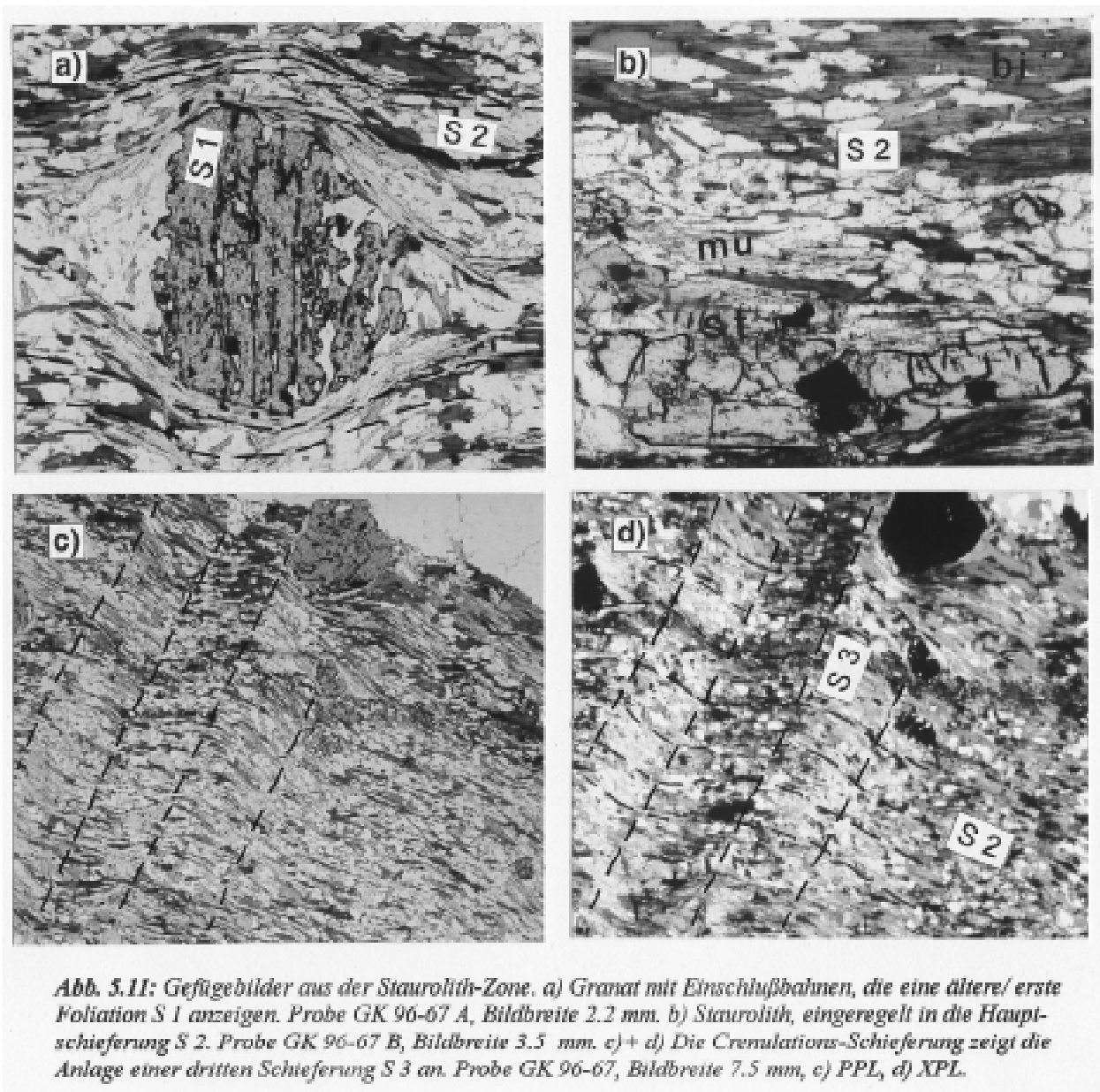
Der Matrix-Chlorit ist in der Hauptfoliation S 2 eingeregelt und unterscheidet sich chemisch nicht von den Staurolith-Abbauprodukten ($X_{\text{Fe}} = 0.39 - 0.40$). Die vereinzelt beobachteten dicktafeligen bis blättrigen Querchlorite sind maximal 0.7 mm groß und zeichnen die sich neu bildende dritte Foliation S 3 nach (Probe GK 96-67A).

Plagioklas (ca. 8 Vol-%) tritt als Einschluß in Granat und Staurolith sowie als granoblastisches Matrix-Mineral auf. Er ist bis 0.8 mm groß und selten verzwilligt. Es treten Oligoklase bis Andesine mit unterschiedlichen Zusammensetzungen auf:

- Plagioklaseinschlüsse im Granatkern: an₂₂,
- Plagioklaseinschlüsse zwischen Granatkern und Granatrand: an₂₅,
- Plagioklaseinschlüsse im Granatrand: an₃₁,
- Matrix-Plagioklase: an₂₅₋₃₃, dabei ist keine Zonierung vom Kern zum Rand erkennbar,
- Plagioklaseinschlüsse in Staurolith: an₃₄.

Die Mineralchemie von Plagioklas ist sehr komplex und weist auf Prozesse von Plagioklasabbau und Plagioklasneubildung während der Metamorphose hin. Beim Granatwachstum werden die Plagioklase die während der progressiven Metamorphose immer Ca-reicher werden, z.T. vollständig abgebaut und ihr Ca wird in Granat eingebaut. Es sind dann nur noch die Plagioklasreste als Einschlüsse in Granat erhalten. Modellrechnungen zeigen, daß während der Staurolithbildung u.a. Granat abgebaut und Plagioklas neu gebildet wird (Abb. 5.13 b); das frei werdende Ca aus dem Granat kann in den neu gebildeten Plagioklas eingebaut werden, welcher von Staurolith umwachsen wird. Das erklärt den höheren Anorthitgehalt der Plagioklaseinschlüsse in Staurolith.

Die bis zu 0.5 mm großen Quarze (ca. 15 Vol-%) treten meist in der Matrix auf und bilden ein granoblastisches Gefüge. Sie sind oft in Bahnen, lagig in der Hauptschieferung zwischen den Glimmern, eingeregelt. Außerdem sind Quarzeinschlüsse in Granat zu beobachten, die Einschlußbahnen bilden.



Als Akzessorien treten Ilmenit, Rutil, Apatit, Zirkon und Turmalin auf. Ilmenit und Rutil kommen sowohl als Einschlüsse in Granat und Staurolith als auch in der Matrix vor. In der Matrix sind sie miteinander verwachsen oder liegen nebeneinander vor. Die Zirkone bilden winzige Einschlüsse in Biotit.

Zusammenfassung Petrographie:

Die Granat-Staurolith-Glimmerschiefer (GK 96-67 und GK 97-105) aus der Staurolith-Zone zeigen eine deutliche Foliation, die vor allem durch Biotit und Muskovit definiert wird. Porphyroblastische und in Bezug auf die Matrix z.T. rotierte Staurolithe und Granate liegen in einer feinkörnigen granoblastischen und lepidoblastischen Matrix. Die Granate weisen ein gegenüber der Hauptschieferung deutlich verlegtes Interngefüge auf, was als eine reliktsche erste Schieferung angesehen wird. Die Staurolithe sind in die Hauptschieferung eingeregelt. Die Glimmer bilden eine Crenulations-Schieferung nach, die die Hauptschieferung überprägt (Abb. 5.11

a-d). Das läßt darauf schließen, daß der Granat während einer ersten Deformationsphase (D 1) zu wachsen begann, Staurolith während der Hauptdeformation (D 2) gebildet wurde und die Crenulation Ergebnis einer späteren Überprägung des Gesteines während einer dritten Deformationsphase ist.

Die prograde Entwicklung ist durch das gemeinsame Auftreten von

- Granatkern + Chlorit 1 + anorthitärmerer Plagioklas 1 + Biotit 1 + Quarz + Akzessorien

gekennzeichnet. Außerdem ist die Elementzonierung/Wachstumszonierung im Granat ein noch erhaltenes Merkmal der prograden Metamorphoseentwicklung (siehe dazu auch Abb. 5.13 a und Kapitel 5.2.2.).

Die peakmetamorphe Mineralparagenese ist durch das erste Auftreten von Staurolith charakterisiert und umfaßt

- Granatrand + Staurolith + Biotit 2 + anorthitreicherer Plagioklas 2 + Chlorit 2 + Quarz + Akzessorien

(siehe dazu auch Abb. 5.13 b und Kapitel 5.2.2.). Retrograd wird der Staurolith zu Chlorit abgebaut.

5.2.2. Druck-Temperatur-Entwicklung

Metamorphosehöhepunkt

Am Granat-Staurolith-Glimmerschiefer *Probe GK 96-67* wurden zur Ermittlung der Metamorphosebedingungen zuerst Druck-Temperatur-Abschätzungen mit konventionellen Geothermobarometern vorgenommen. Dabei wurden die folgenden peakmetamorphen Bedingungen ermittelt (Abb. 5.12):

- 7 - 8 kbar mit dem Geobarometer nach Hoisch (1990),
- 540 - 550 °C mit dem Granat-Biotit-Thermometer von Perchuk & Lavrent'eva (1983),
- 560 - 575 °C mit den Granat-Biotit-Thermometern von Bhattacharya et al. (1992) und Kleemann und Reinhard (1994),
- 560 - 575 °C mit dem Granat-Staurolith-Thermometer von Perchuk (1969) und Perchuk & Fedkin (1974).
- Die Mineralendgliederreaktionen nach Hoisch (1990, R 1 - R6 siehe Anhang E) zeigen Temperaturen bis ca. 590°C an.

Für die Berechnungen wurden die Granatrand-Analysen verwendet, die noch nicht retrograd modifiziert sind. Ein Teil der ehemaligen prograden Entwicklung, der äußerste Granatrand, ist jedoch nicht mehr vorhanden, da er bei der Staurolithbildung abgebaut wurde (siehe nächstes Kapitel). Die Geothermometrie erbringt also etwas zu niedrige Peaktemperaturen.

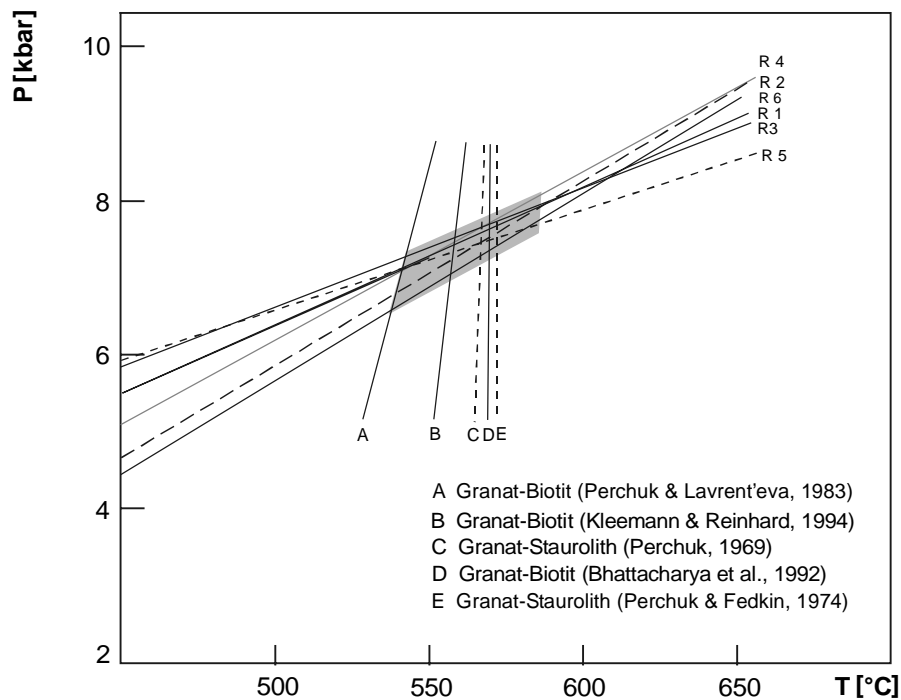


Abb. 5.12: Peakmetamorphe Bedingungen im Granat-Staurolith-Glimmerschiefer GK 96-67 aus der Staurolith-Zone (Pkt. 476 im westlichen Gomatum-Tal). Geobarometer nach Hoisch (1990) und Ergebnisse der Granat-Biotit- und Granat-Staurolith-Thermometrie. Die im Barometer nach Hoisch (1990) verwendeten Reaktionen R1 - R 6 sind in Anhang E aufgeführt.

Prograder Metamorphoseast

Für die Rekonstruktion der prograden Metamorphoseentwicklung wurden zuerst die Einschlußparagenesen Granat-Biotit, Granat-Chlorit und Granat-Ilmenit untersucht. Die Granat-Chlorit-Geothermometrie erbrachte keine geologisch sinnvollen Ergebnisse und die Mikrosondenanalysen von Biotiteinschlüssen in Granat sind für geothermometrische Berechnungen qualitativ zu schlecht. Für einen Ilmeniteinschluß im Granatkern wurde mit dem Granat-Ilmenit-Thermometrie nach Pownceby et al. (1987 a,b) eine Temperatur von 532 °C ermittelt. Diese wäre in etwa dem Beginn des Granatwachstum zuzuordnen. Die Temperaturangabe ist jedoch mit Vorsicht anzuwenden, da die Genauigkeit des Geothermometers von Pownceby et al. (1987 a,b) mit $\pm 30^\circ\text{C}$ angegeben wird.

Eine weitaus bessere Möglichkeit zur Rekonstruktion der prograden Metamorphoseentwicklung in der Staurolith-Zone ergibt sich durch die Nutzung des Elementzonierungsmusters in Granat. Aus Abb. 5.10 b) und 5.13 a) ist ersichtlich, daß der Granat aus Probe GK 96-67 eine ausgeprägte prograde Wachstumszonierung aufweist. Der Spessartingehalt zeigt die für eine Rayleigh-Franktionierung typische Glockenkurve und nimmt vom Kern zum Rand hin ab, der Almandin- und der Pyropgehalt dagegen nehmen vom Kern zum Rand hin zu (X_{Sp} : von 20 auf 4 Mol-%, X_{Alm} : von 59 auf 72 Mol-% und X_{Prp} : von 8 auf 14 Mol-%). Das gleichzeitig damit abnehmende Eisen-Magnesium-Verhältnis weist auf ein Granatwachstum unter Temperaturzunahme hin. Ganz am Granatrand zeigen die Elementverteilungsmuster, daß der Granatrand

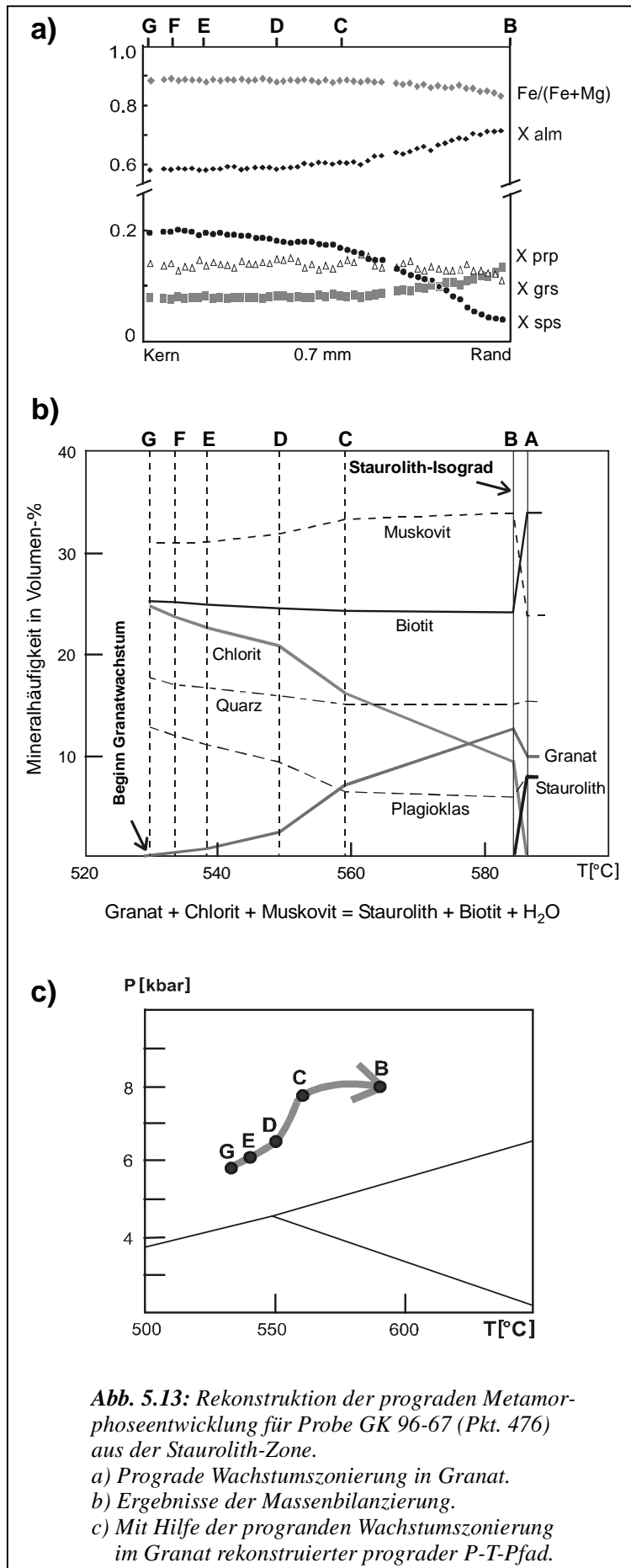


Abb. 5.13: Rekonstruktion der prograden Metamorphoseentwicklung für Probe GK 96-67 (Pkt. 476) aus der Staurolith-Zone.

- a) Prograde Wachstumszonierung in Granat.
- b) Ergebnisse der Massenbilanzierung.
- c) Mit Hilfe der prograden Wachstumszonierung im Granat rekonstruierter prograder P-T-Pfad.

bereits wieder abgebaut wurde, die prograde Wachstumszonierung ist also nicht mehr vollständig erhalten.

Unter Verwendung der prograden Wachstumszonierung in Granat wurde für die genannte Probe ein P-T-Pfadsegment der prograden Metamorphoseentwicklung mit Hilfe der Gibbs-Methode (Sear & Menart, 1989; Spear et al., 1991a) berechnet. Die Einbeziehung der Massenbilanzen in die Berechnung ergibt, welche Minerale während der prograden Metamorphose gebildet oder abgebaut wurden. Eine Beschreibung der Gibbs-Methode und der durchgeführten Berechnungen sowie die Dokumentation der Einzelergebnisse sind in Anhang E.4 nachzulesen.

Die Gefügebeziehungen und die Einschlußverhältnisse in Granat (aus dem Dünnschliff) ließen vermuten, daß während der progressiven Metamorphose eine staurolithfreie Paragenese (g + chl + bi + pl + q + Akzessorien) von der peakmetamorphen staurolithführenden Paragenese (g + st + chl-Reste + bi + pl + q + Akzessorien) abgelöst wurde. Daher wurde, ausgehend von den ermittelten peakmetamorphen Bedingungen, zuerst berechnet, wann sich der Staurolith gebildet hat und wie sich dabei die Massenbilanz, die Zusammensetzung der beteiligten Mineralphasen sowie Druck und Temperatur ändern.

Für den Ausgangspunkt A wurden 585 °C und 8 kbar sowie die in Tabelle E.2 aufgeführten Mineral-

zusammensetzungen und Modalgehalte vorgegeben. Es wurde ermittelt, daß der Staurolithgehalt von 8 Vol-% bereits bei minimal geringerer Temperatur Null wird. Der Druck ändert sich ebenfalls kaum. Die Massenbilanz der Mineralphasen ändert sich jedoch merklich (Abb. 5.13 b):

Startbedingungen:	→	Bedingungen bei Beginn des Staurolithwachstums
585 °C, 8 kbar	→	584.8 °C, ca. 8 kbar
Staurolith	8 Vol-%	→ 0 Vol-%
Chlorit	ca. 1 Vol-%	→ 10 Vol-%
Granat	10 Vol-%	→ 13 Vol-%
Muskovit	22 Vol-%	→ 35 Vol-%
Biotit	34 Vol-%	→ 24 Vol-%
Plagioklas	8 Vol-%	→ 6 Vol-%
Quarz	16 Vol-%	→ 15 Vol-%
H ₂ O	2 Vol-%	→ 1.6 Vol-%.

Die Zusammensetzung der beteiligten Mineralphasen ändert sich dabei unbedeutend (siehe Tabelle E.2 von Punkt A zu Punkt B).

Das bedeutet, daß sich der Staurolith bei äußerst geringen Druck- und Temperaturänderungen auf Kosten von Chlorit, Granat und Muskovit gebildet hat. Das läßt sich durch die Reaktion



ausdrücken. Der bei dieser Reaktion stattfindende Granatabbau erklärt damit auch das randliche Elementzonierungsmuster im Granat.

Unter Verwendung der ermittelten Bedingungen zum Beginn des Staurolithwachstums (P, T, Mineralzusammensetzungen und Massenbilanz), dem prograden Granatrand (Punkt B) sowie der Wachstumszonierung in Granat wurde von Punkt B (prograder Granatrand) zu Punkt G (Granatkern) das folgende prograde P-T-Pfadsegment berechnet (Abb. 5.13 a + c):

Punkt **B**: 8 kbar, 584.8 °C (Ausgangspunkt),

Punkt **C**: 7.8 kbar, 559 °C,

Punkt **D**: 6.6 kbar, 550 °C,

Punkt **E**: 6.1 kbar, 537 °C,

Punkt **F**: 6.0 kbar, 534 °C und

Punkt **G**: 5.9 kbar, 532 °C.

Die Abb. 5.13 b) zeigt, wie sich dabei die Massenbilanzen ändern.

Die so ermittelte prograde Metamorphoseentwicklung läßt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 5.13 a - c):

- der Granat begann bei etwa 530 °C und 6 kbar zu wachsen,
- das Granatwachstum erfolgte unter deutlicher Druck- und Temperaturzunahme auf Kosten von Chlorit und Plagioklas,

- Staurolith wurde bei extrem geringen Druck- und Temperaturänderungen durch Granatabbau, Chloritzerfall und auf Kosten von Muskovit gebildet,
- während der Staurolithbildung wurde auch eine neue Biotit- und Plagioklasgeneration gebildet,
- aus dem Dünnschliff ist ersichtlich, daß bei der prograden Entwicklung noch nicht aller Chlorit aufgebraucht wurde, es sind noch Chloritreste vorhanden.

P-T-Pfad: P-T-Pseudoschnitt

Als Beispiel für die Staurolith-Zone wurde ein P-T-Pseudoschnitt für den Granat-Staurolith-Glimmerschiefer GK 96-67 berechnet. Dieser Pseudoschnitt soll ermöglichen, neben dem prograden Metamorphoseast weitere Segmente des P-T-Pfades zu rekonstruieren, die das Gestein während seiner tektono-metamorphen Entwicklung durchlaufen hat. Die Grundlage für diesen Schnitt bildete das petrogenetische Netz für das erweiterte metapelitische Modellsystem KMnFMASH von Will (1998a) (Abb. E.4, Anhang E). Die Berechnung erfolgte für die normalisierte Gesamtgesteinsgeochemie $K_2O : MnO : FeO : MgO : Al_2O_3 = 13.00 : 1.23 : 24.05 : 21.62 : 40.10$ [Mol-%, normiert auf 100] und für eine Wasseraktivität von $a_{H_2O} = 1.0$. Der in Abb. 5.14 dargestellte P-T-Pseudoschnitt zeigt die univarianten Reaktionen sowie divarianten-, trivarianten- und quadrivarianten Mineralstabilitätsfelder, die vom Gestein der genannten Zusammensetzung während der Metamorphose „gesehen“ werden können. Für das Stabilitätsfeld der Mineralparagenese $g + chl + bi + q + mu + H_2O$ sind zusätzlich die berechneten $Mn/(Mn+Fe+Mg)$ - und $Fe/(Fe+Mn+Mg)$ -Isoplethen im Granat angegeben.

Aus der Verbindung der bisher gewonnenen Ergebnisse zur Metamorphoseentwicklung, den Beobachtungen im Dünnschliff sowie der prograden Wachstumszonierung im Granat mit dem P-T-Pseudoschnitt ergibt sich das folgende (Abb. 5.14). Die mit der Gibbs-Methode rekonstruierte prograde Metamorphoseentwicklung sowie die Einschlußverhältnisse im Dünnschliff zeigen, daß während der prograden Entwicklung zunächst die Mineralparagenese $g + bi + chl + q + mu + H_2O$ und dann, zum Höhepunkt der Metamorphose, die Mineralparagenese $g + st + bi + chl + q + mu + H_2O$ (Punkt III) stabil waren. Der Granat zeigt eine prograde Wachstumszonierung von $Mn/(Mn+Fe+Mg) = 0.23$ und $Fe/(Fe+Mn+Mg) = 0.68$ im Kern sowie $Mn/(Mn+Fe+Mg) = 0.04$ und $Fe/(Fe+Mn+Mg) = 0.80$ im Rand, zur Druckabschätzung wurden die konventionellen Geobarometrie und die Ergebnisse der Gibbs-Methode genutzt. Das ergibt die prograde Metamorphoseentwicklung von Punkt I zu Punkt II. Disthen, Sillimanit, Andalusit oder Cordierit wurden nicht beobachtet und die Reaktion

Chlorit + Staurolith = Biotit + Granat + Disthen + H_2O (KMnFMASH, unterhalb der Singularität)
bzw.

Chlorit + Staurolith + Granat = Biotit + Disthen + H_2O (KMnFMASH, oberhalb der Singularität)
oder

Chlorit + Staurolith = Biotit + Disthen + H_2O (System KFMASH)

wurde noch nicht überschritten (siehe dazu auch Abb. E.4; Spear, 1993, S. 356 sowie Will, 1998a, S. 114). Retrograd wird der Staurolith wieder zu Chlorit abgebaut, die retrograde Metamorphoseentwicklung bleibt im $g + bi + chl + q + mu + H_2O$ -Stabilitätsfeld (Punkt IV).

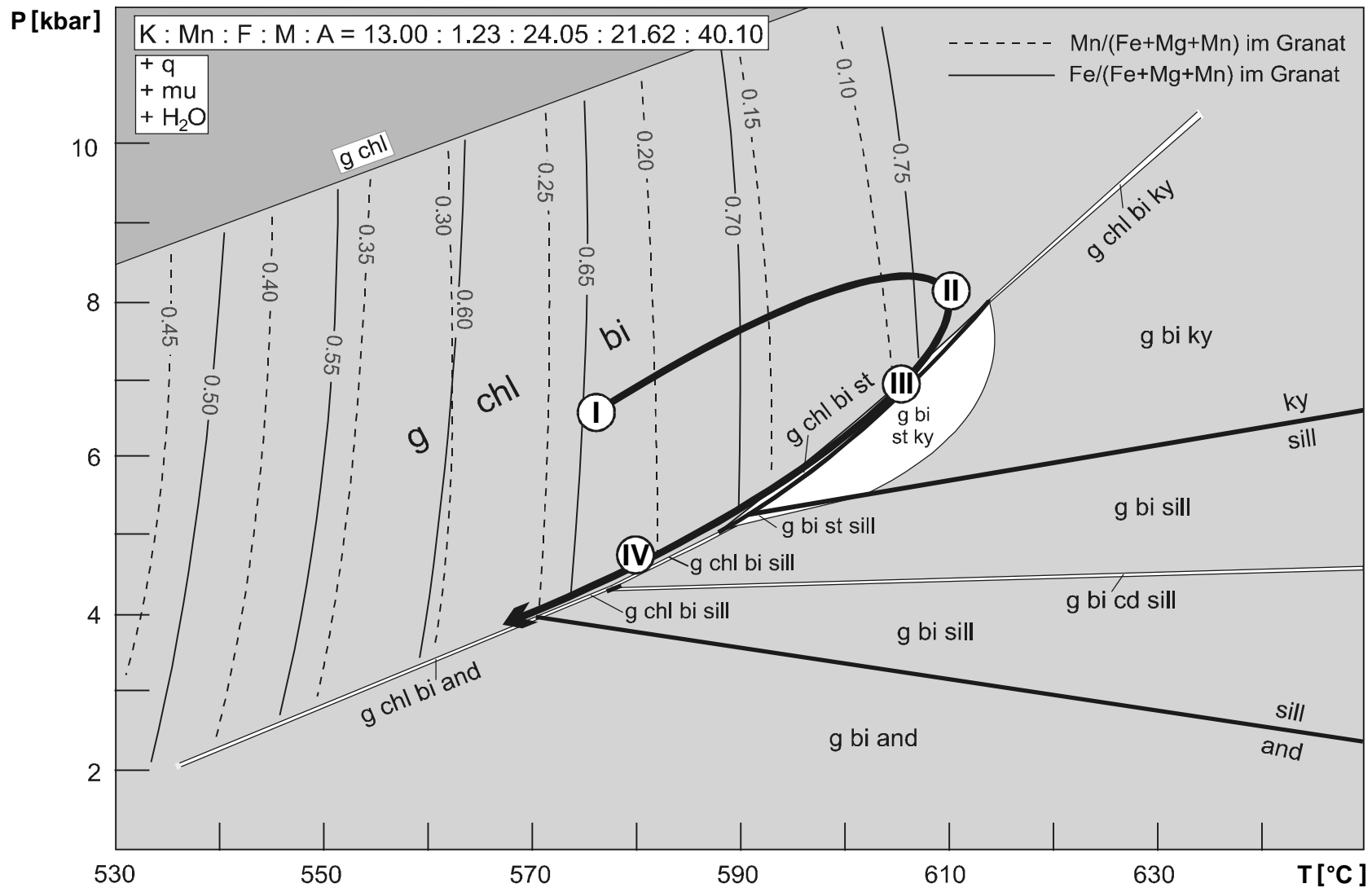


Abb. 5.14: P-T-Pseudoschnitt für den Granat-Staurolith-Glimmerschiefer GK 96-67 aus der Staurolith-Zone. Der Pseudoschnitt wurde im erweiterten metapelitischen Modellsystem KMnFMASH für die oben links angegebene normalisierte Gesamtgesteinschemie berechnet. Dicke Linien: univariante Reaktionen, in weiß: divariante Felder, in hellgrau: trivariante Felder, in dunkelgrau: quadrivariante Felder. Quarz, Muskovit und Wasser sind im Überschuß. Für das trivariante Feld $g+chl+bi+q+mu+H_2O$ sind die Granat-Isoplethen für $Mn/(Mn+Fe+Mg)$ sowie $Fe/(Fe+Mn+Mg)$ angegeben. Erläuterungen im Text.

5.2.3. Zusammenfassung Staurolith-Zone

Die Staurolith-Zone liegt im zentralen Kaokogürtel. Sie ist nur sehr schmal und erstreckt sich über eine Breite von ca. 700 - 800 m von 13°07,83 E bis 13°07,48 E im westlichen Gomatum-Tal.

Die für die Staurolith-Zone charakteristischen Minerale sind:

- Granat + Staurolith + Biotit + Chlorit + Muskovit + Plagioklas + Quarz + Akzessorien.

Die Granat-Staurolith-Glimmerschiefer zeigen eine ausgeprägte Hauptschieferung (D 2 nach Dingeldey, 1997), die vor allem durch die Glimmer definiert wird. Synkinematisch gewachsene Granatporphyroblasten sind rotiert und besitzen ein gegenüber der Hauptfoliation verlegtes Interngefüge. Die Granate sind wahrscheinlich während einer früheren Deformationsphase gewachsen (D 1) und haben dabei die Einschlußbahnen, die das Interngefüge definieren, überwachsen. Die Staurolithe sind z.T. deutlich in die Hauptschieferung eingeregelt und wurden während der Hauptdeformationsphase D 2 gebildet. Die Glimmer zeichnen außerdem eine Crenulations-Schieferung nach, die die Hauptschieferung überprägt und die Anlage einer weiteren Foliation, angelegt während einer duktilen Deformation D 3, dokumentiert. Die Fragmentierung von ausgeprägten Staurolithen läßt eine spätere spröde Deformation D 4 vermuten.

Die ursprüngliche sedimentäre Schichtung ist auch in der Staurolith-Zone durch den unterschiedlichen Stoffbestand der Metasedimente noch gut erkennbar.

Für die Metamorphoseentwicklung wurde ein Druck-Temperatur-(Deformations)-Pfad in Uhrzeigerichtung rekonstruiert (Abb. 5.15). Die peakmetamorphen Bedingungen liegen bei 7-8 kbar und 550 - 610°C (580 ± 30°C). Während der prograden Metamorphose kam es zu einem gleichzeitigen Druck- und Temperaturanstieg, gefolgt von einer Heraushebung durch Druckentlastung während des Temperaturhöhepunktes und einer etwa gleichmäßigen weiteren Heraushebung unter Abkühlung (Druck- und Temperaturabnahme). Eine zeitliche Eingrenzung der Deformations- und Metamorphosestadien konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden.

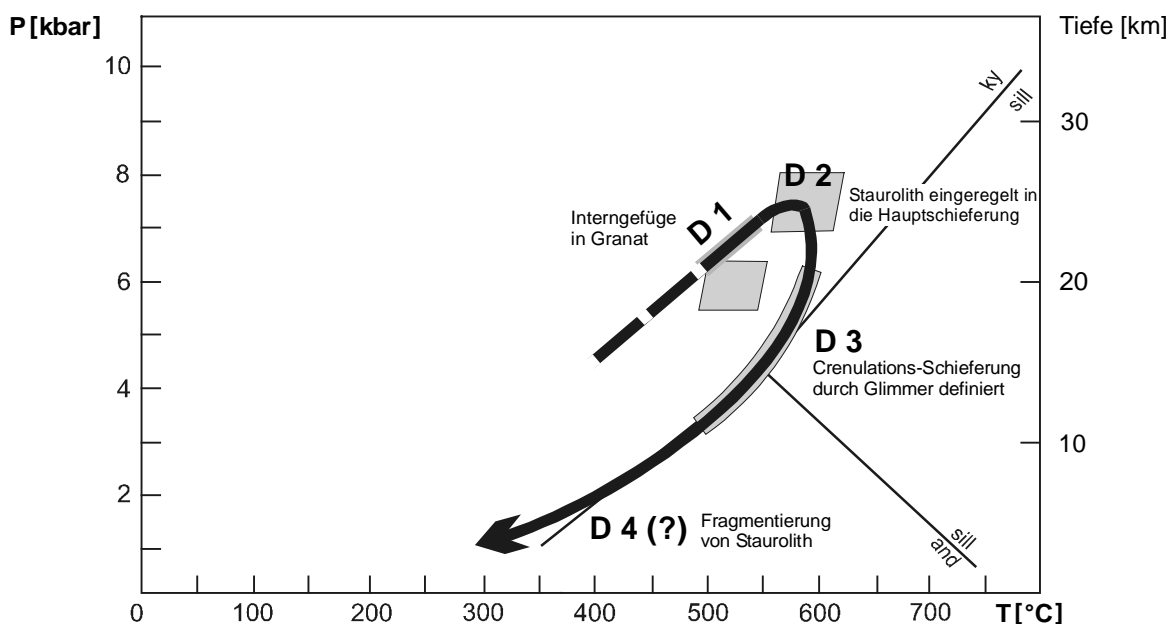


Abb. 5.15: P-T-Pfad für die Staurolith-Zone im zentralen Kaokogürtel. Zusammenfassung der Ergebnisse aus der konventionellen Geothermobarometrie (Peakmetamorphose) sowie der Nutzung von phasenpetrologischen Methoden für die Rekonstruktion des prograden und retrograden Metamorphoseastes sowie des Metamorphosehöhepunktes in Verbindung mit den Gefügemerkmalen im Dünnsschliff.