

Niedrigst- bis niedriggradige Metamorphose im südlichen Grazer Paläozoikum (Ostalpen)

BARBARA RUSSEGGER*)

4 Abbildungen

Österreichische Karte 1 : 50 000
Blätter 162, 163, 164

*Steiermark
Grazer Paläozoikum
Vitrinitreflexion
Illitkristallinität
Conodont-Color-Alteration*

Inhalt

Zusammenfassung	93
Abstract	93
1. Einleitung	94
2. Geologie des Arbeitsgebietes	95
3. Methodik	95
4. Ergebnisse	96
4.1. Untersuchungen der organischen Substanz	96
4.2. Tonmineralogische Untersuchungen	96
4.3. Conodont-Alteration-Index (CAI)	97
5. Metamorphosegeschichte	98
6. Schlußfolgerungen	99
Dank	99
Literatur	99

Zusammenfassung

Die metamorphe Überprägung im südlichen Grazer Paläozoikum wurde erstmals mit Hilfe von kohlenpetrologischen und tonmineralogischen Methoden untersucht.

Trendflächenkarten für die Vitrinitreflexion und die Illitkristallinität zeigen eine Zunahme der Inkohlung von Süden nach Norden und eine Zunahme der Illitkristallinität von Westen nach Osten. Die CAI-Daten lassen keinen Trend erkennen.

Die Synthese der Untersuchungsergebnisse führt zu folgender Metamorphosegeschichte:

- Die altpaläozoische, unterkretazische Deckentektonik im Grazer Paläozoikum beeinflusst als synmetamorphes Ereignis die Illitkristallinität, wobei Temperaturen von 250°C in der Rannachdecke (hohe Deckengruppe) nicht überschritten wurden.
- Extrem erhöhter Wärmefluß im Zuge der oberkretazischen Extensionstektonik waren für die Inkohlung und den Graphitisierungsbeginn der organischen Partikel verantwortlich.
- Die hohen und stark streuenden CAI-Werte in der Rannachdecke werden durch hydrothermale Aktivität im Zusammenhang mit der Deckentektonik und/oder Extensionstektonik im Grazer Paläozoikum erklärt.

Very Low-Grade to Low-Grade Metamorphism in the Southern Part of the Graz Paleozoic (Eastern Alps)

Abstract

For the first time the southern area of the Graz Paleozoic was investigated with tools of coal petrology and clay mineralogy in order to estimate the metamorphic conditions. Trend surface maps for vitrinite reflectance and illite crystallinity display a north to south decrease of the coalification and a west to east increase of the illite crystallinity. The CAI-values show a scattering pattern.

The synthesis of this observations indicates the following metamorphic succession within the southern part of the Graz Paleozoic:

- Lower Cretaceous nappe tectonics in the Graz Paleozoic influenced the increase of the illite crystallinity as a synmetamorphic event.
- Extreme enhanced heat flow related to the Upper Cretaceous extensional tectonics was responsible for coalification and graphitisation of the organic matter.
- The anomalous high and scattering CAI-values in the Rannach Nappe are interpreted as a result of hydrothermal activity related to the extensional or/and compressional tectonics in the Graz Paleozoic.

*) Anschrift der Verfasserin: Barbara RUSSEGGER, Institut für Geowissenschaften, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben.

1. Einleitung

Die Anwendung kohlenpetrologischer und tonmineralogischer Methoden zur Erfassung geothermaler Probleme in schwach metamorphen Terrains hat in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt an Bedeutung gewonnen (STACH et al., 1972; KISCH, 1983; FREY, 1987; ROBERT, 1988). Dabei findet vor allem die kombinierte Anwendung mehrerer Methoden Beachtung (FREY, 1986).

Innerhalb des Paläozoikums der Ostalpen wurde die Methode der Illitkristallinitäts-Bestimmung auf Gebiete der Grauwackenzone (SCHRAMM, 1977; KRALIK et al., 1987; LENGAUER & SCHRAMM, 1989), des Gurktaler Deckensystems (SCHRAMM et al., 1982; v. GOSEN et al., 1987) und der Karawanken (LÖSCHKE & WEBER, 1973) angewandt.

Eine kombinierte Anwendung mehrerer Methoden (Illitkristallinität, Reflexionsmessungen an Organoklasten, Conodont-Alteration-Index, Indexminerale) findet sich in HASENHÜTTL & RUSSEGER (1992) und RANTITSCH (1992).

In den genannten Arbeiten wurden die ersten Ergebnisse einer großräumigen Untersuchung der Paläozoika des

Grazer Paläozoikums sowie der Karnischen Alpen vorgestellt.

Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse der Metamorphoseuntersuchungen im südlichen Teil des Grazer Paläozoikums.

Ziel der Untersuchung war es, die vermutete anchi- bis epimetamorphe Prägung der Sedimente und Vulkanite des Grazer Paläozoikums (NEUBAUER, 1981, 1982, 1989; THALHAMMER, 1982; NEUBAUER et al., 1986; BECKER et al., 1987; FRITZ et al., 1991) mit Hilfe von Inkohlungsuntersuchungen an Organoklasten (speziell an Vitriniten), Illitkristallinitäts-Bestimmungen, dem Conodont-Alteration-Index (CAI) und den temperaturkritischen Tonmineralen erstmalig detailliert zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden Metamorphosekarten erstellt und Korrelationsversuche zwischen den Parametern der organischen bzw. anorganischen Metamorphose unternommen.

Sämtliche Untersuchungsergebnisse wurden einem Metamorphoseablauf zugeordnet.

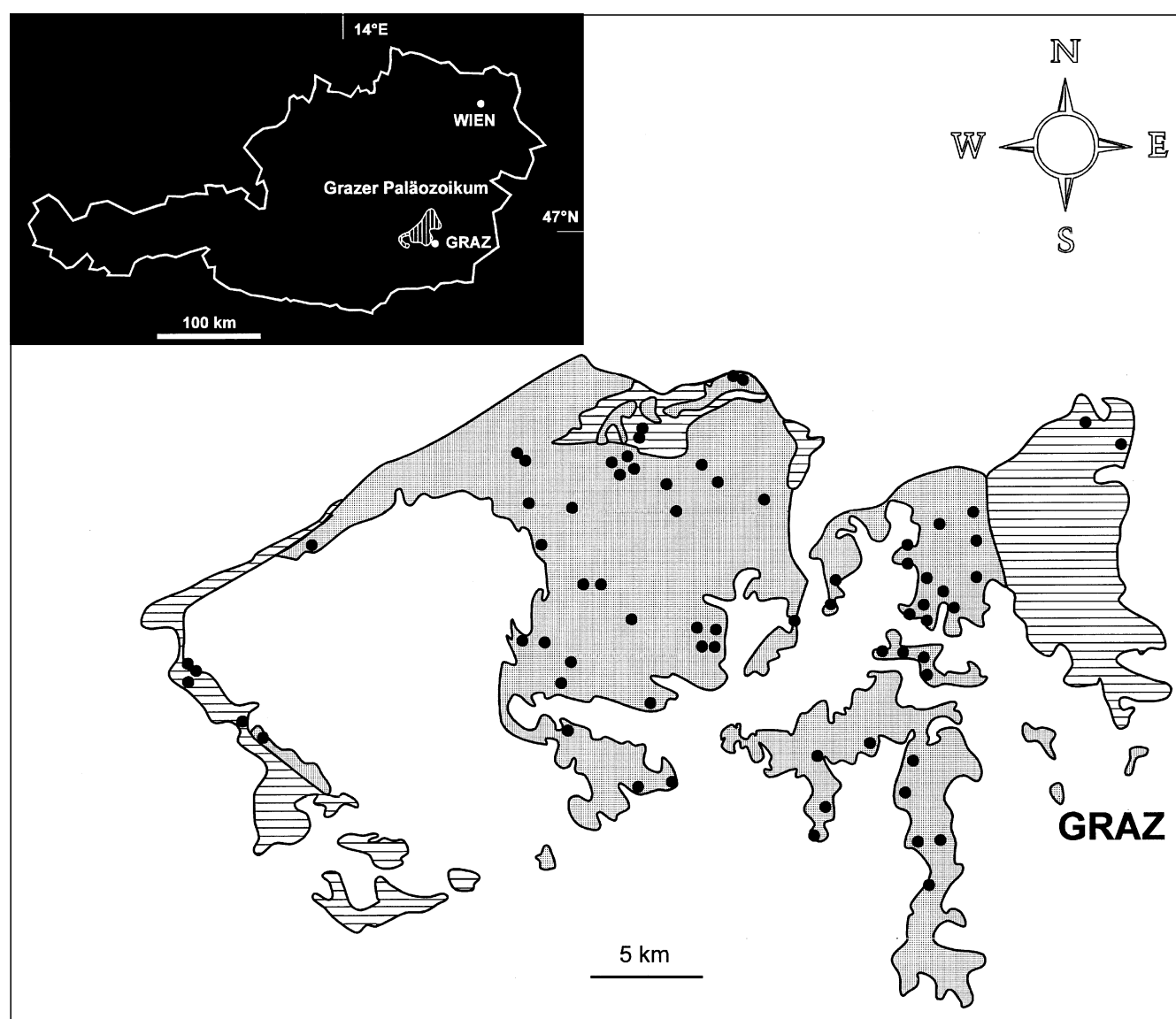


Abb. 1. Untersuchungsgebiet und Lage der Probenpunkte. Schattierte Fläche = Rannachdecke (hohe Decke) und Teile der Kalkschieferdecken (mittlere Deckengruppe); schraffierte Fläche = Schöckldecke (tiefe Decke).

2. Geologie des Arbeitsgebietes

Die Metasedimente und Metavulkanite des Grazer Paläozoikums, als Teil des oberostalpinen Deckenstapels, werden im Westen, Norden und Osten von ostalpinen Basementeinheiten (Kor-, Stub-, Gleinalm-, Radegunder und Raabalpen Kristallin) unterlagert, im Süden von tertiären Sedimenten des Steirischen Beckens überlagert. Auf dem Grazer Paläozoikum liegen diskordant die Kreidesedimente der Kainacher Gosau.

Die stratigraphische Reichweite des Grazer Paläozoikums umfaßt generell Obersilur bis Oberkarbon, stellenweise Untersilur bis Karbon (FLÜGEL & NEUBAUER, 1984 cum lit.).

FRITZ & NEUBAUER (1990) untergliedern das Grazer Paläozoikum in eine tiefe, mittlere und hohe Deckengruppe, wobei die E-W gerichtete Deckenstapelung altalpidisch (Unterkreide) erfolgte. Diese Kompressionstektonik wird von intra- bis postgosauischer Extensionstektonik abgelöst, die sich in NE-SW streichenden Scherzonen und duktilen Abschiebungszonen an der Basis des Grazer Paläozoikums ausdrückt (FRITZ et al., 1991 cum lit.; NEUBAUER et al., 1995).

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit ist der südliche Teil des Grazer Paläozoikums. Die Nordgrenze des betrachteten Raumes bildet die Linie Übelbach, Murtal, Rötischgraben. Das Gebiet umfaßt die gesamte Rannachdecke (hohe Deckengruppe), Teile der Schöckldecke (tiefe Deckengruppe) und Teile der sog. Kalkschieferdecken (mittlere Deckengruppe, s. Abb. 1).

Insgesamt wurden 153 Einzelproben aus Oberflächenaufschlüssen aufgesammelt, wobei auf eine flächendeckende Verteilung der Probenpunkte Wert gelegt wurde. Beprobte wurden in der Hauptsache dunkelblaue bis schwarze Kalkschiefer und Kalke, daneben auch die im Arbeitsgebiet sehr seltenen karbonatfreien Schwarzschiefer.

Die Gesteinsproben stammen aus sämtlichen stratigraphischen Niveaus der Rannachdecke und aus Bereichen innerhalb der Schöckldecke und der Kalkschieferdecken (s. Abb. 1).

3. Methodik

Inkohlungsuntersuchungen und Untersuchungen an Tonmineralen sind dazu geeignet den Metamorphosegrad feinklastischer Gesteine im Bereich niedrigst- bis niedriggradiger Metamorphose (very low- to low-grade metamorphism, s. WINKLER, 1979), zu bestimmen. Nach FREY (1986) umfaßt die niedrigstgradige Metamorphose den Metamorphosebereich zwischen Diagenese und Grünschieferfazies mit Temperaturen von ungefähr 200–250°C bis 350–400°C.

Der Begriff der „Anchizone“ (oder „-metamorphose“) für diesen Übergangsbereich ist im engeren Sinne ausschließlich im Zusammenhang mit Illitkristallinitätswerten zu verwenden. Um Korrelationen zwischen verschiedenen Methoden zu erreichen, wird dies jedoch oft umgangen und „anchizonal“ (oder „-metamorph“) nicht mehr methodenabhängig verwendet (vgl. TEICHMÜLLER et al., 1979).

In den bearbeitenden Gesteinen liegt das organische Material dispers im Sediment vor. Die Inkohlung der organischen Substanz wurde mit Hilfe von Reflexionsmessungen an Vitriniten, einem Maceraltyp der Kohle, ermittelt.

Da das Reflexionsvermögen der Vitrinite neben einer Reflexionszunahme mit zunehmender Inkohlung auch von der Schnittlage der betrachteten Partikel abhängt (sog.

Reflexionsanisotropie) wurden Gesamtgesteinspräparate senkrecht zur Schichtung bzw. Schieferung angefertigt, um an diesen die maximale und minimale Reflexion erfassen zu können ($\% R_{\max}$ und $\% R_{\min}$).

Die in Kunstharz eingegossenen und mehrstufig polierten Gesteinsklötzchen wurden mit einem LEITZ MPV3 Photometer unter Verwendung eines 125-fach vergrößernden Ölimmersionsobjektives (Gesamtvergrößerung: ca. 1625-fach) im polarisierten, monochromatischen Licht ($\lambda = 546 \text{ nm}$) gemessen. Zur Eichung diente ein SiC-Standard (7,47 % R/Öl).

Die Inkohlungsstadien werden in zwei unterschiedlichen Normen angegeben, der deutschen DIN und der nordamerikanischen ASTM (s. STACH et al., 1982). In vorliegender Arbeit wird die Bezeichnung „Semigraphit“ nach DIN und „Metaanthrazit“ gemäß der ASTM-Klassifikation verwendet.

Die Illitkristallinität wurde mit Hilfe des sog. KÜBLER-Indexes (KÜBLER, 1967, 1968) bestimmt, der die Kristallinität des Illits als die gemessene Halbhöhenbreite (oder Halbwertsbreite) des ersten Illit-Basisreflexes (bei 10 Å) definiert. Dabei wird die Halbwertsbreite als Maß für den Ordnungsgrad des Illitgitters verwendet, wobei bei abnehmender Halbwertsbreite die Kristallinität der Illite zunimmt.

Die Gesteinsproben wurden händisch oder in einer Achatmühle (max. 30 sec.) zerkleinert und mit 20 %iger Ameisensäure entkarbonatisiert. Aus der neutralisierten Probe wurde mittels Atterbergverfahren die $<2\mu\text{m}$ Fraktion gewonnen und daraus Sedimentationspräparate mit definierter Dicke (1 mg/cm²) hergestellt. Jede Probe wurde unabhängig von ihrer Lithologie mit der gleichen Aufbereitungstechnik behandelt.

Nach Bestimmung des Tonmineralspektrums wurden die Sedimentationsblättchen mindestens fünfmal von 5° bis 11° 2 θ mit einem Siemens D500 Röntgendiffraktometer unter folgenden Aufnahmebedingungen gemessen:

Cu-Röhre, K α -Strahlung, Ni-Filter;
30 kV, 20 mA;
1/4° Aperturblende, 0,2° Detektorblende;
0,6°/min Goniometervortrieb;
Time Constant = 1 sec.;
step size: 0,01.

Als Standard diente der MF 1046–1 Standard von M. FREY. Die Probenaufbereitung und die Aufnahmebedingungen stimmen mit den von KISCH (1991) vorgeschlagenen überein.

KÜBLER et al. (1979) setzen die Grenze Diagenese/Anchimetamorphose bei 0,42° $\Delta 2\theta$ die Grenze Anchi-/Epizone bei 0,25° $\Delta 2\theta$. Diese Werte werden in vorliegender Arbeit übernommen.

Parallel zur Illitkristallinität wurde die Halbwertsbreite des (001) Chloritpeaks bei 14 Å gemessen (ARKAI, 1991). Als Standard diente hier ebenfalls MF 1046–1.

Die CAI-Bestimmungen basieren auf Farbänderungen von Conodontenfragmenten in Abhängigkeit ihrer postmortalen Geschichte (EPSTEIN et al., 1977; REJEBIAN et al., 1987; HARRIS et al., 1990).

Die Farbänderung verläuft von milchig weiß (CAI 1) nach gelbbraun, braun bis schwarz (CAI 5), grau bis zu durchsichtig kristallklar (CAI 8).

Die CAI-Untersuchungen wurden an Conodonten aus der Sammlung des Instituts für Geologie und Paläontologie der Universität Graz durchgeführt.

4. Ergebnisse

4.1. Untersuchungen der organischen Substanz

Die Gesteine des untersuchten Gebietes sind phyto-klastenarm. Die im Detail bearbeitete Rannachdecke, die hauptsächlich von Dolomiten und Kalken aufgebaut wird, zeigt eine geringe Phytoklastenführung. Nur 45 % aller bearbeiteten Proben waren für eine Reflexionsbestimmung brauchbar (70 Proben).

Der Inkohlungsbereich der Proben aus der Rannachdecke liegt zwischen 1,85–9,34 % R_{max} , das entspricht einer Maturität der organischen Substanz vom höheren Steinkohlestadium („low volatile bituminous coal“) bis zum Metaanthrazit bzw. Semigraphit. Das Inkohlungsspektrum der Schöckldecke liegt bei 3,74–8,47 % R_{max} (Anthrazit bis Metaanthrazit bzw. Semigraphit).

Die Inkohlung im Grenzbereich Kalkschieferdecken/Rannachdecke beträgt 6,8 % R_{max} (Metaanthrazit bzw. Semigraphit). Sowohl die höchsten als auch die niedrigsten Inkohlungswerte des Arbeitsgebietes findet man innerhalb der Rannachdecke. Es ist in allen drei Decken keine Abhängigkeit der Inkohlung vom Gesteinsalter ersichtlich. Das regionale Inkohlungsbild zeigt einen eindeutigen N-S-Trend, eine Zunahme der Inkohlung nach Norden.

Dieser Trend wird durch die Trendfläche 4. Grades ($r = 0,84$) dargestellt (Abb. 2).

Neben den eigentlichen homogenen, kohligten Partikeln, zu denen Vitrinit zählt, der sich als einziger für solche Inkohlungsgradbestimmungen eignet, findet man im untersuchten Gebiet sogenannte „koxige und graphitoide Übergangspartikel“ (DIESEL & OFFLER, 1975; DIESEL et al., 1978; OKYAMA-KUSUNOSE & ITAYA, 1987; HASENHÜTTL & RUSSEGGER, 1992; RUSSEGGER, 1992; RANTITSCH, 1995), die den Graphitisierungsbeginn anzeigen.

Die organischen Übergangspartikel treten im Untersuchungsgebiet ausschließlich nördlich der Linie Stiwill, St. Oswald, Plankenwarth, Unterthal, Kollerkogel/ Feliferhof auf (ident mit der 5 % Isoreflextlinie in Abb. 2). Sie sind entweder zusätzlich zu den kohligten Partikeln anzutreffen oder ersetzen diese vollständig.

4.2. Tonmineralogische Untersuchungen

An beinahe allen Proben konnte die Illitkristallinität (IK) gemessen werden. Die Ursachen für eine Nichtbestimmung der IK lagen entweder an zu schwachen Intensitäten des 10 Å Glimmerpeaks oder an einer unzureichenden Menge der Tonfraktion.

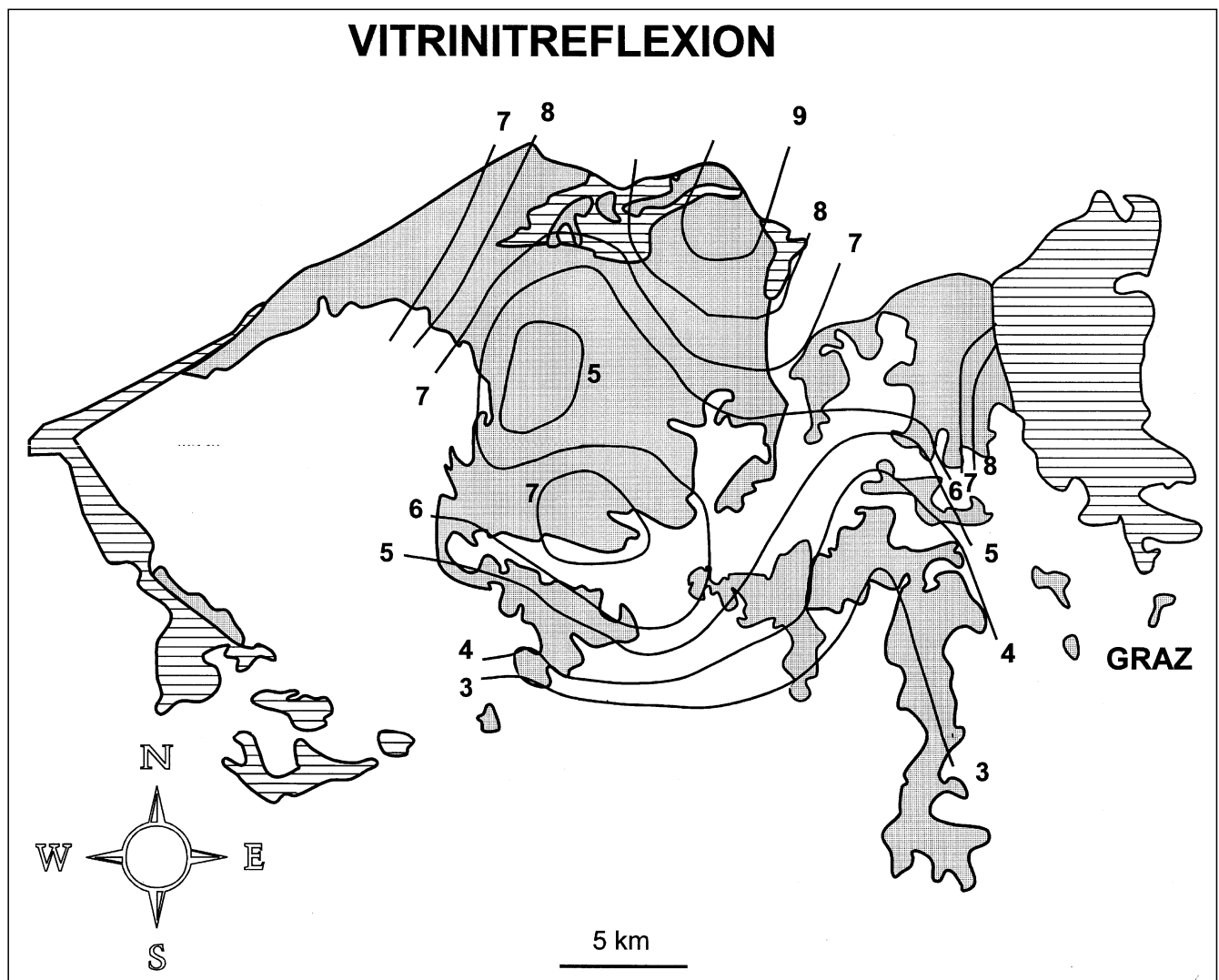


Abb. 2. Trendflächenkarte (4. Grades) für die Vitrinitreflexion ($r = 0,84$). Die Vitrinitreflexion ist in % R_{max} , der maximalen Reflexion im einfach polarisiertem Licht, angegeben. Die Isoreflextlinien zeigen eine Zunahme der Inkohlung nach Norden.

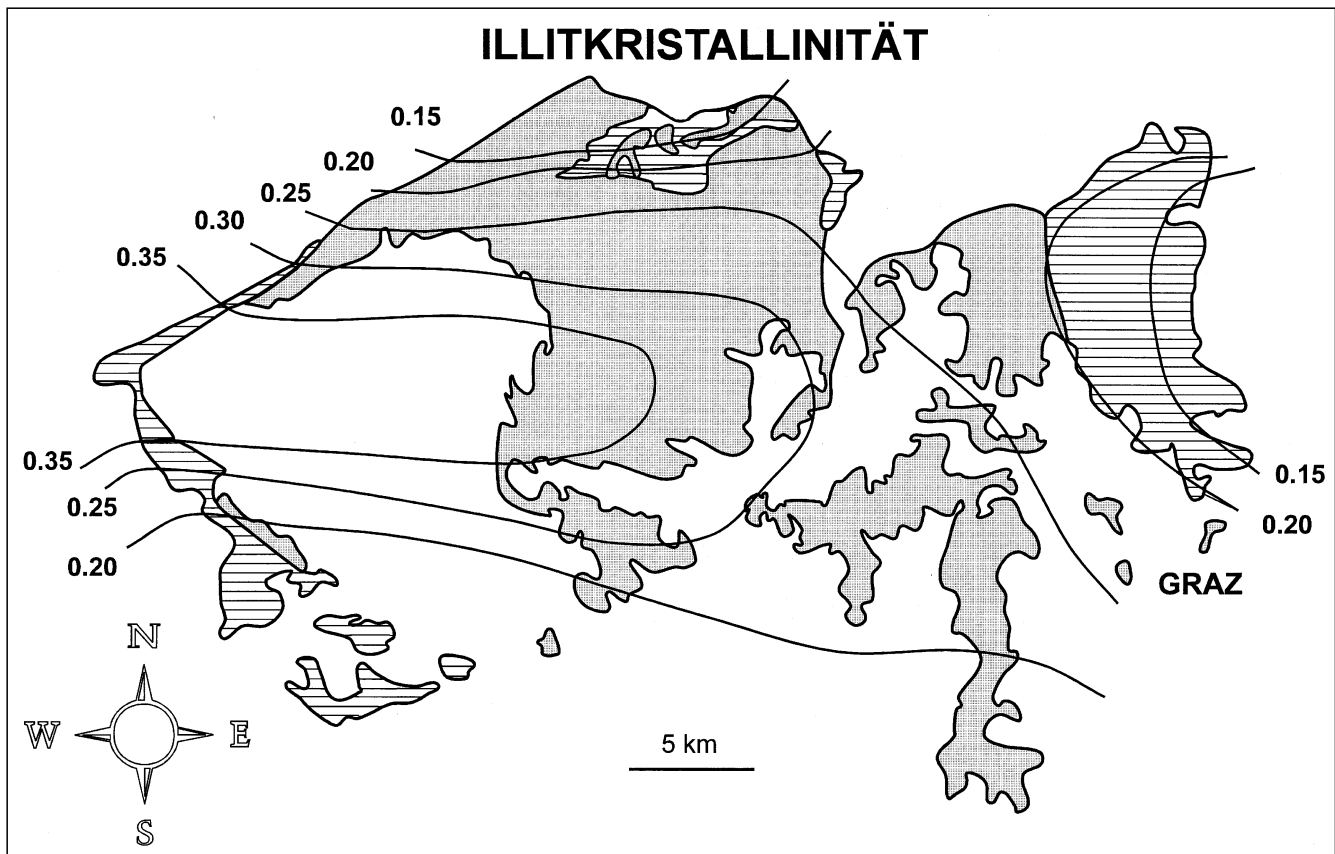


Abb. 3.
Trendflächenkarte (3. Grades) für die Illitkristallinität ($r = 0,66$).
Die Illitkristallinität ist in $\Delta 2\theta$ angegeben. Die Isocrystlinien verlaufen parallel mit den Deckengrenzen und zeigen eine Zunahme der Kristallinität des Illits nach Osten.

Der IK-Bereich der paläozoischen Proben liegt zwischen $0,64-0,13^\circ \Delta 2\theta$. Nach KÜBLER et al. (1979) sind demnach diagenetische bis epizonale Metamorphosebedingungen nachgewiesen.

Innerhalb der Rannachdecke wurden die höchsten und die niedrigsten IK-Daten gemessen. Es ist in allen Decken keine Abhängigkeit der Illitkristallinität vom Gesteinsalter zu erkennen.

Analog zur Inkohlung wurden Trendflächenkarten zur objektiven Darstellung der IK-Verhältnisse berechnet. Die Trendfläche 3. Grades aller paläozoischen Proben (s. Abb. 3, $r = 0,66$) zeigt einen W-E-Trend, eine Zunahme der Kristallinität (und damit der Metamorphose) nach Osten. Zusätzlich zeichnet der Verlauf der $0,20^\circ \Delta 2\theta$ Isocrystlinie im E und im N der Rannachdecke die Deckengrenze zur Schöckldecke ab.

Die Schöckldecke zeigt durchwegs epizonale Metamorphosebedingungen mit Illitkristallinitäten unter $0,20^\circ \Delta 2\theta$. Die Gesteine der Rannachdecke östlich der Mur und in den nördlichen Anteilen zeigen, mit Illitkristallinitäten zwischen $0,25-0,20^\circ \Delta 2\theta$, die beginnende Epizone. Der Großteil der Rannachdecke ist jedoch anchizonal überprägt, mit einer nach Westen hin abnehmenden Metamorphose.

Die an 41 Proben zusätzlich gemessene Kristallinität des Chlorits zeigt eine Korrelation mit den korrespondierenden IK-Werten ($r = 0,83$; RUSSEGER, 1992). Alle untersuchten Chlorite sind trioktaedrisch (nach OINUMA et al., 1972) und v.a. Fe- und Fe, Al-reich.

Die semiquantitative Analyse des Mineralbestandes der entkarbonatisierten Fraktion $<2\mu\text{m}$ ergab einen erwar-

tungsgemäß dominanten Gehalt an Illit/Muskowit. Als weitere Tonminerale treten vor allem Chlorit, daneben Pyrophyllit, Paragonit, Paragonit/Muskowit-Wechselagerungsminerale und Wechselagerungsminerale vom Typ Chlorit/Smektit auf.

Pyrophyllit findet man ausschließlich in den östlichen Bereichen der Rannachdecke, Paragonit hingegen ist in der Schöckldecke und in den Kalkschieferdecken verbreitet (Abb. 4).

4.3. Conodont-Alteration-Index (CAI)

Das CAI-Spektrum der Rannachdecke liegt zwischen $(3)4\frac{1}{2}$ (hell- bis dunkelbraun) und 8 (durchsichtig). Die CAI-Werte in der Schöckldecke liegen durchschnittlich bei CAI 5.

Die enorme Streubreite der CAI-Daten ist auch innerhalb einer stratigraphischen und sogar innerhalb einzelner Conodontenproben zu finden. Es ist sowohl bei Vergleich der niedrigsten und höchsten CAI-Einzelwerte als auch bei Vergleich der CAI-Durchschnittswerte keine Altersabhängigkeit der Conodontenfärbung zu erkennen.

Die höchste CAI-Stufe 8 findet man einerseits in den ober-silurisch/unterdevonischen Flaserkalken der Kehrer Schichten und andererseits auch in den unter-/mitteldevonischen Dolomiten der Dolomitsandsteinfolge.

Ebenso läßt die CAI-Verteilung keine regionalen Trends erkennen. Die N-S- bzw E-W-Metamorphosetrends, die durch Vitrinitreflexion bzw. Illitkristallinität bestimmt wurden, können mit Hilfe des CAI nicht erkannt werden.

MINERALVERTEILUNG

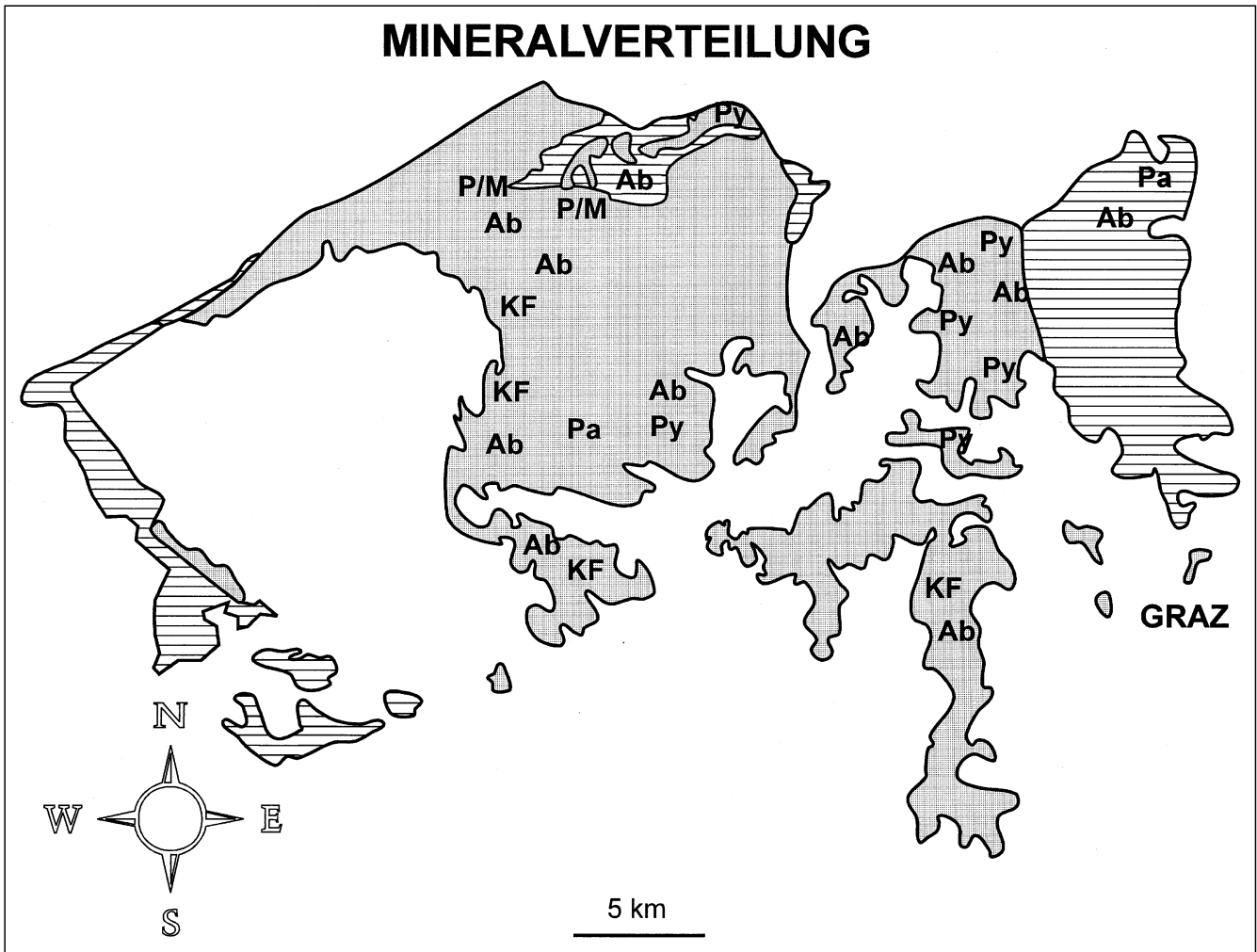


Abb. 4.

Die regionale Verteilung der wichtigsten Minerale in der Tonfraktion $<2\mu\text{m}$.

P/M = Paragonit/Muskowit Wechsellagerungsmineral; Ab = Albit; KF = Kalifeldspat; Pa = Paragonit; Py = Pyrophyllit.

5. Metamorphosegeschichte

Im folgenden soll diskutiert werden welche Metamorphoseereignisse für die Inkohlung, den Graphitisierungsbeginn, die Illitkristallinität, die Bildung der typisch anchizonalen Minerale und den CAI verantwortlich sein können und ob dafür ein oder mehrere Ereignisse eine Rolle gespielt haben. Die vorliegenden Daten sollen zu einem Modell des Metamorphoseablaufes vereinigt werden.

Folgende Ereignisse könnten für ein prägendes Metamorphoseereignis in Frage kommen:

- 1) Die variszische temperaturbetonte Karbon/Perm-Metamorphose, die auch die Interntektonik des Grazer Paläozoikum bestimmt hat (nach FRANK, 1987).
- 2) Die unterkretazische Deckenstapelung im Grazer Paläozoikum, mit E-W gerichteten tektonischen Transport (FRITZ et al., 1991).
- 3) Die oberkretazische Extensionstektonik und Krustenausdünnung (FRITZ et al., 1991; NEUBAUER et al., 1995).

Ein eindeutiges Charakteristikum für ein prätektonisches, also variszisches Metamorphoseereignis sind Inkohlungs- oder Illitkristallinitätssprünge an den Deckengrenzen. Diese konnten im Untersuchungsgebiet nicht erkannt werden.

Der parallele Verlauf der Isocrystlinien mit den Deckengrenzen der Rannach-Schöckldecke im E und im N des

Untersuchungsgebiet (s. Abb. 3) weist auf eine syntektonische Metamorphoseprägung der Illitkristallinität hin (vgl. ROBERT, 1988).

Als entscheidendes Ereignis bietet sich die unterkretazische Deckentektonik im Grazer Paläozoikum an.

Dabei förderte die E-W gerichtete Überschiebung die Illitkristallinität, da die Aktivierungstemperatur für die Rekristallisation der Illite, im Vergleich zur Inkohlung, durch eine synkinematische Metamorphose herabgesetzt wird (TEICHMÜLLER et al., 1979). Die Gebiete östlich der Mur zeigen hochanchizonale bis epizonale Illitkristallinitäten und die Bildung von Pyrophyllit als Kennzeichen einer beginnenden Metamorphose, obwohl die Phytoklasten noch niedrig inkohlt sind.

An der Stirnfront der überschiebenden Rannachdecke blieb die Illitkristallinität bei diagenetischen Halbwertsbreiten. Die Maximaltemperatur an der Basis der überschiebenden Decke wird, da keine Forcierung der Inkohlung stattgefunden hat, kaum 250°C überschritten haben.

Die unterkretazische Kontraktionstektonik wird von einer ENE-WSW gerichteten oberkretazischen Extensionstektonik abgelöst (NEUBAUER, 1989; FRITZ et al., 1991; NEUBAUER et al., 1995). Durch Krustenausdünnung, bedingt durch eine Hochlage des Mantels, kommt es kurzfristig zu extrem erhöhten geothermischen Gradienten (OXBURGH, 1983). Dies verursacht eine schnelle, daher

6. Schlußfolgerungen

Im südlichen Grazer Paläozoikum gibt es keine Hinweise für ein die Illitkristallinität prägendes variszisches Metamorphoseereignis. Es sind keine Metamorphosesprünge an den Deckengrenzen feststellbar. Die Isocrystlinien verlaufen parallel zu den Deckengrenzen.

Eine variszische Metamorphoseprägung der Organo-klasten ist, wenn vorhanden, dann nur im Süden des untersuchten Gebietes, südlich der 5 %-Isoreflexionslinie (s. Abb. 2) anzunehmen: Nördlich der 5 %-Isoreflexionslinie treten graphitoide und koxige Übergangspartikel auf, die hier auf ein kurzzeitiges Temperaturereignis hinweisen. In den Gesteinen südlich der 5 %-Isolinie findet man ausschließlich kohlige Partikel, was auf eine kontinuierliche Inkohlung der Gesteine hinweist, für die nach BOSTICK et al. (1979) Temperaturen von 200°C bis max. 250°C (mit einer Zeitdauer der Inkohlung von einigen 10er Ma) anzunehmen sind.

Der E-W-Trend der Illitkristallinität, die Abnahme der Illitkristallinität in Richtung Stirnfront der überschiebenden Decke und der parallele Verlauf der Isocrystlinien mit den Isobathen legt es nahe, daß für die Prägung der Illitkristallinität die alpidische Deckentektonik im Grazer Paläozoikum verantwortlich ist. Die Aktivierungstemperatur, die für die Rekristallisation der Illite notwendig war, wurde durch die synkinematische Metamorphose herabgesetzt. Temperaturen von 250°C wurden in der Rannachdecke nicht überschritten. Die Inkohlung der Phytoklasten wurde daher nicht beeinflußt.

Daß die letzte maßgebliche Inkohlung nach der Prägung der Illitkristallinität stattgefunden haben muß, wird durch die mit diagenetischen Illithalbwertsbreiten assoziierten hohen Inkohlungswerte im Westen des Untersuchungsgebietes erkenntlich.

Als prägendes Inkohlungsereignis sind, zumindest für das Gebiet nördlich der 5 %-Isoreflexlinie (d.h. ab dem Einsetzen der Übergangspartikel, s. Abb. 2), im Zusammenhang mit der oberkretazischen Extensionstektonik, kurzfristig extrem erhöhte geothermische Gradienten verantwortlich. Aufheizzeiten unter 1 Ma, mit einem Temperaturmaximum über 300°C, sind für die Inkohlung von über 5 % R_{max} und der Bildung von Übergangspartikel notwendig. Dieses kurzzeitige Temperaturereignis konnte die Illitkristallinität nicht mehr beeinflussen (vgl. WOLF, 1975; TEICHMÜLLER et al., 1979; ROBERT, 1988).

Für das CAI-Spektrum in der Rannachdecke wird auch ein altalpidisches Ereignis verantwortlich gemacht, bei dem Fluidbewegungen im Zusammenhang mit der Deckentektonik oder der Extensionstektonik oder beiden gemeinsam die hydrothermale Prägung der Conodontenfragmente verursacht hat.

Dank

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation am Institut für Geologie und Paläontologie in Graz erarbeitet (RUSSEGGER, 1992). Für deren Betreuung bedanke ich mich bei Prof. Dr. A. FENNINGER und Prof. Dr. F. NEUBAUER. Für die hilfreichen Diskussionen danke ich meinem Kollegen und Freund Dr. G. RANTITSCH.

Literatur

ARKAI, P.: Chlorite crystallinity: an empirical approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Palaeozoic and Mesozoic rocks of northeast Hungary. – *J. metam. Geol.*, **9**, 723–734, Oxford 1991.

BECKER, L.P., FRANK, W., HÖCK, V., KLEINSCHMIDT, G., NEUBAUER, F., SASSI, F.P. & SCHRAMM, J.M.: Outlines of the pre-alpine metamorphic events in the Austrian Alps. – In: FLÜGEL, H.W., SASSI, F.P. & GREGULA, P. (eds): Pre-variscan and variscan events in the Alpine Mediterranean mountain belts, 69–106, Bratislava (Alfa Publishers Bratislava) 1987.

BOSTICK, N.H., CASHMAN, S.M., MCCULLOH, T.H. & WADELL, C.T.: Gradients of vitrinite reflectance and present temperature in the Los Angeles and Ventura Basins, California. – In: OLTZ, D.F. (ed): Low temperature metamorphism of kerogen and clay minerals, 65–96, Los Angeles 1979.

DIESEL, C.F.K. & OFFLER, R.: Chance in physical properties of coalified and graphitised phytoclasts with grade of metamorphism. – *N. Jb. Mineral. Mh.*, **1975**, 11–26, Stuttgart 1975.

DIESEL, C.F.K., BROTHERS, R.N. & BLACK, P.M.: Coalification and graphitization in high-pressure schists in New Caledonia. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**, 63–78, Heidelberg 1978.

EPSTEIN, A.G., EPSTEIN, J.B. & HARRIS, L.D.: Conodont color alteration: An index to organic metamorphism. – *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **995**, 27 S., Washington D.C. 1977.

FLÜGEL, H.W. & NEUBAUER, F.: Steiermark. Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark. 1:200 000. – 127 S., Wien (Geol. B.-A.) 1984.

FRANK, W.: Evolution of the Austroalpine elements in the Cretaceous. – In: FLÜGEL, H.W. & FAUPL, P. (eds): Geodynamics of the Eastern Alps, 379–406, Wien (Deuticke) 1987.

FREY, M.: Very low-grade metamorphism of the Alps – an introduction. – *Schweiz. Mineral. Petr. Mitt.*, **66**, Basel 1986.

FREY, M.: Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. – In: FREY, M. (ed): Low temperature metamorphism, 9–58, Chapman and Hall, New York 1987.

FRITZ, H. & NEUBAUER, F.: Grazer Paläozoikum, Exk.f. TSK III. – 24 S., Graz 1990.

FRITZ, H., NEUBAUER, F. & RATSCHBACHER, L.: Compression versus extension in the Paleozoic of Graz (Eastern Alps, Austria). – *Zentralbl. der Geologie und Paläontologie*, **1/1**, 55–68, Stuttgart 1991.

GOSEN, W. v., PISTOTNIK, J. & SCHRAMM, J.-M.: Schwache Metamorphose in Gesteinsserien des Nockgebietes und im Postvariszikum des Karawankenvorlandes (Ostalpen, Kärnten). – *Jb. Geol. B.-A.*, **130**, 31–36, Wien 1987.

HARRIS, A.G., REXROAD, C.B., LIERMAN, R.T. & ASKIN, R.A.: Evaluation of a CAI anomaly, Putnam County, Central Indiana, U.S.A.: Possibility of a Mississippi Valley-type hydrothermal system. – *Courier Forsch.-Inst. Senckenberg*, **118**, 253–266, Frankfurt 1990.

HASENHÜTTL, C. & RUSSEGGER, B.: Niedriggradige Metamorphose im Grazer Paläozoikum. – *Jb. Geol. B.-A.*, **135**, 287–297, Wien 1992.

KISCH, H.J.: Mineralogy and petrology of burial diagenesis (burial metamorphism) and incipient metamorphism in clastic rocks. – In: LARSEN, G. & CHILINGAR, G.V. (eds): Diagenesis in sediments and sedimentary rocks, *Developments in Sedimentology*, **258**, 289–493, Amsterdam 1983.

KISCH, H.J.: Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. – *J. metam. Geol.*, **9**, 665–670, Oxford 1991.

KRALIK, M., KRUMM, H. & SCHRAMM, J.M.: Low grade and very low grade metamorphism in the Northern Calcareous Alps and in the Greywacke Zone: illite-crystallinity data and isotopic ages. – In: FLÜGEL, H.W. & FAUPL, P. (eds): Geodynamics of the eastern alps, 164–178, Wien (Deuticke) 1987.

KÜBLER, B.: La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. – *Étages Tectoniques*, 105–122, Neuchâtel 1967.

KÜBLER, B.: Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. – *Bull. Centre Rech. SNPA*, **2**, 385–397, Pau 1968.

- KÜBLER, B., PITTION, J.L., HEROUX, Y., CHAROLLAIS, J. & WEIDMANN, M.: Sur le pouvoir réflecteur de la vitrinite dans quelques roches du Jura, de la Molasse et des Nappes préalpines helvétiques et penniques. – *Eclogae geol. Helv.*, **72**, 347–373, Zürich 1979.
- LENGAUER, C.L. & SCHRAMM, J.M.: Metamorphoseuntersuchungen am Nordrand der westlichen Grauwackenzone (Salzburg). – *Jb. Geol. B.-A.*, **132**, 425–441, Wien 1989.
- LOESCHKE, J. & WEBER, K.: Geochemie und Metamorphose paläozoischer Tuffe und Tonschiefer aus den Karawanken (Österreich). – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **142**, 115–138, Stuttgart 1973.
- NEUBAUER, F.: Untersuchungen zur Geologie, Tektonik und Metamorphose des „Angerkristallins“ und des E-Randes des Grazer Paläozoikum. – *Jber.* 1980, Hochschulschwerpkt. S15, **2**, 114–121, Leoben 1981.
- NEUBAUER, F.: Untersuchungen zur Tektonik, Metamorphose und Stellung des Grazer Paläozoikum. – *Jber.* 1981, Hochschulschwerpkt. S15, **3**, 93–101, Leoben 1982.
- NEUBAUER, F.: Bau und Entwicklungsgeschichte des Rennfeld-Mugl- und des Gleinalmkristallins (Ostalpen). – *Jb. Geol. B.-A.*, **132**, 459–474, Wien 1989.
- NEUBAUER, F.: Lithostratigraphie und Strukturen an der Basis der Rannachdecke im zentralen Grazer Paläozoikum (Ostalpen). – *Jb. Geol. B.-A.*, **132**, 459–474, Wien 1989.
- NEUBAUER, F., DALLMEYER, R.D., DUNKL, I. & SCHIRNIK, D.: Late Cretaceous exhumation of the metamorphic Gleinalm dome, Eastern Alps: kinematics, cooling history and sedimentary response in a sinistral wrench corridor. – *Tectonophysics*, **242**, 79–98, 1995.
- NEUBAUER, F., GOLLNER, H. & SCHALK, L.: Volcanism-controlled sedimentation – the Silurian and early Devonian facies distribution in the Rannach facies, Paleozoic of Graz, Austria. – IGCP Project No. 5: Correlation of Prevariscan and Variscan Events in the Alpine Mediterranean Mountain Belts, Final Meeting, Sardinia, 56–66, Cagliari 1986.
- OINUMA, K., SHIMODA, S. & SUDO, T.: Triangular diagrams in use of a survey of crystal chemistry of chlorites. – *Proceed. Intern. Clay Conf.*, 123–128, Madrid 1972.
- OKUYAMA-KUSUNOSE, Y. & ITAYA, T.: Metamorphism of carbonaceous material in the Tono contact aureole, Kitikani Mountains, Japan. – *J. metam. Geol.*, **1987**, 121–139, Oxford 1987.
- OXBURGH, E.R.: Heterogenous lithospheric stretching in early history of orogenic belts. – In: HSÜ, K. (ed): *Mountain building processes*, 85–93, London (Academic Press) 1983.
- RANTITSCH, G.: Reflexionsmessungen an Graptolithen im Silur und Unterdevon der Karnischen Alpen. – *Jb. Geol. B.-A.*, **135**, 299–316, Wien 1992.
- RANTITSCH, G.: Coalification and graphitization of Graptolites in the anchizone and lower epizone. – *Intern. J. Coal Geol.*, **27**, 1–22, 1995.
- REJEBIAN, V.A., HARRIS, A.G. & HUEBNER, J.S.: Conodont color and textural alteration: an index to regional metamorphism and hydrothermal alteration. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **99**, 471–479, Tulsa 1987.
- RUSSEGGER, B.: Diagenese bis niedriggradige Metamorphose im südlichen Grazer Paläozoikum (Steiermark, Österreich). – Unveröff. Diss. Naturw. Fak. Graz, 180 S., Graz 1992.
- ROBERT, P.: Organic metamorphism and geothermal history. – 311 S., Dordrecht-Boston-Lancaster-Tokyo (Elf-Aquitain and D. Reidel Publishing Company) 1988.
- SCHRAMM, J.M.: Über die Verbreitung epi- und anchimetamorpher Sedimentgesteine in der Grauwackenzone und in den Nördlichen Kalkalpen (Österreich) – ein Zwischenbericht. – *Geol.-Paläont. Mitt. Innsbruck*, **7**, 3–20, Innsbruck 1977.
- SCHRAMM, J.-M., GOSEN, W. v., SEEGER, M. & THIEDIG, F.: Zur Metamorphose variszischer und postvariszischer Feinklastika in Mittel- und Ostkärnten (Österreich). – *Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, **53**, 169–179, Hamburg 1982.
- STACH, E., MACKOWSKY, M.-Th., TEICHMÜLLER, M., TAYLOR, G.H., CHANDRA, D. & TEICHMÜLLER, R. (eds.): *Stach's Textbook of coal petrology*. – 535 S., Berlin-Stuttgart (Gebrüder Borntraeger) 1982.
- TEICHMÜLLER, M.: Inkohlungsgradbestimmung an Kohlen- und Mergelproben aus der Kainacher Gosau (Obersanton-Untercampan) des Grazer Berglandes, Österreich. – *Jber.* 1979, Hochschulschwerpkt. S15, **1**, 102–104, Leoben 1980.
- TEICHMÜLLER, M., TEICHMÜLLER, R. & WEBER, K.: Inkohlung und Illitkristallinität. Vergleichende Untersuchungen im Mesozoikum und Paläozoikum von Westfalen. – *Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf.*, **27**, 201–276, Krefeld 1979.
- THALHAMMER, O.: Das Paläozoikum nördlich der Breitenau (Grazer Paläozoikum, Steiermark). – Unveröff. Diss. Naturwiss. Fak. Graz, 251 S., Graz 1982.
- WINKLER, H.G.: *Petrogenesis of metamorphic rocks* (5. edition). – 348 S., New York (Springer Verlag) 1979.
- WOLF, M.: Über die Beziehungen zwischen Illitkristallinität und Inkohlung. – *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, **7**, 437–447, Stuttgart 1975.