

DIE ENTWICKLUNG DER SÜDKALABRISCHEN KRUSTE:  
EINE INTERPRETATION VON GEOLOGISCHEN, PETROLOGISCHEN  
UND ISOTOPENGEOCHEMISCHEN DATEN

von

V. Schenk \*)

Vortrag vor der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft  
gemeinsam mit dem Institut für Petrologie der Universität Wien  
am 4. Mai 1987.

In der Serre des südlichen kalabrischen Massivs sind Gesteine aus allen Niveaus einer kontinentalen Kruste aufgeschlossen. Die verschiedenen Krustenniveaus folgen dabei, von Norden nach Süden, lagig aufeinander (Abb. 1): zu-unterst befindet sich eine granulitfazielle Unterkruste, von mindestens 7 km Mächtigkeit, bestehend aus einer überwiegend basischen Granulit-Pyriklasit-Einheit und einer überlagernden Metapelit-Einheit; darauf folgen varistische Granitoide, welche diskordant in amphibolitfazielle Oberkrustengneise und paläozoische Phyllite (Devon ist durch Fossilien belegt) intrudiert sind; diskordant auf dem Paläozoikum lagert ein karbonatisches Mesozoikum und darauf tertiäre und quartäre Sedimente.

---

\*) Anschrift des Verfassers:  
Prof. Dr. Volker Schenk  
Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität  
Olshausenstraße 40, D-2300 Kiel

Rock type	Schist	Metabasite	Granulite	Paragneisses	Dioritic gneiss	Tonalite	Granite	Gneiss	Devon siltst.
Model age Sm-Nd			$T_{CHUR} 1080$	$T_{CHUR} 1060$			$T_{CHUR} 900$		
Whole Rock, Rb-Sr			$450 \pm 20$						
Upper intercept		550 (730)	2300	2000	295	295	< 315		2500
Zircon lower intercept		295 (310)	$312 \pm 10$	$292 \pm 4$	0		0		550
Monazite, U-Pb			290-295	290-295					
Hornblende, K-Ar		180		250					
Garnet, Sm-Nd			215						
Muscovite, Rb-Sr	270			200					
Plg-Kf, Rb-Sr			145	175					
Biotite, Rb-Sr	43		110	135	85	135	230 - 295*		
Apatite, Fission-Tr	15		13	15		18			

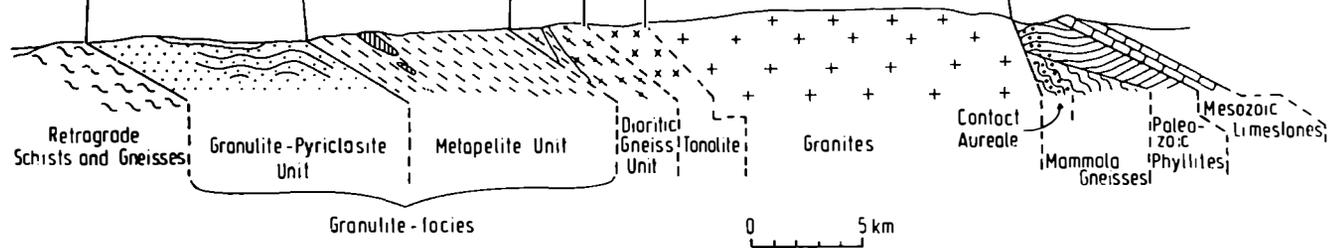


Abb. 1:

Geologisches Profil durch die gekippte Kruste der Serie mit den wichtigsten isotopischen Altersdaten, die für die Rekonstruktion der Entstehung, der thermischen Entwicklung, der Differentiation und der Heraushebung und Kippung der süditalienischen Kruste verwandt wurden.

\* Biotit-Modellalter der Granitoide, aus Borsi et al. (1976).

Die U-Pb Zirkonalter der Metabasite wurden sowohl mit einem Metamorphosealter von 295 m.y. (unterer Diskordia-Schnittpunkt wurde festgelegt) gerechnet als auch durch eine Regression durch die Zirkonanalysenpunkte der Pyroxenit-Probe 145 (in Klammern) ermittelt.

Petrologische Daten und radiometrische Alter der Unterkrustengesteine erlauben die Rekonstruktion von zwei wichtigen tektonischen Ereignissen, die die Unterkruste herausgehoben und die gesamte Kruste gekippt haben: Die erste Anhebung erfolgte varistisch, die Heraushebung und Kippung apenninisch. Beide tektonische Akte, die in der Unterkruste zu erkennen sind, spiegeln sich auch in den oberflächennahen Sedimenten, in Erosion und Steilstellung, wider. Daher kann auf eine gemeinsame Entwicklung und auf eine geologische Zusammengehörigkeit von Unter- und Oberkruste geschlossen werden.

Unter dieser Voraussetzung scheint es erlaubt, das an der Oberfläche aufgeschlossene Profil durch die Kruste in eine vertikale Abfolge von lithologischen Einheiten zurückzukippen, um somit ein wahrscheinliches lithologisches Profil durch die südkalabrische Kruste zu erhalten (Abb. 2).

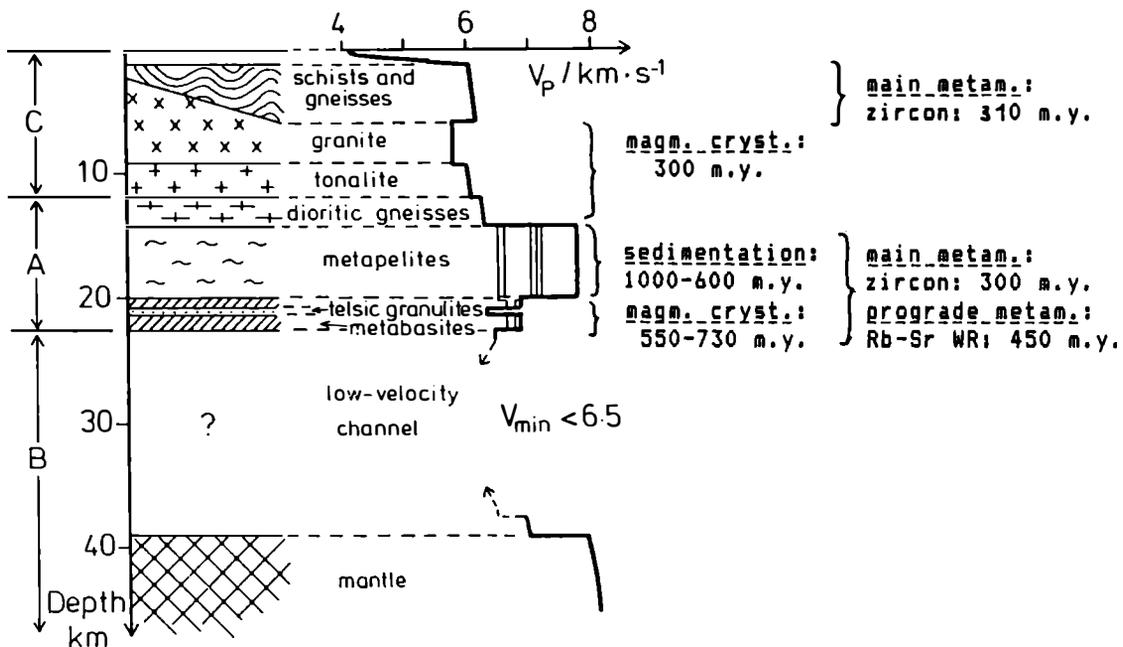


Abb. 2:

Hypothetisches lithologisches und seismisches Profil durch die südkalabrische Kruste. Modifiziert nach Kern & Schenk, 1985.

Zeitliches Entwicklungsmodell zur Entstehung, Metamorphose und Differentiation (Bildung der Granitoide) der Kruste entsprechend den Altersdaten in Abb. 1.. Der Niedergeschwindigkeitskanal unterhalb der ehemaligen Unterkruste wurde vermutlich varistisch (300 m.y.) angelegt und apenninisch (25-10 m.y.) überprägt.

Anhand der in einer Triachialpresse unter erhöhten Drucken und Temperaturen gemessenen Geschwindigkeiten seismischer Wellen in den kalabrischen Unterkrustengesteinen und von Wellengeschwindigkeitsdaten aus der Literatur für die Gesteinstypen der Oberkruste läßt sich ein hypothetisches Geschwindigkeit-Tiefenprofil für die Kruste Südkalabriens entwerfen (Abb. 2). Eine Überprüfung dieses Modells durch seismische Untersuchungen zur Krustenstruktur von Südkalabrien liegt leider noch nicht vor. Wenn diese, wie zu vermuten ist, ähnlich der nordkalabrischen Kruste ist, könnte die seismisch nachgewiesene Hochgeschwindigkeitslage in etwa 20 km Tiefe möglicherweise mit den Granat-reichen Metapeliten der ehemaligen Unterkruste zu korrelieren sein, während die unterlagernden granulitfaziellen Metabasite wieder etwas niedrigere Geschwindigkeiten aufweisen.

Über das Alter der Krustenbildung können Aussagen sowohl aus den Metasedimenten als auch aus den Meta-Magmatiten der Kruste gewonnen werden. Die mittlere Krustenverweilzeit des metamorphen Sedimentmaterials in der granulitfaziellen Unterkruste beträgt nach den Sm-Nd-Modellaltern eines hellen Granulits und eines  $Al_2O_3$ -reichen Paragneises 1080 bzw. 1060 m.y. (Tchur; vgl. Abb. 1). Das im Vergleich damit etwas jüngere Rb-Sr-Modellalter der Metapelite von etwa 950 m.y. wird auf eine Erhöhung des mittleren Rb/Sr-Verhältnisses des klastischen Sedimentmaterials durch Reaktion mit dem Meerwasser beim Vorgang der Sedimentation zurückgeführt. Bei Extrapolation des heutigen mittleren  $^{87}Rb/^{86}Sr$ -Verhältnis der Metapelite auf die Sr-Entwicklungslinie des Meerwassers erhält man ein wahrscheinliches Sedimentationsalter der Unterkrusten-Metasedimente von 1000 bis 600 m.y..

U-Pb-Isotopenanalysen an Zirkonen der Unterkrusten-Metasedimente ergeben Diskordien, deren obere Konkordia-Schnittpunkte bei 2000 bis 2300 m.y. liegen (Abb. 3). Dies deutet darauf hin, daß auch sehr viel älteres Krustenmaterial in den Paragesteinen enthalten ist, und daß die Sm-Nd- und Rb-Sr-Modellalter somit nur Mischalter bzw. eine mittlere Krustenverweilzeit angeben.

Modellhaft für die Interpretation der Sm-Nd und Rb-Sr-Modellalter und der oberen Zirkon-Diskordien-Schnittpunkte von den Unterkrusten-Gesteinen könnten sich die Ergebnisse an den fast unmetamorphen devonischen Sedimenten der Oberkruste erweisen: U-Pb Analysen an detritischen Zirkonen aus einem devonischen (380 m.y.) Siltstein von Stilo, deuten darauf hin, daß die Zirkone sich im wesentlichen aus nur zwei Komponenten zusammensetzen, einer etwa 2500 m.y. und einer etwa 550 m.y. alten (Abb. 3). Eine wesentliche Beteiligung einer dritten Zirkonkomponente mit einem Alter von etwa 1000 m.y. kann dagegen ausgeschlossen werden. Zukünftige Sm-Nd Analysen von diesen devonischen Sedimenten müssen überprüfen, ob die Sm-Nd Modellalter Mischalter zwischen der alten (2500 m.y.) und der jungen (550 m.y.) Zirkonkomponente anzeigen. Ein solches Sm-Nd-Modellalter gäbe dann kein geologisch wichtiges Mantelextraktions- bzw. krustenbildendes Ereignis an, sondern nur ein Mischalter.

Den Verhältnissen im devonischen Siltstein entsprechend geben die oberen Schnittpunkte der Diskordien durch die Zirkone zweier Unterkrusten-Paragesteine und eines amphibolitfaziellen Oberkrusten-Gneises wahrscheinlich jeweils nur Mischalter zwischen (ebenfalls zwei?) verschieden alten Zirkonkomponenten wieder (Abb. 3). Die Lage der Zirkone aus diesen Parametamorphiten ließe sich jedenfalls zwanglos aus der gleichen Zirkonmischung (550-2500 m.y.) wie sie in dem devonischen Siltstein vorhanden ist durch einen Pb-Verlust zu varistischer Zeit (im Fall der Unterkruste) bzw. zu kaledonischer Zeit (für die Oberkruste) erklären (Abb. 3).

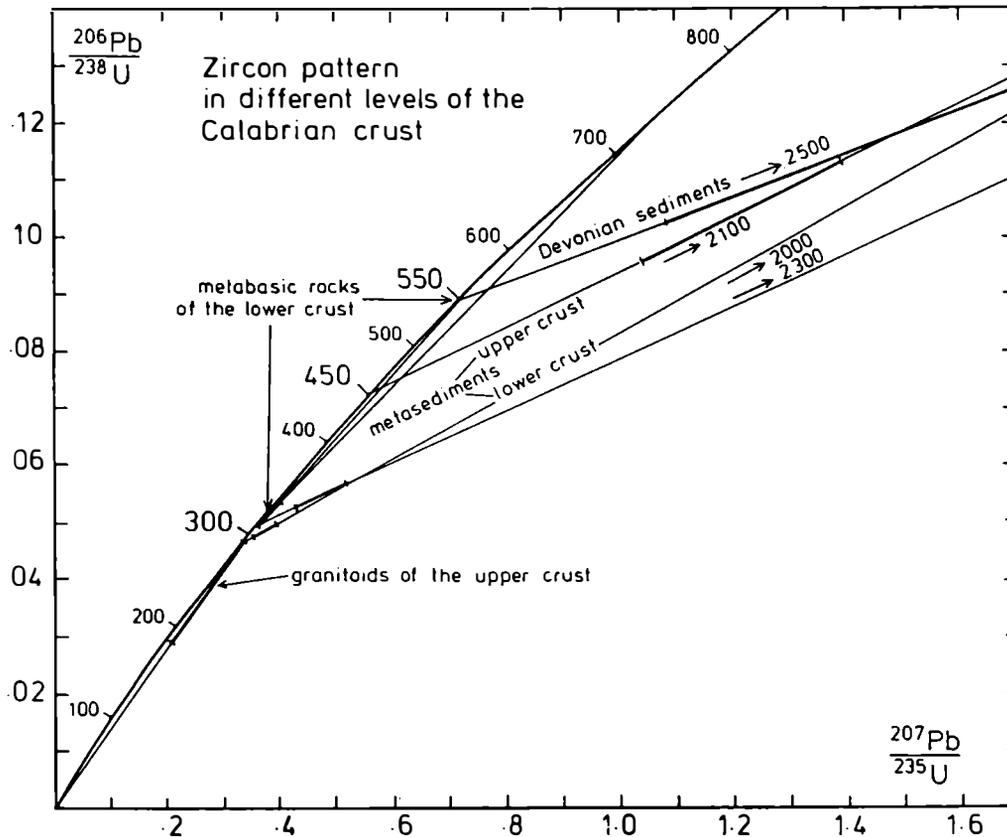


Abb. 3:

U-Pb Zirkon-Systematik in Paragesteinen, Graniten und Metabasiten aus verschiedenen Niveaus der südkalabrischen Kruste.

Der Streubereich der U-Pb Zirkonanalysen aus den einzelnen Gesteinen sind auf den jeweiligen Diskordien durch dicke Striche gekennzeichnet. Die detritischen Zirkone des devonischen Siltsteins bestehen überwiegend aus nur zwei verschieden alten Komponenten, einer 550 m.y. und einer 2500 m.y. alten. Die Zirkone der Paragesteine aus Oberkruste und Unterkruste lassen sich durch metamorphen Pb-Verlust zu kaledonischer (Oberkruste) bzw. varistischer (Unterkruste) Zeit aus einer Mischung von Zirkonpopulationen, wie sie im devonischen Siltstein vorhanden ist, ableiten. Die Bedeutung der 2500 m.y. alten Komponente nimmt dabei nach unten in der Kruste, in den höher metamorphen Gesteinen, zu. Die Zirkone der Granitoide lassen zum Teil einen rezenteren Pb-Verlust erkennen. Ihre  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ -Alter liegen zwischen 295 m.y. und 324 m.y.. Die Diskordia durch die Zirkone der Unterkrustenmetabasite schneidet quer durch die der Paragesteine. Der obere Diskordia-Schnittpunkt fällt zufällig (?) mit dem Alter der jüngeren Zirkonkomponente im devonischen Siltstein zusammen.

Geht man von der Hypothese aus, daß die am tiefsten unten in der Kruste befindlichen hellen Granulite stratigraphisch älter als die überlagernden Metapelite sind, daß diese älter als die Oberkrustengneise und letztere älter als die devonischen Sedimente sind, so kann man aus den Zirkonmustern der Gesteine, wie sie im Konkordia-Diagramm (Abb. 3) dargestellt sind, eine systematische Verjüngung der detritischen Zirkonmischungen im Laufe der Sedimentationsgeschichte ablesen: Der Schnittpunkt der Diskordia der drei metamorphen Gesteine mit der Diskordia durch die Zirkone des devonischen Siltsteins verschiebt sich zum Liegenden hin zu immer höheren Pb/U-Verhältnissen, d.h. zu höheren Durchschnittsaltern. Von dem Gesichtspunkt des Liefergebietes aus gesehen, kann es als eine Zunahme des jungen, assyntischen bzw. panafrikanischen Materials gegenüber dem archaischen Anteil im Laufe der Erosionsgeschichte verstanden werden.

Eine alternative Deutung der U-Pb-Zirkonmuster aus den verschiedenen Niveaus der kalabrischen Kruste wäre, daß die archaischen Zirkonkomponenten sich resistenter gegen den Pb-Verlust während der Metamorphose verhielten als die jüngere. Auch dies würde bei einer Mischung verschiedener detritischer Zirkone den oberen Diskordia-Schnittpunkt mit steigender Metamorphose systematisch zu höheren Altern hin verschieben.

Auch über die Bestimmung des magmatischen Kristallisationsalters der Unterkrusten-Metabasite wurden Auskünfte über das Bildungsalter der kalabrischen Unterkruste gewonnen:

U-Pb Zirkonanalysen von zwei Pyriklasiten der Granulit-Pyriklasit-Einheit ergeben einen oberen Diskordia-Schnittpunkt bei etwa 550 m.y. (Abb. 1 und 3). Kathodolumineszenz-Untersuchungen zum Zonarbau dieser Metabasit-Zirkone lassen – im Gegensatz zu den komplizierter zonierten, Korrosion und Überwachungen zeigenden, Zirkonen der Paragesteine – auf eine nur zweistufige Entwicklungsgeschichte (magmatische Kristallisation und Metamorphose) schließen. Daher wird das Alter, welches durch den oberen Diskordia-Schnittpunkt angezeigt wird, als deren magmatisches Kristallisationsalter interpretiert, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Sm-Nd-Analysen von sechs Hornblende-freien Pyriklasiten und Kumulat-Ultramafititen. Die  $T_{Nd}$ -Werte der Metabasite betragen vor 550 m.y. zwischen -3.4 und -2.5; somit scheinen die basischen Magmen aus einem an leichten seltenen Erden angereicherten Mantel zu stammen.

Sowohl die Rb-Sr-Datierung der Sedimentation der heutigen Unterkrusten-Paragesteine, als auch die U-Pb-Zirkon- und Sm-Nd-Datierungen der Unterkrusten-Metabasite ergeben somit übereinstimmend ein Bildungsalter des Unterkrustensegmentes im späten Ober-Proterozoikum oder im frühen Kambrium.

Als Bildungsraum kann wegen der großen Mächtigkeit an Flachwassersedimenten mit einem hohen Anteil an aufgearbeitetem älterem, klastischem Sedimentmaterial die Nähe eines Kontinents, etwa ein passiver Kontinentalrand, angenommen werden. Der das klastische Sedimentmaterial liefernde Kontinent im Hinterland hatte ein mittleres Krustenalter von 1000 bis 1100 m.y. ( $T_{Nd}$   $c_{HVR}$ ). Wenn die Ergebnisse von den devonischen Sedimenten auch auf die älteren, metamorphen Sedimente übertragen werden dürfen, setzt sich dieses mittlere Krustenalter aus zwei Komponenten, einer 550 m.y. und einer 2500 m.y. alten zusammen.

	PROGRADE EVOLUTION		DECOMPRESSION	COOLING-HYDRATION
	syn-tectonic	post-tectonic		
Analectic leucosomes	concordant folded leucosomes	discordant unfolded leucosomes		
Pyrobitiles	Hbl → Px <sub>matr</sub>	Hbl → Opx + Plg + Ilm Symbol. B I		
Gt-pyrobitiles	Hbl + Plg = Gt + Px <sub>matr</sub>	Hbl + Gt → Cpx + Gt + Ilm Symbol. B II	Gt → Opx + Plg = Hbl Symbol.	$Opx + H_2O \rightarrow Cum$ B IV $Cpx + H_2O \rightarrow \text{green Hbl}$ B VII
Gt-pyrclosites	Opx + Plg - Gt - Cpx (without Qz)		Gt → Opx + Plg Symbol. B VIII	$Opx + Plg \rightarrow Gt + Cpx + Qz$ reaction rim B X B XI
Granulites		Bio + Qz → Opx + Gt + Kf G I		$Opx + Kf + H_2O \rightarrow Bio + Qz + Gt$ Symbol. G III G IV
Metapelites	Gt - Bio - Sil - Kf - Oz Bio - Sil - Oz - Gt - Cord - Kf Sl → Sil + Gt + Spin + Cord/Co  Kyonite → Sillimonite	Gt + Sil + Oz → Cord Gt + Kf → Cord + Bio + Oz P II P III	$Gt + Kf + H_2O \rightarrow Bio + Sil + Oz$ P I $Gt + Cord + Sil + H_2O \rightarrow Sl + Qz$ P IV $Sl + Cord + H_2O \rightarrow Sil + Chl + Oz$ P V $Cord + H_2O \rightarrow And + Chl + Oz$ $Cord + CO_2 \rightarrow And + M + Qz$	
Aluminous Felses		Gt + Sil → Cord + Spin	Cord + Spin → Gt + Sil $Opx + H_2O \rightarrow Anth \rightarrow Gedr$	
Impure marbles and Calcisilicate rocks	Fo - Cc - Do ± Spin  Me <sub>99</sub> Cc - Oz		$Fo + Cc \rightarrow Di + Do$ C IX $Fo + Cc + H_2O + CO_2 \rightarrow Tr + Do$ C X $Di + Do + H_2O + CO_2 \rightarrow Tr + Cc$ C XI $MeCO_3 \rightarrow An + Cc + Qz$ C I $MeCO_3 + Qz + Cc \rightarrow Gro + CO_2$ C V $An + Cc + Qz \rightarrow Gro + CO_2$ C II $An + Cc + H_2O \rightarrow Zo + CO_2$ C III $MeCO_3 + H_2O \rightarrow Zo + CO_2$ C VI $Zo + Cc + Qz \rightarrow Gro + CO_2 + H_2O$ C IV $Di + CO_2 \rightarrow Oz + Do$ C VIII $Cpx + H_2O + CO_2 \rightarrow Hbl + Qz + Cc$ C VII	

Abb. 4:

Chronologische Zusammenstellung der für die petrologische Rekonstruktion des P-T-t Pfades der ehemaligen kalabrischen Unterkruste wesentlichen Mineralreaktionen in den verschiedenen Gesteinstypen der Serre. Die meisten erhaltenen Reaktionstexturen sind bei der Abkühlung und Rehydratation entstanden, während die Druckabsenkung und die prograde Entwicklung durch eine geringe Anzahl von Texturen belegt ist. Modifiziert nach Schenk, 1984.

Bei der prograden thermischen Entwicklung der ehemaligen Unterkruste lassen sich zwei Stadien, ein synkinematisches und ein späteres Stadium unterscheiden, das nach der durchgreifenden Deformation der Gesteine erreicht wurde. Während beider Stadien wurden granulitfazielle Bedingungen erreicht und es kam zur Bildung anatektischer Mobilisate (Abb. 4). Während in dem frühesten, erkennbaren Metamorphosestadium der geothermische Gradient noch relativ niedrig war und die P, T-Bedingungen für das gesamte aufgeschlossene Unterkrustenprofil im Stabilitätsfeld des Disthens lagen, wurde während des postkinematischen Stadiums ein geothermischer Gradient von etwa 30°/km erreicht und die P,T-Bedingungen in der Unterkruste befanden sich im Stabilitätsfeld von Sillimanit (Abb. 5).

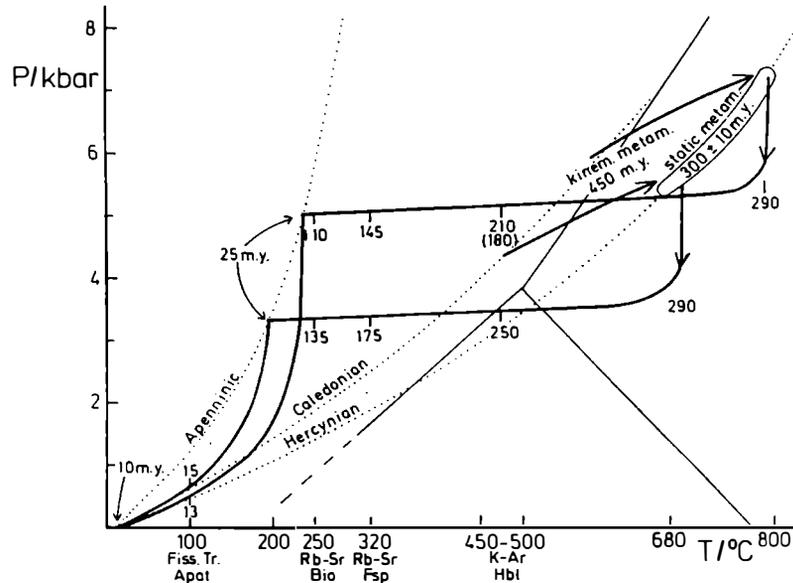


Abb. 5:

Korrelation der radiometrischen Alter mit der Druck- und Temperaturentwicklung der ehemaligen Unterkruste in Südkalabrien. Die beiden dick ausgezogenen Kurven gelten für den unteren bzw. den oberen Teil des granulitfaziellen Unterkrustensegments. Die Zahlen entlang den Kurven sind Altersangaben in Millionen Jahren.

Der "kaledonische Gradient" ist nur durch Disthenrelikte belegt und wurde mit der prograden kinematischen Metamorphose korreliert, während der die Sr-Isotope im Großbereich (vor 450 m.y.) homogenisiert wurden. Der "varistische Gradient" ist petrologisch gut belegt und wurde zeitlich mit dem stärksten Pb-Verlust der Zirkone und Monazite korreliert (300+10 m.y.). Der prograde P-T-Weg zwischen "kaledonischem" und "varistischem" Gradienten ist hypothetisch. Die Druckabsenkung nach der höchsten Metamorphose um etwa 2 kbar ist petrologisch belegt und wurde korreliert mit dem Ende des Pb-Verlustes in Zirkonen und Monaziten und dem Anfang der langsamen (ca. 3°/m.y.), in etwa isobaren Abkühlung. Der Abkühlungspfad ist petrologisch durch Reaktionstexturen nur bis etwa 500°C belegt; die weitere Abkühlung und Heraushebung wurde mit Hilfe von Mineralaltern und dem Alter der auflagernden tertiären Sedimente (10 m.y.) rekonstruiert.

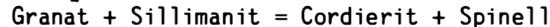
Der niedrige geothermische Gradient zu Beginn der apenninischen Heraushebung entspricht in etwa dem heutigen nach El-Alí & Giese, 1978.

Die prograde Entwicklung von dem Disthen-Stadium zum Sillimanit-Stadium wurde begleitet von postkinematischen Entwässerungsreaktionen, wie dem Abbau von Biotit in sauren Granuliten oder dem Abbau von Hornblende in Metabasiten (Abb. 4), und scheint daher mit einer Temperatur-Erhöhung verbunden gewesen zu sein.

Aus den petrologischen Daten gibt es leider keinerlei Hinweis über Druckänderungen bei der prograden Entwicklung. Daher muß auch der geologische Grund für die prograde Erwärmung weitgehend im Dunkeln bleiben:

- War die Ursache eine Erhöhung des Wärmeflusses vom Erdmantel (isobare Temperaturerhöhung),
- oder war es die Überlagerung durch mächtiges Krustenmaterial (Temperaturerhöhung bei steigendem Druck) etwa durch überschobene Decken, Ablagerung von Sedimenten oder Überlagerung von Magmatiten.
- oder war die Ursache für den höheren geothermischen Gradienten eine rasche tektonische Heraushebung ("isotherme" Druckerniedrigung)?

Das Ende der varistischen Hochtemperatur-Geschichte wurde nicht durch eine Änderung des Wärmeflusses vom unterliegenden Mantel eingeleitet, sondern durch eine tektonische Heraushebung der ehemaligen Unterkruste um 5-10 km. Erst danach setzte die in etwa isobar verlaufende Abkühlung ein. Diese P-T-Entwicklung, bei der die Druckabsenkung der Abkühlung vorausging, wurde petrologisch nachgewiesen durch die charakteristische Richtungsumkehr von Mineralreaktionen, die stark vom Druck abhängig sind (Abb. 4): In SiO<sub>2</sub>-untersättigten Metabasiten zerfallen Granatporphyroblasten in Orthopyroxene-Plagioklas-Koronen, doch kommt es zwischen den Koronamineralen anschließend wieder zum Neuwachstum von Granat- und Klinopyroxen-Reaktionssäumen. In SiO<sub>2</sub>-untersättigten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reichen Felsen lief die Reaktion



ab, und auch hier kam es zur Bildung von sekundären Sillimanit-Säumen um den bei der Druckabsenkung entstandenen Spinell.



Im Einklang mit dem Vorhandensein einer intrakrustalen Hochgeschwindigkeitslage in der Kruste von Nordkalabrien wird der kalabrische Typ der P-T-Entwicklung auf eine tektonische Überlappung von mächtigen Krustensegmenten, möglicherweise im Zusammenhang mit einer Kontinent-Kontinent-Kollision, zurückgeführt (Abb. 6). Durch die dabei entstandene starke Mächtigkeitszunahme der Kruste setzte anschließend rasch die "postorogene" Erosion ein und bewirkte in dem überschobenen Krustensegment die beobachtete Druckabsenkung. Der Beginn der anschließenden Abkühlung kann als Folge der Temperatur-Anpassung der überschobenen ehemaligen Unterkruste an die Temperatur in der mittleren Kruste verstanden werden.

Nach der radiometrischen Datierung des Abkühlungspfades wurde nach der Heraushebung der alte varistische geothermische Gradient schon wieder vor etwa 250-260 m.y. erreicht (Abb. 5). Wie der systematischen Abfolge von Rb-Sr Feldspat- und Biotit-Abkühlungsaltern zu entnehmen ist, stellte sich aber die Temperatur in der ehemaligen Unterkruste offensichtlich nicht auf diesen alten, prä-tektonischen Gradienten ein, sondern es kam zu einer weiteren langsamen Abkühlung von 2-3°/m.y. (Abb. 5). Diese durch radiometrische Datierung belegte extrem langsame Abkühlung ist in Einklang mit der petrologisch abgeleiteten, isobaren Abkühlung in noch relativ großer Krustentiefe, ohne daß die Unterkruste wesentlich weiter herausgehoben wurde. Wenn dieses Modell richtig ist, muß der Wärmefluß vom unterlagernden Erdmantel nach der varistischen Orogenese kontinuierlich abgenommen haben, bis im Tertiär, zu Beginn der apenninischen Heraushebung, der geothermische Gradient ähnlich niedrig war wie er von El-Ali & Giese (1978) aufgrund des geringen Oberflächenwärmeflusses in Kalabrien auch für heute angegeben wird (Abb. 5).

Nach dem hier vorgestellten Modell wurden die südkalabrischen granulitfaziellen Einheiten also durch die varistische Orogenese aus der Unterkruste herausgehoben und erlebten anschließend eine mehr als 250 m.y. dauernde Geschichte als mittlere Kruste, die mit kontinuierlicher Abkühlung von 700 bis 800°C auf etwa 200°C verbunden war.

Die Niedertemperaturgeschichte in der mittleren Kruste hatte aber nur einen relativ geringen Effekt auf die Mineralogie und das Korngefüge der granulitfaziellen Gesteine. Nicht durchgreifend, sondern nur lokal, im Aufschlußbereich wie im Dünnschliffbereich, kam es zur Bildung retrograder Reaktionsgefüge, die vor allem den hochtemperierten Beginn der Abkühlung belegen (Abb. 4). Der Abbau von Cordierit bei etwa 500° bis 450°C in Andalusit, Chlorit und Quarz bzw. bei Anwesenheit von CO<sub>2</sub> in Andalusit, Magnesit und Quarz sind die letzten Reaktionen, welche den Abkühlungsvorgang auch texturell durch Reaktionsgefüge erkennbar machen.

Den stärksten Effekt der retrograden Metamorphose haben die Gesteine durch die Rehydratation erfahren. Diese ist in der Granulit-Pyriklasit-Einheit relativ gering und nimmt in der Metapelit-Einheit nach oben hin deutlich zu. Wegen der geringen Rehydratation im unteren Teil des Unterkrustenprofils wird das Wasser nicht aus dem - entsprechend dem vorgeschlagenen tektonischen Modell - subduzierten Krustensegment hergeleitet; hier hätte das Wasser möglicherweise durch die posttektonische metamorphe Aufheizung freigesetzt werden können. Andererseits wird auch eine Wasserzufuhr aus höheren Krustenniveaus bis in eine Tiefe von etwa 15 km für unwahrscheinlich gehalten. Daher wird für das Wasser, welches für die Rehydratation benötigt wurde, eine interne Herkunft angenommen, etwa aus der im Gestein verbliebenen fluiden Phase oder aus sogenannten "wasserfreien" Silikaten wie Quarz. Quarz zeigt mit steigenden Drucken und Temperaturen eine zunehmende Löslichkeit von Wasser und könnte dies bei der Retromorphose wieder freigesetzt haben

(Spear & Selverstone, 1983). Durch ein Modell, nach welchem das retrograd freigesetzte Wasser nicht sofort am Ort der Freisetzung für Hydratationsreaktionen wieder verbraucht wurde, sondern sich sammeln und in der Kruste nach oben wandern konnte, ließe sich das Rehydratationserscheinungsbild in dem ehemaligen Unterkrustensegment von Südkalabrien erklären.

Während die höchsttemperierte, varistische und die retrograde postvaristische thermische Entwicklung der ehemaligen Unterkruste und die entsprechenden radiometrischen Daten recht plausibel geologisch interpretiert werden können, ist die geologische Bedeutung der prograden, prävaristischen Entwicklung weniger verstanden: Läßt sich die synkinematische prograde granulitfazielle Entwicklung und die Bildung der älteren, gefalteten Mobilisate mit dem kaledonischen Sr-Homogenisierungsereignis im Großbereich vor 450 m.y. korrelieren? Ist die Bildung der granitoiden Magmen, die heute als Orthogneise vereinzelt in den Unterkrusten-Metapeliten vorkommen, aber in den amphibolitfaziellen Oberkrusten-Gneisen des Aspromonte weitverbreitet sind (Ferla et al., 1983), zeitlich und genetisch mit diesem frühen Metamorphosestadium zu korrelieren?

Die Metapelite der etwa 5 bis 6 km mächtigen Metapelite-Einheit in dem ehemaligen Unterkrustensegment weisen einen stark restitischen Chemismus auf, der nur durch Extraktion von großen Anteilen (> 60%) an granitischer Schmelze aus Durchschnittspeliten erklärt werden kann.

Sowohl die volumenmäßig stark vertretenen varistischen Granitoide, von denen die älteren "mesaluminous" und auch die jüngeren "peraluminous" Granite einen S-Typ Charakter aufweisen, als auch die älteren Orthogneise kommen prinzipiell als Differentiationsprodukt bei der Bildung der restitischen Unterkruste in Frage.

Das genauere magmatische Alter der Orthogneise in der ehemaligen Unterkruste konnte wegen des starken varistischen Pb-Verlustes ihrer Zirkone nicht geklärt werden, doch ist das prävaristische Alter eindeutig. Die Datierung von weniger stark metamorph überprägten Augengneisen der Oberkruste kann in Zukunft hier die Klärung der Altersbeziehung zwischen prävaristischer Metamorphose und Magmatismus bringen.

Das magmatische Intrusionsalter der varistischen "mesaluminous" Granitoide scheint nach den U-Pb-Zirkondatierungen zeitlich mit dem Ende der höchsten granulitfaziellen Metamorphose in der unterlagernden Unterkruste zusammenfallen, während die "mesaluminous" Suite nach internen Rb-Sr Mineralisochronen (Dei Moro et al., 1983) etwa 5 bis 10 m.y. jünger zu sein scheint ( $280 \pm 4$  bis  $288 \pm 4$  m.y.).

Die Sm-Nd Entwicklungslinien des Granits von Stilo ("mesaluminous Suite") und des einzigen analysierten  $Al_2O_3$ -reichen Unterkrusten-Paragneises überschneiden sich bei dem Intrusionsalter des Granits von etwa 300 m.y. Granit und restitischer Metapelite scheinen danach in enger genetischer Beziehung zueinander zu stehen.

Andererseits sind die Sr-Initialwerte aller bisher analysierter varistischer Granitoide niedriger als der Initialwert der kaledonischen (450 m.y.) Rb-Sr Isochrone der Metapelite-Großproben. Die Granite könnten demnach nur dann zu varistischer Zeit aus den Unterkrusten-Metapeliten differenziert worden sein, wenn geringer radiogenes Sr, etwa aus dem Erdmantel, den granitischen Schmelzen zugeführt worden wäre.

Es bedarf sicher nicht eines größeren analytischen Aufwandes an Unterkrusten-Metapeliten und an prävaristischen wie varistischen Granitoiden, um den Differenzierungsprozeß in granulitische Unterkruste und granitoide Oberkruste zu verstehen, und die scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse der Nd- und der Sr-Isotopie deuten zu können.

Möglicherweise erhielten die Unterkrusten-Metapelite ihren restitischen Chemismus schon während der kaledonischen Metamorphose, während die varistischen granitoiden Schmelzen in dem varistisch subduzierten und vermutlich aus äquivalenten Metapeliten bestehenden Krustensegment unter Beteiligung von Mantelmaterial gebildet wurden.

Zusammenfassend ist der Aufbau und die Entwicklung der südkalabrischen Kruste schematisch in Abb. 2 dargestellt:

Für das magmatische Kristallisationsalter der Metabasite in der Granulit-Pyriklasit-Einheit wurde der Zeitraum 550 m.y. bis etwa 730 m.y. bestimmt, und die sedimentäre Entstehung der überlagernden Metapelite erfolgte nach der Rb-Sr Datierung ebenfalls vor etwa 700 m.y. . Das Bildungsalter der Unterkruste ist daher nicht älter als Ober-Proterozoikum, wahrscheinlich z.T. Unterkambrium.

Im Großbereich erfolgte eine Sr-Homogenisierung in den Metapeliten vor  $450 \pm 20$  m.y.; in diesem Zeitraum kam es möglicherweise zur Degranitierung der Metapelite und zur magmatischen Bildung der heutigen (bisher nicht datierten) Orthogneise in Metapelite-Einheit und Oberkruste.

Nach U-Pb-Zirkondatierungen und ihrer Korrelation mit der metamorphen Entwicklung der granulitfaziellen Einheiten erfuhr die Unterkruste ihre stärkste Aufheizung in varistischer Zeit, vor  $300 \pm 10$  m.y., während die amphibolitfaziellen Oberkrusten-Gneise von Mammola ihre stärkste Metamorphose in kaledonischer Zeit vor etwa 450 m.y. erlebten. Eine tektonische Heraushebung und Überschiebung der Oberkrusten-Gneise auf den Krustenabschnitt der granulitfaziellen Einheiten zu kaledonischer Zeit könnte diese radiometrischen und thermischen Beziehungen zwischen ehemaliger Unterkruste und den Oberkrusten-Gneisen erklären.

Am Ende des Varistikums scherte die Unterkruste, möglicherweise im Zusammenhang mit einer Kontinent-Kontinent-Kollision, vom oberen Mantel ab und wurde in ein mittleres Krustenniveau gehoben. Fast gleichzeitig intrudierten große Volumina von S-Typ Granitoiden, Tonaliten und Dioriten in die mittlere und obere Kruste.

Die isotopischen Altersdaten deuten somit daraufhin, daß nach der oberproterozoischen magmatischen und sedimentären Bildung der späteren Unterkruste eine Differentiation der Kruste schon prävaristisch (möglicherweise vor etwa 450 m.y.?) erfolgte; die stärkste Anreicherung granitoiden Materials in der Oberkruste erfolgte aber varistisch, doch konnte dessen anatektischer Ursprung wegen der unterschiedlichen Aussagen der bisher vorliegenden Nd- und Sr-Daten nicht eindeutig in dem vorliegenden restitischen Unterkrustensegment lokalisiert werden.

Postvaristisch erlebte die ehemalige Unterkruste eine mehr als 250 m.y. dauernde Geschichte als mittlere Krustenlage und kühlte dabei von  $800-700^{\circ}\text{C}$  auf etwa  $200^{\circ}\text{C}$  ab.

Der geringe Unterschied zwischen den postorogen (apenninisch) abgelagerten

Sedimenten des Torton (ca. 10 m.y.) auf den ehemaligen Unterkrustengesteinen und den Apatit-Spaltpuren-Altern (13 bzw. 15 m.y.) belegen eine rasche Abkühlung und Heraushebung der ehemaligen Unterkruste aus dem mittleren Krustenniveau bis an die Erdoberfläche (Abb. 5).

#### Literatur

- BORSI, S., HIEKE, M., LORENZONI, O., PAGLIONICO, A., ZENETTIN LORENZONI, E. (1976): Stilo and "dioritic kinzigitic" unit in Le Serre (Calabria, Italy). Geological, petrological and geochronological characters. *Boll. Soc. Geol. It.* 95, 219-245.
- DEL MORO, A., PARDINI, G., MACCARRONE, E., ROTTURA, A. (1983): Studio radiometrico Rb-Sr di granitoidi peraliminosi dell'arco calabro-peloritano. *Rend. Soc. It. Miner. Petrol.* 38, 1015-1026.
- EL ALI, H., GIESE, P. (1978): A geothermal profile between the Adriatic and the Tyrrhenian Sea. In: Closs, H., Roeder, D., Schmidt, K. (eds) *Alps, Apennines, Hellenides*. Schweizerbart, Stuttgart, 324-327.
- FERLA, P., LORENZONI, S., ZANETTIN LORENZONI, E. (1983): Geological constitutions and evolution of the Calabro-Peloritan Hercynian range. *Rend. Soc. It. Mineral. Petrol.* 38, 951-962.
- KERN, H., SCHENK, V. (1985): Elastic wave velocities in rocks from a lower crustal section in Southern Calabria (Italy). *Phys. Earth Planet. Int.* 40, 147-160.
- SCHENK, V. (1984): Petrology of felsic granulites, metapelites, metabasics, ultramafics and metacarbonates from Southern Calabria (Italy): Prograde metamorphism, uplift and cooling of a former lower crust. *J. Petrol.* 25, 255-298.
- SPEAR, F., SELVERSTONE, J. (1983): Water exsolution from quartz: Implications for the generation of retrograde metamorphic fluids. *Geology* 11, 82-85.