

HEBUNGSRATEN IM TAUERNFENSTER, ABGELEITET AUS SPALTSPURENDATIERUNGEN
VON APATITEN

von

G. Grundmann +)

(eingelangt am 27. Feber 1987)

Einleitung

Die penninische Zone des Tauernfensters repräsentiert das tiefste tektonische Stockwerk des Ostalpinen Deckensystems. Die Hauptmasse der heute an der Oberfläche aufgeschlossenen Gesteine innerhalb des Tauernfensters wurde von der alpidischen Regionalmetamorphose (Tauernkristallisation) niedrig- bis mittelgradig überprägt. Aus P-T Abschätzungen ihrer fazieskritischen Mineralparagenesen muß geschlossen werden, daß die penninischen Gesteinsserien mindestens aus Tiefen von 15 bis 30 km in ihre heutige Position gehoben wurden.

Ein generelles Ziel petrologischer Untersuchungen ist es, die individuelle Druck- und Temperaturgeschichte (P und T) im zeitlichen Geschehen (t) zu rekonstruieren, wobei z.B. mit der graphischen Darstellung des P-T-t-Pfades der Verlauf von Versenkung und Wiederaufstieg einer Gesteinsprobe bzw. Gesteinseinheit nachvollzogen wird.

Die Lösung der Frage, wann das Maximum der Metamorphose durchschritten wurde und mit welcher Geschwindigkeit die Hebung und Abkühlung erfolgte, bleibt insbesondere den radiometrischen Altersbestimmungsmethoden vorbehalten. Aus Metamorphiten ohne Fossilien können die absoluten Zeitangaben vor allem über Rb/Sr- und K/Ar-Glimmerdatierungen sowie über Spaltspurendatierungen von Zirkonen, Titaniten und Apatiten ermittelt werden. Ein Vergleich der Schließungstemperaturen der einzelnen Altersbestimmungsmethoden gibt zu erkennen, daß die Spaltspurenmethode bei der Verwendung von Apatit mit rund 100° C eine Lücke zwischen den Rb/Sr- und K/Ar-Biotitaltern mit rund 300° C und der Oberflächentemperatur ausfüllt. Die Vorzüge der Spaltspurenmethode liegen weiterhin nicht nur im Erfassen des Niedertemperaturbereiches, sondern auch im direkten Bestimmen der Hebungsraten ausgewählter Gebiete. Aus dem Temperatur/Zeit-Diagramm können zudem die Abkühlungsraten innerhalb des datierten Zeitraums abgelesen werden. Eine umfassende geochronologische Arbeit, u.a. mit dieser Zielsetzung, liegt bereits über die Schweizer Zentralalpen vor (WAGNER et al., 1977). Aus dem Raum der zentralen Ostalpen sind Angaben über Hebungsraten bislang nur aus aktuellen Präzisionsnivelements (SENFELT & EXNER, 1973) sowie aus geologisch-petrologischen Untersuchungen heraus abgeleitet worden (z.B. MORTEANI, 1974; FRISCH, 1976; RAITH et al., 1980).

Untersuchungsgebiet Tauernfenster und Umrahmung

Zielgebiet der vorliegenden Untersuchung ist das mittlere und westliche Tauernfenster sowie Teilbereiche seiner nördlichen und südlichen austroalpinen Umrahmung (Abb.1). Beprobte wurde zunächst ein etwa 10.000 km² großes Gebiet zwischen den Städten Innsbruck, Kitzbühel, Lienz (Österreich) und Bressanone (Italien).

Aus dem Tauernfenster und seiner nördlichen und südlichen Umgebung wurden insgesamt 62 Spaltspurenalter von Apatit-Konzentraten bestimmt. Die Apatite wurden

+) Anschrift des Verfassers:

Dr. Günter Grundmann

Institut für Angew. Mineralogie und Geochemie

Techn. Universität München, Lichtenbergstr. 4, D-8046 Garching

hauptsächlich aus Gneisen granitischer bis granodioritischer Zusammensetzung, in Ausnahmefällen aus Metabasiten separiert. Alle Gesteine wurden direkt aus dem Anstehenden genommen. In mehreren Fällen wurden Bereiche datiert, aus denen bereits eine Reihe von Rb/Sr- und K/Ar- Glimmerabkühlungsalter vorlagen.

Das jüngste thermische Ereignis im Raum des Tauernfensters war die Tauernkristallisation. Das Verbreitungsgebiet und die Metamorphosebedingungen der Tauernkristallisation sind durch eine Vielzahl von Arbeiten in großen Zügen bekannt (z.B. HOERNES, 1973; HOERNES & FRIEDRICHSEN, 1974; RAASE & MORTEANI, 1976; HÜCK, 1980; SATIR & FRIEDRICHSEN, 1981; SELVERSTONE et al., 1984). Die höchsten Temperaturen wurden in der zentralen Längsachse des Tauernfensters mit Werten um maximal 560° C erreicht (SATIR & FRIEDRICHSEN, 1983). Die Rb/Sr- und K/Ar- Biotitalter aus dem mittleren und westlichen Tauernfenster mit Werten zwischen min. 13 und max. 30 Ma werden ausnahmslos als Abkühlungsalter der Tauernkristallisation interpretiert.

Ergebnis der Apatit-Spaltpurenaltersdatierungen

Abb.2 zeigt die Apatit-Spaltpurenalter und die regionale Verteilung der 62 datierten Proben. Spezielle Angaben über die genaue Lage der Probenlokalitäten und die Methodik der vorliegenden Apatit-Spaltpurendatierungen sind der Arbeit von GRUNDMANN & MORTEANI (1985) zu entnehmen bzw. auf Anfrage vom Autor zu erhalten. Die Apatit-Spaltpurenalter innerhalb des Tauernfensters mit einer Streubreite zwischen min. 5 Ma und max. 11 Ma sind erwartungsgemäß jünger als die entsprechenden Glimmer-Abkühlungsalter. Diese radiometrisch ermittelten Abkühlungsalter sind jedoch abhängig von

- a) der topographischen Höhe der Probenlokalität,
- b) dem geothermischen Gradienten zur Zeit der Hebungsphase und
- c) der Hebungsrates.

Die empfindliche Höhenabhängigkeit des Apatit-Spaltpurenalters ist dadurch bedingt, daß eine im Vertikalprofil topographisch höher liegende Probe infolge des Hebungsvorganges die Isotherme der Schließungstemperatur früher passiert hat und dementsprechend ein höheres Alter ergibt als die tiefer liegende Probe. Als anschauliches Beispiel für die Höhenabhängigkeit und die Notwendigkeit einer Höhenkorrektur insbesondere des Apatit-Spaltpurenalters sei eine Probenfolge des Ötztal-Massivs aus dem westlichen Tauernfenster herangezogen. Die Probe unmittelbar vom Gipfel in rund 3470 m Höhe ü. NN zeigt ein Alter von 10,5 Ma. Eine aus dem Tuxer Stollen (1800 m ü.NN) darunter entnommene Probe liefert einen Wert von 7,7 Ma. Das entspricht einer Altersdifferenz von immerhin rund 3 Ma bei einer Höhendifferenz von 1670 m. Die höher liegende Gipfelprobe hat demzufolge die 100°-Isotherme rund 3 Ma früher passiert als die tiefer liegende Probe aus dem Tuxer Stollen, vorausgesetzt der geothermische Gradient blieb über diesen Zeitraum konstant. Die 1 sigma Fehlerbalken dieser Spaltpurenalterswerte sind mit durchschnittlich $\pm 5\%$ anzusetzen (GRUNDMANN & MORTEANI, 1985).

Bestimmung der Hebungsrates im Tauernfenster

Eine Reihe von Spaltpurenaltern eines Vertikalprofils ausreichender Höhendifferenz erlaubt nun die direkte Bestimmung der Hebungsrates eines durch datierte Proben belegten und en bloc gehobenen Teilbereiches.

Im Untersuchungsgebiet des Tauernfensters wurde aus den Teilbereichen Granatspitz, Habachtal, Krimmler Achenal, Stilltuptal und Schlegeistal jeweils eine Probengruppe möglichst großer Höhendifferenz zusammengestellt.

Das Diagramm "Höhe der Probenlokalität gegen Spaltpurenalter" (Abb.3) zeigt für alle genannten Teilbereiche, daß entsprechend der Modellvorstellung die Alter mit ansteigender topographischer Höhe zunehmen. Die durchgezogenen Linien stellen die berechneten Ausgleichsgeraden dar. Die Steigung der Ausgleichsgerade einer Probengruppe gibt den direkten Betrag der durchschnittlichen Hebungsrates in m/Ma

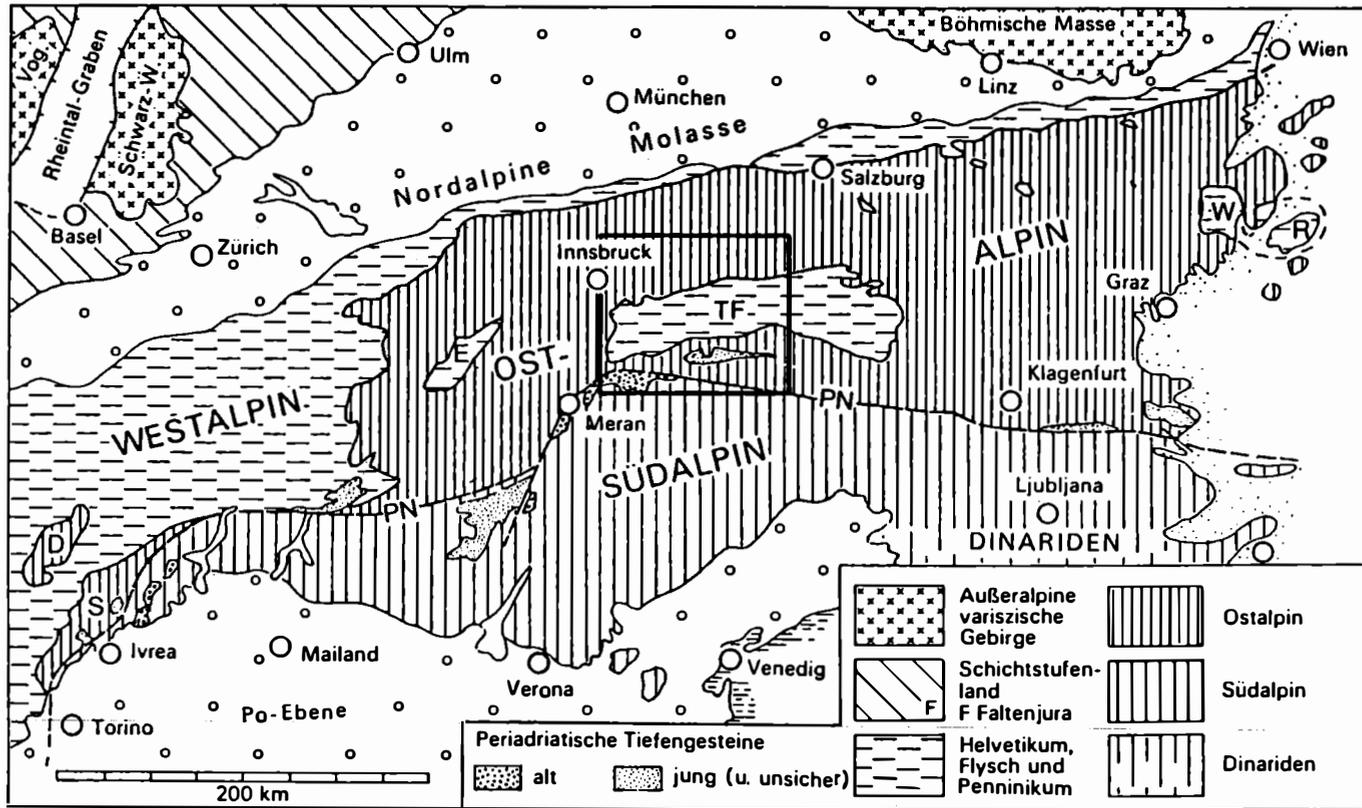


Abb.1: Tektonische Übersichtskarte der Ostalpen (aus BÜGEL und SCHMIDT, 1976, Kleine Geologie der Ostalpen, 1.Aufl., S.14) mit der Lage des Untersuchungsgebietes (rechteckig umrahmt).
 D Dent-Blanche-Decke, S Sesia-Lanzo-Zone, PN Periadriatische Naht, E Engadiner Fenster, TF Tauernfenster, W Wechselfenster, R Rechnitzer Schieferinsel.

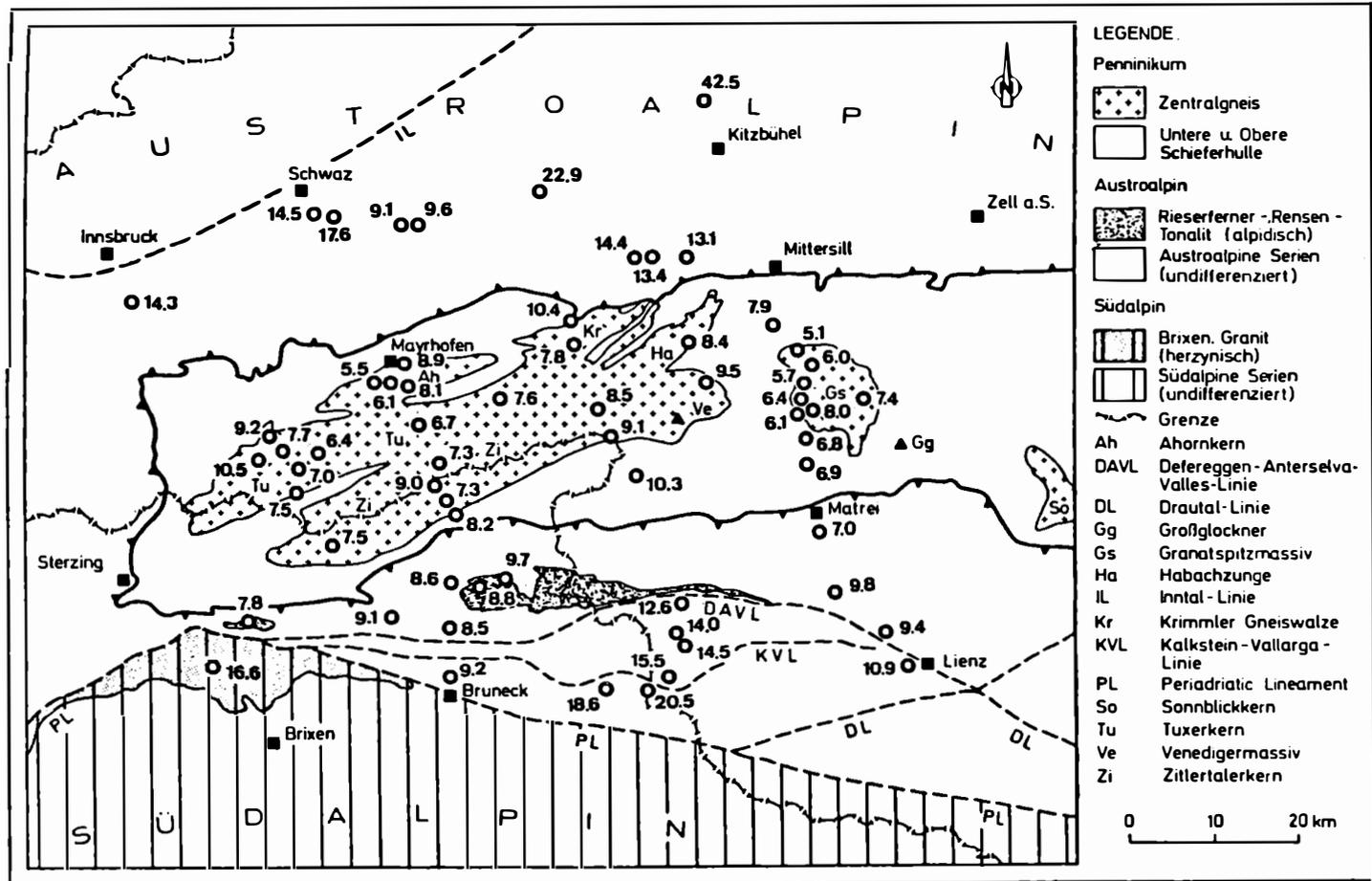


Abb.2: Regionale Verteilung der in Bezug auf ihre topographische Höhe unkorrigierten Apatit-Spaltspurenalter im Bereich des mittleren und westlichen Tauernfensters und seiner nördlichen und südlichen Umrahmung. Die Altersangabe ist in Millionen Jahren (Ma).

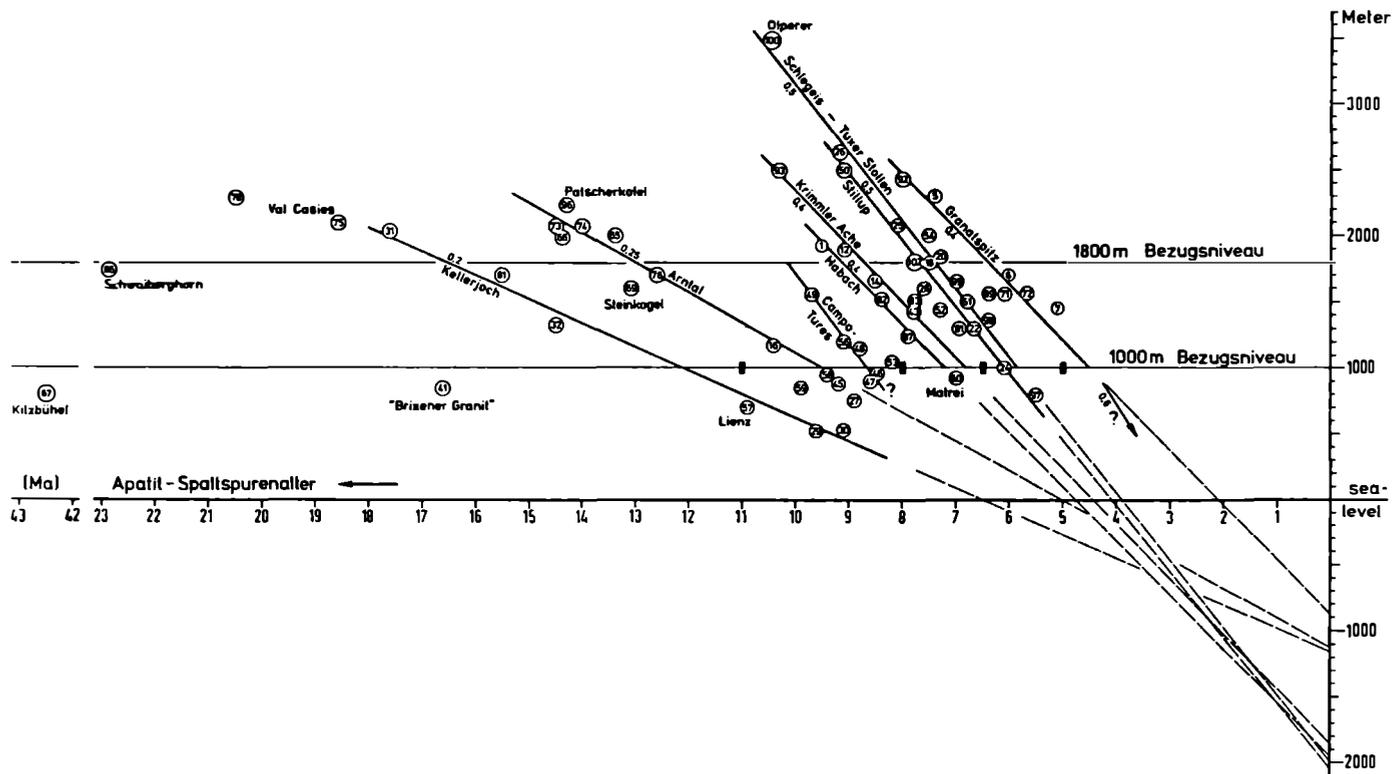


Abb.3: Topographische Höhe der Probenlokalitäten gegen die entsprechenden Apatit-Spaltspurenalter. Die durchgezogenen fetten Linien sind die Regressionsgeraden ausgewählter Gebiete mit den Beiträgen der Hebungsrate (in mm/a). Die auf dem 1000 m Bezugsniveau für die Höhenkorrektur ausgewählten Zeitintervalle sind durch kurze Querstriche gekennzeichnet.

bzw. mm/a wieder. Die resultierenden Hebungsraten liegen im mittleren Tauernfenster einheitlich bei 0,4 mm/a, im westlichen einheitlich um 0,5 mm/a. Diese Werte sind nur gültig für den durch die Spaltspurenalte r erfaßten Zeitraum von vor rund 5 bis 11 Ma. Nach bislang noch unveröffentlichten Untersuchungsergebnissen resultiert für die Zentralgneisareale des östlichen Tauernfensters eine durchschnittliche Hebungsr ate von 0,2 mm/a, gültig für den Zeitraum von vor 7 bis 24 Ma (STAUFENBERG, 1985).

Höhenkorrektur der Apatit-Spaltspurenalte r

Für die Beurteilung regionaler Hebungsinhomogenitäten muß, wie oben erwähnt, die starke Höhenabhängigkeit der Spaltspurenalte r als Variable ausgeschaltet werden. Hierzu ist eine Höhenkorrektur erforderlich, die mit der Wahl eines bestimmten Bezugsniveaus die Kartierung von Gebieten gleicher oder sehr ähnlicher Hebungsbzw. Abkühlungsgeschichte ermöglicht. In Anlehnung an die Untersuchungen von WAGNER et al. (1977) über die Hebungsbzw. Abkühlungsgeschichte der Schweizer Zentralalpen wurde das 1000 m ü.NN - Bezugsniveau für die Höhenkorrektur verwendet.

Der Schnittpunkt der aus einer Probengruppe errechneten Regressionsgerade mit dem 1000 m Bezugsniveau (Abb.3) ist maßgebend für die Zuordnung der Proben zu den Gebieten gleicher Hebungsgeschichte. Die Gebiete gleicher Hebungsgeschichte wurden nach Zeitintervallen wie folgt gegliedert:

Apatit-Spaltspurenalte r korrigiert auf das 1000 m ü.NN Bezugsniveau	Signatur
kleiner als 5 Ma	Kreise offen
zwischen 5 und 6,5 Ma	" viertel gefüllt
zwischen 6,5 und 8 Ma	" halb gefüllt
zwischen 8 und 11 Ma	" dreiviertel gefüllt
älter als 11 Ma	" geschlossen

Die Abb.4 zeigt nun die regionale Verteilung der korrigierten und mit entsprechender Signatur versehenen Apatit-Spaltspurenalte r.

Der Tauernfensterrand und das Gebiet um den Granatspitzkern sind durch deutliche Alterssprünge gekennzeichnet. Symmetrisch zur Tauernfenster-Längsachse treten im nördlichen und südlichen Austroalpin zunehmend höhere Alter auf, was darauf hinweist, daß diese Gesteinsserien bei etwas langsamerer Hebungsgeschwindigkeit die 1000-Isoterme wesentlich früher durchschritten haben als die des Tauernfensters. Insgesamt ergibt sich eine gute Kongruenz der Spaltspurenalte rverteilung mit dem tektonischen Großbau verbunden mit einer relativ homogenen Hebungsbzw. Abkühlungsgeschichte.

Als Anomalie in der sonst relativ homogenen Spaltspurenalte rverteilung innerhalb des Tauernfensters treten im Granatspitzmassiv die niedrigsten Spaltspurenalte r des gesamten Untersuchungsgebietes auf. Am Rand des Granatspitzmassivs liegen deutliche Alterssprünge vor, obwohl seine Hebungsr ate mit 0,4 mm/a im Zeitraum zwischen 10 und 5 Ma etwa den gleichen Betrag hatte, wie die des unmittelbar umgebenden Areals. Für diese Altersunterschiede sind vorerst zwei Modelle als Erklärung heranzuziehen:

- 1) Es erfolgte im Zeitraum von vor 5 Ma bis jetzt eine isoliert blockartige, schnellere Hebung des Granatspitzmassivs gegenüber seiner Umgebung. Werden für den Zeitraum während dieses Hebungsvorganges gleichbleibend ebene Isothermen vorausgesetzt, so ist eine Beschleunigung des Granatspitzmassivs von 0,4 mm/a auf mindestens 0,6 mm/a Hebungsgeschwindigkeit zwingend zu folgern.
- 2) Bei gleichbleibender Hebungsr ate von 0,4 mm/a zeigten die Isothermen im Bereich des Granatspitzmassivs eine domartige Aufwölbung. Ein derartiger Wärme-

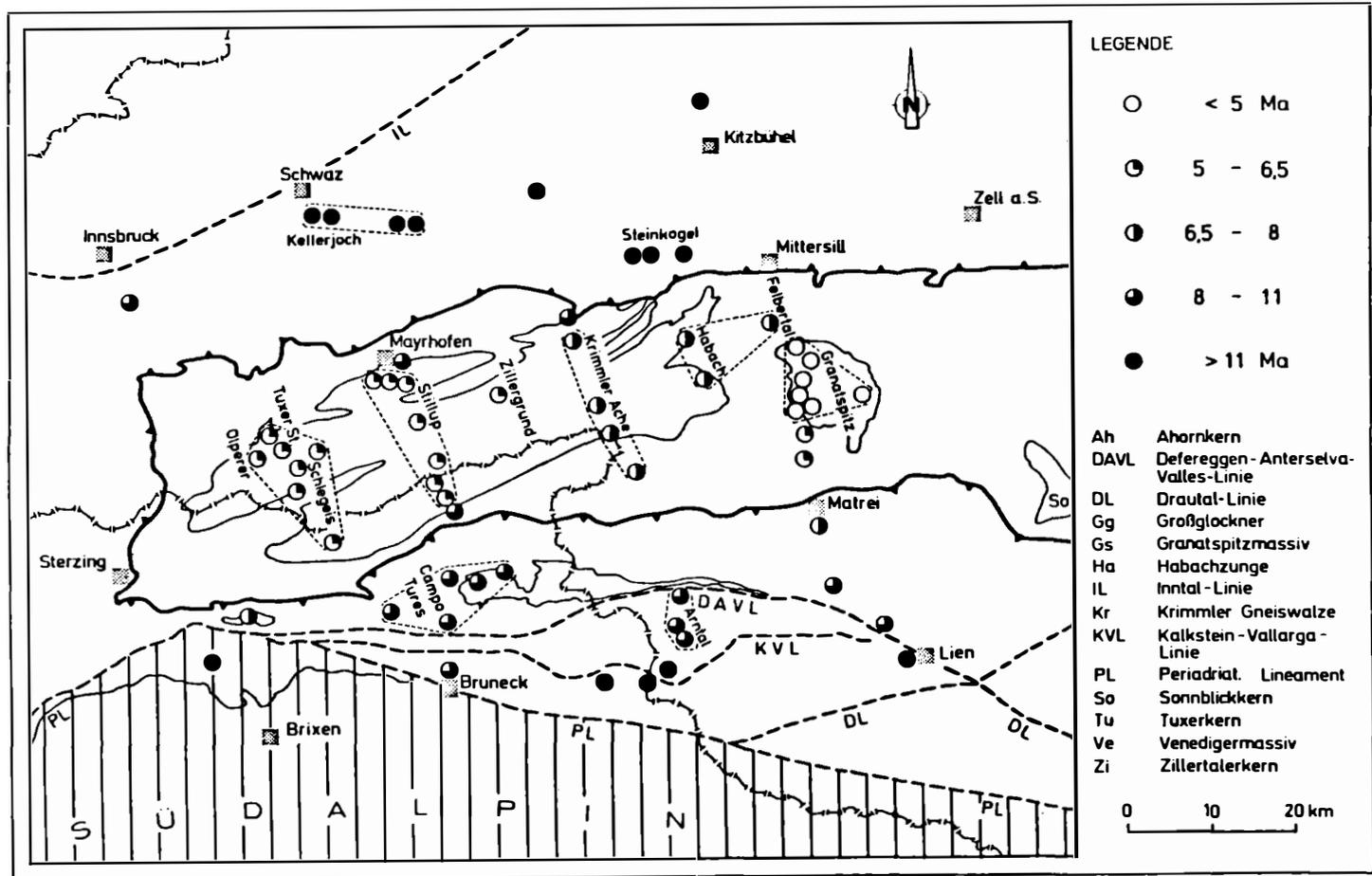


Abb.4: Regionale Verteilung der auf das 1000 m Bezugsniveau höhenkorrigierte Apatit-Spaltspurenalter im Bereich des mittleren und westlichen Tauernfensters und seiner nördlichen und südlichen austroalpinen Umrahmung.

dom könnte durch einen lokal erhöhten Wärmefluß aus der Tiefe oder durch eine im Zentralgneis lokal erhöhte Wärmeproduktion gegenüber den umgebenden Metabasiten der Schieferhüllen bestanden haben. Da derzeit keine Informationen über die aktuelle Tiefenlage der 100° C-Isotherme im Raum des Tauernfensters vorliegen, bleibt diese Frage vorerst ungeklärt.

Die signifikanten Alterssprünge sind am besten durch Modell 1) erklärbar, denn zumindest im Felbertal an der Nordwestflanke des Granatspitzmassivs sind angenähert N-S-verlaufende Vertikalstörungen mit hohen vertikalen Versetzungsbeträgen nachgewiesen (BRIEGLEB, mündl.Mitt. 1984). Oberlieferungen aus dem Mittelalter sprechen sogar von lokalen Erdbeben, die z.B. im Felbertal und im Amertal zu größeren Bergstürzen geführt haben sollen (HÖLL, 1975; PESTAL, 1983).

Glimmer-Abkühlalter im Vergleich zu den Apatit-Spaltspurenaltern

Wie eingangs erwähnt, liegen aus dem Raum des Tauernfensters diverse Rb/Sr- und K/Ar-Glimmer-Abkühlungsalter von verschiedenen Autoren vor. Um die Spaltspurenalter an diese Daten direkt ankoppeln zu können, muß gewährleistet sein, daß die verwendeten Werte möglichst von ein- und derselben Probe, oder, sofern nicht verfügbar, von einer möglichst nahegelegenen Probe derselben topographischen Höhe stammen. Aus den Gebieten Habach, Krimmler Ache, Zillergund und Schlegeis wurden die Apatit-Spaltspurenalter und die aus der Literatur verfügbaren Glimmer-Abkühlungsalter in das Diagramm "Modellalter gegen Schließungstemperatur" eingetragen (Abb.5). In diesem Beispiel sind die Alterswerte auf eine Höhe von 1800 m ü.NN normiert. Soweit vorhanden wurden die Fehlerbalken ergänzt. Diesem Diagramm ist klar zu entnehmen, daß sowohl die Spaltspurenalter als auch die Rb/Sr- und K/Ar-Biotit-Alter in etwa gleicher Tendenz von Ost nach West jünger werden. Demzufolge wurde das westliche gegenüber dem zentralen Tauernfenster kontinuierlich etwas schneller herausgehoben, wonach heute in den Zillertaler Alpen ein tieferes Anschnittniveau zutage liegt. Dieses Verhalten kann im Detail entlang eines Ost-West Profiles, beginnend vom Granatspitzmassiv bis hin zum Fenntal am Westrand des Tauernfensters studiert werden (Abb.6). Die entsprechenden Abkühlungsalter von K/Ar-Hellglimmer, Rb/Sr-Biotit und Apatit-Spaltspuren in Ma sind über eine maßstabgetreue horizontale Entfernung von 90 km aufgetragen. Von Ost nach West ist eine in etwa gleichförmige Abnahme der Abkühlungsalter zu verzeichnen. Danach durchschritt das westliche Tauernfenster die 500° C, die 350° C und die 100° C-Isotherme zwar schneller, aber jeweils wesentlich später als das zentrale Tauernfenster. Sowohl im zentralen als auch im westlichen Tauernfenster ist zu jüngeren Altern hin eine geringe Abnahme der Hebungsgeschwindigkeit festzustellen.

Der Granatspitz ist - hier wiederum deutlich erkennbar - an seiner Westflanke in Höhe des Felbertales durch einen deutlichen Alterssprung abgetrennt. Glimmer-Abkühlungsaltersbestimmungen liegen aus dem Raum des Granatspitz leider noch nicht vor. Dennoch können für den Bereich zwischen dem Granatspitzkern und dem Zillertaler Kern sehr ähnliche Beträge der Abkühlungsraten abgeschätzt werden. Unter Zugrundelegung eines konstanten geothermischen Gradienten von 30°/km resultiert bei einer durchschnittlichen Hebungsrates von 0,4 - 0,5 km/Ma eine durchschnittliche Abkühlungsrate von 12° - 15° C/Ma.

Diskussion und Schlußfolgerungen

Der Datenvergleich zwischen den etwa gleichgroßen Gebieten der Schweizer Zentralalpen (WAGNER et al., 1977) und den zentralen Ostalpen (GRUNDMANN & MORTEANI, 1985; STAUFENBERG, 1985) läßt erkennen, daß die blockartige Hebung des Tauernfensters insgesamt homogener verlief, als die in mehreren Teilbereichen unterschiedlich schnell aufgestiegenen Schweizer Zentralalpen. Dort wurde zwar eine sehr ähnliche Variationsbreite von Spaltspurenaltern datiert, jedoch insgesamt höhere fossile Hebungsraten von bis zu 1,3 mm/a und vor allem stärkere Hebungsgeschwindigkeiten.

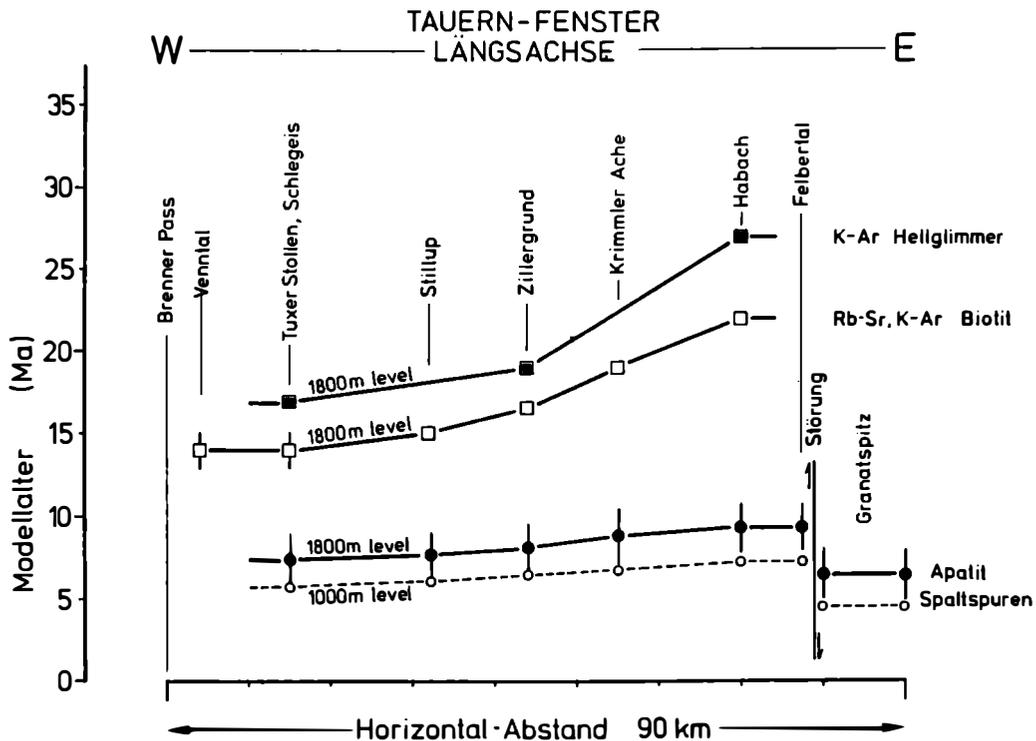
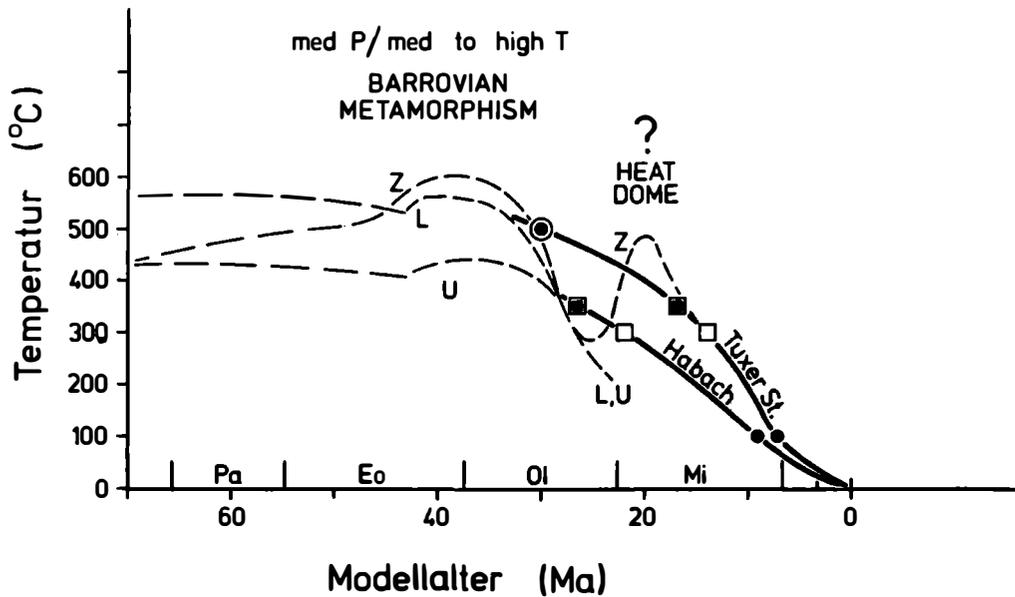


Abb.6: K/Ar- und Rb/Sr-Glimmeralter nach RAITH et al. (1978) und SATIR (1975) und die auf das 1800 m üNN-Bezugsniveau höhenkorrigierten Apatit-Spaltspurenalter nach GRUNDMANN & MORTEANI (1985), aufgetragen über ein Ost-West Profil vom Granatspitz bis zum Fenntal im Tauernfenster. Alle Alterswerte sind auf das 1800 m üNN-Bezugsniveau korrigiert.

inhomogenitäten errechnet. Eine überraschende Diskrepanz ergibt sich aus dem Vergleich zwischen der innerhalb des Tauernfensters relativ einheitlich niedrigen fossilen Hebungsrates von 0,2 bis 0,5 mm/a (STAUFENBERG, 1985; GRUNDMANN & MORTEANI, 1985) und der von SENFTL & EXNER (1973) nach Präzisionsnivelements errechneten aktuellen Hebungsrates von rund 1 mm/a im Raume Mallnitz/Bad Gastein im östlichen Tauernfenster. Dagegen zeigen sich erstaunlich gute Übereinstimmungen der radioemtrisch bestimmten Hebungsrates mit der Voraussage von FRISCH (1976), der eine durchschnittliche fossile Rate von 0,5 mm/a für die zentrale Achse des Tauernfensters ableitete, sowie eine Übereinstimmung mit der Voraussage von RAITH et al. (1980), die für das südliche Großvenedigergebiet eine durchschnittliche Hebungsrates von 0,4 mm/a vorschlugen. Eine Revision des von KREUZER et al. (1978) entworfenen alpidischen Metamorphoseverlaufes im Diagramm "Temperatur gegen Modellalter" gibt zu erkennen, daß die Annahme eines dritten jungalpidischen Metamorphoseereignisses als "heat dome" vor etwa 20 Ma unrealistisch ist (Abb. 7). Gestrichelt dargestellt sind die angenommenen Temperaturverläufe der Zentralgneise "Z", der Unteren Schieferhülle "L" und der Oberen Schieferhülle "U". Die lagerichtige Eintragung der Rb/Sr- und K/Ar-Biotit-Abkühlungsalter sowie der Apatit-Spaltspurenalter aus dem Habachtal und dem Tuxer Stollen, Zillertal zeigt eindeutig, daß sich im Tauernfenster diese dritte sog. "Neoalpine" Metamorphose in Form eines extrem schnell auf- und wieder absteigenden Wärmedoms radiometrisch nicht nachweisen läßt.



● Rb-Sr Hellglimmer ■ K-Ar Hellglimmer □ Rb-Sr, K-Ar Biotite ● Spaltspuren Apatite

Abb.7: Revision des von KREUZER et al. (1978) vorgeschlagenen alpidischen Metamorphoseverlaufes im Diagramm "Temperatur gegen Modellalter" (gestrichelt dargestellt) für die Zentralgneiskerne (Z), die Untere Schieferhülle (L) und die Obere Schieferhülle (U) im mittleren und westlichen Tauernfenster. Die Interpretation eines Wärmedoms (heat dome) um etwa 20 Ma erscheint unrealistisch.

Die Hebungsgeschichte des Untersuchungsgebietes wurde wahrscheinlich durch die Dichteverteilung seines Untergrundes beeinflusst. Eine Vorstellung über die aktuelle Dichteverteilung des Untergrundes der zentralen Ostalpen geben hierzu die Isolinien der Bouguer-Schwere (in mgal) nach MAKRIS (1971) und WEIHRAUCH (1983). Die Ost-West verlaufende Längsachse des Tauernfensters liegt fast dekungsgleich über einer ausgeprägten negativen Bouguer-Anomalie. Insbesondere die jüngsten Apatit-Spaltspurenalter im Granatspitzmassiv erscheinen direkt im Bereich der mit minus 170 mgal stärksten negativen Bouguer-Anomalie der zentralen Ostalpen (Abb.8).

Zur Beantwortung der Frage nach signifikanten Alterssprüngen bzw. hohen Versetzungsbeträgen entlang der großtektonischen Linien, wie z.B. der Tauernfenster-Randstörung reicht das vorhandene Datenmaterial noch nicht aus. Immerhin ist festzustellen, daß starke Hebungsinhomogenitäten nördlich und südlich der Zentralgneiskörper innerhalb und am Rande des Tauernfensters existieren, wo vertikale Versetzungsbeträge von einigen hundert bis über 1000 m festzustellen sind.

Die Interpretation von Apatit-Spaltspurenaltern kombiniert mit Rb/Sr- und K/Ar-Glimmer-Abkühlungsaltern legt nahe, daß eine Diskussion der Hebungs- und Abkühlungsgeschichte von Arealen mit dem starken Relief eines Hochgebirges nur auf der Grundlage von Modellaltern derselben topographischen Höhe geführt werden sollte. Handelt es sich bei datierten Proben um Fallstücke, so ist zu berücksichtigen,

sichtigen, daß vor allem die Höhe des Herkunftsortes nicht immer zweifelsfrei geklärt werden kann.

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse belegen und unterstreichen die Anwendbarkeit der Apatit-Spaltspurenaltersbestimmungsmethode insbesondere in Verbindung mit den zu höheren Temperaturen hin anschließenden Rb/Sr- und K/Ar- Altersbestimmungen, womit durchaus ein Beitrag zur Klärung der jüngeren thermischen und tektonischen Geschichte eines Orogens geleistet werden kann.

Literatur

- FRISCH, W.: Ein Modell zur alpidischen Evolution und Orogenese des Tauernfensters. - Geol. Rundschau, 65, 2, 375-393, Stuttgart 1976.
- GRUNDMANN, G. & MORTEANI, G.: The young uplift and thermal history of the central Eastern Alps (Austria/Italy), evidence from apatite fission track ages. - Jahrb. Geol. B.-A., 128, 197-216, Wien 1985.
- HAMMERSCHMIDT, K.: Isotopengeologische Untersuchungen am Augengneis vom Typ Campo Tures bei Rain in Taufers, Südtirol. - Mem. Ist. Geol. Miner. Univ., Padova, 34, 273-300, Padova 1981.
- HOERNES, S.: Untersuchungen zur Metamorphose in den westlichen Hohen Tauern (Österreich). - TMPM, 20, 81-106, Wien 1973.
- HOERNES, S. & FRIEDRICHSEN, H.: Oxygen isotope studies on metamorphic rocks of the western Hohe Tauern area (Austria). - SMPM, 54, 2-3, 769-788, Zürich 1974.
- HÖCK, V.: Distribution maps of minerals of the Alpine metamorphism in the penninic Tauern window, Austria. - Mitt. Österr. geol. Ges., 71/72, 119-127, Wien 1980.
- HÖLL, R.: Die Scheelitlagerstätte Felbertal und der Vergleich mit anderen Scheelitvorkommen in den Ostalpen. - Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl. Abh. N.F., 157, 114 S., München 1975.
- KREUZER, H., MORTEANI, G. & ROEDER, D.: Geodynamic Evolution on the Eastern Alps along a Geotraverse. - In "Mobile Earth", Internat. Geodyn. Proj., DFG Final Report of the FRG, CLOSS, H., GEHLEN, K.v., ILLIES, H., KUNTZ, E., NEUMANN, J. & SEIBOLD, E. (Ed.), 64 p., (Harald Boldt Verlag), Boppard 1978.
- MAKRIS, J.: Aufbau der Kruste in den Ostalpen aus Schweremessungen und die Ergebnisse der Refraktionsseismik. - Hamburger Geophys. Einzelschr., 15, 65 S., Hamburg 1971.
- MORTEANI, G.: Petrology of the Tauern Window, Austrian Alps. - Fortschr. Miner., 52, 1, 195-220, Stuttgart 1974.
- PESTAL, G.: Beitrag zur Kenntnis der Geologie in den mittleren Hohen Tauern im Bereich des Amer- und des Felbertales (Pinzgau/Salzburg). - Diss. Univ. Wien, 117 S., Jochberg 1983.
- RAASE, P. & MORTEANI, G.: The potassic feldspar in metamorphic rocks of the western Hohe Tauern area, Eastern Alps. - Geol. Rundschau 65, 422-436, Stuttgart 1976.
- RAITH, M., RAASE, D., KREUZER, H. & MOLLER, D.: The age of the alpidic metamorphism in the western Tauern Window, Austrian Alps, according to radiometric dating. - In CLOSS, H., ROEDER, D.H., SCHMIDT, K. (Ed.): "Alps, Apennines, Hellenides", Inter-Union Commission on Geodynamics, Scientific Report No. 38, 140-148, Stuttgart 1978.

- RAITH, M., MEHRENS, Ch. & THÖLE, W.: Gliederung, tektonischer Bau und metamorphe Entwicklung der penninischen Serien im südlichen Venediger-Gebiet, Osttirol. - Jahrb. Geol. B.-A., 123, 1-37, Wien 1980.
- SATIR, M.: Die Entwicklungsgeschichte der westlichen Hohen Tauern und der südlichen Ötztalmasse auf Grund radiometrischer Altersbestimmungen. - Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, 30, 84 S., Padova 1975.
- SATIR, M. & FRIEDRICHSEN, H.: Sauerstoff- und Wasserstoffisotopenuntersuchungen an polymetamorphen Gesteinen der westlichen Hohen Tauern. - Fortschr. Miner. 59, Beih. 1, 258-259, Stuttgart 1981.
- SATIR, M. & FRIEDRICHSEN, H.: Die Entwicklungsgeschichte der westlichen Hohen Tauern auf Grund der radiometrischen Altersbestimmungen und stabilen Isotope. - Abstr. Tagung Geo. Verein, Berchtesgaden 1983.
- SELVERSTONE, J., SPEAR, F.S., FRANZ, G. & MORTEANI, G.: High pressure metamorphism in the SW Tauern Window, Austria: P-T path from Hornblende-Kyanite-Staurolite schists. - Journ. Petrol., 25, Part 2, 501-531, 1984.
- SENFTEL, E. & EXNER, Ch.: Rezente Hebung der Hohen Tauern und geologische Interpretation. - Verh. Geol. B.-A., 1973, 209-234, Wien 1973.
- STAUFENBERG, H.: Hebungs- und Abkühlungsgeschichte des östlichen Tauernfensters und seiner Ostalpinen Umrahmung, abgeleitet aus Apatit-Spaltspurenaltern. - Diss. TU München 1985.
- WAGNER, G.A., REIMER, M. & JÄGER, E.: Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: The uplift and cooling history of the central alps. - Mem. Ist. Geol. Miner. Univ., Padova, 30, 27 S., Padova 1977.
- WEIHRAUCH, W.: Entwicklung von Graphik-Ausgabeprogrammen für die interaktive 3-D Berechnung von Dichtemodellen mit Anwendungsbeispielen aus dem Gebiet der Ostalpen. - Unveröffentl. Diplomarbeit Univ. Clausthal 1983.