Spaltspuren in Apatit und Zirkon : Schlüssel zur Niedertemperatur- und Hebungsgeschichte der Alpen

Autor(en): **Hejl, Ewald / Wagner, Günther A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie**

Band (Jahr): **71 (1991)**

Heft 1

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-54346

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

SCHWEIZ. MINERAL. PETROGR. MITT. 71, 63–71, 1991

Frau Prof. Dr. Emilie Jäger gewidmet

Spaltspuren in Apatit und Zirkon: Schlüssel zur Niedertemperatur- und Hebungsgeschichte der Alpen

von *Ewald Hejl*[1] und *Günther A. Wagner*[1]

Abstract

Several concepts for the geological interpretation of fission track ages were established by case studies on Alpine rocks. The long term stability of fission tracks in apatite and zircon was investigated on samples with known cooling history. The effective closure temperatures for fission tracks in these minerals are in the order of 100 and 240 °C respectively. In the Alps the clear dependence of fission track ages on topographic elevation was observed for the first time. With some well known restrictions the age increase with altitude may reflect the uplift rate. The importance of fission track dating for our knowledge of the Alpine orogenesis is shown for several examples.

Keywords: Fission track dating, apatite, zircon, uplift rate, Alpine orogenesis.

Zusammenfassung

Am Beispiel der Alpen wurden grundlegende Konzepte zur geologischen Interpretation von Spaltspuraltern entwickelt. Die Langzeitstabilität von Spaltspuren in Apatit und Zirkon wurde an Gesteinseinheiten mit bekannter Abkühlgeschichte untersucht. Die effektiven Schliessungstemperaturen der Spaltspurensysteme dieser beiden Minerale liegen in der Grössenordnung von 100 bzw. 240 °C. Die in den Alpen erstmals beobachtete Zunahme der Apatitspaltspuralter mit der topographischen Höhe der Probenlokalität führte zur These des sogenannten Hebungsprofils, wobei der Anstieg der Alters-Höhen-Kurve als Hebungsgeschwindigkeit aufgefasst wurde. Die Bedingungen, unter denen eine solche Interpretation gültig ist, werden ausführlich diskutiert. Der Beitrag der Spaltspurdatierung zur Erforschung der alpinen Orogenese wird an Beispielen erläutert.

Die Alpen gehören zu den am frühesten und dichtesten mittels Spaltspuren untersuchten Gebieten. Die ersten Spaltspuralter alpiner Minerale wurden schon Anfang der siebziger Jahre – noch ganz im Frühstadium der Spaltspurmethode – veröffentlicht. Dabei wurden Epidote (REIMER und WAGNER, 1971) und Apatite (WAGNER und REIMER, 1972) der Schweizer Zentralalpen datiert. Im Laufe der folgenden 20 Jahre sind dann eine Vielzahl von Untersuchungen in den West-, Zentral- und Ostalpen hinzugekommen, so dass gegenwärtig mehr als 400 Spaltspurdaten existieren dürften, meist an Apatit und Zirkon. Aufgrund der frühen und intensiven Beschäftigung mit den Alpen sind dort auch grundlegende Konzepte der Altersinterpretation erarbeitet worden.

Die Anwendung des Apatitspaltspursystems in den Alpen verfolgte bewusst das Ziel, das Konzept des Abkühlalters auf ca. 100 °C, das erst wenige Jahre vorher im variszischen Grundgebirge entwickelt worden war (WAGNER, 1968), an Gesteinseinheiten mit bekannter Abkühlgeschichte zu überprüfen. Dazu boten sich die Zentralalpen an, deren postmetamorphes Abkühlverhalten zwischen 500 und 300 °C von Emilie Jäger und ihren Mitarbeitern in Bern mittels der K-Ar- und Rb-Sr-Systematika in Hell- und Dunkelglimmern bereits gut untersucht war (JÄGER, 1973). Für die Spaltspurdatierungen wurden die Apatite von denselben Gesteinsproben, die bereits vorher mit K–Ar- und Rb–Sr bearbeitet worden waren, abgetrennt. Es wurden Spaltspuralter zwischen 2 und 17 Ma gefunden. Die Tatsache,

[1] Max-Planck-Institut für Kernphysik, D-6900 Heidelberg.

dass die Apatitspaltspuralter systematisch jünger als die Rb-Sr-Biotitalter (Abkühlung auf ≈ 300 °C) sind, stützte ihre Interpretation als ≈ 100 °C Abkühlalter. Damit war es möglich geworden, den T-t-Pfad unter die 300 °C-Temperaturmarke auch in den Niedertemperaturbereich zu verfolgen. Ein weiteres T-t-Wertepaar für die Abkühlungsgeschichte der Alpen hat HURFORD (1986) mit dem Zirkon hinzugefügt: Die effektive Schliesstemperatur für Spaltspuren in Zirkon beträgt ≈ 240 °C und füllt damit die Lücke zwischen dem Biotit-Rb-Sr- und dem Apatitspaltspur-System.

Da die Abkühlung im Niedertemperaturbereich wesentlich von der Gesteinshebung bestimmt wird, spiegelt die regionale Verteilung der Apatitspaltspuralter – vorausgesetzt, der geothermische Gradient bleibt regional konstant – die junge Alpenhebung wider. Diese Interpretation passt auch gut zu der Zunahme der Apatitspaltspuralter mit der topographischen Höhe, eine Erscheinung, die in den Alpen überhaupt erstmals beobachtet wurde (WAGNER und REIMER, 1972), wobei der Anstieg der Alters-Höhen-Kurve direkt als Hebungsgeschwindigkeit aufgefasst wurde. Das Apatitspaltspursystem besitzt damit zwei unabhängige, sich ergänzende Informationsquellen bezüglich der Rekonstruktion der Hebungsgeschichte: Einerseits ergibt sich die (mittlere) Hebungsgeschwindigkeit aus der (mittleren) Abkühlgeschwindigkeit zwischen der 100 °C-Abkühlung und dem Erreichen der Oberfläche aufgrund der Beziehung *Hebungsgeschwindigkeit = Abkühlgeschwindigkeit / geothermischer Gradient,* wobei der geothermische Gradient bekannt sein muss, andererseits kann die Paläohebungsgeschwindigkeit direkt aus dem Diagramm, in dem die topographische Höhe der Probenentnahme gegen das Apatitspaltspuralter (Abb. 1) aufgetragen ist, entnommen werden:

Hebungsgeschwindigkeit = Anstieg der Alters-Höhen-Kurve.

Diese Konzepte haben inzwischen allgemeine Anerkennung gefunden und sind insbesondere durch Längenanalysen an Spaltspuren weiterentwickelt worden. Sie dürfen aber nicht unkritisch übernommen werden. Die Frage, unter welchen Bedingungen Apatitspaltspuralter als Hebungsalter aufgefasst werden können, wird im folgenden diskutiert.

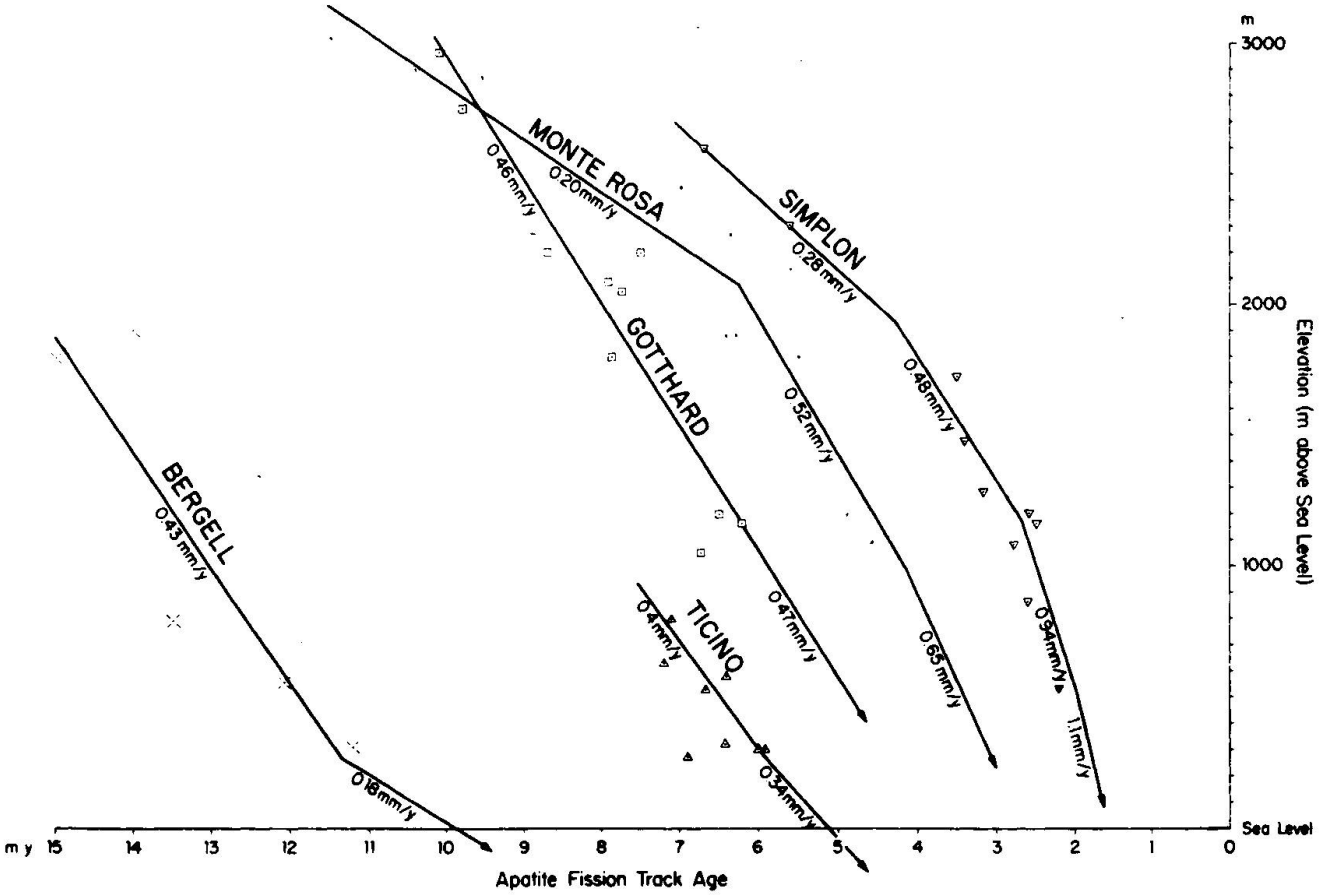

Abb. 1 Die Höhenabhängigkeit der Apatit-Spaltspuralter in den Schweizer Zentralalpen und die daraus abgeleiteten Hebungsraten (aus WAGNER et al., 1977).

1. Apatitspaltspuralter als Hebungsalter

Um ein Spaltspuralter als Hebungsalter interpretieren zu können, muss es nachweislich ein Abkühlalter sein. Im Gegensatz zu anderen radiometrischen Alterssystemen existiert bei Spaltspuren, zumindest in Apatit, mit der *Spaltspurlänge* ein internes Kriterium, das die Diagnostizierung eines Abkühlalters zulässt. Bezüglich der Spaltspurstabilität gibt es drei Temperaturzonen: die Zone I mit vollkommener Ausheilung, die Zone II mit partieller Ausheilung und die Zone III mit vollkommener Spaltspurstabilität. Für Apatit sind die Zonengrenzen gut bekannt: ≈ 140 °C (I/II) und ≈ 60 °C (II/III). Die effektive Schliesstemperatur entspricht ungefähr der Mitte der Zone II, also ≈ 100 °C. Diese Temperaturwerte werden etwas von der Abkühlgeschwindigkeit und dem Apatitchemismus (GREEN et al., 1989) beeinflusst. Die in Zone II gebildeten Spaltspuren besitzen mehr oder weniger verkürzte Längen. Apatit, der während der Abkühlung die Zonen II und III stetig durchlaufen hat, ist durch eine bestimmte Längenverteilung charakterisiert; ohne hier weiter auf Einzelheiten einzugehen, liegt diese bei *confined tracks* (im Inneren des Minerals angeätzte Spuren) zwischen 12 und 14 µm (GLEADOW et al., 1986) und bei *projizierten Spuren* (an der Oberfläche angeschnittene Spuren) mit c_s/c_i-Werten zwischen 0,5 und 0.7 (WAGNER, 1988). Für andere Minerale ist eine derartige Systematik noch nicht entwickelt. Nahezu alle in den Alpen untersuchten Apatite sind aufgrund dieser Kriterien postmetamorphe Abkühlalter (einige wenige Apatitspaltspuralter sind Mischalter).

Bei der Hebung von Krustenblöcken passieren höher positionierte Gesteinsproben die 100 °C-Isotherme (effektive Schliesstemperatur des Apatitspaltspursystems) früher als tiefer positionierte. Daher steigt das Alter mit zunehmender Höhe, was sowohl an Proben aus verschiedener topographischer Höhe (bei möglichst geringer horizontaler Entfernung) als auch aus Bohrkernen regelmässig beobachtet werden kann. In einem Alters-Höhen-Diagramm erzeugt die Gebirgshebung ein charakteristisches Hebungsprofil; aber umgekehrt ist nicht jedes Vertikalprofil, in dem mit steigender Probenhöhe die Alter zunehmen, auch ein Hebungsprofil, d.h. ein in einem solchen Profil beobachteter Kurvenanstieg ist nicht notwendigerweise eine Hebungsgeschwindigkeit, was leider häufig übersehen wird.

In Abb. 2 sind die Zusammenhänge zwischen Krustenhebung und vertikaler Altersverteilung der Apatitspaltspuren schematisch dargestellt. Im Zeitraum t_1 bis t_2 hebt sich der Krustenblock um einen bestimmten Betrag und löst dadurch Denudation aus (Zeitraum t_2 bis t_3). Die beiden Vorgänge laufen sicherlich nicht getrennt nacheinander, sondern mehr oder weniger verzögert ab. Es ist nicht unbedingt zu erwarten, dass der Hebungsbetrag jederzeit völlig durch die Abtragung kompen-

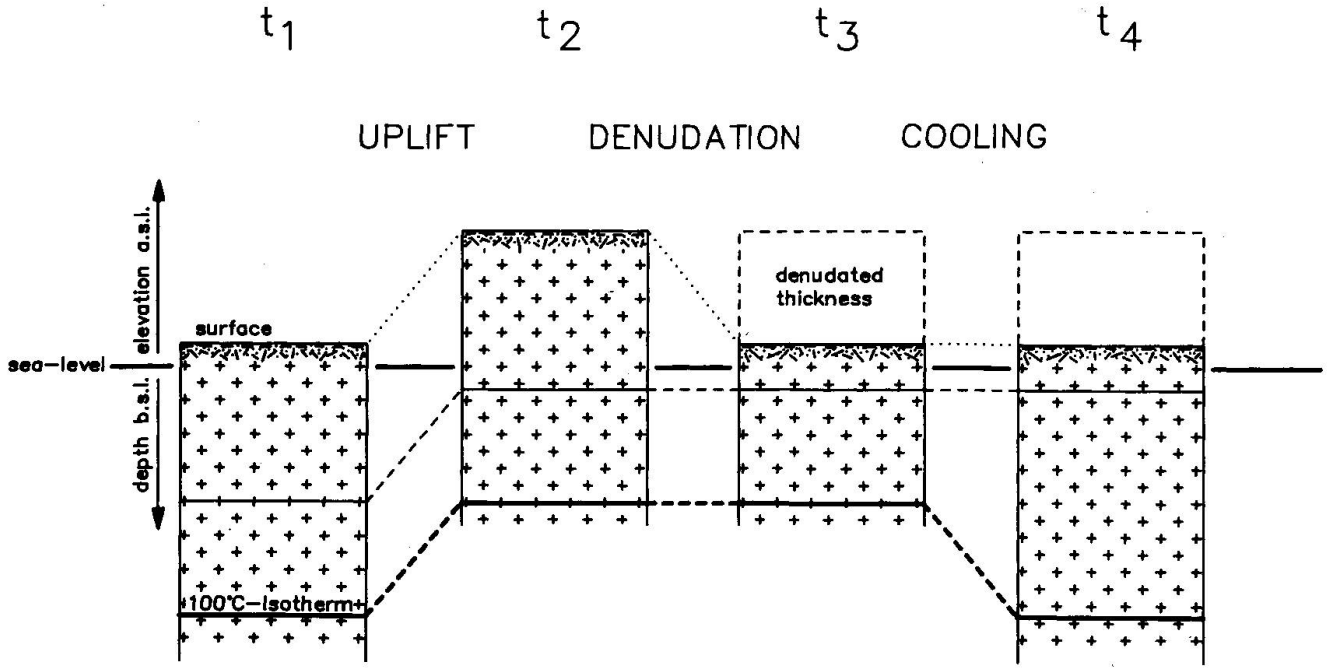

Abb. 2 Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen tektonischer Hebung, Abtragung und Abkühlung einer Gesteinssäule (Erklärung im Text).

siert wird. Das Temperaturregime im Krustenblock und die 100 °C-Isotherme werden im Zeitraum t_1 bis t_2 mitgehoben. Durch das Tieferverlegen der Oberfläche aufgrund der Abtragung kühlt die Erdkruste im Zeitraum t_3 bis t_4 aus, wenn auch nicht getrennt nach der Abtragung, sondern mit etwas Verzögerung. Erst dadurch senkt sich die 100 °C-Isotherme relativ zur Gesteinssäule und erzeugt ein Vertikalprofil der Apatitspaltspuralter. Präzise ausgedrückt, zeichnet das Alterstiefenprofil den Zeitpunkt und die Geschwindigkeit der Isothermenabsenkung und nicht der tektonischen Hebung des Krustenblocks auf. Unter der Voraussetzung eines zeitlich konstanten geothermischen Gradienten bleibt die 100 °C-Isotherme in konstanter Tiefe unter Geländeoberfläche; dann ergeben die Apatitspaltspuralter Zeitpunkt und Geschwindigkeit der Denudation. Nur unter der Voraussetzung eines konstanten geothermischen Gradienten *und* einer völligen Hebungskompensation durch die Denudation (d.h. Hebung = Denudation) ergeben die Apatitspaltspuralter Zeitpunkt und Geschwindigkeit der tektonischen Hebung (gegenüber Meeresniveau). Quantitativ sind die Verzögerungen schwer einzuschätzen, sicherlich dürfen sie bei schneller Hebung (≈ 1 km/Ma) nicht vernachlässigt werden (PARRISH, 1985).

Demgegenüber ist besonders bei niedrigen Hebungsgeschwindigkeiten (≈ 10 m/Ma) ein anderer störender Einfluss, der durch die Existenz der Zone II mit partieller Spaltspuraushеilung verursacht wird, zu berücksichtigen. Bisher ist die 100 °C-Isotherme vereinfacht als Temperaturschwelle behandelt worden, bei der die Spaltspurenakkumulation plötzlich und voll einsetzt. Tatsächlich nimmt aber innerhalb der Zone II zwischen ≈ 140 °C und ≈ 60 °C die Spaltspurstabilität mit sinkender Temperatur stetig zu. Dies hat zur Folge, dass selbst eine plötzliche Änderung (Zeitpunkt t_c, Abb. 3) einer Hebungsgeschwindigkeit von u_1 zu u_2 keinen Knick, sondern eine Krümmung im Alters-Höhen-Profil erzeugen würde. Der neue, der Hebungsgeschwindigkeit u_2 entsprechende Anstieg m_2 im Alters-Höhen-Profil bildet sich erst nach einer Zeit aus, die erforderlich ist, um eine Probe konstant mit u_2 durch die gesamte Zone II hindurchzuheben. Für eine Hebungsgeschwindigkeit vom 10 m/Ma würde das einige 100 Ma dauern. Das impliziert aber auch, dass Alters-Höhen-Profile bestenfalls ein vertikales Auflösungsvermögen von ≈ 1 km für Änderungen der Hebungsgeschwindigkeit besitzen. Niedrige Steigungen in Alters-Höhen-Profilen sind meist nicht als Hebungsgeschwindigkeiten aufzufassen und repräsentieren den Ausheilgradienten der Spaltspuren innerhalb der Zone II. Die Spaltspuralter solcher Profile sind keine Abkühlalter, sondern Mischalterstypen und sollten dementsprechend auch aufgrund ihrer Spaltspurlängenverteilung zu diagnostizieren sein.

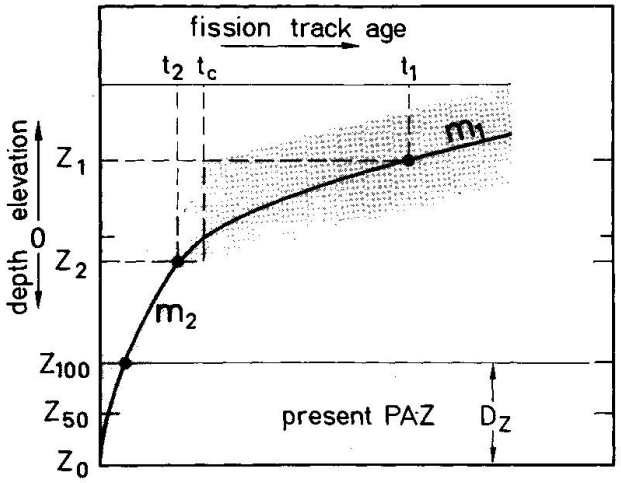

Abb. 3 Ideales Höhen-Profil der Apatit-Spaltspuralter eines Krustenblocks, der zunächst mit konstanter Geschwindigkeit und ab dem Zeitpunkt t_c plötzlich schneller gehoben wurde. D_z = gegenwärtiger Tiefenbereich der Temperaturzone mit teilweiser Spurenausheilung (partial annealing zone, PAZ); Z_0 = gegenwärtige Tiefenlage der Mindesttemperatur für die vollständige Spurenausheilung; Z_{50} = gegenwärtige Tiefe, in der neugebildete Spaltspuren um 50% verkürzt werden (Isotherme der effektiven Schliessungstemperatur); Z_{100} = gegenwärtige Tiefenlage der Maximaltemperatur für die vollständige Spurenstabilität (keine Verkürzung); Z_1 und Z_2: Grenzen der PAZ zum Zeitpunkt t_c. Weitere Erklärungen im Text.

2. Zentral- und Westalpen

In den Westalpen sind bisher das Gran-Paradiso-Massiv (CARPENA, 1985; HURFORD und HUNZIKER, 1989) und die Sesia-Lanzo-Zone (HURFORD und HUNZIKER, 1985), in den Zentralalpen das Lepontin (WAGNER und REIMER, 1972; WAGNER et al., 1977, HURFORD, 1986), das Bergeller Massiv (WAGNER et al., 1979), das Aar- und Gotthardmassiv (SCHAER et al., 1975; WAGNER et al., 1977; MICHALSKI und SOOM, 1990) sowie die Suretta (JÄGER et al., in Vorbereitung) und am Übergang zu den Ostalpen die Silvretta (FLISCH, 1986) bevorzugt mit Spaltspuren untersucht worden, wobei meist Apatit und seltener Zirkon bearbeitet wurden. Dagegen sind erst wenige Spaltspuralter aus den Südalpen veröffentlicht worden. Zu erwähnen sind jedoch Untersuchungen an Molassegeröllen vom Südalpenrand bei Chiasso (WAGNER et al., 1979; GIGER, in Vorbereitung). Einen Überblick über den derzeitigen Stand der Bearbeitung der Alpen mit Spaltspuren gibt die Karte (Abb. 5). Es soll hier für die West- und Zentralalpen nicht versucht werden, diese

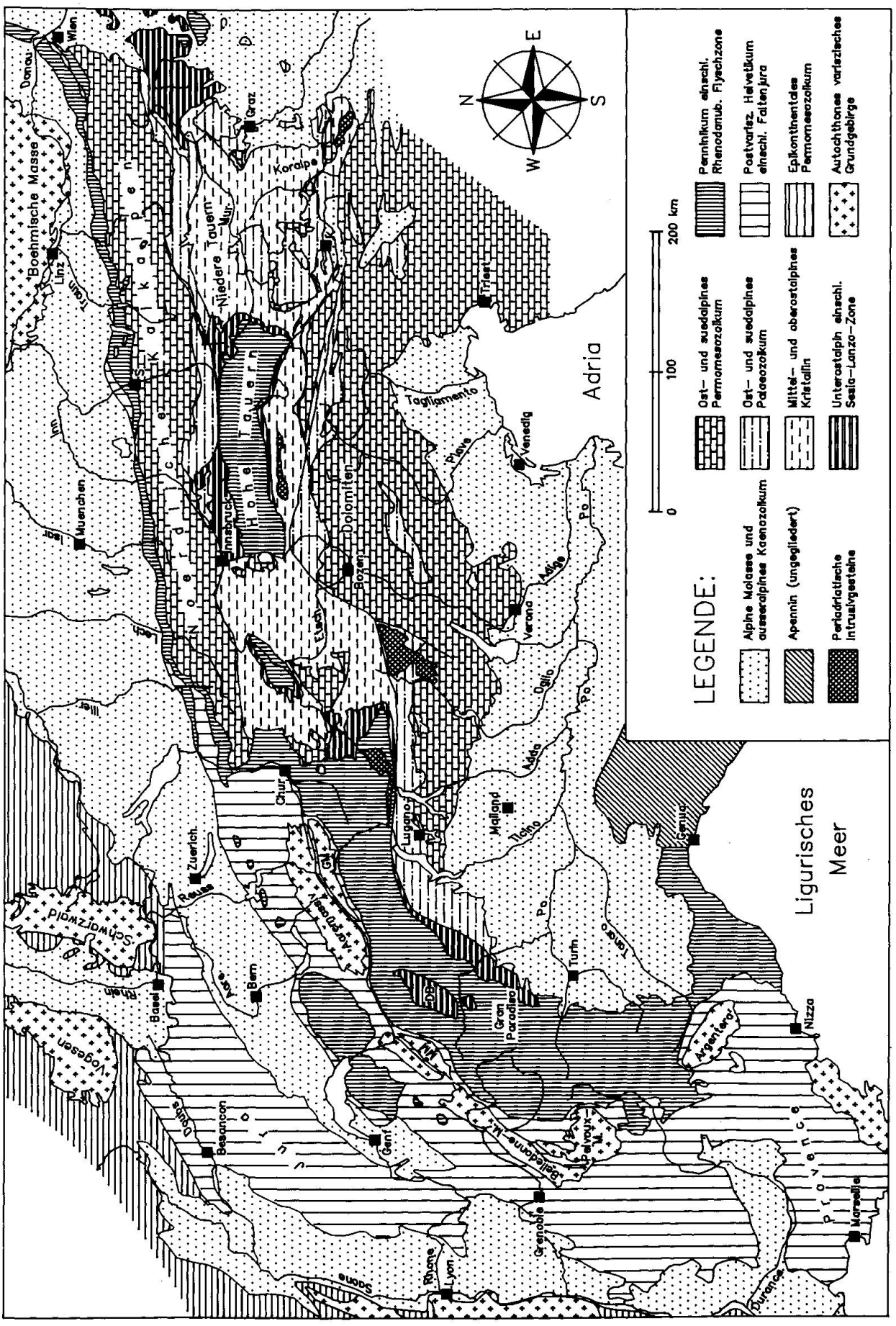

Abb. 4 Geologische Übersichtskarte der Alpen (zusammengezeichnet und teilweise abgeändert nach GWINNER [1971], FREY et al. [1974] und TOLLMANN [1977]). MM = Mont-Blanc-Massiv; GM = Gotthardmassiv; DB = Dent-Blanche-Decke; S = Salzburg; K = Klagenfurt.

Forschungsergebnisse zusammenfassend darzustellen, da ein solches Unterfangen nicht nur den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde, sondern weil es sich auch weitgehend erübrigen dürfte, denn eben erst ist eine diesbezügliche Synopsis aus der Feder der Berner Arbeitsgruppe erschienen (HURFORD et al., 1989). Bemerkt sei nur, dass die Spaltspuranalysen völlig neue Einblicke in die postmetamorphe thermo-tektonische Entwicklung der einzelnen Gebiete ergeben haben. Es wurden Hebungsbeträge, Hebungsgeschwindigkeiten als auch deren räumliche und zeitliche Änderungen, wie z.B. die im späten Miozän einsetzende Kippung der Silvrettadecke nach Osten (FLISCH, 1986), erkannt. Mit den jüngsten Apatitspaltspurdaten, die für das Simplongebiet mit Werten um 2 bis 3 Ma schnelle (1,1 km/Ma) subrezente Hebung belegen, lässt sich der direkte Bezug zur geodätisch feststellbaren, starken rezenten Hebung dieses Gebiets herstellen.

3. Ostalpen

Die Erforschung der Niedertemperaturgeschichte der Ostalpen mittels Spaltspurdatierung setzte rund zehn Jahre nach dem Erscheinen der ersten Spaltspurarbeiten über die Schweizer Alpen ein. Dabei wurde zunächst die in den Westalpen erarbeitete Methode der Hebungsberechnung aus Alters-Höhen-Diagrammen zur Untersuchung analoger Probleme der Ostalpengeologie herangezogen. Die Arbeitsgruppe von MORTEANI (Berlin, Garching) beprobte fast den gesamten Bereich des Tauernfensters und weite Teile seines Rahmens für Apatitspaltspurdatierungen. Durch das dichte Probennetz gelang es, die postmetamorphe Hebungsgeschichte dieses Raumes mit grosser Genauigkeit aufzulösen (GRUNDMANN und MORTEANI, 1985; STAUFENBERG, 1987). Die Apatitspaltspuralter des Penninikums der Hohen Tauern liegen zwischen 5,1 und 23,5 Ma und zeigen erwartungsgemäss eine deutliche Höhenabhängigkeit in einheitlich gehobenen Teilbereichen. Die aus den Alters-Höhen-Diagrammen abgeleiteten Hebungsraten betragen 0,16 bis 0, 24 km/Ma für die östlichen Hohen Tauern, 0,4 km/Ma für die Granatspitzgruppe und 0,4 bis 0,5 km/Ma für die westlichen Hohen Tauern.

Eng verbunden mit der Hebungsgeschichte der Hohen Tauern ist auch die Frage nach dem Alter der Fensterstruktur und der Ursache ihrer Entstehung. Da der Geröllbestand des unmittelbar am Ostrand des Tauernfensters gelegenen Tamsweger Tertiärbeckens (Karpat) vorwiegend ostalpines Altkristallin umfasst, aber noch keine Gesteine des Penninikums oder des unterostalpinen Mesozoikums enthält (HEINRICH, 1977), kann das östliche Tauernfenster erst nach der Ablagerung dieser Serie, also nicht vor dem Mittelmiozän freigelegt worden sein. Die Freilegung des Tauern-Penninikums kann durch drei grundsätzlich verschiedene Mechanismen bzw. durch deren Kombination erklärt werden:

1. Starke oberflächliche Abtragung als Folge der durch den isostatischen Aufstieg erhöhten Reliefenergie.
2. Tektonische Entblössung durch gravitatives Abgleiten der hangenden Einheiten (z.B. Nördliche Kalkalpen).
3. Tektonische Entblössung durch endogene Lateralkräfte.

Das von GENSER und NEUBAUER (1988) propagierte Pull-apart-Dom-Modell erklärt den Aufstieg des Penninikums der Hohen Tauern durch tektonische Entblössung infolge ESE–WNW gerichteter Zerrung. Die beiden Autoren konnten am Ostrand des Tauernfensters duktile bis spröde Abschiebungen, die unter grünschieferfaziellen und kühleren Bedingungen gebildet wurden, nachweisen und bringen diese in einen ursächlichen Zusammenhang mit dem Dekompressionspfad der Tauernkristallisation bzw. mit dem Aufstieg des penninischen Fensterinhalts. Nach dieser Vorstellung riss das Ostalpin im Gebiet des gegenwärtigen Tauernfensters auf und wurde über dem Penninikum nach E und W weggezogen, wodurch es stark ausgedünnt wurde und den Aufstiegsweg für das Penninikum freigab. Gleichzeitig mit der Zerrung sollen am Süd- und Nordrand des Tauernfensters grossräumige sinistrale Horizontalverschiebungen stattgefunden haben.

In seiner derzeitigen Form kann das Pull-apart-Dom-Modell die regionale Verteilung der Apatitspaltspuralter leider nicht widerspruchsfrei erklären. Falls der Aufstieg des Tauernpenninikums durch das Aufreissen der ostalpinen Decken und deren seitliches Ausweichen nach E und W ausgelöst wurde, wäre zu erwarten, dass die Hebung im zentralen und daher zuerst freigelegten Bereich des Fensters begann und die östlichen und westlichen Randbereiche erst später in die sich ausbreitende Hebungstendenz einbezogen wurden. Dies war aber nachweislich nicht der Fall, da in der Mitte des Tauernfensters, nämlich in der Granatspitzgruppe, die jüngsten Apatitspaltspuralter (5,1 bis 8 Ma) gemessen wurden. Die Proben aus den westlichen und besonders aus den östlichen Hohen Tauern ergaben bei gleicher Höhenlage deutlich höhere Abkühlalter (5,5 bis 10,5 Ma bzw. 6,0 bis 23,4 Ma). Die Vorstellung einer im zentralen Teil des Tauernfensters beginnenden und dann gegen die westlichen und östlichen Randbereiche fortschreitenden Hebung wird durch die regionale Verteilung der Apatitspaltspuralter daher nicht bestätigt.

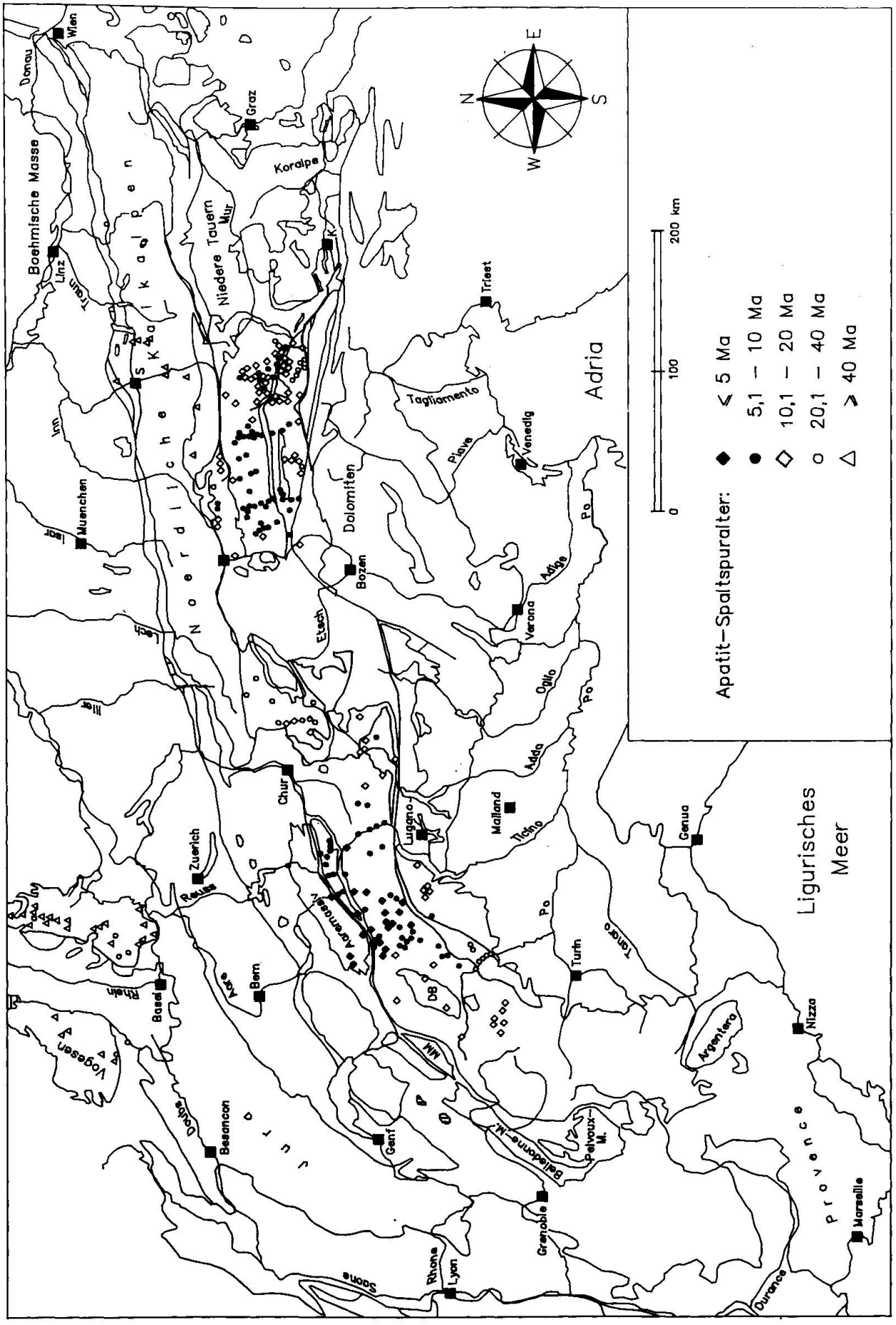

Abb. 5 Regionale Verteilung ausgewählter Apatit-Spaltspuralter, die an Oberflächenproben gemessen wurden (FLISCH, 1986; GRUNDMANN und MORTEANI, 1985; HEIL und GRUNDMANN, 1989; HURFORD, FLISCH und JÄGER, 1989; MICHALSKI, 1987; STAUFENBERG, 1987; WAGNER, REIMER und JÄGER, 1977). Gleicher Kartenausschnitt wie in Abb. 4.

Trotz dieses widersprüchlichen Befundes muss mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass der isostatische Auftrieb und die oberflächliche Abtragung nicht die einzig möglichen Hebungs- und Akühlungsmechanismen sind und eine tektonisch bedingte Abkühlung daher auch in Erwägung gezogen werden sollte.

Eine relativ kleine Anzahl von Apatitspaltspurdaten liegt auch aus den Salzburger Kalkalpen sowie aus dem Mittelabschnitt der Flysch- und Molassezone vor (HEJL und GRUNDMANN, 1989). Vor allem die Daten aus den Kalkalpen sind von grosser Bedeutung für die heftig umstrittene, zeitliche Einstufung des altalpidischen Metamorphosehöhepunktes (vgl. FRANK, 1987, S. 392 ff. und TOLLMANN, 1987, S. 72 ff.), da die hangendsten Einheiten des ostalpinen Deckenstapels nach dieser Metamorphose als erste abzukühlen begannen und später nicht mehr stärker erwärmt wurden. Zwei Apatitspaltspuralter aus den Salzburger Kalkalpen (permischer Diabas und Raibler Sandstein) fallen mit 143 bzw. 149 Ma in den Malm und wurden von HEJL und GRUNDMANN (1989) als Abkühlalter interpretiert. Demnach müsste der thermische Höhepunkt der Nördlichen Kalkalpen spätestens im Malm erreicht worden sein. Als Ursache dieser frühen Erwärmung käme wohl nur eine Erhöhung des geothermischen Gradienten infolge starker Krustenausdünnung in Frage (FRANK, 1983, S. 257 ff.).

Abgesehen von der Tatsache, dass wegen des Fehlens entsprechender Mineralparagenesen eine Metamorphose der Rhenodanubischen Flyschzone nie in Erwägung gezogen wurde, war bis vor wenigen Jahren keine genaue Aussage über die grössten Versenkungstiefen und die dabei erreichten Höchsttemperaturen der heutigen Oberflächengesteine der Flyschzone möglich. Wegen der geringen thermischen Stabilität der Spaltspuren im Apatit ermöglichen Apatitspaltspurdatierungen hier die Unterscheidung stärker und schwächer erwärmter Bereiche und die semiquantitative Abschätzung der maximalen Versenkungstiefen. Zwei Reiselsberger Sandsteine aus dem Flyschfenster von Strobl ergaben eozäne Apatitspaltspuralter von 44 und 52 Ma. Der Granodioritgneis des Leopold-von-Buch-Denkmals, der von WIDDER (1986) als olistholithische Komponente der Buntmergelserie (Ultrahelvetikum) gedeutet wird, ergab ein tiefoligozänes Apatitspaltspuralter von 30 Ma. Da diese Spaltspuralter deutlich niedriger als die jeweiligen Sedimentationsalter sind, nahmen HEJL und GRUNDMANN (1989) für die hier genannten Proben eine mindestens 3 km tiefe Versenkung während des alttertiären Subduktions- und Abscherungsvorgangs an.

Vier Apatitspaltspuralter von Konglomeraten der Puchkirchener Serie (Molassezone) weisen ebenfalls auf die alttertiäre Gebirgsbildung hin. Die Alter liegen zwischen 56 und 39 Ma (Oberpaleozän bis Obereozän). Da sie deutlich höher als das Sedimentationsalter der Puchkirchener Serie sind, wurden sie von HEJL und GRUNDMANN (1989) als Abkühlalter des zentralalpinen Liefergebiets interpretiert.

Beim gegenwärtigen Bearbeitungsstand sind viele Fragen zur Niedertemperaturgeschichte der Ostalpen noch offen. Im Hinblick auf die Spaltspurdatierung ist der Grossteil des ostalpinen Kristallins östlich des Tauernfensters praktisch eine Terra incognita.

Literaturverzeichnis

CARPENA, J. (1985): Tectonic interpretation of an inverse gradient of zircon fission-track ages with respect to altitude: alpine thermal history of the Gran Paradiso basement. Contrib. Mineral. Petrol. 90, 74–82.

FLISCH, M. (1986): Die Hebungsgeschichte der oberostalpinen Silvretta-Decke seit der mittleren Kreide. Bull. d. Vereinig. schweiz. Petrol.-Geolog. u. Ingen. 53, 23–49.

FRANK, W. (1983): Argumente für ein neues Entwicklungsmodell des Ostalpins. Jber. 1982 Hochschulschwerpunkt S 15, 249–262.

FRANK, W. (1987): Evolution of the Austroalpine elements in the Cretaceous. In: Flügel, H.W. and Faupl, P. (Hrsg.): Geodynamics of the Eastern Alps. 377–406.

FREY, M., HUNZIKER, J.C., FRANK, W., BOCOUET, J., DAL PIAZ, G.V., JÄGER, E. und NIGGLI, E. (1974): Alpine metamorphism of the Alps – a review. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 54, 247–290.

GENSER, J. und NEUBAUER, F. (1988): Low angle normal faults at the eastern margin of the Tauern window (Eastern Alps). Mitt. österr. geol. Ges. 81, 233–243.

GLEADOW, A.J.W., DUDDY, I.R., GREEN, P.F. und LOVERING, J.F. (1986): Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. Contrib. Mineral. Petrol. 94, 405–415.

GREEN, P.F., DUDDY, I.R., GLEADOW, A.J.W. und LOVERING, J.F. (1989): Apatite Fission track analysis as a palaeotemperature indicator for hydrocarbon exploration. In: Naeser, N.D., McCulloh, T.H. (Hrsg.): Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories, p. 181–195, New York (Springer).

GRUNDMANN, G. und MORTEANI, G. (1985): The young uplift and thermal history of the Central Eastern Alps (Austria/Italy), evidence from apatite fission track ages. Jb. Geol. B.-A. 128, 197–216.

GWINNER, M.P. (1971): Geologie der Alpen, 477 S., Stuttgart (Schweizerbart).

HEINRICH, M. (1977): Zur Geologie des Jungtertiärbekkens von Tamsweg mit kristalliner Umrahmung. Jb. Geol. B.-A. 120, 295–341.

HEJL, E. und GRUNDMANN, G. (1989): Apatit-Spaltspurdaten zur thermischen Geschichte der Nördlichen Kalkalpen, der Flysch- und Molassezone. Jb. Geol. B.-A. 132, 191–212.

HURFORD, A.J. (1986): Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. Contrib. Mineral. Petrol. 92, 412–427.

HURFORD, A.J., FLISCH, M. und JÄGER, E. (1989): Unravelling the thermo-tectonic evolution of the Alps: a contribution from fission track analysis and mica dating. In: COWARD, M.P., DIETRICH, D. and PARK, R.G. (ed.): Alpine Tectonics. Geological Society Special Publication No. 45, 369–398.

HURFORD, A.J. und HUNZIKER, J.C. (1985): Alpine cooling history of the Monte Mucrone eclogites (Sesia-Lanzo zone): fission track evidence. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 65, 325–334.

HURFORD, A.J. und HUNZIKER, J.C. (1989): A revised thermal history for the Gran Paradiso massif. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 69, 319–329.

JÄGER, E. (1973): Die alpine Orogenese im Lichte der radiometrischen Altersbestimmung. Eclogae geol. Helv. 66, 11–21.

MICHALSKI, I. (1987): Apatit-Spaltspuren-Datierungen des Grundgebirges von Schwarzwald und Vogesen: Die postvariszische Entwicklung. Diss. Naturwiss.-Math. Fak. Univ. Heidelberg, 125 S.

MICHALSKI, I. und SOOM, M. (1990): The Alpine thermo-tectonic evolution of the Aar- and Gotthard massifs, Central Switzerland: Fission track ages on zircon and apatite and K–Ar mica ages. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 70, 373–387.

PARRISH, R. (1985): Some cautions which should be exercised when interpreting fission-track and other dates with regard to uplift rate calculations. Nuclear Tracks 10, 425.

REIMER, M. und WAGNER, G.A. (1971): Fission track studies of alpine epidotes and garnets. Annal. Soc. Geol. Belg. v. 94, p. 127.

SCHAER, J.P., REIMER, G.M. und WAGNER, G.A. (1975): Actual and ancient uplift rate in the Gotthard region, Swiss Alps: a comparison between precise levelling and fission track apatite age. Tectonophysics 29, 293–300.

STAUFENBERG, H. (1987): Apatite fission-track evidence for postmetamorphic uplift and cooling history of the eastern Tauern Window and the surrounding Austroalpine (Central Eastern Alps, Austria). Jb. Geol. B.-A. 130, 571–586.

TOLLMAN, A. (1977): Geologie von Österreich, Band I: Die Zentralalpen. XVI + 766 S., Wien (Deuticke).

TOLLMANN, A. (1986): Die Entwicklung des Reliefs der Ostalpen. Mitt. Österr. Geograph. Ges. 128, 62–72.

TOLLMANN, A. (1987): Neue Wege in der Ostalpengeologie und die Beziehungen zum Ostmediterran. Mitt. österr. geol. Ges. 80, 47–113.

WAGNER, G.A. (1968): Fission track dating of apatites. Earth and Planet. Science Lett. 4, 411–415.

WAGNER, G.A. (1988): Apatite fission-track geochronothermometer to 60 °C: projected length studies. Chemical Geology (Isotope Geoscience Sect.) 72, 145–153.

WAGNER, G.A. und REIMER, M. (1972): Fission track tectonics: the tectonic interpretation of fission track ages. Earth and Planet. Science Lett. 14, 263–268.

WAGNER, G.A., MILLER, D.S. und JÄGER, E. (1979): Fission track ages on apatite of Bergell rocks from Central Alps and Bergell boulders in Oligocene sediments. Earth and Planet. Science Lett. 45, 335–360.

WAGNER, G.A., REIMER, G.M. und JÄGER, E. (1977): Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb–Sr and K–Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alps. Memor. d. Istit. d. Geolog. e Mineral. d. Univers. d. Padova 30, 3–28.

WIDDER, R.W. (1986): Neuinterpretation des Buchdenkmalgranits. Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr. 33, 287–307.

Manuskript eingegangen 6. September 1990; überarbeitetes Manuskript angenommen 16. Januar 1991.