

Zeitschrift: Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure
Herausgeber: Vereinigung Schweizerischer Petroleum-Geologen und -Ingenieure
Band: 52 (1986)
Heft: 123

Artikel: Die Hebungsgeschichte der oberostalpinen Silvretta-Decke seit der mittleren Kreide
Autor: Flisch, Markus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-210052>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Hebungsgeschichte der oberostalpinen Silvretta-Decke seit der mittleren Kreide

mit 6 Tabellen und 13 Figuren

von Markus FLISCH *

Abstract

The alpine uplift history of the upper austroalpine Silvretta nappe (Austria - Switzerland) since middle Cretaceous has been reconstructed. New Rb-Sr and K-Ar muscovite and biotite as well as fission track apatite and zircon analyses have been carried out. From the radiometric age determinations the following uplift events can be distinguished and timed:

- a) Central W-E trending, W dipping updoming of the Silvretta nappe (between ca. 110-35 Ma, with a considerable portion older than 80 Ma).
- b) Updoming of the Engadine Window (sometime between 60 and 35 Ma).
- c) Uniform uplift of the whole Silvretta nappe (between ca. 35 and ca. 2 Ma).
- d) Chur uplift and the corresponding tilting to the east (ca. 2 Ma until today).

The climax of the alpine metamorphism has been estimated at about 110 Ma (fission track zircon cooling ages of 106 and 105 Ma). In the central Silvretta the alpine overprint is of a higher grade than in the northeastern and southwestern part. Near the Engadine Window the highest grade overprint has been recognised. The alpine metamorphism can be explained without or with only a little covering by other tectonic units. Because of the differential uplift, levels with different alpine overprint (diagenesis to greenschist facies) outcrop today.

Zusammenfassung

Die Hebungsgeschichte der oberostalpinen Silvretta-Decke (Österreich - Schweiz) seit der oberen Kreide wurde rekonstruiert. Neue Rb-Sr und K-Ar Muscovit- und Biotit- sowie Kernspaltspur Apatit- und Zirkonanalysen wurden durchgeführt. Aufgrund der radiometrischen Altersbestimmungen konnten folgende Hebungsphasen unterschieden und zeitlich eingestuft werden:

- a) Zentrale W-E verlaufende, nach W fallende Aufwölbung der Silvretta-Decke (zwischen ca. 110-35 Ma, ein bedeutender Teil ist älter als 80 Ma).
- b) Aufwölbung des Engadiner Fensters (irgendwann zwischen 60 und 35 Ma).
- c) Gleichmässige Hebung der ganzen Silvretta-Decke (zwischen ca. 35 und ca. 2 Ma)
- d) Churer Hebung und die damit verbundene Ostkipfung der Decke (ca. 2 Ma bis heute).

Der Höhepunkt der alpinen Metamorphose wurde vor ca. 110 Ma angenommen (Kernspaltspur-Abkühlalter am Zirkon von 106 und 105 Ma). Die alpine Überprägung ist in der zentralen Silvretta höher als in den nordöstlichen und südwestlichen Teilen. In der Nähe des Engadiner Fensters ist sie am stärksten. Die alpine Metamorphose kann ohne oder mit nur geringer Bedeckung durch andere tektonische Einheiten erklärt werden. Durch die differentielle Hebung sind heute Niveaus mit unterschiedlicher alpiner Überprägung (Diagenese bis Grünschieferfazies) aufgeschlossen.

* Markus FLISCH, Abteilung für Isotopengeologie der Universität, Erlachstrasse 9a, 3012 Bern
Zum Vortrag, gehalten an der Jahresversammlung der Vereinigung schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure in Davos am 14. Juni 1986.

1. Einleitung

Die oberostalpine Silvretta-Decke (Österreich/Schweiz) gehört zu den höchsten tektonischen Einheiten der Alpen. Das paläozoische Silvretta-Kristallin sowie die auflagernden triadischen Sedimente sind alpin nur schwach metamorph. In der Umrahmung des Engadiner Fensters, in der Region Paznauntal - Piz Buin - Piz Linard - Zerneß (siehe Fig. 1) sind heute Gesteine mit grünschieferfazieller Überprägung aufgeschlossen (Thöni 1981). Die restliche Silvretta-Decke ist anchizonal, Teile der Sedimente sind sogar nur diagenetisch überprägt (Dunoyer de Segonzac und Bernoulli 1976, Thöni 1981). Der Höhepunkt der alpinen Metamorphose wird der eo-alpinen Phase der Oberkreide zugerechnet. Nach dem Metamorphosehöhepunkt können verschiedene Hebungsphasen unterschieden werden: eo-alpine Hebung, Aufwölbung des Engadiner Fensters, homogene tertiäre Hebung, rezente Churer Hebung (vgl. Gubler 1976, Kahle und Klingelé 1979). Diese Hebungs- und Aufwölbungsereignisse zeigen lokal unterschiedliche Auswirkungen. Sie äussern sich in den heute unterschiedlichen Anschnittniveaus der Silvretta-Decke. Je tiefer das Anschnittniveau, desto stärker die eo-alpine Überprägung. Die Verteilungen der alpin nicht, teilweise oder vollständig verjüngten Mineralalter geben uns Auskunft über die Stärke und die zeitliche Entwicklung der alpinen Metamorphose. Damit lassen sich die Hebungs- und Aufwölbungsereignisse zeitlich einstufen. Die Hebungsbeträge können abgeschätzt werden. Die bestehenden Rb-Sr und K-Ar Altersbestimmungen an Muscovit und Biotit (Grauert 1969, Thöni 1981, Kreczy 1981, Krähenbühl 1984) wurden ergänzt. An Gneisproben wurden zusätzlich 10 Apatit- und 14 Zirkondatierungen mit der Kernspaltspurmethode (im Folgenden als FT-Methode = Fission track Methode bezeichnet) durchgeführt. Die bearbeiteten KAW-Proben sind im Anhang beschrieben und in Fig. 1 eingezeichnet.

2. Experimentelles

Jede 30kg-Gesteinsprobe wurde im Backenbrecher und in der Scheibenmühle zerkleinert. Aus den jeweils optimalen Kornfraktionen wurden mit Hilfe von Trocken- und Nassschütteltisch, Magnetseparation und Schwereretrennung hochreine Konzentrate von Muscovit und/oder Biotit und/oder Zirkon und/oder Apatit hergestellt. Für die Korrektur der Rb-Sr Mineralanalysen wird von den entsprechenden Proben ein analysenfeines Gesamtgesteinsaliquot benötigt. Hierzu wurden jeweils 100g Backenbrecherfraktion 15 h unter reinem Äthanol in der Achatmühle gemahlen.

FT - Datierung:

Einführende Beschreibungen der FT-Methode geben u.a. Wagner und Zaun (1985) und Hurford (1986).

Die Apatitdatierung erfolgte mit Hilfe der Populationsmethode (Gleadow 1981). Dabei werden die induzierten und die spontanen Kernspaltspuren in verschiedenen Präparaten gezählt. Das Aliquot in welchem die induzierten

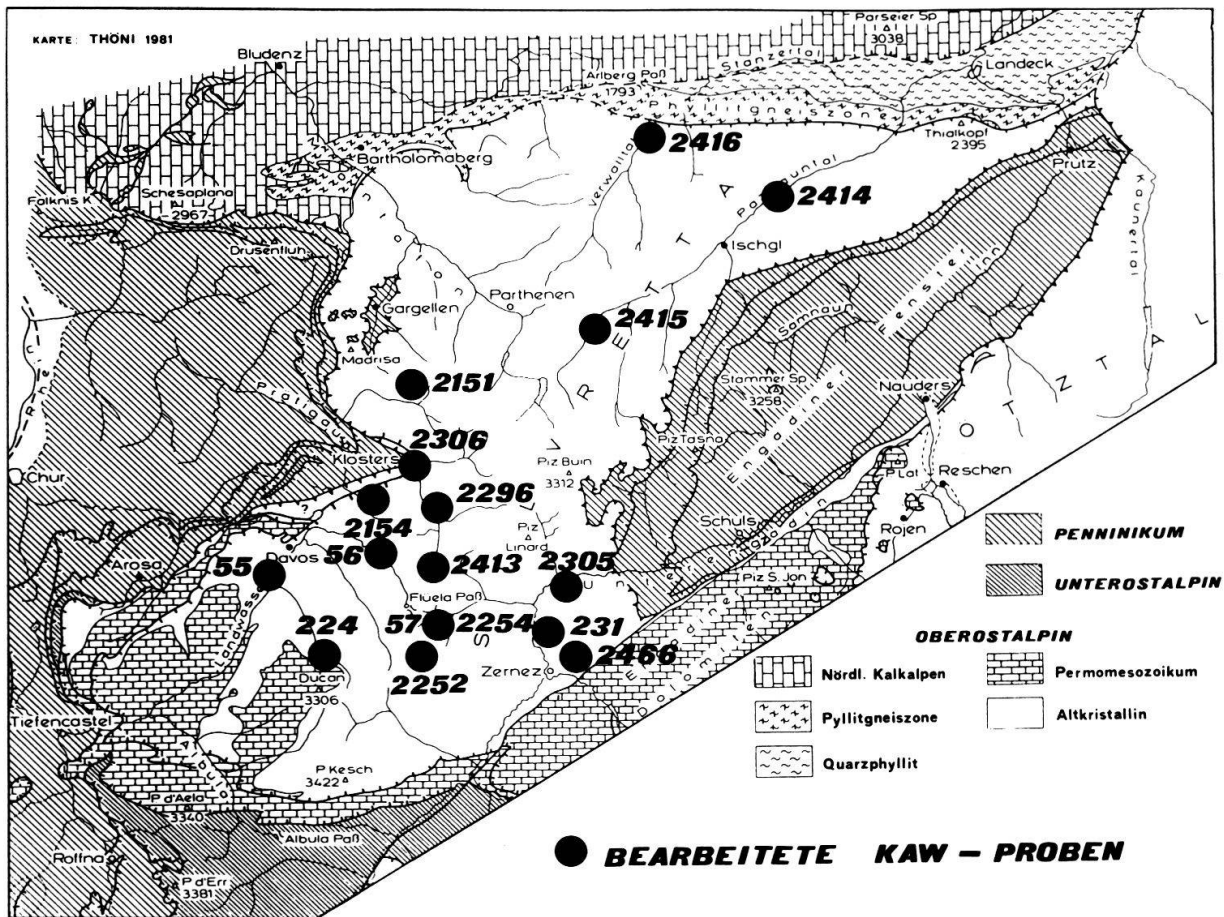


Fig. 1: Die tektonischen Einheiten im Silvretta-Gebiet (Thöni 1981) mit den bearbeiteten KAW-Proben aus der Silvretta-Decke (siehe Anhang).

Spaltspuren durch Bestrahlen mit thermischen Neutronen im Reaktor erzeugt werden sollen, wird zuvor für fünf Stunden auf 500°C aufgeheizt, um die spontanen Spaltspuren auszuheilen. Nach dem Bestrahlen werden die Aliquots mit den spontanen und den induzierten Spaltspuren mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers auf ein Objektträgerglas montiert, poliert und danach für 45 Sekunden in 1 N HNO₃ bei 20°C geätzt, um die Spaltspuren sichtbar zu machen. Die Spaltspurdichte in den einzelnen Proben wurde unter einem Leitz Orthoplan Mikroskop bei 1575-facher Vergrößerung (Trockenobjektiv) bestimmt.

Für die Zirkonanalyse gelangte die "External Detector Method" = EDM (Gleadow 1981) zur Anwendung. Die spontanen Spaltspuren werden dabei im Zirkonkristall und die induzierten Spaltspuren in einem vor der Bestrahlung auf das Zirkonpräparat gelegten Glimmerplättchen ausgezählt. Die Zirkone werden in FEP-Teflon montiert, poliert und anschliessend in einer eutektischen Schmelze von NaOH und KOH bei 220°C für 24 Stunden geätzt (Gleadow et al 1976). Durch Ätzen des Glimmerdetektors während 40 Min. bei 20°C in 40% HF werden die Spaltspuren sichtbar und anschliessend unter Verwendung eines Ölimmersionsobjektives bei 1250-facher Vergrößerung ausgezählt.

Alle Bestrahlungen mit thermischen Neutronen (zum Erzeugen der induzierten Spaltspuren) wurden im Herald Reaktor, Aldermaston, Grossbritannien durchgeführt (Hurford und Green 1983). Zur Referenzierung des Neutronenflusses werden die induzierten Spaltspuren in Glimmerdetektoren von den drei Dosimetergläsern SRM 612, CN-1 und CN-2 (Hurford und Green 1982) ausgezählt (vgl. Tabelle 4a).

Die Altersberechnungen erfolgten nach der sog. Zeta-Kalibrierungsmethode (Fleischer und Hart 1972; Hurford und Green 1982). Durch wiederholte Altersanalysen an Standardmaterialien wird für jedes Dosimeterglas (SRM 612, CN-1, CN-2) ein persönlicher Zeta-Faktor bestimmt (vgl. Tabelle 4b). So kann auf die genaue Festlegung der Konstanten λ_f für die spontane, Spaltspuren erzeugende ^{238}U -Spaltung und die genaue Bestimmung des Neutronenflusses im Reaktor verzichtet werden. Durch die Berechnung von Zeta-Werten für die drei Dosimetergläser SRM 612, CN-1 und CN-2 erfolgt die Altersberechnung der Proben in Bezug auf alle drei Dosimeter, was eine Kontrolle der internen Konsistenz der drei Dosimetergläser erlaubt (vgl. Tabelle 4c). Die Altersfehler wurden mit Hilfe der Poisson-Statistik (konventioneller Fehler nach Green 1981) unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Zeta-Kalibrierung berechnet.

K-Ar-Datierung:

K-Ar-Alterbestimmungen wurden an reinen Biotit- und Muscovitkonzentraten durchgeführt. Der Kaliumgehalt der Proben wurde flammenphotometrisch ermittelt, wobei der mittlere Fehler einer Analyse $\pm 1\%$ beträgt (Fleisch 1986). Die Argon-Analyse erfolgte nach der massenspektrometrischen Isotopenverdünnungsmethode (Kirsten 1966, Dalrymple and Lanphere 1969) unter Verwendung des 99.9997% reinen Referenzisotops (Spike) ^{38}Ar (Schumacher 1975). Der Spike wurde gegen genau bekannte Luftvolumina und gegen die Standardminerale B-4M, B-4B, LP-6 und GL-O (Fleisch 1982, 1986) geeicht. Pro Analyse werden je nach Alter und K-Gehalt 0.1-0.01g Probe mit Hilfe eines HF-Generators in der Hochvakuum-Extraktionsanlage in einem Molybdäntiegel geschmolzen und entgast. Nach der Zugabe einer genau bekannten Spikemenge (ca. $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ STP}$) erfolgt die Reinigung des Probengases mit Hilfe von Ti- und Zr/Al-Gettern. Die Isotopenverhältnisse, aus welchen sich die absoluten Mengen der einzelnen Isotope errechnen lassen, werden statisch im Massenspektrometer VG MM 1200 bestimmt. Der ^{40}Ar "Hot Blank" für den ganzen Analysengang betrug zwischen 3 und $7 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP}$. Das $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ Luftverhältnis wurde mit 302.6 ± 0.3 (1σ) gemessen. Die Fehlerberechnung für die errechneten Alter erfolgt nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Kaliumbestimmung, der Einwaage, der Diskriminierungskorrektur, den Isotopenverhältnissen und der Spikekalibrierung.

Rb-Sr-Datierung:

Die Biotit- und Muscovitalter wurden als Zweipunktisochronen ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ gegen $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) zwischen Mineral und Gesamtgestein berechnet. Die Rb-

und die Sr-Analysen erfolgten nach der Isotopenverdünnungsmethode, wobei hochreine ^{87}Rb - und ^{84}Sr -Spikes als Mengenreferenzen zur Anwendung gelangen. Mit Hilfe von Ionenaustauscherkolonnen werden hochreine Rb- und Sr-Fractionen hergestellt. Gemessen wurde auf einem "Ion Instruments" Festkörper- Massenspektrometer mit 35 cm Radius und einer 3-Band Ionenquelle. Der Analysenfehler auf dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Verhältnis betrug zwischen 0.01% und 0.005% und auf dem $^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Sr}$ - Verhältnis ca.1%. Der Standard NBS 987 wurde während der Bearbeitung der nachfolgend diskutierten Proben 22 mal gemessen und ergab folgende Reproduzierbarkeit ($\pm 1\sigma$): $.710286 \pm 21$ ($\pm 0.003\%$).

Die Alter sind mit den IUGS-Konstanten (Steiger und Jäger 1977) berechnet.

3. Analytische Resultate und Diskussion

3.1 Die Abkühltemperaturen

Als Abkühltemperatur (Tabelle 1) wird diejenige mittlere Temperatur bezeichnet, ab welcher ein Mineral bei der Abkühlung in Bezug auf ein bestimmtes radiometrisches Zerfallssystem (z.B. Rb-Sr, K-Ar) eine geschlossene Einheit darstellt; d.h. ab dieser bestimmten Temperatur beginnt die radiometrische Uhr zu laufen (vgl. Wagner et al 1977).

Bei der Aufheizung z. B. eines "alten" Glimmers über die sog. Abkühltemperatur beginnt dessen Verjüngung. Um sein Alter aber auf Null

Tabelle 1: Mineral-Abkühltemperaturen

Rb - Sr	Hellglimmer	500 ± 50 °C
K - Ar	Hellglimmer	350 ± 50 °C
Rb - Sr	Biotit	300 ± 50 °C
K - Ar	Biotit	300 ± 50 °C
FT	Zirkon	200 - 250 °C
FT	Apatit	120 ± 20 °C

nach: Wagner und Reimer 1972
 Purdy und Jäger 1976
 Wagner, Reimer und Jäger 1977
 Hurford 1986

zurückzusetzen, muss die Abkühltemperatur um etwa 70-100°C (Thöni 1982) überschritten werden. Erfolgte bei einem späteren Ereignis eine nur partielle Verjüngung des "alten" Glimmers, so zeigt er ein sog. Mischalter.

Die Abkühltemperaturen, welche den FT Apatit- und FT Zirkon-datierungen zugrunde liegen, sind abhängig von der Abkühlrate. In der Literatur (Wagner und Reimer 1972, Wagner und Zaun 1985) wird für eine Hebungsrates von 0.1 mm/a eine Apatit Abkühltemperatur von 100°C und für eine Hebungsrates von 1 mm/a eine solche von 120°C vorgeschlagen.

Tabelle 2: Rb-Sr Analysendaten

Probe	Mineral und Korngrösse	Rb total (ppm)	Sr total (ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Alter (Ma) (± 1 Sigma)	
KAW 2151	Total(*)	138.72	162.104	0.72789	2.480		
	Muscovit	40-60	237.30	29.554	0.85501	23.566	423.3 \pm 5.2
		60-100	234.76	22.055	0.89845	31.372	421.5 \pm 4.2
		100-200	228.79	25.858	0.86105	25.984	397.9 \pm 4.8
	Biotit	60-100	512.58	3.382	3.00533	537.113	299.4 \pm 3.0
KAW 2252	Total	188.59	104.983	0.74343	5.215		
	Muscovit	60-100	433.56	12.838	1.17620	102.187	313.6 \pm 3.5
	Biotit	35-60	868.89	2.794	7.57688	1504.631	320.2 \pm 3.2
KAW 2254	Total	252.25	63.159	0.78505	11.643		
	Muscovit	60-100	853.53	8.820	2.13957	319.224	309.4 \pm 3.3
		80-100	930.01	7.850	2.48123	402.232	305.2 \pm 3.2
KAW 2296	Total	151.42	150.293	0.72874	2.921		
	Muscovit	>100	315.52	17.625	0.96661	53.107	333.0 \pm 3.4
	Biotit	>90	617.45	5.057	2.45189	413.520	294.9 \pm 3.0
		70-100	589.51	4.479	2.63028	452.394	297.3 \pm 3.0
		100-200	524.38	6.988	1.65909	237.332	279.0 \pm 3.0
KAW 2305	Total	176.92	70.327	0.75993	7.316		
	Muscovit	50-80	218.04	74.313	0.76336	8.535	197.9 \pm 26
	Biotit	50-80	582.28	4.692	1.76898	396.355	182.4 \pm 1.9
KAW 2306	Total	129.53	180.428	0.72443	2.080		
	Biotit	>100	500.01	5.696	1.81247	281.436	273.8 \pm 2.8
KAW 2413	Total	178.11	74.167	0.75393	6.979		
	Muscovit	>90	419.08	24.958	0.93786	49.675	302.7 \pm 4.0
KAW 2414	Total	163.64	145.443	0.72938	3.262		
	Muscovit	>90	451.38	15.734	1.06243	85.882	283.3 \pm 3.1
	Biotit	60-90	807.17	2.654	3.63233	1131.849	180.9 \pm 1.8
KAW 2415	Total	165.93	73.320	0.75186	6.576		
	Muscovit	>90	434.60	7.165	1.52500	189.514	297.0 \pm 3.2
	Biotit	>90	893.23	3.050	3.81037	1104.678	195.9 \pm 2.0
KAW 2416	Total	72.54	155.618	0.72017	1.350		
	Muscovit	>90	246.07	77.672	0.75288	9.207	292.6 \pm 4.0
	Biotit	>90	425.57	6.086	1.65960	221.162	300.3 \pm 3.0

(*) Das Total KAW 2151 wurde bei der herzynischen(?) Metamorphose mit gewöhnlichem Strontium kontaminiert, deshalb ergeben die Total-Muscovit-Isochronen zu hohe Alter !

Für die FT-Zirkonanalysen wurde eine Abkühltemperatur von 220°C verwendet (vgl. Hurford 1986).

3.2. Rb-Sr und K-Ar Hellglimmer - und Biotitaltersverteilung

In den Fig. 2,3,4 und 5 sind die in der Literatur zugänglichen (Grauert 1969, Thöni 1981, Kreczy 1981, Krähenbühl 1984) und die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Rb-Sr und K-Ar Glimmerdatierungen (siehe Tab. 2,3) dargestellt. Die geschlossenen Quadrate repräsentieren herzynische Abkühlalter, die offenen Quadrate herzynisch-alpine Mischalter. Als Obergrenze zwischen herzynischem Abkühlalter und herzynisch-alpinem Mischalter wurden für die Rb-Sr Hellglimmerdatierungen 280 Ma eingesetzt. Für die Rb-Sr Biotit- und die K-Ar Hellglimmer- und Biotitdatierungen wurden 270 Ma angenommen (vgl. Thöni 1981). Diese Werte erscheinen realistisch, da die vulkanische Ruinaformation ab unterem Perm auf dem Silvretta-Kristallin abgelagert wurde (Dössegger 1974, Furrer 1985). Die postherzynische Abkühlung kann deshalb kaum jünger sein.

Tabelle 3: K-Ar Analysendaten

Probe	Mineral und Korngröße	K%	$^{40}\text{Ar}_{\text{rad}} \times 10^{-6}$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$	$\%^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$	Alter (Ma) ($\pm 1\text{sigma}$)
KAW 55	Muscovit 60-80	7.52	115.44	98.54	357.1 \pm 4.1
KAW 56	Muscovit 50-60	8.75	118.00	98.30	317.3 \pm 3.3
	Biotit >60	7.53	103.06	98.07	321.7 \pm 3.7
KAW 57	Biotit 80-100	7.73	104.67	99.00	318.5 \pm 3.4
KAW 2151	Muscovit 60-100	8.84	121.46	96.83	322.8 \pm 3.1
	Biotit 60-100	7.78	87.40	97.74	268.1 \pm 2.8
KAW 2252	Muscovit 60-100	8.68	124.58	96.83	335.9 \pm 3.4
	Biotit 35-60	7.84	107.00	98.74	320.8 \pm 3.6
KAW 2254	Muscovit 60-100	8.49	116.31	99.25	322.0 \pm 3.2
KAW 2296	Biotit >70	7.47	82.40	98.86	263.6 \pm 3.2
	Biotit 70-100	7.33	78.22	98.57	255.5 \pm 3.0
KAW 2305	Muscovit 50-80	7.56	87.18	98.72	274.7 \pm 3.4
	Biotit 50-80	6.97	64.66	99.59	224.1 \pm 3.0
KAW 2306	Biotit 100-200	4.89	36.08	97.86	122.9 \pm 1.6
KAW 2414	Muscovit >90	9.03	75.22	99.00	202.5 \pm 2.2
	Biotit 60-90	7.85	64.28	99.06	199.3 \pm 2.3
KAW 2415	Muscovit >90	9.00	97.15	98.06	258.3 \pm 2.9
	Biotit >90	7.66	64.94	99.40	205.9 \pm 2.4
KAW 2416	Muscovit >90	8.35	111.19	98.74	313.7 \pm 3.2
	Biotit >90	6.57	86.99	99.28	312.0 \pm 3.6
KAW 2466	Biotit 35-60	7.68	110.70	99.22	337.3 \pm 4.0
	Biotit 60-90	7.71	107.12	99.09	326.1 \pm 3.8

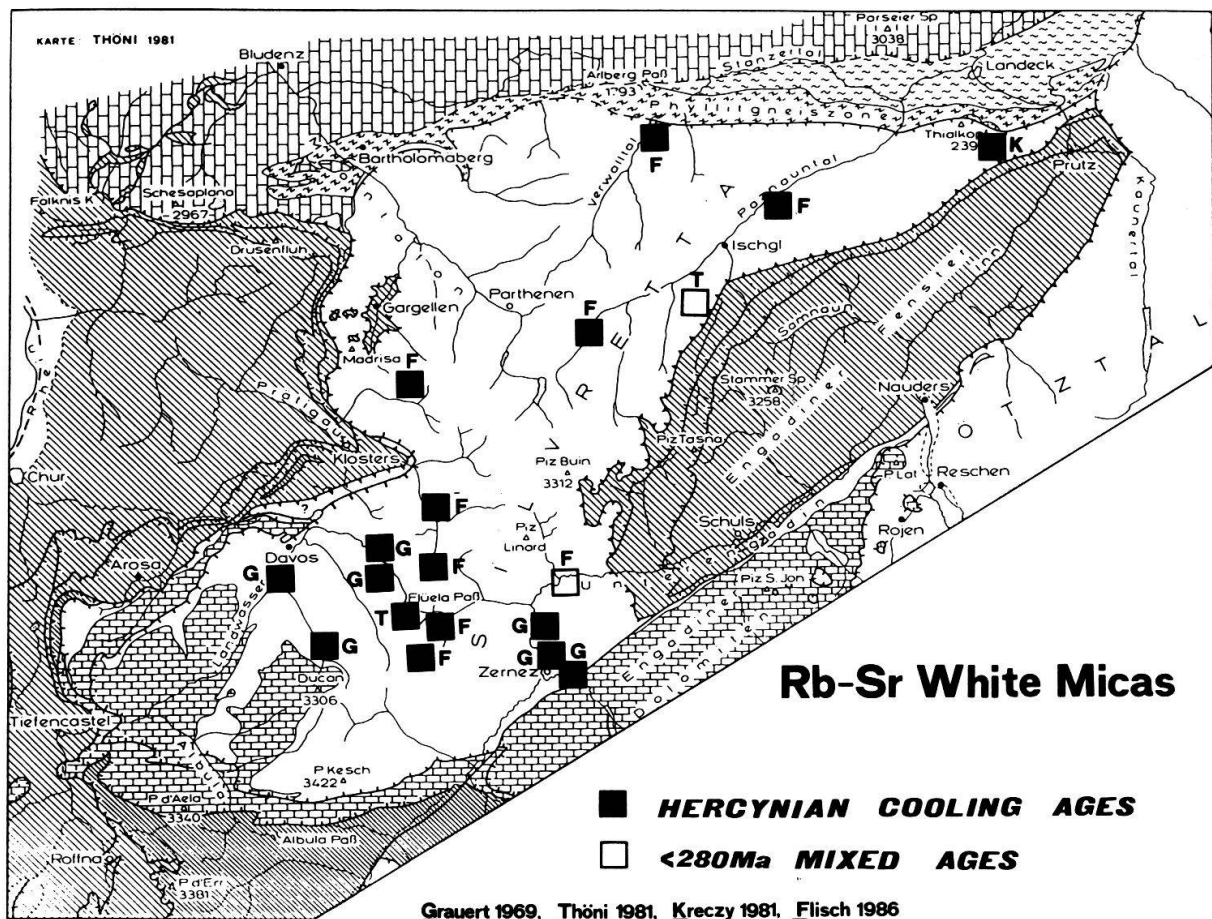


Fig. 2:
Rb-Sr Hellglimmer-Altersverteilung (geschlossene Quadrate: herzynische Abkühlalter >280 Ma, offene Quadrate: herzynisch-alpine Mischalter <280 bis >110 Ma).

Die Verteilung der Rb-Sr Hellglimmeralter (Fig. 2, Abkühltemperatur: $500 \pm 50^\circ\text{C}$) zeigt, dass in der Silvretta-Decke während der alpinen Metamorphose eine Temperatur von 500°C höchstens knapp erreicht wurde. Nur zwei Proben zeigen Mischalter. Bei der Probe aus dem Engadin (Paragneis, KAW 2305, Bohrung Lavin) liegen der Glimmerpunkt ($^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Sr}$: 8.535) und der Gesamtgesteinspunkt ($^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Sr}$: 7.316) sehr nahe beieinander. Eine Korrektur für den Gehalt an gewöhnlichem Strontium (wurde bei der Glimmerbildung eingebaut) ist deshalb nur mit grosser Unsicherheit möglich. Das K-Ar Hellglimmeralter derselben Probe ergibt ein herzynisches Alter. Es ist deshalb anzunehmen, dass auch die Probe KAW 2305 während der alpinen Metamorphose die Temperatur von 500°C nicht erreichte. Auch die aus dem Raume Zernezz von Gruert (1969) mit Rb-Sr datierten Hellglimmer zeigen alle herzynische Alter. Als einziges, bis heute bekanntes, alpin-herzynisches Rb-Sr Hellglimmermischalter bleibt somit die von Thöni (1981) analysierte Probe südwestlich von Ischgl aus der Basis des Silvretta-Kristallins.

Die Rb-Sr Biotitanalysen (Fig. 3, Abkühltemperatur: $300 \pm 50^\circ\text{C}$) zeigen im Bereich Paznauntal - Piz Buin - Piz Linard - Zernezz herzynisch-alpine

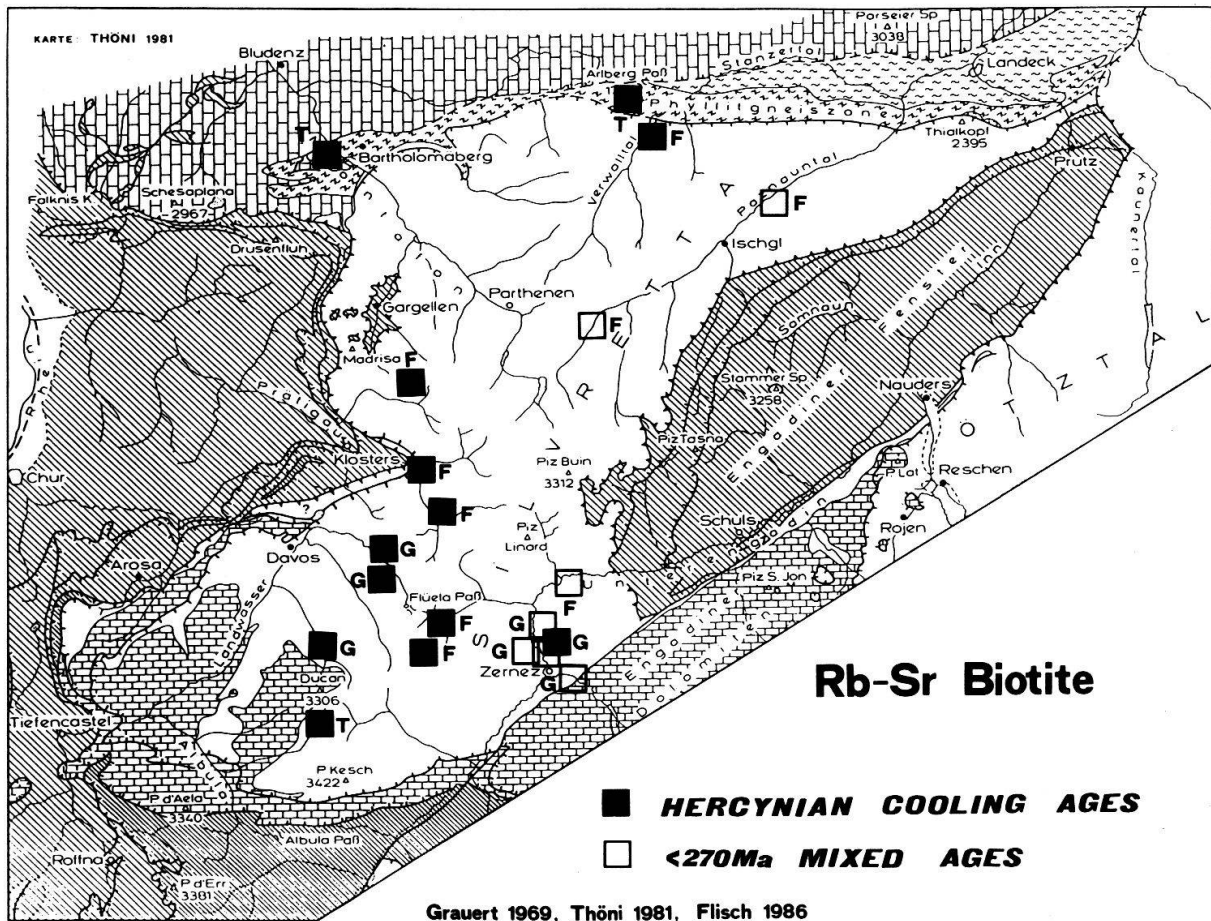


Fig. 3: Rb-Sr Biotit-Altersverteilung (geschlossene Quadrate: herzynische Abkühlalter >270 Ma, offene Quadrate: herzynisch-alpine Mischalter <270 bis >110 Ma).

Mischalter. In der nördlichen und westlichen Silvretta finden sich rein herzynische Abkühlalter.

Die K-Ar Hellglimmeralter (Fig. 4, Abkühltemperatur: $350 \pm 50^\circ\text{C}$) zeigen eine ähnliche Verteilung wie die Rb-Sr Biotitalter. Der Mischaltersbereich ist auf die Umgebung des Engadiner Fensters beschränkt.

Anders präsentiert sich das Bild bei den K-Ar Biotitanalysen (Fig. 5, Abkühltemperatur: $300 \pm 50^\circ\text{C}$). Die ganze zentrale Silvretta-Decke fällt in die Mischalterszone. Bei theoretisch gleicher Rb-Sr und K-Ar Biotit-abkühltemperatur zeigt das K-Ar-System für die Verjüngung im vorliegenden Fall eine etwas grössere Empfindlichkeit. In den Proben KAW 2151, KAW 2296 und KAW 2306 (vgl. Fig. 1) kann am Quarz alpine, straininduzierte Grenzflächenwanderung (Suturierung) und Polygonisation (Subkornbildung) beobachtet werden (vgl. Krähenbühl 1984). Dies setzt nach Voll (1976) eine Temperatur von minimal 275°C voraus. Die alpine Höchsttemperatur lag also für die erwähnten Proben etwa 275 ± 50 und $300 \pm 50^\circ\text{C}$, da, wie bereits erwähnt, das Rb-Sr Biotitsystem nicht verjüngte.

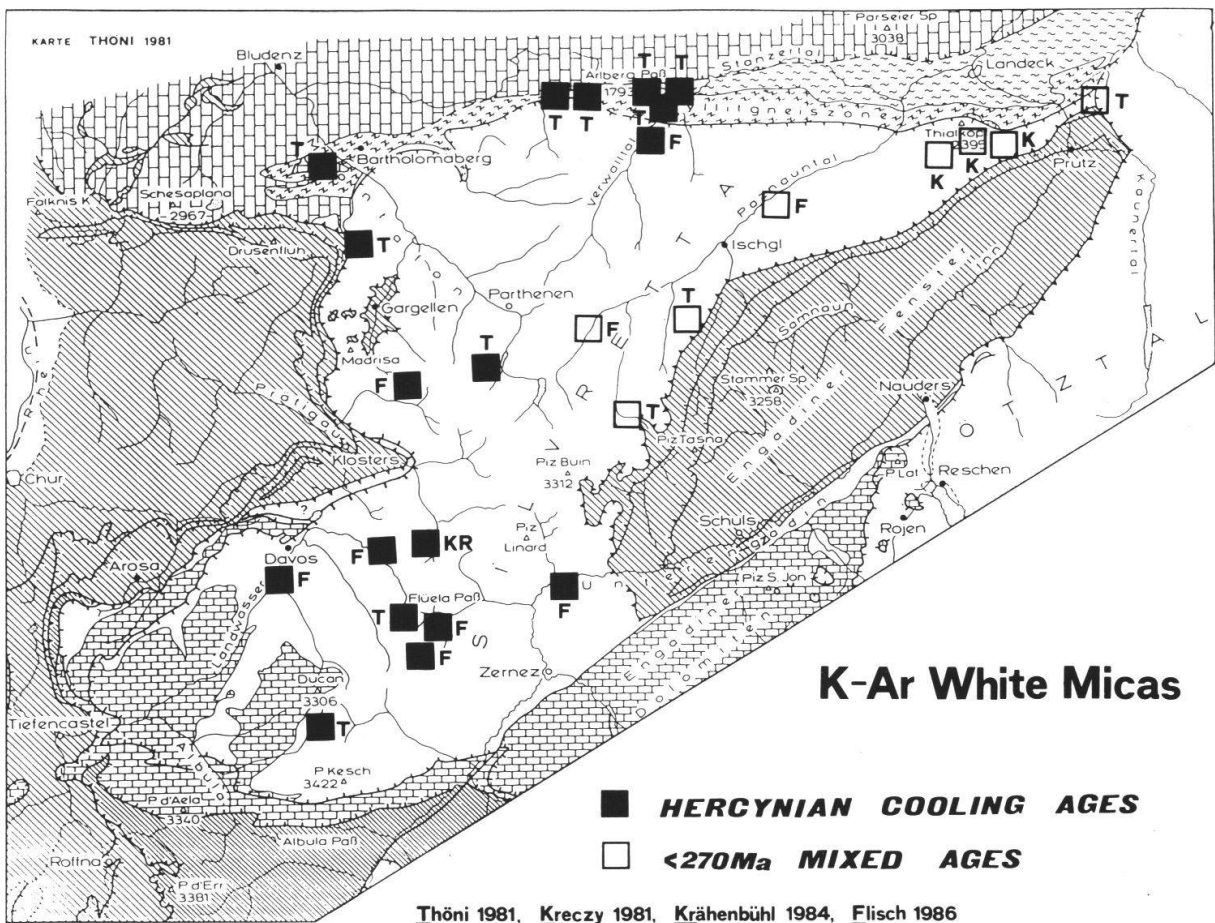


Fig. 4:
K-Ar Hellglimmer-Altersverteilung (geschlossene Quadrate: herzynische Abkühlalter >270 Ma, offene Quadrate: herzynisch-alpine Mischalter <270 bis >110 Ma).

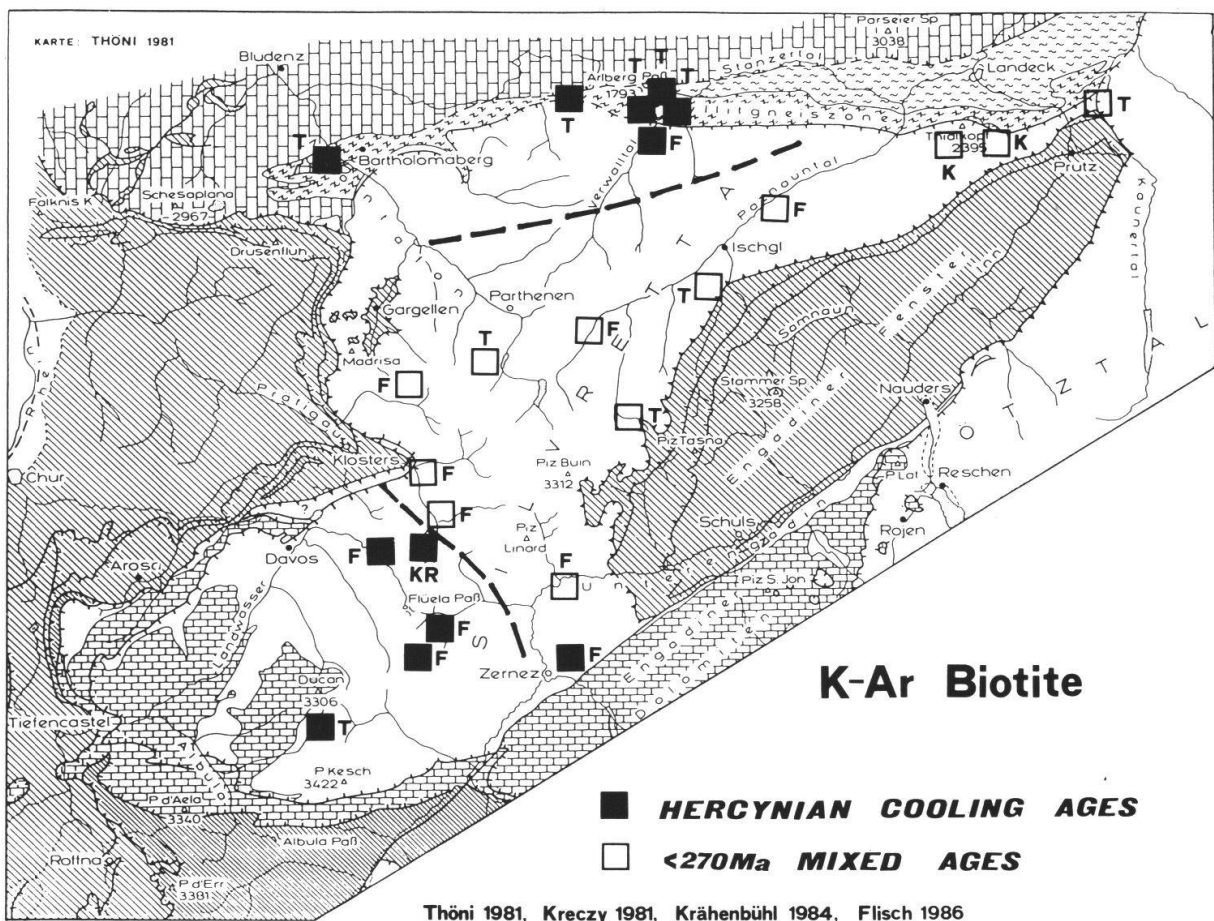


Fig. 5:
K-Ar Biotit-Altersverteilung (geschlossene Quadrate: herzynische Abkühlalter >270 Ma, offene Quadrate: herzynisch-alpine Mischalter <270 bis >110 Ma).

Tabelle 4a: FT Analysendaten: Dosimeterwerte für die Bestrahlungen

Bestrahlung	SRM 612		Dosimeter CN-1		CN-2	
	Nd	pd ($\times 10^5$ tcm ⁻²)	Nd	pd ($\times 10^5$ tcm ⁻²)	Nd	pd ($\times 10^5$ tcm ⁻²)
Bern 23	4427	5.422	6595	16.15	6246	15.30
Bern 27	2495	1.070	3767	3.250	3555	3.048
Bern 30	4774	5.116	-----	-----	-----	-----
Bern 31	-----	-----	10474	3.889	-----	-----

Tabelle 4b: FT Analysendaten: Die verwendeten Zeta-Werte

Mineral	Dosimeter		
	SRM 612	CN-1	CN-2
Zirkon	333 ± 12	111 ± 5	117 ± 5
Apatit	280 ± 15	93.8 ± 4.9	99.1 ± 5.3

Tabelle 4c: FT Analysendaten: Alter

Probe	Mineral	Bestrahlung	Anz. Krist.	Spontane/Induzierte N _s /N _i	ps/pi (x10 ⁵ tcm ⁻²)	Dosimeter	Alter (Ma)	Mittleres Alter (Ma) (±1sigma)
KAW 224	Zirkon	Bern 31	10	2067 242	200.875 23.518	CN-1	184	184 ± 15
KAW 231	Zirkon	Bern 31	10	1740 621	93.830 33.488	CN-1	60.2	60.2 ± 3.9
KAW 2151	Apatit	Bern 23	---	293 1403	8.373 50.119	SRM 612 CN-1 CN-2	25.3 25.3 25.3	25.3 ± 2.1
	Zirkon	Bern 27	12	1973 337	92.120 15.577	SRM 612 CN-1 CN-2	104.5 105.1 104.6	105 ± 8
KAW 2154	Zirkon	Bern 27	10	2691 451	187.915 31.494	SRM 612 CN-1 CN-2	105.5 106.1 105.5	106 ± 7
KAW 2252	Apatit	Bern 23	---	324 1700	4.630 24.291	SRM 612 CN-1 CN-2	28.9 28.8 28.8	28.9 ± 2.4
	Zirkon	Bern 27	15	3299 361	131.778 14.420	SRM 612 CN-1 CN-2	160.8 161.8 160.9	161 ± 12
KAW 2254	Apatit	Bern 23	---	1200 2843	11.431 67.706	SRM 612 CN-1 CN-2	25.6 25.5 25.6	25.6 ± 1.7
	Zirkon	Bern 27	12	2987 329	146.432 16.129	SRM 612 CN-1 CN-2	159.7 160.7 159.9	160 ± 12
KAW 2296	Apatit	Bern 23	---	299 1323	4.272 37.809	SRM 612 CN-1 CN-2	17.1 17.1 17.1	17.1 ± 1.4
	Zirkon	Bern 27	12	2188 498	86.333 19.650	SRM 612 CN-1 CN-2	77.8 78.3 77.9	78 ± 5
KAW 2305	Zirkon	Bern 27	10	1067 312	52.841 15.451	SRM 612 CN-1 CN-2	60.6 61.0 60.7	61 ± 5
KAW 2306	Apatit	Bern 23	---	233 1627	3.329 46.496	SRM 612 CN-1 CN-2	10.9 10.8 10.9	10.9 ± 1.0
	Zirkon	Bern 27	10	3072 682	87.189 19.356	SRM 612 CN-1 CN-2	79.7 80.2 79.8	80 ± 5

Tabelle 4c: FT Analysendaten: Alter (Fortsetzung)

Probe	Mineral	Bestrahlung	Anz. Krist.	Spontane/Induzierte N_s/N_i ps/pi ($\times 10^5 \text{tcm}^{-2}$)		Dosimeter	Alter (Ma)	Mittleres Alter (Ma) ($\pm 1\text{sigma}$)
KAW 2413	Apatit	Bern 30	---	346 1597	4.944 22.820	SRM 612	31.0	31.0 \pm 2.5
	Zirkon	Bern 31	10	2267 302	171.912 22.901	CN-1	155.8	
KAW 2414	Apatit	Bern 30	---	143 335	.908 4.787	SRM 612	27.1	27.1 \pm 3.1
	Zirkon	Bern 31	10	1222 347	101.380 28.788	CN-1	71.9	
KAW 2415	Apatit	Bern 30	---	309 1306	4.415 26.659	SRM 612	23.7	23.7 \pm 3.1
	Zirkon	Bern 31	12	1313 355	140.052 37.866	CN-1	74.2	
KAW 2416	Apatit	Bern 30	---	145 708	1.727 10.117	SRM 612	24.4	24.4 \pm 2.6
	Zirkon	Bern 31	12	1735 264	92.532 14.080	CN-1	130.7	
KAW 2466	Apatit	Bern 30	---	887 3266	8.450 38.890	SRM 612	31.1	31.1 \pm 2.1
	Zirkon	Bern 31	10	1647 483	104.488 30.642	CN-1	67.6	

3.3 Die FT Zirkonaltersverteilung

Die FT Zirkonalter (Fig. 6, Tabelle 4c, Abkühltemperatur 220°C) lassen sich in die drei Bereiche Mischalter, eo-alpine Alter (mittlere bis obere Kreide) und tertiäre Alter gliedern. Ungefähr dort, wo uns das K-Ar Biotitsystem herzynische Alter definiert (südwestliche und nördliche Silvretta), finden wir mit der FT Zirkonmethode herzynisch-alpine Mischalter zwischen 184 und 131 Ma. Die alpinen Temperaturen dürften in diesem Teil der Silvretta 220°C nicht überschritten haben. Im Gebiet der K-Ar Biotit- Mischalterszone (zentrale Silvretta) erhalten wir mit der FT Zirkonmethode alpine Abkühlalter zwischen 106 und 60 Ma. Die Alter zwischen 184 und 131 Ma werden deshalb als Mischalter bezeichnet, da sie bislang mit keinem geologischen Ereignis vernünftig korreliert werden konnten. Tertiäre FT Zirkonalter wurden in der Gegend zwischen Zernez und dem Westende des Engadiner Fensters bestimmt.

3.4 Der Höhepunkt der eo-alpinen Metamorphose

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in Fig. 1 dargestellten Proben südwestlich der Linie Davos-Flüelawisshorn und die Probe aus dem

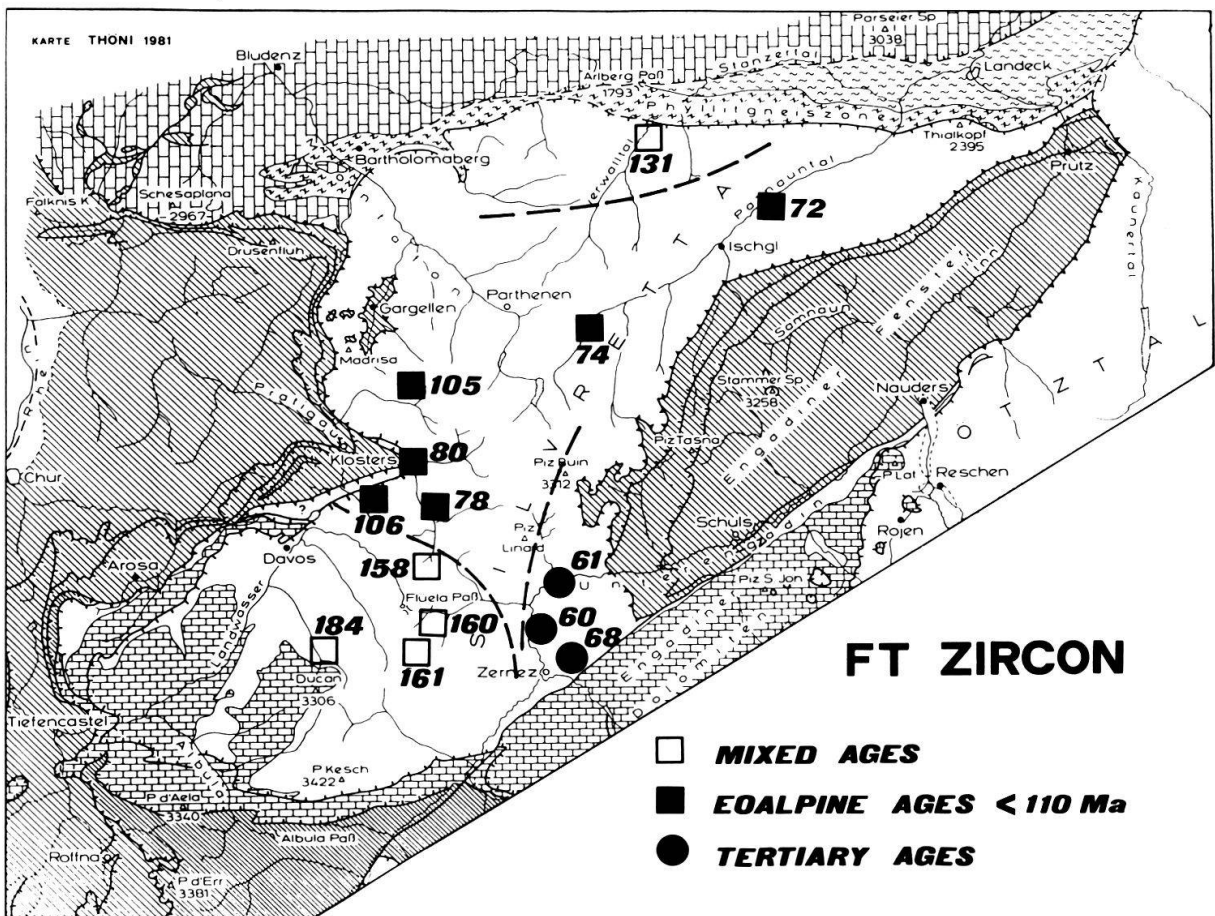


Fig. 6:

FT Zirkon-Altersverteilung (offene Quadrate: herzynisch-alpine Mischalter > 110Ma, geschlossene Quadrate und geschlossene Kreise: alpine abkühlalter < 110Ma).

Verwalltal (damit wahrscheinlich die ganze Umgebung des Arlbergpasses) während der eo-alpinen Metamorphose Temperaturen zwischen 200 und 220°C ausgesetzt waren (FT Zirkon-Mischalterszone). Wären hier die Temperaturen merklich höher oder tiefer gewesen, wäre es entweder zur vollständigen oder zu gar keiner eo-alpinen FT Zirkonverjüngung gekommen. Für die westliche Zentralsilvretta, wo nur die K-Ar Biotite verjüngten, und die Gesteinsquarze straininduzierte Korngrenzenwanderung zeigen, erscheinen Temperaturen von 275- 300±50°C als realistisch. Im Raum Zernez - Lavin finden wir bei den Talproben (<1700 m.ü.M.) Rb-Sr und K-Ar Biotitmischalter. Eine Ausnahme macht die Probe KAW 233 (siehe Grauert 1969), welche, mit neuen Konstanten gerechnet (Steiger und Jäger 1977), ein herzynisches Alter ergibt (272 Ma). Die Probe KAW 2305 (Bohrung Lavin) zeigt ein herzynisches K-Ar Hellglimmeralter- und die Probe KAW 2466 (Munt Baselgia, 2700 m.ü.M.) ein herzynisches K-Ar Biotitalter. Das eo-alpine Temperaturmaximum kann für die Proben im Raum Zernez - Lavin demnach je nach Höhenlage mit 300-350°C angenähert werden. Die Proben im Paznauntal zeigen stark verjüngte Rb-Sr und K-Ar Biotit- und K-Ar Hellglimmeralter. Temperaturen von 350°C wurden sicher, solche von 500°C kaum erreicht.

Der alpine Metamorphosegrad der heute in der Silvretta-Decke aufgeschlossenen Gesteine reicht also von der Diagenese (Sedimente der Ducanmulde) bis zur Grünschieferfazies (low grade) im Paznauntal.

Die Altersbestimmung des eo-alpinen Metamorphosehöhepunktes in den westlichen Ostalpen macht einige Schwierigkeiten. Für die eo-alpine Schneebergmetamorphose (Ötztal-Kristallin) gibt Satir (1975) aufgrund von Hellglimmerbildungsaltern (?) einen Wert von 130-110 Ma. Thöni (1981,1983,1985) bevorzugt ein Alter zwischen 100 und 85 Ma. Er begründet dies mit zahlreichen Glimmer-Abkühlaltern und Kleinbereichsisochronen (Thöni 1983, 1985) aus den oberostalpinen Decken westlich des Tauern Fensters (Ötztal-Decke, Campo-Decke, S-charl Einheiten und Silvretta-Decke). Weiter wird die Auffassung vertreten (Thöni 1981), der eo-alpine thermische Höhepunkt habe in all diesen Einheiten mehr oder weniger gleichzeitig stattgefunden.

Die Proben KAW 2151 und KAW 2154 aus der westlichen zentralen Silvretta-Decke zeigen FT Zirkonalter von 105 bzw. 106 Ma. Aufgrund der Tatsache, dass beide Proben aus dem Gebiet mit K-Ar Biotit-Mischaltern kommen und aufgrund der alpinen Quarzgefüge (siehe oben) müssen diese Alter als eo-alpine Abkühlalter interpretiert werden. Für den Zeitpunkt des Metamorphosehöhepunktes haben wir in der Silvretta-Decke keine weiteren Hinweise und wir legen ihn in einer ersten Näherung auf ca 110 Ma. Es ist aber durchaus möglich, dass die andern oberostalpinen Einheiten ihren thermischen Höhepunkt erst später (<100 Ma) erreichten (siehe Abschnitt 4).

3.5 Die totale Hebung vom eo-alpinen Metamorphosehöhepunkt (ca 110 Ma) bis heute

Mit Hilfe der im letzten Abschnitt abgegrenzten eo-alpinen Temperaturen und unter der Annahme eines geothermischen Gradienten von 30°C/km

(Begründung siehe Abschnitt 3.6) kann die totale Hebung der einzelnen Probenlokalitäten in einer ersten Näherung abgeschätzt werden. Alle Angaben in Fig. 7 wurden auf die heutige mittlere Reliefhöhe von 2200 m.ü.M. (vgl. Wagner et al 1977) bezogen. Für die Proben aus dem Paznauntal (KAW 2414, 2415) wurden Temperaturen von 360°C, bzw. 350°C in die Berechnung eingesetzt. Dies ergibt für diese Proben sicher einen minimalen Hebungsbeitrag von ca. 11 km (vgl. Abschnitt 3.4). Einen Eindruck von der Grössenordnung der differentiellen Hebung vermitteln die Zahlen in Fig. 7. Es zeigt sich eine ungefähr von West nach Ost streichende, nach West fallende, zentrale Aufwölbung der Silvretta-Decke. Der totale Hebungsunterschied beträgt mindestens 5000m.

3.6 Die FT Apatitalter

Um näheres über den Ablauf der alpinen Hebung zu erfahren, wurden auch FT Apatitanalysen durchgeführt (Abkühltemperatur: bei ca. 0.1 mm Hebung/a ca. 100°C, bei ca 1mm Hebung/a ca. 120°C). Die erhaltenen Alter (siehe Tabelle 4) sind in Fig. 8 eingetragen. Der westlichste Punkt (KAW 224) wurde der Arbeit von Wagner, Reimer und Jäger (1977) entnommen. Die Alter zeigen eine stärkere Abhängigkeit von der Höhenlage der Probenlokalität. Im Diagramm "Probenhöhe" gegen Alter (Fig. 9) definieren die Punkte des N-S-

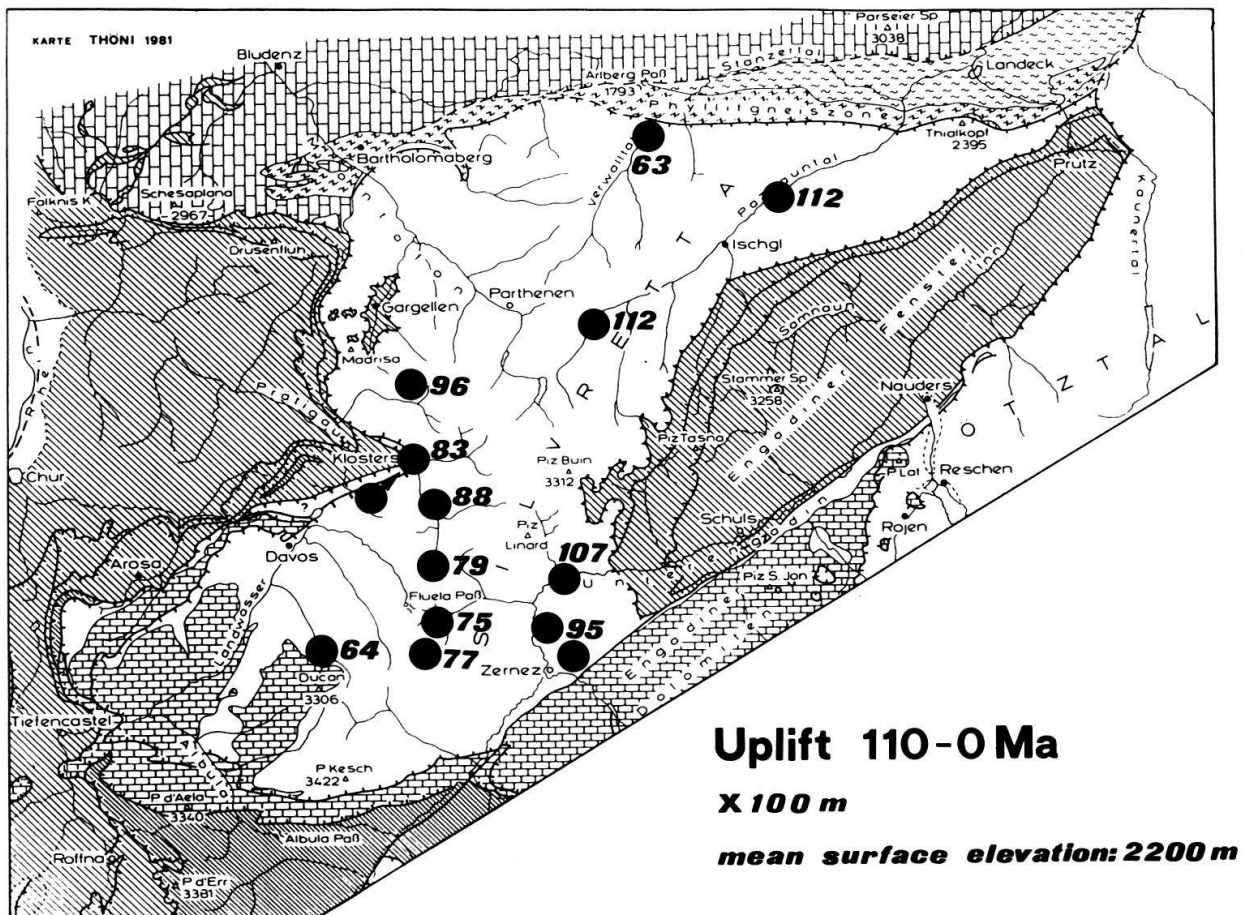


Fig. 7: Totale Hebung 110-0 Ma bezogen auf die mittlere Oberflächenhöhe von 2200 m.ü.M. (x100m).

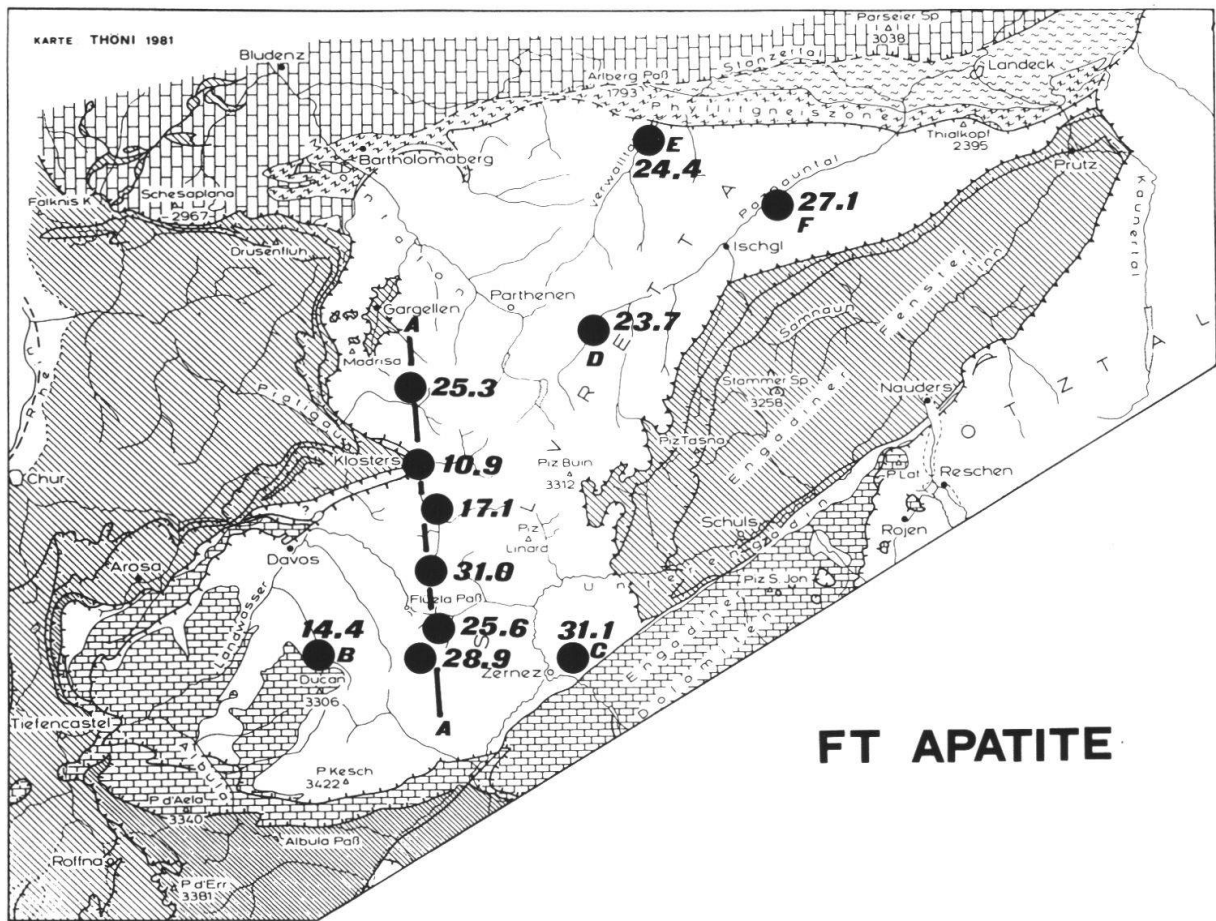


Fig. 8:
FT Apatit-Altersverteilung (Ma).

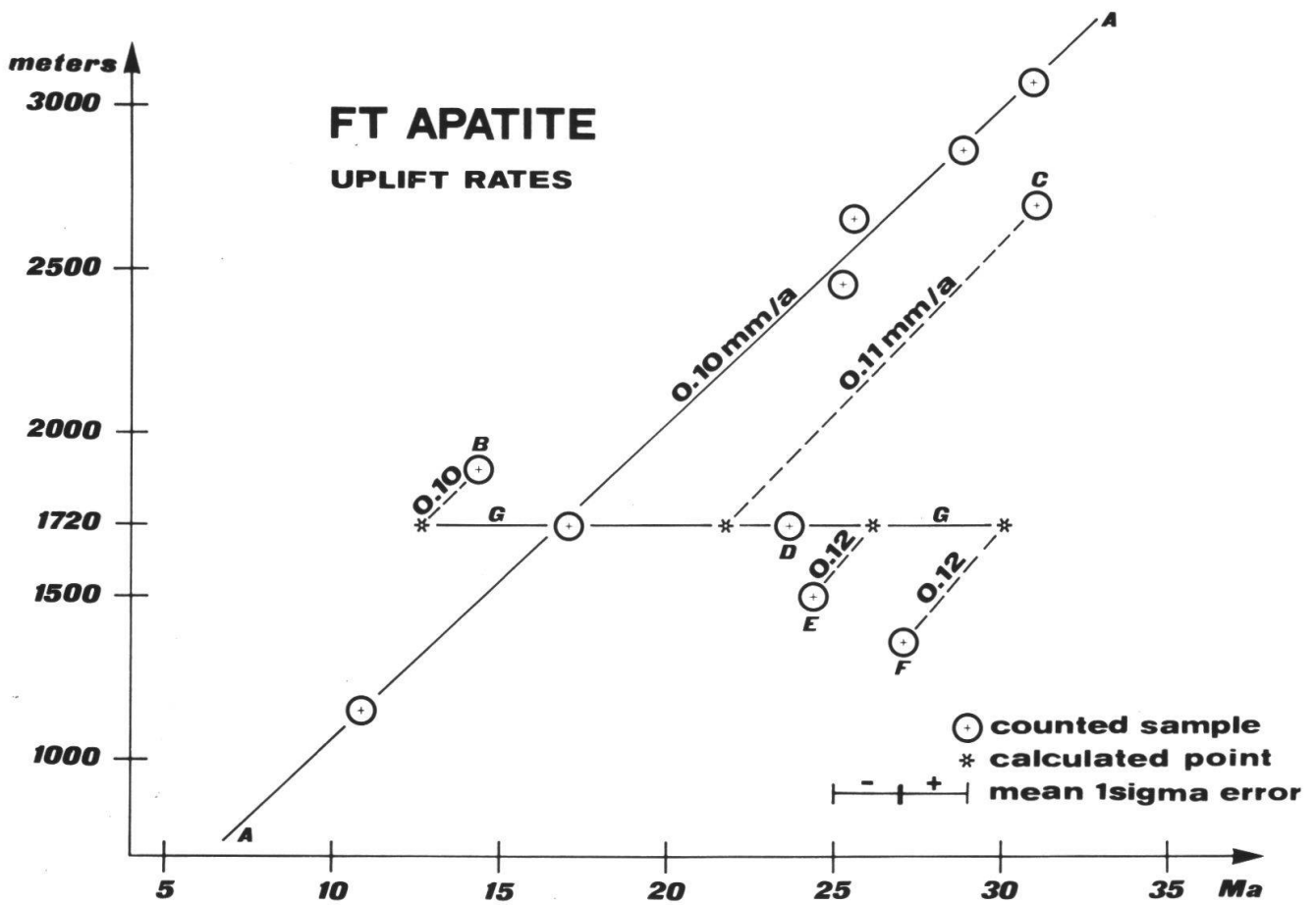


Fig 9:
Ft Apatitalter und Hebungsraten. Auf der Linie A sind die Alter des N-S-Profiles und auf der horizontalen 1720m-Linie (G) die gezählten und die berechneten Punkte der NE-SW-Linie eingetragen.

Profils Schlappintal - Vereinatal - Flüelapass (Fig. 8 und 9 Linie A) eine gut belegte Linie, deren Steigung einer Hebung von 0.1 mm/a entspricht. Die Probe vom Flüelawisshorn (KAW 2413: 3080 m.ü.M.) zeigt mit 31.0 Ma das älteste Alter und die Probe aus der Bohrung Novai (KAW 2306: 1150 m.ü.M) mit 10.9 Ma das jüngste Alter der Profillinie. Jeder Höhenlage auf der N-S-Linie (A) kann nun eindeutig ein Alter zugeordnet werden. In Fig. 8 und 9 fällt auf, dass der Punkt B westlich der Profillinie ein gegenüber seiner Höhenlage zu tiefes und die Punkte C-F östlich davon ein gegenüber ihrer Höhenlage zu hohes Alter besitzen. In Fig. 10 wurde eine neue NE-SW-Linie Paznauntal - Klosters - Davos auf 1720 m.ü.M. gelegt (Linie G). Darauf liegt der Probenpunkt KAW 2415 mit 23.7 Ma (D). Diese NE-SW verlaufende Linie G schneidet das N-S-Profil A bei Klosters. Einer Höhe von 1720 m.ü.M. entspricht dort ein Alter von 16.9 Ma. Zwischen dem Schnittpunkt der beiden Linien (entspricht der Lokalität KAW 2306) und dem Probenpunkt KAW 2415 (23.7 Ma, D) beträgt die Alterszunahme von W nach E auf 18.2 km 6.8 Ma. (Basiswerte!). Nun wird jeder nicht auf der N-S (A) oder der NE-SW (G) Linie liegende Punkt parallel zur N-S-Profillinie auf die NE-SW-Linie projiziert. Für die so erhaltenen Projektionspunkte kann nun mit Hilfe der vorhin definierten Basiswerte das einer Höhe von 1720 m.ü.M. entsprechende Alter rein aus der geographischen Lagebeziehung errechnet werden. Es ergibt sich z.B. für den Projektionspunkt von KAW 224 (Sertig, Ducan, B) ein Alter von 12.7 Ma und für den Projektionspunkt von KAW 2416 (Verwalltal, E) ein solches von 26.2

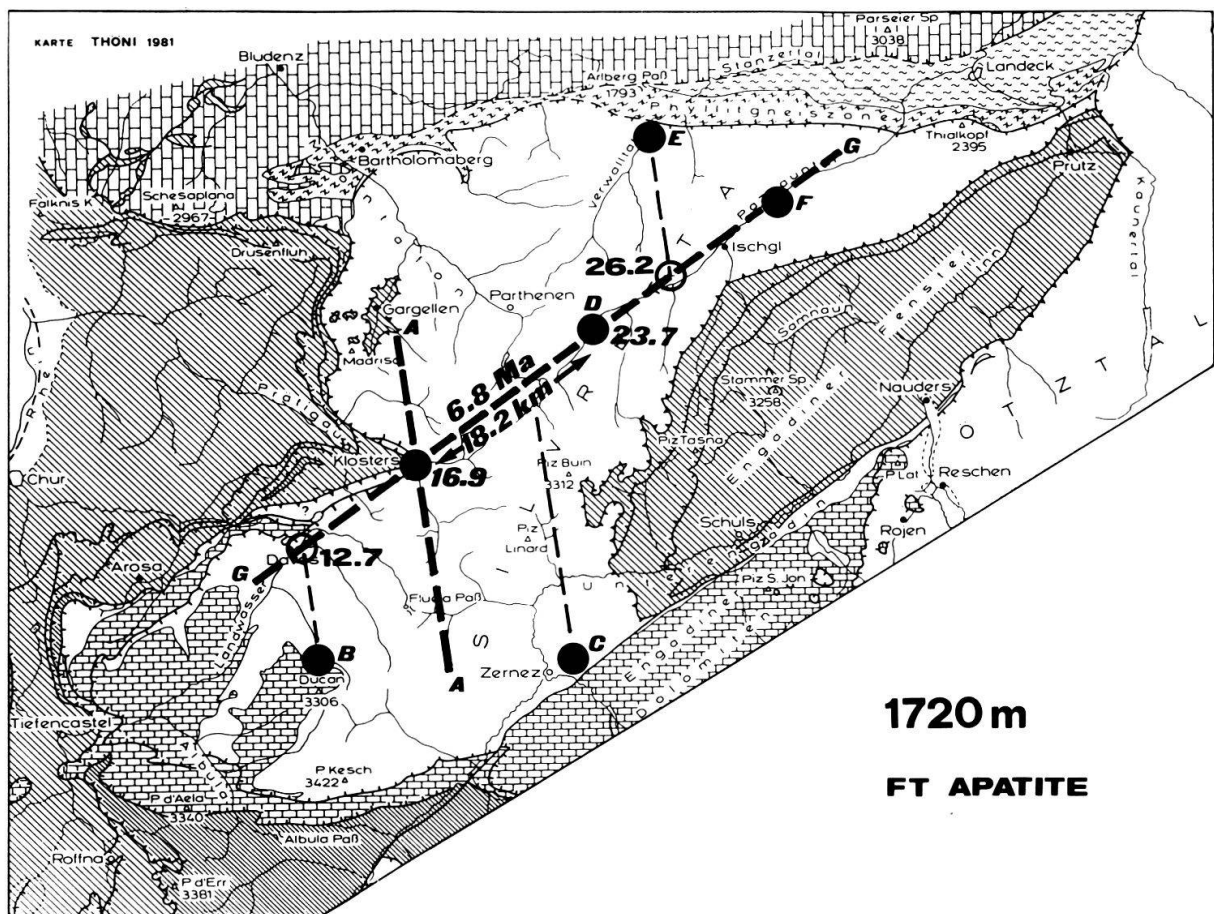


Fig. 10: Die NE-SW-Linie (Vorgehen zum Berechnen der Projektionspunkte).

Ma. Die so errechneten Alter der Projektionspunkte wurden in Fig.9 eingetragen und mit den entsprechenden, gezählten Probenpunkten verbunden. Die Verbindungslinien definieren auch für alle nicht auf der N-S-Profillinie (A) liegenden Probenpunkte zwischen 31 Ma und 10 Ma eine konstante Hebung von ca. 0.1 mm/a. Die Tatsache, dass die Alter auf einer bestimmten Meereshöhe von W nach E zunehmen, muss demnach seine Ursache in einem jüngeren Hebungereignis haben, welches erst nach der Abkühlung des Silvretta-Kristallins unter die FT Apatit Abkühltemperatur wirksam wurde. Bei diesem jüngeren Ereignis wurde die Silvretta-Decke nach E gekippt. Die Kippachse verläuft parallel zur N-S-Profillinie (A).

Das gesuchte jüngere Ereignis finden wir in der heute noch in ganz Graubünden und dem angrenzenden Ausland wirksamen Churer Hebung. Sie äussert sich in anormal hohen, von Chur aus radial abnehmenden Hebungsbeträgen (Gubler 1976). Kahle und Klingelé (1979) führen diese

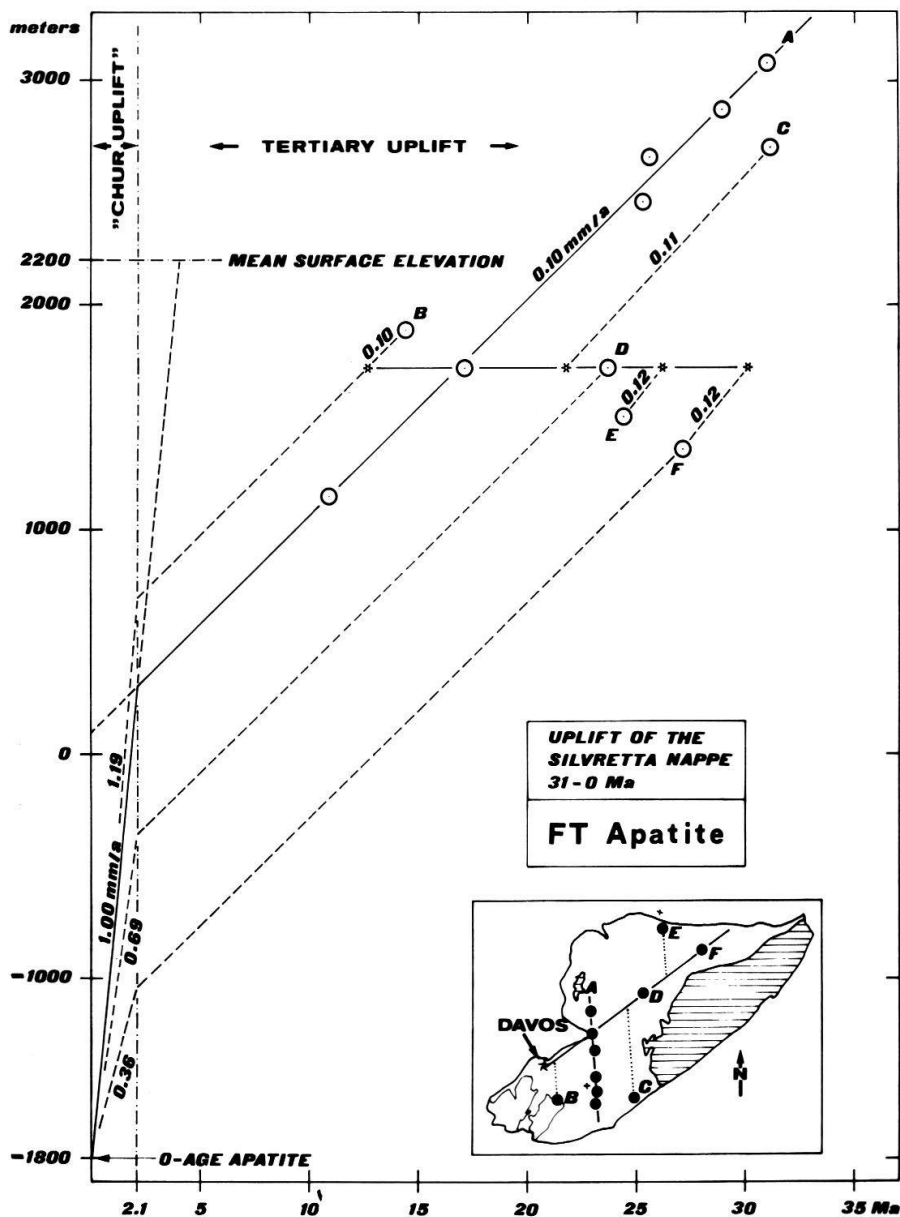


Fig. 11:
Die Hebung der Silvretta-Decke zwischen 31 und 0 Ma.

Hebung auf eine ausgeprägte, negative isostatische Anomalie mit Zentrum in der Region Chur zurück. Die rezente Hebung von Chur beträgt ca. 1.7 mm/a und von Davos ca. 1.1-1.2 mm/a, sie nimmt also gegen E ab.

Es stellt sich nun die Frage, in welcher Tiefe heute mit Apatit-Nullaltern gerechnet werden muss, d.h. in welcher Tiefe die heutige Temperatur 120°C beträgt. Temperaturmessungen in den Bohrlöchern für die Projektierung des Vereina-Tunnels lassen in der Silvretta einen normalen geothermischen Gradienten von ca. 30°C/km vermuten. Mit einer mittleren Meereshöhe von 2200 m berechnet, liegt somit die Apatit-Nullalterstiefe auf -1800 m (siehe Fig. 11). Für das Gebiet östlich von Klosters, wo die N-S-Profilinie (A) durchzieht, kann in erster Näherung eine rezente Hebungsrate von 1.0 mm/a abgeschätzt werden. Lassen wir nun einen Apatit von -1800 m mit 1.0 mm/a heben, definiert das eine Hebungslinie, welche die 0.1 mm/a Hebungslinie des N-S-Profils (Fig. 11, Linie A) bei 2.1 Ma schneidet. Diese 2.1 Ma zeigen uns den ungefähren Beginn der rezenten Churer Hebung. Lassen wir nun den Probenpunkt B während der letzten 2.1 Ma mit 1.2 mm/a, Profil A mit 1.0 mm/a, Punkt D mit 0.7 mm/a und Probe F mit 0.4 mm/a heben, ergibt das genau die gefundene FT-Apatitaltersverteilung. Gute Übereinstimmung mit der postulierten Ostkipung zeigen auch die Beobachtungen von Krähenhühl (1984). Er führte im Vereina-Gebiet Kluftrichtungen durch, und die weitaus häufigste Kluftrichtung verläuft genau parallel dem N-S-Profil, also parallel der

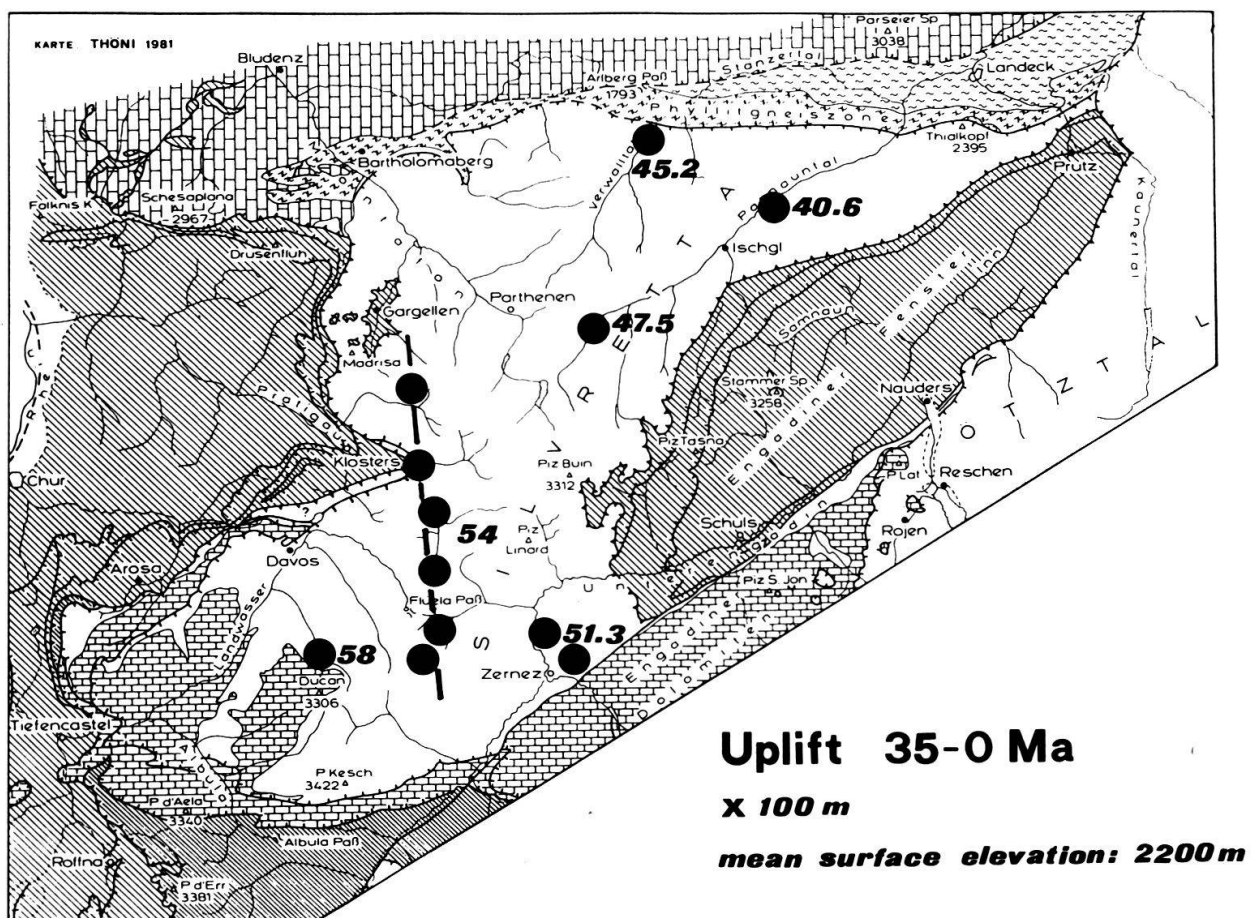


Fig. 12: Die Hebungsbeträge 35-0 Ma bezogen auf die mittlere Oberflächenhöhe von 2200 m.ü.M. (x100m).

Achse der jungen Ostkipfung. Gleiches geht aus den bei der Projektierung des Vereina Tunnels (Klosters - Lavin) gemachten Beobachtungen hervor.

Die Fig. 12 zeigt die Hebungsbeträge der mittleren Reliefhöhe wie sie sich aus den FT Apatitanalysen für die Zeit zwischen 35 Ma und heute ableiten lassen. Die totale Hebung in diesem Zeitraum setzt sich aus einer älteren, homogenen Hebung (ca 35 Ma bis 2.1 Ma) und einer jüngeren (<2.1 Ma), ostkippenden Hebung zusammen. Die ältesten Alter der homogenen Hebungsphase ergaben 31.1 Ma. Dies ist aber nur ein Minimalalter für den Beginn dieser Hebungsphase, da keine Proben von höhergelegenen Lokalitäten zur Verfügung standen. Der Beginn der 0.1 mm/a Hebung ist aber sicher jünger als 40 Ma, da ansonsten die Hebung für den Punkt KAW 224 (Sertig/Ducan) bereits höher wäre als die gesamte, abgeschätzte Überlagerung (siehe auch Fig. 7). Für den Beginn der homogenen 0.1 mm/a-Hebung wurde ein Alter von 35 Ma angenommen. Die aus dieser Abschätzung auf dem Hebungsbetrag 35-0 Ma resultierende Unsicherheit beträgt ± 400 m.

Es muss erwähnt werden, dass der errechnete Hebungsbetrag für die Zeit zwischen 35 Ma und 2.1 Ma vom herrschenden Thermogradienten unabhängig ist. Einzige Bedingung ist die horizontale Lage der Isothermenflächen. Der Thermogradient für die Zeit < 2.1 Ma kann aus rezenten Messungen gut geschätzt werden. Die Gesamthebungsbeträge in Fig. 12 sind deshalb relativ gut belegt.

In Abschnitt 3.5 haben wir zur Abschätzung des Gesamthebungsbetrages 110-0 Ma einen Thermogradienten von 30°C/km eingesetzt. In jüngerer Literatur wird für die eo-alpine Phase im Oberostalpin ein wesentlich höherer Thermogradient postuliert. Dies dürfte aber für die Silvretta-Decke kaum Gültigkeit haben, da bereits der gut belegte Hebungsbetrag 35-0 Ma mit einem Thermogradient von 36°C/km zur vollständigen Verjüngung der FT-Zirkonalter in der Probe KAW 224 (Sertig/Ducan) hätte führen müssen. Der Thermogradient von 30°C/km wurde demnach im Zeitraum 110-0 Ma kaum wesentlich überschritten.

4. Zusammenfassung und Konsequenzen

In Fig. 13 ist die Hebungsgeschichte der Silvretta-Decke zwischen 110 und 0 Ma zusammengefasst. Es wurde eine Zweiteilung in den weniger gut belegten Zeitraum zwischen 110 und 35 Ma (unterhalb der 0-Linie) und den besser belegten Zeitraum 35-0 Ma (oberhalb der 0-Linie) durchgeführt. Die Gesamthebung der einzelnen Probenpunkte bezogen auf die mittlere Höhe von 2200 m ergibt sich durch Addition der beiden Komponenten.

Im Folgenden beziehen sich die Buchstaben auf das Kärtchen in Fig. 13. Für den Zeitraum 110-35 Ma zeigt der Punkt A (Sertig/Ducan) die kleinste und die Punkte F,G und H in der südwestlichen Silvretta, sowie der Punkt M in der nördlichen Silvretta (Verwalltal) eine geringe Hebung. Die Punkte B,C D und E im westlichen Zentralteil, sowie die Punkte I, J und K aus der Gegend von Zernez wurden relativ stark, die Punkte L und N im Paznauntal wurden am stärksten gehoben. Dies ergibt eine zentrale, ca W-E streichende, nach W fallende Aufwölbung der Silvretta-Decke.

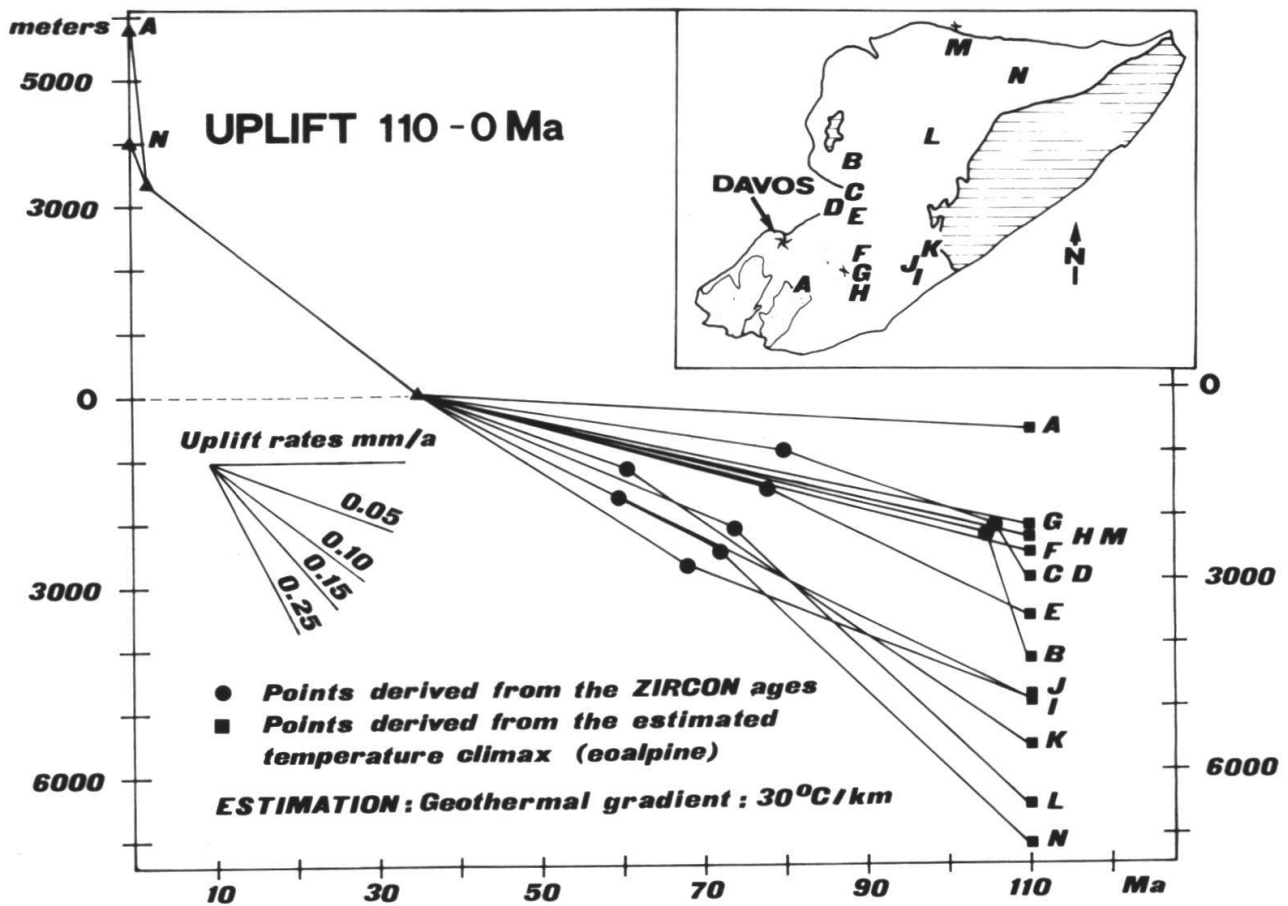


Fig. 13:

Die Hebungsgeschichte der Silvretta-Decke von der mittleren Kreide bis heute (unterhalb der 0-Linie: Hebung 110-35 Ma, oberhalb der 0-Linie: Hebung 35-0 Ma).

Die FT Zirkonalter zeigen, dass ein Grossteil der heute in der Silvretta-Decke sichtbaren differentiellen Hebung älter ist als 80 Ma. Damit wird auch die Hebung, welche zur zentralen Aufwölbung führte, teilweise älter als 80 Ma. Wie die Hebung zwischen 110 Ma und 80 Ma im einzelnen ablief, kann aber nur vermutet werden. Folgendes Modell wird vorgeschlagen:

Um 110 Ma, eher aber früher, begann im oberostalpinen Ablagerungsraum die Kompression der eo-alpinen Phase. Dies führte zur Bildung von Hochgebieten (Aufwölbungen) und damit zur Abkühlung gewisser Teilbereiche (105 und 106 Ma Zirkonalter). Zu dieser Zeit könnte es auch bereits zur Aufschuppung grösserer Kristallin- und Sedimentpartien gekommen sein. In den zwischen den Hochgebieten liegenden Becken entstanden flyschartige Ablagerungen (z.B. Triazza-Formation, siehe Furrer 1985). Die Einengung im oberostalpinen Raum wird stärker. Dies führte in der Zeit vor 90-80 Ma zur Bildung grosser Abscherungen und damit entstanden die grossen Kristallin- und Sedimentdecken wie Silvretta-Decke, Ötztal-Decke, Decken der nördl. Kalkalpen usw. Die daraus folgende starke Krustenverdickung führte zur Temperatur- und Druckzunahme in den tieferen Teilen des oberostalpinen Deckenstapels (vgl. Thöni 1985). Der Metamorphosehöhepunkt stand also vor 90 Ma gewissen oberostalpinen Kristallin- und Sedimentdecken erst bevor (z.B. Ötztal-Decke), wobei andere

nur noch abkühlten (z.B. Silvretta-Decke). Dass im oberostalpinen Ablagerungsraum der Schweiz keine jüngeren als Cenoman- oder Turonsedimente zu finden sind (Furrer 1985), gibt auch einen Hinweis für das Einsetzen grosser tektonischer Bewegungen um diese Zeit. Ein Grossteil der differentiellen Hebung und damit der Abkühlung der Silvretta-Decke ist also vor deren endgültigen Abscherung vom kontinentalen Untergrund erfolgt (siehe Fig 13). Die Abscherung ging demnach bei Temperaturen um oder unter 250°C vor sich. Damit war eine plastische Deformation der Gesteine nicht mehr möglich und dies erklärt auch die Entstehung der für die Silvrettabasis typischen Pseudotachylite. Dieses Modell setzt voraus, dass es sich bei der Silvretta-Decke wirklich um eine der höchsten tektonischen Einheiten des Oberostalpins handelt, da die Deckenstapelung zwischen 90 und 80 Ma ohne wesentliche Auswirkung blieb. Tatsächlich können bei einer Sedimentbedeckung von ca. 4000 m die in der Silvretta-Decke gefundenen alpinen Metamorphosebedingungen praktisch ohne Fremdbedeckung (höchstens 2000-3000 m) erklärt werden. Dies folgt aus den Zirkon-Mischaltern der Proben KAW 224 von Sertig und KAW 2416 aus dem Verwalltal (in Fig. 13 die Proben A und M). Die Ereignisse zwischen 90 und 80Ma führten innerhalb der Silvretta-Decke zu Verschuppung und Verfaltung (z.B. Einfalten der Ducan-Sedimente, Ducan-Scherfläche und Muchetta-Falte). Die daraus resultierende Mächtigkeitzunahme hatte aber nur eine geringe Auswirkung auf die Silvretta-Decke. Die höhere Diagenese der noch vorhandenen unteren bis mittleren Triasformationen (Dunoyer de Segonzac, Bernoulli 1976) im Ducangebiet kann damit erklärt werden.

Die jüngsten Sedimente im Engadiner Fenster wurden von Rudolf (1979, 1982) und Oberhauser (1983) ins obere Paleozän bis untere Eozän eingestuft. Die Unterschiebung der penninischen Decken ist demnach sicher jünger als 65 Ma. Bei den FT Zirkonaltern zeigen die Punkte J (KAW 231, 1650 m.ü.M., 60 Ma) und K (Kaw 2305, 1220 m.ü.M., 61 Ma) eine geringe Altersinversion wie sie für die Überschiebung von "warmen" Decken auf "kalte" Sedimente üblich ist. Ob wir mit den 61 Ma den Beginn der Unterschiebung des Penninikums unter das Ostalpin datiert haben, wäre möglich, muss aber noch mit weiteren Datierungen abgeklärt werden.

Vor ca. 35 Ma, spätestens aber vor 31 Ma, setzte in der Silvretta eine für alle analysierten Punkte gleich schnelle, homogene Hebung ein. Diese langsame Hebung (0.1 mm/a) dauerte bis vor 2.1 Ma (Beginn der Churer Hebung). In der Literatur (z.B. Pirkl 1980) wird die Aufwölbung des Engadiner Fensters ins Miozän eingestuft. Ein Einfluss auf die Apatitaltersverteilung wäre deshalb, entgegen unseren Feststellungen, zu erwarten gewesen. Es erscheint deshalb wahrscheinlicher, dass die Hebung des Engadiner Fensters im Zeitraum zwischen ca. 60 Ma (jüngste Sedimente im Fenster) und ca. 35 Ma (Beginn der homogenen Hebung) stattfand.

Die beiden Probenpunkte A und N (Fig. 13) zeigen die Auswirkungen der jungen Churer Hebung. Sie führte in der Zeit zwischen 2.1 Ma und heute zu einer Ostkipfung der Silvretta-Decke.

Anhang

Die bearbeiteten Proben:

An den nachstehenden Proben wurden im Rahmen dieser Arbeit die aufgeführten Datierungen durchgeführt (Fig. 1):

KAW 55 (gesammelt von E. Jäger und A. Streckeisen, Grauert 1969) Steinbruch bei Davos-Frauenkirch, anstehend; Koord. 780.200 / 182.800; grobflaseriger Muscovitgranitgneis vom Typus Frauenkirch; K-Ar Muscovit.

KAW 56 (gesammelt von E. Jäger und A. Streckeisen, Grauert 1969) Flüelatal, Lokalität Mehlkasten, Block aus der Moräne; Koord. 790.300 / 183.925; augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; K-Ar Biotit und Muscovit.

KAW 57 (gesammelt von E. Jäger und A. Streckeisen, Grauert 1969) Radönt, SE Flüelapass, anstehend; Koor. 793.000 / 179.675; feinkörniger Biotit-Plagioklas-Paragneis; K-Ar Biotit.

KAW 224 (gesammelt von B. Grauert 1969) Felssturz SW von Sand im Sertigtal, Sturzblock; Koord. 784.060 / 177.090, 1890 m.ü.M.; augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; FT Zirkon, FT Apatit wurde von Wagner et al (1977) durchgeführt.

KAW 231 (gesammelt von B. Grauert 1969) oberer Steinbruch von Plattas N von Zernez, anstehend; Koord. 803.115 / 176.930, 1650 m.ü.M.; klein- bis mittelkörniger granitischer Zweiglimmergneis; FT Zirkon.

KAW 2151 Rot Büel im Schlappintal bei Klosters, anstehend; Koord. 792.000 / 198.275, 2460 m.ü.M.; gleichkörnig massiger, einschlussreicher Anatexit (Rotbüelgranit); Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2154 Mönchalptal, Sturzblock; Koord. 787.900 / 189.280, ehemalige Höhe: 2350 +/- 200 m.ü.M.; grobkörniger, massiger Granit mit vielen, bis 10 cm grossen Biotitputzen (Mönchalpgranit); FT Zirkon.

KAW 2252 Radönt, SE Flüelapass, anstehend; Koord. 793.100 / 177.975, 2870 m.ü.M.; muskovitführender, augiger Biotitgranitgneis vom Typus Radönt; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2254 Radönt, SE Flüelapass, anstehend; Koord. 793.580 / 178.980, 2660 m.ü.M.; klein bis mittelkörniger granitischer Zweiglimmergneis; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Muscovit.

KAW 2296 Vereina, Stutzalp, 98m-103m der Bohrung Vereina; Koord. 793.210 / 189.190, 1720 m.ü.M.; augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2296 Vereina, Stutzalp, 98m-103m der Bohrung Vereina; Koord. 793.210 / 189.190, 1720 m.ü.M.; augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2305 Lavin, Pranun, 169-175m der Bohrung Lavin; Koord. 803.990 / 182.450, 1220 m.ü.M.; Biotit-Palgioklas-Paragneis; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Zirkon.

KAW 2306 Novai, 188-207m der Bohrung Novai; Koord. 791.655 / 192.110, 1150 m.ü.M.; kataklastischer, augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; Rb-Sr Biotit, K-Ar Biotit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2413 Gipfel des Flüelawisshorn, anstehend; Koord. 793.100 / 182.180, 3080 m.ü.M.; augiger Zweiglimmer-Granitgneis vom Typus Flüela; Rb-Sr Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2414 kleiner Steinbruch zwischen Kappl und Ischgl (an der Strasse gelegen), anstehend; Koord. 820.000 / 213.825, 1360 m.ü.M.; muskovitführender Biotitgranitgneis; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2415 klein Vermunt, Steinbruch an der Silvretta-Hochalpenstrasse bei der Abzweigung zum Stausee Kops, 3.5 km WSW Galtür, anstehend; Koord. 806.500 / 204.050, 1720 m.ü.M.; grobflaseriger Granitgneis; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2416 Verwalltal, ca 1.25 km SW Rasthaus Verwall, anstehend; Koord. 810.450 / 219.800, 1500 m.ü.M.; feinkörniger Biotit-Plagioklas-Paragneis; Rb-Sr Biotit und Muscovit, K-Ar Biotit und Muscovit, FT Apatit und Zirkon.

KAW 2466 Munt Baselgia, NE Zernez, anstehend; Koord. 805.375 / 177.150, 2700 m.ü.M.; grobkörniger, massiger Granit mit vielen, bis 10 cm grossen Biotitputzen (Mönchalpgranit) ; Rb-Sr Biotit, K-Ar Biotit, FT Apatit und Zirkon.

Verdankungen

Vorliegende Arbeit entstand als Teil der Dissertation unter der Leitung von Frau Prof. Dr. E. Jäger. Für ihr stetes Interesse am Fortgang der Arbeit, für die zahlreichen Diskussionen, Anregungen und Hilfeleistungen sei herzlichst gedankt. Für die Einführung in die FT Altersbestimmung gebührt unserem Spezialisten Herrn Dr. A. J. Hurford ein ganz besonderer Dank. Viele Diskussionen mit meinen Kommilitonen an der Abteilung für Isotopengeologie, speziell mit den Herren R. Krähenbühl und M. Giger, lösten viele Probleme. Für die Hilfe am Computer und die Wartung der elektronischen Geräte möchte ich den Herren Dr. R. Siegenthaler und R. Brunner danken. Herr U. Schaltegger und Frau I. Hebeisen halfen im Chemielabor und führten die K-Bestimmungen durch. Vielen Dank auch meiner Frau Sybille für die Reinschrift des Manuskripts und ihre stete Unterstützung. Die alpine Altersforschung an der Abteilung für Isotopengeologie wird vom schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unterstützt.

Literaturverzeichnis

- DALRYMPLE, G.B., LANPHERE, M.A. (1969): *Potassium-Argon Dating*. W.H. Freeman, San Francisco, 258p.
- DÖSSEGGER, R (1974): *Verrucano und Buntsandstein in den Unterengadiner Dolomiten*. Mitt. Geol. Inst. ETH und Univ. Zürich (N.F.) 235.
- DUNOYER DE SEGONZAC, G., BERNOULLI, D. (1976): *Diagenese et metamorphisme des argiles dans le Rhétien Sud-alpin et Austro-alpin (Lombardie et Grisons)*. Bull. Soc. géol. France 7, t. XVIII, 1283-1293.
- FLEISCHER, R.L., HART, H.R. (1972): *Fission track dating: techniques, and problems*. In: Calibration of hominoid evolution (Bishop, W.W., Miller, J.A., eds.), Scott Acad Press, Edinburgh, 135-170.
- FLISCH, M. (1982): *Potassium-Argon Analysis*. In: Numerical dating in stratigraphy (Odin, G.S., ed.), John Wiley, Chichester, 151-158.
- FLISCH, M. (1986 A): *K-Ar dating of Quaternary samples*. In: Dating young sediments (Hurford, A.J., Jäger, E., Ten Cate, J.A.M., eds.), CCOP Technical Secretariat, Bangkok, Thailand, TP 16, 299-323.
- FURRER, H. (1985): *Field workshop on Triassic and Jurassic sediments in the Eastern Alps of Switzerland, Guide-Book*. Mitt. Geol. Inst. ETH und Univ. Zürich (N.F.) 248.
- GLEADOW, A.J.W. (1981): *Fission track dating methods: what are the real alternatives?* Nucl Tracks 5, 3-14.
- GLEADOW, A.J.W., HURFORD, A.J., QUAIFFE, D.R. (1976): *Fission track dating of zircon - improved etching techniques*. Earth Planet Sci Letts 33, 273-276.
- GRAUERT, B. (1969): *Die Entwicklungsgeschichte des Silvretta-Kristallins auf Grund radiometrischer Altersbestimmungen*. Steinbauer und Rau, München.
- GREEN, P.F. (1981): *A new look at statistics in fission track dating*. Nucl Tracks 5, 77-86.
- GUBLER, E. (1976): *Beitrag des Landesnivellements zur Bestimmung vertikaler Krustenbewegungen in der Gotthard-Region*. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 675-678.
- HURFORD, A.J. (1986): *Application of the fission track dating method to young sediments: principles, methodology and examples*. In: Dating young sediments (Hurford, A.J., Jäger, E., Ten Cate, J.A.M., eds.), CCOP Technical Secretariat, Bangkok, Thailand, TP 16, 199-233.
- HURFORD, A.J., GREEN, P.F. (1982): *A users' guide to fission track dating calibration*. Earth Planet Sci Letts 59, 343-354.
- HURFORD, A.J., GREEN, P.F. (1983): *The zeta age calibration of fission track dating*. Isot Geosci 1, 285-317.
- KAHLE, H.-G., KLINGELE, E. (1980): *Recent activities in gravimetry and physical geodesy*. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 59, 207-217.
- KIRSTEN, T. (1966): *Determination of radiogenic argon*. In: Potassium argon dating (Schäffer, O.A., Zähringer, J., eds.), Springer Verlag, Heidelberg, 7-39.

KRÄHENBÜHL, R. (1984): *Petrographisch-Geologische Untersuchungen in der Silvretta-Masse vom Flüelawisshorn zum Gorihorn und Rosställispitz (Kanton Graubünden)*. Unpubl. Diplomarbeit, Bern.

KRECZY, L. (1981): *Seriengliederung, Metamorphose und Altersbestimmung in der Region der Thialspitze SW Landeck, Tirol*. Unpubl. Diss. Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien.

OBERHAUSER, R. (1983): *Mikrofossilfunde im Nordwestteil des Unterengadiner Fensters sowie im Verspallfisch des Rätikon*. Jb. Geol. B.-A. 126/1, 71-93.

PIRKL, H. (1980): *Die westlichen Zentralalpen (von der Silvretta zum Brenner)*. In: *Der geologische Aufbau Österreichs* (Oberhauser, R., ed.), Springer-Verlag, Wien-New York.

RUDOLF, J. (1979): *Geologische Untersuchungen im obersten Fimbartal*. Unpubl. Diplomarbeit Univ. Freiburg i. Br.

RUDOLF, J. (1982): *Tieferes Tertiär im oberen Fimbartal*. Neues Jb. Geol. Palaeont., MH, 1982, 181-183.

SATIR, M. (1975): *Die Entwicklungsgeschichte der westlichen Hohen Tauern und der südlichen Ötztalmasse aufgrund radiometrischer Altersbestimmungen*. Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova 30, 1-84.

SCHUMACHER, E. (1975): *Herstellung von > 99.9997 per cent ^{38}Ar für die $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ Geochronologie*. Chimia 29, 441-442.

STEIGER, R.H., JÄGER, E. (1977): *Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology*. Earth Planet Sci Letts 36, 359-362.

THÖNI, M. (1981): *Degree and evolution of the alpine metamorphism in the austroalpine unit W of the Hohe Tauern in the light of K/Ar and Rb/Sr age determinations on micas*. Jb. Geol. B.-A. 124, H.1, 111-174.

THÖNI, M. (1982): *Der Einfluss der kretazischen Metamorphose im Westabschnitt der ostalpinen Einheit: Interpretation geochronologischer Daten*. Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr. 28, 17-34.

THÖNI, M. (1983): *The thermal climax of the early alpine metamorphism in the austroalpine thrust sheet*. Mem. scienze. geol. Padova 36, 211-238.

THÖNI, M. (1985): *Die Rb/Sr -Kleinbereichsisochronen-Methode -- ein unverlässliches Instrument zur Datierung geologischer Ereignisse in polymetamorphen Gebieten ?* Habilitationsschrift, Formal- u. Naturwiss. Fak. Univ. Wien.

VOLL, G. (1976): *Recrystallisation of quartz, biotite and feldspars from Erstfeld to the Leventina nappe, Swiss Alps, and its geological significance*. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56, 641-647.

WAGNER, G.A., REIMER, G.M. (1972): *Fission track tectonics: the tectonic interpretation of fission track apatite ages*. Earth Planet Sci Lett 14, 263-268.

WAGNER, G.A., REIMER, G.M., 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*. Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova 30.

WAGNER, G.A., ZAUN, P.E. (1985): *Spaltspuren - Uhr und Thermometer für Gesteine*. Geowissenschaften in unserer Zeit 4, 127-134.