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

Band: 42 (1962)

Heft: 1

Artikel: Wasserstoff-Gehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit

Autor: Bambauer, H.U. / Brunner, G.O. / Laves, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-32672

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 26.04.2025

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

Wasserstoff-Gehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit[1])

Von *H. U. Bambauer, G. O. Brunner* und *F. Laves* (Zürich)[2])

Mit 2 Textfiguren und 2 Tafeln

Zusammenfassung

An etwa 400 Quarzkristallen aus Zerrklüften — von möglichst gleichmässig über die zentralen Schweizer Alpen gestreuten Fundpunkten — wurden quantitative Messungen des in die Struktur eingebauten Spurenelementes H ausgeführt. Die erhaltenen Werte werden in Form von Häufigkeitsdiagrammen sowie nach ihrer regionalen Verbreitung in Karten dargestellt. Die untersuchten Quarze lassen sich nach ihrer Domänenstruktur und dem H-Gehalt in zwei Gruppen unterteilen: 1. Rauchquarze (stets $<40 H/10^6$ Si) und gewöhnliche farblose Quarze mit <2 bis ~ 70 $H/10^6$ Si. 2. Quarze mit einem mimetischen Aufbau aus niedrigsymmetrischen Lamellen und ~ 45 bis ~ 1500 $H/10^6$ Si. Im Bereich der zentralen Tessiner Alpen weisen Kristalle beider Gruppen die höchsten gemessenen H-Gehalte auf. Diese Region wird von einem Gürtel mit Quarzen niedriger H-Gehalte umgeben. Es wird daraus auf regional verschiedene Bildungstemperaturen geschlossen, was mit den Aussagen von Wenk über einen im Zentralteil dieses Gebietes lokalisierten Wärmedom im Einklang steht.

Abstract

About 400 quartz crystals from fissures in the Central Swiss Alps were examined quantitatively for the trace element H incorporated in the strcuture; an attempt was made to collect the specimens from evenly distributed localities. The values obtained are plotted on histograms as well as on maps. The quartz

---

[1]) Enthält Teile einer an der Abteilung für Naturwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule eingereichten Habilitationsschrift (Bambauer, 1961a). Im Auszug vorgetragen auf der Jahrestagung der Deutschen Min. Ges. in Tübingen und der Schweiz. Min. Petr. Ges. in Biel, September 1961.

[2]) Institut für Kristallographie und Petrographie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.

crystals examined may be divided into two groups: (1) smoky quartz (always with <40 H/10^6 Si), and ordinary colourless quartzes with <2 to $\sim$70 H/10^6 Si. (2) quartz with a mimetic structure of less symmetrical lamellae containing $\sim$45 up to $\sim$1500 H/10^6 Si. The highest concentrations in both these groups are found in the Alps of central Tessin. This region is surrounded by a zone of quartz with lower H content. A regional distribution of temperatures of formation is deduced from this, which corresponds to the position of the heat dome in the central Tessin proposed by Wenk.

I. Einführung

Bisherige Untersuchungen über die Spurenelementgehalte von Quarzen aus Zerrkluftvorkommen der Schweizer Alpen (Bambauer, 1961a, b) führten unter anderem zu den folgenden Ergebnissen:

1. In den Quarzkristallen treten als mengenmässig vorherrschende Spurenelemente Al, Li (Emissionsspektralanalyse) und H (Ultrarotabsorption) auf. Im OH-Spektrum lassen sich zudem verschiedene strukturelle H-Positionen unterscheiden (Brunner, Wondratschek und Laves, 1959, 1961; Kats und Haven, 1960; Kats, 1961).

2. Es erwies sich als zweckmässig, die untersuchten Quarze nach ihrer Domänenstruktur und dem Spurenelementgehalt in zwei Gruppen zu unterteilen:

Gruppe a) Rauchquarze und gewöhnliche, farblose Quarze (im folgenden gemeinsam „*gewöhnliche*" *Quarze* genannt) mit einem Aufbau aus teils gröberen, teils feineren, unregelmässigen, keiligen Bereichen, die in Basisschnitten — meist radial von den Prismenflächen her — flammenartig ins Kristallinnere reichen. [Weil (1931) und Friedlaender (1951) haben gezeigt, dass es sich bei diesen Partien (von ihnen „plages" bzw. Lamellen genannt) um nach der Prismenzone orientierte *Subindividuen* handelt, die gegeneinander in beliebigen Richtungen bis zu etwa 3° verstellt sein können (Verzweigungsstruktur nach Buerger)]. Dieser Makromosaikbau lässt sich auch an der Verteilung der bei Bestrahlung mit γ-Strahlung entstehenden Rauchfarbe sowie äusserlich oft in der Ausbildung von ungefähr $\parallel$ c laufenden Suturen auf den Prismenflächen (meist schon von Auge) erkennen. Als Spurenelementkonzentrationen wurde in solchen „gewöhnlichen" Quarzen gefunden: 10—150 Al, 2—200 Li, meist <2 Na (selten bis 30) und <2—60 H pro 10^6 Si[3]).

[3]) 1 Atom/10^6 Si $\widehat{=}$ $2{,}66 \cdot 10^{16}$ Atome/cm^3. 1 H/10^6 Si $\widehat{=}$ 0,0167 g H/t SiO_2, 1 Li/10^6 Si $\widehat{=}$ 0,116 g Li/t SiO_2, 1 Na/10^6 Si $\widehat{=}$ 0,384 g Na/t SiO_2, 1 Al/10^6 Si $\widehat{=}$ 0,450 g Al/t SiO_2. 3 Atome/10^6 Si $\widehat{=}$ 1 Atom/10^6 Gitteratome.

Gruppe b) Quarze (stets farblos) mit Aufbau aus einem mimetischen Fachwerk von *niedrigsymmetrischen* (optisch schwach zweiachsigen) Lamellen, das weitgehend nach der Morphologie orientiert ist. Die in den lamellierten Partien solcher Quarze gefundenen Spurenelementgehalte sind etwa: ~200—2500 Al, 100—1300 Li, 20—40 Na und 45—1400 H pro 10^6 Si. Dieser Lamellenbau (der nichts mit lamellarer Verzwillingung zu tun hat) wurde von WEIL (1931) erstmals beobachtet; er kann nach BAMBAUER, BRUNNER und LAVES (1961) als sekundäre Bildung angesehen werden. Die einzelnen Lamellen zeigen einen unterschiedlichen Grad von Strahlungsverfärbbarkeit. An keinem der bisher untersuchten Quarze mit solchem Lamellenbau wurden Suturen auf den Prismenflächen beobachtet. Die Kristalle dieser Gruppe neigen zu besonders langgestreckter Ausbildung mit Dauphiné-Habitus. Sie sind meist von relativ geringer Grösse (Länge selten > 7 cm).

3. Die Intensität der bei γ-Bestrahlung entstehenden Rauchfarbe von gewöhnlichen Quarzen ist ungefähr proportional der Konzentration an AlLi (Näheres bei BAMBAUER, 1961b, über die Bezeichnung AlLi BRUNNER, WONDRATSCHEK und LAVES, 1961).

4. Der Einbau der Spurenelemente ist von der Wachstumsrichtung abhängig.

5. Zwischen den Konzentrationen an Al, Li und H bestehen über den gefundenen Variationsbereich von etwa 3 Zehnerpotenzen positive Korrelationen sowie näherungsweise die Beziehung $[Al] \approx \sum [H + Li + Na]$.

6. Die Bestimmung der H-Gehalte an ca. 130, über die zentralen Schweizer Alpen gestreuten gewöhnlichen Quarzproben (BAMBAUER, 1961a) ergab eine — kaum zufällige — Zunahme der H-Gehalte in Richtung Aarmassiv-Gotthardmassiv-Penninikum der Tessiner Alpen. Die gleiche Tendenz wurde für die Intensität der bei γ-Bestrahlung auftretenden Verfärbung (Sektoren unter r $(10\bar{1}1)$, n_ω, 466 mμ) gefunden. Mit den unter 3. und 5. angeführten Korrelationen kann man daraus auf eine dem H ähnliche regionale Verteilung der Spurenelemente Li und Al schliessen.

Es erschien nun lohnend, diese regionale Verschiedenheit im Spurenelementgehalt der Kluftquarze an einem umfangreicheren Material zu überprüfen, das heisst ein möglichst ausgedehntes Untersuchungsgebiet zu wählen, die Probenzahl wesentlich zu erhöhen (s. Abschnitt II) und eine breite Streuung der Probenpunkte im Untersuchungsgebiet anzustreben.

II. Herkunft der Proben, Experimentelles

Tektonisch gesehen deckt sich das Untersuchungsgebiet im wesentlichen mit dem Bereich jener alpinen Grosskulmination, welche Aar- und Gotthardmassiv im Norden und das daran südlich anschliessende mittlere und untere Penninikum (mit den von der Maggiaquerzone getrennten Tosa- und Tessin-Teilkulminationen) bis zur insubrischen Bruchzone umfasst. Ihre Aufwölbung fand im wesentlichen gegen Ende der Alpenbildung, nach den hauptsächlichsten Deckenüberschiebungen statt. (Eine zusammenfassende strukturelle Deutung des Baues der Tessiner Alpen findet sich bei Wenk, 1955). Diese Region umfasst eines der bevorzugtesten Häufungsgebiete der an Zerrungsklüfte gebundenen alpinen Mineralvorkommen. Nach P. Niggli (1940) ist das Auftreten der Klüfte im alpinen Orogen an Kulminationszonen (Querantiklinalen) gebunden, die im Streichen des Alpenbogens von Depressionszonen mit nur spärlichen Kluftmineralbildungen abgelöst werden.

Nach allgemeiner Ansicht erfolgte die Bildung der Kluftmineralien gegen Ende oder nach Abschluss der orogenetischen Bewegungen. Die Klüfte selbst lassen sich nach Koenigsberger (1940) je nach Gesteinsbeschaffenheit, lokalem Metamorphosegrad und Zeitpunkt ihrer Entstehung während des Aufstaues der Massive und Deckenkulminationen in verschiedene Typen von oft regional begrenztem Auftreten unterscheiden. Ihre Häufigkeitsverteilung im Untersuchungsgebiet hängt in erster Linie nicht von petrographischen, sondern ausgezeichneten tektonischen Einheiten ab. P. Niggli (1940) hat die (oben weitgehend nach ihm referierten) Zusammenhänge zwischen alpiner Tektonik und der regionalen Verteilung der Mineralklüfte zusammenfassend behandelt, so dass hier darauf verwiesen werden kann.

Die Bildungsbedingungen der Kluftmineralien werden allgemein als hydrothermal und überwiegend lateralsekretionär gedeutet. P. Niggli (1940) nimmt an, dass mit und nach dem Aufstau in den Kulminationsgebieten aufsteigende hydrothermale Lösungen die Gesteine durchtränkten und eine Teilmobilisierung des Stoffbestandes bewirkten (beginnende Metatexis). Als tiefere Ursache dieser Vorgänge wurde entsprechend damaligen Vorstellungen ausschliesslich die Wirkung der Dislokationsmetamorphose angesehen. Diese Auffassung muss jedoch nach den Arbeiten von E. Wenk revidiert werden (s. Abschnitt III). Zunehmendes Absinken der Temperatur und Druckentlastung führten zur Bildung von Mineralabsätzen in den Klüften und Hohlräumen. P. Niggli (1940) schätzt, dass zu Beginn der Mineralbildung Temperaturen von

höchstens ca. 350° C und Drucke von ca. 2000—3000 Atm. geherrscht haben. Die so entstandenen, sehr vielfältigen Paragenesen zeigen in ihrem regionalen Auftreten eine starke Abhängigkeit zum Stoffbestand des Nebengesteins. Eine eingehende Diskussion der Bildungsumstände findet sich bei NIGGLI, KOENIGSBERGER und PARKER (1940).

Der Quarz ist das häufigste und verbreitetste alpine Kluftmineral; man findet ihn als Bergkristall (farbloser Quarz), Rauchquarz und selten auch als Amethyst; er kommt in nahezu allen Paragenesen vor. Rauchquarz findet sich mit wenigen Ausnahmen nur im Aar- und Gotthardmassiv und dem Adulagebiet; er tritt auch dort gewöhnlich erst ab ca. 2000 m ü. M. auf.

Die häufigsten Begleiter des Quarzes in den Zerrkluftparagenesen sind: Chlorite, Adular, Calcit sowie andere Karbonate, Plagioklas (meist Albit bis Andesin), Muskowit, Hämatit, Pyrit, Zeolithe; dazu kommen eine Reihe weiterer, zwar typischer, aber mengenmässig nur untergeordnet auftretender Mineralien. Eine umfassende Darstellung der Kluftparagenesen und ihrer regionalen Verteilung findet sich bei PARKER (1954).

Die Zahl der insgesamt untersuchten Quarzproben beträgt ca. 425 (ca. 70 Rauchquarze, 295 gewöhnliche farblose Quarze und 60 Quarze mit Aufbau aus niedrigsymmetrischen Lamellen). Fast alle Proben sind idiomorphe, in den Klüften frei gewachsene Kristalle. Nur an einigen wenigen Punkten wurde ersatzweise klares, derbes Material aus dem sogenannten Quarzband oder aus völlig gefüllten Klüften und Hohlräumen herangezogen. Es handelte sich dabei meist um grössere (bis faustgrosse) Einkristalle (!), die tektonisch nicht nennenswert beansprucht waren.

Für die statistische Verfolgung der regionalen Variation der Spurenelementgehalte in den Kluftquarzen kam vor allem die ultrarot-spektroskopische H-Bestimmung in Frage, weil sie zerstörungsfrei arbeitet und einen wesentlich geringeren Arbeitsaufwand benötigt als die Emissionsspektralanalyse (Al-, Li- und Na-Bestimmung). Jedoch dürfte der H-Gehalt der Quarze auch Rückschlüsse auf die ungefähre Konzentration an Al und Li erlauben (s. Abschnitt I und S. 231). Die Bestimmungen erfolgten an $\perp$ c geschnittenen Platten, die je nach H-Gehalt 2—10 mm dick waren. Wurde nur eine einzige Platte untersucht, so stammte sie etwa aus der Mitte des Kristalls. Damit wurde zwar nicht die gesamte H-Variation eines Quarzkristalles während seiner Wachstumsgeschichte erfasst, doch hat sich gezeigt, dass die innerhalb vergleichbarer Partien eines Kristalls auftretenden Konzentrationsunterschiede gewöhnlich weit geringer sind als die noch zu besprechende regionale Variation im Untersuchungsgebiet. Sofern es die Probengrösse zuliess (bei ca. 80% aller Proben) wurden nur Wachstumssektoren nach r $(10\bar{1}1)$ verglichen,

um die Abhängigkeit der Werte von der Wachstumsrichtung möglichst auszuschalten.

Ein möglicher systematischer Fehler der H-Bestimmung (herrührend vom verwendeten Wert für den molaren Extinktionskoeffizienten) ist ohne Einfluss auf die Einteilung der beiden Quarzgruppen in jeweils drei Konzentrationskategorien und die im folgenden gezogenen Schlüsse. Der Relativfehler der Messungen (vorwiegend infolge Unsicherheit beim Ziehen der Basislinie der UR-Absorption) dürfte bei 10—20% liegen. Infolge der Analysenfehler und der möglichen Inhomogenität der Proben war es angezeigt, eine Gruppe mittleren (siehe Fig. 1 und 2) Gehaltes auszuscheiden und die Diskussion der regionalen Abhängigkeit vor allem auf Quarze geringen und hohen Gehaltes zu verlegen. Der Konzentrationssprung zwischen diesen beiden Extremgruppen ist so hoch gewählt (Faktor 2), dass die Fehler der Analysenmethodik ohne Einfluss auf die gezogenen Schlüsse sind.

Etwa vorhandene Flüssigkeitseinschlüsse werden bei unseren H-Bestimmungen *nicht* mit erfasst; bei den angegebenen H-Gehalten handelt es sich um H-haltige Defekte der Quarzstruktur. Während die Flüssigkeitseinschlüsse eine sehr breite, unpolarisierte OH-Absorptionsbande liefern, verursacht das strukturell eingebaute H mehrere relativ scharfe, senkrecht c polarisierte OH-Banden, so dass durch entsprechendes Ziehen der Basislinie nur dieses erfasst wird. Da fast ausschliesslich klare Quarze beziehungsweise klare Teilstücke verwendet wurden, war im Spektrum nur selten eine Absorption durch Flüssigkeitseinschlüsse festzustellen. Weitere Einzelheiten der Analysenmethodik sind bei BRUNNER, WONDRATSCHEK und LAVES (1961) sowie bei BAMBAUER (1961) beschrieben.

Die Proben entstammen den verschiedenen Belegsammlungen der Eidgenössischen Technischen Hochschule (186), den Sammlungen der Mineralogischen Institute von Basel (15), Bern (4), Fribourg (11) sowie der Naturhistorischen Museen von Basel (6) und Bern (16), sodann aus Neuerwerbungen von Strahlern (92), Stiftungen von Kollegen aus ihren Arbeitsgebieten (30) und aus eigenen Aufsammlungen (64).

III. Ergebnisse und Diskussion

a) Häufigkeitsdiagramme

Fig. 1 enthält eine Gegenüberstellung sämtlicher gemessener H-Gehalte in den 3 Gruppen: Rauchquarze, gewöhnliche, farblose Quarze und Quarze mit Lamellenbau. Man erkennt daraus, dass die unter-

suchten Rauchquarze stets < 40 H/10^6 Si aufweisen; etwa 85% davon besitzen Werte < 10 H/10^6 Si. Höhere Gehalte finden sich vorwiegend in nur schwach gefärbten Rauchquarzen oder in fast farblosen *Kernen* von Kristallen mit rauchfarbigen Randzonen Die gewöhnlichen Bergkristalle können in seltenen Fällen bis zu etwa 70 H/10^6 Si enthalten, doch liegen etwa 95% davon unter 40 H/10^6 Si. Dagegen können die

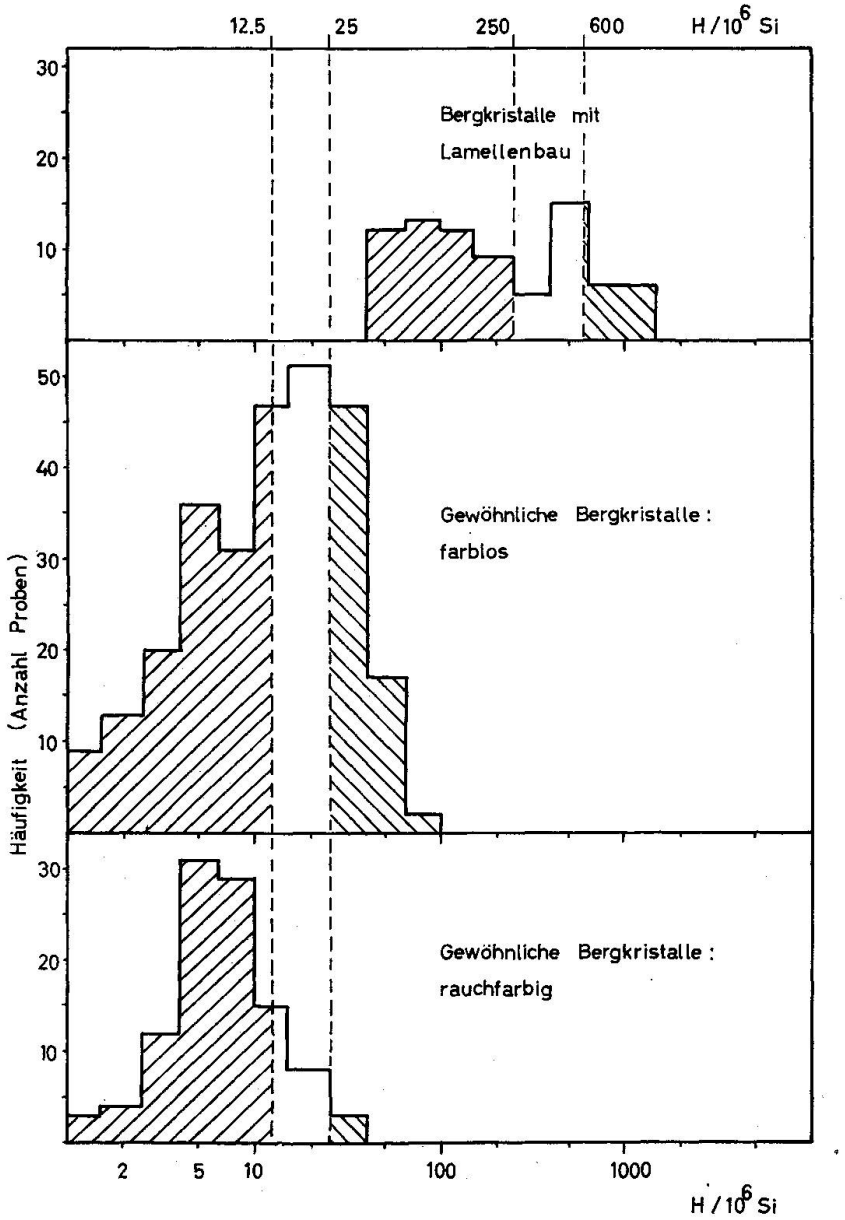


Fig. 1. Häufigkeitsverteilung der H-Gehalte (z. T. Mittelwerte über verschiedene Wachstumsrichtungen) in Quarzen mit Lamellenbau, rauchfarbigen und farblosen gewöhnlichen Quarzen. H-Gehalte in *logarithmischem* Massstab. (Lies statt Bergkristall: Quarz.)

Quarze mit Lamellenbau extrem hohe Gehalte besitzen: ihr Variationsbereich geht von ca. 45—1400 H/10^6 Si. Die Überlappung mit den gewöhnlichen Quarzen im Bereich 45—70 H/10^6 Si ist recht gering.

Fig. 2 zeigt die Häufigkeitsdiagramme gewöhnlicher Quarze (inkl. Rauchquarze), aufgeteilt nach Herkunft aus verschiedenen Regionen.

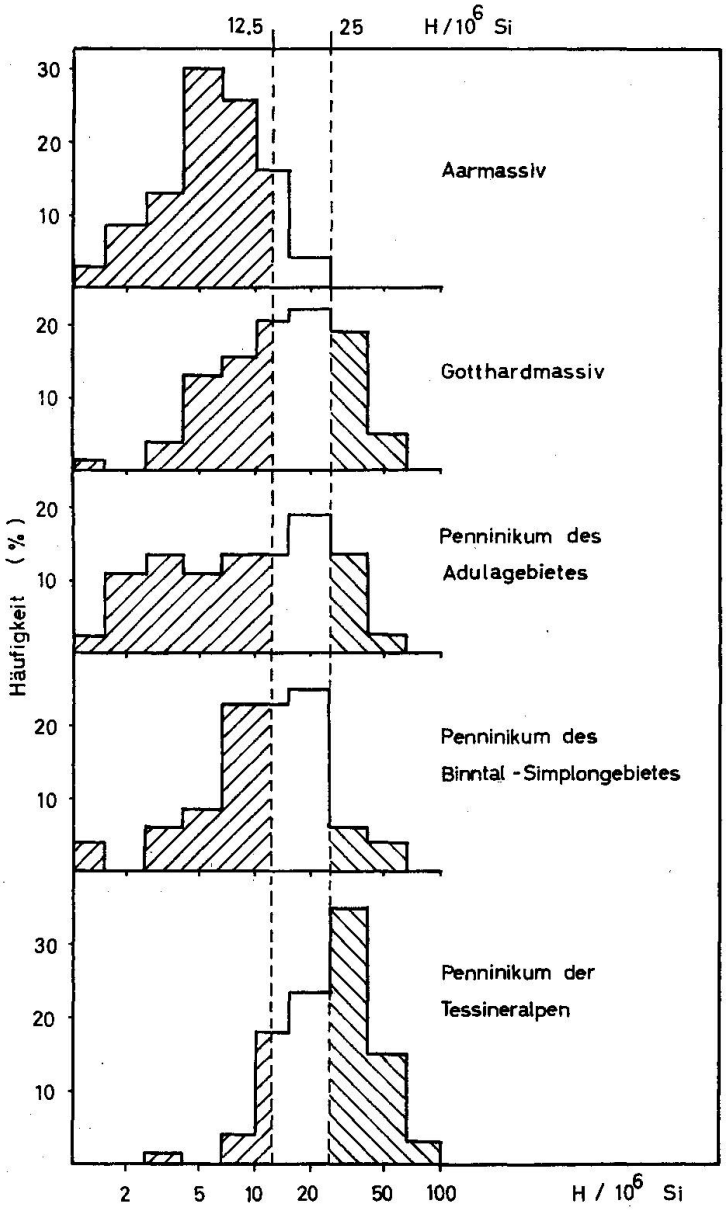


Fig. 2. Häufigkeitsverteilung der H-Gehalte (Nur Sektoren unter r(10$\bar{1}$1)) in rauchfarbigen und farblosen gewöhnlichen Quarzen aus verschiedenen Regionen der Schweizer Alpen. H-Gehalte in *logarithmischem* Massstab.

b) Beobachtungen über Bandenintensitäten im UR-Spektrum und über den Kristallhabitus

Mit zunehmender H-Konzentration wächst generell auch das Intensitätsverhältnis der beiden OH-Banden 2.88/2.95 μ (Spektrum bei ca. 20° C). Es ist geplant, diese Beziehung in Tieftemperaturspektren näher zu untersuchen. Die beiden Banden (die dabei noch weiter aufspalten) rühren von strukturell verschiedenartigem H-Einbau her (vgl. BRUNNER, WONDRATSCHEK, LAVES, 1961). Der H-Gehalt wurde aber im wesentlichen durch den die Bande bei 2.95 μ verursachenden H-Defekt diktiert (AlH als Ersatz für Si).

Enge Beziehungen zwischen Kristallhabitus und Spurenelementgehalt fanden wir bisher nicht. Quarze mit penninischem Habitus (z. B. Tessiner Habitus, vgl. NIGGLI, KOENIGSBERGER und PARKER, 1940), weisen oft höhere Gehalte auf als der Durchschnitt, doch gilt dies auch für Kristalle mit gewöhnlichem Habitus aus der gleichen Region. Indessen scheint ein gewisser Zusammenhang zwischen Kristallgrösse und Spurenelementkonzentration zu bestehen. Quarze mit Lamellenbau (hohe Spurenelementgehalte) wurden im Mittel kleiner als gewöhnliche Quarze (niedrige Gehalte) gefunden. Nach Erfahrungen bei der Quarzsynthese wirkt ein starker Einbau von Spurenelementen wachstumshemmend (z. B. BROWN and THOMAS, 1960).

c) Die regionale Abhängigkeit des H-Gehaltes sowie des Auftretens der Lamellenquarze

Gewöhnliche Quarze (inkl. Rauchquarze) und „Lamellenquarze" (Quarze mit Lamellenbau) unterscheiden sich nicht nur in ihrer Domänenstruktur und der Grössenordnung ihrer Spurenelementkonzentration, sondern man darf als Ursache für die Verschiedenheit auch besondere (petrochemische) Unterschiede bei der Bildung vermuten. So hat sich zum Beispiel gezeigt, dass die hier untersuchten Lamellenquarze (soweit die Nebengesteinszusammensetzung uns bekannt ist, das heisst bei ca. 40% der Proben) in der Regel aus Kalksteinen, Kalkschiefern, Marmoren und karbonathaltigen Bündnerschiefern (vermutlich auch aus Dolomiten) stammen. Stoffmobilisierung und Lösungstransport in solchen Gesteinen lässt eine andere Lösungszusammensetzung erwarten als zum Beispiel in Gesteinen granitischer bis quarzdioritischer Zusammensetzung. Allerdings schliesst dieses vermutlich vom Nebengestein beeinflusste Auftreten der Lamellenquarze umgekehrt nicht auch das Vorkommen von gewöhnlichen Quarzen in solchen Gesteinen aus.

Für die regionale Betrachtung werden diese beiden Quarzgruppen ge-

sondert betrachtet. Jede Gruppe wird dazu in Proben tiefen, mittleren und hohen Gehaltes unterteilt, wobei die Grenzen mit Rücksicht auf die Häufigkeitsdiagramme und die experimentellen Bestimmungsfehler festgesetzt und in Fig. 1 und 2 eingezeichnet sind. Man erkennt nun auf den beiden Karten der Fundpunkte ein Zentralgebiet mit Quarzen hohen H-Gehaltes, umgeben von einem Gürtel mit Kristallen tiefen Gehaltes. Zur Deutung dieses Befundes sind zwei Einflüsse zu unterscheiden, von welchen der Einbau von Spurenelementen, das heisst die Bildung struktureller Defekte beim Wachstum der Kristalle in den Zerrklüften, abhängen kann:

α) Physikalische Bedingungen, wie Temperatur und Druck, direkt oder indirekt, indem dadurch die Löslichkeit der Gesteinsmineralien oder andere chemische Gleichgewichte beeinflusst werden; dazu die Wachstumsgeschwindigkeit beziehungsweise der Temperaturverlauf als Funktion der Zeit. Diese Bedingungen können in ihren Auswirkungen über eine grössere geographische Region etwa konstant sein.

β) Petrochemische Bedingungen, das heisst Zusammensetzung des Nebengesteins und dementsprechend das Materialangebot in der Lösung (wie zum Beispiel die Basizität, abhängig unter anderm vom CO_2-Druck). Diese Bedingungen sind im Untersuchungsgebiet nur innerhalb kleinerer Regionen als konstant anzusehen.

Falls im vorliegenden Fall der Einbau von H überwiegend durch Faktoren nach β) bedingt wird, so sollten sich Korrelationen mit der Gesteinsmannigfaltigkeit bemerkbar machen. Wie jedoch die Karten zeigen, ist die *lokale* Variation der Nebengesteinszusammensetzung ohne grossen Einfluss auf die (grossräumige) *regionale* Verteilung der H-Gehalte von Quarz. Auch umfasst die Gesteinszusammensetzung in Gebieten hohen wie auch niedrigen H-Gehaltes ähnliche Variationen, so dass sich die regionalen Verschiedenheiten im H-Gehalt nicht mit petrographischen Gegebenheiten erklären lassen. Derartige Bedingungen können aber zu den Schwankungen der H-Gehalte innerhalb der gewählten Konzentrationsbereiche beigetragen haben. Es ist zwar (wie bereits erwähnt) ein Zusammenhang mit dem Nebengestein beim Auftreten einer besonderen Quarzgruppe, der „Lamellenquarze", festzustellen, doch zeigen auch diese Quarze eine geographisch *vergleichbare* Verteilung auf Gebiete mit Kristallen hohen beziehungsweise tiefen H-Gehaltes wie die gewöhnlichen Quarze. Dieser Zusammenhang zeigt immerhin, dass lokale Gegebenheiten nach β) durchaus von Bedeutung sein können und nicht

einfach etwa bei der Wanderung der hydrothermalen Lösungen ausgemittelt worden sind. Die Ursache der regionalen Abhängigkeit im Gesamtgebiet dürfte somit in einem dominierenden Einfluss von Grössen nach α) zu suchen sein, insbesondere dürfte (in direkter oder indirekter Weise) die Temperatur beim Wachstum in Frage kommen. Es ist daher anzunehmen, dass im Gebiet mit Quarzen hohen H-Gehaltes andere Wachstumsbedingungen geherrscht haben als im umgebenden Gürtel mit Quarzen tiefer H-Konzentration.

Im folgenden Abschnitt d) wird aus geologischen Zusammenhängen angenommen, dass die Quarze der Zentralzone mit hohem H-Gehalt bei höherer Temperatur gewachsen sind. Umgekehrt kann man daraus entnehmen, dass höhere Wachstumstemperaturen den Einbau des Spurenelementes H und, entsprechend den von BAMBAUER gefundenen Korrelationen (s. eingangs unter 6) auch von Al und Li in die Quarzstruktur begünstigen.

Modellversuche an synthetischen Quarzen wären wünschenswert, um besser abzuklären, inwiefern der H-Gehalt oder das Intensitätsverhältnis einzelner OH-Banden zu diagnostischen Zwecken (Thermometer) benützt werden kann. Bisherige Synthesen, soweit sie in der Literatur beschrieben sind, lassen keine Vergleiche zu; die Bedingungen differieren von denjenigen der Kluftquarze zu sehr und wurden nicht systematisch verändert. Es wurden Wachstumsrichtungen (z. B. [0001]) erzwungen, die bei natürlichen Quarzen nicht auftreten. Auch finden sich experimentell begründete Angaben über den *strukturellen* Einbau von H unseres Wissens bisher erst in der eingangs zitierten Literatur.

d) Beziehungen zwischen H-Gehalten der Kluftquarze und der Temperaturverteilung während der spätalpinen Metamorphose

Da eine sichere Interpretation der gefundenen regionalen Abhängigkeit der H-Gehalte im Quarz allein auf Grund experimenteller Daten zur Zeit nicht möglich ist, soll im folgenden versucht werden, dieses Ziel mit Hilfe der heutigen Kenntnis von Ursachen und Ablauf der alpinen Metamorphose im Untersuchungsgebiet anzustreben. Ausgehend von gefügestatistischen (1943), strukturellen (1955) und petrogenetischen (1956) Analysen des Gebirgsbaues der Lepontinischen Alpen zwischen Simplon (W) und Bergell (E) sowie der Diskussion regionaler Abhängigkeit der Plagioklaszusammensetzung bei gegebener Paragenese (1962), hat E. WENK eine Reihe von neuen Vorstellungen über Tektonik und Gesteinsmetamorphose der hier betrachteten alpinen Region entwickelt. Danach ist mit dem unteren Penninikum der Tessiner Alpen ein Gebiet mit Erscheinungen *alpidischer* Ultrametamorphose (Anatexis,

Migmatitzonen) aufgeschlossen, das als Epizentrum eines im tieferen Untergrund zu suchenden Wärmeherdes zu verstehen ist. Das Gebiet zeichnet sich durch wirbel- und schlingenartige Strukturen aus, die von den grossen Überschiebungsdecken unabhängig (jedoch alpin) sind. Die Entwicklung dieser Wärmebeule während und nach der alpinen Hauptphase wurde von WENK (1956) wie folgt zusammengefasst:

„Gleich wie in der kaledonischen Zentralzone Ostgrönlands ist auch im Rückgrat der Alpen, das in den lepontinischen Alpen blossgelegt ist, das alte Gebirge verschwunden. Seine oberen Partien sind, zusammen mit dem Mesozoikum, alpin umgefaltet, umgeprägt, umkristallisiert und zum Teil auch stofflich verändert, seine tieferen Teile versenkt, aufgelöst und reaktiviert worden. Reaktiviertes und wohl auch juveniles Material stieg als spezifisch leichter, erneut intrusions- und assimilationsfähiger Kristallbrei wieder auf, wurde als granitisches bis quarzdioritisches Kernmaterial aus dem Untergrund ausgequetscht und unter Migmatitbildung in die antiklinalen Strukturen hineingepresst. Pegmatitische Schmelzlösungen injizierten das Dachgestein und durchtränkten es diffus; noch weiter wandernde Stoffe veränderten auch die entferntere Hülle. Der Granitaufstieg war begleitet von einem sich bis in die Bündnerschiefermassen bemerkbar machenden Aufstieg der *Wärmefront*, welche die spät- bis postorogene Kristallisation bedingte und erst *nach* dem Abschluss der Faltung — aber *vor der Kluftmineralbildung* — wieder abzusinken begann."

Es dürfte ausser Zweifel stehen, dass die Mineralbildung in den Zerrklüften von der aus dem Untergrund des Tessiner Penninikums gespeisten Wärmefront herzuleiten ist. Schon KOENIGSBERGER (1940), der wohl beste Kenner der alpinen Kluftmineralien, hatte dahin zielende Überlegungen (die den damaligen Modellvorstellungen über die alpine Metamorphose widersprachen) angestellt. Er schrieb wörtlich (S. 477):

„...bleibt jedenfalls die... paradoxe Tatsache bestehen, dass überall die Bildung der Kluftmineralien... nach den letzten stärksten Bewegungen und nach der letzten Schieferung der Gesteine erfolgt sein muss oder wenigstens damals noch fortdauerte. Das verlangt teilweise Wärmequellen in grösserem Abstand (es genügt nicht überall der Umsatz mechanischer Energie in Wärme), dann mitunter Erhaltung der Schieferung bei der Umkristallisation der Gesteine, also Abbildungs- oder facsimile-Kristallisation (beides schwierig anzunehmen, aber Fragen, die das Studium der Kluftmineralien erneut stellt!)."

Auch die von P. NIGGLI (1950) angeführten Vorstellungen über die Bedingungen während der Kristallisation dieser Mineralien lassen sich damit zwanglos in Einklang bringen (vgl. S. 224f.).

Ausgehend von der Wärmebeule im Gebiet der zentralen Tessiner Alpen, sollte man rundum nach aussen hin Zonen abnehmender Metamorphose (das heisst vor allem tieferer Temperatur und niedrigeren

Druckes) erwarten. E. NIGGLI (1960) hat gezeigt, dass man in den Schweizer Alpen verschiedene Mineralzonen der alpinen Metamorphose unterscheiden kann. Nach seiner Darstellung der Verbreiterungsgebiete faziesempfindlicher Mineralien folgen sich, ausgehend von den zentralen Tessiner Alpen, zonenweise Disthen + Sillimanit, Disthen, Chloritoid, Stilpnomelan + Chloritoid und Stilpnomelan.

WENK (1962) gelang es in eindrucksvoller Weise, mit Hilfe der regionalen Variation der Anorthitgehalte von Gesteinsplagioklasen (bei gegebener Paragenese Plagioklas + Calcit) Zonen gleicher Kristallisationstemperatur nachzuweisen. Die Isograden (= Zonen gleichen Anorthitgehaltes) verlaufen gürtelförmig (im Süden von der jüngeren insubrischen Bruchlinie abgeschnitten) um den zentralen Bereich der Wärmebeule. Die An-Gehalte sinken vom Zentralgebiet mit Bytownit-Anorthit nach aussen hin bis Albit.

Auch bei den *Kluftmineralien* müssen zonal verschiedene Bildungsbedingungen angenommen werden. Bereits bei NIGGLI, KOENIGSBERGER und PARKER (1940) werden Unterschiede zwischen den Paragenesen in den Tessiner Alpen und den nördlichen Gebieten betont.

GÜNTHERT (1953) hat darauf aufmerksam gemacht, dass die Kluftplagioklase in Gneisen und Amphiboliten des Tessiner Penninikums beträchtliche Ca-Gehalte (vorwiegend Oligoklas bis Andesin) besitzen können. Daneben ist seit langem bekannt, dass in der ferneren Umgebung dieses Gebietes vorwiegend Albite auftreten (neue Analysen von M. WEIBEL in SCHNEIDER, 1957, sowie WEIBEL, 1958). In diesem Zusammenhang dürfte auch das regionale Auftreten der Perikline von Interesse sein, da diese heute meist als Albit vorliegenden Kluftplagioklase ursprünglich als Oligoklase gewachsen sind (LAVES und SCHNEIDER, 1956). WEIBEL (1961) stellte fest, dass die Na-Gehalte von Adularen aus Kluftvorkommen vom Aarmassiv (N) über das Gotthardmassiv zum Penninikum (S) hin von ca. Ab 2—5 bis Ab 10—17 ansteigen. Die chemische Variation der Adulare und Plagioklase spricht ebenfalls für steigende Bildungstemperatur in Richtung auf die Wärmebeule in den Tessiner Alpen, wenn man im nördlichen Gebietsteil nicht extrem Na- beziehungsweise Ca-arme Lösungen annimmt (die Zusammensetzung der meisten Nebengesteine lässt das allerdings nicht erwarten).

Vergleicht man nun die regionale Darstellung der Plagioklaszusammensetzung von WENK (1962) mit unseren Karten der H-Gehalte von „gewöhnlichen" und „lamellierten" Quarzen, so erkennt man eine grundsätzliche Übereinstimmung: Dem zentralen Bytownit-Anorthit-Bereich WENKS entspricht bei den Kluftquarzen das Gebiet mit 25—70 H/10^6 Si

(rote Punkte) beziehungsweise 600—1400 H/10^6 Si (schwarze Punkte). Allerdings ist bei den Quarzen der Schwerpunkt des Zentralgebietes etwas nach Norden und Nordosten verschoben; man findet zum Beispiel im südlichen Gotthardmassiv (in der Plagioklaszone An 17—30) noch gewöhnliche Quarze mit >25 H/10^6 Si. Dies kann aber zwanglos als eine Verschiebung der Wärmefront im Zeitabschnitt zwischen der Bildung von Gesteinsplagioklasen und Kluftquarzen interpretiert werden. Gemeinsam ist weiterhin beiden Darstellungen, dass die Isograden im Norden enger geschart erscheinen als im Osten und Westen. In der Albitzone WENKS finden sich im Falle der gewöhnlichen Quarze überwiegend solche mit <12.5 H/10^6 Si (grüne Quadrate) oder aber Kristalle der mittleren Gruppe (12.5—25 H/10^6 Si, schwarze Dreiecke) mit vorwiegend niedrigen Werten (vgl. Fig. 2). Im Falle der „Lamellenquarze" sind diese Beziehungen noch klarer zu erkennen: Innerhalb der Albitzone finden sich praktisch nur noch Kristalle mit <250 H/10^6 Si. Es besteht also im Untersuchungsgebiet ein übereinstimmender Gang zwischen Temperaturgefälle während der Metamorphose und dem H-Gehalt der Kluftquarze.

Sieht man in der von WENK geforderten, aus dem Untergrund des Tessiner Penninikums gespeisten Wärmefront die tiefere Ursache für die Mineralbildung in den Zerrklüften, so erscheint uns die Annahme gerechtfertigt, dass auch die aufgezeigte regionale Variation der H-Gehalte in den Kluftquarzen (direkt oder indirekt) im wesentlichen einen (späten) Abschnitt aus dem Verlauf des Temperaturgefälles dieser Wärmefront widerspiegelt. Man kann sich vorstellen, dass die Lösungen im heissen Zentrum der Wärmebeule stärker angereichert waren und demzufolge nach beginnender Abkühlung das Wachstum der Kristalle bei höherer Temperatur einsetzen konnte als im umgebenden kälteren Gürtel.

Das Auftreten von Quarzen mit niedrigen H-Gehalten (insbesondere grüne Fundpunkte in Tafel I) in Gebieten hoher Bildungstemperatur (zum Beispiel innerhalb der Zone mit An >70 nach WENK) *neben* solchen mit hoher H-Konzentration (rote Punkte), steht dazu nur scheinbar im Widerspruch. Denn nach den Sukzessionsdiagrammen der Kluftmineralien von KOENIGSBERGER (1940) verhält sich der Quarz genetisch gesehen als Durchläufer, und gerade dieses Verhalten machte ihn erst für die vorliegende Untersuchung geeignet. Hingegen sind Quarze mit hohem H-Gehalt in Zonen niedriger Temperatur (etwa Albitzone) seltene Ausnahmen. Vermutlich können Ausnahmen zum Teil auch von starkem Zonarbau einzelner Kristalle, falschen Fundortangaben, dem

Überwiegen lokaler Nebengesteinseinflüsse und (besonders bei kleinen Kristallen) von der Summierung über verschieden H-haltigen Wachstumssektoren herrühren.

Die Untersuchungen wurden durch einen Kredit des Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung ermöglicht. Auch danken wir dem Zentenarfonds der ETH für die Mittel zur Anschaffung des Ultrarotspektrographen.

Für mancherlei Rat und Unterstützung danken wir den Herren Prof. C. Burri, Prof. R. L. Parker, Prof. F. de Quervain, Dr. O. W. Flörke, Dr. M. Grünenfelder und Dr. M. Weibel. Von den folgenden Herren wurden uns in freundlicher Weise Proben zur Untersuchung überlassen, wofür ihnen herzlich gedankt sei: Dr. Adrian, Prof. E. Niggli und A. Steck (Bern); W. Bauer, Dr. St. Hafner, F. Hofmänner, W. Jung, R. Moser, H. J. Scheel, R. Steiger, A. Uhr und Dr. M. Weibel (Zürich); Dr. O. Grütter, J. Hansen, J. Hunziker und Prof. E. Wenk (Basel); Prof. E. Nickel (Fribourg); V. Sicher (Gurtnellen); C. Simmen (Schattdorf); Dr. P. Streiff (Uetikon). Herrn E. Schärli danken wir für das Schleifen der Proben.

Besonderen Dank schulden wir Herrn Prof. Dr. E. Wenk (Basel) für die Durchsicht des Manuskripts, die Überlassung seiner Kartenskizze und anregende Diskussionen.

Literatur

Bambauer, H. U. (1961a): Beziehungen zwischen Spurenelementgehalten, Farbzentren und regionaler Verteilung von Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen. Habil.-Schrift ETH Zürich.

— (1961b): Spurenelementgehalte und γ-Farbzentren in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 41/2, 335—369.

Bambauer, H. U., Brunner, G. O. und Laves, F. (1961): Beobachtungen über Lamellenbau an Bergkristallen. Z. Krist., *116*, 3/6, 173—181.

Brown, C. S. and Thomas, L. A. (1960): The effect of impurities on the growth of synthetic quartz. J. Phys. Chem. Solids *13*, 337—343.

Brunner, G. O., Wondratschek, H. und Laves, F. (1959): Über die Ultrarotabsorption des Quarzes im 3-μ-Gebiet. Naturwiss. *24*, 664.

— (1961): Ultrarotuntersuchungen über den Einbau von H in natürlichem Quarz. Z. Elektrochem. *56*, 735—750.

Friedlaender, C. (1951): Untersuchungen über die Eignung alpiner Quarze für piezoelektrische Zwecke. Beitr. z. Geol. der Schweiz, Geotechn. Serie *29*.

Günthert, A. (1953): Plagioklase aus Klüften der Tessiner Alpen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. 33/1, 161—166.

Kats, A. und Haven, Y. (1960): Infrared Absorption Bands in α-Quartz in the 3-μ-Region. Phys. and Chem. of Glass, *1*, 99.

Kats, A. (1961): Hydrogen in α-Quartz. Diss. Delft.

Koenigsberger, J. (1940), in Niggli, Koenigsberger und Parker (1940), Bd. II.

Laves, F. und Schneider, T. (1956): Über den rhombischen Schnitt in sauren Plagioklasen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *36*, 622—623.

NIGGLI, P. (1940), in NIGGLI, KOENIGSBERGER und PARKER (1940), Bd. II.

NIGGLI, P., KOENIGSBERGER, J. und PARKER, R. L. (1940): Die Mineralien der Schweizeralpen. Bd. I und II. Verlag Wepf & Co., Basel.

NIGGLI, E. (1960): Mineralzonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen. Internat. Geol. Congr. Rep. *25*, Sess XIII, 123—128.

PARKER, R. L. (1954): Die Mineralfunde der Schweizer Alpen. Verlag Wepf & Co., Basel.

SCHNEIDER, T. (1957): Röntgenographische und optische Untersuchung der Umwandlung Albit-Analbit-Monalbit. Z. Krist. *109*, 245—271.

WEIBEL, M. (1958): Chemische Untersuchungen an Albiten aus den Schweizer Alpen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *38*/1, 61—75.

— (1961): Neue Untersuchungen an alpinen Kluftmineralien. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *41*/1, 8—11.

WEIL, M. R. (1931): Quelques observations concernant la structure du quartz. Compte Rend. 1er Réunion de l'Institut d'Optique, 2—11.

WENK, E. (1943): Ergebnisse und Probleme von Gefügeuntersuchungen im Verzascatal (Tessin). Schweiz. Min. Petr. Mitt. *23*, 266—294.

— (1948): Ostalpines und penninisches Kristallin. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *28*/2, 761—771.

— (1955): Eine Strukturkarte der Tessiner Alpen. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *35*, 311—319.

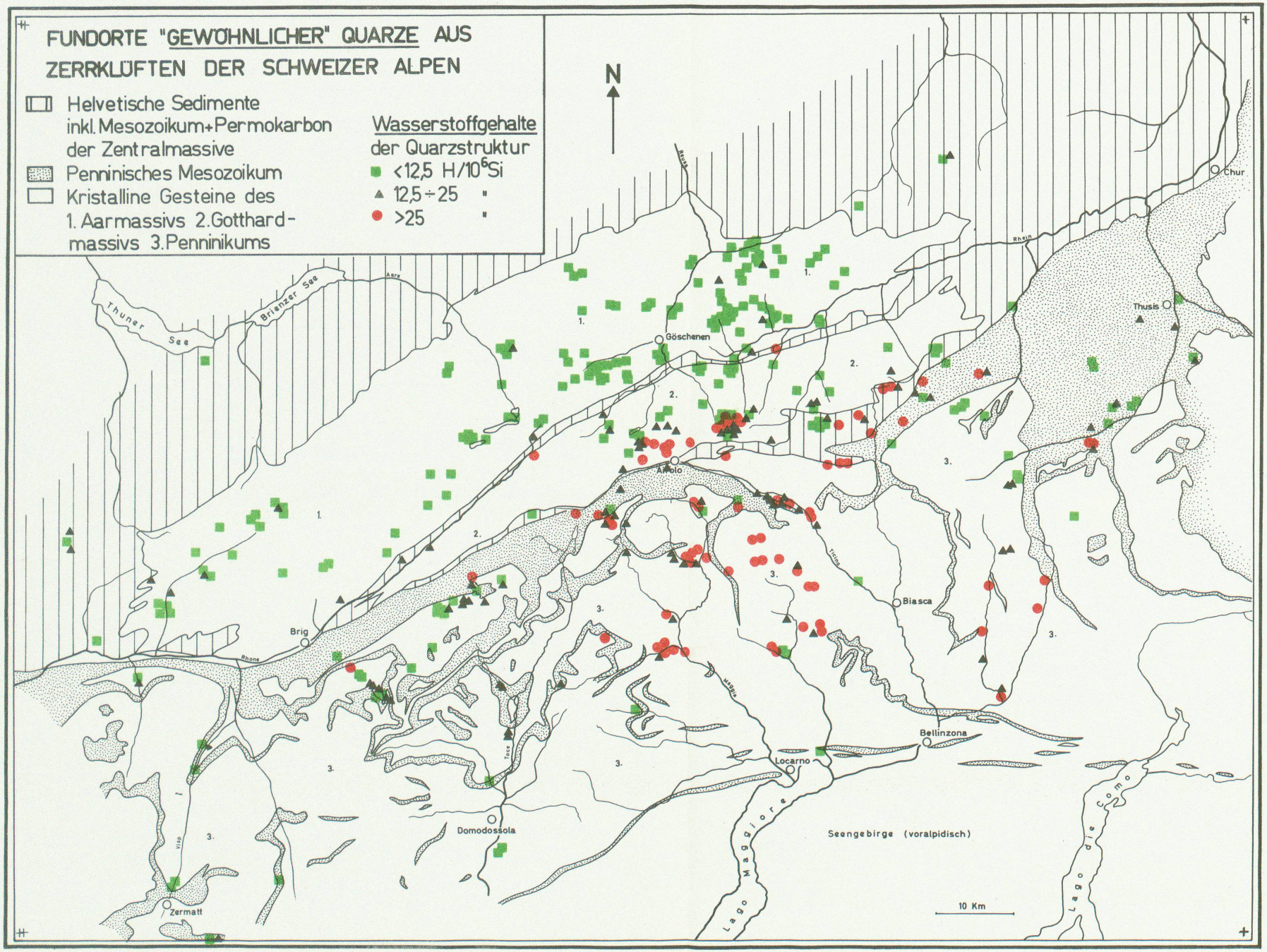
— (1956): Alpines und ostgrönländisches-kaledonisches Kristallin, ein tektonisch-petrogenetischer Vergleich. Verh. Naturf. Ges. Basel, *67*/2, 75—102.

— (1962): Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen. Die Paragenese Calcit-Plagioklas. Schweiz. Min. Petr. Mitt. *42*/1, 139—152.

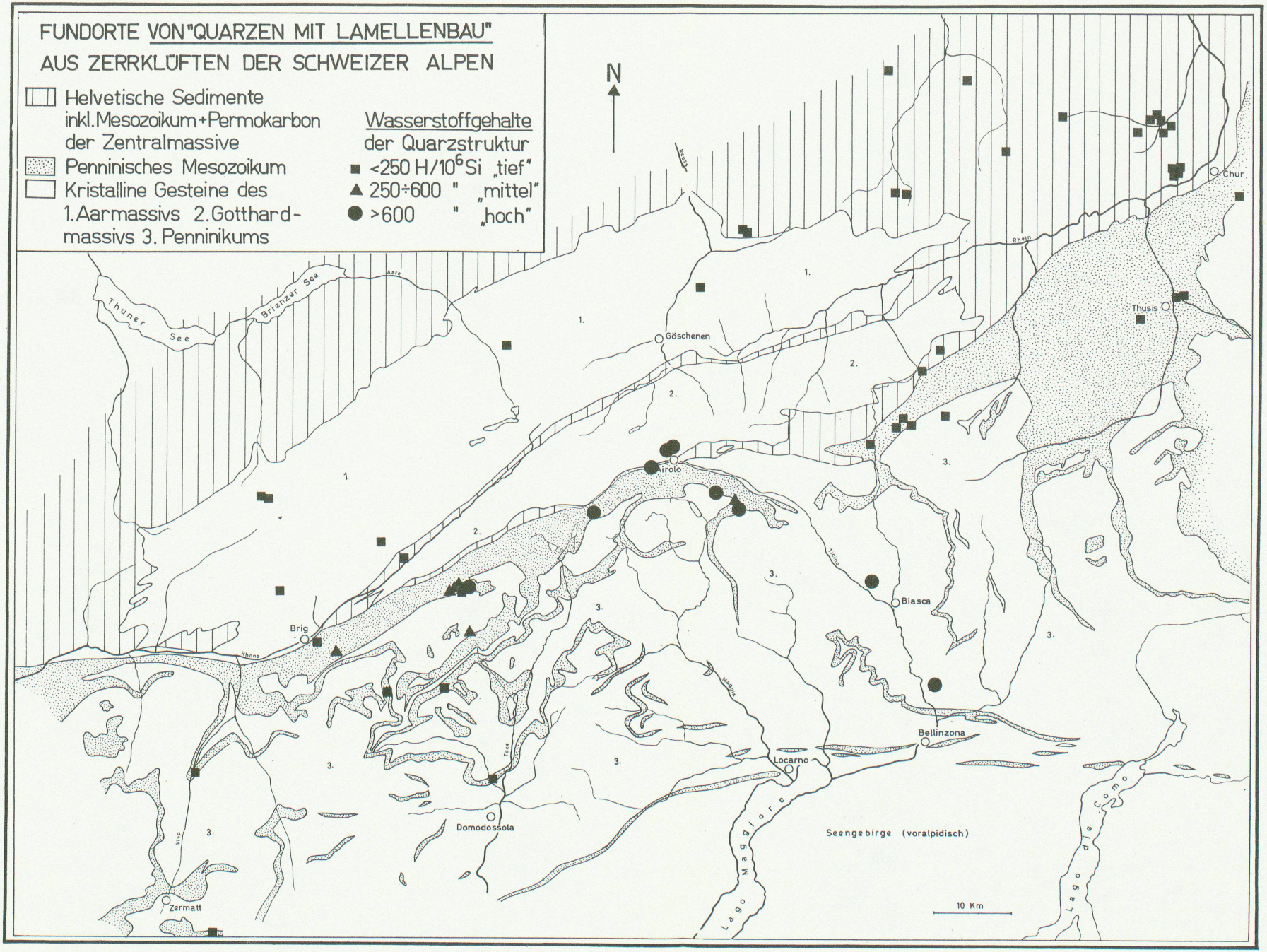
Manuskript eingegangen am 15. Januar 1962.

Schweiz. Min. Petr. Mitt.
Band 42, Heft 1, 1962

H. U. BAMBAUER, G. O. BRUNNER und F. LAVES: Wasserstoff-Gehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit



Leere Seite
Blank page
Page vide

Schweiz. Min. Petr. Mitt.
Band 42, Heft 1, 1962

H. U. BAMBAUER, G. O. BRUNNER und F. LAVES: Wasserstoff-Gehalte in Quarzen aus Zerrklüften der Schweizer Alpen und die Deutung ihrer regionalen Abhängigkeit