Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel

Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Basel ; Naturforschende Gesellschaft Baselland

Band: 13 (2011)

Artikel: Alter und Herkunft vulkanischer Apatite in der Molasse des Baselbieter und Aargauer Tafeljuras (NW-Schweiz)

Autor: Rahn, Meinert K. / Stumm, Fred G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-676766

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: 09.12.2025

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

Alter und Herkunft vulkanischer Apatite in der Molasse des Baselbieter und Aargauer Tafeljuras (NW-Schweiz)

Meinert K. Rahn, Fred G. Stumm

Zusammenfassung: Die erstmals vor 50 Jahren von Franz Hofmann beschriebenen vulkanischen Apatite in den Helicidenmergeln des Baselbieter und Aargauer Tafeljuras wurden mit Hilfe der Spaltspurenmethode datiert. Apatite von der Tennikerfluh und vom Steinbruch von Gisiberg haben ein Alter von 15.1 ± 0.7 Millionen Jahren (Ma), datieren damit erstmalig die Sedimentation der Helicidenmergel und weisen darauf hin, dass die Obere Meeresmolasse in dieser distalen Position bis ins Langhian (16.0 bis 13.7 Ma) hinein angedauert hat. Die unmittelbar darüber folgenden Nagelfluhschüttungen (Juranagelfluh) der Oberen Süsswassermolasse aus dem Schwarzwald haben erst nach 15 Ma eingesetzt.

Das Vorkommen der vulkanischen Apatite in den Süsswasserkalken der Oberen Süsswassermolasse bei Anwil-Kienberg ist mit 12.3 ± 1.3 Ma markant jünger und weist auf mindestens zwei zeitlich versetzte Einträge vulkanischen Materials in die Molasse hin. Die idiomorphen Apatite bilden in den Süsswassermergeln und -kalken den praktisch einzigen sandigen Detritus und sind daher nicht durch Flusstransport, sondern bei einem grossen Vulkanausbruch via Luftfracht transportiert worden.

Bereits Hofmann (1961) hatte sich über die Herkunft der vulkanischen Apatite Gedanken gemacht und aufgrund der begleitenden vulkanogenen Minerale (Titanit, Melanit) eine Herkunft aus dem Kaiserstuhl (SW-Deutschland) angenommen. Da die jüngsten vulkanischen Aktivitäten des Kaiserstuhls jedoch mehr als 16 Millionen Jahre alt, alle hier datierten Apatite jedoch jünger sind, ist eine Herkunft der vulkanischen Einstreuungen aus dem Hegau praktisch zwingend. Tatsächlich zieht die Spur der datierten Vorkommen von Tenniken über Anwil, Homberg, Küssaburg in Richtung der Hegau-Vulkane (S-Deutschland), deren Aktivität auf der Basis publizierter Alter (15–7 Millionen Jahre) die hier vorgestellten Alter abdeckt. Westlich des Gebiets um die Tennikerfluh konnten bisher keine weiteren Vorkommen vulkanischer Apatite in Molassegesteinen des Tafeljuras nachgewiesen werden.

Abstract: Age and origin of volcanic apatites from Molasse units of the Tabular Jura (Cantons Basel-Landschaft and Aargau, NW Switzerland): Occurrences of euhedral volcanogenic apatites within the red terrigenous marls (Helicidenmergel, uppermost Upper Marine Molasse) of the Tabular Jura (Cantons Basel-Landschaft and Aargau) have first been described by Franz Hofmann some 50 years ago. In this study, we have dated the apatites using fission track technique. Apatites from Tennikerfluh and the Gisiberg quarry show a common age of 15.1 ± 0.7 million years (Ma). The age for the first time provides a sedimentation age for the red marls and thus illustrates that the Upper Marine Molasse in this distal position has lasted into the Langhian (16.0 to 13.7 Ma). In addition, our data represent a maximum age for the local onset of conglomerate (called Nagelfluh) sedimentation shed from the Black Forest.

Volcanic apatites from within lacustrine marls and limestones of Upper Freshwater Molasse sediments at Anwil-Kienberg yield an age of 12.3 ± 1.3 Ma and are thus markedly younger than those of Tennikerfluh-Gisiberg. Next to the euhedral apatites, no significant other detrital minerals are found, which indicates that these apatites did not undergo fluvial, but air-borne transport, probably due to a large ash-cloud eruption.

On the basis of minor amounts of other volcanogenic minerals (titanite, melanite), Hofmann (1961) suggested an origin of the volcanic apatites from the Kaiserstuhl volcano. Existing age data from the Kaiserstuhl, however, indicate that all apatites dated in this study are younger than final eruptions at the Kaiserstuhl. We conclude that the volcanic material has only been derived from the Hegau vol-

canic field, the magmatic activity of which has covered a time period between 15 and 7 Ma. Traces of volcanic material are also found and dated in-between Hegau and the above mentioned localities, namely at Homberg and Küssaburg. No volcanic apatites have yet been reported from Upper Marine and Freshwater Molasse occurrences in the Tabular Jura west of the area around Tennikerfluh.

Key words: fission track dating, apatite, Hegau volcanism, Upper Freshwater Molasse.

Einführung

Vor genau 50 Jahren publizierte Hofmann (1961) in einem Artikel das Vorkommen vulkanischen Materials im Tertiär (65.5 bis 2.6 Ma) des Baselbieter und Aargauer Juras (NW-Schweiz). Bereits früher waren vulkanische Minerale nachgewiesen (von Moos 1934), hingegen als authigene Bildungen interpretiert und die Apatite aufgrund der damaligen HCl-Behandlung der Proben nicht entdeckt worden. Weitere Vorkommen vulkanischer Apatite wurden später auch im Rahmen anderer Studien an Sedimenten der oberen Süsswassermolasse (OSM) bestätigt (Stumm 1964, Suter 1976) und in den entsprechenden Kartenblättern (Diebold et al. 2006) vermerkt. Den Beschreibungen von Hofmann (1961) folgend, konnten die Apatite durch Auswaschung aus den unverfestigten Helicidenmergeln gewonnen werden. Die Apatite fallen durch ihre hohe Konzentration in der Sandfraktion und ihre idiomorphe und teilweise langprismatische Kornform auf.

Aus den gesammelten Beobachtungen sind die folgenden stratigraphischen Aspekte bemerkenswert:

- Hofmann (1961) beobachtete am Chalofen (Villnachern, Kanton Aargau, AG), dass die Apatit-höffigen Helicidenmergel in Rissen in die darunterliegenden Muschelagglomerate der Oberen Meeresmolasse (OMM) hineinreichten, also an der Basis der Helicidenmergel vorkommen. An gleicher Stelle wurden sie an der Tennikerfluh, beim Hof Bisnacht (Tenniken, Kanton Basel-Landschaft, BL) und westlich von Känerkinden (BL) nachgewiesen (Stumm 1964).
- An der Tennikerfluh sind die Helicidenmergel auf eine zwei Meter mächtige Schicht zwischen den Muschelagglomeraten (OMM) und den aus dem Schwarzwald stammenden Juranagelfluh-Schüttungen (OSM) zu finden, das heisst sie bilden ein dünnes stratigraphisches Intervall zwischen letzter mariner Transgression und Einsetzen der Juranagelfluh.
- Stumm (1964) berichtete erstmalig vom Vorkommen vulkanischer Apatite in den OSM-Mergeln. Seine sedimentpetrographischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Zusammensetzung der vulkanogenen Minerale zwischen den Vorkommen in den Helicidenmergeln (Obere Meeresmolasse, OMM) und den Süsswassermergeln der OSM deutliche Unterschiede zeigte, in dem bei ersteren immer auch idiomorphe Körner von Titanit und Magnetit auftreten.
- Suter (1976) nahm ein Profil in den Sedimenten der Oberen Süsswassermolasse an der Bänkerjochstrasse (Oberhof, AG) auf. Der damals frisch entstandene Aufschluss ist heute durch eine Betonmauer verdeckt. Suter (mündl. Mitteilung, 2010) erinnert sich aber noch, dass es in der sehr variablen Abfolge zwei nahe beieinander liegende rote Horizonte gab, die nachgewiesenermassen apatitführend waren. Diese Beobachtung ist zurzeit der einzige erhältliche stratigraphische Beweis, dass zur Zeit der Oberen Süsswassermolasse mindestens zwei vulkanische Ereignisse ihre Spuren im Tafeljura des Aargaus hinterlassen haben.
- Die von Hofmann (1961) beschriebenen Vorkommen besitzen eine deutliche Ost-West-Erstreckung, die gegen Osten in Richtung der Tuffvorkommen am Randen (Kanton Schaffhausen, SH) (Hofmann 1958) und der Tuffschlote der Hegau-Vulkane (S-Deutschland) zeigt. Trotzdem: Die Vorkommen im Gebiet um die Tennikerfluh liegen luftlinienmässig näher am Kaiserstuhl (SW-Deutschland) als an den östlichsten Schloten des Hegaus (Abb. 1).

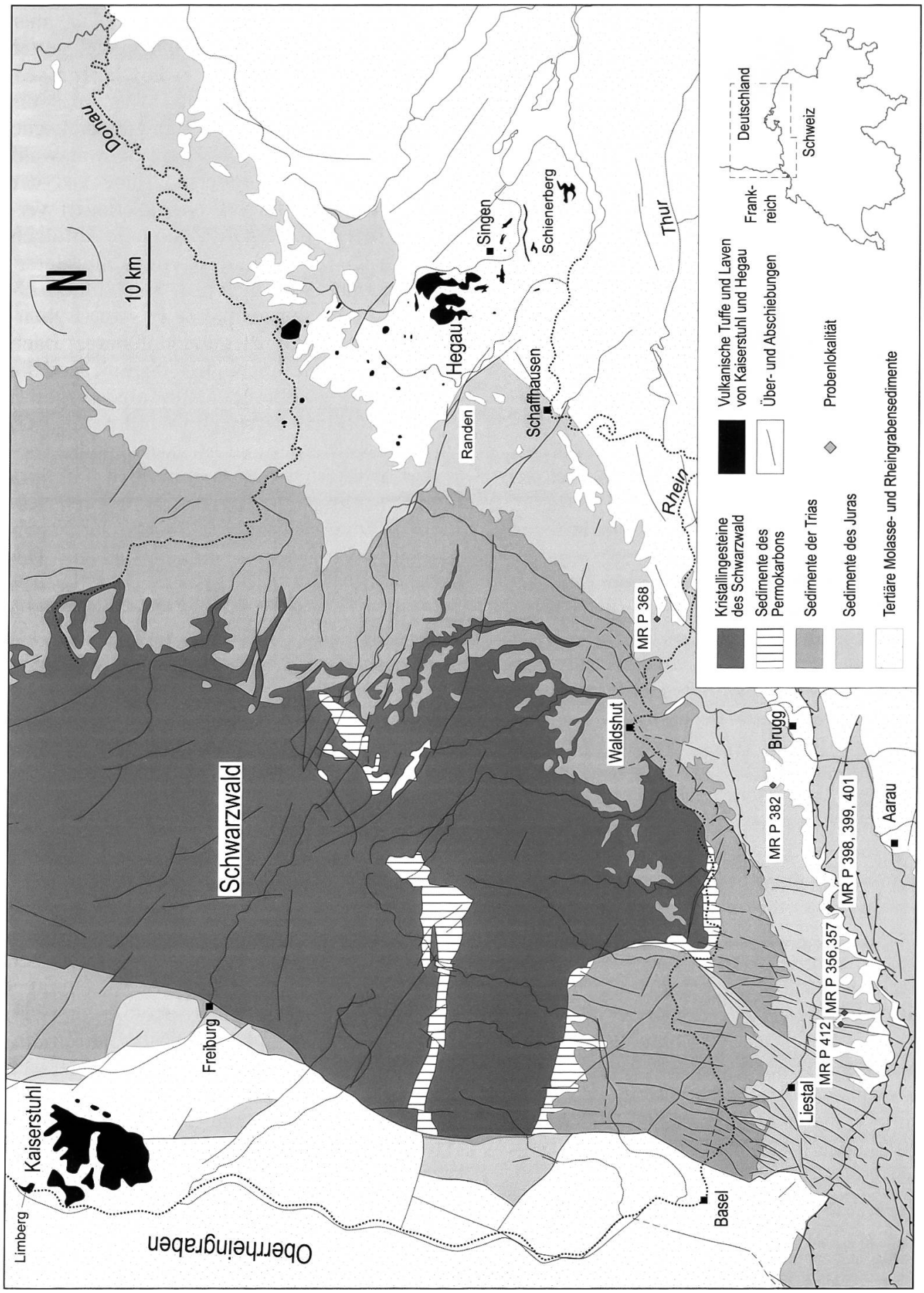

Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte des Baselbieter und Aargauer Tafeljuras (NW-Schweiz) und der angrenzenden Gebiete (modifiziert nach Müller et al. 2002) mit Probenlokalitäten in Molassesedimenten mit vulkanischem Apatit.

In der folgenden Studie wird gezeigt, dass die Datierung der Apatite mit Hilfe der Spaltspurentechnik erlaubt, das vulkanische Material zeitlich der Periode des Hegau-Vulkanismus zuzuordnen. Aufgrund der erhaltenen Alter lassen sich auch deutlich zwei vulkanische Ereignisse zeitlich trennen.

Geologischer Kontext

Im Gegensatz zum flächenhaften Vorkommen der Gesteine der OMM und OSM im Molassebecken, finden sich westlich des Juradurchbruches der Aare entlang der Jura-Randüberschiebung flächenmässig nur noch beschränkte und gegen Westen zunehmend isolierte Vorkommen tertiärer Bedeckung (Abb. 1). Diese sind gekennzeichnet durch diverse engräumige Fazieswechsel (Diebold et al. 2006). Das sich seit dem Aquitanian (23.0 bis 20.4 Ma) im Molassebecken ausbreitende Molassemeer (Schlunegger et al. 1996) hat die vom sich bildenden Alpenorogen weit entfernten Gebiete nur teilweise erreicht und es finden sich Übergänge zu brackischen und terrigenen Verhältnissen (Kuhlemann und Kempf 2002). In dieser distalen Position des Molassebeckens sind die tertiären Sedimente auch im Vergleich zur Ostschweiz (Bolliger 1998) und zum Mittelland (Schlunegger et al. 1996) auf sehr geringe Mächtigkeiten reduziert (Kälin 1993).

Die Sedimente der OMM auf Kartenblatt Frick (Diebold et al. 2006) sind gekennzeichnet durch glimmerführende quarzreiche Sandsteine bis Konglomerate von bis zu 50 m Mächtigkeit (die dem Burdigalian, 20.4 bis 16.0 Ma, zugeordnet werden), zum Teil reich an roten Mergeln und meistens nach oben in einem groben Kalksand mit hohem Anteil an Muschelschill (Muschelagglomerat) abschliessend. Darüber folgen über einem Übergang mit kavernösen Süsswasserkalken festländische Sedimente, die meist als rote mergelige Schichten ausgebildet sind und Landschnecken (u.a. Heliciden) enthalten. Trotz des kontinentalen Charakters zählen die Helicidenmergel noch zur OMM (Diebold et al. 2006).

Bereits vor 17 Ma beginnen sich in den Sedimenten der OMM brackische und terrigene Bedingungen auszubreiten (Kuhlemann und Kempf 2002). Nach den Sedimenten eines letzten Meeresvorstosses von Westen her um 17 Ma etablieren sich kontinentale Verhältnisse. Die auflagernden Sedimente der OSM bestehen aus einer Abfolge terrestrischer Mergel und eingelagerter Seesedimente (zum Beispiel die Süsswasserkalke von Anwil, Stumm 1964), die lokal bis regional durch sandige bis konglomeratische Schüttungen (Nagelfluh aus dem Schwarzwald sowie Sande der Glimmersandrinne aus der Böhmischen Masse) ersetzt oder überlagert werden. Wie bereits in der OMM sind die Abfolgen lateral variabel, was auf eine engräumig unterteilte Landoberfläche hinweist. So ist im Baselbieter Jura zwischen Hinterer Frenke (Bubendorf bis Reigoldswil, BL) und Homburger Bach (Thürnen bis Läufelfingen, BL) überwiegend die Nagelfluhfazies verbreitet, dann folgen gegen E bis zum Wölflinswiler Bach (Wölflinswil, AG) mehrheitlich Mergel und Süsswasserkalke, bevor weiter gegen E im aargauischen Tafeljura wieder Nagelfluhablagerungen dominieren (Kälin 1993, Diebold et al. 2006). Die Juranagelfluhschüttungen weisen auf bedeutende Hebungsprozesse im Schwarzwald hin. In den Schüttungen ist nachweisbar, dass sich die durch die Hebung bedingte Erosion im Schwarzwald in sukzessive tiefere Schichten eingräbt (Stumm 1964, Kälin 1993).

Die tektonischen Vorgänge und Grabenbildungen in der Europäischen Platte sind seit spätestens oberster Kreide und frühem Tertiär (Zeitraum von 80 bis 40 Ma) begleitet von lokalen Aufstiegen von Magma (Keller et al. 2002, Schmitt et al. 2007). So sind entlang des heutigen Rheingrabens diverse Gänge bekannt, die mehrheitlich ein tertiäres Alter haben (Lippolt et al. 1963, Keller et al. 2002). Zu grösseren vulkanischen Zentren haben sich die magmatischen Aktivitäten jedoch nur im Odenwald (Schmitt et al. 2007), am Kaiserstuhl (Lippolt et al. 1963, Keller et al. 2002) und im Hegau (eine Zusammenstellung der vorhandenen Daten findet sich in Schreiner 1992) entwickelt. Die heute vorliegenden Altersdatierungen zur magmatischen Aktivität zeigen eine sich von Norden nach Süden verschiebende Aktivität: Während magmatische Intrusionen im Odenwald in die oberste Kreide und ins Eozän fallen, beginnt die Aktivität am Kaiserstuhl im mittleren Miozän und endet nach nur wenigen Jahren mit letzten Ausbrü-

chen knapp vor 16 Ma am Limberg (Keller et al. 2002, Kraml et al. 2006), noch bevor die Aktivität um 15 Ma im Hegaugebiet einsetzt und mit dem Eindringen der Phonolith-Schlote um 7 Ma endet. Abseits grösserer tektonischer Elemente schlagen im Urach-Gebiet vertikale Gänge aus grosser Tiefe an die Oberfläche durch. Hier ist jedoch die Altersdatenlage beschränkt (Lippolt et al. 1963, Kröchert et al. 2009) und die Altersangaben zum Teil widersprüchlich. In einer kürzlich erstellten Studie (Kröchert et al. 2009) wird die Vermutung geäussert, dass die früheren Datierungen, die eine zeitgleiche Aktivität in Kaiserstuhl und Urach-Gebiet angenommen haben, allenfalls revidiert werden muss und die Uracher Vulkane eher zeitgleich mit den Hegau-Vulkanen aktiv waren.

Im Unterschied zum Kaiserstuhl, der zentral im Oberrheingraben gelegen eine nur beschränkte Ausdehnung der magmatischen Aktivität und der Ablagerung der Eruptionsprodukte zeigt, weisen die stark verstreuten Tuffschlote und Deckentuffe des Hegaus darauf hin, dass sowohl die intrudierenden Gänge als auch die an der Oberfläche abgelagerten Eruptiva eine grössere Region durch Ausbrüche und vulkanische Ablagerungen gestaltet haben. Tufflagen der Hegau-Vulkane reichen über die südlichsten Eruptionsorte (bei Ramsen, SH, Hofmann 1956, beziehungsweise am Schienerberg, östlich Stein am Rhein, SH, Zaugg et al. 2008) weit in die Schweiz hinein (Hofmann 1975, Rahn und Selbekk 2007). Auch gegen Westen finden sich über die westlichsten Schlote (Blauer Stein bei Randen, S-Deutschland, Schreiner 1992) Tufflagen beziehungsweise vulkanische Einstreuungen im gesamten Randengebiet (Kanton SH, Hofmann 1958).

Methodik

Spaltspuren in Kristallgittern von Uran-haltigen Mineralen sind das Resultat des natürlich vorkommenden spontanen Kernzerfalls des Uranisotops 238 (^{238}U). Beim Zerfall eines in einem Kristallgitter eingebauten ^{238}U-Isotops werden zwei in etwa gleich grosse Kernteile in entgegengesetzte Richtung voneinander weggeschleudert. Die stark positiv geladenen Kernfragmente ziehen dabei auf ihrem Pfad aus der näheren Umgebung Elektronen ab und hinterlassen auf einer charakteristischen Länge ein deformiertes Kristallgitter (Wagner und Van den haute 1992). Die so entstandenen Spaltspuren sind thermisch instabil, das heisst sie heilen oberhalb mineralspezifischer Temperaturen wieder aus. Unterschreitet ein Gestein in der Erdkruste diese Temperaturen, werden die Spaltspuren akkumuliert, die radiometrische Uhr beginnt zu laufen. Aus diesem Grund wird die Spaltspuren-Methode in der Geologie besonders dazu verwendet, um Hebungs- und Abtragungsprozesse zu datieren und quantifizieren. Sie kann jedoch im Falle sehr schneller Abkühlung von Gesteinen, wie zum Beispiel in einem vulkanischen Umfeld, auch direkt zur Datierung verwendet werden.

Die Gitterdefekte der Spaltspuren sind nur wenige Nanometer breit. Um sie sichtbar und damit unter einem Mikroskop zählbar zu machen, werden ^{238}U-haltige Minerale als Körner aus dem Gestein separiert, in ein Probenpräparat eingebettet und durch Schleifen und Polieren freigelegte korninterne Flächen angeätzt, so dass die Spuren etwa tausendfach verbreitert werden.

In der Praxis werden vor allem die Minerale Apatit (Ca-Phosphat) und Zirkon (Zirkonium-Silikat), die beide in geringen Mengen Uran enthalten, verwendet. Für den in dieser Studie ausschliesslich datierten Apatit beginnt ein Ausheilen der Spaltspuren über geologische Zeiträume bereits ab einer Temperatur von ca. 60°C (das heisst gewöhnlich in ca. 2 km Erdtiefe), wohingegen oberhalb von 120°C (entsprechend ca. 4 km Tiefe) die entstandenen Spuren unmittelbar nach Entstehung ausgeheilt werden. Der Temperaturbereich ergibt sich daraus, dass der Zerstörungsgrad entlang der Spaltspur vom Zentrum zu den Enden abnimmt, da die Enden thermisch instabiler sind und bei einer Ausheilung die Spur von den Enden her kürzer wird. Hält sich die Probe auf ihrem Abkühlweg länger im kritischen Temperaturbereich auf, der so genannten partiellen Ausheilzone, werden die entstehenden Spaltspuren in ihrer Länge verkürzt. Zur Kontrolle darüber, wie langsam oder schnell die Abkühlung erfolgt ist, werden in den Körnerpräparaten daher routinemässig die Längen derjenigen Spaltspuren gemessen, die parallel zur Präparatoberfläche im Korn liegen und durch das Ein-

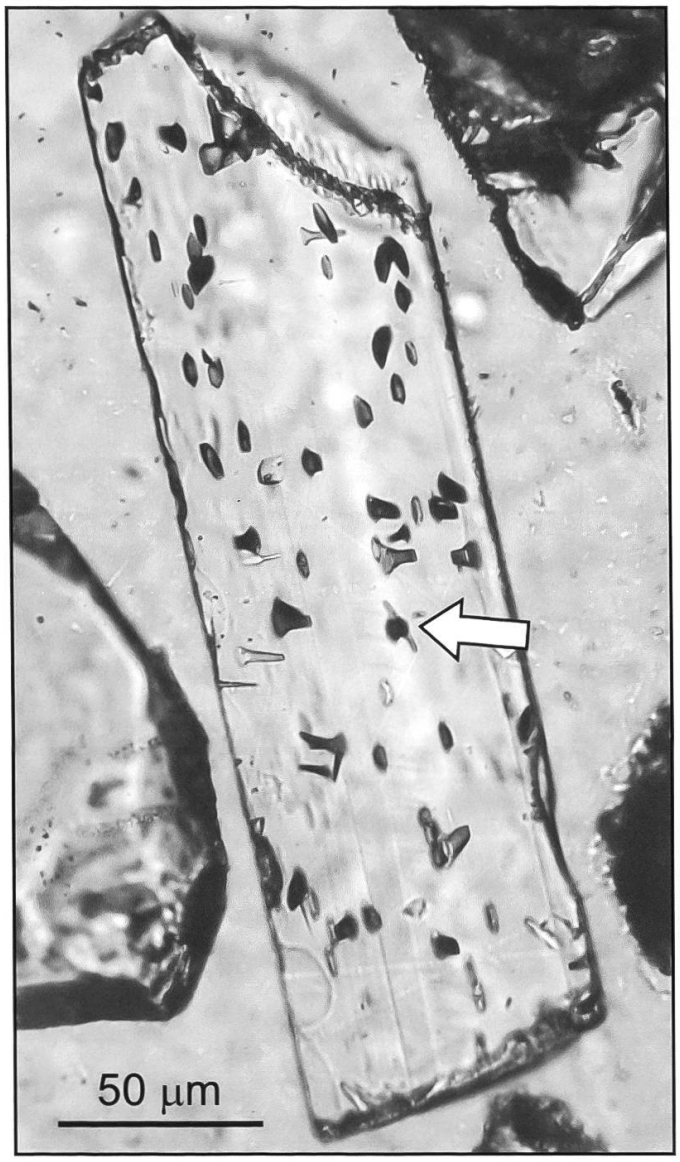

Abb. 2: Bild eines typischen langprismatischen vulkanischen Apatits mit angeätzten Spaltspuren (Probe MR P 412, Tennikerfluh, Tenniken, BL). Die Länge des Korns beträgt rund 270 µm. Weisser Pfeil: Entlang einer ins Korn hinein reichenden Spaltspur wurde eine parallel zur Oberfläche im Korninneren liegende (daher nur unscharf sichtbare) Spaltspur angeätzt, die für eine Spaltspuren-Längenmessung geeignet ist.

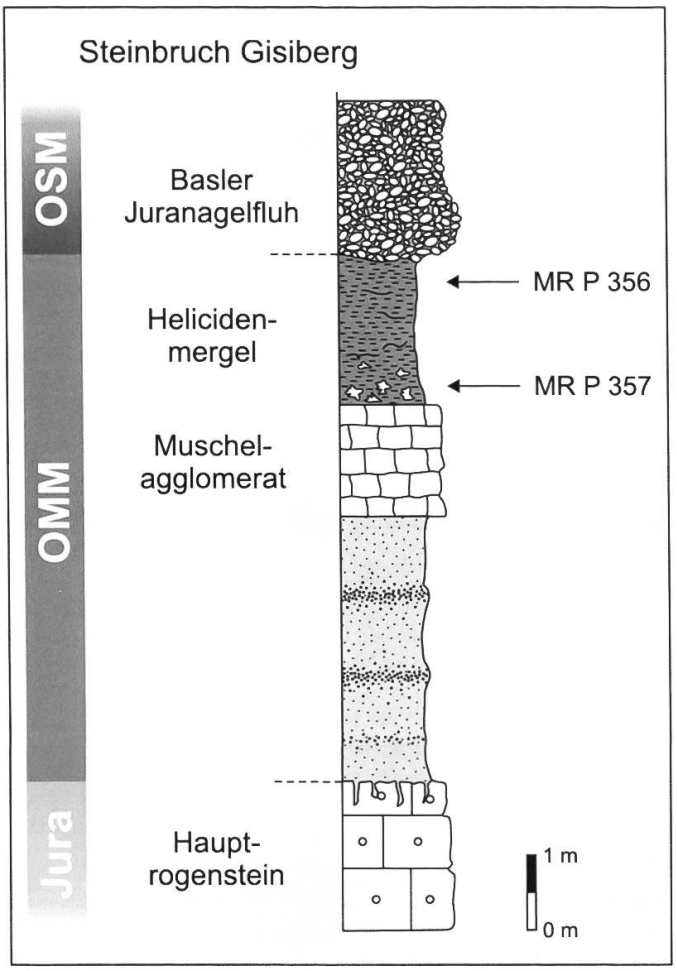

Abb. 3: Skizze der Aufschlussverhältnisse und der Probenlokalitäten im Steinbruch Gisiberg (Wittinsburg, BL, Profil modifiziert nach Kälin 1993).

dringen der Ätzflüssigkeit entlang von Spaltspuren oder Rissen angeätzt wurden. Für Apatit ist bekannt, dass frisch gebildete Spaltspurenlängen im Bereich von 15 bis 17 µm liegen. Über geologische Zeiträume abgekühlte Proben besitzen abhängig von der Abkühlrate mittlere Spaltspurenlängen von 12 bis 14 µm. Rasch abgekühlte vulkanische Proben haben hingegen Spurenlängen, die um einen Mittelwert von über 15 µm streuen (Gleadow et al. 1986).

Methodisch anspruchsvoll für das Auszählen der Spaltspuren waren die in vielen Apatitkörnern angeätzten Gitterdefekte (Abb. 2), die als Resultat der schnellen Abkühlung und Auskristallisation der Apatite angesehen werden. Das Vorhandensein dieser Strukturen erlaubte jedoch, die vulkanischen Apatite eindeutig von detritischen Apatiten anderer Herkunft zu unterscheiden.

In dieser Studie werden die absoluten Alterswerte der Spaltspurendatierung in die Altersskala der geologischen Zeitepochen und -stufen (Gradstein et al. 2004) eingereiht, aber auch den relativen Säugetierzonen zugeordnet. Letztere beziehen sich auf 17 im Neogen (23.0 bis 2.6 Ma) definierte Zonen (MN-Zonen, Mein 1975, MN steht für «Mammals Neogene»), die jeweils das erstmalige Auftauchens diagnostischer Säugetierreste (insbesondere Zähnen) angeben.

Probenherkunft und -bearbeitung

Alle von Hofmann (1961) beschriebenen Apatithöffigen Stellen wurden beprobt, wobei nicht mehr alle Stellen in der gleichen Weise zugänglich waren. So konnten an den früheren Aufschlüssen in Sennhütten (Mönthal, AG) und Chalofen (Villnachern, AG) keine höffigen Proben gefunden werden. P. Diebold (pers. Mitteilung, 2010) wies darauf hin, dass das von Hofmann (1961) beschriebene Vorkommen an der Lokalität Chalofen aufgrund eines neuen Waldwegs nicht mehr vorhanden ist. Ein frischer Aufschluss von OSM-Mergeln in Ursprung (AG, 654.200/259.300, 505 m ü. M.) erwies sich als nicht apatitführend. Erfolgreich hingegen waren die Probennahmen in Tenniken in den Helicidenmergeln der Tennikerfluh (MR P 412), im Steinbruch von Gisiberg (Wittinsburg, BL, gemeint ist der aufgelassene Steinbruch südlich Steinholden und westlich Hölstegrabe, wo eine Probe, MR P 356, direkt unterhalb der Basis der Juranagelfluh und eine Probe, MR P 357, im Verwitterungshorizont oberhalb des OMM-Muschelagglomerats genommen wurde, Abb. 3), sowie auf dem Homberg (Egewil, AG, MR P 382, umgefallener Baumstrunk) und an der Küssaburg (S-Deutschland, nordöstlich Zurzach, AG, MR P 368, Wegrand). Den Beobachtungen von Stumm (1964) folgend wurden ausserdem die verwitterten Horizonte oberhalb der OSM-Süsswasserkalke von Anwil (BL)-Kienberg (SO, MR P 398, 399, 401) beprobt (Abb. 1).

Drei Proben wurden aus den OSM-Aufschlüssen bei Vermes (Kanton Jura) genommen. Gemäss der Detailstratigraphie von Vermes in Engesser et al. 1981 stammen die Proben aus den Schichten 4–6 (Zuordnung unsicher), 10 und 39/40 und liegen oberhalb der Helicidenmergel. In keiner dieser Proben konnten vulkanogene Apatite nachgewiesen werden. Die von Engesser et al. (1981) angegebenen Helicidenmergel im Bachbett des östlichsten Aufschlusses sind heute verschüttet.

Aus den unverfestigten Helicidenmergeln der Tennikerfluh, des Steinbruches von Gisiberg, des Hombergs und der Küssaburg wurde die Sandfraktion herausgewaschen und aus dieser mittels Schwereflüssigkeiten und Magnetseparator die Apatite angereichert. Die Proben aus den Süsswasserkalken von Anwil-Kienberg wurden zur Abtrennung des Apatits während diverser Wochen mit 3 %-iger Ameisensäure entkalkt.

Apatitreiche Fraktionen wurden mit Epoxyharz auf Objektträger fixiert und korninterne Flächen durch Schleifen und Polieren freigelegt. Anschliessend wurden die Körnerpräparate bei 21°C während 20 s mit 5-normaler HNO_3 angeätzt und an diesen Präparaten die Spaltspurenlängen gemessen. Zur Bestimmung der Alter wurden die Körnerpräparate mit einem Uranfreien Glimmerplättchen abgedeckt, übereinander gestapelt und als Probenstapel zusammen mit Dosimetergläsern mit bekanntem Urangehalt in eine Al-Dose eingeschweisst und im Forschungsreaktor FRM-II der TU München in Garching (De) mit thermischen Neutronen bestrahlt (10^{16} n pro cm^2). Nach Abklingen der durch die Bestrahlung erzeugten Radioaktivität wurden die Proben ausgepackt und wieder von ihrem Glimmerplättchen getrennt. Die auf den Glimmerplättchen durch die Bestrahlung induzierten Spaltspuren von ^{235}U wurden durch ein 45-minütiges Einlegen der Glimmer in konzentrierte HF angeätzt. Dank der Möglichkeit der Bestimmung des kornindividuellen Urangehaltes mittels der induzierten ^{235}U-Spuren und der Bestimmung des Neutronenflusses anhand der Glimmer auf den Dosimetergläsern wurden anschliessend die natürlichen ^{238}U-Spuren in den Apatiten sowie die induzierten ^{235}U-Spuren in den Glimmern unter einem Zeiss-Axioplan-Mikroskop der Universität Basel bei 1600-facher Vergrösserung ausgezählt und daraus die Alter berechnet. Die übliche Praxis ist 20 Körner auszuzählen. Abweichend davon wurden so viele Körner wie möglich berücksichtigt, um zu testen, ob sich allenfalls in der gleichen Probe verschieden alte Kornpopulationen nachweisen lassen. Ausgezählt wurden nur die Spuren in eindeutig vulkanogenen Apatiten. Diese lassen sich klar von den teilweise untergeordnet vorhandenen nicht-vulkanogenen Apatiten trennen. Erstere sind praktisch immer idiomorph und langprismatisch und fallen durch das Auftreten von angeätzten Gitterdefekten auf (Abb. 2).

Die Altersangaben erfolgen als so genannte «central ages» (Galbraith und Laslett, 1993), was einer statistischen Auswertung unter Fehler-

Probe Lokalität Koordinaten, Höhe (m ü. M.)	Anzahl Körner	spontane Spuren ρ_s (N_s)	induzierte Spuren ρ_i (N_i)	$P\chi^2$	Dosimeter ρ_d (N_d)	zentrales Spaltspuren-alter in Ma ($\pm 1\sigma$)	mittlere Spurenlänge ± Stand.abw. in µm	St.-abw.	Anzahl Spuren
MR P 356 Gisiberg-1, Wittinsburg, BL 629.940 / 254.420, 610	28	0.015 (221)	0.250 (3587)	>99 %	0.144 (11305)	15.2 (–1.1/+1.1)	15.14±0.13	1.23	93
MR P 357 Gisiberg-2, Wittinsburg, BL 629.960 / 254.420, 608	38	0.009 (347)	0.145 (5682)	44 %	0.144 (11290)	15.1 (–0.9/+0.9)	15.21±0.09	0.85	85
MR P 368 Küssaburg, Baden-Württemberg, De 669.200 / 272.820, 590	7	0.006 (18)	0.098 (317)	94 %	0.142 (11144)	13.9 (–3.4/+4.1)	14.97 ±0.59	1.19	4
MR P 382 Homberg, Egewil, AG 652.510 / 261.300, 605	14	0.016 (156)	0.272 (2674)	84 %	0.142 (11129)	14.2 (–1.1/+1.2)	12.65±0.50	1.64	11
MR P 398 Schilthof-2, Kienberg, SO 640.270 / 255.682, 660	43	0.002 (40)	0.036 (866)	98 %	0.162 (12601)	12.9 (–2.1/+2.4)	15.36±0.32	1.20	14
MR P 399 Schilthof-3, Kienberg, SO 640.270 / 255.682, 660	40	0.002 (33)	0.35 (747)	93 %	0.162 (12573)	12.3 (–2.2/+2.5)	15.59±0.17	1.89	26
MR P 401 Unterberg, Wölflinswil, AG 640.490 / 255.900, 675	45	0.001 (36)	0.032 (856)	100 %	0.161 (12546)	11.7 (–2.0/+2.3)	15.18±0.22	1.09	25
MR P 412 Tennikerfluh, Tenniken, BL 628.560 / 254.580, 610							15.10±0.11	1.14	100

Erläuterungen:

(i) Spurendichtenangaben in 10^7 Spuren pro cm^2, Anzahl gezählte Spuren (N) in Klammer;

(ii) Spurenanalyse mittels Externer Detektormethode mit einer Konstante von 0.5 für die $4\pi/2\pi$-Geometriekorrektur;

(iii) Apatitalter berechnet unter Verwendung von Dosimeterglas CN-5 with ζ_{CN5} =344 ± 5.

(iv) $P\chi^2$ entspricht der Wahrscheinlichkeit, einen χ^2-Wert bei ν Freiheitsgraden zu erhalten, wobei ν = Anzahl Körner - 1.

(v) Für den Mittelwert der Spurenlängen wird ein Fehler (Stand.abw.) angegeben, für die Längenverteilung eine Standardabweichung (St.-abw.) sowie die Anzahl der Messungen.

Tab. 1: Spaltspurenalter der vulkanischen Apatite aus Sedimenten der Oberen Meeres- und Süsswassermolasse im Baselbieter und Aargauer Jura (NW-Schweiz).

gewichtung der Einzelkornalter entspricht. Spaltspurenalterswerte haben aufgrund der angewendeten Statistik üblicherweise Fehler (einfache Standardabweichung) im Bereich von 5 bis 10 %. In Fällen, in denen die Urangehalte der Apatite tief sind oder nur wenige Körner gezählt werden konnten, können die Altersfehler aufgrund der schlechten Auszählstatistik auch höhere Prozentwerte annehmen, was in unserem Datensatz auf einige Proben zutrifft.

Resultate

Die aus den Apatiten erhaltenen Spaltspurenalter variieren von 11.7 bis 15.2 Millionen Jahren (Tab. 1). Die Fehler der Alter liegen bei knapp 1 bis 4 Millionen Jahren, wobei insbesondere die Probe der Küssaburg aufgrund nur geringer Zahl ausgezählter Körner einen relativ hohen Fehler aufweist.

Die beiden Proben aus dem Steinbruch Gisiberg zeigen innerhalb des Fehlers das gleiche Alter, das heisst hier lässt sich nicht eruieren, ob innerhalb der zwei Meter mächtigen Helicidenmergel allenfalls mehrere vulkanische Ereignisse Material geliefert haben. Das fehlergewichtete Alter für beide Proben beträgt 15.1 ± 0.7 Ma. Deutlich jünger sind die Proben von Anwil-Kienberg, die zusammen genommen ein spät-serravallisches Alter anzeigen (12.3 ± 1.3 Ma, Serravallian = 13.7 bis 11.6 Ma). Für alle Proben bei Anwil-Kienberg ist stark zu vermuten, dass die knapp oberhalb der Süsswasserkalke genommenen Apatitproben einst ebenfalls in den Süsswasserkalken abgelagert wurden. Durch Bodenbildungsprozesse wurden jedoch der einbettende Kalk aufgelöst und die unlöslichen Anteile (darunter die Apatite) angereichert. In einer Zusatzprobe aus dem Süsswasserkalk fanden sich tatsächlich Apatite. Aufgrund

des Altersunterschiedes zu den Proben von Tennikerfluh-Gisiberg ist für die Anwil-Kienberg-Proben ein eigenes vulkanisches Ereignis anzunehmen.

Die Alter der Proben vom Homberg und der Küssaburg passen in das Altersfenster sowohl von Tennikerfluh-Gisiberg wie von Anwil-Kienberg. Eine Zuordnung zum einen oder anderen vulkanischen Ereignis ist aufgrund der Alter nicht eindeutig möglich.

In allen Proben wurden Spaltspurenlängen gemessen, um die vulkanische Herkunft zu verifizieren. Die erhaltenen mittleren Längen von 15 µm oder mehr deuten klar auf eine solche Herkunft hin. Eine nicht ausgezählte Probe von der Tennikerfluh zeigt durch die Längenwerte ebenfalls eindeutig ihre vulkanische Herkunft. Eine Ausnahme bildet die durch nur wenige Messungen gekennzeichnete Längenverteilung vom Homberg, die deutlich verkürzte Längen andeutet. Der Grund für die Verkürzung der Längen nach der Eruption ist unbekannt, könnte aber auch einfach durch die beschränkte Anzahl von Längenmessungen begründet sein.

Diskussion

Herkunft des vulkanischen Materials

Die Altersbestimmungen an den vulkanischen Apatiten zeigen zwei altersmässig getrennte vulkanische Ereignisse an, ein älteres von Tennikerfluh-Gisiberg, ein jüngeres aus den Süsswasserkalken von Anwil-Kienberg. Die bereits von Hofmann (1961) gestellte Frage der Herkunft des Materials kann aufgrund der Alterswerte neu diskutiert werden. Bereits Hofmann (1961) hatte festgestellt, dass die Probenlokalitäten der Tennikerfluh luftlinienmässig näher am Vulkankomplex des Kaiserstuhls liegen als an den westlichsten Ausläufern der Hegau-Vulkane nördlich von Schaffhausen.

Aufgrund publizierter Altersbestimmungen aus beiden Vulkanregionen lassen sich heute die folgenden Altersfenster für die vulkanische Aktivität angeben: Der Kaiserstuhl war von 18 bis 16 Ma aktiv und erlosch nach jüngsten Ausbrüchen am Limberg (Abb. 1) vor 16.2 Ma (Keller et al. 2002, Kraml et al. 2006). Für die vulkanischen Aktivitäten im Hegau ergibt sich nach Schreiner (1992) ein Zeitfenster von 15 bis 7 Ma. Jüngstes Ereignis sind die Schlote mit Phonolithen (Mägdeberg, Hohenkrähen, Hohentwiel). Damit sind die Aktivitätsphasen der Vulkane zeitlich getrennt, und nur das Hegau-Zeitfenster überlappt mit allen hier präsentierten Altersdaten. Eine Herkunft aus dem Kaiserstuhl ist damit unwahrscheinlich. Sie kann jedoch unter Berücksichtigung einer zweifachen Standardabweichung als Altersfehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Herkunft aus dem Hegau passt jedoch zur durch die Probenlokalitäten vorgegebenen Spur, die vom Hegau nach Westen reicht (Abb. 1), aber westlich des Gebiets der Tennikerfluh nicht weiter nachgewiesen ist (Stumm 1964). Weiter westlich gelegene Vorkommen von Helicidenmergeln werden bei Hauber (1960) beschrieben, wurden aber noch nicht beprobt. Da die Vorkommen der Gesteine der OMM und OSM jedoch ebenfalls in einer Richtung WSW-ENE vorliegen (Abb. 1), war die Richtung der Spur bis jetzt nicht als hinreichendes Argument anzusehen.

Bemerkenswert ist, dass für das Auftreten der Apatite in den Süsswasserkalken der OSM von Anwil-Kienberg ein fluviatiler Transport auszuschliessen ist. Die Apatite treten in den Süsswassermergeln und -kalken neben wenigen stark korrodierten Körnern als praktisch einzige nichtkalkige detritische Komponente auf. Damit ist ein Eintrag der Apatite aus einem in den See einfliessenden Fluss unwahrscheinlich. Die Schüttungen der Juranagelfluh deuten weiter west- und östlich Schüttungsrichtungen von Norden an. Ein solcher Zufluss hätte vermutlich weiteres detritisches Material, insbesondere Quarz, mitgeliefert, welches in der aus dem Kalk mit Säure herausgelösten detritischen Fraktion praktisch vollständig fehlt. Für den Transport der Apatite muss somit ein Lufttransport, zum Beispiel im Rahmen eines grossen Ausbruchs mit weit aufsteigender Aschenwolke, angenommen werden. In der OSM der Nordostschweiz (Hofmann 1975) und des Randens (Hofmann 1958) sind diverse Vorkommen vulkanischer Apatite bekannt, zu denen jedoch nur in wenigen Fällen Datierungen existieren (Rahn und Selbekk 2007, Zaugg et al. 2008). Der Transport grosser Mengen von Ausbruchsmaterial über

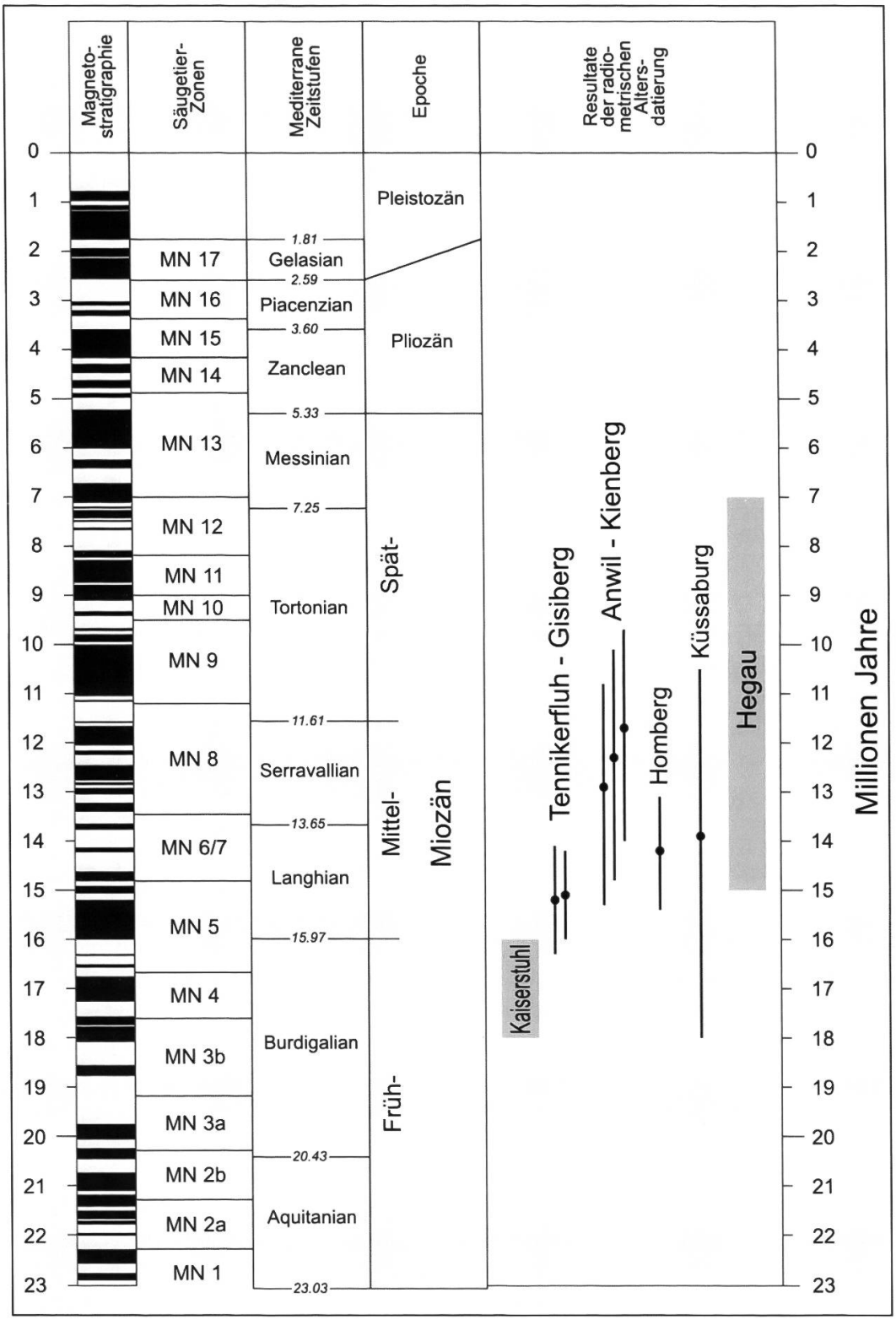

Abb. 4: Geologische Zeitskala von Mio- bis Holozän und Einordnung der Apatit-Alterswerte bezüglich vulkanischer Aktivität im Kaiserstuhl (gemäss Keller et al. 2002, Kraml et al. 2006) und Hegau (Schreiner 1992). Die Alterswerte der Stufengrenzen und magnetostratigraphischen Streifung in der geologischen Zeitskala wurden aus Gradstein et al. (2004) übernommen, die Beziehungen zu den Säugetierzonen (MN) stammen aus Berger et al. (2005).

weite Strecken bedingt, dass dieses Material durch den Ausbruch in sehr grosse Höhe geschleudert und von einer konstanten Windrichtung rasch verfrachtet wurde.

Die Altersdaten aller Proben gehören in die Frühphase der Hegau-Aktivität. Diese Phase geht den heute morphologisch prägnanten Schloten aus Basalten (Höwenegg, Hohenstoffeln, Hohenhewen, Riedheim, Blauer Stein) und Phonolithen voran. Das Auftreffen heisser Magmen aus grosser Tiefe auf oberflächennahe Aquifere (zum Beispiel die Malmkalke) dürfte zu heftigen Eruptionen geführt haben, geeignet, um hohe Eruptionswolken zu generieren.

Tennikerfluh – Gisiberg

Die im Steinbruch Gisiberg datierten Apatite in den Helicidenmergeln stammen nicht notwendigerweise direkt aus den Ablagerungen einer vulkanischen Aschenwolke. In den beiden Proben von Basis und Top der Helicidenmergel lässt sich anhand der Apatite kein Altersunterschied finden. Hingegen ist aufgrund der idiomorphen Kornformen klar, dass auch diese Körner nur unweit transportiert worden sind und zwischen dem Auswurf des vulkanischen Materials (und damit dem Start der Spaltspurenuhr) und der finalen Platznahme der Sedimente nur geologisch kurze Zeiträume verstrichen sind. Ein beschränkter Transport durch Erosion einer Tuffschicht und nachfolgende Anreicherung durch Bodenbildungsprozesse ist davon nicht ausgeschlossen. Damit entspricht das Eruptionsalter auch dem Sedimentationsalter der Helicidenmergel. Diese Aussage ist wichtig, erlaubt sie doch, entscheidende zeitliche Aussagen zu den Helicidenmergeln und den darunter und darüber liegenden Gesteinswechseln zu machen.

Für die OMM wird durch Schlunegger et al. (1996) ein sedimentäres Zeitfenster von 20 bis18 Ma angegeben. Dies entspricht den Zonen MN 3a bis MN 4 der Säugetierstratigraphie (Mein 1975, 1989; vgl. Abb. 4). Es ist zu erwarten, dass aufgrund des vorrückenden alpinen Orogens die jüngsten Sedimente der OMM am Nordrand des damaligen Molassebeckens abgelagert worden sind (Kuhlemann und Kempf 2002). Mit einem Sedimentationsalter von 15 Ma für die Helicidenmergel im Steinbruch Gisiberg liegt erstmalig in dieser distalen Lage ein radiometrischer Alterswert für das Ende der OMM-Sedimentation vor. Das Ende der OMM-Sedimentation fällt in das Langhian oder in das obere Ende der Säugetierzone MN5 (Abb. 4).

Für das im Steinbruch Gisiberg überlagernde Ereignis der Nagelfluhsedimentation kann mit der Datierung ein Maximalalter angegeben werden. Die im Profil mit scharfem Kontakt einsetzenden Schüttungen aus dem Schwarzwald (Abb. 3) passen zu zeitgleichen Hebungsvorgängen im Kristallin des Südschwarzwalds. Thermochronologische Daten aus dem Südschwarzwald (Link 2010) zeigen, dass im mittleren Miozän um 15 Ma bedeutende Hebungen stattgefunden haben. Das Alter stimmt gut mit dem von Kälin (1993) angegebenen Maximalalter für die Baselbieter Juranagelfluhschüttungen von 14 Ma (entsprechend MN 6/7) überein.

Anwil-Kienberg

Die OSM-Lokalität Anwil wird allgemein in der Säugetierstratigraphie als Referenzlokalität für MN 8 angegeben, welche in etwa den Zeitraum des Serravallian umfasst (Abb. 4, vgl. Kälin 1993, Berger et al. 2005). Das hier erhaltene Alter fällt in diesen Zeitraum. Alle drei Spaltspurenalter aus den Süsswasserkalken, einschliesslich der darüber liegenden kondensierten Bodenhorizonte, von Anwil-Kienberg liegen innerhalb des entsprechenden Zeitintervalls. Das gilt auch für das nach Altersfehlern gewichtete Gesamtalter. Eine zeitliche Zuordnung der Süsswasserkalke zu dem von Suter (1976) beschriebenen Doppelhorizont roter Tufflagen an der Bänkerjochstrasse (Oberhof, AG) ist zurzeit nicht möglich.

Kälin (1993) weist darauf hin, dass die als Referenzlokalität herangezogene Fundstelle von Säugern (Engesser 1972) an der Basis der Süsswasserbildungen liegt und damit älter als die vulkanischen Einstreuungen ist. Das gewichtete Gesamtalter der vulkanischen Apatite (12.3 Ma) liegt im mittleren Bereich der Säugerzone MN 8, die von 13.4 bis 11.2 Ma reicht (Berger et al. 2005). Für die stratigraphisch oberhalb der Säugerfundstelle von Anwil gelegenen OSM-Sedimente lässt sich somit ein gesamthaft mittelmiozänes Alter vermuten. Damit stellen die hier vorgestellten Daten auch die Frage, inwiefern ein Andauern von MN 8 ins Tortonian (Abb. 4) gerechtfertigt wird. Aus Sicht der vulkanischen Einstreuungen wäre das Zeitfenster der durch Säuger belegte Referenzlokalität für MN 8 bereits vor Ende des Serravallian geschlossen. Oberhalb der Süsswasserkalke von Anwil-Kienberg sind aus den Gesteinen keine Säugerfunde bekannt. Erst oberhalb der vulkanischen Apatite setzen die ersten feinkonglomeratischen Schüttungen der Juranagelfluh ein (Stumm 1964, Kälin 1993).

Das Alter der Süsswasserkalke setzt auch ein Maximalalter für die direkt über den Süsswasserkalken folgende Juraüberschiebung (Stumm

1964), wenn auch dieses Alter nicht kritisch ist. Kälin (1993) hat für die OSM-Sedimente auf der Vue des Alpes (Kanton Neuchâtel) ein Sedimentationsalter von MN 9 hergeleitet, welches deutlich jünger als dasjenige der Süsswasserkalke von Anwil-Kienberg ist (Abb. 4). Für die Phase der Jurafaltung wird allgemein ein Zeitraum zwischen 9 und 4 Ma angenommen (Becker 2000), vermutlich zeitlich von SW nach NE, das heisst entlang der Juraketten, und von SE nach NW, das heisst quer dazu, jünger werdend.

Schlussfolgerungen

Spaltspurendatierungen an vulkanischen Apatiten der Oberen Meeres- und Süsswassermolasse ergeben für die Helicidenmergel bei Tenniken ein Sedimentationsalter um 15 Ma und für die Süsswasserkalke bei Anwil-Kienberg ein signifikant jüngeres von 12.3 Ma. Zusammen mit zwei Altern aus dem Aargauer und süddeutschen Tafeljura deuten diese auf eine Herkunft der Proben aus der vulkanischen Aktivität des Hegaus, während alle Alter für eine Herkunft aus dem Kaiserstuhl zu jung sind.

Für das Vorkommen eingestreuter Apatite in die mittelmiozänen Süsswasserkalke bei Anwil-Kienberg muss ein Transport auf dem Luftweg angenommen werden als Resultat eines grossen Ausbruchs mit Bildung einer grossen Aschenwolke und unmittelbaren Windtransport nach WSW.

Aus den datierten Helicidenmergeln vom Steinbruch Gisiberg wird ein distales Ende der OMM-Sedimentation im Langhian (MN 5) hergeleitet. Auch der Beginn der Nagelfluhsedimentation hat demnach in diesem Teil des Tafeljuras nach 15 Ma eingesetzt.

Dank

Wir danken Herrn W. Kanz für seine Begleitung und Diskussionen anlässlich einer gemeinsamen Begehung der Aufschlüsse zwischen Kienberg und Wölflinswil, Herrn M. Suter für seine Auskünfte zum ehemaligen Aufschluss an der Bänkerjochstrasse, Herrn D. Kälin für seine stratigraphischen Hinweise zu den Aufschlüssen im Steinbruch Gisiberg sowie A. Kounov für den grosszügigen Zugang zum Spaltspurenlabor am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Basel. Die Endseparation und die Präparatherstellung der Proben erfolgten durch D. Flemming und M. Schrage an der Mineralogie der Universität Freiburg. Dank der Durchsicht von A. Puschnig und B. den Brok hat das Manuskript an Klarheit gewonnen.

Literatur

Becker, A. (2000): The Jura Mountains: An active foreland fold-and-thrust belt? Tectonophysics 321: 381–406.

Berger, J.-P., B. Reichenbacher, D. Becker, M. Grimm, K. Grimm, L. Picot, A. Storni, C. Pirkenseer & A. Schaefer (2005): Eocene-Pliocene time scale and stratigraphy of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB). International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau) 94: 711–731.

Bolliger, T. (1998): Age and geographic distribution of the youngest Upper Freshwater Molasse (OSM) of eastern Switzerland. Eclogae geologicae Helvetiae 91: 321–332.

Diebold, P., P. Bitterli-Brunner & H. Naef (2006): Erläuterungen zum Kartenblatt Frick mit schweizerischem Anteil von Blatt Laufenburg. Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25000, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, 136 S.

Engesser, B. (1972): Die obermiozäne Säugetierfauna von Anwil (Baselland). Tätigkeitsbericht der naturforschenden Gesellschaft Baselland 28: 37–363.

Engesser, B., A. Matter, & M. Weidmann (1981): Stratigraphie und Säugetierfaunen des mittleren Miozäns von Vermes (Kt. Jura). Eclogae geologicae Helvetiae 74: 893–952.

Galbraith, R.F. & G.M. Laslett (1993): Statistical models for mixed fission track ages. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 21: 459–470.

Gleadow, A.J.W., I.R. Duddy, P.F. Green & J.F. Lovering (1986): Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. Contributions to Mineralogy and Petrology 94: 405–415.

Gradstein, F.M., J.G. Ogg & A.G. Smith (2004): A geologic time scale 2004. Cambridge University Press, 589 S.

Hauber, L. (1960): Geologie des Tafel- und Faltenjura zwischen Reigoldswil und Eptingen. Beitrag zur geologischen Karte der Schweiz, Neue Folge 112: 1–71.

Hofmann, F. (1956): Die vulkanischen Erscheinungen auf schweizerischem Gebiet in der Gegend von Ramsen (Kt. Schaffhausen). Eclogae geologicae Helvetiae 49: 85–96.

Hofmann, F. (1958): Vulkanische Tuffhorizonte in der Oberen Süsswassermolasse des Randen und Reiat, Kanton Schaffhausen. Eclogae geologicae Helvetiae 51: 371–377.

Hofmann, F. (1961): Vulkanische Aschen in den Helicitenmergeln des baslerischen, Aargauischen und badischen Tafeljuras. Eclogae geologicae Helvetiae 54: 133–136.

Hofmann, F. (1975): Vulkanische Tuffe auf dem Wellenberg E von Frauenfeld und neue Funde auf dem thurgauischen Seerücken. Eclogae geologicae Helvetiae 68: 311–318.

Kälin, D. (1993): Stratigraphie und Säugetierfaunen der Oberen Süsswassermolasse der Nordwestschweiz. Dissertation ETH Zürich Nr. 10152, 238 S.

Keller, J., M. Kraml & F. Henjes-Kunst (2002): $^{40}Ar/^{39}Ar$ single crystal laser dating of early volcanism in the Upper Rhine Graben and tectonic implications. Schweizerische Mineralogisch-Petrographische Mitteilungen 82: 121–130.

Kraml, M., R. Pik, M. Rahn, R. Selbekk, J. Carignan & J. Keller (2006): A New Multi-Mineral Age Reference Material for $^{40}Ar/^{39}Ar$, (U-Th)/He and Fission Track Dating Methods: The Limberg t3 Tuff. Geostandards and Geoanalytical Research 30: 73–86.

Kröchert, J., M. Schmieder, T. Theye & E. Buchner (2009): Considerations on the age of the Urach volcanic field (Southwest Germany). Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 160: 325–331.

Kuhlemann, J. & O. Kempf (2002) Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. Sedimentary Geology 152: 45–78.

Link, K. (2010): Die thermo-tektonische Entwicklung des Oberrheingraben-Gebietes seit der Kreide. Unpublizierte Dissertation Universität Freiburg i. Brsg., 318 S.

Lippolt, H.J., W. Gentner & W. Wimmenauer (1963): Altersbestimmungen nach der Kalium-Argon-Methode an tertiären Eruptivgesteinen Südwestdeutschlands. Jahreshefte des geologischen Landesamtes Baden-Württemberg 6: 507–538.

Mein, P. (1975): Résultat du groupe de travail des vertébrés: biozonation du Néogène mediterranéen à partir des mammifères. In: Report on activity of RCMN working groups. (1971–1975): 78–81.

Mein, P. (1989): Updating of MN Zones. In: Lindsay, E.H. et al. (Hrsg.): European Neogene Mammal Chronology. NATO ASI Series A 180, Plenum Press, New York: 73–90.

Müller, W., H. Naef & H.-R. Graf (2002). Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 99–08. Nagra, Wettingen, 237 S.

Rahn, M. & R. Selbekk (2007): Absolute dating of the youngest sediments of the Swiss Molasse basin by apatite fission track analysis. Swiss Journal of Geosciences 100: 371–381.

Schlunegger, F., D.W. Burbank, A. Matter, B. Engesser & C. Mödden (1996): Magnetostratigraphic calibration of the Oligocene to Middle Miocene (30–15 Ma) mammal biozones and depositional sequences of the Swiss Molasse Basin. Eclogae geologicae Helvetiae 89: 753–788.

Schmitt, A.K., M.A.W. Marks, H.D. Nesbor & G. Markl (2007): The onset and origin of differentiated Rhine Graben volcanism based on U-Pb ages and oxygen isotopic composition of zircon. European Journal of Mineralogy 19: 849–858.

Schreiner, A. (1992): Geologische Karte 1:50000 von Baden-Württemberg, Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 3. Auflage. Freiburg i. Br./Stuttgart, 290 S.

Stumm, F. (1964): Das Tertiär des Basler Tafeljura, mit besonderer Berücksichtigung der miocänen Ablagerungen. – Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft Basel 75: 154–218.

Suter, M. (1976): Tortonprofil «Benkenstrasse» (Aargauer Tafeljura, E Talseite des Wölflinswilerbachs). Manuskript aus Archiv der Landesgeologie.

von Moos, A. (1934): Sedimentpetrographische Untersuchungen an Molassesandsteinen. Schweizerische Mineralogisch-Petrographische Mitteilungen 15: 169–265.

Wagner, G.A. & P. Van den haute (1992). Fission Track-Dating. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 285 S.

Zaugg, A., M. Geyer, M. Rahn, M. Wessels, H. Schlichtherle, A. Hasenfratz & R. Burkhalter (2008): Erläuterungen zum Blatt 1033 Steckborn (Südteil) mit SW-Anteil von 1034 Kreuzlingen, Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25 000. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, 124 S.

PD Dr. Meinert Rahn
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
Industriestrasse 19
CH-5200 Brugg
meinert.rahn@ensi.ch

Dr. Fred G. Stumm
Amselstrasse 16
CH-4142 Münchenstein
f.stumm@bluewin.ch