

## Anwendungsmöglichkeiten von K-Ar- und Rb-Sr-Isotopenuntersuchungen an Sedimenten, Erz- und Erdöllagerstätten

Von Martin KRALIK<sup>1)</sup>

Mit 5 Abbildungen

Herrn Prof. Dr. E. SCHROLL  
zum 60. Geburtstag gewidmet

### Zusammenfassung

Im Gegensatz zur Anwendung der K-Ar- und Rb-Sr-Methode in kristallinen Gesteinen ist der Einsatz dieser Methoden für Sedimentuntersuchungen noch weitgehend unbekannt. Im wesentlichen können diese Isotopenmethoden hilfreich zur Klärung dreier Problemkreise eingesetzt werden: (1) Herkunft von Sedimenten, (2) stratigraphisch-diagenetische Alter der Sedimente und (3) postdiagenetische Einflüsse (schwache Metamorphose, Tektonik). Die Datierung von hydrothermalen Ereignissen und der Einsatz für die Erforschung von Kohlenwasserstofflagerstätten decken sich methodisch mit den oben genannten Untersuchungen.

Für die verschiedenen Anwendungsgebiete wurden einige Beispiele ausgewählt und diskutiert. Um die ungemein wichtige Zusammenarbeit von Geologie, Sedimentpetrographie und Isotopengeochemie zu unterstreichen, werden am Ende jedes Abschnitts Kriterien für die feldgeologische und zum Teil auch labormäßige Auswahl und Interpretation der zu untersuchenden Proben zusammengefaßt. Zuletzt wurden für diese Untersuchungen gebräuchliche Umrechnungsfaktoren und Standards zusammengestellt.

### Summary

The use of K-Ar- and Rb-Sr methods for the investigations of sediments is relatively unknown compared to the widely used and accepted field of applications in crystalline rocks. Essentially three groups of problems can successfully be solved under favourable circumstances: (1) The source of sediments (2) The stratigraphic-diagenetic age of sediments (3) The postdiagenetic history of sediments (weak metamorphism, tectonic events). The dating of hydrothermal events and the applications of these methods for the investigations of oilfields are included here due to identical methodologies.

Few examples are given for the various fields of applications. In order to underline the essential cooperation of geology, sedimentary petrography and of isotope geochemistry

<sup>1)</sup> Adresse des Verfassers: Institut für Geologie, A-1010 Wien, Universitätsstraße 7.

the attempt was made to summarize field and partly laboratory criterias for the selection and interpretation of samples for these K-Ar and Rb-Sr investigations. Frequently used standards and recalculation factors are compiled.

## Inhalt

1. Einleitung .....	190
2. Herkunft der Sedimente .....	191
3. Stratigraphisch-diagenetische Alter von Sedimentgesteinen .....	193
3.1. Marines Strontium-Geochronometer .....	193
3.2. Stratigraphisch-diagenetische Alter von Gesamtgesteinen, Tonfraktionen, Zeolithen und Hornsteinlagen .....	194
3.3. Stratigraphisch-diagenetische Alter von glaukonitischen Mineralien .....	197
4. Postdiagenetische Einflüsse auf Sedimentgesteine .....	198
4.1. Schwache Metamorphose .....	198
4.2. Datierung von tektonischen Ereignissen .....	199
5. Hydrothermale Lagerstätten .....	200
6. Erdöllagerstätten .....	201
7. Häufig gebrauchte Umrechnungsfaktoren und Standards für die K-Ar- und Rb-Sr-Methode .....	202
Literatur .....	203

## 1. Einleitung

Während in allen Geologielehrbüchern die Grundzüge der Isotopen-Altersdatierung im Zusammenhang mit kristallinen Gesteinen beschrieben werden, löst der Einsatz dieser natürlich-radioaktiven Isotopen bei der Untersuchung von Sedimentgesteinen noch vielfach Skepsis und Ablehnung aus.

Auf vielfachen Wunsch von Fachkollegen wird hier der Versuch unternommen, den heutigen Kenntnisstand über den Einsatz der K-Ar- und Rb-Sr-Isotopen bei der Untersuchung von Sedimenten zusammenzustellen.

Die Grundprinzipien der K-Ar- und Rb-Sr-Methode werden als hinreichend bekannt vorausgesetzt. Es sollen hier auch nicht labormethodische Details diskutiert werden, sondern die unerläßliche Zusammenarbeit der Isotopengeochemie mit der Geologie, Sedimentologie und Petrologie unterstrichen werden. Eine sinnvolle Hilfe und Interpretation können diese doch recht kostenintensiven Methoden nur in Kombination mit detaillierten feldgeologischen und petrologischen Vorstudien anbieten.

Diese Arbeit beschränkt sich ganz bewußt auf die in den meisten Labors praktizierten K-Ar- und Rb-Sr-Methoden.

Die schwache Metamorphose und schwach hydrothermale Einflüsse werden in diese Darstellung einbezogen, da sie meist an den gleichen Mineralien und mit ähnlicher Methodik wie Sedimentgesteine studiert werden.

Als allererster forderte WICKMANN (1948) den Einsatz von natürlich radioaktiven Isotopen mit dem Vorschlag, die durch den Zerfall von  $^{87}\text{Rb}$  im Laufe der Erdgeschichte

ansteigenden  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse im Meerwasser mittels mariner Karbonate zu messen und so diese Karbonate zu datieren. Dieser Anstieg erwies sich später viel komplizierter als ursprünglich angenommen und führte vorerst zu keinem Erfolg (siehe Kap. 3.1.).

Die erste praktische Anwendung in Sedimenten führten CORMIER et al. (1956) bei der Datierung von Glaukoniten durch.

Umfangreiche Pionierarbeit wurde von HURLEY durchgeführt, aber erst in den siebziger Jahren entwickelte die Strasbourger Gruppe um BONHOMME und CLAUER auch die mineralogischen Kriterien für einen interpretierbaren Einsatz von K-Ar- und Rb-Sr-Isotopen in Sedimenten. Nähere Daten über die Erforschungsgeschichte findet man bei FAURE (1977) und CLAUER (1982).

## 2. Herkunft der Sedimente

Um Abtragungsgebiete und deren Alter zu rekonstruieren, eignen sich nur unverwitterte, zentrale Teile von Geröllen aus Gesamtgesteinen oder gegen Verwitterung und diagenetische Umwandlungen resistente Minerale mit möglichst hohem K-Gehalt oder hohem Rb/Sr-Verhältnis. Während niedrige K-Gehalte und Rb/Sr-Verhältnisse die Fehlermöglichkeiten erheblich erhöhen, bewirken oft schon geringe Verwitterungsanzeichen, besonders bei der Rb-Sr-Methode, verjüngte und geologisch unsignifikante Alter.

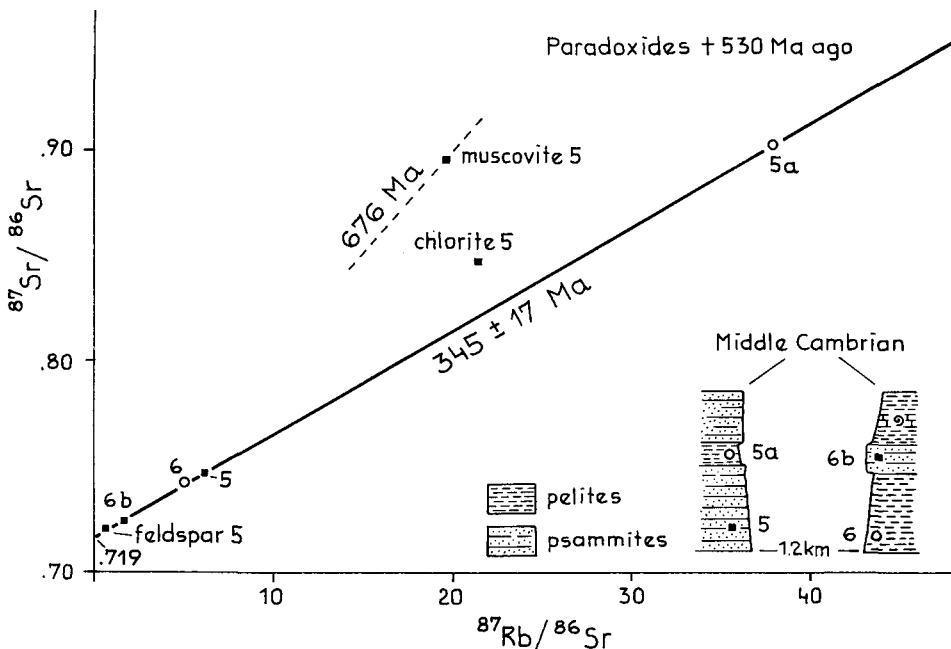


Abb. 1: Rb-Sr-Entwicklungsdiagramm von mittelkambrischen Tonschiefern und Psammiten im Süden der Montagne Noire nach GEBAUER und GRÜNENFELDER (1974, Abb. 3), das detritische Modellalter des Muskovits wurde mit einem angenommenen Initial von 0.708 berechnet.

GEBAUER und GRÜNENFELDER (1974) analysierten aus einer schwach metamorphen psammitischen Serie des Mittelkambriums in der französischen Montagne Noire grobe detritische Chlorite und Muskovite. Die detritischen Chlorite wurden durch die schwache variszische Metamorphose verjüngt, während die gegen Verwitterung und Metamorphose stabilen Muskovite die Herkunft aus im Untergrund bekannten cadomisch geprägten Serien bekunden (Abb. 1).

Analytisch schwieriger ist die Herkunftsbestimmung von Flußquarzen, da Rb und Sr nur in geringsten Spuren enthalten sind. POWERS et al. (1979) analysierten Flußquarze von einem präkambrischen Granit (S. Dakota) und erhielten trotz der geringen Rb-(0,3—6,8  $\mu\text{g/g}$ ) und Sr-(0,2—2,0  $\mu\text{g/g}$ ) Gehalte ein Alter, das dem Gesamtgesteinsalter des Granits nahezu ident ist.

Quarze aus länger verwittertem Grus zeigen Lösungs- und Wiederausscheidungsphänomene auf den Kornoberflächen und ergaben stark streuende Modellalter, jünger als das vorhin erwähnte Gesamtgesteinsalter. Künstliche Abrasion und Säurelaugung könnten auch diese Quarze zur Datierung geologisch signifikanter Alter geeignet machen.

Eine ähnliche Methode der Herkunftsbestimmung stellten TAYLOR und FAURE (1981) mit der Datierung von Feldspäten aus Tilliten vor. Zur Entscheidung, ob die glazialen Spät-Wisconsin-Ablagerungen im Mittelwesten der Vereinigten Staaten mehr von der Superior-Provinz (2,70 Ga) oder von der Greenville-Provinz (1,07 Ga) stammen, wurden Rb-Sr-Analysen an mit Säure gewaschenen Feldspat-Konzentraten in Sandkorngröße (63—1000  $\mu\text{m}$ ) durchgeführt. Die Herkunftsmischalter steigen von E (1,2 Ga) nach W (1,8 Ga) an, was auf einen erhöhten Anteil der Feldspäte aus der Superior-Provinz schließen läßt.

Als schwierig und zeitaufwendig werden die Möglichkeiten erachtet, durch Rb-Sr-Isochronen rein detritischen Sedimentmaterials auf initiale  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse des Herkunftsgebiets zu schließen. Zu viele Fehlermöglichkeiten, wie Mischungen aus verschiedenen Herkunftsgebieten und zu große Streuung der analytischen Punkte können die Ermittlung dieser Verhältnisse verhindern oder uninterpretierbar machen.

## Zusammenfassung

Bei weitem erfolgversprechendst und vielfach angewandt sind Gesamtgesteinsanalysen an unverwitterten internen Teilen von Geröllen oder an verwitterungs- und gegen diagenetische Umkristallisation resistenten Hellglimmern. Hohe K-Gehalte oder Rb/Sr-Verhältnisse in den Geröllen erlauben es, die Fehlermöglichkeiten eines sekundären Austausches oder meßtechnischer Art erheblich zu reduzieren. Große Altersunterschiede ( $> 50$  Ma) oder große Unterschiede in den Rb/Sr-Verhältnissen der in Frage kommenden Herkunftsgebiete sind von Vorteil, da ansonsten komplizierte Mischungsverhältnisse von detritischem Material diese Unterscheidung unmöglich machen könnten.

Bisweilen sind gut abraisierte Quarze, trotz geringer Rb-Sr-Gehalte, zur Herkunftsdatierung geeignet und im Fall von Tilliten sind auch große Feldspatkonzentrate verwitterungsresistent und deren Daten interpretierbar.

Initiale  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse von Herkunftsgebieten über Isochronen von rein detritischem Material zu erzielen, ist arbeitsintensiv und risikoreich.

Für Geröllgesamtgesteinsanalysen und Hellglimmer ist die K-Ar-Methode mangels der Probleme einer genügend großen Verteilung der Rb/Sr-Verhältnisse und im Falle der Hellglimmer einer fiktiven Annahme eines  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Initials rascher und einfacher einsetzbar. Alle anderen oben erwähnten Möglichkeiten wurden bisher nur mit der Rb-Sr-Methode erfolgreich durchgeführt.

### 3. Stratigraphisch-digenetische Alter von Sedimentgesteinen

Als stratigraphisches Alter wird der Zeitpunkt der Sedimentation angesehen, während man unter diagenetischem Alter den Zeitpunkt versteht, an dem der diagenetische Austausch beendet ist und die einzelnen Minerale als geschlossenes System angesehen werden können. Das kann sehr rasch nach der Sedimentation, aber insbesondere bei Tongesteinen oft erst nach 30—50 Ma der Fall sein (GARRELS und MACKENZIE, 1974).

#### 3.1. Marines Strontium-Geochronometer

Seitdem PETERMANN et al. (1970) demonstrierte, daß die Sr-Isotopenzusammensetzung im Meerwasser über das Phanerozoikum entgegen den Voraussagen von WICKMAN (1948) erheblich variiert, haben in letzter Zeit FAURE (1982) und BURKE et al. (1982) diese Kurve (Abb. 2) mit vielen Daten aus der Literatur und mit vielen Neuergebnissen wesentlich verfeinert. Diese zeitabhängige Variation der  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse des marinen Sr erlaubt, ähnlich wie die S-Isotopen in Sulfaten, zwei Anwendungen: (1) Die Unterscheidung mariner oder nichtmariner Zusammensetzung von Karbonaten bekannten Alters oder (2) die zeitliche Einordnung nachweislich mariner Karbonate.

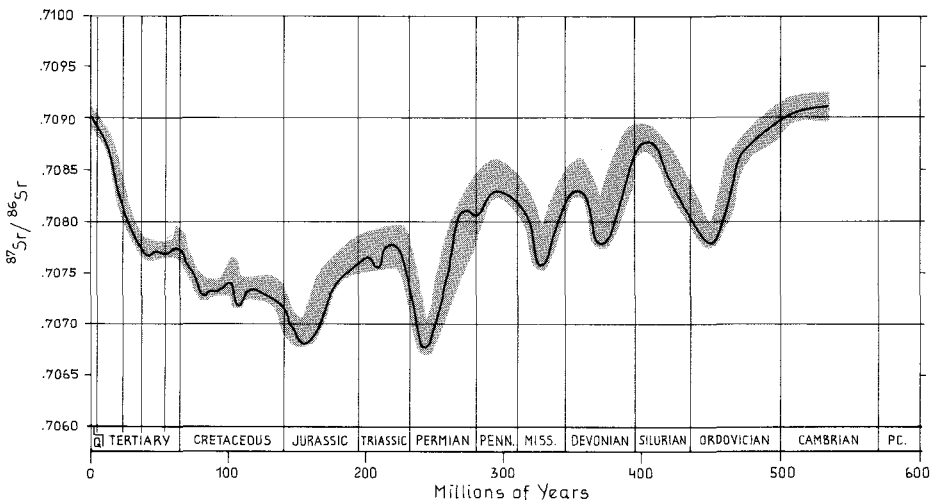


Abb. 2: Kurve der Meerwasser- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse während des Phanerozoikums, gemessen an 744 marinen Karbonaten nach BURKE et al. (1982, Abb. 1).

Rekristallisation durch schwache Metamorphose oder Laugung von  $^{87}\text{Sr}$  aus dem unlöslichen Rückstand durch Karbonate die ebenfalls  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse höher als zeitgleiches Meerwasser erzeugen können, sollen durch Mikroskopie, Illitkristallinitätsmessungen und durch Verwendung rückstandsarmer und Sr-reicher Karbonatgesteine ausgeschlossen werden. Kalksteine sind Dolomitgesteinen vorzuziehen, da sie normalerweise höhere Sr-Gehalte aufweisen.

Bei gegebener mariner Herkunft offeriert die  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Datierungsmethode wegen zahlreicher Fluktuationen der Sr-Isotopenkurve zwar keine eindeutige Lösung, doch ermöglicht sie in vielen Fällen eine nähere Eingrenzung des zu erwartenden Alters.

### 3.2. Stratigraphisch-diagenetische Alter von Gesamtgesteinen, Tonfraktionen, Zeolithen und Hornsteinlagen

Die Interpretation von CORDANI et al. (1978), die Rb-Sr-Gesamtgesteinsanalysen von feinklastischen Tongesteinen als stratigraphische Alter zu sehen, geht auf folgende Annahme zurück: Die etwas gröberen detritischen Minerale seien in der diagenetisch verjüngten Matrix so homogen verteilt, daß zur Zeit der Ablagerung mehr oder minder gleiche  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse vorherrschen. Dies mag in einigen Fällen richtig sein, erklärt aber nicht die Streuung in vielen Gesamtgesteinsuntersuchungen (CLAUER, 1982). Trotz dieser Vorbehalte kann die Gesamtgesteinsmethode als erste rasche Orientierung in Gebieten mit großen stratigraphischen Unsicherheiten wie z. B. im Präkambrium oder unter Umständen zur Datierung maximaler stratigraphischer Alter in ganz schwach metamorph überprägten Tongesteinen dienen.

Wesentlich für die Datierung diagenetischer Alter ist die Abtrennung authigener neugebildeter oder durch Ionenaustausch mit den Porenwässern aggradierter Tonminerale (MILLOT, 1978). Vorteilhaft ist die Zentrifugenseparierung zweier Fraktionen  $< 2\ \mu\text{m}$  (z. B.  $< .4$ — $.8\ \mu\text{m}$ ) unter der Berücksichtigung, daß es sich um plättchenförmige Minerale handelt. Da die Absinkgeschwindigkeit eines plättchenförmigen Minerals 2- bis 3mal langsamer ist (LERMAN, 1979) als eines kugelförmigen Minerals gleicher Dichte, kann eine „sogenannte Fraktion“  $< 2\ \mu\text{m}$  detritische Kristalle bis  $4$ — $6\ \mu\text{m}$  Durchmesser beinhalten.

Natürlich sollen röntgenographisch zumindest die semiquantitative Mineralzusammensetzung, die Illitkristallinität und Illitmodifikationen bestimmt werden (CLAUER, 1982). Mit diesen Methoden können jedoch kleinere detritische Anteile nicht mehr nachgewiesen werden, die bei großen ererbten radiogenem  $^{40}\text{Ar}$  oder  $^{87}\text{Sr}$  die Alter merklich erhöhen können. Wenn jedoch die Alter der beiden oben erwähnten Fraktionen  $< 2\ \mu\text{m}$  im Meßfehlerbereich übereinstimmen, kann das als Hinweis gewertet werden, daß kein größerer detritischer Anteil mehr in den Fraktionen zu erwarten ist.

Kaolinite sind im marinen Milieu nie authigen gebildet, während Feldspäte authigen gebildet werden können, aber häufig detritische Kerne besitzen.

Feinfraktionen von Fithian Illit, der Typlokalität, an der erstmals der Begriff Illit geprägt wurde, zeigen, daß durch Laugung von Karbonat Spuren mit verschiedensten Reagenzien ( $1\ \text{NHCl}$ , EDTA und Ionenaustauscher Amberlite) eine nahezu konkordante Übereinstimmung im stratigraphischen Alter (Stefan, 296—286 Ma, HARLAND et al., 1982) und errechnetem Alter  $284 \pm 8\ \text{Ma}$  (Abb. 3, KRALIK, in Vorbereitung) erzielt wurde. Vermutlich ist das diagenetische Alter noch etwas jünger, da in den analysierten Fraktionen noch Spuren von (detritischem) 2 M Illiten zu finden sind.

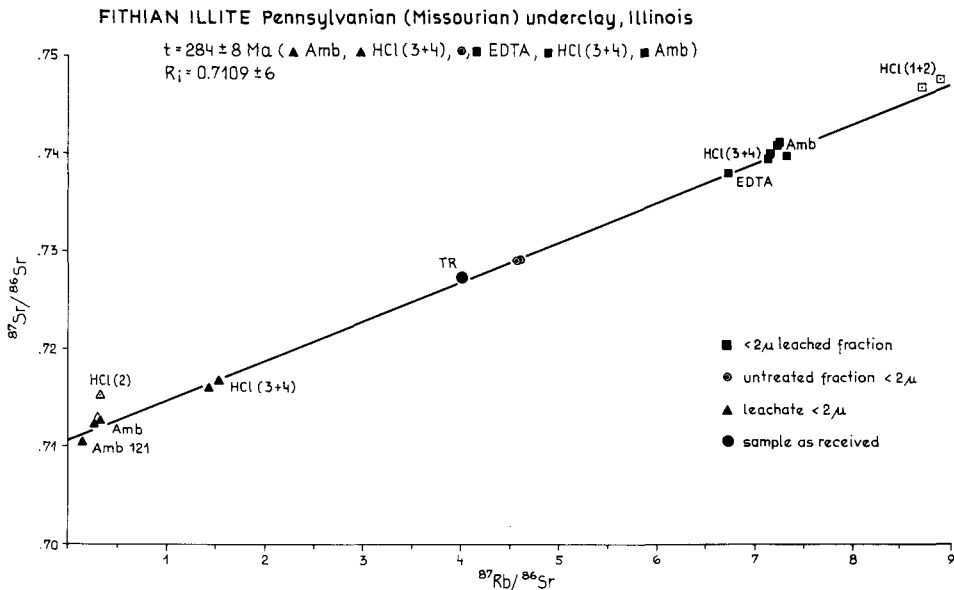


Abb. 3: Rb-Sr-Entwicklungsdiagramm der Fithian Illit Fraktionen (<2 $\mu\text{m}$ ). Die Fraktionen wurden mit 1NHCl, EDTA und Ionenaustauscher gelaugt und der gelaugte Rückstand (■), die unbehandelte Fraktion (○) und die gelaugte Fraktion (△) wurden auf Rb-Sr analysiert.

Weiters kann durch die Anwendung der vorhin erwähnten Laugungstechniken das Karbonat weggelöst werden und als repräsentativ für das  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis im Bildungsmilieu gemessen werden. Beim Beispiel des oberkambrischen Pomegranate-Kalksteins im Georgina-Becken (Australien), gruppieren sich die analysierten Fraktionen entlang zweier Isochronen mit errechneten Altern von  $506 \pm 16 \text{ Ma}$  und  $519 \pm 6 \text{ Ma}$  (Abb. 4). Wobei letztere durch die feinsten Fraktionen (0,4–2 $\mu\text{m}$ ) gebildet wird und durch die Karbonatpunkte im Ursprung läuft, die ungefähr dem kambrischen Meerwasser entsprechen und daher als authigen gebildet interpretiert werden können. Die obere Isochrone wird von größeren Fraktionen (2,5–5 $\mu\text{m}$ ) gebildet und scheint einen mehr oder minder konstanten Anteil an detritischem Material einzuschließen, der sich in dem erhöhten Initial von  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7204$  äußert. Da das O. Kambrium von 530–505 Ma (HARLAND et al., 1982) angenommen wird, entsprechen die beiden Alter mehr oder minder dem stratigraphischen Niveau (KRALIK, in Vorbereitung).

Die Schwierigkeiten, eine vollständige und gleichzeitige Homogenisierung zu prüfen und die damit verbundenen Fehlerbereiche (mind.  $\pm 5 \%$ ) lassen diese Methode nicht mit einer paläontologischen Stratigraphie konkurrenzieren, doch bei Ermangelung von Fossilien können diagenetische Alter in einem größeren Rahmen Hinweise auf das Alter der Ablagerung geben. Überdies können bei bekanntem Alter vorsichtige Angaben über die Dauer der Diagenese gemacht werden.

Kürzlich berichtete CLAUER (1982) über die Datierung von Zeolithen in mittlereozänen ( $42 \pm 3 \text{ Ma}$ ) Sedimenten, wobei er das Rb-Sr-Alter von 15 Ma als das Ende der diagenetischen Umwandlung interpretiert.

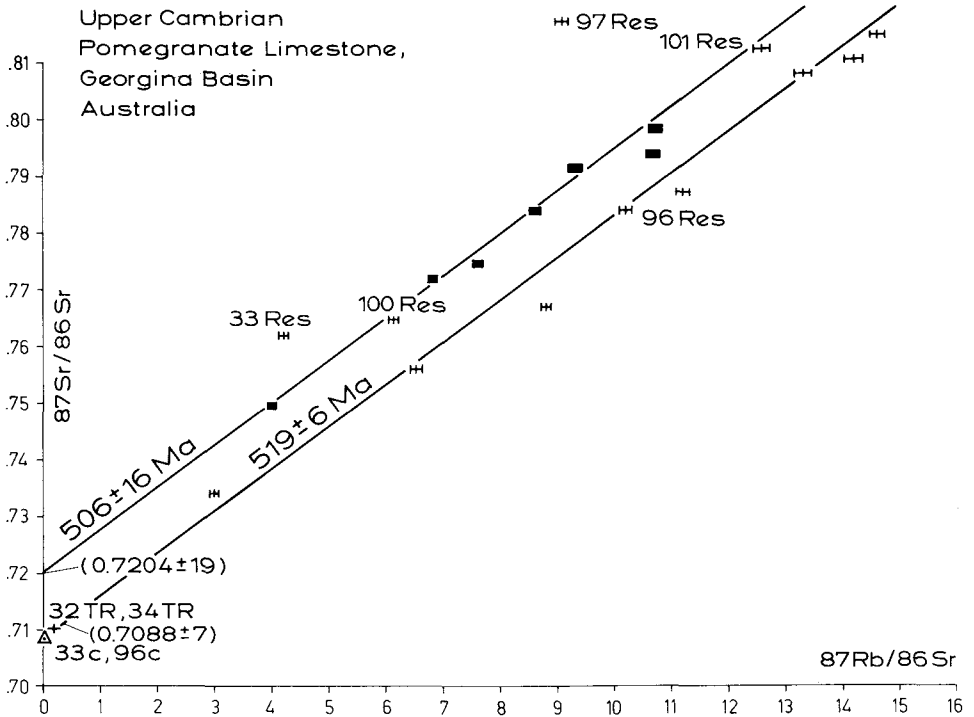


Abb. 4: Rb-Sr-Entwicklungsdiagramm der aus dem Pomegranate-Kalkstein separierten Feinfraktionen. Die untere Trendlinie wird von Fraktionen 0,4–2  $\mu\text{m}$  und die obere Trendlinie von Fraktionen 2,5–5  $\mu\text{m}$  gebildet. Res symbolisiert die Gesamttrückstände.

Hornsteinlagen oder „cherts“ wurden von BRUECKNER und SNYDER (1979) mit Rb-Sr-Isotopen datiert. Die Autoren erhielten zu hohe Alter aufgrund eingeschlossener detritischer Mineralien.

BONHOMME (1982) und CLAUER (1979, 1981, 1982) geben weitere detaillierte Hinweise für die Datierung von Gesamtgesteinen, Tonfraktionen und Zeolithen.

#### Zusammenfassung:

Für Tongesteinsproben, die nur in einem sehr weitgesteckten stratigraphischen Rahmen eingeordnet werden können, sind Rb-Sr-Gesamtgesteinsanalysen eine schnelle Methode, Altershinweise zu bekommen. Für Datierungen in einem engeren stratigraphischen Bereich sind sie jedoch mit besonderer Vorsicht zu interpretieren.

Ton- und Karbonatgesteinsproben für die Datierung stratigraphischer Alter sollen:

- 1) nach eventuellem Abgraben der obersten verwitterten Partien möglichst groß (1–3 kg) gewählt werden, um im Labor Klutzementierung und jegliche Verwitterungsanflüge eliminieren zu können;
- 2) feinkörnig-mikritisch und nicht rekristallisiert sein;
- 3) frei von tektonischer Deformation und frei von offensichtlich detritischen Mineralien (glitzernde Glimmerplättchen, Feldspat- und Quarzanreicherungen) sein;

- 4) von zwei Feinfraktionen (z. B. 0,4, 0,4—0,8  $\mu\text{m}$ ) separiert werden und diese röntgenographisch zur Datierung ausgewählt werden (kein Kaolinit, nur 1M Illite mit diagenetischen Illitkristallinitäten).

Zeolithe und Hornsteinlagen können unter Umständen zur Datierung stratigraphisch-diagenetischer Alter geeignet sein, doch fehlt es noch an ausreichender Erfahrung.

### 3.3. Stratigraphisch-diagenetische Alter an glaukonitischen Mineralien

Einleitend sei zur Begriffserklärung zu erwähnen, daß ODIN (1982, S. 387) für jede Form von granularem, grünem Pigment, das auch eine Reihe nicht glaukonitischer Minerale enthält, als eine Art Faziesbegriff den Ausdruck „Glaucony“ verwendet.

Glaukonitische Mineralien haben als Endglieder glaukonitischen Smektit und glaukonitischen Glimmer, auf den der eigentliche Begriff Glaukonit beschränkt bleibt.

Der zu datierende Horizont sollte sedimentologisch gut untersucht sein und in vertikaler Abfolge und in lateraler Erstreckung (bis km) beprobt werden, um davon die geeignetsten glaukonitischen Minerale für die Messung auszusuchen. Es sollten nur Horizonte beprobt werden, die reich an meist dunkelgrünen Körnern sind, da die Chance hier am größten ist, gut entwickelte und K-reiche glaukonitische Körner zu erhalten, die für die Datierung geeignet sind. Horizonte mit nur wenig Glauconies sind meist entweder schlecht entwickelt und K-arm oder umgelagert.

Glauconies sind sehr anfällig gegenüber Verwitterung, daher muß man besonders in Sandsteinen tief graben, bis nur mehr dunkelgrüne Körner ohne bräunliche Verwitterungsanflüge zu beobachten sind. Glauconies in Karbonaten sind verwitterungsbeständiger.

100 g Glauconies, aber mindestens 15 g werden als ausreichend angesehen, einen Horizont zu repräsentieren. Das bedeutet in den meisten Fällen ein paar kg Gesteinsprobenmaterial.

Die Separierungs- und Datierungsmethodik wurde detailliert von ODIN (1982) beschrieben. Für die Rb-Sr-Datierung sind karbonatische Proben zu bevorzugen, da am Karbonat das initiale  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis des Bildungsmilieus gemessen werden kann.

ODIN (1982, S. 308 und 751) datierte zwei Proben von oberkretazischen Glaucony-Horizonten des Molasseuntergrundes in den ÖMV-Bohrungen bei Porrau und Staatz (Niederösterreich). Die etwas zu jungen Alter wurden als durch Überlagerung von mehr als 1500 m und durch tektonisierenden Einfluß der Faltung interpretiert. Im Gegensatz dazu ergab eine Oberflächenprobe eines Glaucony-Kalksteins (Typlokalität der Klementerschichten) ein konkordantes stratigraphisches Alter des Coniac ( $86,8 \pm 3,3$  Ma).

#### Zusammenfassung:

Die zur Datierung ausgewählten Glauconygesteine sollen:

- 1) geringmächtig überlagert und nicht tektonisiert sein;
- 2) dunkelgrüne Glauconies in hoher Konzentration besitzen und frei von braunen Verwitterungsanflügen sein;
- 3) bevorzugt karbonatisch sein;
- 4) in Mengen von mehreren kg in vertikaler und lateraler Richtung (100te m bis km) über und im zu datierenden Horizont aufgesammelt werden.

ODIN (1982) erzielte raschere und besser interpretierbare Ergebnisse mit der K-Ar-Methode. Für die Rb-Sr-Datierung sind Glauconies in Karbonaten vorzuziehen.

#### 4. Postdiagenetische Einflüsse auf Sedimentgesteine

##### 4.1. Schwache Metamorphose

Schwächste regionalmetamorphe (anchizonale) Einflüsse, die meist ohne geschulten Blick feldgeologisch nicht erkannt werden, kann in Feinfraktionen ( $< 2\mu\text{m}$ ) von Tongesteinen und Karbonaten und bei Erreichen der Grünschieferfazies sogar dementsprechend in feinkörnigen Gesamtgesteinen einen isotopen-geochemischen Austausch verursachen.

AHRENDT et al. (1978) berichtete über K-Ar-Datierungen an Feinfraktionen ( $< 2\mu\text{m}$ ) von anchizonal-metamorphen Tonschiefern und Tuffiten im Rheinischen Schiefergebirge im Bereich von 300—315 Ma. Aufgrund des niedrigen Metamorphosegrades wurde angenommen, daß die Datierung kein Abkühlalter, sondern das Alter des Höchststandes der Metamorphose bedeutet. In ähnlicher Weise verwendeten CLAUER und KRÖNER (1979) K-Ar und Rb-Sr an Feinfraktionen anchizonaler Tonschiefer im Damara Belt (S-Afrika). Das erste metamorphe Ereignis wurde mit beiden Methoden übereinstimmend mit 535 Ma datiert. Sie argumentieren aufgrund früherer Erfahrungen, daß bei Temperaturen von über  $250^\circ\text{C}$  und weniger als 1 kbar die Feinfraktionen normalerweise völlig equilibrieren.

Vielfach gehen schwache Regionalmetamorphosen zwischen Anchi- und Epizone (Grenze Prehnit-Pumpellyit-Fazies) wie auch in den beiden oberen Beispielen mehr oder minder zeitgleich mit tektonischer Deformation (Faltung, Schieferung, Überschiebung) Hand in Hand, so daß zum Teil auch gröbere Korngrößen austauschen können, wie im Beispiel der mittelmkambrischen Zone am Südrand der Montagne Noire (Abb. 1). Die Ton- und Siltgesteine dieser anchimetamorphen Übergangszone zeigen Anzeichen der Schieferung und Faltung. Da nach GEBAUER und GRÜNENFELDER (1974) der Anteil der detritischen Glimmer in den Tonschiefern verschwindend klein ist, fällt das Alter von  $345 \pm 17$  Ma mit dem der angenommenen Überschiebung und Faltung zwischen dem O. Visé und Stefan (352—286 Ma, HARLAND et al., 1982) zusammen.

BONHOMME et al. (1980) beobachtete, daß schwach metamorphe ophiolitische Rollstücke in einem oligozänen Becken bei Barrême (französische Alpen) K-Ar-Alter von 37—34 Ma ergeben, jedoch Radiolaritgerölle, die Phengite einschließen, in einem  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ — $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Diagramm auf eine  $85 \pm 3$  Ma Isochrone fallen. Es wird angenommen, daß aufgrund der eigenartigen mineralogischen Eigenschaften der Proben die Phengite in den Radiolariten die zweite Metamorphose als geschlossenes System überdauerten.

Die schwache Metamorphose im Grenzbereich Anchi-Epizone an der Basis der Nördlichen Kalkalpen (O. Wildschönauer Schiefer-Permo-Skyth) wurden im Salzburger Bereich mit der K-Ar- und Rb-Sr-Methode als unterkretazisch datiert (KRALIK, 1983).

#### 4.2. Datierung von tektonischen Ereignissen

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, interferieren viele in der Literatur bekannten Daten, die als Alter eines tektonischen Ereignisses interpretiert werden, mit schwach regionalmetamorphen Temperaturerhöhungen.

Erste Versuche, Altersangaben von der polyphasigen Deformation in „Schistes Lustrés“ der französischen Alpen zu erhalten, wurden von LIEWIG et al. (1981) unternommen. Sie basieren auf der Annahme, daß bei Temperaturen knapp unter der Schließungstemperatur zusätzliche penetrative Deformation einen verbesserten Isotopenaustausch der Phengite bewirkt.

Es konnten zwar die strukturell erkannten Phasen nicht altersmäßig aufgelöst werden, aber nach genauen strukturellen und petrographischen Studien und gezielter Separation wurden zwei Trendlinien im  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ — $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Diagramm mit Altern von 58—54 Ma und 50—49 Ma als zwei Phasen-Verhalten der Phengite zur Deformation interpretiert.

Sehr wenig Information liegt über die Datierung von Störungen vor. Soweit dem Autor bekannt, versuchten erstmals LYONS und SNELLENBURG (1971) mit der K-Ar-Methode Störungsbeläge in Graniten und Monzoniten aus New Hampshire zu datieren. Sie gehören einem S-streichendem Störungssystem von 100 km Länge und 18 km Breite an, das über Massachusetts nach Connecticut reicht. Die „ $< 2\mu$ “-Fraktionen dieser Störungsbeläge bestehen hauptsächlich aus 1 Md Illiten, Smektiten, wenig Chlorit und Quarz und Spuren von Kaolinit. Die Alter von drei Störungen (7 Messungen) schwanken einheitlich um  $163 \pm 4$  Ma. Die Autoren heben hervor, daß damit eine Methode gefunden wurde, mit der man über Tonkluftbeläge eine gute Approximierung für das Alter der letzten Bewegungen an mit Illitbelägen ausgekleideten Störungsoberflächen erhält.

Die Schlußfolgerung der beiden Autoren scheint insofern etwas zu optimistisch, als sie mögliche spät-hydrothermale Aktivitäten völlig außer acht lassen. KRÁLIK (1982b) untersuchte ebenfalls mit der K-Ar-Methode die unlöslichen Feinfraktionen 0,1—4 und 4—8  $\mu\text{m}$  von drei Proben in und um die Pailwandstörung (SE Abtenau, Salzburg), die bunten Hallstätter Kalk zerschert. Die herausgelösten Fraktionen bestehen fast durchwegs aus 2 M Illiten und ergeben das recht einheitliche Alter von 106—99 Ma in der Störung selbst, aber die dritte Probe außerhalb der Störungszone weist bloß von der schwachen Regionalmetamorphose beeinflusste Mischalter (177—151 Ma) auf. Diese Zerschierung des Hallstätter Kalks wird im Zusammenhang mit gleichzeitiger Deckenüberschiebung und Frühalpiner Metamorphose gesehen.

#### Zusammenfassung:

Anchimetamorphe Überprägung von Sedimentgesteinen kann häufig makroskopisch nur schwer erkannt werden und sollte daher durch die relativ raschen Illitkristallinitätsmessungen (KÜBLER, 1968) an Hand der separierten Feinfraktionen bestätigt werden. Für die Datierung von schwacher Metamorphose und tektonischer Deformation gelten im übrigen dieselben Auswahlkriterien wie für die stratigraphisch-diagenetische Datierung mit Ausnahme von Rekristallisation und tektonischer Deformation der Proben.

Noch unausgereift sind die Versuche über Phengite, die Metamorphosetemperaturen knapp unter ihrer Öffnungstemperatur unterworfen wurden und nur durch zusätzliche penetrative Durchbewegung weitgehend ihr radiogenes  $^{40}\text{Ar}$  verlieren, auf das Alter der Deformation zu schließen.

Obwohl erst einige wenige Daten vorliegen, kann die K-Ar-Datierung als erfolgversprechend für die Erfassung von tektonischer Störungsaktivität erachtet werden. Voraussetzung ist die Separierung von Feinstfraktionen von unverwitterten, gezielt entnommenen Kluftbelägen oder sonstigen intensiv deformierten Störungsbereichen.

In den meisten Fällen dürfte für die Datierung der schwachen Metamorphose und tektonischer Ereignisse aufgrund rascherer Handhabung und höherer Temperatursensitivität die K-Ar-Methode vorzuziehen sein.

## 5. Hydrothermale Lagerstätten

Hydrothermale Mineralisationen sind häufig von Tonmineralneubildungen, Feldspatisierung oder Silifizierung des unmittelbaren Nebengesteins gekennzeichnet. Von den vorliegenden Datierungsversuchen an Feldspäten und Tonmineralien, die bislang durchgeführt wurden, sollen nur zwei herausgegriffen werden.

(1) HALLIDAY (1980) datierte Feldspäte in unmittelbarer Verwachsung mit Sulfidvererzungen aus Spaltenfüllungen des SW Cornwall Granitkomplexes.

Rb-Sr-Modellalter variieren von 279—269 Ma und sind daher ungefähr 20 Ma jünger als das Aufdringen des Plutons (ca. 295 Ma) und ungefähr 10 Ma jünger als die Bildung der zinnvererzten Pegmatite (ca. 285 Ma).

K-Ar-Alter von denselben K-Feldspatproben streuen zwischen 244—212 Ma. Diese Alter korrelieren negativ mit der Triklinität, wie sie intermediären bis maximum Mikroklinen entspricht. Dem Autor zufolge wird die strukturelle Ordnung der Feldspäte durch hydrothermale Lösungen und nicht durch einfaches Abkühlen der Granite bewirkt.

(2) Kürzlich erhielt BONHOMME et al. (1983) an Tonen und an einer Silifizierung (Gatuzieres) im Zusammenhang mit verschiedensten Gangvererzungen K-Ar-Alter zwischen 190—170 Ma (Abb. 5). Die roten und grünen Tone bilden letzte Hohlraumausfüllungen und cm-dicke plastische Tone zwischen Mineralisation und Nebengestein. Die Feinfraktionen bestehen nur aus 1 M Illit (abnormal hohe Cr-, Cu- und relativ niedrige Ti-Gehalte), etwas Chlorit und „mixed layer“-Minerale. Das Alter von 190—170 Ma entspricht dem Zeitraum des Öffnens des Atlantiks und die Mineralisation wird daher im Zusammenhang mit dieser Dehnungsphase interpretiert.

### Zusammenfassung:

Zur Datierung eignen sich Feinfraktionen von Tonbelägen, Silifizierungen und Feldspäte, die unmittelbar mit der Vererzung in Beziehung stehen und keiner Verwitterung ausgesetzt waren. Bei höher thermalen Einflüssen könnten auch Feinfraktionen des veränderten Nebengesteins den Zeitpunkt des Endes der hydrothermalen Aktivität fixieren.

Wichtig sind zusätzliche chemische (z. B. hohe Cr-, Cu- und niedrige Ti-Werte) und röntgenographische Analysen, um den hydrothermalen Charakter der untersuchten Tone und Feldspäte nachzuweisen.

Für hydrothermal beeinflusste oder gebildete Feldspäte sind sicher Rb-Sr-Isotopenuntersuchungen vorzuziehen. In den meisten anderen Fällen gibt es noch zu wenig Untersuchungen, um eine Empfehlung auszusprechen.

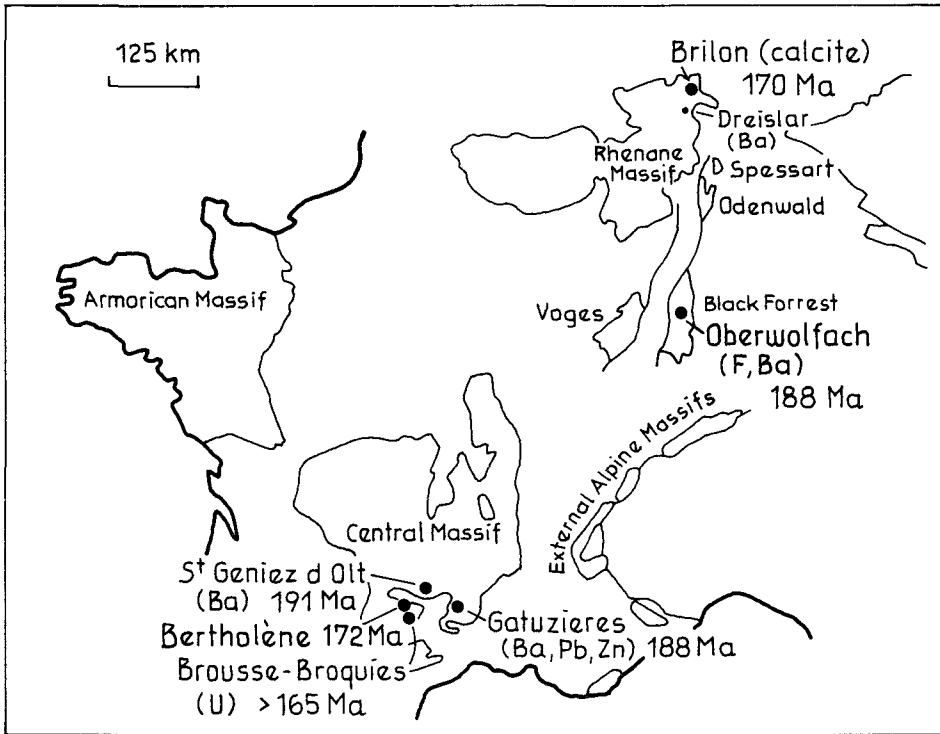


Abb. 5: Lagerstätten und K-Ar-Alter von hydrothermal beeinflussten Tonfraktionen nach BONHOMME (1983, Abb. 1).

## 6. Erdöllagerstätten

Bislang wurden im Zusammenhang mit Erdöllagerstätten, abgesehen von der Möglichkeit, diagenetisch-stratigraphische Alter in fossilere Horizonten zu bestimmen, Isotopen für die Korrelation von Formationswässern und die K-Ar- und Rb-Sr-Methode für die Datierung von neugebildeten Tonmineralien in Speichergesteinen eingesetzt.

Aus verschiedenen Gründen wurde es immer wichtiger, die primäre und sekundäre Migrationsgeschichte von Formationswässern zu verstehen und Wässer von verschiedensten Formationen zu unterscheiden. Die Sr-Konzentration in salinen Formationswässern ist generell wesentlich höher als im Meerwasser (COLLINS, 1975) und unter den Kationen sind bloß Na und Ca häufiger, was darauf hinweist, daß dieses Element entscheidend von Prozessen beeinflusst wurde, die in der Entwicklung dieses Wassers eine wesentliche Rolle spielten.

CHAUDHURI (1978) und SUNWALL und PUSHKAR (1979) berichteten von  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen, die an Formationswässern von Erdölfeldern in Kansas, Colorado und Ohio gemessen wurden, und zwischen .7092— .7341 schwanken. Beide Autoren stimmen überein, daß die Sr-Isotopenzusammensetzung innerhalb eines Reservoirs homogen ist, während sie von einem Reservoir zum anderen wesentlich schwanken

kann, auch wenn sie in der gleichen lithologischen und stratigraphischen Formation liegen.

Während in sandigen Speichergesteinen genügend radiogenes  $^{87}\text{Sr}$  zur Verfügung steht, um einen Austausch des Formationswassers mit dem unmittelbaren Nebengestein zu vermuten, so deuten doch Formationswässer mit  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen höher ( $>0,71$ ) als ihr unmittelbares karbonatisches Speichergestein auf einen Austausch während der Migration hin.

ESQUEVIN und WALGENWITZ (1982) studierten die diagenetischen Neubildungen in einem fluviatilen U-Kreide-Sandstein Libyens. Während der ölführende Anteil des Speichergesteins keine „mixed layer“-Minerale (Illit-Smektit), sondern nur gut erhaltene Kaolinite führt, bildet der ölfreie Anteil reichlich diagenetische Illit-Smektite auf den detritischen Quarzen. Sechs Fraktionen  $<0,3\ \mu\text{m}$  ergaben konkordante K-Ar- und Rb-Sr-Alter von 59 und 56 Ma, die mit einem thermalen Ereignis mit tektonischer Aktivität und daraus folgender Lösungszirkulation im Paleozän in Zusammenhang gebracht werden.

#### Zusammenfassung:

Im Zusammenhang mit Erdöllagerstätten werden neben der diagenetisch-stratigraphischen Datierung Sr-Isotopen als „tracer“ für Zusammenhänge von Reservoirs und die K-Ar- und Rb-Sr-Methoden zur Datierung authigener Tonminerale im Zusammenhang mit Kohlenwasserstoffmigrationen verwendet.

250—500 ml Formationswasserproben sind ausreichend, um nach kurzer Zeit die Kohlenwasserstoffe obenauf schwimmen zu lassen und aus der eingedampften Wasserprobe das Sr-Isotopenverhältnis zu messen.

Um die diagenetische Neubildung in Reservoirgesteinen zu studieren, sind raster-elektronenmikroskopische Aufnahmen unerlässlich. Die diagenetischen Tonminerale sollen nur mit Ultraschall aus kleinen vorgebrochenen Sandsteinstücken gelöst und davon Fraktionen  $<0,5\ \mu\text{m}$  separiert werden. Die zu analysierenden Separate müssen nach gleichen röntgenographischen Kriterien ausgewählt werden wie bei der Datierung stratigraphisch-diagenetischer Alter.

### 7. Häufig verwendete Umrechnungsfaktoren und Standards für die K-Ar- und Rb-Sr-Methode

Die neuen von IUGS (STEIGER und JÄGER, 1977) empfohlenen Zerfallskonstanten sind für:

$$^{40}\text{K}_{\beta}\lambda = 4.962 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$$

$$^{40}\text{K}_{\epsilon}\lambda + ^{40}\text{K}_{\epsilon}\lambda' = 0.581 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$$

$$^{87}\text{Rb}\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$$

DALRYMPLE (1979) publizierte eine Tabelle, um alte K-Ar-Alter schnell auf die neuen Konstanten umrechnen zu können. Alte Rb-Sr-Alter können mit der einfachen Formel umgerechnet werden:

$$\text{Neues Alter} = \text{Altes } \lambda / (1.42 * 10^{-11}) \times \text{altes Alter.}$$

Standards	Empfohlene Werte				
	$^{40}\text{Ar}$ rad. [nl STP/g]	% K	Rb [ $\mu\text{g/g}$ ]	Sr [ $\mu\text{g/g}$ ]	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
GLO-Glaukonit	24.80 $\pm$ 20	6.56 $\pm$ 6	—	—	—
4 M Muskovit Bern	6.32 $\pm$ 7	8.70 $\pm$ 5	—	—	—
LP-6 Biotit	43.26 $\pm$ 44	8.33 $\pm$ 3	—	—	—
SRM 607 K-Feldspat	—	—	523.90 $\pm$ 1.01	65.485 $\pm$ 0.320	1.20039 $\pm$ 20
SRM 987 $\text{SrCO}_3$	—	—	—	—	0.71014 $\pm$ 20
EIMER und AMEND $\text{SrCO}_3$	—	—	—	—	0.70794

Danksagung: Meinen Kollegen sei herzlich für die Anregung gedankt. Herrn Prof. W. FRANK bin ich sehr für die Durchsicht einer früheren Version des Manuskripts verpflichtet. Das Zeichnen der Abbildungen durch Herrn LEITNER und das Maschin-schreiben durch Frau SCHNEIDER sei dankbar erwähnt.

### Literatur

- AHRENDT, H., HUNZIKER, J. C., & WEBER, K.: K/Ar-Altersbestimmungen an schwach-metamorphen Gesteinen des Rheinischen Schiefergebirges. — Z. dt. geol. Ges., 129, S. 229—247, Hannover 1978.
- BONHOMME, M. G.: The use of Rb-Sr and K-Ar dating methods as a stratigraphic tool applied to sedimentary rocks and minerals. — Precambrian Res., 18, S. 5—25, Amsterdam 1982.
- BONHOMME, M. G., SALIOT, P., & PINAULT, Y.: Interpretation of Potassium-Argon Isotopic data related to metamorphic events in south-western Alps. — Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 60, S. 81—98, Zürich 1980.
- BONHOMME, M. G., BÜHMANN, D., & BESNUS, Y.: Reliability of K-Ar dating of clays and silifications associated with vein mineralization in Western Europe. — Geol. Rdsch., 72, S. 105—117, Stuttgart 1983.
- BRUECKNER, H. K., & SNYDER, W. S.: Rb-Sr dating of chert: A potential chronological tool. — Abstr. Geol. Soc. Amer. meet., 11/3, S. 71, Boulder/Col. 1979.
- BURKE, W. H., DENISON, R. E., HETHERINGTON, E. A., KOEPNICK, R. B., NELSON, H. F., & OTTO, J. B.: Variation of seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  throughout Phanerozoic time. — Geology, 10, S. 516—519, Boulder/Col. 1982.
- CHAUDHURI, S.: Strontium isotopic composition of several oilfield brines from Kansas and Colorado. — Geochim. cosmochim. Acta, 42/3, S. 329—331, Oxford 1978.
- CLAUER, N.: A new approach to Rb-Sr dating of sedimentary rocks. — [In:] JÄGER, E., & HUNZIKER, J. C. [Hrsg.]: Lectures in Isotope Geology (30—51), Berlin 1979.
- CLAUER, N.: Rb-Sr and K-Ar dating of Precambrian clays and glauconies. — Precambrian Res., 15, S. 331—352, Amsterdam 1981.
- CLAUER, N.: The rubidium-strontium method applied to sediments: certitudes and uncertainties. — [In:] ODIN, G. S. [Hrsg.]: Numerical dating in stratigraphy (245—276), John Wiley, Chichester 1982.
- CLAUER, N., & KRÖNER, A.: Strontium and Argon homogenization of pelitic sediments during low-grade metamorphism: The Pan-african Upper Damara Sequence of Northern Namibia (South West Africa). — Earth and planet. Sci. Lett., 43, S. 117—131, Amsterdam 1979.
- COLLINS, A.: Geochemistry of oilfield waters. — 496 S., Elsevier, Amsterdam 1975.
- CORDANI, U. G., KAWASHITA, K., & THOMAZ, A.: Applicability of the rubidium-strontium method to shales and related rocks. — [In:] COHEE, G. V., GLAESSNER, M. F., & HEDBERG, H. D. [Hrsg.]: Contribution to the Geologic Time Scale 6 (93—117), Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa/Oklah. 1978.
- CORMIER, R. F., HERZOG, L. F., PINSON, W. H., & HURLEY, P. M.: Rubidium-strontium age determinations of the mineral glauconite. — Bull. amer. geol. Soc., 67, S. 1681—1682, Boulder/Col. 1956.

- DALRYMPLE, G. B.: Critical tables for conversion of K-Ar ages from old to new constants. — *Geology*, 7, S. 558—560, Boulder/Col. 1979.
- ESQUEVIN, J., & WALGENWITZ, F.: K-Ar and Rb-sr dating of reservoir illite-smectite from the Calanscio Formation (Lybia). — *Abstr. 5th inter. confer. Geochron. Cosmochron. Isotope Geol.*, Nikko National Park, Japan, 1982.
- FAURE, G.: *Principles of isotope geology*. — 464 S., J. Wiley, Chichester 1977.
- FAURE, G.: The marine-strontium geochronometer. — [In:] ODIN, G. S. [Hrsg.]: *Numerical dating in stratigraphy* (73—79), J. Wiley, 1982.
- GARRELS, R. M., & MACKENZIE, F. T.: Chemical history of the oceans deduced from post-depositional changes in sedimentary rocks. — [In:] HAY, W. W. [Hrsg.]: *Studies in paleo-oceanography* (193—204), Soc. Econ. Paleontol. Miner., Tulsa/Okl. 1974.
- GEBAUER, D., & GRÜNENFELDER, M.: Rb-Sr whole-rock dating of late diagenetic to anchimeta-morphic, Paleozoic sediments in southern France (Montagne Noire). — *Contr. Mineral. Petrol.*, 47, S. 113—130, Berlin 1974.
- HALLIDAY, A. N.: The timing of early and main stage ore mineralization in Southwest Cornwall. — *Econ. Geol.*, 75, S. 752—759, New Haven/Conn. 1980.
- HARLAND, W. B., COX, A. V., LLEWELLYN, P. G., PICKTON, C. A. G., SMITH, A. G., & WALTERS, R.: *A geological time scale*. — 131 S., Cambridge University Press, Cambridge 1982.
- KÜBLER, B.: Évaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. — *Bull. Centre Rech. Pau*, 2, S. 385—397, Pau 1968.
- KRALIK, M.: Rb-Sr age determinations on Precambrian carbonate rocks of the Carpentarian McArthur Basin, Northern Territory, Australia. — *Precamb. Res.*, 18, S. 157—170, Amsterdam 1982a.
- KRALIK, M.: Geochronologie der kretazischen Metamorphose in den Kalkalpen und der Grauwackenzone im Bereich von Bischofshofen. — *Jber. 1981 Hochschulschwerpkt.* S 15, 3, S. 9—22, Leoben 1982b.
- KRALIK, M.: Interpretation of K-Ar and Rb-Sr data of different fine fractions of weakly metamorphosed shales and carbonate rocks at the base of the Northern Calcareous Alps (Salzburg, Austria). — *Tscherm. miner. petrogr. Mitt.*, 32, S. 49—67, Wien 1983.
- LERMAN, A.: *Geochemical processes, water and sediment environments*. 481 S., J. Wiley, Chichester 1979.
- LIEWIG, N., CARON, J. M., & CLAUER, N.: Geochemical and K-Ar isotopic behaviour of Alpine sheet silicates during polyphased deformation. — *Tectonophysics*, 78, S. 273—290, Amsterdam 1981.
- LYONS, J. B., & SNELLENBURG, J.: Dating faults. — *Bull. geol. Soc. Amer.*, 82, S. 1749—1752, Boulder/Col. 1971.
- MILLOT, G.: Clay genesis. — [In:] FAIRBRIDGE, R. W., & BOURGOIS, J. [Hrsg.]: *The encyclopedia of sedimentology* (152—155), Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg/PA, 1978.
- ODIN, G. S.: *Numerical dating in stratigraphy*. — 1040 S., J. Wiley, Chichester 1982.
- PETERMAN, Z. E., HEDGE, C. E., & TOURTELOT, H. A.: Isotopic composition of strontium in seawater throughout Phanerozoic time. — *Geochim. cosmochim. Acta*, 34, S. 105—120, Oxford 1970.
- POWER, L. S., BRUECKNER, H. K., & KRINSLEY, D. H.: Rb-Sr provenance ages from weathered and stream transported quartz grains from the Harney Peak Granite, Black Hills, South Dakota. — *Geochim. cosmochim. Acta*, S. 137—146, Oxford 1979.
- STEIGER, R. H., & JÄGER, E.: Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. — *Earth planet. Sci. Letters*, 36, S. 359—362, Amsterdam 1977.
- TAYLOR, K. S., & FAURE, G.: Rb-Sr dating of detrital feldspar: A new method to study till. — *J. Geology*, 89, S. 97—107, Chicago 1981.
- SUNWALL, M. T., & PUSHKAR, P.: The isotopic composition of strontium brines from petroleum fields of southeastern Ohio. — *Chem. Geol.*, 24, S. 189—197, Amsterdam 1979.
- WICKMAN, F. E.: Isotope ratios: A clue to the age of certain marine sediments. — *J. Geol.*, 56, S. 61—66, Chicago 1948.