Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 80 (1987)

Heft: 2: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz : Symposium "Geologie der Nordschweiz"

Artikel: 87Sr/86Sr-Verhältnisse und Sr-Gehalte von Tiefengrundwässern, Mineralien sowie Gesteinen aus dem Kristallin und der Trias der Nordschweiz

Autor: Matter, Albert / Peters, Tjerk / Ramseyer, Karl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-166016

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: 13.07.2025

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

Eclogae geol. Helv.	Vol. 80	Nr. 2	Seiten 579–592	Basel, August 1987

$^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse und Sr-Gehalte von Tiefengrundwässern, Mineralien sowie Gesteinen aus dem Kristallin und der Trias der Nordschweiz

Von ALBERT MATTER[1]), TJERK PETERS[2]) und KARL RAMSEYER[1])

ZUSAMMENFASSUNG

Die Sr-Isotopenverhältnisse in Grundwässern, Gesamtgesteinen und Mineralphasen aus triadischen Sedimenten und dem kristallinen Untergrund der Nordschweiz wurden im Hinblick auf mögliche Interaktionen des Gesteins mit durchfliessenden Wässern untersucht.

Die auf Klüften im Kristallin zirkulierenden Grundwässer weisen ein $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis von 0.716 bis 0.718 auf. Diese Verhältnisse werden durch Reaktionen mit Sr-reichen, während der permischen hydrothermalen Phase gebildeten Mineralien bestimmt. Ausser zwei Kluftmineralien besitzen alle Festphasen aus dem Kristallin signifikant höhere Sr-Isotopenverhältnisse als die sie begleitenden Kluftwässer.

Die Wässer des Buntsandstein-Aquifers besitzen bei einem generell höheren Sr-Gehalt ein niedrigeres $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis als diejenigen im liegenden Kristallin. Dies deutet auf eine Entstehung der Buntsandsteinwässer durch Reaktion infiltrierender Kristallinwässer mit leichtlöslichen Festphasen des Buntsandsteins. Obwohl die Sr-Isotopenverhältnisse in Drusen- bzw. Kluftmineralien und Wässern des Buntsandsteins identisch sind, lassen die Sr-Gehalte (unter Annahme von Fraktionierungsgleichgewicht) darauf schliessen, dass die Mineralien nicht aus den heutigen Wässern auskristallisiert sind.

Die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse in den Wässern des Muschelkalks unterscheiden sich mit Werten von 0.708 bis 0.709 eindeutig von denjenigen der Buntsandstein- und Kristallinwässer. Die Sr-Isotopenverhältnisse in den Grundwässern des Muschelkalks sind jedoch signifikant höher als im Muschelkalk-Meerwasser. Sie dürften eine Reaktion mit Dolomit und kontinental beeinflussten Sulfaten widerspiegeln.

Sr-Isotopenbestimmungen an früh- und spätdiagenetischen Mineralphasen bestätigen, dass die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse in den Grundwässern während geologischer Zeiträume Schwankungen unterliegen.

ABSTRACT

In order to determine the origin of groundwaters and their interaction with the host rock, the amount and ratio of strontium isotopes in groundwaters, vein minerals, authigenic cements and whole rocks were measured in the crystalline basement and Triassic sediments of northern Switzerland.

The groundwaters in the fractured basement aquifer generally show Sr-isotope ratios that range between 0.716 and 0.718. These ratios in the groundwaters are mainly determined by reaction with Sr-rich minerals that were formed during a Permian hydrothermal event. With minor exceptions, the Sr-isotope ratios of most vein minerals are not in equilibrium with those of the present groundwaters.

The waters of the Buntsandstein aquifer are characterised by slightly lower Sr-isotope ratios and a higher Sr-content than in the corresponding basement aquifer waters. Buntsandstein waters are considered to have evolved from the waters of the basement aquifer through dissolution of calcite and sulphate present in the Buntsandstein. Although the Sr-isotope ratios in Buntsandstein vein minerals and waters are similar the relative

[1]) Geologisches Institut der Universität, Baltzerstrasse 1, CH–3012 Bern.
[2]) Mineralogisches Institut der Universität, Baltzerstrasse 1, CH–3012 Bern.

amount of Sr (assuming equilibrium partitioning) suggest these vein minerals did not precipitate from the present waters.

The much lower Sr-isotope ratio characteristic of waters in the Muschelkalk aquifer (0.708 to 0.709) readily distinguishes these from the Buntsandstein and basement waters. The low Sr-isotope ratios in the Muschelkalk waters are, however, higher than those measured from marine sulphates in the Muschelkalk, and may result from dissolution of dolomite and continental sulphates.

Measured variations in the Sr-isotope ratios of successive authigenic minerals indicate that the Sr-isotope composition in the groundwaters fluctuated through geological time.

1. Einleitung

Im Rahmen des von der Nagra durchgeführten hydrogeologischen Untersuchungsprogramms (THURY & DIEBOLD 1987) wurden zur Charakterisierung, Datierung und zur Herkunftsbestimmung der Tiefengrundwässer der Nordschweiz zusätzlich zur hydrochemischen Analyse die unterschiedlichsten Isotopenmethoden eingesetzt. Diese werden in der vorliegenden Studie durch Bestimmung der $^{87}Sr/^{86}Sr$-Zusammensetzung und des Strontiumgehalts ergänzt, welche vor allem im Hinblick auf die Wechselwirkungen zwischen Poren- bzw. Kluftwasser, Mineralien und Gesteinen wertvolle zusätzliche Informationen liefern können, wie die Untersuchungen von FRITZ (1986) an Tiefenwässern von Stripa, von MCNUTT et al. (1984) an Grundwässern im Kanadischen Schild, von KAY & DARBYSHIRE (1986) an Graniten und Thermalwässern von Cornwall oder von LAND (1980) an Porenwässern aus Kreidesedimenten von Texas belegen.

Die Verwendung des Strontium-Isotopenverhältnisses eignet sich vorzüglich, um Gleichgewichtsbedingungen zwischen Mineralphasen und Kluft- bzw. Porenwässern zu bestimmen, da das $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis im Anwendungsbereich ($T < 400\,°C$) weder temperaturabhängig ist noch durch eine Fraktionierung während der Kristallisation aus einer Lösung verändert wird. Die auskristallisierenden Mineralphasen registrieren somit das Sr-Isotopenverhältnis der Lösung. Falls keine Rekristallisation erfolgt, kann einzig der radioaktive Zerfall von ^{87}Rb zu ^{87}Sr in Mineralien, z. B. Glimmern, Illiten, Feldspäten, zu einer Veränderung des primär eingebauten Strontium-Isotopenverhältnisses führen. Dieser Effekt tritt vor allem in kristallinen und metamorphen Gesteinsserien, sowie in siliziklastischen Sedimenten auf, wo diese Minerale gewöhnlich als Hauptbestandteile vorkommen. In rubidiumfreien Mineralien wie Calcit, Dolomit und Gips/Anhydrit kann dagegen eine Veränderung des Sr-Isotopenverhältnisses nur durch Zufuhr von Strontium unterschiedlicher Isotopenzusammensetzung herbeigeführt werden.

Andererseits ist die Menge Strontium, die in Minerale wie Calcit, Dolomit, Gips und Anhydrit an Stelle des Calciums eingebaut wird, vom Konzentrationsverhältnis zu Calcium in der Lösung, der Mineralspezies, der Temperatur und der Wachstumsgeschwindigkeit des Minerals abhängig. Durch Verwendung bekannter mineralspezifischer Verteilungskoeffizienten kann, falls Bildungstemperatur und Wachstumsrate bekannt sind, der Sr-Gehalt des aus einer Lösung auskristallisierenden Minerals berechnet werden (VEIZER 1983). Durch Analyse des Sr-Gehaltes von Karbonat- und Sulfatmineralen lässt sich umgekehrt feststellen, ob diese mit dem heutigen Kluft- bzw. Porenwasser, dessen Sr-Gehalt bekannt ist, im Gleichgewicht sind. Bei der Untersuchung von Tiefengrundwässern, Mineralien und Gesteinen von Tiefbohrungen aus der Nordschweiz standen folgende Fragen im Vordergrund:

— Lassen sich die Wässer der verschiedenen Grundwasserträger mittels ihres $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisses unterscheiden?
— Sind die heutigen Kluft- und Porenwässer bezüglich ihrer Sr-Isotopenzusammensetzung sowie ihres Sr-Gehalts im Gleichgewicht mit dem Wirtgestein oder mit einzelnen Mineralien?
— Ergibt die Untersuchung der Minerale und Gesteine Anhaltspunkte über die Veränderung der $^{87}Sr/^{86}Sr$-Zusammensetzung und des Sr-Gehalts der Poren- und Kluftwässer seit der Ablagerung der Sedimente bzw. seit der Kluftbildung?

2. Methodisches

Die Proben wurden nach der von JÄGER (1962 und 1979) beschriebenen Methode aufgeschlossen und behandelt. Rb- und Sr-Isotope wurden in einem Ion-Instruments-Festkörpermassenspektrometer mit 35 cm Radius und 90° Ablenkung, auf einer 3-Band-Ionenquelle (BRUNNER 1973) gemessen. Isotopenverhältnis und Alter wurden nach dem auf der Methode von YORK (1969) beruhenden Programm von FAURE (1977) berechnet, unter Benützung der von der IUGS Subcommission on Geochronology vorgeschlagenen Werte (STEIGER & JÄGER 1977). Die Bestimmung des Strontiumgehaltes erfolgte für die Festphasen massenspektrometrisch, in kristallinen Gesteinen mit Röntgenfluoreszenz und, im speziellen Falle von Baryt, mit einer Elektronen-Mikrosonde, Typ ARL-SEMQ.

3. Geologische und hydrogeologische Situation

Die vorliegende Arbeit stützt sich ausschliesslich auf Untersuchungen ab, welche im Zusammenhang mit den von der Nagra in der Nordschweiz niedergebrachten Tiefbohrungen Böttstein, Kaisten, Leuggern, Riniken, Schafisheim und Weiach ausgeführt wor-

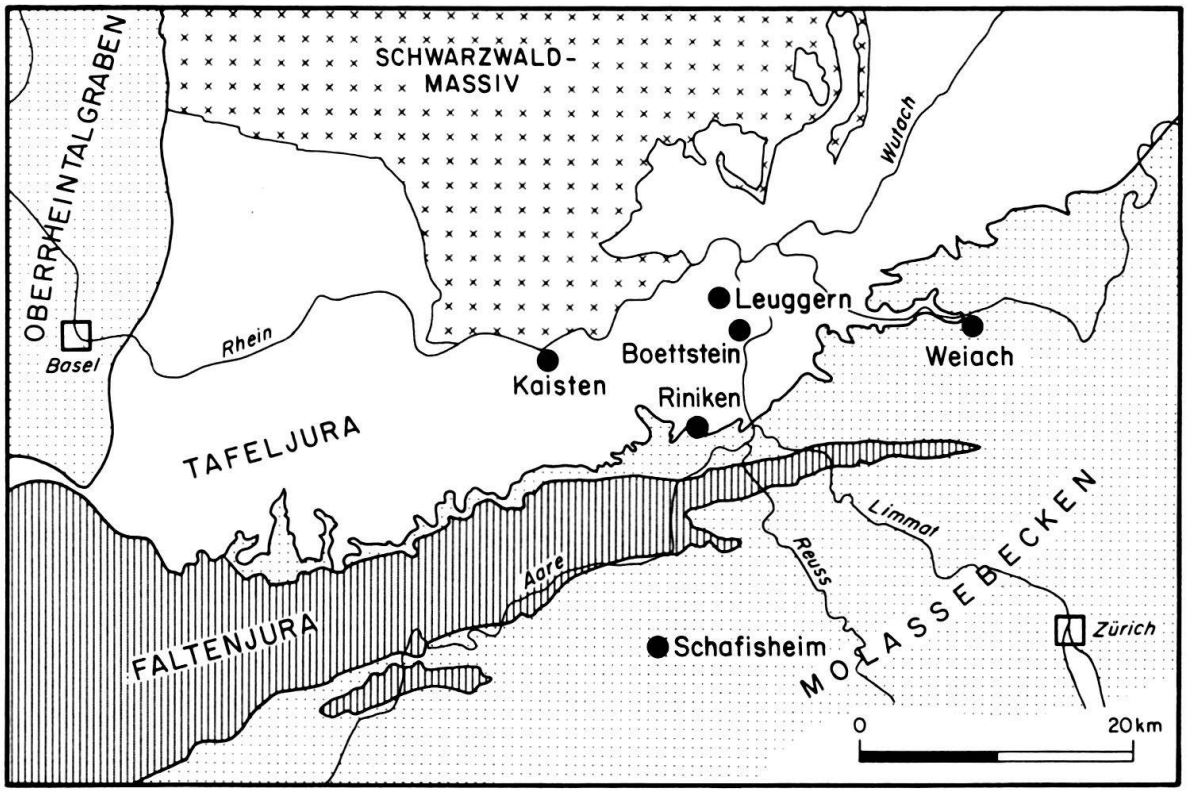

Fig. 1. Tektonische Übersicht der Nordschweiz mit Standorten der untersuchten Nagra-Tiefbohrungen.

den sind (MATTER et al. 1987a, b, c; PETERS et al. 1987a, b, c). Die beiden letzterwähnten Bohrstandorte befinden sich im Molassebecken bzw. an dessen Nordrand, die übrigen liegen im Tafeljura (Fig. 1). Hydrogeologisch dürfte von Bedeutung sein, dass die Tiefbohrung Schafisheim durch den Faltenjura von den anderen Bohrungen getrennt wird.

Das in Figur 2 dargestellte Profil zeigt schematisch die geologische Abfolge der Nordschweiz sowie die wichtigsten Aquifere und Aquitarden. Infolge der geschichteten Lagerung des Deckgebirges liegt eine Wechsellagerung von Aquiferen und Aquitarden vor. Letztere bestehen aus geringdurchlässigen Mergeln und Anhydriten, die eine mehr oder weniger vollständige Trennung der einzelnen Aquifere und eine Abschirmung gegen oberflächennahe Fließsysteme bewirken. Nach DIEBOLD (1986) führt dies zu grösseren, regionalen Grundwasserfließsystemen. Die Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit beschränken sich auf die Verhältnisse im Kristallin und der Trias und lassen die posttriadischen Formationen ausser Betracht.

Das Wirtgestein der kristallinen Grundwässer besteht aus hochmetamorphen Gneisen, ursprünglich vorwiegend sedimentärer Herkunft, die von jungvariskischen Graniten, Dioriten und Syeniten intrudiert wurden.

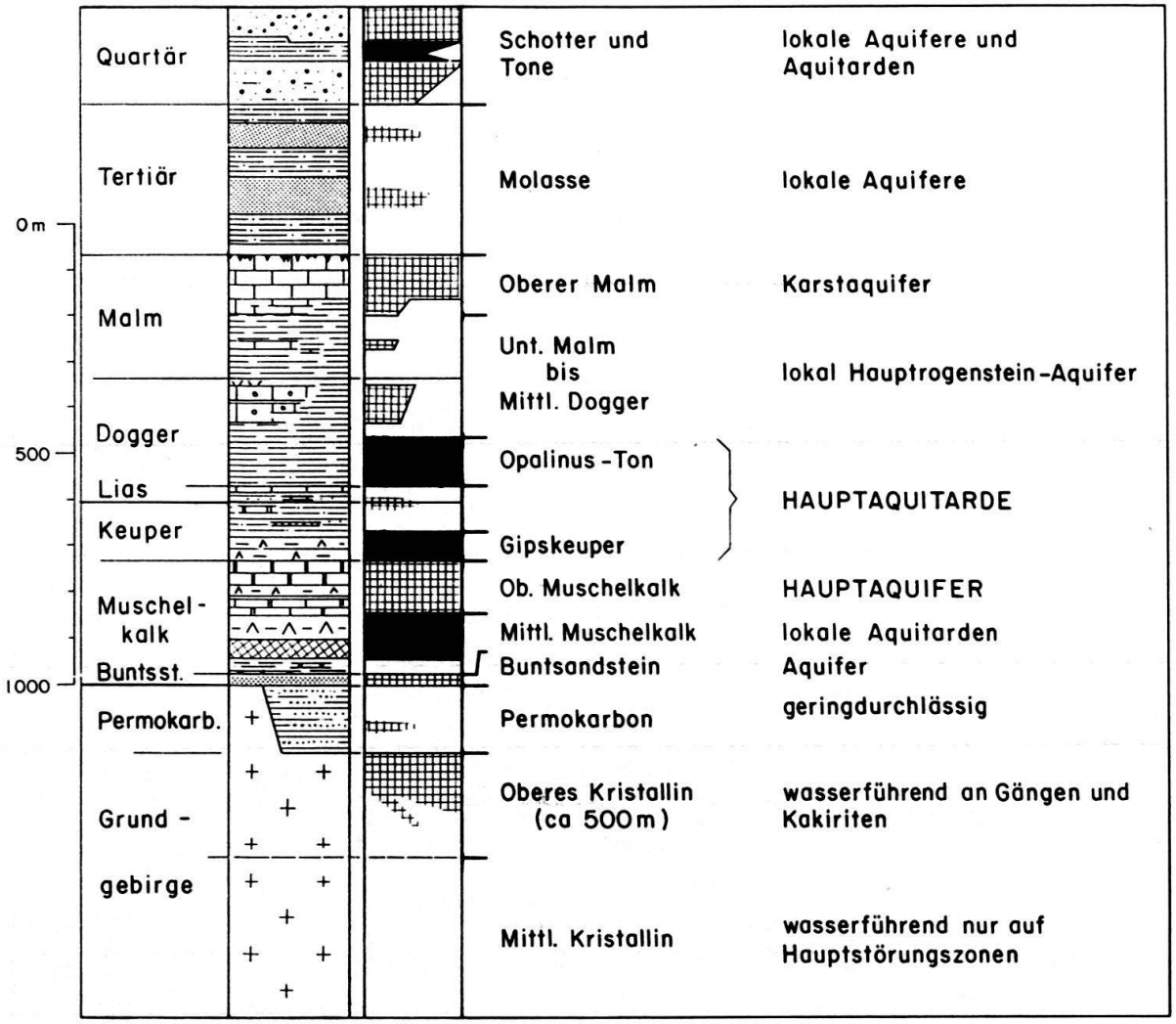

Fig. 2. Schematisches stratigraphisches Profil mit Aquiferen (kreuzschraffiert), geringdurchlässigen Einheiten (weiss) und Aquitarden (schwarz) der Nordschweiz. Nach DIEBOLD (1986), vereinfacht.

Entlang von Störungszonen sind die Gesteine teilweise kataklastisch deformiert (MEYER 1987) und hydrothermal umgewandelt (PETERS 1987). Nach den stratigraphischen Evidenzen, der Maturation des organischen Materials in den Permokarbon-Sedimenten von Weiach (KEMPTER 1987) und radiometrischen Altersbestimmungen (HUNZIKER et al. 1987) fand diese hydrothermale Phase vor allem während des Perms statt. Untersuchungen der fluiden Einschlüsse (MULLIS 1987) und radiometrische Altersbestimmungen (HUNZIKER et al. 1987) weisen allerdings auch auf spätere Wasserzirkulationen entlang Klüften hin. Bei den Wasserfliesswegen im Kristallin (GAUTSCHI et al. 1986) lassen sich folgende Systeme unterscheiden:

a) Offene grobporöse bis drusige, hydrothermale Mineraladern, -klüfte und -gänge, zum Beispiel Quarzadern oder Erzadern. Die Adern treten bevorzugt in mehr oder weniger markant ausgebildeten kakiritischen oder kataklastischen Störungszonen oder in deren näheren Umgebung auf, im allgemeinen verbunden mit einer hydrothermalen Umwandlung des Nebengesteins. Dieses kann aus Granit oder Gneis bestehen.
b) Aplitische und pegmatische Ganggesteine mit offenen Klüften
c) Offene Klüfte in Gneisen

Praktisch alle offenen Klüfte im Kristallin weisen einen Kluftbelag, vorwiegend aus Tonmineralien und, je nach Tiefe, Hämatit, auf. Untergeordnet führen die offenen Klüfte frei in den Hohlraum wachsende Kristalle wie Calcit, Quarz, Fluorit, Baryt und Cölestin.

In den Tiefbohrungen Böttstein, Leuggern und Schafisheim wird das Kristallin direkt von siliziklastischen Buntsandstein-Sedimenten überlagert, wogegen in Riniken, Kaisten und Weiach permokarbone Sedimente im Hangenden des Kristallins (MÜLLER et al. 1984 und Fig. 2) folgen. Der mehrheitlich fluviatil abgelagerte geringmächtige (< 35 m) Buntsandstein bildet wegen seiner teils grossen Porosität ($\leq 20\%$) und Permeabilität (≤ 1500 md) eine stark wasserführende Zone, den sog. Buntsandstein-Aquifer (BALDERER 1985, RAMSEYER 1987). Als detritische Mineralien, welche sowohl Strontium wie Rubidium enthalten können, sind Illit und Kalifeldspat in unterschiedlicher Menge vorhanden. Da Kalifeldspat deutliche Lösungserscheinungen aufweist, kann angenommen werden, dass er zeitweise Strontium in die Porenlösung abgab (RAMSEYER 1987). Als authigene Mineralien mit unterschiedlichsten Strontiumgehalten kommen im Buntsandstein Anhydrit, Gips, Baryt, Cölestin, Calcit, Dolomit und Illit vor (Tab. 1). Diese Mineralphasen vermitteln ein Isotopenverhältnis, welches vorwiegend während der Meso- respektive Telogenese in den Porenwässern anzutreffen war. Einzig in der Bohrung Weiach wurden syn- bis eogenetisch ausgeschiedene Mineralien (Calcit 988.65 m und Anhydrit 985.07 m) gemessen, die keine Anzeichen späterer Veränderungen aufweisen und die deshalb die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Zusammensetzung zur Zeit der Ablagerung widerspiegeln sollten.

Die marinen Kalke und Dolomite des Oberen Muschelkalks stellen im nordschweizerischen Mesozoikum den Hauptaquifer dar, welcher beidseits durch die als hydraulische Barrieren wirkenden Hauptaquitarden – den kontinentalen Gipskeuper bzw. die marinen Sulfatschichten des Mittleren Muschelkalks – gut abgeschirmt wird (SCHMASSMANN et al. 1984 und Fig. 2). In erster Linie wurden die gesteinsbildenden Mineralien des Oberen und Mittleren Muschelkalks, nämlich Dolomit, Anhydrit und Halit, auf ihr Strontium-Isotopenverhältnis hin untersucht. Die Anhydritleitbank des Mittleren Muschelkalks, eine durch submarines Wachstum von Gips (Selenit) gebildete Schicht (MATTER et al. 1987b), wurde im Hinblick auf mögliche diagenetische Veränderungen der $^{87}Sr/^{86}Sr$-Zusammen-

Tabelle 1: *Zusammenfassung der Analysedaten* (*aus* MATTER et al. 1987a, b, c, PETERS et al. 1987a, b, c, *und* BLÄSI et al. 1987). **Röntgenfluoreszenz-Analysen.* +*Elektronen-Mikrosonden-Analysen.*

	Teufe m	Material	Vorkommen	Sr ppm	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$^{87}Rb/^{86}Sr$
BÖTTSTEIN						
Keuper	53.37	Gips	randliche Zone einer Anhydritknolle	1576	0.70811 ± 0.00008	
	53.37	Anhydrit	Knolle	2150	0.70814 ± 0.00009	
	59.00	Gips	Fasergips	886	0.70810 ± 0.00007	
	88.9	Anhydrit	pseudomorph nach Fasergips	2701	0.70807 ± 0.00004	
Muschelkalk	122.65	Calcit	Druse	100	0.70936 ± 0.00006	
	123.0-202.5	Wasser		11.0	0.70968 ± 0.00006	
	137.20	Dolomit	Gestein	586	0.71053 ± 0.00006	
Buntsandstein	305.2-319.8	Wasser		0.9	0.71455 ± 0.00006	
Kristallin	393.9-405.1	Wasser		0.4	0.71730 ± 0.00010	
	618.5-624.1	Wasser		0.6	0.71752 ± 0.00006	
	1490.7-1491.1	Biotit		22.4	1.10808 ± 0.00007	113.738
	1490.7-1491.1	Gestein		207	0.72716 ± 0.00006	3.5872
WEIACH						
Keuper	749.60	Anhydrit	Knolle	1893	0.70821 ± 0.00009	
Muschelkalk	822.0-896.1	Wasser		7.9	0.70881 ± 0.00006	
	910.15	Anhydrit	Leitbank	1105	0.70783 ± 0.00006	
Buntsandstein	981.0-989.6	Wasser		10.9/11.4	0.71652 ± 0.00008	
	985.07	Anhydrit	Zement in Sandstein	2614	0.71024 ± 0.00009	
	988.56	Calcit	Caliche	1092	0.71042 ± 0.00007	
Kristallin	2211.6-2224.6	Wasser		4.7	0.71671 ± 0.00006	
	2220.12	Gestein	chloritisierter Biotit-Plagioklas-Gneis	244*	0.71441 ± 0.00005	
	2224.95	Calcit	Calcit-Prehnit-Kluft	584	0.70992 ± 0.00006	
RINIKEN						
Muschelkalk	617.3-696.0	Wasser		13.6	0.70924 ± 0.00004	
	742.29	Steinsalz		2.4	0.70915 ± 0.00025	
Buntsandstein	793.0-820.2	Wasser		15.7/16.1	0.71506 ± 0.00007	
	805.0	Calcit	Druse	290	0.71504 ± 0.00009	
Oberrotliegendes	958.4-972.5	Wasser		32.4	0.71570 ± 0.00006	
	1045.45	Calcit	offene Kluft	286	0.71618 ± 0.00008	
KAISTEN						
Buntsandstein	95.17	Gips	Fasergips	199	0.71224 ± 0.00006	
	97.0-129.9	Wasser		12.6	0.71386 ± 0.00012	
Kristallin	475.5-489.8	Wasser		0.9/1.1	0.71722 ± 0.00008	
	816.0-822.9	Wasser		1.3/1.4	0.71767 ± 0.00006	
	1021.0-1040.9	Wasser		1.4	0.71778 ± 0.00003	
	1038.83	Gestein	Migmatischer Metapelit, frisch	-	0.72392 ± 0.00004	
	1046.36	Calcit	Derber Kluftbelag	148	0.71701 ± 0.00011	
	1046.36	Illit	massig dichter Kluftbelag	49.7	0.80971 ± 0.00005	50.777
	1046.36	Gestein	chloritisierter Metapelit	-	0.72305 ± 0.00013	
	1238.0-1305.8	Wasser		1.0	0.71711 ± 0.00008	
LEUGGERN						
Muschelkalk	53.5-96.4	Wasser		3.1	0.70867 ± 0.00004	
	54.08	Calcit	Druse	58	0.70905 ± 0.00003	
	116.43	Anhydrit	Leitbank	1196	0.70784 ± 0.00007	
Buntsandstein	208.2-227.5	Wasser		0.7	0.71629 ± 0.00022	
	218.61	Calcit	Druse	107	0.71659 ± 0.00014	
Kristallin	507.4-568.6	Wasser		0.5	0.71672 ± 0.00010	
	702.0-709.5	Wasser		0.5	0.71656 ± 0.00008	
	1179.3-1227.2	Wasser		0.3	0.71729 ± 0.00009	
	1427.4-1439.4	Wasser		0.7	0.71741 ± 0.00006	
	1511.32	Calcit	zonierte Calcit-Albit-Kluft	-	0.71156 ± 0.00008	
	1525.97	Gestein	Biotit-Granit, frisch	206*	0.72859 ± 0.00008	3.8771
	1525.97	Calcit	Calcitkluft geschlossen	-	0.71105 ± 0.00008	
	1636.90	Gestein	Cordieritführender Zweiglimmergranit frisch	290*	0.76098 ± 0.00005	11.7798
	1642.2-1688.9	Wasser		0.4	0.71747 ± 0.00009	
	1648.29	Baryt II	Rhombisch gedrungene klare Kristalle	1090+	0.71755 ± 0.00017	
	1648.29	Gestein	Cordieritf. Zweiglimmergranit umgewandelt		0.82390 ± 0.00009	27.7169
	1648.83	Illit	Hydrothermale Gangfüllung	60.6	0.80142 ± 0.00006	22.6114
	1648.83	Baryt I	sekundäre Gangfüllung	16500+	0.71575 ± 0.00006	
	1648.83	Gestein	Hydroth. Gangfüllung (Quarz, Illit)	38*	0.74421 ± 0.00006	7.2449
SCHAFISHEIM						
Muschelkalk	1227.8-1293.0	Wasser		17.2	0.70919 ± 0.00004	
	1233.93	Dolomit	Gestein (mit 2 % Anhydrit)	85	0.70812 ± 0.00009	
	1329.20	Calcit	offene Kluft	233	0.70966 ± 0.00005	
	1374.25	Anhydrit	Leitbank	1142	0.70785 ± 0.00003	
Buntsandstein	1476.0-1500.4	Wasser		18.0/20.9	0.71343 ± 0.00009	
	1485.75	Calcit	Kluft	3566	0.71300 ± 0.00023	
Kristallin	1564.5-1577.7	Wasser		10.5/11.6	0.71442 ± 0.00002	
	1879.78-1883.76	Apatit		1581	0.70872 ± 0.00009	0.002415
	1879.78-1883.76	Perthit		2978	0.70958 ± 0.00009	0.2741
	1879.78-1883.76	Albit + Quarz		928	0.70964 ± 0.00004	0.2662
	1879.78-1883.76	Hornblende		261	0.70988 ± 0.00006	0.2192
	1879.78-1883.76	Biotit		16.8	1.14886 ± 0.00005	98.0801
	1879.78-1883.76	Gestein	Syenit, frisch	494	0.71405 ± 0.00005	1.2351

setzung in den Bohrungen Leuggern, Weiach und Schafisheim untersucht. Mit demselben Ziel wurden eine teilweise vergipste Anhydritknolle sowie Fasergips aus der Bohrung Böttstein in die Untersuchungen mit einbezogen. Aus der Bohrung Schafisheim konnte zusätzlich noch ein idiomorpher Calcitkristall, der während der Jurafaltung in einer offenen Kluft gebildet wurde, analysiert werden (BLÄSI et al. 1987).

Aus dem Keuper von Böttstein wurden Gips und Anhydrit von unterschiedlichster Bildungszeit und -bedingungen entnommen, um den Effekt von Hydratation und Dehydratation von Anhydrit bzw. Gips auf das Strontium-Isotopenverhältnis zu ermitteln.

4. Analysenresultate

4.1 Tiefengrundwässer

Aus den in Tabelle 1 aufgeführten Resultaten geht hervor, dass die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse der Kluftwässer aus dem Kristallin der Bohrungen Böttstein, Leuggern, Kaisten und Weiach in einem recht engen Bereich von 0.7166 bis 0.7178 liegen. Einzig das Kluftwasser im Kristallin von Schafisheim weist mit 0.7144 ein niedrigeres Isotopenverhältnis auf.

Die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse der Wässer aus den siliziklastischen Sedimenten des Buntsandsteins sind generell kleiner als diejenigen der Kristallin-Kluftwässer aus der entspre-

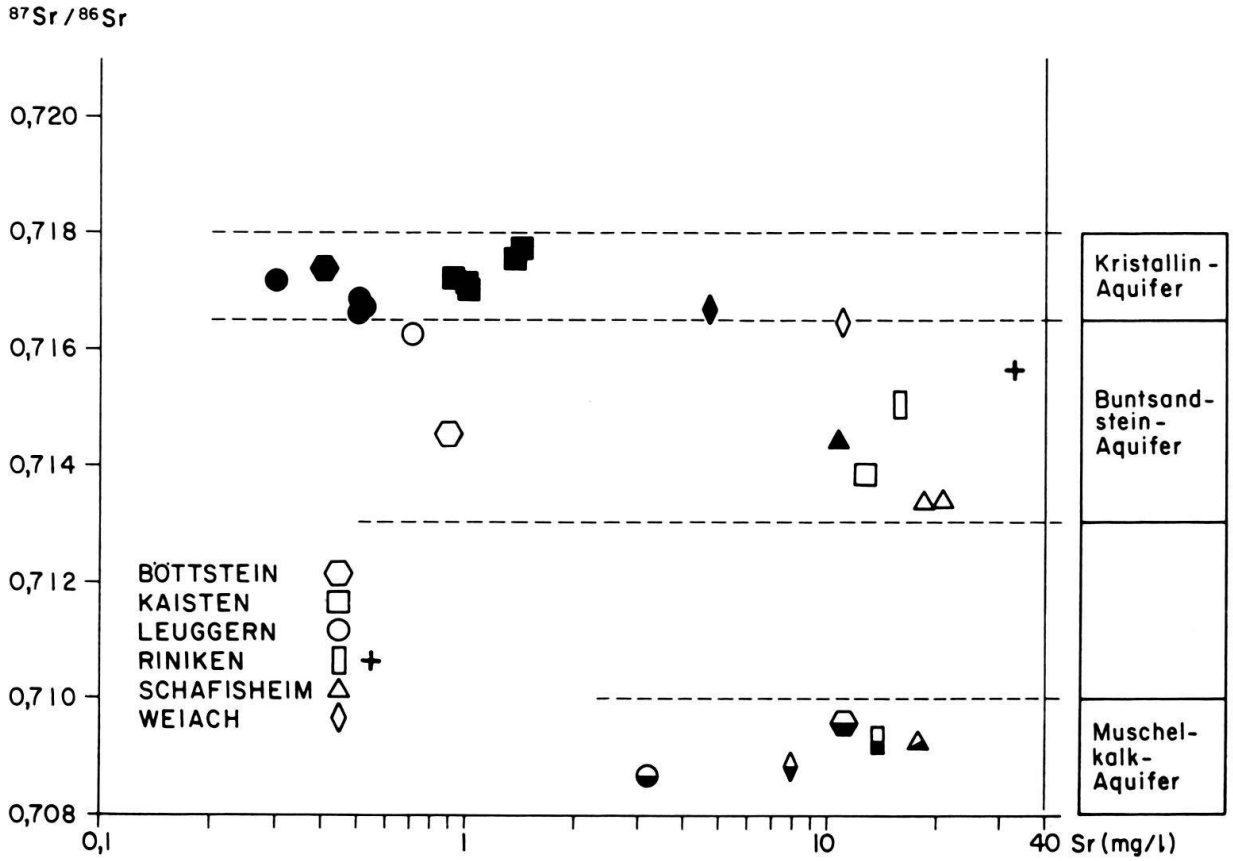

Fig. 3. Beziehung zwischen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnissen und Sr-Gehalten in Tiefengrundwässern des Kristallin-, Buntsandstein- und Muschelkalk-Aquifers. Volle Symbole: Kristallinwässer, offene Symbole: Buntsandsteinwässer, halboffene Symbole: Muschelkalkwässer und +Permwasser.

chenden Bohrung. Ausserdem unterscheiden sich die Wässer des Buntsandsteins von denjenigen des Kristallins durch einen 1.4- bis 9fach erhöhten Strontiumgehalt (Fig. 3, Tab. 1).

Stark abweichende Verhältnisse liegen im Muschelkalk-Aquifer vor. Das $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis variiert zwischen 0.7087 und 0.7097. Neben einer geringeren Streuung ist der Mittelwert eindeutig kleiner als in den Buntsandstein- respektive Kristallinwässern. Der Gesamtgehalt an Strontium ist wiederum gegenüber den Kluftwässern aus dem Kristallin stark erhöht und liegt etwa im Bereich der Porenwässer des Buntsandstein.

4.2 Kristallines Grundgebirge

Die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse der *granitischen Gesamtgesteine* (Böttstein 1490.7–1491.1 m; Leuggern 1525.97 m, 1636.90 m und 1648.83 m; Kaisten 1038.83 m) liegen mit 0.7239 bis 0.8239 bedeutend über denjenigen der heutigen Tiefengrundwässer. Im Biotit-Gneis von Weiach (2220.12 m) dagegen ist das $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis mit 0.7144 tiefer als in den Kluftwässern des Kristallins.

Vereinzelte *Kluftmineralien* wie beispielsweise die frei in den Hohlraum ragenden Baryte von Leuggern (1648.29 m) und der derbe Calcitbelag von Kaisten (1046.36 m) weisen mit 0.7175 bzw. 0.7170 dasselbe $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis auf wie das heute auf den benachbarten Klüften im Kristallin zirkulierende Wasser (Tab. 1).

Im Gegensatz dazu wurden an Illiten aus *hydrothermalen Gang- bzw. Kluftfüllungen* (Leuggern 1648.83 m, Kaisten 1046.36 m) mit 0.8014 und 0.8097 wesentlich höhere Sr-Isotopenverhältnisse gemessen. Dies trifft ebenfalls auf die mit Quarz vermischte Illit-Kluftfüllung bei Meter 1648.36 der Bohrung Leuggern zu. Die Calcite aus geschlossenen hydrothermalen Calcit-Albit- und Calcitgängen von Leuggern (1511.32 m und 1525.97 m) zeigen andererseits mit 0.7115 und 0.7110 niedrigere Verhältnisse als die heutigen Kluftwässer im kristallinen Grundgebirge (Tab. 1).

4.3 Sedimente

Die an Calcit, Anhydrit und Gips aus dem Buntsandstein ermittelten Sr-Isotopenverhältnisse liegen zwischen 0.7102 und 0.7166. Eine Sonderstellung nehmen dabei die weiter oben erwähnten in Weiach beobachteten syn- bis eogenetischen Phasen, eine Caliche-Knolle bei 988.56 m und ein Anhydritzement bei 985.07 m ein, welche mit 0.7104 bzw. 0.7102 ein relativ niedriges Sr-Isotopenverhältnis aufweisen. Alle übrigen, nach Ramseyer (1987) zu einem späteren Zeitpunkt auskristallisierten Mineralien zeigen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse, welche grösser als 0.7122 sind (Tab. 1).

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, variieren die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse von Calcit, Dolomit, Anhydrit und Halit aus dem Muschelkalk und Keuper zwischen 0.7078 und 0.7105. Die drei aus der Anhydritleitbank der Bohrungen Leuggern, Schafisheim und Weiach stammenden Proben weisen jedoch nicht nur dasselbe $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis (0.7078), sondern auch nahezu denselben Strontiumgehalt auf (1105–1196 ppm). Um abzuklären, ob hier noch die sedimentären Sr-Isotopenverhältnisse des ehemaligen subaquatisch gewachsenen Selenits (transparente Gipskristalle) vorliegen, wurden einige Sulfatproben aus dem Keuper von Böttstein auf die Effekte der Dehydration und Hydratation untersucht. Der Vergleich des zu Gips umgewandelten Randes einer Anhydritknolle mit ihrem Anhydrit-

kern (Böttstein 53.97 m) zeigt ein durch die Hydratation unverändertes Sr-Isotopenverhältnis auf. Nur der Gesamtgehalt an Strontium dürfte sich von 2150 bzw. 1700 ppm (bei Berücksichtigung des H_2O-Gehaltes in äquivalentem Gips) auf 1576 ppm abgereichert haben (Tab. 1). Auch pseudomorph nach Fasergips rekristallisierter Anhydrit und jüngerer Fasergips besitzen dasselbe $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis wie die Anhydritknolle und deren hydratisierter Gipsrand. Der Strontiumgehalt ist indessen im jüngeren Fasergips wiederum erniedrigt. Bedeutend niedrigere Strontiumgehalte als in den Sulfatmineralien fanden sich jedoch in den Calciten aus Drusen und Klüften im Oberen Muschelkalk (58–233 ppm).

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Aufgrund der $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse in den heutigen Tiefengrundwässern hebt sich der Muschelkalk-Aquifer deutlich vom Buntsandstein- und dem Kristallin-Aquifer ab (Fig. 3). Dies ist weiter nicht verwunderlich, ist doch der Muschelkalk-Aquifer – wie erwähnt – durch sehr geringdurchlässige hydraulische Barrieren (vgl. Fig. 2) von den anderen Aquiferen isoliert (DIEBOLD 1986).

Im allgemeinen besitzen im Kristallin weder das Wirtgestein noch die hydrothermalen Gangfüllungen exakt dasselbe $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis wie die entsprechenden Kluftwässer. Es stellt sich somit die Frage wie die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse in Kluftwässern zustande kommen. Mehrere Möglichkeiten müssen hier in Betracht gezogen werden, wie eine externe Herkunft oder ein Herauslösen aus bestimmten Mineralphasen oder auch eine Mischherkunft.

Stellt man nun die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse der kristallinen Wirtgesteine aus der Bohrung Leuggern als Funktion ihrer $^{87}Rb/^{86}Sr$-Isotopenverhältnisse (Fig. 4) dar, so ergibt sich eine Isochrone mit einem Alter von 279±5 Ma. Dieses permische Alter (Rotliegend) entspricht der hydrothermalen Phase, die mit einer grossen Anzahl von Illit-Altern (HUNZIKER et al. 1987) belegt ist. Diese Phase war offenbar so durchdringend, dass auch bei den frischesten Graniten das Strontium-System umgestellt wurde. Ebenfalls auf diese Gerade kommt das Gesamtgestein des frisch aussehenden Granites von Böttstein (1490.7–1491.1 m) zu liegen. Der Biotit (1490.7–1491.1 m) aus dem Kristallin dieser

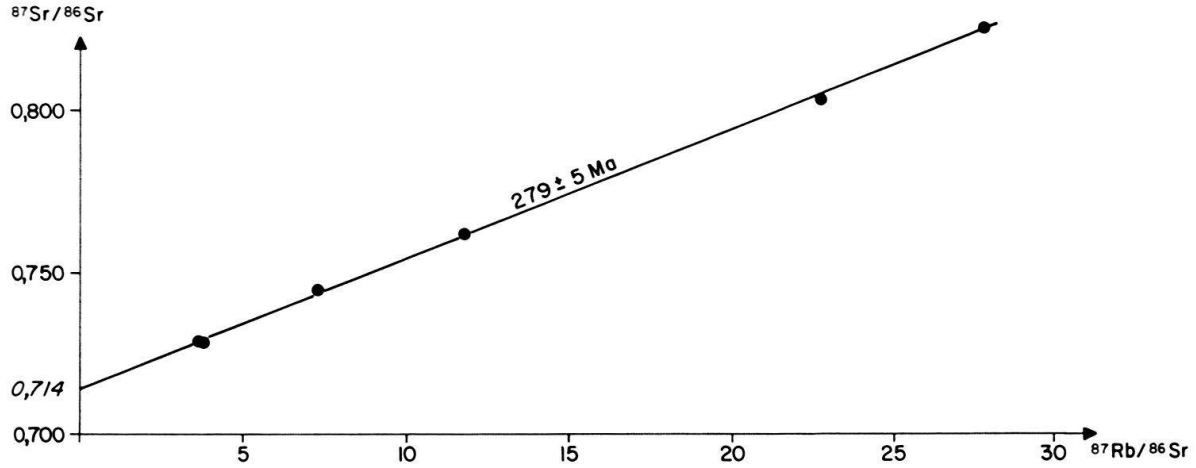

Fig. 4. Isochrone aus Kristallin-Gesamtgesteinsanalysen der Tiefbohrungen Leuggern und Böttstein sowie einer hydrothermalen Gangfüllung (Illit 1648.83 m) von Leuggern (vgl. Tab. 1).

Bohrung liegt dagegen etwas unterhalb der Isochrone der Proben von Leuggern (ausserhalb der Fig. 4). Der untere Einstichpunkt der Isochrone ergibt ein $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis von 0.714±0.001 (Fig. 4). Hätten sich zu dieser Zeit während des Perms strontiumreiche Mineralien wie Baryte, Calcite oder Fluorite gebildet, so würden sie dieses $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis eingebaut haben, welches sich, da diese Mineralien praktisch rubidiumfrei sind, kaum mehr verändert hätte. Wenn die heutigen Kristallinwässer diese vor 280 Ma in Plagioklas ausgeschiedenen Calcite auflösen, müssten sie ein $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis von 0.714 aufweisen, wie dies in der Wasserprobe aus dem Kristallin von Schafisheim der Fall ist. Um aber auf die in den anderen Bohrungen an Kristallinwässern gemessenen Werte von 0.716 bis 0.718 zu kommen, braucht es eine zusätzliche Quelle mit grösserem $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis. Hier bietet sich einerseits das Gesamtgestein mit seinem grösseren $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis an: durch Herauslösen von radiogenem ^{87}Sr auf Rb-Plätzen, welches leichter gebunden ist als das auf Ca-Plätzen. Andererseits würden jüngere Sr-reiche Neubildungen infolge Produktion von radiogenem Strontium höhere $^{87}Sr/^{86}Sr$-Werte aufweisen, falls die hydrothermale Umwandlung noch nach 280 Ma angedauert hat, welches nach den K/Ar- und Rb/Sr-Mineralaltern anzunehmen ist. Diese Verhältnisse würden dann eher im Bereich der Kristallinwässer (0.716–0.718) liegen.

Die heutigen Kristallinwässer können demnach ihr $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis weder durch kongruentes Lösen des Gesamtgesteins noch durch Lösen von Rb-reichen Mineralien wie Biotit oder Illit (Tab. 1) erreicht haben. Es kommen somit nur noch Rb-arme Mineralien mit kleinen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnissen wie Plagioklas oder sekundär aus der Anorthitkomponente entstandener Calcit in Frage. Untersuchungen von KAY & DARBYSHIRE (1986) am Carnmenellis-Granit zeigten, dass die Tiefengrundwässer tatsächlich praktisch dasselbe $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis aufwiesen wie die hydrothermal gebildeten Fluorite und Calcite oder die vor etwa 290 Ma hydrothermal beeinflussten Plagioklase (KAY & DARBYSHIRE 1986, Fig. 3). Diese Autoren betrachten Plagioklas als die Hauptquelle des gelösten Strontiums.

Die zwei untersuchten derben Calcitfüllungen aus geschlossenen Klüften der Bohrung Leuggern (1511.32 m, 1525.97 m) liegen mit ihrem Sr-Isotopenverhältnis von 0.711 jedoch deutlich unterhalb demjenigen des Kristallinwassers (Tab. 1). Somit müssen diese Calcite entweder aus Lösungen von z. T. externer Herkunft (Buntsandstein, Caliche und Anhydrit) oder vor der permischen hydrothermalen Phase auskristallisiert sein. Letzteres ist wegen der engen Verwachsung mit hydrothermal gebildetem Illit praktisch auszuschliessen.

Aus der Tatsache, dass die $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse der Kristallin-, Perm- und Buntsandsteinwässer ähnlich sind, geht hervor, dass es keine Rolle spielt, ob der Buntsandstein auf Kristallin oder Perm auflagert (Fig. 3), sondern dass die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine ausschlaggebend ist. Der unter kontinentalen Bedingungen abgelagerte Buntsandstein besteht je nach Bohrstandort aus erstzyklischem oder aus dem Permokarbon aufgearbeitetem kristallinem Verwitterungsschutt und weist deshalb dieselben Sr-haltigen Mineralien auf wie der kristalline bzw. permokarbone Untergrund (BLÄSI et al. 1987). Die Ausnahme bildet Plagioklas, welcher im Buntsandstein primär fehlt (RAMSEYER 1987) da er bei der Verwitterung ausgemerzt worden ist.

Diese Interpretation wird durch die Resultate von Schafisheim deutlich unterstützt. Die hier niedrige Sr-Isotopenzusammensetzung sowohl des Kristallin- wie des Buntsandsteinwassers erklärt sich durch die nach schwermineralogischen Untersuchungen

lokale Herkunft des Buntsandsteins (BLÄSI et al. 1986) und das niedrige $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis des Grundgebirges (Tab. 1).

Die Unterschiede sowohl im Sr-Isotopenverhältnis wie im Sr-Gehalt zwischen den Kristallin- und Buntsandsteinwässern können ausser Weiach durch Lösungsreaktionen von Kristallinwässern mit Calcit und Sulfaten im Buntsandstein erklärt werden. Im Falle von Schafisheim zeigt eine Mischungsrechnung, dass bei Zufuhr von 8 ppm Strontium zum Kristallinwasser (11 ppm Strontium) durch Lösung von Kluftcalcit aus dem Buntsandstein (SHA 1485.75 m) ein Sr-Isotopenverhältnis von 0.71360 resultiert, was im Einklang ist mit dem gemessenen Wert von 0.71341 ± 0.00009 (Tab. 1).

Da in der Tiefbohrung Weiach das Buntsandsteinwasser nach thermodynamischen Berechnungen im Gleichgewicht mit Calcit und den Sulfatphasen steht (F. J. Pearson, schriftl. Mitt. 1986), kann der erhöhte Gehalt an Strontium in diesem Wasser nicht durch Lösung einer dieser Phasen, wie in den übrigen Standorten, erklärt werden. Auch die in den Festphasen verglichen mit dem Buntsandsteinwasser tieferen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse unterstützen diese Hypothese, da die Reaktion mit Kristallinwasser zu einem viel tieferen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis führen würde. Dies deutet darauf hin, dass bezüglich Calcit und Sulfaten gesättigtes Wasser mit erhöhtem Sr-Gehalt, wie etwa ein Wasser aus dem Permokarbon oder ein bereits sedimentär geprägtes Kristallinwasser in den Buntsandstein infiltrierte. Solche Mischungsvorgänge werden auch von W. Balderer (mdl. Mitt. 1987) angenommen.

Es soll nun der Frage etwas genauer nachgegangen werden, ob das Wirtgestein oder allenfalls Kluftminerale dasselbe Sr-Isotopenverhältnis aufweisen wie die durchfliessenden Wässer und somit als Sr-Quelle bzw. -Senke in Frage kämen.

Aus den triadischen Sedimenten wurden neben den Wässern auch Kluft- und gesteinsbildende Mineralien auf ihre Sr-Isotopenverhältnisse und Sr-Gehalte untersucht. Calcitkristalle aus Drusen im Buntsandstein der Bohrungen Riniken (805.0 m) und Leuggern (218.61 m) besitzen zwar dieselben Sr-Isotopenverhältnisse wie das entsprechende Tiefengrundwasser (Tab. 1) und könnten sich deshalb mit diesem im Gleichgewicht befinden. Wird jedoch ausgehend vom Sr-Gehalt in den heutigen Wässern und einem Fraktionierungskoeffizienten von 0.13 für Calcit der Sr-Gehalt der aus diesem Wasser für im Gleichgewicht bei 25° bzw. 100 °C ausgeschiedene Calcite berechnet, so sind die tatsächlich gemessenen Gehalte verglichen mit den berechneten viel zu gering (BLÄSI et al. 1987). Ausserdem sind die Calcite bezüglich $\delta^{18}O$ bei den gemessenen In-situ-Temperaturen (Leuggern 18 °C, Riniken 51 °C) nicht im Fraktionierungsgleichgewicht mit den Grundwässern (W. Balderer, mdl. Mitt. 1987). Ein Wachstum dieser Calcite im Gleichgewicht mit den heutigen Wässern ist jedoch auch wegen der aus Flüssigkeitseinschlüssen ermittelten minimalen Kristallisationstemperaturen (MULLIS 1987) von 60 bis 75 °C auszuschliessen.

Bei dem aus dem Buntsandstein der Bohrung Schafisheim untersuchten Kluftcalcit liegt die Sr-Isotopenzusammensetzung leicht unterhalb derjenigen des Grundwassers (Tab. 1). Kathodenlumineszenzaufnahmen dieser Kluft lassen erkennen, dass zwei Generationen von Calcit vorliegen, wobei die jüngere nach RAMSEYER (1987) im Zusammenhang mit der Jurafaltung steht. Das gemessene Isotopenverhältnis stellt somit ein Mischverhältnis dar.

Die beiden identischen $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisse von syn- bis eogenetisch gebildetem Calcit (Caliche) und Anhydrit aus dem Buntsandstein der Bohrung Weiach widerspiegeln

dagegen die Sr-Isotopenzusammensetzung von Porenwässern zur Buntsandsteinzeit, welche bei 0.710 lag (Tab. 1).

Der Effekt der Mineralreaktionen auf das $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis des Grundwassers ist wohl am Eindeutigsten in den aus dem Keuper von Böttstein stammenden Gips- und Anhydrit-Proben ersichtlich (Tab. 1). Weder Rehydratation von Anhydrit zu Gips, noch sekundäre Ausscheidung von gelöstem Anhydrit als Fasergips veränderte das $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis. Diese Konstanz des $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisses nach Lösung und wieder Ausscheidung (Fasergips) ist aber nur dank des hohen Gehaltes an Strontium (900–2700 ppm Sr) und niedrigem Rb-Gehalt in diesen Sulfaten möglich.

Es überrascht deshalb nicht, dass die durch Dehydratation von Selenit entstandene Anhydritleitbank des Mittleren Muschelkalks ein Sr-Isotopenverhältnis aufweist, welches genau demjenigen von Muschelkalk-Meerwasser (0.70780, BURKE et al. 1982) entspricht. Demgegenüber deutet das höhere $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnis des Halits (0.7091) von Riniken auf Zufuhr kontinentaler Wässer in die eindampfenden Salzpfannen hin.

Alle gemessenen Mineralphasen und Gesamtgesteinsproben aus dem Oberen Muschelkalk weisen ein höheres Sr-Isotopenverhältnis auf (0.7081–0.7105) als das Muschelkalkmeerwasser bzw. die marine Anhydritleitbank. Die um einen mittleren Wert von etwa 0.709 sich gruppierenden Sr-Isotopenverhältnisse der Muschelkalkwässer (Fig. 3) können somit nicht in erster Linie auf Lösung mariner Sulfate zurückgeführt werden. Die Sr-Isotopenverhältnisse weisen vielmehr darauf hin, dass sich die generell sulfat- und chloridhaltigen Wässer vor allem durch Karbonat- insbesondere Dolomitlösung ($^{87}Sr/^{86}Sr$ des Dolomits 0.7081–0.7105) verbunden mit Lösung von kontinentalen Sulfaten vom Typ Gipskeuper ($^{87}Sr/^{86}Sr$ der Sulfate 0.7081) oder von den noch nicht analysierten Sulfaten aus dem Oberen Muschelkalk entwickelt haben. Die erste Möglichkeit ist aufgrund der $\delta^{34}S$- und $\delta^{18}O$-Werte der Sulfate eher auszuschliessen (W. Balderer, mdl. Mitt. 1987). Zum gleichen Ergebnis führt die thermodynamische Modellierung der Wasserevolution (PEARSON 1985). Lösung von dem als Chlorid-Quelle in Frage kommenden Steinsalz hätte dagegen wegen seines mit dem Wasser übereinstimmenden $^{87}Sr/^{86}Sr$-Verhältnisses keinen Einfluss auf die Sr-Isotopenzusammensetzung der Muschelkalkwässer.

Das Sr-Isotopenverhältnis von 0.7090 des vor der Jurafaltung in einer Druse auskristallisierten Calcits in der Bohrung Leuggern sowie das höhere Verhältnis von 0.7096 eines in Schafisheim in eine offene Kluft während der Jurafaltung gewachsenen Calcits (BLÄSI et al. 1987) und der Vergleich mit den heutigen Grundwässern lässt jedoch den Schluss zu, dass die Sr-Isotopenzusammensetzung im Muschelkalkgrundwasser im Verlaufe geologischer Zeiten in einem gewissen Ausmass variierte. Die erwähnten Mineralphasen sind weder aufgrund ihrer Sr-Isotopenzusammensetzung noch ihres Sr-Gehalts im Gleichgewicht mit den heutigen Muschelkalkwässern dieser Bohrungen.

Verdankungen

Die Autoren danken M. Giger (Abt. Isotopengeologie, Mineralogisches Institut der Universität Bern) für die sorgfältigen Isotopenbestimmungen sowie J. Hunziker und J. Meyer für die wertvollen Diskussionen. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und zahlreiche Anregungen sind wir W. Balderer (Zürich), A. Gautschi (Baden) und F. J. Pearson (Houston) sehr zu Dank verpflichtet. Der Nagra, insbesondere ihrem Chefgeologen M. Thury, danken wir für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Untersuchungsresultate. Frau I. Blaser und Frau H. Haas besorgten die Reinschrift des Manuskripts.

LITERATURVERZEICHNIS

BALDERER, W. (1985): The Nagra investigation project for the assessment of repositories for high-level radioactive waste in geological formations. – Min. Mag. *49*, 281–288.

BLÄSI, H.-R., DRONKERT, H., MATTER, A., & RAMSEYER, K. (1987): Diagenese des Muschelkalk- und des Buntsandsteinaquifers in den Nagra-Tiefbohrungen. Nagra Technischer Bericht NTB 87-02. – Nagra, Baden (in Vorbereitung).

BRUNNER, R. (1973): Ein neues Massenspektrometer in der Schweiz. – Der Elektroniker.

BURKE, W. H., DENISON, R. E., HETHERLINGTON, E. A., KOEPENICK, R. B., NELSON, H. F., & OTO, J. B. (1982): Variation of seawater $^{87}Sr/^{86}Sr$ throughout Phanerozoic time. – Geol. *10*, 516–519.

DIEBOLD, P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – Mitt. Aarg. Naturf. Ges. *31*, 11–52.

FAURE, G. (1977): Principles of isotope geology. – John Wiley & Sons, New York.

FRITZ, B., CLAUER, N., & KAM, M. (1986): Strontium isotopes and magnesium control as indicators of the origin of saline waters in crystalline rocks. In FRITZ, P., & FRAPE, S. K. (Ed.): Saline water and gases in crystalline rocks. – Spec. Pap. geol. Assoc. Canada *33* (in press).

GAUTSCHI, A., MEYER, Ch., PETERS, Tj., MEYER, J., & HOFMANN, B. (1986): Die geologische Charakterisierung der Wasserfließsysteme im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. – Nagra informiert *8*/2, 15–21.

HUNZIKER, J. H., STEINER, H.-R., & HURFORD, A. (1987): Absolute Altersbestimmungen, Sondierbohrung Böttstein. In PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H.-R., & GAUTSCHI, A. (Ed.): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. – Nagra, Baden (im Druck).

JÄGER, E. (1962): Rb-Sr age determinations on micas and total rocks from the Alps. – J. geophys. Res. *67*/13.

— (1979): The Rb-Sr method. Lectures in Isotope Geology. – Springer, Berlin, Heidelberg.

KAY, R. L. F., & DARBYSHIRE, D. P. F. (1986): A strontium isotope study of groundwater-rock interaction in the Carnmenellis granite. – Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Reykjavik, Iceland, 329–332.

KEMPTER, E. H. K. (1987): Fossile Maturität, Paläothermogradienten und Schichtlücken in der Bohrung Weiach im Lichte der Modellberechnungen der thermischen Maturität. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 543–552.

LAND, L. S. (1980): The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. – Soc. econ. Paleont. Mineral *28*, 87–110.

MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ISCHI, H. (1987a): Sondierbohrung Weiach – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-01. – Baden, (im Druck).

MATTER, A., PETERS, Tj., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Riniken – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-02. – Nagra, Baden (im Druck).

MATTER, A., PETERS, Tj., BLÄSI, H.-R., SCHENKER, F., & WEISS, H.-P. (1987c): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-03. – Nagra, Baden (in Vorbereitung).

MCNUTT, R. H., FRAPE, S. K., & FRITZ, P. (1984): Strontium isotope composition of some brines from the Precambrian Shield of Canada. – Isotope Geosci. *2*, 205–215.

MEYER, J. (1987): Die Kataklase im kristallinen Untergrund der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *80*/2.

MULLIS, J. (1987): Fluideinschluss-Untersuchungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 553–568.

MÜLLER, W. H., HUBER, M., ISLER, A., & KLEBOTH, P. (1984): Erläuterung zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100000. Nagra Technischer Bericht NTB 84-25. – Nagra, Baden.

PEARSON, F. J. (1985): Sondierbohrung Böttstein – Results of hydrochemical investigations: analyses and interpretation. Nagra Technischer Bericht NTB 85-05. – Nagra, Baden.

PETERS, Tj. (1987): Das Kristallin der Nordschweiz: Petrographie und hydrothermale Umwandlungen. – Eclogae geol. Helv. *80*/2.

PETERS, Tj., MATTER, A., BLÄSI, H.-R., & GAUTSCHI, A. (1987a): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 85-02. – Nagra, Baden (im Druck).

PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & ZIEGLER, H.-J. (1987b): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. Technischer Bericht NTB 86-04. – Nagra, Baden (im Druck).

PETERS, Tj., MATTER, A., ISENSCHMID, Chr., BLÄSI, H.-R., MEYER, J., & MEYER, Chr. (1987c): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. Nagra Technischer Bericht NTB 86-05. – Nagra, Baden (im Druck).

RAMSEYER, K. (1987): Diagenese des Buntsandsteins und ihre Beziehung zur tektonischen Entwicklung der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 383–395.

SCHMASSMANN, H., BALDERER, W., KANZ, W., & PEKDEGER, A. (1984): Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Technischer Bericht NTB 84-21. – Nagra, Baden.

STEIGER, R. H., & JÄGER, E. (1977): Subcommission on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. – Earth and planet. Sci. Lett. *36*, 359–362.

THURY, M., & DIEBOLD, P. (1987): Überblick über das geologische Untersuchungsprogramm der Nagra in der Nordschweiz. – Eclogae geol. Helv. *80*/2, 271–286.

VEIZER, J. (1983): Chemical diagenesis of carbonates: Theory and application of trace element technique. In: ARTHUR, M. A., ANDERSON, T. F., KAPLAN, I. R., VEIZER, J., & LAND, L. S. (Ed.): Stable isotopes in sedimentary geology. – Soc. econ. Paleont. Mineral. Short Course 10-3.

YORK, D. (1969): Least squares fitting of a straight line with correlated errors. – Earth and planet. Sci. Lett. *5*, 320–324.

Manuskript eingegangen am 10. April 1987
Revision angenommen am 4. Mai 1987