

Hydrogeologische Charakterisierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Molasse der Nordostschweiz aufgrund von hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen

Hydrogeological Characterization of the Groundwater Reservoirs in the Molasse of the North-East of Switzerland on the Basis of Hydrochemical Investigations and Isotope Methods

W. BALDERER¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	36
2. Überblick über die hydrochemischen Verhältnisse.....	38
2.1. Grundwässer in quartären Lockergesteinsablagerungen.....	38
2.2. Grundwässer innerhalb des morphologisch anstehenden Bereiches der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse (OSM) und der Oberen Meeresmolasse (OMM).....	40
2.3. Grundwässer in den Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse (OMM) und im Malm (in Position als tiefliegende Formationen)....	41
2.4. Grundwässer in den Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse (USM) und im Malm.....	44
3. Interpretation der vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich möglicher Informationen in bezug auf die Konfiguration der hydrodynamischen Fließsysteme.....	47
3.1. Hydrodynamische Fließsysteme innerhalb der quartären Lockergesteinsablagerungen.....	47
3.2. Hydrodynamische Fließsysteme innerhalb der Ablagerungen der Molasse (OSM, OMM und USM).....	53
3.2.1. Generelle Beobachtungen zu den hydrodynamischen Fließsystemen aufgrund der Beziehung zwischen der hydrochemischen Beschaffenheit der Grundwässer und den hydrogeologischen Verhältnissen.....	53
3.2.2. Interpretation der speziellen hydrodynamischen Aspekte der Resultate der Isotopen- und hydrochemischen Untersuchungen der Tiefengrundwässer aus der USM und dem Malm.....	54

¹⁾ Dr. Werner BALDERER, Privatdozent, Ingenieurgeologie, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

3.3. Resultierendes Interpretationsmodell der aktuellen Fließvorgänge der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse und des Malm	72
3.3.1. Hydrochemische Deutung	72
3.3.2. Hydrodynamische Deutung	75
3.3.3. Neu postulierte Thesen als Grundlage für ein hydrodynamisches Interpretationsmodell	78
3.3.4. Argumente für das neu postulierte Interpretationsmodell	79
3.3.5. Brückenschlag zwischen den dargestellten hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten zur dargestellten Interpretation der Isotopendaten	86
3.3.6. Definition des neu postulierten hydrodynamischen Interpretationsmodells.....	88
3.4. Resultierende Entwicklung der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse als Konsequenz des postulierten konzeptuellen hydrodynamischen Interpretationsmodells	93
Zusammenfassung	96
Literatur	97
Summary	103
Dank	104

1. Einleitung

Die Ablagerungen der Molasse, welche in die lithostratigraphischen Einheiten der Oberen Süßwassermolasse (OSM), der Oberen Meeresmolasse (OMM) und der Unteren Süßwassermolasse (USM) unterteilt werden, bilden in den Regionen des Schweizerischen Mittellandes oft den oberflächlich anstehenden Fels, morphologisch sichtbar aufgeschlossen an Hügeln und Talflanken sowie die untere und seitliche Begrenzung zu den quartären Lockergesteinsablagerungen.

In den Gebieten, wo die Ablagerungen der Molasse die oberste anstehende Felsformation bilden, insbesondere auch bei Bedeckung mit quartären Lockergesteinen, ist mit einem aktiven Austausch in Beziehung zum oberflächennahen hydrologischen Kreislauf zu rechnen. Die Ablagerungen der Molasse spielen eine wichtige Rolle als Infiltrations- und Exfiltrationszone in lokalen Fließsystemen, wobei aber auch Verbindungen zu intermediären und regionalen Fließsystemen möglich sind (welche andere geologische Formationen umfassen und bis in größere Tiefe reichen).

In der vorliegenden Arbeit wird angestrebt, ausgehend von den Ergebnissen der hydrochemischen und Isotopenuntersuchungen der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse der Region Nordostschweiz (Fig. 1.1) in Kombination mit den verfügbaren hydrogeologischen Daten, Aussagen hinsichtlich der Konfiguration der hydrodynamischen Fließsysteme zu gewinnen. Da jedoch, wie bereits erwähnt, wechselseitige Beziehungen zu den Grundwässern in den darüber abgelagerten quartären Lockergesteinen zu vermuten sind, werden auch die prinzipiellen hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse der quartären Ablagerungen mitdargestellt.

2. Überblick über die hydrochemischen Verhältnisse

2.1. Grundwässer in quartären Lockergesteinsablagerungen

Die in quartären, meist fluvioglazialen Schotterablagerungen in den Talsohlen vorkommenden Grundwässer weisen meist eine relativ geringe mittlere Verweilzeit auf, welche aufgrund vorliegender Tritiumbestimmungen meist etwa ein bis einige Jahre beträgt.

Aufgrund der im Rahmen des Grundwasserüberwachungsprogrammes (zur Kontrolle der genutzten Grundwasservorkommen in der Umgebung der Nagra-Tiefbohrungen) analysierten quartären Grundwässer ergeben aufgrund der Charakterisierung in Tab. 2.1 folgende Hinweise:

Die chemische Beschaffenheit dieser Grundwässer in quartären Lockergesteinsablagerungen ist von der mineralogischen bzw. chemischen Zusammensetzung der wichtigsten vorkommenden Gesteinskomponenten Kalk- und Dolomit- sowie Sulfatgesteine geprägt. Da diese Komponenten relativ leicht löslich sind, wird eine Prägung durch den Chemismus dieser Mineralien im Grundwasser schon bei relativ kurzen Verweilzeiten erreicht (W. BALDERER, 1989). In bezug auf die Grundwasserentwicklung des Kohlenstoffsystems ist anzunehmen, daß sich diese Wässer wahrscheinlich zur Hauptsache unter den Bedingungen des gegenüber dem CO₂ offenen Systems (in der ungesättigten Zone resp. im Bereich des Kapillarsaumes) entwickelt haben.

Diese oberflächennahen Grundwässer in quartären Lockergesteinsablagerungen sind nun wichtig als mögliche Infiltrate (und damit Ausgangsglieder der weiteren Entwicklung) für die darunterliegenden Aquifere in Festgesteinen, falls keine schlecht durchlässigen quartären Ablagerungen (wie Grundmoränen oder Seeablagerungen) vorhanden sind, welche die Rolle einer Zwischenabdichtung (Aquiclude, Aquitard) erfüllen und damit eine hydraulische Verbindung verunmöglichen oder zumindest erschweren.

Eine Beeinflussung durch das Grundwasser in den darüberliegenden quartären Hochterrassenschottern ist für das Grundwasser aus dem Muschelkalk der Tiefbohrung Leuggern zu vermuten. Ebenso ist für das im Muschelkalk der Bohrung 12 Kaisten-Felsbohrung-Breitematt erbohrte Grundwasser eine Beziehung zum Grundwasser in den quartären Ablagerungen anzunehmen. Da jedoch diese Ablagerungen aus Komponenten des Oberen Muschelkalks aufgebaut sind, ist in dem darin vorkommenden Grundwasser ein weitgehend identischer Chemismus bei etwas geringerer Gesamtmineralisation zu beobachten (H. SCHMASSMANN et al., 1984).

Größere Verweilzeiten von > 25 Jahren (d.h. meist ohne nachweisbares anthropogen produziertes Tritium) weisen diejenigen Grundwässer auf, welche in tiefliegenden quartären Rinnenfüllungen mit undurchlässiger Bedeckung vorkommen. Zu diesen Grundwässern aus glazial übertieften Rinnen gehören die durch Bohrungen entdeckten Vorkommen im unteren Glattal (M. FREIMOSER & Th. LOCHER, 1980, Th. KEMPF et al., 1986) und im Gebiet zwischen Knonau und Maschwanden (Th. KEMPF et al., 1986) sowie das durch die Tiefbohrung Schafisheim neu entdeckte tiefere Grundwasserstockwerk des unteren Seetales, welches direkt den anstehenden Gesteinen der Unteren Süßwassermolasse (USM) aufliegt (A. MATTER et al., 1988). Aufgrund der vorliegenden ³H-Bestimmungen ist sowohl für das Grundwasser des tieferen Vorkommens aus dem unteren Glattal sowie aus dem Gebiet Maschwanden-

Tab. 2.1: Chemische Charakterisierung genutzter quartärer Grundwasservorkommen in der Umgebung der Nagra-Tiefbohrungen (Wertebereiche) aufgrund der im Rahmen der Nagra-Überwachungsprogramme durchgeführten Analysen (gemäß NAGRA, Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik, NTB 85-12, 86-06, 86-07, 86-08, 86-09, 86-10).

Bezeichnung des GW-Vorkommens	Chemische Wassertypen	Gesamtmineralisation	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	³ H (TU)
Böttstein (Aaretal-schotter)	Ca-(Mg)-HCO ₃ -SO ₄	420–640	97–108	116 ± 5
Weiach (Schotter)	Ca-Mg-HCO ₃	560–623	23–26	–
Riniken (Hochterrassen-schotter)	Ca-HCO ₃	503–683	14–30	–
Schafisheim (Schotter)	Ca-Mg-HCO ₃	490–592	16–33	–
Kaisten (Schotter, Gehängeschutt- und Bergsturzmaterial)	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	751–918	192–368	–
Leuggern (Hochterrassen-schotter)	Ca-(Mg)-HCO ₃ -(SO ₄)-(NO ₃)	404–493	15–60	–
Leuggern (Aaretal-schotter)	Ca-(Mg)-HCO ₃ -(SO ₄)-(NO ₃)	628–653	116–135	–

Knonau eine Verweilzeit von > 25 Jahren anzunehmen. Aufgrund des δ¹⁸O-Wertes ergibt sich außerdem die Aussage, daß das letztere Grundwasser wahrscheinlich durch Infiltration in der engeren Region unter aktuellen klimatischen Bedingungen entstanden ist.

Die beiden aus den tieferen quartären Vorkommen analysierten Grundwässer des Unteren Glattales und des Gebietes Knonau-Maschwanden unterscheiden sich dabei als Na-HCO₃-Typ charakteristisch vom Chemismus der Grundwässer in oberflächennahen quartären Lockergesteinsvorkommen (dargestellt in Tab. 2.1). Dieser Chemismus vom Na-HCO₃-Typus dieser beiden tieferen Grundwässer aus quartären Vorkommen kann dabei, entsprechend der etwas größeren Verweilzeit, durch ablaufende Ionenaustauschprozesse (Na gegen Ca) erklärt werden. Leider liegen für das Grundwasser aus dem tieferen Grundwasserstockwerk bei Schafisheim weder chemische noch Isotopenbestimmungen vor. Da es sich jedoch um ein Grundwasservorkommen in ähnlicher hydrogeologischer Situation (hinsichtlich Lithologie und Chemismus der Komponenten ähnliche Ablagerungen) handelt, kann für dieses

Grundwasser aus dem tieferen Grundwasserstockwerk bei Schafisheim als Arbeitshypothese ebenfalls ein Chemismus vom Na-HCO₃-Typus sowie eine Verweilzeit von wahrscheinlich > 25 Jahren postuliert werden. Da ein direkter Kontakt zu den Schichten der darunter folgenden Unteren Süßwassermolasse (USM) besteht, ist außerdem mit der Möglichkeit einer hydraulischen Kommunikation zu rechnen. Damit besteht entweder die Möglichkeit, daß Grundwasser aus den quartären Lockergesteinsablagerungen in die USM infiltriert resp. Grundwasser aus der USM in dieses darüberliegende quartäre Grundwasservorkommen exfiltriert.

Wie in F. MATOUSEK (1989) dargestellt ist, wurde in einer 1989 abgeteufte Spülbohrung in der benachbarten (rund 3 km südöstlich von Schafisheim gelegenen) Ortschaft Seon in einer Tiefe von rund 267 m u.T. unterhalb von mächtigen, feinkörnigen See- und Moränenablagerungen ein 38 m mächtiger, fluvioglazialer Schotter angetroffen, welcher ein subartesisch gespanntes Grundwasser enthält. Dieses gehört zum Na-Mg-Ca-HCO₃-Typus und weist eine Gesamtmineralisation von 467 mg/l auf. Zudem wurde, wie ebenfalls in F. MATOUSEK (1989) erwähnt, bereits 1975 in einer Bohrung, welche 17 km südöstlich von Schafisheim ebenfalls im Seetal in der Ortschaft Ermensee (zwischen Baldegger- und Hallwilersee) ausgeführt worden war, unterhalb des oberflächennahen Schotters (32 m) und 106 m mächtigen feinkörnigen Seeablagerungen und Moräne in einem tieferen Schotter in einer Tiefe von 138–182 m ein Grundwasser erbohrt, welches artesisch gespannt ist und zum Na-HCO₃-Typus gehört.

2.2. Grundwässer innerhalb des morphologisch anstehenden Bereiches der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse (OSM) und der Oberen Meeresmolasse (OMM)

Die Ablagerungen der OSM weisen als terrestrische Sedimente (als Schuttfächerbildung ehemaliger ausgedehnter Flußsysteme) einen stark wechselnden, lateral und horizontal inhomogenen Aufbau auf. Dieser Aufbau prägt nach W. BALDERER (1983) auch die hydrogeologischen Verhältnisse mit zahlreichen kleinen Quellen im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse (OSM). Die relativ geringmächtigen, gut durchlässigen Zonen (Sandsteine und Konglomerate) weisen andererseits bei der Erschließung in Bohrungen meist nur eine geringe Ergiebigkeit auf. Das in oberflächennahen Quellen ausfließende Grundwasser aus der OSM gehört meistens zum Ca-Mg-HCO₃-Typus und weist eine Gesamtmineralisation im Bereich von rund 5 bis 10 mval/l (entsprechend ca. 350 bis 600 mg/l) auf (W. BALDERER, 1989, A. R. BAUMANN, 1987). Diese oberflächennahen Grundwässer aus der OSM sind also weitgehend mit jenen in den oberflächennahen quartären Lockergesteinsablagerungen vergleichbar und weisen wie diese eine nur geringe Verweilzeit im Bereich von ein bis einigen Jahren auf, entsprechend der vorhandenen Konzentration an anthropogen produziertem Tritium (z.B. ergab sich für das Wasser der Quelle 42 Schwarzenberg nach H. SCHMASSMANN et al., 1984, bei der Probenahme im Jahr 1981 ein Tritiumgehalt von $86,8 \pm 6,0$ TU).

Grundwässer, welche aus den tieferen Bereichen der OSM stammen, wie z.B. die zwei (während des Ausbaus) im Autobahntunnel Zürich-Milchbuck erfaßten Grundwässer (H. SCHMASSMANN, 1990), weisen nun einen anderen Chemismus vom Na-HCO₃-Typus auf, welcher ebenfalls (wie bei den Grundwässern aus den tiefergelegenen quartären Vorkommen) auf einen Ionenaustausch mit dem Gestein bei längerer Grundwasserverweilzeit hindeutet. Diese beträgt für diese OSM-Grund-

wässer aus Zonen mit größerer Überdeckung aufgrund der vorliegenden Tritiumbestimmungen mehr als 30 Jahre (d.h. kein anthropogen produziertes Tritium vorhanden). Aufgrund der vorliegenden $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmungen ist eine Infiltration unter aktuellen Klimaverhältnissen, d.h. bei nacheiszeitlichen Bedingungen innerhalb der engeren Region der Aufschlußgebiete wahrscheinlich (ähnliche Verhältnisse in bezug auf die Werte von ^3H , $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ zeigt das aus dem tieferen Bereich der morphologisch anstehenden Molasse aus den Schichten der OMM im Dettenbergtunnel zwischen Embrach und Bülach erfaßte Grundwasser (H. SCHMASSMANN, 1990). Dieses weist bei einer Gesamtmineralisation von 7 mval/l (resp. rund 600 mg/l) jedoch einen Chemismus vom Ca-Mg-Na- HCO_3 -Typus auf, was auf einen etwas weniger weit fortgeschrittenen Austausch mit dem Gestein hindeutet.

2.3. Grundwässer in den Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse (OMM) und im Malm (in Position als tiefliegende Formationen)

Die Ablagerungen der OMM weisen gegenüber jenen der OSM einen etwas einheitlicheren Aufbau auf (U. P. BÜCHI, 1975, U. P. BÜCHI & S. SCHLANKE, 1977). In der Position als tiefliegende Formation unterhalb dem morphologischen Talniveau (d.h., Felssohle liegt unterhalb der Talsohle) stellt die OMM einen Grundwasserleiter von regionaler Ausdehnung dar. Die in den Bohrungen 1 Aquis, 128 Mainau, 98 Konstanz und Kloten (Hohstrasse) (N. SIEBER, 1988) erfaßten Grundwässer aus der OMM gehören zum Na- HCO_3 -(Cl)- SO_4 -Typ mit einer Mineralisation von 8 bis 12 mval/l (H. SCHMASSMANN et al., 1984). Nach ihrem Chemismus handelt es sich ebenfalls um Austauschwässer, jedoch von eigener Prägung (Schoeller-Diagramm in Fig. 2.1).

In bezug auf die Infiltrationsbedingungen sind für diese Grundwässer aus der OMM aufgrund der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Fig. 2.2) folgende Hypothesen möglich:

- I Die untersuchten OMM-Grundwässer stammen von einer Infiltration in Gebieten mit einer Höhenlage zwischen rund 1200 m bis 1600 m ü.M. (gemäß Beziehung in H. SCHMASSMANN et al., 1984).
- II Diese Grundwässer aus der OMM entsprechen einer Infiltration unter kaltzeitlichen (d.h. während einer Eiszeit herrschenden) Klimabedingungen.
- III Diese Grundwässer entsprechen einer Versickerung von Oberflächenwasser (aus Flüssen oder Seen), welche ein relativ hohes mittleres Einzugsgebiet besitzen (in Frage kommen dabei als Infiltranten insbesondere Limmat, Zürichsee, Rhein und Bodensee).

Während die Hypothese I praktisch ausgeschlossen werden kann, da in einer vor-ausgesetzten Höhenlage von 1200–1600 m ü.M. praktisch keine Aufschlußgebiete der OMM bekannt sind, welche als hydrogeologisch mögliche Infiltrationszonen in Frage kommen, sind jedoch die Hypothesen II und III aufgrund der vorliegenden Daten prinzipiell möglich.

Für eine vertikale Infiltration ergäbe sich bis zum Erreichen des OMM-Aquifers, ausgehend von einer mittleren horizontalen Durchlässigkeit von 1×10^{-5} bis 1×10^{-6} m/s (U. P. BÜCHI, 1975), bei der Annahme einer rund 100mal kleineren vertikalen Durchlässigkeit sowie einer nutzbaren Porosität von 5% und eines hydraulischen Gradienten von 0,03 resp. von 0,01 eine mittlere Fließzeit für die direkte vertikale Distanz von 280 m (Entnahmezone in der OMM bei Aquis 295–500 m, U. P. BÜCHI, 1974, nach H. SCHMASSMANN et al., 1984) zwischen 156 und rund 4700 Jahren.

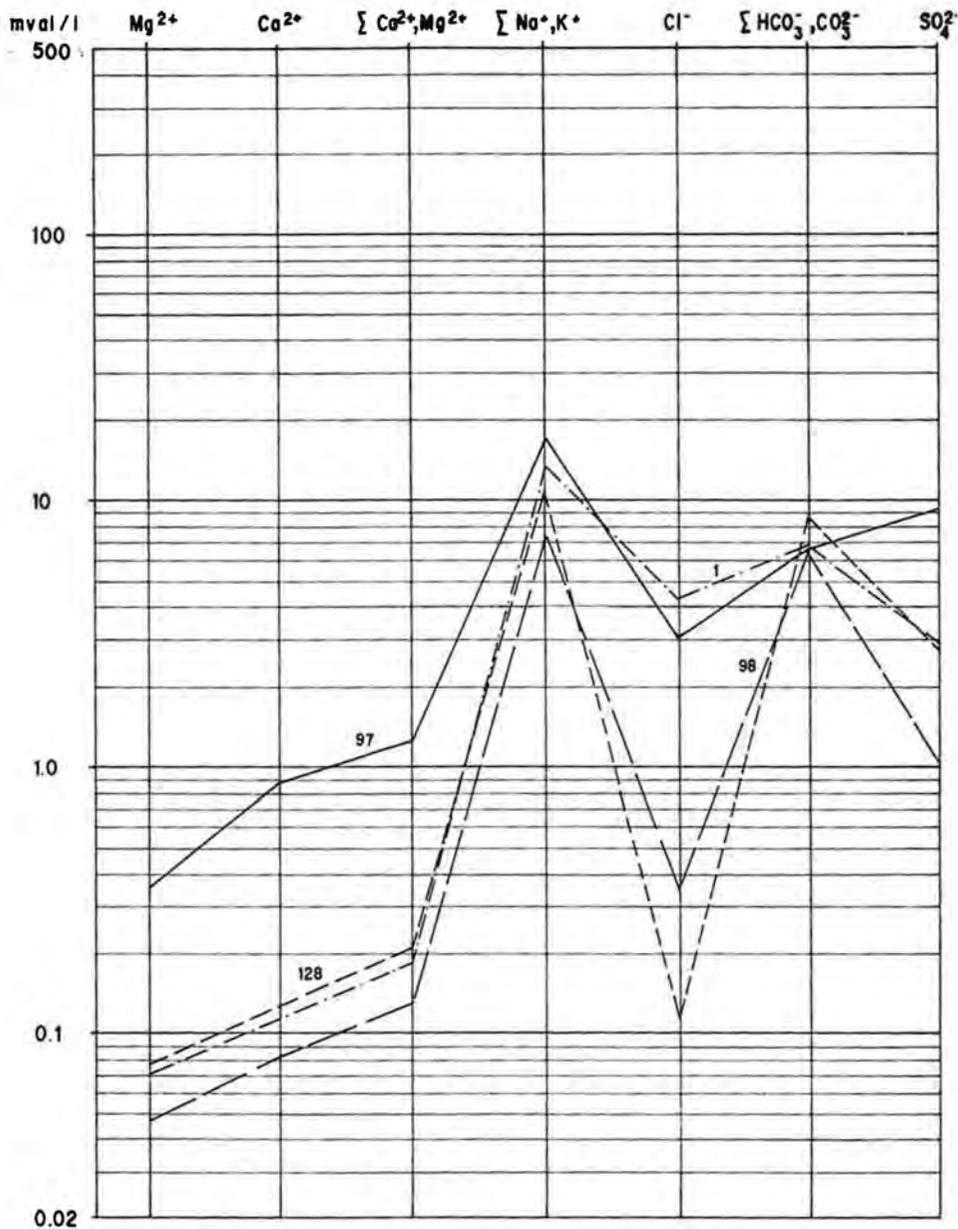


Fig. 2.1: Schoeller-Diagramm der OMM-Wässer: 1 Aqui-Zürich, 98 Konstanz, 128 Mainau und 97 Singen.

Aufgrund der ^{14}C -Bestimmung für das OMM-Grundwasser 1 Aqui mit $^{14}\text{C} = < 1,3\%$ modern kann jedoch aufgrund der fortgeschrittenen geochemischen Entwicklung (sichtbar am $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von $-3,0\text{‰}$) kein Modellalter angegeben werden. Aufgrund der ^{39}Ar -Bestimmung ergibt sich jedoch eine Verweilzeit von größer 1000 Jahren (HÜRLIMANN AG, 1988, H. SCHMASSMANN et al., 1984).

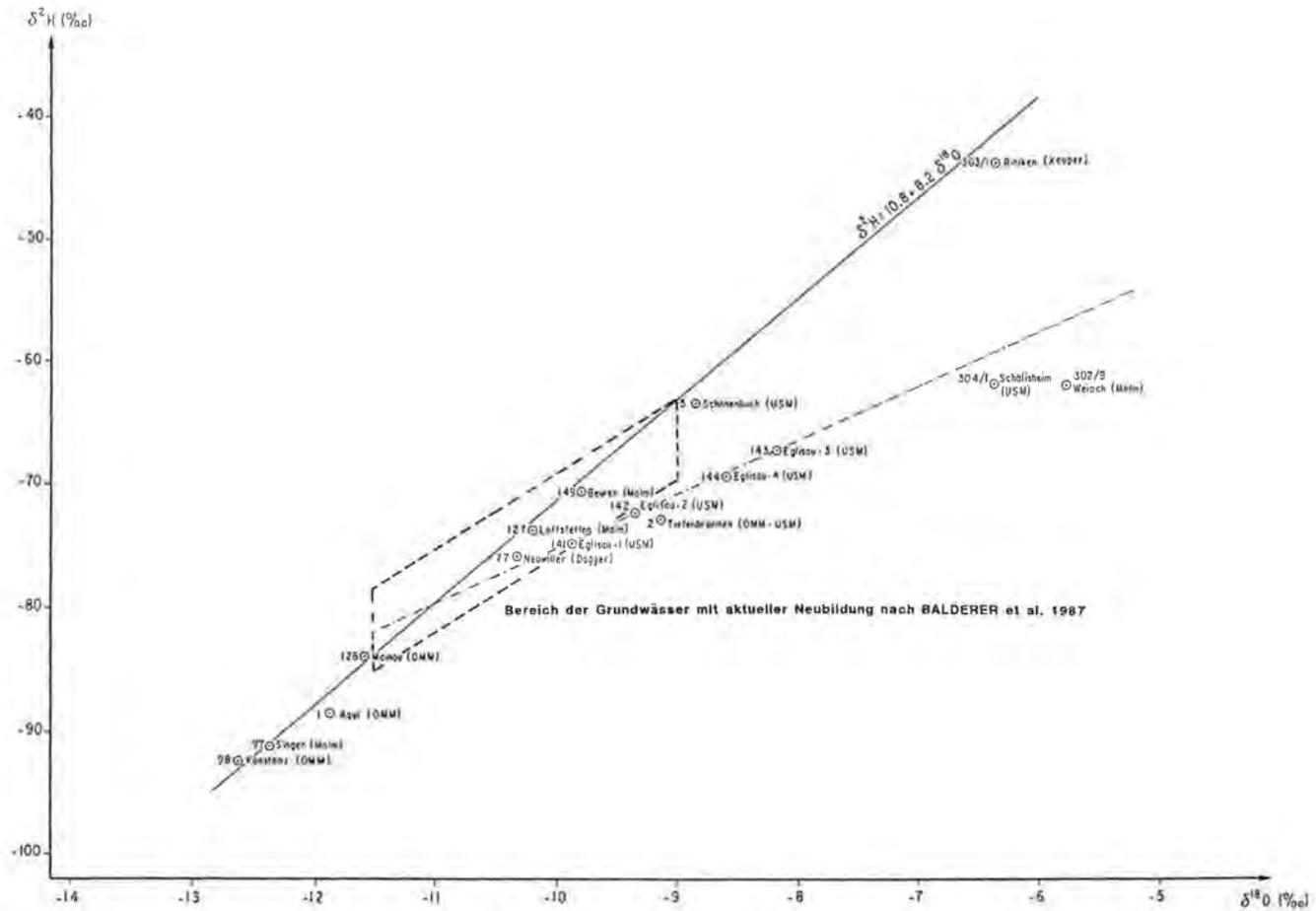


Fig. 2.2: $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm der Tiefengrundwässer aus Tertiär (OMM und USM), Jura (Malm, Dogger) und Keuper (Gansinger Dolomit/Schilfsandstein).

Für die Hypothese III einer kaltzeitlich erfolgten Infiltration dieser Tiefengrundwässer aus der OMM geben nun die Werte des Grundwassers aus dem Malm der Bohrung 97 Singen einen Hinweis, welches mit 2 l/s artesisch an einer Stelle ausfließt, welche rund 34 m höher liegt als der Bodensee (H. SCHMASSMANN et al., 1984). Für dieses Grundwasser 97 Singen, welches ebenfalls zum $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl-(SO}_4\text{)}$ -Typus gehört und ähnliche Werte der stabilen Isotope aufweist ($\delta^2\text{H} = -90,7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -12,43\text{‰}$), kann nun auch die Hypothese II ausgeschlossen werden. Somit bleibt für dieses Grundwasser aus dem Malm 97 Singen als einzige Erklärung der Bildungsbedingungen eine Entstehung durch Infiltration unter kaltzeitlichen Klimabedingungen. Dieses Grundwasser aus dem Malm der Bohrung 97 Singen gibt somit einen Hinweis, daß eine Infiltration unter kaltzeitlichen Bedingungen für ein in chemischer Hinsicht identisches Wasser wie jene in der OMM erfaßten Grundwässer tatsächlich eine Möglichkeit darstellt. (Ein weiteres Indiz stellen eventuell die Edalgaskonzentrationen dar. Nach H. SCHMASSMANN et al., 1984, wurde für Aqvi eine Ar-Konzentration von 0,87 mg/kg bestimmt, neuere Bestimmungen sind in D. RAUBER et al., 1990, in: F. J. JR. PEARSON et al., 1990, diskutiert).

Indessen darf, wie in W. BALDERER (1983, 1984) dargestellt, aus der ähnlichen chemischen Beschaffenheit und den ähnlichen Werten verschiedener Isotope (wie in diesem Fall insbesondere von $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$) nicht auf eine identische Herkunft innerhalb eines zusammenhängenden Fließsystems geschlossen werden. Aus den hydraulischen Daten (Potentialverteilung) in B. W. BERTLEFF (1984, 1986) und E. VILLINGER (1972, 1973, 1977) geht hervor, daß die Thermalwasserbohrung 97 Singen zu einem von nördlicher Richtung gegen den Rhein zuströmenden Fließsystem innerhalb des Malmkarstes gehört. Für die OMM-Wässer I Aqvi und Kloten Hohstrasse ist am ehesten eine Zugehörigkeit innerhalb eines einheitlichen generell gegen N gerichteten hydrodynamischen Fließsystems anzunehmen.

Die durchgeführten ^{14}C -Bestimmungen der weiteren untersuchten Grundwässer 98 Konstanz, 128 Mainau und 97 Singen, welche Werte unterhalb der Nachweisgrenzen ergaben, können indessen nicht zur Bestimmung von Modellaltern verwendet werden. Denn, wie die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Bereich von $-5,5$ und $-4,3\text{‰}$ zeigen, ist der in diesen Grundwässern gelöste anorganische Kohlenstoff TIC durch die abgelaufenen Auflösungs- und Austauschprozesse bereits zu einem weitgehenden Gleichgewicht mit dem Aquifergestein gelangt (H. M. BÜRGISSER et al., 1983).

2.4. Grundwässer in den Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse (USM) und im Malm

Die Grundwässer 304/1 und 302/9 aus der USM der Bohrung Schafisheim und dem verkarsteten Malm der Bohrung Weiach weisen einen Chemismus vom Na-Cl -Typus auf und besitzen zudem eine wesentlich größere Gesamtmineralisation als die bereits beschriebenen Grundwässer aus der OMM (Schoeller-Diagramm in Fig. 2.3). Einen ähnlichen Chemismus, jedoch bei geringerer Gesamtmineralisation, weisen zudem die Grundwässer aus der USM der Bohrungen 1–4 Eglisau (Nr. 141–144) und aus der OMM (+ oberster Teil der USM) der Bohrung Zürich-Tiefenbrunnen (Nr. 2, gemäß Numerierung in H. SCHMASSMANN et al., 1984) auf. Aufgrund hydrochemischer Überlegungen und der analysierten $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Fig. 2.2), welche auf einen abgelaufenen Verdunstungsprozeß oder auf eine Komponente ehemaliger mariner Herkunft hindeuten, ist anzunehmen, daß diese Grundwässer aus der USM sowie aus dem Malm der Bohrung Weiach am ehesten

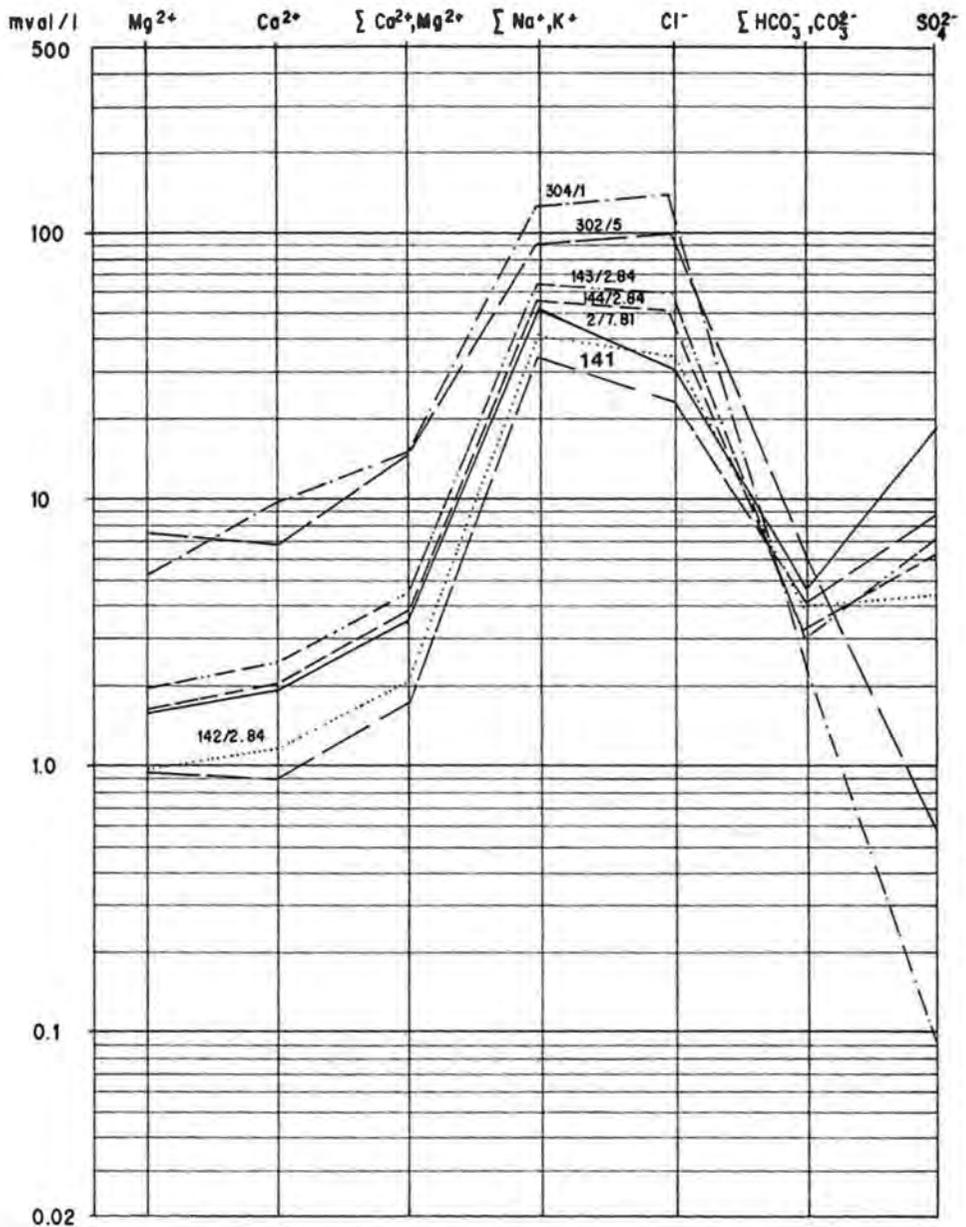


Fig. 2.3: Schoeller-Diagramm der USM-Wässer: 141 bis 144 Eglisau 1–4, 2 Tiefenbrunnen, 304/1 Schafisheim USM sowie 302/5 Weiach-Malm.

eine Mischung von ursprünglich marinem oder sogar brackischem Formationswasser mit einem durch Versickerung von Niederschlägen gebildeten Grundwasser darstellen.

Wie in H. SCHMASSMANN et al., (1984) am Beispiel der Grundwässer 141–144 Eglisau 1–4 gezeigt wird, stellen dabei die einzelnen Grundwässer wahrscheinlich

diskrete Mischungen einer Mischungsreihe, ausgehend von einem unbekanntem, noch stärker konzentrierten ursprünglichen Formationswasser dar. Dieses würde ^2H - und ^{18}O -Werte im Wertebereich von Meerwasser oder sogar von noch weiter durch Evaporationsprozesse an ^2H und ^{18}O angereichertem lagunärem bis brackischem Wasser aufweisen (siehe Kapitel 3.2.2.).

Aufgrund der vorliegenden Werte für $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ in SO_4 der in diesen Grundwässern gelösten Sulfate (Beilagen 21 und 22, in: H. SCHMASSMANN et al., 1984) ergeben sich folgende Informationen über die formationsspezifische Herkunft: Während die gelösten Sulfate in den Grundwässern aus den Mineralwasserbohrungen 141–144 Eglisau 1–4 einen $\delta^{18}\text{O}$ -Wert sowie $\delta^{34}\text{S}$ -Werte im Bereich der marinen Evaporite des Miozäns aufweisen (G. E. CLAYPOOL et al., 1980), was somit einen weiteren Hinweis auf die Entstehung durch einen Mischungsprozeß ausgehend von einem marinen ehemaligen Formationswasser ergibt, liegen die $\delta^{34}\text{S}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der gelösten Sulfate des Grundwassers 302/9 aus dem Malm der Bohrung Weiach nur für ^{18}O innerhalb dieses Wertebereiches der Evaporite des Miozäns (W. BALDERER et al., 1990). Der $\delta^{34}\text{S}$ -Wert liegt jedoch noch innerhalb des Wertebereiches der tertiären Evaporite in Mitteleuropa nach H. NIELSEN (1978).

Die Grundwässer 304/1 Schafisheim USM und 302/9 Weiach-Malm weisen jedoch trotz fortgeschrittener chemischer Entwicklung und wie die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zeigen bei praktisch erreichtem Gleichgewicht mit dem Gestein in bezug auf den gelösten anorganischen Kohlenstoff (TIC) relativ große gemessene ^{14}C -Konzentrationen auf (Kapitel 3.2.2.), welche, falls eine Anwendung der ^{14}C -Korrekturmodelle möglich ist, nur relativ kleine ^{14}C -Modellalter im Bereich von bis zu einigen 10^3 Jahren ergeben (F. J. JR. PEARSON et al., 1990). Diese ^{14}C -Konzentrationen können nun ebenfalls als ein Hinweis auf ablaufende Mischungsprozesse innerhalb dieser an und für sich stark mineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus gedeutet werden. Jedenfalls sind diese analysierten ^{14}C -Konzentrationen (selbst bei Berücksichtigung einer allfälligen Kontamination durch die Probenentnahme) nicht mit einer Herkunft ausschließlich ausgehend von einem ehemaligem Formationswasser zu vereinbaren. Eher deuten diese ^{14}C -Konzentrationen auf eine Mischung mit nacheiszeitlich, d.h. unter aktuellen Klimabedingungen infiltriertem Grundwasser hin, welches jedoch kein anthropogen produziertes Tritium enthält. Zum Beispiel sind Mischungsprozesse zwischen dem im tieferen Grundwasserstockwerk der mit quartären Ablagerungen gefüllten Erosionsrinne bei Schafisheim vorhandenen Grundwasser mit jenem innerhalb der USM denkbar. Für das Grundwasser 302/9 Weiach-Malm ist dagegen eher eine Verbindung zwischen den Grundwässern in dem Malmkarst und der USM wahrscheinlich. Jedoch wäre durch die Rinnenmorphologie mit tieferen quartären Ablagerungen, wie im Bereich des unteren Glattales nachgewiesen, auch eine Speisung durch die darin enthaltenen Grundwässer (welche kein anthropogenes Tritium enthalten) möglich.

3. Interpretation der vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich möglicher Informationen in bezug auf die Konfiguration der hydrodynamischen Fließsysteme

3.1. Hydrodynamische Fließsysteme innerhalb der quartären Lockergesteinsablagerungen

Die quartären, eiszeitlich und nacheiszeitlich gebildeten Sedimente bestehen praktisch ausschließlich aus Lockergesteinen (eine Ausnahme bilden einzig die z.T. stark verkitteten sog. höheren Deckenschotter sowie die unter Umständen stark vorbelasteten Grundmoränen). Diese quartären Lockergesteine liegen als letzte Ablagerung direkt über den lokal vorkommenden (anstehenden) Festgesteinen (z.B. über den Molasseschichten im Mittelland, den mesozoischen Serien im Tafel- und Faltenjura, dem Kristallin in der Umgebung von Säckingen).

Die grobkörnigen quartären glazialen, glazifluvialen und alluvialen Ablagerungen (Kiese, Sande, sandige Kiese) weisen eine ausgesprochen gute Durchlässigkeit auf und bilden auch die hauptsächlichsten genutzten Grundwasservorkommen entlang den oft glazial erodierten Talsohlen (Typus Urstromtäler mit Schotterfüllung nach J. HUG & A. BEILICK, 1934).

Je nach Sedimentationsbedingungen sind jedoch auch feinkörnige Ablagerungen vorhanden (Silte, Tone, tonige, siltige Kiese, z.B. als Seeablagerungen, Gehängelehme, Moränen, Grundmoränen usw.), welche eine geringe, z.T. uneinheitliche Durchlässigkeit aufweisen. Je nach lithologischer Abfolge bilden diese schlecht durchlässigen Ablagerungen in bezug zu den gut durchlässigen, grobkörnigen und damit grundwasserleitenden Ablagerungen entweder die Deckschicht, Trennschicht oder die darunterliegende Stauschicht. Sie beeinflussen damit direkt die Art und Ausbildung der Grundwasserverhältnisse in bezug auf die (vertikale) Infiltration (Speisung) von der Oberfläche her resp. den vertikalen Austausch innerhalb der Ablagerungen (mit Bildung von getrennten Grundwasserstockwerken bei vorhandenen, schlecht durchlässigen Trennschichten) sowie den Austausch mit dem darunterliegenden Festgestein. Ist z.B. eine direkt dem anstehenden Fels aufliegende Grundmoräne vorhanden, so wird ein Austausch von Grundwasser aus dem darüberliegenden quartären Grundwasserleiter mit dem Grundwasser im liegenden Festgestein weitgehend eingeschränkt. In diesem Fall bilden die Grundwasservorkommen in den quartären Ablagerungen ein eigenes hydrogeologisches Gesamtsystem (W. BALDERER, 1979, 1984). Hingegen erscheint ein Austausch zwischen dem Grundwasser in quartären Lockergesteinsablagerungen mit dem Grundwasser innerhalb des liegenden Festgesteins möglich, falls die betreffenden gut durchlässigen Lockergesteinsablagerungen direkt der Felssohle aufliegen.

Da die Durchlässigkeit des liegenden Festgesteins (je nach dessen Beschaffenheit) meist um mehrere Größenordnungen (ca. 1–4) geringer ist als jene des darüberliegenden Lockergesteins, ist in quantitativer Hinsicht (in bezug auf die Durchflussmengen innerhalb der quartären Lockergesteinsgrundwasserleiter) dieser Austausch mit dem Festgestein meist vernachlässigbar klein.

Die unterschiedlichen Verhältnisse in bezug auf die Durchlässigkeit innerhalb dieser quartären Lockergesteinsablagerungen, welche somit eigene hydrogeologische Gesamtsysteme darstellen, führen nun zur Ausbildung von eigenständigen, separaten Grundwasserzirkulationssystemen, welche lokalen hydrodynamischen Fließsysteme

men entsprechen, bei welchen nach der Definition von J. TOTH (1962) die Infiltrations- und Exfiltrationszonen unmittelbar benachbart ausgebildet sind. Solche Verhältnisse mit der Ausbildung von lokalen hydrodynamischen Fließsystemen sind, wie in Fig. 3.1 und 3.2 schematisch dargestellt (W. BALDERER, 1984) z.B. in seitlich der Talsohle vorkommenden Ablagerungen (entsprechend Seitenmoränen, Schotterterrassen etc.) sowie in den Grundwasservorkommen in fluvioglazialen Schottern entlang der Talsohlen vorhanden (mit vertikaler Infiltration, Flußinfiltration und Exfiltration in Zonen, wo der Grundwasserleiter auskeilt, z.B. bei im Flußbett anstehendem Felsriegel, W. BALDERER, 1979, 1981).

Die Grundwässer in diesen lokalen hydrodynamischen Systemen entsprechen im allgemeinen den rezenten, oberflächennahen Grundwässern. Zu diesen gehören nun sämtliche, in der Umgebung der Nagra-Tiefbohrungen untersuchten Grundwässer in quartären Lockergesteinen, welche in Tab. 2.1 dargestellt sind (vom Ca-HCO_3 - bis $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Typus mit einer Gesamtmineralisation zwischen rund 420 und 920 mg/l).

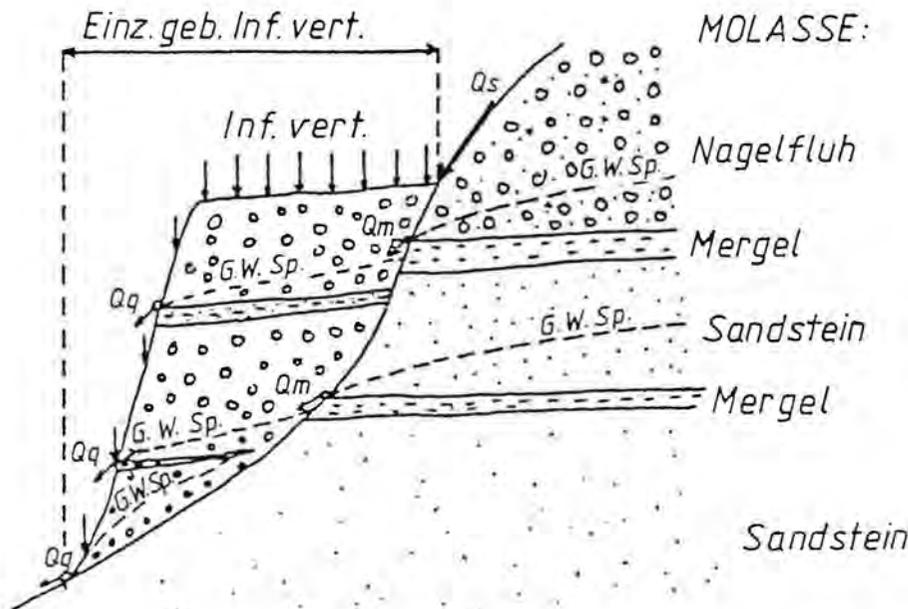


Fig. 3.1: Grundwasserverhältnisse in seitlicher, geschichteter Lockergesteinsablagerung mit durchlässigen und undurchlässigen Horizonten, angrenzend an die aus Molasse bestehende Talflanke (W. BALDERER, 1984).

Einen Sonderfall stellen die in verschiedenen Tälern im Mittelland erbohrten tieferen quartären Grundwasservorkommen dar. Diese sind meist durch mächtige, schlecht durchlässige tonige bis siltige Ablagerungen (Seeablagerungen, Stausedimente) vom oberflächennahen, genutzten Lockergesteinsgrundwasservorkommen getrennt. Dieser Stockwerkbau in quartären Ablagerungen führt zur Ausbildung von getrennten Grundwasserfließsystemen. Befindet sich das Grundwasser im tieferen Aquifer (Grundwasserstockwerk) in aktiver Zirkulation (d.h., es ist ein Grund-

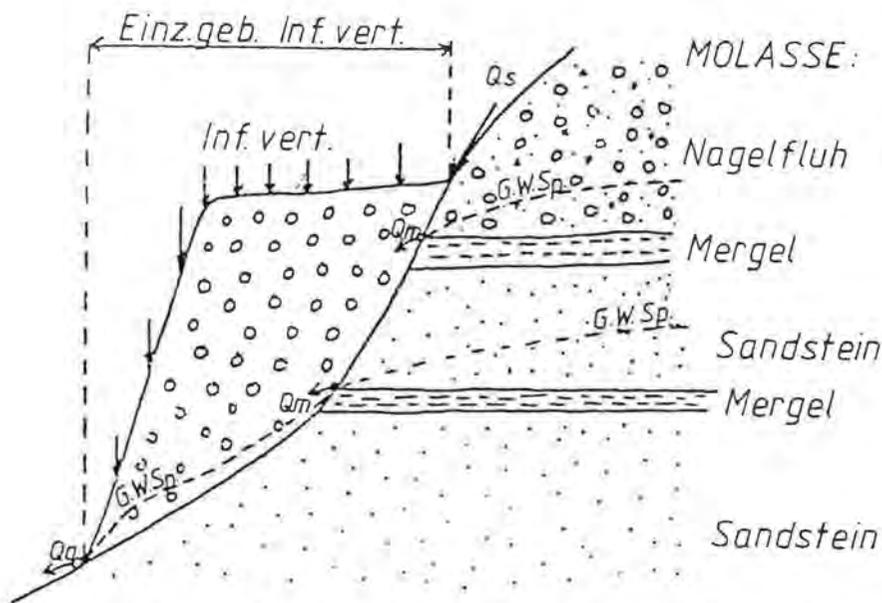


Fig. 3.2: Grundwasserverhältnisse in seilicher, annähernd homogener aufgebauter Lockergesteinsablagerung (Typus Schotterterrasse), angrenzend an die aus Molasse bestehende Talflanke (W. BALDE-
 RER, 1984).

wasseraustritt an einer eigenen Exfiltrationszone oder Quelle vorhanden, wo die betreffende grundwasserleitende Schicht an der Oberfläche aufgeschlossen ist, z.B. durch Flußerosion), so besteht die Möglichkeit, daß sogar ein intermediäres hydrodynamisches Fließsystem ausgebildet ist, welches mehrere lokale Fließsysteme unterströmt. Die Anordnung dieser tieferen intermediären Fließsysteme ist dabei vorwiegend von der (z.T. noch unsicher bekannten) Ausdehnung dieser tieferen grundwasserleitenden Schichten abhängig, welche aber oft nicht von der oberflächlichen, morphologisch sichtbaren Topographie abhängig ist, sondern von der Morphologie der Felsoberfläche, d.h., der Ausdehnung und Lage der zu einer früheren eiszeitlichen Epoche erodierten und mit durchlässigeren Lockergesteinen gefüllten Felsrinnen. Damit sind nun aber die Fließrichtungen innerhalb dieser tieferen Grundwasserstockwerke ohne genaue Kenntnis der Lage (Morphologie) der Felsrinnen sowie der darin herrschenden Potentialverhältnisse nicht prognostizierbar. Es ist aber denkbar, daß wie im Fall des Grundwasserleiters in den Hochterrassenschottern bei Leuggern die Zirkulation innerhalb solch eines Grundwasserleiters entsprechend der Morphologie der Felssohle und damit quer zu der heutigen Orographie, d.h. der sichtbaren Talmorphologie, verläuft (DONATSCH et al., 1981, NAGRA, NTB 86-10, in Vorb., Tj. PETERS et al., 1988). Oft ist jedoch der Grundwasserleiter, welcher ein solches tieferes Grundwasserstockwerk (innerhalb einer Rinnenfüllung) aufbaut, nirgends morphologisch aufgeschlossen, d.h., es existiert weder eine eigentliche eigene Infiltrations- noch eine Exfiltrationszone. (Ein Beispiel für ein solches tieferes, isoliertes Grundwasserstockwerk stellt der vermutete Verlauf des tieferen rißeiszeitlichen (?) Schotters, bedeckt mit Seeablagerungen, im Oberen Glattal dar (Th. KEMPF et al., 1986).

Ein solches isoliertes Grundwasservorkommen entspricht in diesem Fall eher einer gut durchlässigen Linse, welche rundherum durch schlechter durchlässige Gesteine begrenzt wird (z.B. mit Seeablagerungen als Deckschicht und dem schlechter durchlässigen Felsbett resp. der diesem aufliegenden Grundmoräne als Stauschicht). Eine direkte Speisung wie ein eigentlicher Abfluß sind in dieser Situation nicht vorhanden. Wie in J. TOTH (1963) für verschiedene Modellfälle dargestellt, bewirkt in diesem Fall die besser durchlässige Gesteinsschicht, welche eine Linse innerhalb von schlechter durchlässigen Gesteinen darstellt, eine Veränderung des Potentialfeldes und damit auch des Strömungsfeldes in der näheren Umgebung, ähnlich den Feldlinien eines Magnetdipols.

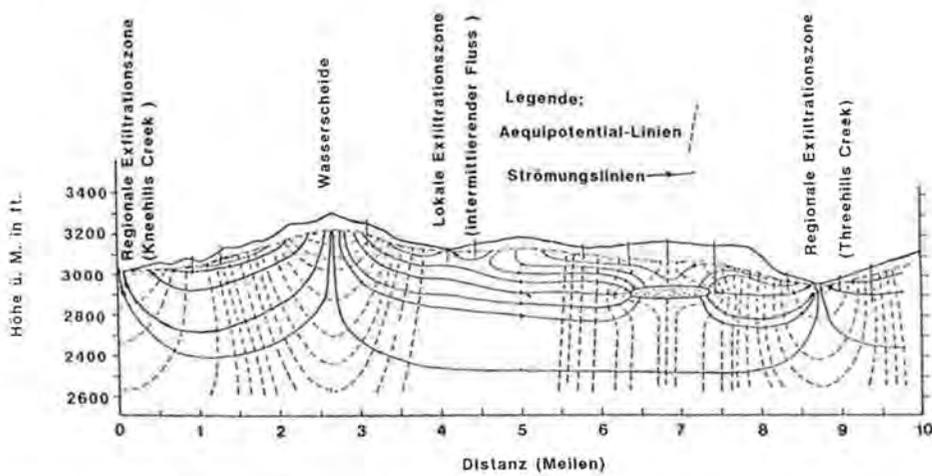


Fig. 3.3: Einfluß eines Gesteinskörpers mit wesentlich größerer Durchlässigkeit auf die Konfiguration der hydrodynamischen Fließsysteme (entnommen aus J. TOTH, 1963).

Infolge der größeren Durchlässigkeit ist der hydraulische Gradient innerhalb dieser linsenförmigen Schicht kleiner als in den umgebenden, schlechter durchlässigen Gesteinen. Diese räumliche Anordnung der Durchlässigkeit bewirkt nun die in Fig. 3.3 schematisch dargestellte Ausbildung der Grundwasserströmung (J. TOTH, 1963), indem die Stromlinien (Trajektorien) entsprechend dem herrschenden Potentialfeld an dem Ende mit dem höchsten Potential allseitig zu dieser besser durchlässigen, linsenförmigen Schicht hinein und anschließend praktisch als Parallelströmung in dieser verlaufen, um schließlich gegen das andere Ende mit dem niedrigsten Potential hin wieder allseitig (strahlenförmig) in die umgebenden, schlechter durchlässigen Gesteinsschichten auszutreten. Durch diese besser durchlässige, linsenförmige Schicht wird also entsprechend der größeren Durchlässigkeit die Grundwasserströmung kanalisiert, d.h., die Grundwasserströmung eines größeren Querschnittes von schlechter durchlässigen Gesteinsschichten wird von dieser besser durchlässigen Schicht aufgenommen, um in dieser konzentriert als Parallelströmung zu verlaufen, und wird erst an der stromabwärts gelegenen Begrenzung zum Wiederaustritt gezwungen, um erneut über einen wesentlich größeren Querschnitt verteilt in den umgebenden, schlechter durchlässigen Gesteinsschichten zu verlaufen.

Aus dieser geschilderten hydrodynamischen Situation lassen sich nun aber auch Schlußfolgerungen hinsichtlich der hydrochemischen Beschaffenheit des Grundwassers innerhalb einer solchen isolierten, gut durchlässigen Schicht ableiten:

– Diese gut durchlässige Schicht stellt ein eigentliches lokal-regionales Mischungssystem dar.

– Das Grundwasser kann, wie bereits erwähnt, diese gut durchlässige Schicht nur nach dem Transit durch die umgebenden, schlechter durchlässigen Gesteinsschichten erreichen. Da diese meist einen großen Anteil an Tonmineralien enthalten, ist zu erwarten, daß während des Transits durch diese schlecht durchlässigen Ablagerungen, welcher entsprechend der geringen Durchlässigkeit eine Verweilzeit im Bereich von ein bis einigen Jahrzehnten beansprucht, ein Ionenaustauschprozeß sich auswirken kann, sodaß aus einem ursprünglich oberflächennahen Grundwasser vom Ca-HCO_3 -Typus ein Grundwasser vom Na-HCO_3 -Typus entsteht. Im Falle von Seeablagerungen ist zu erwarten, daß durch Oxidation des darin enthaltenen organischen Kohlenstoffs der ursprünglich im infiltrierenden Grundwasser enthaltene Sauerstoff aufgebraucht wird und deshalb das Grundwasser eines solchen tieferen isolierten Grundwasserstockwerkes einen reduzierenden Charakter aufweist (d.h. praktisch ohne gelösten Sauerstoff, evtl. mit relativ hohem CO_2 - und CH_4 -Gehalt und/oder evtl. auch H_2S). Entsprechend dem zu erwartenden Bereich der Verweilzeiten sind entweder hohe Tritiumkonzentrationen (aus der Auffangszeit der atmosphärischen Nuklearexplosionen) oder Werte an der Nachweisgrenze (d.h. < 1 TU) zu erwarten. Hingegen sind in bezug auf ^{18}O und ^2H als stabile Isotope des Wassermoleküls keine unterschiedlichen Werte gegenüber dem Wasser im aktuellen hydrologischen Kreislauf zu erwarten. Da tonige Ablagerungen im allgemeinen einen etwas höheren Gehalt an Uran und Thorium aufweisen und durch deren Zerfall Helium produziert wird, ist aufgrund der theoretischen Ausbildung der Strömungssysteme eine erhöhte He-Konzentration im Grundwasser aus einem solchen isolierten tieferen Grundwasserstockwerk zu erwarten (wobei ein Teil des Heliums auch aus den unterhalb liegenden Festgesteinsschichten entsprechend der Diffusion aus der Erdkruste stammt und sich ebenfalls entsprechend dem Strömungsverlauf in der besser durchlässigen, wasserführenden Schicht ansammelt).

In bezug auf die Isotope ^{14}C und ^{13}C ist innerhalb der schlechter durchlässigen Gesteinsschichten sowohl mit ablaufenden Austauschprozessen zwischen den festen und gelösten Spezies des Kohlenstoffsystems als auch mit Reduktionsprozessen zu rechnen. Da in diesen schlechter durchlässigen Gesteinsschichten, wie erwähnt, z.T. ein größerer Anteil an organischem Material vorhanden ist, ist zu erwarten, daß durch die gleichzeitig vorkommenden Redox-, Austausch- und Auflösungsprozesse ein Gleichgewicht zwischen dem Gestein und dem gelösten anorganischen Kohlenstoff TIC erreicht wird, welches die ^{14}C -Ausgangskonzentration stark erniedrigt, aber aufgrund des ähnlichen Bereiches der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte nur schwierig zu erkennen ist und wahrscheinlich nicht durch Korrekturmodelle erfaßt werden kann.

Diese nun theoretisch abgeleitete Charakterisierung der Beschaffenheit eines solchen Grundwassers aus einem isolierten, tieferen Grundwasserstockwerk kann nun mit zwei aus der Literatur bekannten Beispielen von untersuchten Grundwässern aus solchen tiefen Aquifers in quartären Ablagerungen verglichen werden:

– Im Gebiet Hochfelden-Bülach wurde nach M. FREIMOSER et al. (1976), M. FREIMOSER & Th. LOCHER (1980) und Th. KEMPF et al. (1986) ein durch ca. 100 m mächtige Seeablagerungen abgeschirmtes tieferes Grundwasservorkommen innerhalb 50 m mächtiger Sande und Kiese entdeckt. Das Grundwasser aus diesem tieferen

Grundwasserstockwerk ist vom Na-(K)-HCO₃-Typus und weist eine Tritiumkonzentration von < 5,6 TU auf (d.h., eine anthropogene Beeinflussung kann praktisch ausgeschlossen werden). Von einem weiteren tieferen Grundwasserstockwerk im Gebiet zwischen Knonau und Maschwanden innerhalb von quartären Lockergesteinsablagerungen wird ebenfalls in Th. KEMPF et al. (1986) berichtet. Dieses Grundwasser wird als reduzierend und ebenfalls zum Na-HCO₃-Typ gehörend beschrieben. In bezug auf die Tritiumkonzentration von $0,35 \pm 0,2$ TU ist keine anthropogene Komponente festzustellen. Hingegen zeigt der Wert der $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmung von $-10,04\%$, daß eine Infiltration dieses Wassers unter den aktuellen Klimaverhältnissen anzunehmen ist.

Leider sind aus der Literatur keine weiteren Angaben über Grundwässer aus solchen tieferen Stockwerken in quartären Lockergesteinsablagerungen bekannt. Jedoch lassen sich damit die theoretisch zu erwartenden hydrochemischen Verhältnisse wenigstens teilweise bestätigen. [In bezug auf die Größenordnung der Verweilzeit sei noch folgende Abschätzung für die Situation bei Hochfelden-Bülach angebracht: Wird z.B. von einem hydraulischen Gradienten $i = 0,01$, einer nutzbaren Porosität $n' = 0,05$, einer Durchlässigkeit $K_D = 10^{-7}$ m/s und einer Mächtigkeit dieser schlechter durchlässigen Schicht von 100 m ausgegangen, so ergäbe sich für eine direkte vertikale Fließstrecke nach dem Gesetz von DARCY (Gleichung 3.1 in Kapitel 3.2.2.) eine Fließzeit von rund 160 Jahren.]

Durch die Nagra-Tiefbohrung 304 Schafisheim wurde nun ein weiteres tieferes Schottergrundwasservorkommen entdeckt, welches rund 72 m mächtig ist und von rund 59 m mächtigen Seeablagerungen sowie 55 m mächtigen Rutschmassen aus der USM überdeckt ist und seinerseits direkt dem darunterfolgenden Fels, bestehend aus Festgesteinen der USM, aufliegt. Leider sind keine Wasserproben aus diesem tieferen Lockergesteinsaquifer entnommen worden, sodaß keine weiteren Aussagen über die Beschaffenheit dieses Grundwassers gemacht werden können. Entsprechend den vorangehend dargestellten theoretischen Überlegungen ist es nun jedoch möglich, daß dieses tiefere Grundwasserstockwerk ebenfalls eine Rolle als Mischungskörper spielt. Dadurch könnten Grundwässer, welche aus dem oberflächennahen Grundwasserleiter oberhalb der Deckschicht stammen, in diesem mit Grundwässern der USM gemischt werden. Die entstandene Mischung würde anschließend aus diesem Grundwasserstockwerk teilweise wiederum in die USM-Schichten infiltrieren. Diese hydrodynamische Situation ist insbesondere deshalb denkbar, da die Durchlässigkeit der Schichten der USM je nach lithologischer Ausbildung etwa gleich groß bis sogar etwas größer ist als jene der tonigen Seeablagerungen.

Diese theoretisch abgeleiteten Verhältnisse werden auch durch die Untersuchungsergebnisse des Grundwassers aus der erst kürzlich (1989) erfolgten Bohrung Seon bestätigt (F. MATOUSEK, 1989 und mündl. Mitt.). Dabei wurde, wie in Kapitel 2.1. bereits erwähnt, rund 267 m u.T. ein Schottervorkommen gefunden, welches bis zu der Terrainoberfläche mit feinkörnigen See- und Moränenablagerungen bedeckt ist und auf einer aus Grundmoräne bestehenden Unterlage ruht. Das Grundwasser weist bei einem Chemismus vom Ca-Mg-Na-HCO₃-Typus eine unterhalb der Nachweisgrenze liegende Tritiumkonzentration von < 1,5 TU auf. Dies bedeutet, daß dieses Grundwasser keine anthropogene Beimischung von Tritium enthält resp. eine Verweilzeit von größer als rund 30 Jahren aufweist. Hingegen deuten sowohl die chemische Beschaffenheit und die Werte für $\delta^2\text{H} = -76,2\%$ und $\delta^{18}\text{O} = -10,78\%$ als auch das Resultat der ¹⁴C- und ¹³C-Bestimmungen (mit $A^{14}\text{C} = 16,4 \pm 1,4\%$

modern und $\delta^{13}\text{C} = -9,9\text{‰}$) auf eine komplexe Herkunft mit verschiedenen Mischungskomponenten hin (F. MATOUSEK, 1989), wie dies nach dem vorangehend dargestellten theoretischen Konzept nach J. TOTH (1963) auch zu erwarten ist.

3.2. Hydrodynamische Fließsysteme innerhalb der Ablagerungen der Molasse (OSM, OMM und USM)

3.2.1. Generelle Beobachtungen zu den hydrodynamischen Fließsystemen aufgrund der Beziehung zwischen der hydrochemischen Beschaffenheit der Grundwässer und den hydrogeologischen Verhältnissen

In den Gebieten, wo die Ablagerungen der Molasse morphologisch anstehend sind, oder wo diese im Bereich der Talsohlen durch eiszeitliche und nacheiszeitliche Einflüsse erodiert und anschließend mit gut durchlässigen Lockergesteinsablagerungen bedeckt wurden, sind lokale bis intermediäre hydrodynamische Fließsysteme ausgebildet. Grundwässer, welche aus den Ablagerungen der Molasse (OSM, OMM und USM) in diesen hydrogeologischen Situationen stammen, zeigen Einflüsse oberflächennaher Herkunft und der Infiltration unter aktuellen klimatischen Bedingungen. Meist handelt es sich dabei um Ca-HCO_3 bis Ca-(Mg)-HCO_3 -Wässer, welche gegenüber Calcit und Dolomit gesättigt resp. leicht untersättigt sind (W. BALDERER, 1989), die anthropogen produziertes Tritium und $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Bereich der aktuellen Oberflächenwässer und Niederschläge enthalten (H. SCHMASSMANN et al., 1984). In hydrogeologischer Situation, wo die Ablagerungen der Molasse in ungestörter Lage unterhalb der Talsohle vorhanden sind und von stratigraphisch jüngeren, schlecht durchlässigen Ablagerungen bedeckt werden, sind je nach Ausbildung dieser Überdeckung innerhalb der Molasse (insbesondere innerhalb der Ablagerungen der OMM und USM) intermediäre bis sogar regionale hydrodynamische Fließsysteme zu erwarten.

Die in der bedeckten tieferen Molasse (OMM und USM) und teilweise auch im Malm als Ablagerungen von regionaler Verbreitung innerhalb der Nordschweiz vorhandenen Grundwasservorkommen stellen dabei einerseits bedingt durch den lithologisch-faziellen Aufbau getrennte hydrogeologische Einzelsysteme (im Sinne von gut durchlässigen, aus Sandstein und Konglomeraten resp. aus verkarsteten Kalken aufgebauten wasserführenden Schichten und Linsen, begrenzt durch schlecht durchlässige, umgebende mergelige und tonige Serien), jedoch andererseits aber auch ein teilweise verbundenes (z.B. durch Schichtlücken), einheitliches hydrogeologisches Gesamtsystem dar (analog den Verhältnissen in der OSM, W. BALDERER, 1979, 1983).

Die in diesen tiefliegenden Ablagerungen der OMM, USM und des Malms vorhandenen Grundwässer sind dabei über größere Strecken von direkten oberflächlichen Einflüssen (durch Infiltration von oberflächennahem Grundwasser) durch mächtige, schlecht durchlässige Deckschichten abgeschirmt. In gewissen Regionen mit stark durch glaziale Erosion übertieften Tälern oder Rinnen, die unter der aktuellen Morphologie durch mächtige quartäre Ablagerungen verborgen sind (welche, wie bereits erwähnt, z.T. ein tieferes Grundwasserstockwerk in gut durchlässigen Lockergesteinen enthalten), ist jedoch eine Beeinflussung durch Grundwässer aus dem Quartär (mit oberflächennahen Einflüssen) zu erwarten.

Gegenüber den stratigraphisch tieferliegenden Aquifer-Formationen des Oberen Keupers (Gansinger-Dolomit/Schilfsandstein) sowie des (Oberen) Muschelkalkes sind die Grundwässer in der Molasse und im Malm in der Region der Nordschweiz

durch die noch schlechter durchlässigen tonig-mergeligen Ablagerungen des Dogger und des Lias weitgehend getrennt (NAGRA, 1988). Allfällige Verbindungen sind dabei höchstens in Zonen mit sekundären Zirkulationssystemen bedingt durch spezielle tektonische Situationen wie Staffelbrüche und Überschiebungszonen denkbar.

In den Ablagerungen der OMM, der USM und des (Oberen) Malms (verkarstete Kalke des Kimmeridgien) sind, wo diese als tiefliegende Formation unterhalb des Basisniveaus der Talsohle vorkommen, in hydrochemischer Hinsicht, wie in den Kapiteln 2.3. und 2.4. im einzelnen beschrieben, zwei verschiedene Typen von Grundwässern anzutreffen:

– Vorwiegend innerhalb der OMM und teilweise im Malm ist ein relativ schwach mineralisiertes Austauschwasser vom Na-HCO₃-Typus anzutreffen. Entsprechend den kleinen δ²H- und δ¹⁸O-Werten ist für diese Grundwässer entweder eine Infiltration unter kaltzeitlichen Bedingungen (d.h., welche also während der Zeitperiode des Pleistozäns stattgefunden hat) oder eine Infiltration von Oberflächenwasser aus den Einzugsgebieten des Rheins resp. der Limmat anzunehmen. Entsprechend den analysierten natürlichen Radioisotopen sind in bezug auf die Verweilzeit folgende Angaben möglich: Tritium: Verweilzeit > 25 Jahre für alle untersuchten Grundwässer 1 Aqvi, 128 Mainau, 98 Konstanz, 97 Singen und Kloten-Hohstrass; ³⁹Ar: > 1000 Jahre (für 1 Aqvi Zürich); ¹⁴C: für 1 Aqvi, 128 Mainau, 98 Konstanz und 97 Singen gemessene Aktivität an resp. unterhalb Nachweisgrenze, jedoch infolge fortgeschrittenen Austausches mit dem Gestein kann kein definiertes Modellalter angegeben werden. Für das Grundwasser aus dem Malm der Bohrung 97 Singen kann nun immerhin aufgrund des gemessenen piezometrischen (artesischen) Niveaus eine Beeinflussung durch die in Frage kommenden Oberflächengewässer ausgeschlossen werden, sodaß für dieses Grundwasser eine Entstehung unter kaltzeitlichen Bedingungen wahrscheinlich ist.

– Innerhalb der USM (resp. im untersten Teil der OMM und im obersten Teil der USM in der Bohrung 2 Tiefbrunnen) und im Malm der Bohrung Weiach (Proben 302/5-9) wurde ein wesentlich stärker mineralisiertes Grundwasser vom Na-Cl-Typus (bis zum Na-Cl-SO₄-HCO₃-Typ) angetroffen.

Diese zwei beobachteten verschiedenen Grundwassertypen innerhalb der OMM, der USM und des Malm passen in die von K. LEMKE (1976) aufgrund von Beobachtungen in Erdölbohrungen entworfene Theorie, nachdem diese salinen Na-Cl-reichen Grundwässer ursprünglich aus der OMM stammen und allmählich in die USM und in den Oberen Malm abgesunken sind. Aufgrund der vorliegenden Isotopen und hydrochemischen Untersuchungen ist es nun aber möglich, ein wesentlich differenzierteres Bild der ablaufenden Vorgänge innerhalb der Aquifere in der OMM, USM und im Malm zu rekonstruieren, welches sich auch mit dem hydrogeologischen Verständnis im Sinne der hydrodynamischen Fließsysteme vereinbaren läßt.

3.2.2. Interpretation der speziellen hydrodynamischen Aspekte der Resultate der Isotopen- und hydrochemischen Untersuchungen der Tiefgrundwässer aus der USM und dem Malm

Entsprechend dem Konzept von K. LEMKE (1976) stellen die tieferen hochmineralisierten Na-Cl-reichen Grundwässer gegenüber den schwach mineralisierten Grundwässern vom Na-HCO₃-Typus die ursprüngliche, vorangehende Bildung innerhalb der OMM, USM und des Malm dar. Falls diese Theorie zutrifft, sollten theoretisch sowohl diese hochmineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus in der USM als auch die als Verdünnungsreihe in H. SCHMASSMANN et al. (1984) betrachteten Grundwässer aus den vier Bohrungen 141–144 Eglisau, falls diese im Über-

gangsbereich der beiden Grundwassertypen durch Mischungsvorgänge aus diesen hervorgegangen sind, ebenfalls sehr niedrige ^{14}C -Konzentrationen (an resp. unterhalb der Nachweisgrenze) aufweisen.

Die in den untersuchten Tiefengrundwässern aus der USM und dem Malm (141 Eglisau 1, 304/1,2 Schafisheim und 302/5-9 Weiach) bestimmten, relativ hohen ^{14}C -Konzentrationen können nun jedoch durch einen Verdrängungsprozeß der Tiefengrundwässer entsprechend der Theorie von K. LEMKE (1976) nicht erklärt werden. Vielmehr muß angenommen werden, daß abhängig von der herrschenden Potentialverteilung in den Aquifers der OMM, der USM und des Malms auch lokale Mischungsprozesse mit rezenten, aus den oberflächennahen Lockergesteinsaquifers stammenden Grundwässern vorkommen. In der hydrodynamischen Deutung würden somit diese Resultate auf Zonen hinweisen, in welchen das hydraulische Potential in den tieferen Aquifers gegenüber den oberflächennahen Aquifers geringer ist und deshalb direkte oder indirekte Infiltrationsprozesse stattfinden. Die USM- und Malm-Grundwässer 141 Eglisau 1, 304/1,2 Schafisheim und 302/5-9 Weiach stellen deshalb aufgrund der gemessenen, relativ hohen ^{14}C -Konzentrationen (Tab. 3.1) günstige Beispiele dar, um diese Hypothese einer möglichen oberflächennahen Beimischung abzuklären.

Tab. 3.1: Beispiele von Tiefengrundwässern aus der USM und dem Malm.

Tiefengrundwasser	Gemessene Werte der Wasserprobe					
	^3H TU	$\delta^2\text{H}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$\delta^{14}\text{C}$ ‰ mod.	HCO_3^- mg/kg
141 Eglisau 1	<0,7	-7,48	-9,89	-8,7	11,1 ± 2,1	241
302/5-9 Weiach	<3,6 <5,7	-61,8	-5,77	-4,2	12,47 ± 0,25	466 (Mittelwert)
304/1,2 Schafisheim	<1,2 (0,6 ± 0,2)	-61,7	-6,4	-8,5	40,46 ± 0,7	153 (Pumpversuch) 110 (Druckprobe)

Beispiel 1: Grundwasser aus der Bohrung 141 Eglisau 1:

Die Rolle der aktuellen Infiltration läßt sich am anschaulichsten am Beispiel der Beobachtungen an der Bohrung 141 Eglisau ableiten. Wie in H. SCHMASSMANN et al. (1984) erwähnt, liegt die Bohrung 141 Eglisau 1 in unmittelbarer Nähe des nördlichen Rheinuferes (Th. KEMPF et al., 1986). Vor dem Bau und Betrieb des Kraftwerkes Eglisau im Jahre 1920 lag das piezometrische Niveau des Grundwassers in dieser Bohrung 141 Eglisau 1 mit rund 342 m ü.M. höher als der damalige Rheinspiegel. Seit der Inbetriebnahme dieses Kraftwerkes liegt nun der Rheinspiegel entsprechend der Staukote von 343,5 m um rund 1,5 m höher als das piezometrische Niveau des artesisch ausfließenden Grundwassers der Bohrung 141 Eglisau 1. Das Ergebnis der im Jahr 1981 durchgeführten Tritiumbestimmung mit $^3\text{H} < 0,7$ TU zeigt nun,

daß in dem aus dieser Bohrung stammenden Wasser keine anthropogene Beimischung vorhanden ist. Dies bedeutet, daß dieses aus der Bohrung 141 Eglisau 1 ausfließende Grundwasser eine Verweilzeit von > 25 Jahre (nach dem Piston-Flow-Modell) aufweist. Das Resultat der ^{14}C -Bestimmung mit $A^{14}\text{C} = 11,1 \pm 2,1\%$ modern/ $\delta^{13}\text{C} = -8,7\%$ kann hingegen als ein Hinweis für einen stattfindenden Infiltrationsprozeß gedeutet werden: Wird angenommen, daß in dem untersuchten Wasser nur eine einzige jüngere Grundwasserkomponente vorhanden ist, welche eine ^{14}C -Aktivität im Bereich zwischen 85%–50% modern enthält, und daß die Konzentration des gelösten anorganischen Kohlenstoffs TIC in beiden Mischungskomponenten eine vergleichbare Größe aufweist, so ergibt sich für diese jüngere Wasserkomponente ein Mischungsanteil im Wasser 141 Eglisau 1 von rund 13–22%. Diese Deutung steht nicht im Widerspruch mit dem Resultat der Tritiumbestimmung, da diese jüngere Komponente ohne weiteres eine Verweilzeit zwischen > 25 Jahren und rund 60 Jahren (d.h. innerhalb der Zeitspanne seit Beginn des Rheinstaus durch das Kraftwerk Eglisau) aufweisen kann.

Von dieser Zeitspanne ist auszugehen, falls angenommen wird, daß dieser Prozeß der Infiltration von oberflächennahem Grund- oder Oberflächenwasser zum Grundwasser in der USM und im oberen Malm erst seit dem Zeitpunkt des Aufstaus des Rheins durch das Kraftwerk Eglisau stattfindet und durch die dabei erfolgte Umkehr des hydraulischen Gradienten bedingt ist.

Ausgehend von dieser Voraussetzung ergibt sich nun die Möglichkeit, unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Daten gemäß H. SCHMASSMANN et al. (1984) die mittlere Durchlässigkeit in bezug auf die vertikale Infiltration der rund 225 m mächtigen Schichten der USM (ab Ansatzpunkt in der Bohrung Eglisau 1) bis zu der Zone des vermutlichen Grundwasserzuflusses (nach J. HUG, in: J. CADISCH, 1937) im oberen Teil der verkarsteten Malmkalke (bis zur Endteufe in 241 m ab Ansatzpunkt) zu bestimmen.

Ausgehend vom Gesetz nach DARCY ergeben sich für die vertikale Infiltration (nach dem auch in E. VILLINGER, 1977, und in B. W. BERTLEFF, 1984 und 1986, angewendeten Prinzip des sog. Leaky Aquifers) folgende Beziehungen:

$$V_r = \frac{V_D}{n'} = \frac{K_D \cdot i}{n'} = \frac{x}{t_r} \quad (3.1)$$

und somit:

$$K_D = \frac{x n'}{t_r i} \quad (3.2)$$

wobei:

- K_D : Durchlässigkeit (hydraulische Leitfähigkeit) in (m/s),
- x : vertikale Fließstrecke (m),
- n' : nutzbare resp. hydraulisch wirksame Porosität,
- t_r : Fließzeit (s resp. a),
- $i = \frac{dh}{dl}$: hydraulischer Gradient ($\approx \frac{\Delta h}{x}$),
- Δh : Potentialdifferenz oberflächennahes Grundwasser zu Grundwasser im USM-Malm-Aquifer (m),
- V_r : reelle Fließgeschwindigkeit (m/s),
- V_D : spezifischer Durchfluß resp. Filtergeschwindigkeit nach DARCY (m/s).

Ausgehend von einer nutzbaren Porosität von 5%, einer Fließzeit von ≥ 25 Jahren, einer Potentialdifferenz von 1,5 m und einer Fließstrecke von 225 m ergibt sich ein Wert für K_D von $9,5 \times 10^{-7}$ m/s. Dieser Wert entspricht der minimalen Fließzeit und damit dem Maximalwert der vertikalen Durchlässigkeit. Wird von einer mittleren Verweilzeit von 60 Jahren ausgegangen, also entsprechend der Zeit seit dem Beginn des Rheinstaus, so ergibt sich ein Wert von $K_D = 4,0 \times 10^{-7}$ m/s, welcher entsprechend der aufgrund der ^{14}C -Konzentration bereits vorhandenen jüngeren Komponente von ca. 13–22% eher einem Mittelwert der vertikalen Durchlässigkeit entsprechen dürfte.

Zur weiteren Diskussion der nun dargestellten Mischungsbeziehung sind ausgehend von den Werten des Grundwassers 141 Eglisau 1 in Tab. 3.1 und den vorausgesetzten Werten für die Mischungskomponente oberflächennaher Herkunft (gemäß Tab. 3.2, entsprechend einem durch Rheinfiltrat gebildeten Grundwasser) die in Tab. 3.3 dargestellten Werte der stabilen Isotope für das ungemischte Endglied berechnet worden. Die berechneten $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für dieses Endglied ohne oberflächennahe Beimischung liegen nun mit $\delta^2\text{H} = -72,7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -9,5\text{‰}$ und $\delta^2\text{H} = -70,8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -9,2\text{‰}$, wie aus Fig. 3.4 hervorgeht, recht nahe bei den entsprechenden Werten des Grundwassers 142 aus der rund 800 m rheinabwärts und 200 m vom südlichen Ufer entfernt gelegenen Mineralwasserbohrung Eglisau 2. Dies würde nun bedeuten, daß vor dem Auftreten einer oberflächennahen Beimischung infolge des Aufstaus des Rheins das Grundwasser aus der Bohrung Eglisau 1 eine ähnliche Beschaffenheit wie das heutige Grundwasser 142 Eglisau 2 aufgewiesen haben könnte. Die unterschiedliche Cl-Konzentration und Gesamtmineralisation zwischen 141 Eglisau 1 und 142 Eglisau 2 ist in diesem Fall auch durch Verdünnung mit dieser oberflächennahen Beimischung zu erklären. Die berechneten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte dieses Endgliedes ohne oberflächennahe Beimischung von $-7,2\text{‰}$ und $-7,6\text{‰}$ liegen innerhalb des Wertebereichs des Karbonats aus Molassesandsteinen (H. M. BÜRGISSER et al., 1983). Mit einer solchen Herkunft stimmt auch die relativ geringe HCO_3^- -Konzentration von 241 mg/l überein. In diesem Fall müßte das ursprüngliche, ungemischte Grundwasser eher aus der USM selbst stammen. Eine weitere Beurteilung ist jedoch nicht möglich, da keine ^{13}C -Werte von Grundwässern vom Na-Cl-Typus aus USM und Malm mit geringeren ^{14}C -Konzentrationen (resp. an der Nachweismenge) bekannt sind. Es ist zumindest festzuhalten, daß aufgrund der Isotopenwerte als auch der chemischen Beschaffenheit die Präsenz einer Beimischung oberflächennaher Herkunft im Grundwasser 141 Eglisau 1 nicht auszuschließen ist.

Beispiel 2: Grundwasser 302/5-9 aus dem Malm der Nagra-Tiefbohrung Weiach (Entnahmezone 242,9–267,0 m)

Das aus dem Malm der Bohrung Weiach geförderte Grundwasser (Probe 302/5-9, Intervall 242,9–267,0 m) entspricht nach seiner chemischen Beschaffenheit den Na-Cl-Wässern aus den Bohrungen Eglisau 1–4 und der Tiefbohrung Schafisheim (304/1).

Aufgrund der Resultate der vorliegenden Tritiumbestimmungen von $< 3,6$ TU (Probe 302/9, Grundwasserentnahme während des Pumpversuchs vom 5. 3. 1983) und $< 5,7$ TU (Grundwasserprobe 302/6 aus der oberen DST-Kammer, während des anschließenden Ausbaus der Testgeräte am 6. 3. 1983 entnommen) sowie der chemischen Parameter und der geförderten Wassermenge von 55 m^3 (C. WITTEW, 1986) darf angenommen werden, daß die Kontamination mit dem Wasser der ver-

Tab. 3.2: Vorausgesetzte Werte für die Mischungskomponente oberflächennaher Herkunft in den betrachteten Tiefengrundwässern (* Jahresmittelwerte des Bodensees für 1979 und 1980 gemäß H. SCHMASSMANN et al., 1984).

Betrachtetes Tiefengrundwasser	Mischungskomponente I (Oberflächenwasser, Grundwasser aus Lockergesteinsaquifer)	Mischungskomponente I gemessene (Mittel-)Werte oder vorausgesetzte Werte					Resultierender Mischungsanteil K_W (%) H_2O (Gl. 8.5)
		HCO_3^- (mg/kg)	δ^2H ‰ (SMOW)	$\delta^{18}O$ ‰ (SMOW)	$\delta^{13}C$ ‰ (PDB)	^{14}C ‰ mod.	
141 Eglisau 1	Rheininfiltrat (mit direkter Infiltration in USM)	240	-88,8*	-12,35*	-19,0	85	13,1
			-88,8*	-12,35*	-12,5	50	22,3
302/5-9 Weiach	Lokales Schottergrundwasser ($\delta^{13}C$ - und ^{14}C -Werte mit Berücksichtigung des Transits in USM)	365 (350–380)	-72,0	-10,00	-14,5	85	19,7
			-72,0	-10,00	-12,5	50	35,7
304/1,2 Schafisheim (mit $[HCO_3^-]$ = 110 mg/l)	Lokales Schottergrundwasser ($\delta^{13}C$ - und ^{14}C -Werte für unteres Grundwasserstockwerk)	350	-72,0	-10,00	-14,5	85	11,0
		350	-72,0	-10,00	-12,5	70	12,5
		350	-72,0	-10,00	-12,5	50	15,4
304/1,2 Schafisheim (mit $[HCO_3^-]$ = 153 mg/l)	Lokales Schottergrundwasser ($\delta^{13}C$ - und ^{14}C -Werte für unteres Grundwasserstockwerk)	350	-72,0	-10,00	-14,5	85	15,8
		350	-72,0	-10,00	-12,5	70	18,1
		350	-72,0	-10,00	-12,5	50	22,3
304/1, 2 Schafisheim (ohne Berücksichtigung der $[HCO_3^-]$ -Konzentration)	Lokales Schottergrundwasser ($\delta^{13}C$ - und ^{14}C -Werte für unteres Grundwasserstockwerk)		-72,0	-10,00	-14,5	85	47,6
			-72,0	-10,00	-12,5	70	57,8

Tab. 3.3: Resultierende Werte für das ungemischte Endglied tiefer Herkunft der betrachteten Mischungsbeziehung.

Tiefengrundwässer als betrachtete Mischung	Resultierende Werte für das ursprüngliche ungemischte Endglied (Komponente II) tiefer Herkunft (Annahme $A^{14}C \approx 0$)					
	HCO_3^- (mg/kg)	δ^2H ‰ (SMOW)	$\delta^{18}O$ ‰ (SMOW)	$\delta^{13}C$ ‰ (PDB)	^{14}C ‰ mod.	Resultierender Mischungsanteil (100- K_{Ψ}) % H_2O
141 Eglisau 1	241,2	-72,7	-9,5	-7,2	0	86,9
	241,3	-70,8	-9,2	-7,6	0	77,7
302/5-9 Weiach Malm	490,8	-59,3	-4,7	-2,3	0	80,3
	522,0	-56,1	-3,4	-1,0	0	64,3
304/1,2 Schafisheim (mit $[HCO_3^-]$ = 110 mg/l)	80,5	-60,4	-6,0	-5,3	0	89,0
	75,7	-60,2	-5,9	-5,9	0	87,5
	66,4	-59,8	-5,7	-4,7	0	84,6
304/1,2 Schafisheim (mit $[HCO_3^-]$ = 153 mg/l)	116,1	-59,8	-5,7	-5,4	0	84,2
	109,5	-59,4	-5,6	-5,7	0	81,9
	96,5	-58,7	-5,4	-4,3	0	77,7
304/1,2 Schafisheim (ohne Berücksichtigung der $[HCO_3^-]$ -Konzentration)		-52,3	-3,1	-3,0	0	52,4
		-47,6	-1,47	-3,0	0	42,2

wendeten Tonsüßwasserspülung weniger als 4% betragen dürfte. (Die relativ hohen Nachweisgrenzen der Tritiumbestimmungen sind dabei infolge der geringen zur Verfügung stehenden Probenvolumen einzig durch die Meßmethodik bedingt und erlauben keine weitere Aussage.)

Das Resultat der ^{14}C -Bestimmung der Grundwasserprobe 302/6 mit $A^{14}\text{C} = 12,47 \pm 0,25\%$ und $\delta^{13}\text{C} = -4,20\%$ kann deshalb nicht (oder jedenfalls nur zu einem geringen Anteil von $< 5\%$) durch eine Beimischung von Wasser der Bohrspülung erklärt werden. (Wie in Tab. 3.1 und 3.2 dargestellt, ist die HCO_3^- -Konzentration des Wassers im oberflächennahen Grundwasservorkommen, aus welchem auch das Trinkwasser der Wasserversorgung Weiach stammt, mit rund 350–380 mg/l sogar etwas geringer als jene des beprobten Malmgrundwassers 302/5-9 mit 466 mg/l.)

Das gemessene hydraulische Potential der beprobten wasserführenden Strecke des Malms von 242,9–267,0 m liegt mit 336,5 m ü.M. (approximativer Wert für Süßwasserdruckhöhe, F. PASQUIER, Nagra, mündl. Mitt., 1990) jedoch höher als der Grundwasserspiegel des oberflächennahen Grundwassers im Niederterrassenschotter, welcher auf rund 332–333 m ü.M. liegt (gemäß Grundwasserkarte 1 : 25 000 des Kantons Zürich). Für die oberste getestete Strecke im Malm von 188–202 m wird ebenfalls ein hydraulisches Potential von 336,5 m angegeben. Damit ist ein Zusammenhang mit dem bereits erwähnten Aufstau des Rheins auf die Kote 343,5 m durch das Kraftwerk Eglisau zumindest für diese oberste getestete Zone des Malms nicht auszuschließen. Das Stauwehr des Kraftwerks befindet sich unterhalb Rheinfeldens im Bereich der anstehenden Schichten der USM, nur rund 1 km rheinaufwärts vom Standort der Bohrung Weiach entfernt. Durch diesen Aufstau des Rheins wurde oberhalb des Stauwehres lokal eine Umkehr des Potentialgefälles bewirkt, da im natürlichen Zustand der Rhein in diesem Gebiet eher die regionale und lokale Exfiltrationszone darstellt. Um diese Hypothese einer möglichen Beeinflussung zu prüfen, wird wiederum angenommen, daß diese gemessene ^{14}C -Konzentration der Probe 302/6 Weiach-Malm ausschließlich durch eine jüngere Wasserkomponente bedingt ist.

Diese kann entweder einer Infiltration von Oberflächenwasser aus dem Rhein oder von Grundwasser aus dem Rheingrundwasserstrom im aufgestauten Bereich oberhalb Herdern entsprechen. Gemäß einer kurzen hydraulischen Abschätzungsrechnung mit Hilfe der Beziehungen 3.1 und 3.2 erscheint nun aber ein Einfluß des Rheinanstaus als eher unwahrscheinlich.

Für die Annahme einer Fließzeit von rund 60 Jahren entsprechend dem Bau des Kraftwerks Eglisau ergeben sich für eine ausschließlich vertikale Infiltration durch die darüberliegenden Schichten der USM (Mächtigkeit 149,0 m in der Bohrung Weiach) resp. inklusive des obersten Malms mit total 209,3 m Schichtmächtigkeit (für die Zone von 242,90–267,00 m mit der Wasserprobenentnahme) Werte von K_D zwischen 3×10^{-8} und $1,7 \times 10^{-7}$ m/s. Wird hingegen die notwendige horizontale Fließdistanz mitberücksichtigt, so ergeben sich gegenüber der dargestellten Berechnung bei Eglisau sogar zehnmals größere Werte für die Durchlässigkeit. K_D -Werte in dieser Größenordnung müssen jedoch als eher unwahrscheinlich betrachtet werden. In hydrodynamischer Hinsicht muß diese Variante insbesondere auch infolge des Kontaktes des anstehenden Malms und der USM mit dem Rhein unterhalb der Staustufe des Kraftwerkes Eglisau, wo seine Spiegelhöhe ca. 332 m beträgt, als unwahrscheinlich betrachtet werden (entsprechend der nächst tieferen Staustufe bei Reckingen).

Für die Herkunft der im Grundwasser aus dem Malm der Bohrung Weiach vorhandenen ^{14}C -Konzentration kommt aufgrund dieser Abschätzung und der gemessenen Potentiale eher eine Infiltration von jüngerem Grundwasser aus dem lokalen Lockergesteinsgrundwasserleiter des Tales des Windlacher Feldes und des Unteren Glattales, welcher direkt der USM aufliegt (M. FREIMOSER et al., 1980), in Betracht. Wie aus der Grundwasserkarte 1 : 25 000, Blatt Eglisau, sowie der hydrogeologischen Übersicht in M. FREIMOSER & Th. LOCHER (1980) ersichtlich ist, wäre dabei am ehesten eine Infiltration im Bereich des untersten Talabschnittes bei Endberg-Zweidlen, wo diese beiden Grundwasserströme sich vereinigen und ein recht großes Gefälle des Grundwasserspiegels besteht, möglich (mit Koten des Grundwasserspiegels um 340–355 m ü.M.).

Entsprechend dem möglichen Bereich der Unterschiede der hydraulischen Potentiale Δh von maximal 18,5 bis minimal 3,5 m gegenüber der unteren durchlässigen Zone im Malm der Bohrung Weiach ergeben sich bei Annahme einer mittleren Durchlässigkeit K_D von USM und Malm von 4×10^{-7} m/s (entsprechend dem Mittelwert für Eglisau 1) minimale Fließzeiten für die Fließdistanz von rund 1000 m von rund 215 bis 1130 Jahren, mit $x = 1000$ m, $n' = 0,05$.

Entsprechend dieser zweiten hydraulischen Abschätzung ist nun zumindest theoretisch eine Beimischung von jüngerem, lokal gebildetem, oberflächennahem Grundwasser mit Verweilzeiten im Bereich von einigen hundert bis tausend Jahren möglich.

Als weiterer Schritt bleibt nun abzuklären, ob eine solche Beimischung oberflächennaher Herkunft im Grundwasser 302/5-9 Weiach (Malm) auch in bezug auf die ^{14}C -Konzentration als auch der übrigen, in Tab. 3.1 dargestellten Isotopenwerte sowie der Werte der hydrochemischen Parameter möglich ist. Ausgehend von den in Tab. 3.2 dargestellten Werten wird für das lokale Schottergrundwasser von einer HCO_3^- -Konzentration von 365 mg/l entsprechend dem Bereich der im Rahmen des Überwachungsprogramms untersuchten Grundwasserproben ausgegangen.

Für die ^{14}C -Konzentration der oberflächennahen Komponente wird von einem Bereich zwischen 85% und 50% modern ausgegangen. Damit werden einerseits der radioaktive Zerfall entsprechend dem gemäß Abschätzung erwarteten Bereich der Fließzeit sowie andererseits die ablaufenden Lösungs- und Austauschprozesse entsprechend einer hydrochemischen Evolution unter kongruenter Lösung berücksichtigt (wobei mit einer ^{14}C -Konzentration von 85% modern eher eine teilweise Entwicklung unter den Bedingungen des offenen Systems innerhalb des oberflächennahen Schottergrundwasserleiters und mit 50% modern eine bereits abgelaufene Entwicklung innerhalb der USM berücksichtigt wird). Bei den vorausgesetzten $\delta^{13}\text{C}$ -Werten wurde von denselben Überlegungen ausgegangen, wobei der gewählte Wertebereich von $-14,5$ bis $-12,5\text{‰}$ mit vorhandenen Bestimmungen an Grundwässern aus der USM und OSM mit ^{14}C -Konzentrationen im vorausgesetzten Wertebereich übereinstimmt (OSM Zürich-Milchbuck, H. SCHMASSMANN, 1990, 5 Schönenbuch USM, H. SCHMASSMANN et al., 1984).

Wird wiederum von der Voraussetzung ausgegangen, daß die gesamte in der Grundwasserprobe 302/5-9 Weiach vorhandene ^{14}C -Konzentration von einer jungen, oberflächennahen beigemischten Grundwasserkomponente herrührt, so können die Mischungsanteile der beteiligten Wasserkomponenten nur unter der Bedingung bestimmt werden, daß die unterschiedlichen Konzentrationen an HCO_3^- (bzw. falls möglich des TIC) dieser Komponenten berücksichtigt werden.

Entsprechend der in W. BALDERER (1985) dargestellten Herleitung ergeben sich für die beteiligten Mischungskomponenten folgende Beziehungen:

$$K^{14}\text{C} = k_w \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]_j}{[\text{HCO}_3^-]_a} \cdot A_j \quad (3.3)$$

wobei:

- $K^{14}\text{C}$: gemessene ^{14}C -Konzentration in % modern des untersuchten Tiefengrundwassers (welches als Mischung betrachtet wird),
 k_w : Mischungsanteil der jungen oberflächennahen Grundwasserkomponente als Wassermasse (ausgedrückt in Bruchteilen von 1),
 $[\text{HCO}_3^-]_j$: HCO_3^- -Konzentration in der jungen oberflächennahen Grundwasserkomponente,
 $[\text{HCO}_3^-]_a$: HCO_3^- -Konzentration der ursprünglichen, ungemischten Komponente (für welche eine ^{14}C -Konzentration von $\approx 0\%$ modern vorausgesetzt wird),
 A_j : ^{14}C -Konzentration der jungen, oberflächennahen Grundwasserkomponente.

Da $[\text{HCO}_3^-]_a$ nicht bekannt ist, wird folgende Substitution durchgeführt:

$$[\text{HCO}_3^-]_a = \frac{[\text{HCO}_3^-]_M - [\text{HCO}_3^-]_j \cdot k_w}{(1 - k_w)} \quad (3.4)$$

mit $[\text{HCO}_3^-]_M$ = gemessene HCO_3^- -Konzentration des Tiefengrundwassers (welches als Mischung betrachtet wird). Damit ergibt sich folgende Beziehung:

$$K^{14}\text{C} = k_w \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]_j \cdot A_j (1 - k_w)}{[\text{HCO}_3^-]_M - [\text{HCO}_3^-]_j} \quad (3.5)$$

Diese Beziehung kann nun nach k_w (als quadratische Gleichung) aufgelöst und damit k_w bestimmt werden.

Ausgehend von den in Tab. 3.1 dargestellten Werten des Tiefengrundwassers 302/5-9 Weiach (Malm) und den vorausgesetzten Werten für die junge, oberflächennahe Mischungskomponente (gemäß Tab. 3.2) ergeben sich Mischungsanteile K_w (= $100 k_w$) für die junge oberflächennahe Grundwasserkomponente zwischen 20% und 36% (ohne Berücksichtigung der jeweiligen HCO_3^- -Konzentration der beiden Mischungskomponenten würden sich etwas kleinere Werte für den Mischungsanteil der oberflächennahen Komponente von rund 15% bis 25% ergeben).

Ausgehend von den berechneten Mischungsanteilen der oberflächennahen Komponente von 20% bis 36% ergeben sich für die übrigen stabilen Isotope die in Tab. 3.3 dargestellten Werte für die ursprüngliche ungemischte Komponente des Tiefengrundwassers. Die berechneten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von $-2,3\%$ bis $-1,0\%$ deuten nun auf ein erreichtes Gleichgewicht mit einem Karbonatgestein mariner Entstehung hin (solche $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sind z.B. für Formationswässer in marinen Karbonaten bekannt). Sie liegen damit praktisch am Endpunkt der innerhalb des verkarsteten Malm-aquifers zu erwartenden Entwicklung. Wie aus der Fig. 3.4 hervorgeht, liegen die Endpunkte des Wertebereiches der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für die ursprüngliche Komponente mit $\delta^2\text{H} = -59,3\%$ / $\delta^{18}\text{O} = -4,7\%$ und $\delta^2\text{H} = -56,1\%$ / $\delta^{18}\text{O} = -3,4\%$ innerhalb resp. knapp außerhalb des Mischungsbereiches für Grundwässer aus Malm- und Tertiäraquiferen nach W. STICHLER et al. (1987), welcher einerseits durch die Niederschlagsgerade mit der Gleichung $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ und andererseits durch

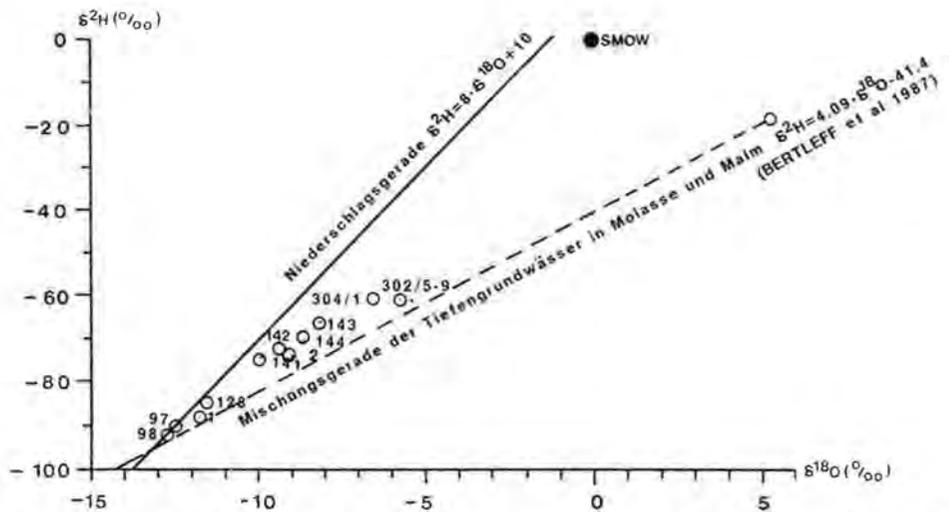


Fig. 3.4: $\delta^2\text{H}$ -/ $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm und Mischungsbereich der Tiefengrundwässer aus der Molasse der Regionen Nordschweiz, Baden-Württemberg und Oberösterreichs (nach B. W. BERTLEFF et al., 1987). Darstellung der Tiefengrundwässer 1 Aquis, 2 Tiefenbrunnen, 128 Mainau, 98 Konstanz, 97 Singen, 141 Eglisau 1, 142 Eglisau 2, 143 Eglisau 3, 144 Eglisau 4, 304/1 Schafisheim USM, 302/5-9 Weiach-Malm.

die Gerade des salinen Endgliedes mit der Gleichung $\delta^2\text{H} = 4,09 \times \delta^{18}\text{O} - 41,4$ begrenzt wird. Es wäre also möglich, daß diese ursprüngliche Komponente des Malmgrundwassers 302/5-9 eine ursprüngliche Mischung zwischen einem noch höher mineralisierten Endglied, welches noch wesentlich größere $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte aufweisen würde (entsprechend dem in B. W. BERTLEFF et al. 1987 erwähnten Endglied), und einem schwach mineralisierten kaltzeitlich (d.h. während des Pleistozäns) versickerten Grundwasser vom Na- HCO_3 -Typus der OMM-Wässer darstellt. Die postulierte Mischungsvariante stellt damit auch in bezug auf die resultierenden Werte für das ursprüngliche Endglied eine theoretisch mögliche Variante dar.

Nach diesen Überlegungen ist jedenfalls die Schlußfolgerung zulässig, daß die in der Grundwasserprobe Weiach-Malm 302/5-9 analysierte ^{14}C -Konzentration mit einer Beimischung eines jüngeren Grundwassers aus einem oberflächennahen Grundwasserleiter durchaus zu vereinbaren ist. Jedoch kann ein Zusammenhang mit dem Aufstau des Rheins beim Kraftwerk Eglisau praktisch ausgeschlossen werden, insbesondere falls die im ersten Beispiel für Eglisau 1 berechnete Durchlässigkeit von $4,0 \times 10^{-7}$ m/s als eher realistisch angesehen wird.

Beispiel 3: Grundwasser 304/1,2 aus der USM der Nagra-Tiefbohrung Schafisheim

Für die bereits dargestellten zwei Beispiele der Na-Cl-Grundwässer aus der USM und dem Malm kann die vorhandene ^{14}C -Konzentration durch eine junge Grundwasserkomponente erklärt werden.

Schwieriger ist es nun aber, die recht hohe ^{14}C -Konzentration von 40,46% modern der Grundwasserprobe 304/1,2 aus der USM der Bohrung Schafisheim, welche mit 149 mval/l zugleich auch die höchste Gesamtmineralisation aller in der Region Nordschweiz untersuchten Tiefengrundwässer aus der OMM, USM und dem Malm auf-

weist, durch eine junge oberflächennahe und zudem nur eine kleine Gesamtmineralisation aufweisende Grundwasserkomponente zu erklären.

Aufgrund der vorliegenden Informationen über die Probenentnahme selbst (C. WITTEW, 1986) ist die Erklärung der gemessenen ^{14}C -Konzentration durch eine mit den Bohrarbeiten und der Probenentnahme selbst zusammenhängende Kontamination (mit modernem ^{14}C) weitgehend auszuschließen.

- a) Das Resultat der an diesen Grundwasserproben 304/1,2 ausgeführten Tritiumbestimmung von $< 1,2$ TU (resp. $0,6 \pm 0,2$ TU) ergibt einen Maximalwert in bezug auf die mögliche Kontamination durch die Bohrspülung bezüglich ^{14}C von $< 4\%$ modern.
- b) Nach C. WITTEW (1986) ist auch aufgrund der Überwachung des gepumpten Grundwassers vor und während der Probenentnahme ein Anteil an Bohrspülung von $< 1\%$ anzunehmen.
- c) Es ist gemäß den Angaben über die verwendete Bohrspülung (A. MATTER et al., 1988) mit Ton-Süßwasserspülung ohne Verwendung von organischen Zusätzen gebohrt worden. Dafür spricht auch die in der Probe 304/1,2 bestimmte Konzentration an organischen Kohlenstoffen von $1,95$ mg/kg, welche der normalen Größenordnung auch der übrigen aus den Nagra-Tiefbohrungen entnommenen Grundwasserproben mit guter Probenqualität (d.h. Kontamination $< 1\%$) entspricht.
- d) Wie in A. MATTER et al. (1988) dargestellt, ist auch durch den gewählten technischen Bohrvorgang keine Beeinflussung (z.B. durch das Grundwasser des tieferen Lockergesteingrundwasserleiters) möglich, da die Strecke der quartären Lockergesteine bis in den oberen Teil der USM bereits verrohrt war, bevor mit dem Durchbohren der tieferen USM (in welcher die Entnahmestrecke liegt) überhaupt begonnen wurde.

Es bleibt deshalb abzuklären, ob diese in dem hochmineralisierten Tiefengrundwasser 304/1,2 Schafisheim bestimmte ^{14}C -Konzentration durch eine Mischung mit einer (in bezug auf die ^{14}C -Konzentration) jüngeren Grundwasserkomponente oberflächennaher Infiltration entstanden sein könnte. Andererseits ist auch die Interpretation der Werte der Grundwasserprobe 304/1,2 als für ein Grundwasser einheitlicher Herkunft nur bedingt möglich. Der dabei resultierende Interpretationsansatz erscheint jedoch aufgrund des relativ geringen ^{14}C -Modellalters von max. 1×10^3 Jahren, der hohen Mineralisation und der großen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, welche eher auf ein durch Interaktion mit dem Gestein sich entwickeltes Formationswasser mit mindestens teilweise mariner Herkunft hindeuten, nicht gerade sinnvoll (im Sinne einer ausschließlichen Interpretation) zu sein. Deshalb ist es nun wichtig, diese weitere Hypothese einer möglichen Beimischung durch vertikale Infiltration von Grundwasser aus den quartären Lockergesteinen abzuklären. Dabei ist insbesondere die gegebene geologische Situation am bzw. in der Umgebung des Bohrstandortes Schafisheim von großer Bedeutung.

Aufgrund der Darstellung in der Hydrogeologischen Karte 1 : 25 000 und der Beschreibung in A. MATTER et al. (1988) ergeben sich folgende Informationen:

In der Bohrung Schafisheim sind ab Geländeoberfläche rund $57,5$ m mächtige Niederterrassenschotter durchquert worden. In diesen ist entsprechend der großen Trockentiefe von rund 55 m nur ein relativ bescheidenes Grundwasservorkommen (Grundwasserspiegel -55 m resp. 366 m ü.M., Th. KEMPF, 1981) vorhanden. Dieses Grundwasservorkommen des Unteren Seetales, welches seitlich durch die aus Ab-

lagerungen der USM bestehenden Talflanken begrenzt wird, ist, wie in Kapitel 2.1. beschrieben, durch zwei Grundwasserfassungen der Gemeinde Schafisheim genutzt. Die große Trockentiefe ist dabei auf die relativ bescheidene Neubildung, welche praktisch ausschließlich durch Versickerung der Niederschläge erfolgt, sowie durch das Vorflutniveau der Aare resp. des Grundwasserstromes des Aaretals bedingt. Unterhalb dieser Ablagerungen aus Niederterrassenschotter wurden in der Bohrung Schafisheim rund 59,5 m mächtige Seeablagerungen sowie anschließend rund 55 m einer aus Gesteinen der USM bestehenden Sackungsmasse durchquert. Anschließend an diese eher schlecht durchlässigen Ablagerungen wurde ein rund 72 m mächtiger älterer (rißeiszeitlicher) unterer Schotterhorizont angetroffen, welcher ein tieferes Grundwasserstockwerk darstellt. Leider ist weder das hydraulische Potential des Grundwassers in diesem tieferen Grundwasserstockwerk noch seine chemische Beschaffenheit bekannt.

Anschließend folgen innerhalb der Bohrung Schafisheim noch rund 322 m mächtige Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse (USM). Man muß sich nun vergegenwärtigen, daß auch die anstehenden Talflanken aus Ablagerungen der USM bestehen und daß die glazial übertiefte Talsohle in rund 244 m Tiefe liegt. Somit sind die Ablagerungen der USM in der Umgebung von Schafisheim teilweise sogar mehr als 566 m mächtig!

Die Entnahmezone der Grundwasserprobe 304/1,2 liegt mit 553–563 m im untersten Teil der Ablagerungen der USM, wobei das gemessene hydraulische Potential (für unkorrigierte Formationsdruckhöhe) mit 365,0 m nur etwa rund 1 m tiefer liegt als das piezometrische Niveau im oberen genutzten Lockergesteinsgrundwasserleiter. Als korrigierte hydraulische Druckhöhe für Wasser mit Dichte = 1 wird in NAGRA (1985), Fig. 3.13, ein Wert von 370 m ü.M. angegeben. (In NAGRA, 1989, werden jedoch wesentlich höhere Werte angegeben: Formationswasserdruckhöhe 381 m ü.M., Süßwasserdruckhöhe 383 m ü.M., welche jedoch mit dem Einbau neuer Packer-systeme zusammenhängen und keinen erreichten Endzustand darstellen.)

Unterhalb der Ablagerungen der USM folgt der obere Malm (Kimmeridgien), welcher eine mit Bolustonen vollständig verstopfte, frühere Verkarstung zeigt und deshalb keinen Grundwasserleiter darstellt.

Die Grundwasserentnahme aus der USM (Entnahmezone 553,0–563,0 m) erfolgte mit einer Entnahmemenge (Durchflußmenge) von 1,6 l/min bei einer Absenkung des hydraulischen Potentials von 112 m (NAGRA, 1984, mündl. Mitt.).

Bei Auswertung dieser Daten gemäß der Näherungsformel für unvollkommene Brunnen (nach RECORDON, 1970),

$$K_D = \frac{Q}{\Delta} \cdot 0,37 \frac{10^3 \log(2L/D)}{L} \text{ m/s}, \quad (3.6)$$

wobei:

Q: Entnahmemenge (m³/s),

Δ: Absenkung (m),

L: Entnahmeintervall (m),

D: Durchmesser der Bohrung (m),

ergibt sich mit L = 10 m und D = 0,216 m ein Wert der Durchlässigkeit $K_D = 1,7 \times 10^{-8}$ m/s für die Entnahmezone.

Zur Verifizierung dieses nun mit Hilfe der Formel 3.6 bestimmten Wertes der Durchlässigkeit K_D wird in bezug auf die mögliche vertikale Infiltration von ober-

flächennahem Grundwasser bis zu der beprobten Zone in der USM eine überschlagsmäßige Berechnung entsprechend dem sog. Leaky-Aquifer-Prinzip gemäß Gleichungen 3.1 und 3.2 in zwei verschiedenen Varianten durchgeführt (da das hydraulische Potential des tieferen quartären Grundwassers nicht bekannt ist und zudem eine gewisse Unsicherheit in bezug auf das hydraulische Potential des Tiefengrundwassers aus der USM besteht):

Variante 1:

Es wird vorausgesetzt, daß das Grundwasser innerhalb des tieferen quartären Grundwasserleiters gespannt ist und sein hydraulisches Druckniveau bei einem geringen Unterschied von < 1 m ungefähr dem hydraulischen Potential im oberen, genutzten Lockergesteinsgrundwasserleiter entspricht. Dabei wird angenommen, daß das hydraulische Druckniveau in der USM bei einem geringen Unterschied von < 1 m ebenfalls dem hydraulischen Potential im oberen genutzten Lockergesteinsgrundwasserleiter entspricht. Gemäß diesen Voraussetzungen kann die folgende Abschätzung in zwei Schritten durchgeführt werden:

A) Transit von oberem Grundwasserstockwerk (in den Niederterrassenschottern) durch die Seeablagerungen und Rutsch- und Sackungsmasse, bestehend aus Sedimenten der Unteren Süßwassermolasse (gesamte Mächtigkeit 114,5 m, Annahme für mittlere Durchlässigkeit 1×10^{-7} m/s, nutzbare Porosität 0,05, $\Delta h = 0,2$ m, hydraulischer Gradient 1,7‰).

Ausgehend von diesen Werten ergibt sich gemäß Gleichung 3.2 eine reelle Fließzeit für die vertikale Infiltration bis zum unteren Grundwasserleiter von rund 1070 Jahren. Die Durchlässigkeit des unteren, älteren, rißeiszeitlichen Schotters wird mit minimal 10^{-4} m/s angenommen, sodaß die rund 72 m mächtige Schicht in sehr kurzer Zeit durchströmt wird, entsprechend den herrschenden Potentialverhältnissen in ca. ein bis zwei Jahren. (Aus den Pumpversuchen des tiefen Grundwasserstockwerkes der Bohrung Seon wurde gemäß F. MATOUSEK, 1989, ein mittlerer Wert für K_D von 2×10^{-4} m/s bestimmt.)

B) Transit vom unteren Grundwasserstockwerk bis zur Entnahmezone in der USM (Strecke in USM = 309 m), mit Durchlässigkeit $K_D = 1,7 \times 10^{-8}$ m/s (entsprechend der Abschätzung aus dem Pumpversuch mit Formel 3.6), nutzbare Porosität 0,05, $\Delta h = 0,8$ m, hydraulischer Gradient = ca. 2,6‰.

Ausgehend von diesen Werten ergäbe sich bei dieser Variante 1 eine reelle Fließzeit für die vertikale Infiltration durch die Strecke der USM allein bis zu der gewählten Entnahmezone in der USM von rund 11 100 Jahren. Diese Fließzeit ist nun aber größer, als aufgrund der in der Probe 304/1,2 gemessenen ^{14}C -Konzentration sowohl als Mischungskomponente als auch sogar für eine einheitliche Herkunft als Zerfallszeit (ausgehend von einer initialen Konzentration von ca. 100%) überhaupt möglich ist (wobei die eventuellen zusätzlichen Effekte wie hydrodynamische Dispersion und Retardation noch nicht berücksichtigt sind).

Aufgrund dieser Variante 1 ist als Schlußfolgerung am ehesten anzunehmen, daß die Durchlässigkeit entsprechend der Auswertung mit dieser einfachen Näherungsformel (3.6) zu klein gewählt ist. Wird vom Mittelwert von $5 \pm 2,5 \times 10^{-8}$ m/s ausgegangen, welcher aufgrund der durchgeführten Tests in einer ersten Auswertung angegeben wird (NAGRA, 1984, mündl. Mitt.) und durch die weiteren Auswertungen (NAGRA, 1989) bestätigt wurde, so ergibt sich eine Fließzeit von rund 3800 Jahren (resp. zwischen rund 7500 und 2500 Jahren). Mit diesem Bereich hydrodynamischer

Fließzeit würde nur etwa eine Reduktion der ^{14}C -Aktivität durch radioaktiven Zerfall von ca. rund 85% (im unteren Grundwasserstockwerk) auf rund 50% modern innerhalb der USM (als Mischungskomponente) übereinstimmen.

Eine weitere Möglichkeit wäre, daß die Bestimmung der Durchlässigkeit aus diesem durchgeführten hydraulischen Test über ein Intervall von 10 m nicht für die gesamten rund 322 m mächtigen, in der Bohrung Schafisheim durchquerten Ablagerungen der USM repräsentativ ist. Würde von dem im ersten Beispiel anhand der Bohrung Eglisau 1 bestimmten Wert der Durchlässigkeit K_D von 4×10^{-7} m/s ausgegangen, so ergäbe sich (bei Verwendung der vorangehend dargestellten Werte für die übrigen Größen) eine Fließzeit von rund 470 Jahren.

Variante 2:

Bei dieser Variante werden die Ergebnisse der Bohrung Seon (F. MATOUSEK, 1989) und NAGRA (1985 – für die USM) mitberücksichtigt.

A) Transit von oberflächennahem Wasser zu dem tieferen Grundwasserstockwerk in quartären Lockergesteinen, welche in der Bohrung Schafisheim im Gegensatz zu den Verhältnissen in der Bohrung Seon direkt den Gesteinen der USM aufliegen.

In diesem Fall ist davon auszugehen, daß das Grundwasser in dem tieferen quartären Aquifer ein wesentlich höheres hydraulisches Potential gegenüber dem Grundwasser im oberen genutzten Grundwasserleiter aufweist. Deshalb muß eine direkte Infiltration vom oberen zum unteren Grundwasserstockwerk nach dem Prinzip des Leaky-Aquifers ausgeschlossen werden.

Hingegen ist anzunehmen, daß dieses tiefere Schottervorkommen auch seitlich, entlang der Talflanken, durch die Schichten der Molasse begrenzt wird. Es kann davon ausgegangen werden, daß aufgrund des sedimentologischen Aufbaus die Schichten der USM als auch der OMM ähnlich den Ablagerungen der OSM ein hydrogeologisches Gesamtsystem darstellen (W. BALDERER, 1983), in welchem Grundwasser entlang von subhorizontalen Fließwegen zirkulieren. Dieses innerhalb der USM zirkulierende Grundwasser kann nun entlang der Kontaktzonen an den Talflanken dem in der quartären Talfüllung enthaltenen tieferen Grundwasserstockwerk zuströmen. Dieses Grundwasser innerhalb der USM wird durch Infiltration innerhalb des morphologisch anstehenden Bereiches der USM gebildet (wobei auch Zuflüsse durch die teilweise noch vorhandenen, darüberliegenden Ablagerungen der OMM und OSM zu erwarten sind) und erreicht diesen tieferen, aus quartären Lockergesteinen bestehenden Grundwasserleiter entlang von subvertikal bis subhorizontal innerhalb der Molasse verlaufenden Fließpfaden (gemäß Fig. 3.3 und 3.9). Dieser aus quartären Lockergesteinen aufgebaute Grundwasserleiter stellt nun aufgrund seiner größeren Durchlässigkeit (von 2×10^{-4} m/s bis zu $4,5 \times 10^{-4}$ m/s in dünnen, lokalisierten Lagen, gemäß F. MATOUSEK, 1989) einen eigentlichen Mischungskörper im Sinne der Fig. 3.3 nach J. TOTH (1963) dar, in welchem die Grundwasserströmung kanalisiert wird und innerhalb welchem auch Mischungsprozesse in großem Ausmaß zu erwarten sind. Im Bereich, wo diese tiefere Lockergesteinsablagerung direkt der Molasse aufliegt, wie im Bereich der Tiefbohrung Schafisheim, ist zu erwarten, daß Zuflüsse zur Molasse hin stattfinden. Das ist insbesondere auch aufgrund der geographischen Situation anzunehmen, da talabwärts am Übergang des Seetales in das Aaretal die Aare bei Ruppertswil-Wildegg (ca. auf Kote 532 m ü.M.) auch den Vorfluter der USM resp. des darunter folgenden, in hydraulischer Beziehung stehenden Malms darstellt, dessen Schichten nach S einfallend, am nörd-

lichen Aareufer aufgeschlossen sind (A. ISLER et al., 1984, Geologische Karte der zentralen Nordschweiz; W. H. MÜLLER et al., 1984; H. SCHMASSMANN et al., 1984; NAGRA, 1988). Es ist deshalb entsprechend dieser gegebenen hydrogeologischen Situation damit zu rechnen, daß sich präferentielle, schnelle Fließwege ausbilden, innerhalb welcher das seitlich aus den (aus USM bestehenden) Talflanken dem quartären Lockergesteinsgrundwasserleiter zufließende Grundwasser diesen relativ rasch durchquert und anschließend im nördlichen Bereich, im direkten liegenden Kontakt zur USM, diesen wieder verläßt und erneut innerhalb der Molasse verläuft, bis zum Austritt im Bereich der Aare als regionaler Vorfluter.

Entsprechend dieser geschilderten Situation ergibt sich nun folgende Abschätzung:

Infiltration des Grundwassers innerhalb des morphologisch anstehenden Bereichs (Kote der gesättigten Zone auf ca. 500 m ü.M. angenommen), Transit innerhalb der Molasse bis zum Austritt in den tieferen Lockergesteinsgrundwasserleiter, Annahme einer mittleren Durchlässigkeit von 5×10^{-8} m/s (entsprechend NAGRA, 1989), nutzbare Porosität 0,05, $\Delta h = 105$ m (die vorausgesetzte Druckhöhe des Grundwassers innerhalb der tieferen Lockergesteinsablagerungen an der Stelle der Bohrung Schafisheim von 395 m ü.M. wurde durch Abschätzung, ausgehend von der Druckhöhe der Bohrung Seon von 418 m ü.M. und der Kote der Aare als Vorfluter bei Rapperswil-Wildeggen von 352 m ü.M. durch quadratische Approximation gemäß der Theorie von DUPUIT für lineare Fassungsanlagen bestimmt. Somit ergibt sich ein hydraulischer Gradient von 42‰ (für subhorizontale Fließdistanz von 2500 m).

Ausgehend von diesen Werten ergibt sich gemäß Gleichung 3.2 eine reelle Fließzeit von rund 1900 Jahren vom Bereich der morphologisch anstehenden Molasse bis zum Eintritt in den tieferen, aus quartären Lockergesteinen aufgebauten Grundwasserleiter. Für den Transit innerhalb dieses Grundwasserleiters wird entsprechend der größeren Durchlässigkeit eine Zeitspanne im Bereich von einigen bis maximal 10 Jahren angenommen.

B) Transit vom unteren Stockwerk bis zur Entnahmezone in der USM: Ausgehend von denselben Werten wie in Variante 1, mit jedoch unterschiedlichen hydraulischen Druckhöhen (heads), für das tiefere Lockergesteinsgrundwasser von 395 m ü.M. und für die USM von 370 m ü.M. (Süßwasserdruckhöhe gemäß NAGRA, 1985) und demzufolge einem wesentlich größeren hydraulischen Gradienten i von 81‰, ergibt sich eine Fließzeit in der Größenordnung von 400 Jahren. Wird von einer mittleren Durchlässigkeit der USM gemäß NAGRA (1984) und (1989) von $5 \pm 2,5 \times 10^{-8}$ m/s ausgegangen, so ergibt sich eine wesentlich geringere Fließzeit von 120 (resp. von rund 80 bis 240) Jahren.

Insgesamt ergibt sich nach dieser Abschätzung der Variante 2 eine Fließzeit von der Infiltration im morphologisch anstehenden Bereich bis zu der untersuchten Zone der USM von 2000 bis 2500 Jahren. Mit diesem Bereich der hydrodynamischen Fließzeit würde eine Reduktion der ^{14}C -Konzentration ausschließlich durch radioaktiven Zerfall von 85% modern auf rund 65 bis 60% modern übereinstimmen.

Diese dargestellten rein hydraulischen bzw. hydrodynamischen Abschätzungen sind nun nur für den konvektiven Stofftransport, welcher ohne Adsorption und Dispersion erfolgt, gültig. Insbesondere ist damit keine quantitative Aussage in bezug auf den Mischungsanteil der jüngeren Komponente möglich. Die einzige Aussage dieser Abschätzungen ist, daß die gemessene ^{14}C -Konzentration nicht den gegebenen hydrodynamischen Bedingungen widerspricht. Es ist aufgrund dieser Abschätzungen möglich, von der Hypothese auszugehen, daß zu einem gewissen Anteil jüngerer Grundwasser in der Grundwasserprobe 304/1,2 aus der USM vorhanden ist.

[Eine weitere Möglichkeit besteht darin, von der Annahme auszugehen, daß die jüngere Mischungskomponente nicht eine einheitliche Verweilzeit gemäß dem Piston-Flow-Modell, sondern eine Verweilzeitverteilung mit verschiedenen Altersanteilen, etwa entsprechend dem Exponentialmodell, aufweist. In diesem Fall würde z.B. eine oberflächliche, beigemischte Grundwasserkomponente einer kontinuierlichen Mischung von spätpleistozänem resp. frühholozänem bis praktisch rezentem oberflächennahem versickertem Grundwasser entsprechen. Wird z.B. vom Lösungsansatz des Exponentialmodells für konstanten Input oder Ausgangskonzentration nach A. NIR (1964) ausgegangen:

$$t_R = \left(\frac{A_a - A}{A} \right) \cdot T_{1/2} \cdot (\ln 2)^{-1} \quad (3.7)$$

so würden sich für die im Grundwasser 304/1,2 Schafisheim enthaltene ^{14}C -Konzentration A von $40,46 \pm 0,7\%$ modern für eine Ausgangskonzentration A_a von 85% resp. 50% modern mittlere Verweilzeiten von t_R rund 2×10^3 bis 9×10^3 Jahren ergeben. Diese könnten entsprechend dem vorangehend dargestellten Interpretationsansatz auch den Bereich der mittleren Verweilzeit der beigemischten, schwach mineralisierten jüngeren Komponente darstellen, falls für die gesamte Komponente des ursprünglichen hochmineralisierten Endgliedes eine Verweilzeit außerhalb des Datierungsbereiches der ^{14}C -Methode resp. eine ^{14}C -Konzentration von $\approx 0\%$ modern angenommen wird].

Eine von den vorangehenden hydraulisch-hydrodynamischen Abschätzungen unabhängige Bestimmung des **Mischungsanteils** der jüngeren (^{14}C enthaltenden) Komponente ist nun aufgrund der gemessenen ^{14}C -Konzentration des Grundwassers 304/1,2 Schafisheim möglich: Dabei wird für die jüngere Komponente von einer hydrochemischen Entwicklung, ausgehend vom oberen, teilweise genutzten Grundwasser in den Niederterrassenschottern, ausgegangen, da für das tiefere, untere Grundwasserstockwerk in den älteren Schottern keine Daten für das darin enthaltene Grundwasser vorhanden sind. Entsprechend der großen Trockentiefe von rund 55 m wird für das Grundwasser innerhalb dieses oberen Lockergesteinaquifers eine praktisch ausschließliche Entwicklung im Kontakt mit der Bodenluft, d.h. innerhalb eines offenen Systems im Austausch mit einer freien CO_2 -Gasphase angenommen. Unter diesen Verhältnissen sind ^{14}C -Konzentrationen zwischen rund 100% und 85% modern (d.h. ohne Berücksichtigung einer anthropogenen Beeinflussung) sowie $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen rund $-17,5\%$ und -15% bei einer HCO_3^- -Konzentration von rund 365 mg/l (d.h. im Bereich der gemessenen Werte von 350 bis 380 mg/l) wahrscheinlich.

Für das Grundwasser im unteren (älteren, rißeiszeitlichen) Schotter wird als Arbeitshypothese angenommen, daß dieses etwas kleinere ^{14}C -Konzentrationen, etwa im Bereich zwischen 85% und 70% sowie als Extremfall um 50% modern aufweisen dürfte (Tab. 3.2). Die korrespondierenden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte werden im Bereich zwischen $-14,5\%$ bis $-12,5\%$ angenommen. Mit diesen Werten wird sowohl eine hydrochemische Entwicklung während des Transits zum tieferen Grundwasserstockwerk als auch eine gewisse Reduktion der ursprünglichen ^{14}C -Konzentration durch den radioaktiven Zerfall mitberücksichtigt.

Ausgehend von den in Tab. 3.1 dargestellten Werten der HCO_3^- -Konzentration des Tiefengrundwassers Schafisheim USM von 153 mg/l (gemäß der gepumpten Probe 304/1) resp. von 110 mg/l (gemäß der In-situ-Druckprobe 304/2) und den vorausgesetzten Werten für die junge Grundwasserkomponente gemäß Tab. 3.2 er-

geben sich mit Hilfe der Gleichung (3.5) die ebenfalls in Tab. 3.2 dargestellten resultierenden Anteile für die junge, oberflächennahe Komponente von 11% bis 22% (bezogen auf die beteiligten Wassermassen).

[Werden hingegen die unterschiedlichen HCO_3^- -Konzentrationen nicht berücksichtigt, so würden sich ausgehend von einer ^{14}C -Konzentration der jüngeren Grundwasserkomponente zwischen 85% bis 70% modern bereits wesentlich höhere Mischungsanteile zwischen 48% und 58% modern für diese jüngere Komponente ergeben.]

Ausgehend von den berechneten Mischungsanteilen für die jüngere Mischungs-komponente, welche in Tab. 3.2 dargestellt sind, sowie den Werten der stabilen Isotope gemäß Tab. 3.1 und 3.2 wurden die in Tab. 3.3 dargestellten Werte für die ältere, ursprüngliche Mischungs-komponente tiefer Herkunft berechnet. Die resultierenden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für die tiefere, ungemischte Komponente liegen im Bereich zwischen $-5,9\text{‰}$ und $-4,3\text{‰}$ für Berechnungen unter Berücksichtigung der HCO_3^- -Konzentrationen. Diese $\delta^{13}\text{C}$ -Werte könnten auf ein erreichtes Gleichgewicht mit kontinentalen, karbonathaltigen Ablagerungen (als Kalksandsteine, Mergel und Süßwasserkalke) hindeuten, wie sie die USM als fluvioterrestrische Ablagerungen darstellen (U. P. BÜCHI & S. SCHLANKE, 1977, A. MATTER et al., 1988, H. M. BÜRGISSER et al., 1983).

[Wird von den Werten der Mischungsanteile ohne Berücksichtigung der korrespondierenden HCO_3^- -Konzentrationen ausgegangen, so ergibt sich für die ursprüngliche Komponente tiefer Herkunft ein $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von $-3,0\text{‰}$. Dieser $\delta^{13}\text{C}$ -Wert deutet nun eindeutig auf ein erreichtes Gleichgewicht mit dem Gestein hin analog der Entwicklung in den Tiefengrundwässern aus der OMM, wie z.B. für 1 Aqüi Zürich mit $\delta^{13}\text{C} = -3,0\text{‰}$ und $\Delta^{14}\text{C} = < 1,3\%$ modern.]

Für das kürzlich in der Bohrung Seon beprobte Grundwasser aus dem tieferen Schottervorkommen (Kapitel 3.2.1.) sind nun neben chemischen Untersuchungen auch Isotopenbestimmungen durchgeführt worden. Dabei ist jedoch eine Verwendung dieser Werte aus folgenden Gründen eher schwierig:

- Die direkte Kontinuität der in der Bohrung Seon erbohrten grobkörnigen Ablagerung mit dem in der Bohrung Schafisheim erbohrten tiefen Schottervorkommen ist bis heute weder als geologischer Körper noch in bezug auf die Grundwasserbeschaffenheit nachgewiesen. Infolge der großen Variabilität, dem komplizierten Aufbau der quartären, glazialen Ablagerungen, ist ohne weitere Bohrungen keine gesicherte Aussage über die Ausdehnung dieser tiefen Schotterkörper möglich.
- Aufgrund des theoretischen Konzeptes der hydrodynamischen Fließsysteme und der Arbeiten nach J. TOTH (1963), ist innerhalb solcher tiefer, gut durchlässiger Körper mit Mischungsvorgängen zu rechnen.
- Die am Wasser aus der Bohrung Seon analysierten Isotopenwerte können deshalb nicht direkt als Ausgangswerte für eine Mischungsbeziehung verwendet werden.

Wie aus Fig. 3.4 ersichtlich ist, liegen die Endpunkte des Wertebereiches der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für die ursprüngliche Komponente tiefer Herkunft (bei Berücksichtigung der korrespondierenden HCO_3^- -Konzentration) mit $\delta^2\text{H} = -60,4\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -6,0\text{‰}$ und $\delta^2\text{H} = -58,7\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -5,4\text{‰}$ innerhalb des Mischungsbereiches für Grundwässer aus Malm- und Tertiäraquiferen nach B. W. BERTLEFF et al. (1987). [Die Endpunkte der Berechnung ohne Berücksichtigung der HCO_3^- -Konzentration liegen mit $\delta^2\text{H} = -52,3\text{‰}$ / $\delta^{18}\text{O} = -3,1\text{‰}$ und $\delta^2\text{H} = -47,6$ und $\delta^{18}\text{O} = -1,47\text{‰}$ eben-

falls innerhalb resp. praktisch auf der begrenzenden Mischungsgeraden $\delta^2\text{H} = 4,09 \times \delta^{18}\text{O} - 41,4$ nach B. W. BERTLEFF et al. (1987).]

Die nun diskutierten resultierenden Werte der stabilen Isotope für die ursprüngliche Komponente tiefer Herkunft des USM-Wassers 304/1,2 Schafisheim, welche in Tab. 3.3 dargestellt sind, lassen sich also ebenfalls mit einem vorangehenden Mischungsprozeß zwischen einem noch wesentlich höher mineralisierten Endglied mit schwereren $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und einem schwach mineralisierten, kaltzeitlich gebildeten Grundwasser vom Typus der OMM-Wässer vereinbaren. Dabei würden diese beiden ursprünglichen Endglieder (ebenso wie die daraus hervorgegangene Mischung) entsprechend der dargestellten Mischungsvariante keine meßbaren ^{14}C -Konzentrationen aufweisen.

Aus diesen nun dargestellten drei Beispielen von Tiefengrundwässern aus der USM und dem Malm läßt sich nun der Schluß ziehen, daß eigentlich zwei verschiedene Arten von Mischungsprozessen zu beobachten sind, wobei aber sämtliche beteiligten Komponenten gemäß Fig. 3.5 in bezug auf die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb des Mischungsbereiches nach B. W. BERTLEFF et al. (1987) liegen:

- a) Mischung zwischen einer jüngeren Grundwasserkomponente (A) oberflächennaher Herkunft (mit ^{14}C -Konzentration im Wertebereich jüngerer Grundwässer) und einer ursprünglichen Mischungskomponente (B), welche dem lokal vorhandenen Tiefengrundwasser der betreffenden Entnahmezone (ohne junge, ^{14}C enthaltende Beimischung) mit den Koordinaten x, y, z entspricht.
- b) Dieses lokal vorhandene Tiefengrundwasser (B) der betreffenden Entnahmezone (x, y, z) zeigt einerseits die Merkmale einer weit fortgeschrittenen hydrochemischen Evolution innerhalb des betreffenden Aquifergesteins (z.B. erkennbar an $\delta^{13}\text{C}$ -Werten im Gleichgewicht mit dem Gesteinskarbonat) sowie andererseits Merkmale einer vorangegangenen Mischung zwischen einem noch höher mineralisierten Wasser, dem Endglied (C) mit wesentlich schwereren Isotopenwerten, welches einem ungemischten Formationswasser entspricht (etwa analog zum Tiefengrundwasser aus der Tiefbohrung Endorf in Bayern), und einem schwach mineralisierten Grundwasser (Endglied D resp. D'), welches durch Infiltration der Niederschläge während des Pleistozäns oder sogar während eines Interglazials gebildet wurde (B. W. BERTLEFF et al., 1987).

Der in Fig. 3.5 dargestellte Mischungsbereich für $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ nach B. W. BERTLEFF et al. (1987) beinhaltet nun sämtliche Mischungsprozesse dieser vier Grundwasserkomponenten A, B, C und D (resp. D'). Dies läßt sich wie folgt erklären: Die extremsten Endglieder vom Typus C und D bestimmen die Lage der begrenzenden Mischungsgeraden mit der Gleichung $\delta^2\text{H} = 4,09 \times \delta^{18}\text{O} - 41,4$, während die meteorischen, durch die Infiltration von Niederschlägen (unter diversen klimatischen Bedingungen) gebildeten Grundwässer, welche den Komponenten A und D (resp. D') entsprechen, definitionsgemäß sich entlang der globalen Niederschlagsgeraden mit der Gleichung $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ gruppieren. Das ursprünglich lokal vorhandene Grundwasser ohne junge Beimischung (B) entspricht also einer Mischung zwischen den Komponenten der Tiefengrundwässer vom Typ C und D und liegt damit auf der durch die Gerade C-D definierten Mischungsbeziehung. Die $\delta^2\text{H}$ -/ $\delta^{18}\text{O}$ -Wertepaare dieser drei vorangehend beschriebenen, in der USM und im Malm beprobten aktuellen Tiefengrundwässer liegen nun innerhalb des durch die Geraden A-D, A-D', C-D sowie C-D' definierten Mischungsbereiches, da diese eigentlich

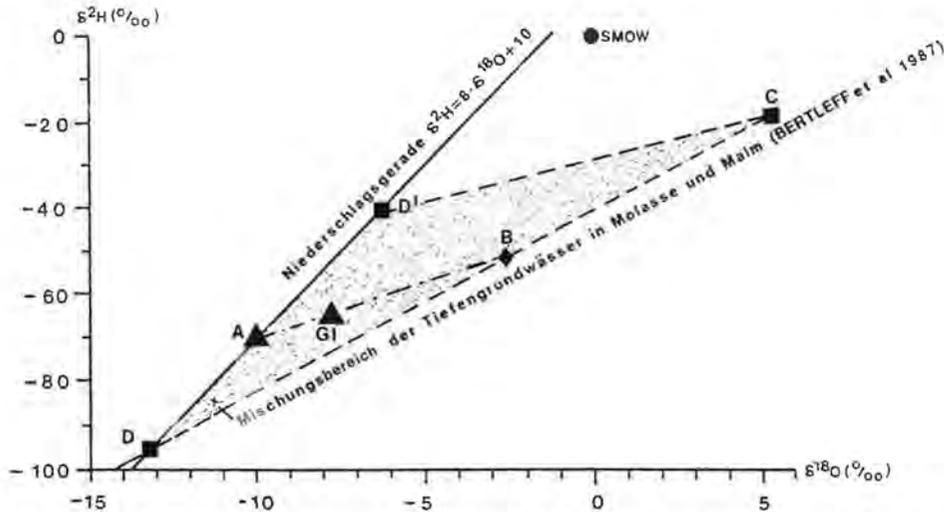


Fig. 3.5: $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm mit Schema der möglichen Mischungsbeziehungen für die Tiefengrundwässer aus der USM und Malm der Nordostschweiz. A: Endglied der oberflächennahen Grundwässer innerhalb der Untersuchungsregion, B: Tiefengrundwasser aus USM (Malm) ohne junge Bemischung, C: Endglied des ursprünglichen „Basin-Waters“ innerhalb der USM (analog dem Tiefenwasser Endorf) in B. W. BERTLEFF et al., 1987), D: Endglied pleistozäner Infiltration (Alternative: Wasser aus Bodensee, resp. Limmat), D': Postuliertes Endglied einer Interglazial-Infiltration (nach B. W. BERTLEFF et al., 1987), G: Untersuchtes Grundwasser vom Na-Cl-Typus innerhalb USM und Malm (141 Eglisau 1, 304/1 Schafisheim, 302/5-9 Weiach).

einer weiteren Mischung G1 entsprechen, welche aus den Grundwässern vom Typus B durch Mischung mit jungem, oberflächennahem Grundwasser vom Typ A hervorgegangen sind. Damit stellen diese drei aktuellen beprobten Tiefengrundwässer, welche dem Typ G1 (141, 304/1,2, 302/5-9) entsprechen, eigentlich Mischungen, ausgehend von mindestens drei Komponenten, d.h. von den Grundwässern vom Typ D (resp. D') und C mit A dar. Entsprechend den einzelnen Mischungsanteilen und den Werten der Komponenten A, C und D (resp. D') ist dabei eine beliebige Lage innerhalb des vorangehend definierten und in Fig. 3.5 dargestellten Mischungsbereiches nach B. W. BERTLEFF et al. (1987) möglich.

3.3. Resultierendes Interpretationsmodell der aktuellen Fließvorgänge der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse und des Malms

Für die Interpretation in bezug auf die hydrodynamischen Fließsysteme sind nun hauptsächlich die beobachtete hydrochemische Differenzierung der Wässer in der OMM und der USM sowie die Rolle des Quartärs und des Malms als nächst höher bzw. nächst tiefer liegende geologische Einheiten von Bedeutung.

3.3.1. Hydrochemische Deutung

Wie in Kapitel 3.2.1. dargestellt, können innerhalb der Ablagerungen der Molasse insgesamt drei verschiedene chemische Typen von Grundwässern beobachtet werden:

- Ca-(Mg)-HCO₃-Wässer generell innerhalb des Bereiches der morphologisch anstehenden Molasse sämtlicher drei lithostratigraphischer Einheiten OSM, OMM und USM.
- Na-HCO₃-Wässer generell in den unterhalb des heutigen aktuellen morphologischen Basisniveaus der Täler vorhandenen Ablagerungen der OMM und des Malms.
- Na-Cl-Wässer, welche wesentlich stärker mineralisiert sind, in den unterhalb des Basisniveaus der Täler vorhandenen Formationen der OMM, USM und des offenen verkarsteten, mit der USM in Verbindung stehenden Malms. Dieser Na-Cl-Typus ist aufgrund der vorliegenden Beobachtungen in größerer Tiefe als die vorangehend beschriebenen zwei Wassertypen vorhanden, stellt also das eigentliche Basisgrundwasser des Molasse-Malm-Systems dar, welches diese anderen beiden Grundwassertypen stets unterlagert.

Diese beschriebenen hydrochemischen Verhältnisse entsprechen damit der in Fig. 3.6 dargestellten schematischen Skizze der innerhalb der Ablagerungen der Molasse und des Malms vorhandenen Grundwassertypen (nach NAGRA, 1988, S. 104). Diese hydrochemischen Verhältnisse stellen nun in Kombination mit den Informationen der Isotopenuntersuchungen den Ausgangspunkt für die Interpretation der hydrodynamischen Vorgänge hinsichtlich der qualitativen Beschreibung der Fließsysteme dar. Durch die Informationen der Isotopenuntersuchungen ergeben sich nun folgende weitere Unterscheidungsmerkmale:

a) Die im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse an der Oberfläche austretenden Quellen vom Ca-(Mg)-HCO₃-Typus enthalten anthropogen produziertes Tritium und weisen deshalb eine Verweilzeit von einigen Jahren bis maximal 25 Jahren auf. Die in Tunnels, im tieferen Bereich der morphologisch anstehenden Molasse (mit größerer Überdeckung) gefassten Quellwässer gehören teilweise zum selben Typus, weisen indessen kein anthropogen produziertes Tritium auf. Es sind deshalb bereits Verweilzeiten von > 25 Jahren anzunehmen. Jedoch weisen die Werte der stabilen Isotope δ²H und δ¹⁸O wie bei den übrigen an der Oberfläche austretenden Molassequellen auf eine Infiltration unter aktuellen Klimabedingungen hin.

b) Sämtliche Grundwässer vom Na-HCO₃-Typus, welche im tieferen Bereich unterhalb des morphologischen Basisniveaus der Talsohle in Bohrungen aus der

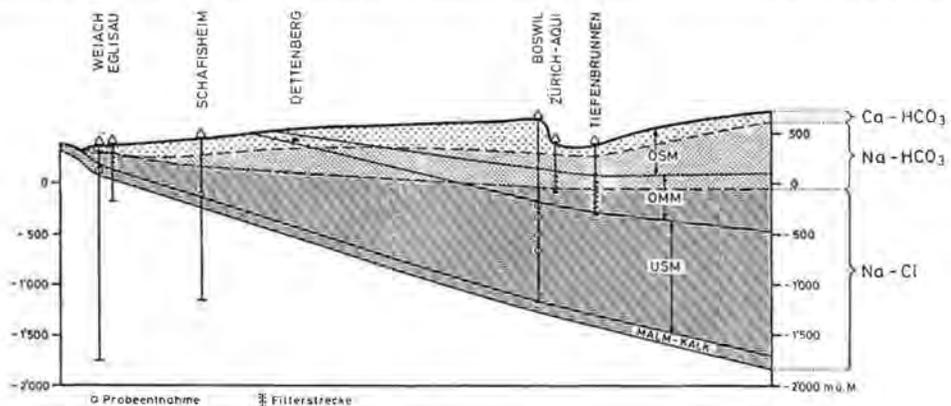


Fig. 3.6: Verbreitung der Wassertypen in nordschweizerischen Molassetrog (Kantone Aargau und Zürich). Schematisches Sammelprofil mit fünffacher Überhöhung (aus NAGRA, 1988).

OMM gewonnen wurden, weisen kein anthropogen produziertes Tritium und damit eine Verweilzeit von > 25 Jahren auf. Bei sämtlichen diesen Grundwässern, an welchen außerdem ^{14}C -Bestimmungen durchgeführt wurden, ergaben sich Werte an der Nachweisgrenze. Die Werte der stabilen Isotope $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ können nur durch kaltzeitlich gebildete Niederschläge erklärt werden (wobei jedoch die Hypothese einer Infiltration von Oberflächenwasser aus höheren Einzugsgebieten, obwohl unter hydrodynamischen Gesichtspunkten eher unwahrscheinlich, noch nicht endgültig und vollständig ausgeschlossen werden kann). [Dabei ist zu beachten, daß, wie die Resultate der ^{14}C - und der ^{18}O -Bestimmungen des Quellwassers aus der morphologisch anstehenden OSM innerhalb des Milchbuckeltunnels zeigen (H. SCHMASSMANN, 1990), allein die Zugehörigkeit zum Na- HCO_3 -Typus (als Austauschwasser) eines Grundwassers aus der Molasse nicht genügt, um auf eine große Verweilzeit (insbesondere mit kaltzeitlicher Infiltration) zu schließen.]

c) Sämtliche Grundwässer, welche zum Na-Cl-Typus gehören, weisen Merkmale einer Mischung auf: Stark variierende Werte der Gesamtmineralisation sowie stark variierende $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, welche unterhalb der Niederschlagsgeraden und teilweise außerhalb des Bereiches der rezenten Niederschläge liegen. Für die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Grundwässer aus dem tieferen Bereich der Molasse und des Malms von Baden-Württemberg, Bayern und Oberösterreich kann dabei gemäß B. W. BERTLEFF et al. (1987) ein Mischungsbereich definiert werden, in welchem auch die Grundwässer vom Na-Cl-Typus aus USM und Malm des schweizerischen Molassebeckens enthalten sind. Entsprechend der begrenzenden Geraden des Mischungsbereichs in Fig. 3.5 mit der Gleichung $\delta^2\text{H} = 4,09 \times \delta^{18}\text{O} - 41,4$ ist eine ursprüngliche Mischung zwischen einem Endglied mit kleineren (leichteren) Werten von $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ im Bereich der kaltzeitlich infiltrierten Grundwässer vom Na- HCO_3 -Typus und einem Endglied mit hohen (schwereren) $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, welches jedoch entsprechend dem $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Wertepaar unterhalb der Niederschlagsgeraden liegt, stark mineralisiert ist und zum Na-Cl-Typus gehört, anzunehmen. Für dieses hochmineralisierte Endglied ist aufgrund der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sowie der chemischen Beschaffenheit (des in der 2000 m tiefen Bohrung Endorf entnommenen Grundwassers sowie durch Extrapolation der als Verdünnungsreihe betrachteten USM-Grundwässer Eglisau 1–4 gemäß H. SCHMASSMANN et al., 1984) eine im weitesten Sinne marin geprägte Herkunft (mit Verdunstungseffekt) entsprechend einem eigentlichen Formationswasser (connate water) wahrscheinlich.

Dabei könnte es sich entweder um fossiles Meerwasser oder um ein Formationswasser mit marinen bis brackischen Einflüssen resp. um ein sog. „basin water“ handeln, welches sich durch Interaktion mit dem Gestein resp. den innerhalb der USM-Ablagerungen enthaltenen evaporitischen Sequenzen während langer („geologischer“) Zeiträume entwickelt hat. Für die Entstehung als „basin water“ oder ursprüngliche „brine“ sprechen u.a. die hohen Konzentrationen an CO_2 und Methan sowie die z.T. in der USM und in den Malmkalken entdeckten, ausbeutbaren Erdgas- und Erdölvorkommen (im zentralen Teil des Schweizerischen Molassebeckens bzw. in Süddeutschland und Oberösterreich; J. N. ANDREWS et al., 1985, B. W. BERTLEFF et al., 1987, W. STICHLER et al., 1987).

Für dieses Endglied mit hoher Mineralisation und vom Na-Cl-Typus ist aufgrund dieser Entstehung eine große, außerhalb des Datierungsbereiches der ^{14}C -Methode liegende Verweilzeit wahrscheinlich. Die relativ hohen ^{14}C -Konzentrationen, welche in den untersuchten drei Grundwässern (141 Eglisau 1, 304/1 Schafisheim, 302/5-9 Weiach) aus der USM und im Malm analysiert worden sind, können deshalb allein

ausgehend von einer Mischungsbeziehung mit den Tiefengrundwässern aus der OMM nicht erklärt werden.

Wie die im vorangehenden Kapitel dargestellten Überlegungen zeigen, sind diese gemessenen ^{14}C -Konzentrationen in diesen drei Grundwässern aus der USM und im Malm am ehesten durch eine Beimischung von versickertem Grundwasser aus dem rezenten, oberflächennahen Kreislauf zu erklären, welches unter den aktuellen Klimabedingungen gebildet wurde. Außerdem ist diese Hypothese einer rezenten Grundwasserbeimischung (welche jedoch kein anthropogenes Tritium enthält) auch mit den beobachteten Wertebereichen der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte dieser untersuchten USM/Malm-Grundwässer zu vereinbaren (gemäß dem definierten Mischungsbereich nach B. W. BERTLEFF et al., 1987).

In Berücksichtigung der Gesetzmäßigkeiten der hydrodynamischen Fließsysteme nach J. TOTH (1962, 1963) ist es nun möglich, hinsichtlich der Grundwässer im Bereich der Molasse der Nordostschweiz (insbesondere für die Region Zürich-Eglisau) folgende zusätzliche Aussagen zu gewinnen:

3.3.2. Hydrodynamische Deutung

– Ungestörte Tiefengrundwässer, welche sowohl zu einem eigenen charakteristischen chemischen Typus gehören und welche weder Tritium noch ^{14}C in nachweisbaren Konzentrationen enthalten, sind in den folgenden Bohrungen entnommen worden: 1 AQUI-Zürich und 2 Zürich-Tiefenbrunnen sowie in den Bohrungen 98 Konstanz, 128 Mainau und 97 Singen (welche aber entsprechend der geographischen Lage zu einem anderen hydrodynamischen Fließsystem gehören).

Diese Beobachtungen deuten nun auf eine weitgehend isolierte Entwicklung ohne Kontakt (resp. mit fehlender Durchmischung) mit den rezenten Grundwässern im aktuellen hydrologischen Kreislauf hin. Daraus ergibt sich die folgende hydrodynamische Deutung: Nach dem Konzept von J. TOTH (1962) sind solche Verhältnisse in Zonen zu erwarten, wo das hydraulische Potential mit zunehmender Tiefe konstant verläuft und demzufolge die Fließbewegung praktisch parallel zur Oberfläche des hydraulischen heads (piezometrisches Niveau) verläuft (und damit auch weitgehend parallel zu der generellen Geländeoberfläche, d.h. auf der Basis der Talniveaus). Diese Zonen entsprechen innerhalb der hydrodynamischen Fließsysteme eigentlichen Transitions- oder Übergangszonen, wo weder größere Mengen von Grundwasser infiltrieren noch exfiltrieren (an die Oberfläche austreten).

– Die beobachtete relativ scharf abgrenzbare, auf kurzer Distanz auftretende vertikale Differenzierung zwischen den Wässern vom schwach mineralisierten Na-HCO₃-Typus zum höher mineralisierten Na-Cl-Typus zwischen den Grundwässern 1 AQUI (Entnahmezone gemäß Filterstrecke von 295–500 m Tiefe im oberen Bereich der OMM) und 2 Tiefenbrunnen (Entnahmezone gemäß Filterstrecke von 330–716 m), den gesamten Bereich der OMM sowie die obersten rund 10 m der darunterfolgenden USM erfassend, deutet nun auch auf eine äußerst geringe vertikale Durchmischung hin. Dabei ist, wie in H. SCHMASSMANN et al. (1984) dargestellt, anzunehmen, daß gegenüber der Bohrung 1 AQUI in der Bohrung 2 Tiefenbrunnen ein durchschnittlich tieferes Wasser erfaßt wird. (In Koten absoluter Höhe in m ü.M. ist dieser Unterschied noch wesentlich größer: Entnahmezone 1 AQUI: +117,22 bis –87,78 m ü.M., Entnahmezone 2 Tiefenbrunnen: +78,0 bis –318 m ü.M. gemäß H. SCHMASSMANN et al., 1984, Ch. ISENSCHMID, 1986).

– Die vorangehende sowie die nun dargestellte Beobachtung führen zum Schluß, daß im mittleren bis unteren Bereich der OMM und im obersten Bereich der USM

in der Region Zürich eine graduelle Differenzierung der Grundwässer mit der Tiefe vorhanden ist, was auf eine äußerst geringe vertikale Durchmischung und damit auf eine parallele, praktisch subhorizontale Fließbewegung hindeutet.

– Anhand der Grundwässer vom Na-Cl-Typus aus den Bohrungen 141–144 Eglisau, 302/5–9 Weiach und 304/1,2 Schafisheim ist zumindest tendenziell eine Zunahme der Konzentration mit zunehmender Distanz von der regionalen Exfiltrationszone zu beobachten. (Aus der lokalen Situation folgt, daß entgegen der schematischen Profildarstellung in Fig. 3.6 die Bohrungen 141–144 Eglisau 1–4 insgesamt näher bei den Aufschlußzonen am Rheinufer liegen als die Bohrung Weiach. Werden die Mächtigkeit der Ablagerungen der USM und die Entnahmezonen in diesen drei Bohrungen mitbetrachtet, so ergibt sich zudem die Beobachtung, daß mit zunehmender Mächtigkeit der USM und zunehmender Tiefe der Entnahmezonen innerhalb der USM resp. des darunter unmittelbar anschließenden obersten verkarsteten Teils des Malms die Gesamtmineralisation sowie die Konzentration der chemischen Inhaltsstoffe zunimmt. Diese Beobachtungen sind nun in Übereinstimmung mit dem Konzept der hydrodynamischen Fließsysteme (J. TOTH, 1962, 1963), nach dem zu erwarten ist, daß in Exfiltrationszonen Mischungsvorgänge vorkommen (welche mit abnehmender Distanz zu dieser zunehmen), da sämtliche Strömungslinien konvergent auf diese Exfiltrationszone hin verlaufen. Ebenso sollte in diesem Bereich das hydraulische Potential mit zunehmender Tiefe innerhalb des Aquifers zunehmen, was zumindest durch die Ergebnisse der zwei innerhalb der Bohrung Weiach ausgeführten hydraulischen Tests im obersten und untersten Teil des verkarsteten Malms (Zonen von 188,0–202,0 m und von 242,9 bis 267,0 m Tiefe) gegenüber dem Grundwasser im Niederterrassenschotter bestätigt wird.

– Wie die Untersuchungen an Tunnelquellen, welche im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse (z.T. mit einer geringen Bedeckung mit quartären Lockergesteinen) in einer Tiefe (Überdeckung) von einigen 10 m bis 100 m entspringen, zeigen, findet die Neubildung des in der Molasse enthaltenen Grundwassers vorwiegend durch (vertikale) Infiltration von Niederschlags- und zumindest teilweise auch von Oberflächenwasser aus Flüssen und oberflächennahen Grundwasservorkommen statt. Wie aus den Analysendaten der Tunnelwässer ohne anthropogenes Tritium hervorgeht, findet diese vertikale Infiltration durch relativ langsame Fließ- (resp. Sicker-)bewegung (Perkolation) statt. Dies ist in Übereinstimmung mit dem abgeschätzten Bereich der (vertikalen) Durchlässigkeit um 10^{-7} m/s. Das bedeutet, daß nach ca. 100 m vertikaler Distanz in Fließrichtung (abhängig vom herrschenden hydraulischen Potential resp. dem lokalen hydraulischen Gradienten) innerhalb der Ablagerungen der Molasse ein Grundwasser ohne anthropogen produziertes Tritium zu erwarten ist.

Falls die Überdeckung und damit die vertikale Fließdistanz noch etwas größer ist resp. Zonen innerhalb der OSM und OMM mit noch wesentlich geringerer vertikaler Durchlässigkeit betrachtet werden, so sind bereits Austauschwasser vom NaHCO_3 -Typus, jedoch mit relativ hohen ^{14}C -Konzentrationen anzutreffen (Beispiel Milchbuckeltunnel, Probe Tm 931 m, H. SCHMASSMANN, 1990).

– Die an der Oberfläche im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse austretenden Schicht- und Kluftquellen (W. BALDERER, 1983) weisen jedoch anthropogen produziertes Tritium und deshalb eine relativ geringe Verweilzeit im Bereich von Monaten bis einigen Jahren, jedoch von < 25 Jahren auf (H. SCHMASSMANN et al., 1984). Es ist entsprechend den in W. BALDERER (1979, 1983) dargestellten Verhältnissen wahrscheinlich, daß diese Quellaustritte in Gesteinen mit akzentuierter

Morphologie wie im Aubachgebiet (Kt. Thurgau, W. BALDERER, 1983) häufiger sind und deshalb ein relativ großer Anteil des versickerten Wassers, bedingt durch den praktisch horizontalen Schichtaufbau, seitlich in Quellen an die Oberfläche tritt und deshalb nicht zur Speisung der tieferen Bereiche der Molasse beiträgt. Die Speisung der tieferen Bereiche erfolgt, wie die Tunnelquellen zeigen, eher innerhalb des zentralen Bereiches von morphologisch anstehenden Hügeln sowie bevorzugt aus hochgelegenen Zonen (Plateaus) anstehender Molasse ohne stark ausgeprägtes (akzentuiertes) morphologisches Relief. Dies bedeutet nun aber, daß die Speisung der Grundwässer in den tieferen Bereichen der Molasse (d.h. unterhalb größerer Überdeckung resp. unterhalb des morphologischen Basisniveaus) hauptsächlich in Regionen stattfindet, welche (entsprechend der mittleren Höhe der Einzugsgebiete) gegenüber dem Basisniveau der Exfiltrationszonen entlang des Rheins eine relativ große Höhendifferenz aufweisen, in welchen jedoch ein möglichst ausgeglichenes Relief mit geringer Variationsbreite zwischen h_{\max} und h_{\min} vorhanden ist. (Also eher in Regionen mit relativ ruhigem, glazial geprägtem Relief, wie z.B. im Zürcher Oberland, als in Regionen mit ausgeprägtem, durch fluviale Erosion entstandenem Relief wie im Hörnli-Bergland und im Aubachgebiet).

– Wie die im vorangehenden Kapitel dargestellte Interpretation der gemessenen ^{14}C -Konzentrationen der Tiefengrundwässer in der Bohrung Schafisheim (aus der USM) und in der Bohrung Weiach (aus dem verkarsteten Malm unterhalb der USM) zeigt, ist andererseits bei höherem hydraulischem Potential innerhalb der Deckschichten gegenüber dem Grundwasser in der Molasse auch eine Speisung durch die Grundwässer innerhalb dieser quartären Ablagerungen selbst im Bereich der glazial übertieften (in Molasse erodierten) Täler möglich. Dabei ist von Bedeutung, daß die Durchlässigkeit der quartären Ablagerungen in Tälern je nach granulometrischem Aufbau um mindestens ein bis drei Größenordnungen größer ist (resp. höchstens vergleichbar im ungünstigsten Fall) als jene der Ablagerungen der Molasse. Damit ist aber die vertikale Fließgeschwindigkeit in quartären Ablagerungen selbst bei vorhandenen Seeablagerungen größer (bzw. im ungünstigsten Fall etwa gleich groß) als im umgebenden (liegenden) anstehenden Gestein der Molasse. Dies bedeutet, daß Grundwasservorkommen in quartären Talfüllungen bei geeigneten Potentialverhältnissen zwischen dem darin enthaltenen Grundwasser und jenem in der umgebenden Molasse bevorzugte Zonen für die Speisung der Molasse darstellen, wie auch aus den schematischen theoretischen Beispielen in J. TOTH (1962, 1963) hervorgeht.

– Aus dem Vergleich des Grundwassers aus der OSM des Milchbuckttunnels mit den OMM-Grundwässern 1 Aqvi, 128 Mainau, 98 Konstanz und 97 Singen, welche zu demselben chemischen Na-HCO_3 -Typus gehören, ist eine im hydrodynamischen Sinne ähnliche Entstehung durch Versickerung (vertikale Infiltration) anzunehmen. Dabei ist jedoch eine zeitliche Differenzierung aufgrund der Isotopenbestimmungen zu erkennen: Während das Grundwasser aus dem Milchbuckttunnel sowohl aufgrund der ^{14}C -Konzentration als auch des $\delta^{18}\text{O}$ -Wertes eine Bildung unter aktuellen Klimabedingungen darstellt, ist für die OMM-Wässer ohne nachweisbare ^{14}C -Konzentration mit $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten unterhalb des Wertebereiches der aktuellen Niederschlags- und Grundwässer der möglichen Einzugsgebiete eine während kaltzeitlichen Bedingungen erfolgte Bildung (Infiltration) wahrscheinlich. Damit stellt sich nun die Frage nach der Erklärung der Entstehung der wesentlich stärker mineralisierten tieferliegenden Grundwässer vom Na-Cl -Typus, welche, wie in Fig. 3.6 schematisch dargestellt, diese schwach mineralisierten Grundwässer vom Na-HCO_3 -

Typus sowie teilweise auch jene vom Ca-HCO₃-Typus unterlagern. Die Deutung der Entstehung dieser wesentlich stärker mineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus sowie des Ablaufs der weiteren Entwicklung stellt den Schlüssel für die anvisierte Gesamtinterpretation der aktuellen Verhältnisse der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse (OSM, OMM und USM) und des oberen Malms dar.

3.3.3. Neu postulierte Thesen als Grundlage für ein hydrodynamisches Interpretationsmodell

Als neue Deutung werden in der vorliegenden Arbeit die folgenden drei Thesen neu postuliert:

I) Das hochmineralisierte Tiefengrundwasser vom Na-Cl-Typus entspricht einer Entstehung im Sinne eines ursprünglichen Formationswassers, welches bereits nach erfolgter Ablagerung der OMM innerhalb der beiden Formationen der OMM und der USM vorhanden war. Dieses hochmineralisierte Na-Cl-Wasser ist ursprünglich aus einer Mischung von schwach mineralisiertem, durch Niederschläge gebildetem Grundwasser (aus der Zeit terrestrischer Ablagerungsbedingungen der USM) mit brackischem bis marinem Wasser (aus den Perioden mit brackischen Bedingungen innerhalb der USM sowie marinen Bedingungen innerhalb der OMM) hervorgegangen. Dieses ursprünglich in den Ablagerungen der OMM und der USM vorhandene hochmineralisierte Na-Cl-Wasser entwickelte sich anschließend weiter durch Interaktion mit dem Gestein bzw. den darin enthaltenen Mineralien. (In H. SCHMASSMANN et al., 1984 wurde für das extrapolierte saline Endglied vom Na-Cl-Typus aus der Mischungsreihe der Grundwässer 141–144 Eglisau 1–4 eine Cl-Konzentration von 213 mval/l berechnet.)

II) Die Grenze der hochmineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus zu den darüberliegenden schwach mineralisierten Grundwässern vom Na-HCO₃-Typus entspricht der Lage des sog. „Interface“ oder der Grenzschicht (Grenzfläche), welche sich zwischen zwei Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte bei erreichtem hydrodynamischem Gleichgewicht ausbildet (entsprechend der Theorie von M. K. HUBBERT, 1940, in: H. R. LANGGUTH & R. VOIGT, 1980). Das heißt, diese Begrenzung (Grenzfläche) verläuft gekrümmt mit der tiefsten Lage innerhalb des zentralen Bereichs des Molassetroges (mit hohem morphologischem Relief und demzufolge auch großem hydraulischem Gradienten und maximaler Höhe des hydraulischen Heads) aufwärts gegen die regionalen Exfiltrationszonen hin.

III) Das oberhalb dieses „Interface“ anzutreffende Grundwasser vom Na-HCO₃-Typus entspricht, soweit es wesentlich tiefere δ²H- und δ¹⁸O-Werte sowie keine nachweisbare ¹⁴C-Konzentration aufweist, dem während der kaltzeitlichen Zeitperiode (endend ca. 10 000 Jahre von heute mit dem Beginn des Holozäns) durch vertikale Infiltration der Niederschläge gebildeten Grundwasser.

[Da dieser vertikale Infiltrationsprozeß als auch die Ionenaustauschprozesse innerhalb des Gesteins bis zur aktuellen Situation weiterhin ablaufen, sind auch im Bereich der OSM ebenfalls Grundwässer vom Na-HCO₃-Typus anzutreffen, welche wohl kein anthropogenes Tritium, jedoch relativ große ¹⁴C-Konzentrationen und δ²H- und δ¹⁸O-Werte im Bereich der aktuellen Niederschläge enthalten. Als rezenteste Bildung in Nähe des morphologisch anstehenden Bereiches finden sich die relativ jung infiltrierten Grundwässer der Molasse, welche zum Ca-HCO₃- bis Ca-Mg-HCO₃-Typus gehören und vorwiegend durch Lösungsprozesse mit dem Aquifergestein ein thermodynamisches Sättigungsgleichgewicht (gegenüber Calcit

und Dolomit) erreicht haben (W. BALDERER, 1989). Diese Grundwässer weisen im Bereich der an der Oberfläche austretenden Quellen relativ kurze Verweilzeiten innerhalb des Datierungsbereiches der ^3H -Methode auf. Bei größerer Überdeckung sind jedoch, wie die Grundwasserprobe (170) aus dem Dettenbergtunnel bei Embrach-Bülach zeigt, bereits Verweilzeiten von > 25 Jahren anzutreffen. Insgesamt zeigen jedoch alle untersuchten Grundwässer vom Ca-HCO₃-Typus $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im Bereich der aktuellen Niederschläge und oberflächennahen rezenten Grundwässer.]

3.3.4. Argumente für das neu postulierte Interpretationsmodell

Diese nun neu postulierten drei Thesen zu der Entstehung und der prinzipiellen hydrodynamischen Deutung der Grundwässer in der Molasse und im Malm können nun anhand der bereits dargestellten Beobachtungen überprüft werden:

Zu I) Ähnlich zu der von P. UDLUFT (1975, 1981) geäußerten Hypothese (nach Beschreibung in NAGRA, 1988) wird also angenommen, daß bereits zu einer sehr frühen Zeitepoche das in den Ablagerungen der USM enthaltene eher terrestrisch gebildete Grundwasser mit Wasser marinen Ursprungs (Brackwasser, Meerwasser, evaporitische Restlösungen) gemischt bzw. durch dieses verdrängt worden ist. Für diese Annahmen sprechen folgende Argumente:

– Allein aufgrund der Mächtigkeiten der Ablagerungen ergibt sich für die USM ein etwa drei- bis fünffaches Speichervolumen gegenüber jener der OMM. Bei einem Vorgang, welcher erst spät, d.h., nach erfolgter Bildung sämtlicher Ablagerungen der OSM, OMM und USM stattgefunden hätte, hätte die innerhalb der Ablagerungen der OMM enthaltene gegenüber der zu verdrängenden nur etwa $1/5$ bis $1/3$ ausmachende Wassermasse salinen Ursprungs sämtliches, schwach mineralisiertes Grundwasser in der USM verdrängen müssen. Dieser Vorgang würde jedoch keinem eigentlichen Verdrängungsprozeß, sondern eher einem Verdünnungsprozeß zwischen dem ehemaligen marinen Formationswasser aus der OMM und dem schwach mineralisierten Grundwasser in der USM entsprechen.

– Eher ist vorstellbar, daß während der Bildung der Ablagerungen der OMM das vorhandene marine bis brackische Wasser des Molassemeeres in die liegenden Ablagerungen der USM eingedrungen ist und entsprechend dem Dichteunterschied das darin vorhandene Grundwasser vollständig verdrängt resp. sich damit vermischt hat. Die geologische Zeitdauer der Bildung der Ablagerungen der OMM ist als ausreichend für eine hydrodynamische Einwirkung gegenüber den liegenden Ablagerungen der USM zu betrachten. Dieser Prozeß wäre, bedingt durch das höhere Potential (zusätzlich: Spiegelhöhe des Molassemeeres) und die größere Dichte des marinen OMM-Formationswassers, durch vertikale Infiltration zu den liegenden Ablagerungen der USM hin erfolgt, welche auch eine Durchlässigkeit in ähnlicher Größenordnung aufweisen (wie aus dem Vergleich der beobachteten Vorgänge der vertikalen Infiltration in bezug auf die pleistozän und holozän gebildeten Grundwässer hervorgeht). Durch diesen Prozeß der vertikalen Infiltration resp. der hydrodynamischen Ausgleichsströmungen wären sukzessive die Ablagerungen der USM mit dem in der OMM zirkulierenden (und mit dem damaligen Molassemeer wahrscheinlich in Kommunikation stehenden) Formationswasser vollständig erfüllt worden. Diese im tieferen Bereich der Ablagerungen der Molasse vorkommenden höher mineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus konnten nun jedoch bis jetzt mit Hilfe von Isotopenmethoden nicht datiert werden. Aufgrund der Werte der stabilen Isotope $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ ist, wie bereits vorangehend begründet, zumindest für

die ursprüngliche Mischungskomponente eine Entstehung als Formationswasser anzunehmen (B. W. BERTLEFF et al., 1987).

Zu II) Mit der Annahme, daß die Lage der Grenzfläche zwischen den tieferen, höher mineralisierten Grundwässern vom Na-Cl-Typus zum wesentlich schwächer mineralisierten Grundwasser vom Na-HCO₃-Typus einem Interface bei herrschendem hydrodynamischem Gleichgewicht zwischen zwei Flüssigkeiten mit verschiedener Dichte entspricht, ist in Übereinstimmung mit allen vorangehend dargestellten Beobachtungen der hydrodynamischen Beziehungen, der hydrochemischen Verhältnisse und der Isotopenwerte der einzelnen in den verschiedenen Entnahmestellen untersuchten Grundwässer.

– Für die einzelnen Grundwässer aus der USM bei Schafisheim und Eglisau sowie aus dem Malm der Tiefbohrung Weiach feststellbaren Mischungsprozesse, welche zu einer zunehmenden Verdünnung (resp. zu einer Abnahme der Gesamtmineralisation und der Konzentration der einzelnen gelösten Bestandteile) mit abnehmender Distanz zur regionalen Exfiltrationszone führen, können nur auf Mischungsprozesse entlang dieses Interface (gemäß Definition M. K. HUBBERT, 1940) zurückgeführt werden. Diese Mischungsprozesse werden dabei in Nähe der regionalen Exfiltrationszone durch folgende Umstände intensiviert:

– Der Strömungsquerschnitt nimmt gegen N zur Exfiltrationszone des Rhein generell ab, da die Mächtigkeiten der Ablagerungen der Molasse gegen N generell abnehmen (durch Auskeilen resp. Ausstreichen der Schichten der OMM, Abnahme der Mächtigkeit der USM von über 1000 m im zentralen Bereich des Molassebeckens auf rund 200 m bei Eglisau-Weiach, siehe schematisches Profil in Fig. 3.6).

– Durch die damit verbundenen größeren hydraulischen Gradienten wird in diesem Gestein der Molasse mit relativ kleiner Durchlässigkeit die Ausdehnung der Mischungszone zwischen dem stärker mineralisierten Na-Cl-Wasser und den darüberliegenden, schwach mineralisierten Grundwässern durch Dispersions- und Mischungsprozesse stark verbreitert. In Nähe der Exfiltrationszone mit relativ geringer Mächtigkeit treten Mischungsprozesse (innerhalb der USM) praktisch auf dem gesamten Strömungsquerschnitt auf. Dies kann bis zu einer praktisch vollständigen Vermischung der Grundwässer vom Na-Cl-Typus mit den darüberliegenden, schwach mineralisierten Grundwässern vom Na-HCO₃-Typus führen.

Mit diesem Vorgang stimmt nun die Beobachtung überein, daß in den Bohrungen Eglisau 1–4 nur ein gemischtes Wasser vom Na-Cl-Typus direkt unterhalb des vermutlich lokal infiltrierte, schwach mineralisierten Grundwassers vom Ca-HCO₃-Typus angetroffen wird (Fig. 3.6).

– Mit dieser hydrodynamischen Situation mit gegen die regionale Exfiltrationszone des Rheins auftretenden vergrößerten hydraulischen Gradienten und bei gleichzeitiger Verminderung des Strömungsquerschnittes kann die Reaktivierung der verkarsteten, während des Siderolithikums mit Bolustonen verstopften Kalke des Oberen Malms erklärt werden. Diese Reaktivierung ist dabei entsprechend dem hydraulischen Basisniveau zuerst in der direkten Umgebung des Rheins erfolgt und setzt sich nun rückschreitend von der regionalen Exfiltrationszone gegen den zentralen Bereich des Molassebeckens fort. Diese Reaktivierung ist im Malm, welcher in den Bohrungen Weiach sowie Eglisau 1 und 2 angetroffen wurde, bereits erfolgt, während in der Bohrung Schafisheim ein noch hydraulisch vollständig inaktiver, mit Bolustonen vollständig verstopfter Malm angetroffen wurde (A. MATTER et al., 1988).

– Entsprechend dem Konzept von M. K. HUBBERT (1940) kann nun ausgehend vom gemessenen hydraulischen Head (piezometrisches Niveau) des Grundwassers

der USM in der Bohrung Schafisheim die Lage des Interface mit Hilfe der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$z = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot \Phi_s - \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot \Phi_f \quad (3.8)$$

wobei:

- Φ_f : hydraulisches Potential bzw. Standrohrspiegelhöhe des nicht salinen bzw. schwach mineralisierten Grundwassers oberhalb des Interface,
- Φ_s : hydraulisches Potential bzw. Standrohrspiegelhöhe des salinen, stark mineralisierten Grund- oder Formationswassers unterhalb des Interface,
- γ_f : spezifisches Gewicht des nicht salinen, schwach mineralisierten Grundwassers (Annahme $\rho \sim 1,00 \text{ g/cm}^3$),
- γ_s : spezifisches Gewicht des salinen, stark mineralisierten Grund- oder Formationswassers

(wobei zwischen dem spezifischen Gewicht γ und der Dichte ρ die Beziehung $\gamma = \rho \times g$ gilt, wobei g der Erdbeschleunigung entspricht).

Ausgehend von einem eher theoretischen Gedankenexperiment unter der Annahme, daß a) das in der Entnahmezone von 553 bis 563 m Tiefe ab OK Terrain gemessene hydraulische Potential von 365 m ü.M. (entsprechend der unkorrigierten Formationsdruckhöhe, Kapitel 3.2.2.) dem hydraulischen Potential unterhalb der Grenzfläche (des Interface) des stärker mineralisierten Grundwassers vom Na-Cl-Typus entspricht, welches gemäß Analyse FRESENIUS in C. WITTMER (1986) eine Dichte von rund $1,0046 \text{ g/cm}^3$ aufweist, sowie b) das hydraulische Potential oberhalb dieser Grenzfläche ungefähr dem Grundwasserspiegel (piezometrisches Niveau) im genutzten oberen Grundwasserstockwerk entspricht, welcher ca. auf 366–367 m ü.M. liegt, ergeben sich als Abschätzung für die Höhenlage z des Interface innerhalb der Bohrung Schafisheim folgende Werte:

$z = +147,6 \text{ m}$ (ausgehend von $\Phi_s = 365 \text{ m}$, $\Phi_f = 366 \text{ m}$)

$z = -69,8 \text{ m}$ (ausgehend von $\Phi_s = 365 \text{ m}$, $\Phi_f = 367 \text{ m}$)

(Entsprechend den Angaben in A. MATTER et al., 1988, erstrecken sich die Ablagerungen der USM in der Tiefbohrung Schafisheim von +177 m ü.M. bis -145 m ü.M., wobei die Entnahmezone der Grundwasserproben 304/1,2 sich von -132 m ü.M. bis -142 m ü.M. erstreckt).

Dieses theoretische Gedankenexperiment zeigt nun zumindest, daß das Konzept von M. K. HUBBERT (1940) prinzipiell anwendbar ist und daß anzunehmen ist, daß die Lage der Grenzfläche zwischen dem schwächer mineralisierten Grundwasser einer Entstehung durch Versickerung der Niederschläge (etwa entsprechend dem Ca-HCO₃- bis Na-HCO₃-Typus) und dem darunterliegenden, stärker mineralisierten, vermutlich ehemaligen Formationswasser vom Na-Cl-Typus wirklich einem Interface bei einem erreichten hydrodynamischen Gleichgewichtszustand entsprechen könnte.

Wird vom Wert der Formationswasserdruckhöhe gemäß NAGRA (1989) von 381 m ü.M. ausgegangen, so muß im Gegensatz zu der vorangehend dargestellten Berechnung angenommen werden, daß das hydraulische Potential im tieferen Lockergesteinsgrundwasserleiter höher ist als im oberflächennahen genutzten Grundwasserleiter. Da jedoch für dieses Grundwasser im tieferen Lockergesteinsgrundwasserleiter keine Angaben zur Verfügung stehen, weil die betreffende Strecke nicht

beprobte und nicht getestet wurde, ist einzig die folgende Abschätzung möglich. Durch Umformung der Formel 3.8 ergibt sich:

$$\Phi_f = - \left[z - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot \Phi_s \right) / \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \right] \quad (3.9)$$

Unter der Annahme, daß die Lage des Interface nur innerhalb der folgenden Extremwerte von $z_{\max} = +177$ m ü.M. (Obergrenze USM, unter Berücksichtigung der Analysenergebnisse des Grundwassers der Bohrung Seon, F. MATOUSEK, 1989, ist anzunehmen, daß das tiefere Lockergesteinsgrundwasser nur schwach mineralisiert sein dürfte) und $z_{\min} = -132$ m ü.M. (Kote OK Packerintervall) schwanken kann, ergeben sich durch die Anwendung der Formel 3.9 folgende Werte für das hydraulische Potential des schwach mineralisierten Grundwassers oberhalb der Grenzfläche:

$\Phi_f \max = 382$ m ü.M.,

$\Phi_f \min = 383$ m ü.M.

Diese berechneten Werte für das hydraulische Potential oberhalb der Grenzfläche sind etwas tiefer als die in Kapitel 3.2.2., ausgehend von der hydraulischen Druckhöhe der Bohrung Seon und der Kote der Aare für das tiefere Lockergesteinsgrundwasser in der Bohrung Schafisheim abgeschätzte Druckhöhe von 395 m ü.M.

Unter der Annahme, daß diese Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Grundwassertypen, welche durch die Bohrungen 1 Aqvi und 2 Tiefenbrunnen im hydrochemischen Sinne auch quasi experimentell nachgewiesen ist (Fig. 3.6), wahrscheinlich einem Interface bei hydrodynamischem Gleichgewicht entspricht, können entsprechend den hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten auch folgende weitere Beziehungen aus den vorhandenen Beobachtungen abgeleitet werden:

Wie bereits erwähnt, stellt der Rhein (unterhalb Eglisau) resp. der damit verbundene Grundwasserstrom in diesem Abschnitt des Rheintales das eigentliche regionale Vorflutniveau für die Grundwässer aus der Molasse der betrachteten südlich davon gelegenen Region dar. Da der Rhein nun hauptsächlich schwach mineralisiertes Oberflächenwasser führt, und auch der damit verbundene Grundwasserstrom von diesem erfüllt ist, kann dieser streng genommen, im hydrodynamischen Sinne nur den Vorfluter mit direktem hydraulischem Anschluß für die schwach mineralisierten Grundwässer aus der Molasse darstellen, d.h., mindestens solange als noch eine Grundwassermächtigkeit (als Speichervolumen) unterhalb dieses Vorflutniveaus für das stark mineralisierte Grundwasser vorhanden ist. Dies würde nun bedeuten, daß entsprechend den aufgeschlossenen bzw. durch den Rhein entlang seines Laufes erodierten Schichten zuerst die schwach mineralisierten Grundwässer aus den erodierten Niveaus der USM austreten und erst weiter stromabwärts im Bereich des aufgeschlossenen, erodierten, verkarsteten Malms in zunehmendem Maße auch höher mineralisierte Grundwässer vom Na-Cl-Typus austreten.

Dieses Verhalten geht aus der Gleichung 3.8 nach M. K. HUBBERT (1940) hervor, da der hydraulische Head des höher mineralisierten Grundwassers (mit der größeren Dichte) stets tiefer liegt als das eigentliche „Süßwasser“-Vorflutniveau. Würde z.B. der Unterschied im hydraulischen Head rund 0,1 m zwischen dem schwach mineralisierten Grundwasser mit Dichte 1,0000 (entsprechend dem mittleren Vorflutniveau des Rheins auf rund 331 m) und dem stärker mineralisierten Grundwasser vom Na-Cl-Typus mit einer Dichte von 1,0046 betragen (entsprechend dem USM-Grundwasser 304/1,2 Schafisheim), so ergäbe dies entsprechend Gleichung 3.8 nach

M. K. HUBBERT (1940) eine Kote z von 309,2 m ü.M. und damit eine um rund 22 m tiefere Lage für das Interface gegenüber dem mittleren Vorflutniveau.

Aufgrund dieser Abschätzungen ist es sogar möglich anzunehmen, daß die Lage des Interface so tief liegt, daß keine direkte hydraulische Verbindung mit dem Rhein als Vorflutniveau aus geometrischen Gründen möglich ist und deshalb kein ungemischtes, hochmineralisiertes Grundwasser vom Na-Cl-Typus in den Rhein austreten kann. In dieser Situation würde sich deshalb in einer gewissen Tiefe unterhalb des Rheinniveaus die gegen N aufsteigende Malmplatte mit dem hydrodynamischen Interface schneiden, sodaß unterhalb des Interface dieses stärker mineralisierte ungemischte Grundwasser vom Na-Cl-Typus (welches aus dem ursprünglichen Formationswasser hervorgegangen ist) quasi gefangen bleiben und sich damit ein sog. „Biseau salé“ resp. ein geschlossener Konus ausbilden würde, wie dies in Fig. 3.7 schematisch dargestellt ist.

Entsprechend dieser theoretischen Lage des Interface in der Umgebung des Rheins als regionale Vorflut mit wie bereits erwähnt wesentlich reduziertem Fließquerschnitt und größeren hydraulischen Gradienten sind nun ausgedehnte Mischungsprozesse zu erwarten. Dabei spielen wahrscheinlich auch die langfristigen Schwankungen des Rheinniveaus (welcher dem Bezugspotential der Vorflutregion entspricht) eine wichtige Rolle. Es ist deshalb anzunehmen, daß alles austretende Grundwasser aus USM und Malm aus zwei resp. drei Wassertypen (Na-HCO₃-, Ca-HCO₃- und Na-Cl-Wässer) gemischt ist, d.h., die Mischungsfront sich praktisch über den gesamten Strömungsquerschnitt erstreckt. Dabei ist aber trotzdem stromabwärts entlang des Rheins eine zunehmende Mineralisation im austretenden Grundwasser bis zur Basis des verkarsteten Malms zu erwarten und auch feststellbar. (Untersuchungen des oberflächennahen Lockergesteinsgrundwassers aus der Talebene von Weiach (Hard bis Rütene) ergaben erhöhte Chloridkonzentrationen (Th. LOCHER, 1990, in Vorb.). Neben der Möglichkeit eines anthropogenen Ursprungs wäre es auch denkbar, daß diese erhöhten Chloridkonzentrationen durch einen Zufluß von Tiefengrundwasser vom Na-Cl-Typus bedingt sein könnten.

– Aus der geologischen Struktur der geometrischen Lage des oberen Malms, welcher sowohl die tiefste grundwasserleitende Einheit innerhalb des verkarsteten Bereichs der Exfiltrationszone als auch die begrenzend stauende Schicht unterhalb der USM im zentralen Bereich des Molassebeckens darstellt, läßt sich nun jedoch auch die Erklärung für die noch vorhandenen hochmineralisierten Grundwässer vom Na-Cl-Typus ableiten:

Entsprechend der Beckenstruktur des Malms, dessen Obergrenze im zentralen Bereich des Molassebeckens eine Tiefenlage von gegen 1800 m ü.M. erreicht (z.B. in der Bohrung Küsnacht/ZH, nach NAGRA, 1985), ergibt sich die Situation, daß die bestehenden aktuellen Vorflutniveaus wie z.B. des Rheins bei Herdern-Kaiserstuhl zu hoch liegen, um ein Austreten dieser im Beckeninnern vorhandenen hochmineralisierten Grund-/Formationswässer zu ermöglichen.

– Entsprechend den herrschenden hydrodynamischen Bedingungen wird dabei diese stärker mineralisierte Wassermasse vom Na-Cl-Typus durch das oberhalb des Interface vorhandene, zur regionalen Vorflut hinströmende, schwach mineralisierte Grundwasser überlagert.

Durch diesen hydrodynamischen Vorgang des Überströmens durch das quasi entlang des Interface darübergleitende schwach mineralisierte Grundwasser, welches entsprechend der Neubildungsrate und den dadurch herrschenden Potentialverhältnissen zu den regionalen Vorflutzone hinströmt, kommt es zu Mischungsprozessen.

zessen entlang des Interface. Dabei ist die Ausdehnung in vertikaler Richtung (resp. senkrecht zum Interface) dieser Mischungszone abhängig von der Durchlässigkeit des betreffenden Aquifergesteins und der reellen Fließgeschwindigkeit (im Sinne eines Dispersionsprozesses).

Dieser Mischungsvorgang entlang des Interface stellt nun den Hauptmechanismus für den Transport des stärker mineralisierten Grundwassers zum regionalen Vorfluter dar.

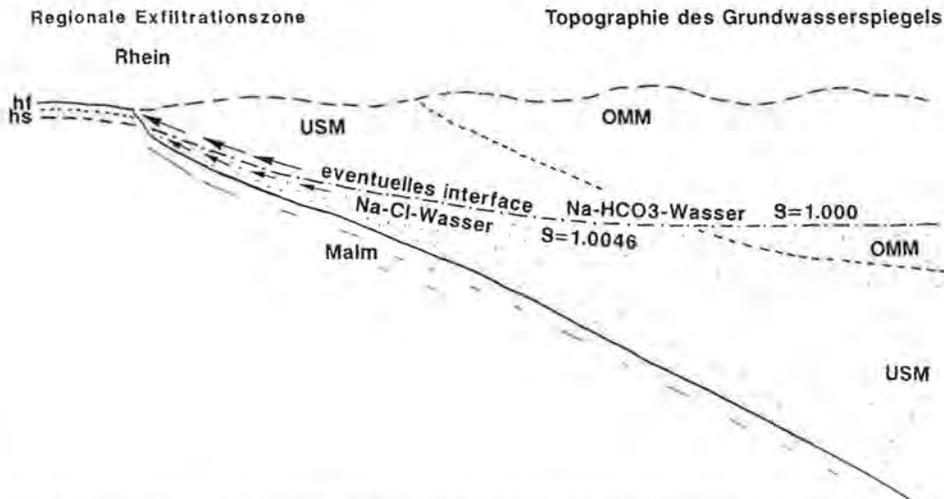


Fig. 3.7; Schema der Lage des Interface zwischen dem stärker und dem schwächer mineralisierten Grundwasser in USM und Malm in der Umgebung des Rheins als regionaler Vorfluter.

Entsprechend diesen Überlegungen stellt nun der Hauptteil des innerhalb der Beckenstruktur des Malms in den Ablagerungen der Molasse vorhandenen stark mineralisierten Grundwassers vom Na-Cl-Typus (als ursprüngliches Formationswasser) eine quasi immobile Wassermasse dar, über welche das schwach mineralisierte, durch Versickerung der Niederschläge entstandene Grundwasser (Süßwasser) nach N zu der Exfiltrationszone aufwärts gleitet und in den Rhein ausfließt. Innerhalb dieser stärker mineralisierten (salinen) Grundwässer vom Na-Cl-Typus mit vermutlicher Entstehung als Formationswasser sind ebenfalls Strömungen zu erwarten, welche jedoch entsprechend Detailuntersuchungen dieser Vorgänge entlang der Grenzfläche (E. CUSTODIO, 1975), resp. des Interface, nur gerade in der direkt unterhalb des theoretischen Interface liegenden Mischungsschicht parallel zur Grundwasserströmung oberhalb des Interface verlaufen. Durch diese Vorgänge entlang der Grenzfläche können nun auch die beobachteten Mischungsprozesse erklärt werden.

Andererseits stellt dieses tiefere, stärker mineralisierte saline Grundwasser vom Na-Cl-Typus aufgrund dieser Ausgleichsströmungen ein praktisch ungestörtes, jedoch zugleich aufgrund dieser Mischungsvorgänge entlang des Interface ein ideales „well mixed reservoir“ im Sinne der ursprünglichen Konzeption des Exponentialmodelles dar.

Zu III) Wie bereits dargestellt, wird davon ausgegangen, daß sämtliche schwach mineralisierten Grundwässer (vom Ca-(Mg)-HCO₃- bis zum Na-HCO₃-Typus) durch Infiltration von Niederschlägen, Oberflächenwasser und oberflächennahem

Grundwasser entstanden sind. Teilweise enthalten diese Grundwässer jedoch infolge von Mischungsprozessen mit den tiefer liegenden, höher mineralisierten Grundwässern vom Na-Cl-Typus auch Elemente mariner Herkunft wie Chlorid, Bromid, Jodid usw. (H. SCHMASSMANN et al., 1984).

Die beobachtete hydrochemische Differenzierung innerhalb dieser schwach mineralisierten Grundwässer läßt sich nun durch folgende Modellvorstellungen mit den Gesetzmäßigkeiten der hydrodynamischen Fließsysteme vereinbaren:

– Innerhalb der ungesättigten Zone verläuft die Infiltration vorwiegend vertikal.

– Die Oberfläche des Grundwasserspiegels, d.h. der Übergang zu der gesättigten Zone, stellt im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse, lokal modifiziert durch den horizontalen bis flach geneigten Schichtaufbau, generell ein Abbild der Morphologie der Geländeoberfläche (jedoch mit wesentlich gedämpftem Relief) dar (W. BALDERER, 1979, 1981, 1982, 1983). Die Oberfläche des Grundwasserspiegels weist also generell einen unebenen, durch Buckel, Rücken und Täler zu charakterisierenden Verlauf auf. (Sind an der Oberfläche oberhalb der Molasse noch Lockersteinsablagerungen vorhanden, so verläuft der Grundwasserspiegel als Grenze zwischen dem gesättigten und dem ungesättigten Bereich kontinuierlich durch die verschiedenen morphologisch anstehenden Gesteine der verschiedenen Ablagerungen hindurch. Die Lage und Krümmung des Grundwasserspiegels ist dabei von der jeweiligen Durchlässigkeit der betreffenden Gesteine und der infiltrierenden Wassermenge – Infiltrationsrate – abhängig.)

– Entsprechend der „Topographie“ des Grundwasserspiegels, welcher an jeder Stelle dem hydraulischen Head (resp. dem hydraulischen Potential oder dem piezometrischen Niveau) entspricht, kommt es zur Ausbildung der hydrodynamischen Fließsysteme. In Abhängigkeit von der räumlichen Verteilung der Durchlässigkeit und des hydraulischen Potentials innerhalb des gesättigten Bereichs führt diese Topographie des Grundwasserspiegels, wie in J. TOTH (1962, 1963) anhand von Modellsimulationen demonstriert, zur Ausbildung der verschiedenen Klassen von lokalen, intermediären und regionalen Fließsystemen. Lokale Fließsysteme sind dabei durch die Lage der lokalen Vorfluter (meist Talsysteme mit Flüssen und evtl. den Tallauf begleitende Grundwasserströme in Rinnenablagerungen) bedingt und weisen deshalb nur eine geringe Zirkulationstiefe auf.

Stromlinien intermediärer und regionaler Fließsysteme beginnen ebenfalls an der Grenzfläche des gesättigten zum ungesättigten Bereich (d.h. auf der Fläche des Grundwasserspiegels) und stellen deshalb immer auch die Fortsetzung gewisser Fließpfade der innerhalb des ungesättigten Bereiches durch vertikale Infiltration zusickernden Wasserteilchen dar. Diese Stromlinien verlaufen jedoch in größerer Tiefe unterhalb der lokalen Systeme. Nach der Systematik von J. TOTH (1962) werden dabei die lokalen hydrodynamischen Fließsysteme von den intermediären und regionalen, die intermediären hingegen von den regionalen hydrodynamischen Fließsystemen unterströmt. Die Wasserteilchen in intermediären Systemen weisen deshalb längere Fließpfade und damit größere Fließzeiten (resp. Verweilzeiten seit dem Zeitpunkt der Infiltration in die Erdoberfläche) als die Wasserteilchen in lokalen Fließsystemen auf, jene in regionalen Fließsystemen weisen sogar noch größere Fließ- resp. Verweilzeiten als jene in intermediären hydrodynamischen Fließsystemen auf.

Diese Systematik ist nun in dem Sinne wichtig, als die Grundwasserfließbewegung innerhalb der lokalen Systeme zu den lokalen Vorflutniveaus völlig abgekoppelt (ausgenommen von einer gewissen Mischung und Dispersion innerhalb eines eng begrenzten Übergangsbereiches) gegenüber den Fließbewegungen innerhalb der

intermediären und der regionalen Fließsysteme erfolgt. Dieselbe Abkoppelung ist auch zwischen regionalen und intermediären Fließsystemen vorhanden, falls diese nicht in einer gemeinsamen Exfiltrationszone münden. Dagegen sind Mischungen aller drei Systeme (lokal, intermediär und regional) im Bereich einer regionalen Exfiltrationszone zu erwarten (W. BALDERER, 1983, 1984).

3.3.5. Brückenschlag zwischen den dargestellten hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten zur dargestellten Interpretation der Isotopendaten

Die Verfolgung von Fließpfaden ist innerhalb eines realen Grundwasserleiters nur mit Hilfe von geeigneten Markierstoffen möglich, falls:

- a) deren Einspeisezeitpunkt oder der zeitliche Verlauf der Inputfunktion bekannt ist (gilt insbesondere bei nicht radioaktiven und anthropogen produzierten radioaktiven Tracern),
- b) die Inputfunktion bekannt, resp. die Inputkonzentration zeitlich konstant ist und das Gesetz der Abnahme der Konzentration im Verlaufe der Zeit (Zerfallsgesetz und Halbwertszeit) bekannt ist (natürliche und künstliche radioaktive Tracer).

Dabei gilt es, prinzipiell zwei Arten von Systemantworten auf eine Tracer-Einspeisung zu unterscheiden:

a) Künstliche und stabile Tracer:

Systemantwort: Ankunft des Markierstoffes: ja/nein?

Falls **Ankunftszeit** und **Einspeisezeitpunkt** bekannt, so kann eine **Fließzeit** bestimmt werden. Sind Beobachtungen an verschiedenen Beobachtungsstellen innerhalb eines Aquifers vorhanden, so kann der Durchgang des Tracers an allen Beobachtungsstellen registriert und damit das Fortschreiten der **Tracerausbreitung** beobachtet werden. Definitionsgemäß stellen dabei jene Punkte, an welchen der Tracer gleichzeitig eintrifft, eine Tracerfront oder eine Ausbreitungsfrent innerhalb eines Grundwasserleiters (resp. des mit Grundwasser gesättigten Gesteinskörpers) dar.

Diese Art von Systemantwort wird nun auch durch die stabilen Tracer innerhalb des Wassermoleküls ^2H und ^{18}O erhalten, falls z.B. zu einem bekannten, definierten Zeitpunkt sich deren Konzentration innerhalb des hydrologischen Kreislaufes brüsk innerhalb einer größeren Region oder eines ganzen Kontinents verändert. Ein solcher Konzentrationsprung ist für ^2H und ^{18}O aufgrund verschiedener klimatischer Studien im Wasser, welches aus Niederschlägen stammt, durch den Klimawechsel am Ende der Eiszeit (vor rund 10 000 Jahren) erfolgt.

b) Radioaktive Tracer:

1. **Systemantwort:** Ankunft des Markierstoffes resp. Markierstoff nachweisbar: ja/nein? Falls ja, so ergibt sich:

2. **Systemantwort:** Aus der **gemessenen Konzentration** des betreffenden radioaktiven Tracers innerhalb des die „Probe“ darstellenden Wasserpaketes einheitlicher Herkunft kann bei Kenntnis der Inputfunktion, des Zerfallsgesetzes und der Halbwertszeit (falls keine sekundären Prozesse auftreten oder diese korrigiert werden können) direkt die individuelle (mittlere) Verweilzeit für dieses Wasserpaket bestimmt werden (im Sinne einer mitgebrachten, beim Start in den Untergrund ausgelösten, initialisierten Stoppuhr).

Aus dieser zweiten Systemantwort ergeben sich nun wesentlich detailliertere Informationen, welche theoretisch sogar erlauben würden, aus einer gegebenen Kon-

zentrationsverteilung innerhalb eines Aquifers eine mittlere Verweilzeitverteilung zu rekonstruieren. In diesem Sinne, wie in W. BALDERER (1983, 1984) dargestellt, repräsentieren Bestimmungen an Wasserproben einzelner Entnahmepunkte innerhalb eines Aquifers zeiträumliche Einzelwerte innerhalb eines Konzentrations- oder als Transformation eines Verweilzeitfeldes.

Nun ist es jedoch oft schwierig, bis zu dieser Bestimmung einer individuellen Verweilzeit, welche für die betreffende Wasserprobe repräsentativ ist, vorzudringen. Dies geht eigentlich aus dem „Wenn“ und „Aber“ als grundsätzliche Bedingungen zu dieser zweiten Systemantwort hervor:

- Die Inputfunktion muß bekannt sein.
- Sekundäre Prozesse müssen korrigiert oder zumindest abgeschätzt werden können.
- Die betreffende Wasserprobe muß eine einheitliche Herkunft aufweisen oder es müssen die Mischungsanteile definiert werden können (vollkommene Mischung, Zweikomponentenmischung resp. multiple Komponentenmischung, dispersive Mischung, einheitliches Wasserpaket ohne Durchmischung gemäß dem Piston-Flow-Modell).

Im Falle der untersuchten Tiefengrundwässer aus der OSM, OMM und USM sind für die Bestimmungen der natürlichen Radioisotope ^3H und ^{14}C , welche in der vorliegenden Arbeit dargestellt sind, oft eine einzelne oder mehrere der vorausgesetzten Bedingungen zur repräsentativen, sinnvollen Bestimmung der mittleren Verweilzeit nicht gegeben (z.B. Mehrdeutigkeit der Inputfunktion bei Tritium, schwierige Abschätzung der sekundären Prozesse der Evolution des Kohlenstoffsystems bei ^{14}C sowie die nicht eindeutig klare einheitliche Herkunft resp. die schwierig abschätzbare Mischungsfunktion).

Somit ergibt sich auch bei der Interpretation der Bestimmungen der natürlichen Radioisotope ^3H und ^{14}C oft nur die erste Systemantwort oder, wie im vorangehenden Kapitel dargestellt, die Möglichkeit der Bestimmung einer (quasi-rezenten) Mischungskomponente (mit ^3H und teilweise auch mit ^{14}C).

Entsprechend dieser Begründung ergeben sich aufgrund der angewendeten Isotopenmethoden für die hydrogeologische Charakterisierung der Grundwassersysteme innerhalb der Ablagerungen der OSM, OMM, USM und Malm nun die folgenden Informationen:

- $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$: Infiltration unter eiszeitlichen Bedingungen oder unter nacheiszeitlichen, aktuellen Bedingungen. (Alternativen: Infiltration von Oberflächenwasser aus höherem Einzugsgebiet, andere Wassermassen mit „schweren“, auf Verdunstung hinweisenden Isotopenwerten, Mischungen).
- ^3H : Falls oberhalb Nachweisgrenze ($> 2 \text{ TU}$) anthropogene Beimischung wahrscheinlich, Verweilzeit $< 25\text{--}30$ Jahre (bei Anwendung des Piston-Flow-Modells) oder Mischung.
- ^{14}C : Rezente Beimischung, Bereich von „größer als“ resp. „kleiner als“ (Maximalalter, Minimalalter) resp. Bereich der Modellalter. Falls nicht nachweisbar, evtl. Minimalalter für Nachweisgrenze (falls Korrekturmodell anwendbar).

In Kombination dieser Resultate der Bestimmungen der natürlichen Isotope mit der beobachteten chemischen Beschaffenheit (z.B. ausgehend von der Charakterisierung nach Hauptbestandteilen entsprechend den einzelnen Grundwassertypen) ist es möglich, eine gewisse weitere Differenzierung der Interpretation zu erreichen.

Für die Grundwässer innerhalb der Molasseablagerungen können aufgrund der vorliegenden Isotopen- und hydrochemischen Resultate der untersuchten Grundwässer folgende Unterscheidungen (im Sinne von Erfahrungsgrundsätzen) getroffen werden:

Ca-HCO₃-Wässer (bis Ca-Mg-HCO₃):

- mit anthropogenem Tritium: im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse,
- ohne anthropogenes Tritium, jedoch mit ¹⁴C in relativ hoher Konzentration: 170 Dettenbergtunnel Embrach-Bülach (OMM, im Übergangsbereich zu OSM), 5 Schönenbuch (mit Mg > Ca als Mg-Ca-HCO₃-Typ, Bohrung in Elsässer-Molasse USM)) nach H. SCHMASSMANN et al. (1984).

Na-HCO₃-Wässer:

- kein Grundwasser bekannt, welches anthropogen produziertes Tritium enthält,
- mit ¹⁴C in nachweisbarer Konzentration: Milchbucktunnel (Tm 931 m, OSM),
- mit ¹⁴C an resp. unterhalb Nachweisgrenze: 1 Aquis, 2 Tiefenbrunnen, 128 Mainau, 98 Konstanz, 97 Singen.

3.3.6. Definition des neu postulierten konzeptuellen hydrodynamischen Interpretationsmodells

Entsprechend diesem kurz erläuterten Interpretationskonzept zu den Isotopen- und hydrochemischen Bestimmungen ergeben sich in Kombination mit den vorgehend dargestellten Gesetzmäßigkeiten der hydrodynamischen Fließsysteme die folgenden Schlußfolgerungen in bezug auf die hydrodynamischen Verhältnisse innerhalb der Ablagerungen der Molasse (OSM, OMM und USM) und des Malm innerhalb der engeren Region der Nordostschweiz, welche das neu postulierte konzeptuelle hydrodynamische Interpretationsmodell definieren, dessen Hauptmerkmale in Fig. 3.8 schematisch dargestellt sind:

– Tritiumhaltiges Grundwasser vom Ca-HCO₃- bis Ca-Mg-HCO₃-Typus (mit δ²H und δ¹⁸O-Werten im Bereich der aktuellen Niederschläge) stellt das Resultat aktueller Neubildung dar. Solche Grundwässer sind im Bereich der morphologisch anstehenden Molasse als eigentliche Sickerwässer oberhalb des gesättigten Bereiches sowie als seitlich austretende Schicht- und Kluftquellen (praktisch im sublokalen Bereich der lokalen Fließsysteme entsprechend dem Schema in Fig. 3.9 nach W. BALDERER, 1981, 1983) anzutreffen. (Leider sind eigentliche lokale Vorflutgebiete im Bereich der Talsohle meist mit quartären Ablagerungen überdeckt, sodaß eigentliche Vorflutquellen eines gesamten lokalen hydrodynamischen Fließsystems innerhalb der Molasse recht selten zu beobachten sind. Ein Beispiel in diesem Sinne bildet eventuell der Aubach bei Fischingen (Kt. Thurgau), welcher bei Niedrigwasser praktisch nur aus den unzähligen Quellabflüssen der Molasse gespiesen wird und dessen Bachbett oberhalb Fischingen zu einem großen Teil aus den anstehenden Schichten der Oberen Süßwassermolasse gebildet wird (W. BALDERER, 1983). Wie in W. BALDERER (1989) dargestellt, unterscheidet sich der Chemismus des Wassers im Aubach bei Fischingen nicht wesentlich von den Wässern der einzelnen Quellen, welche alle zum Ca-Mg-HCO₃-Typus gehören.)

– Grundwässer ohne anthropogenes Tritium werden innerhalb des tieferen gesättigten, jedoch morphologisch sichtbaren anstehenden Bereiches der Ablagerungen der OSM als auch der OMM angetroffen (Milchbucktunnel und 170 Dettenbergtunnel). Da, wie in Fig. 3.8 dargestellt, auch die Fließlinien (Stromlinien) regionaler Fließsysteme vom Bereich der morphologisch anstehenden Molasse ausgehen (wobei

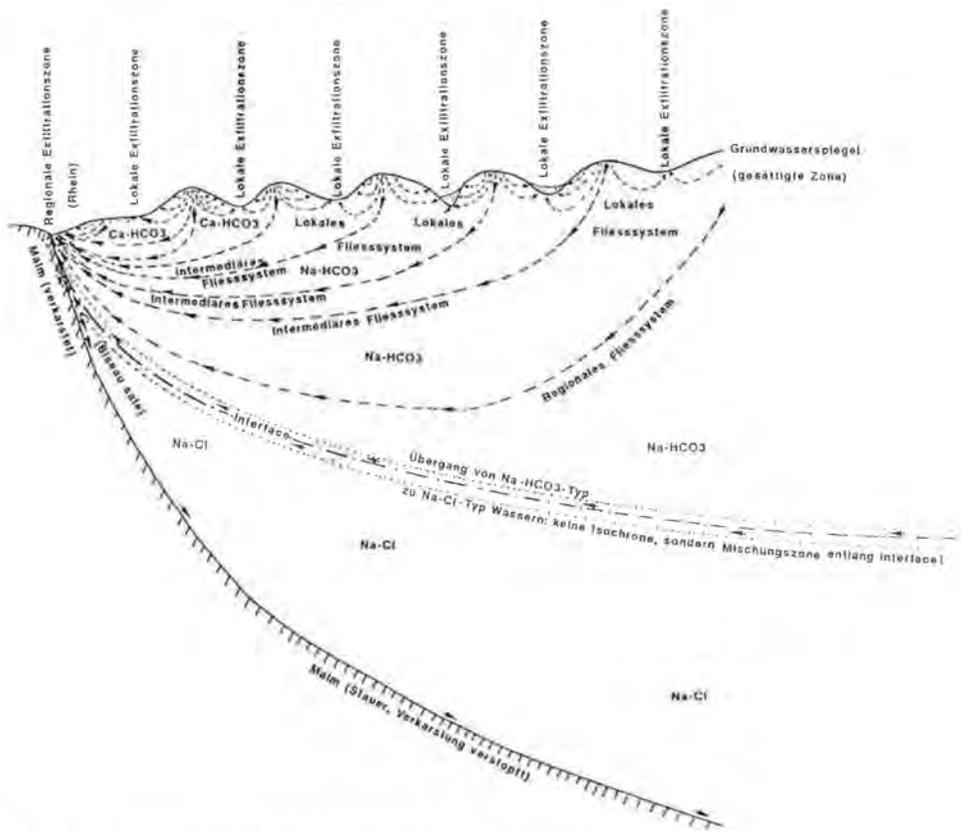
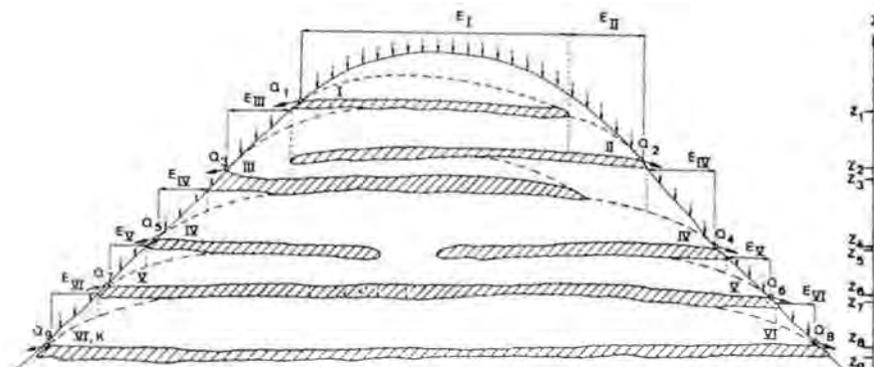


Fig. 3.8: Schematisches hydrodynamisches Interpretationsmodell.

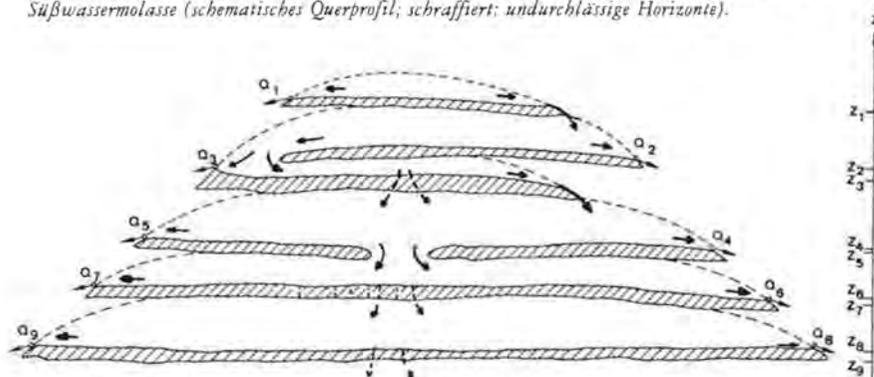
aus dem zentralsten Teil in Nähe der Kulmination des Grundwasserspiegels mit vorwiegend vertikaler bis subvertikaler Fließrichtung) kann nicht entschieden werden, ob diese beiden Proben zu lokalen Fließsystemen gehören oder bereits den Ausgangspunkt zu einer Entwicklung innerhalb von intermediären bis regionalen hydrodynamischen Fließsystemen darstellen.

Diese beiden Wässer aus Tunnelquellen sind aufgrund der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit dem Wertebereich der aktuellen Niederschläge zu vereinbaren. Falls der chemisch-thermodynamische Prozeß des Ionenaustausches von Ca^{2+} gegen Na^+ einen zeitlich limitierten irreversiblen Prozeß darstellt, so müßte das Quellwasser aus dem Milchbucktunnel, welches bereits zum Na-HCO_3 -Typus gehört, eine tendenziell etwas höhere Verweilzeit aufweisen.

– Die aus der OMM entnommenen Grundwässer (1 Aquis, 98 Konstanz, 128 Mainau) gehören nun ebenfalls zum Na-HCO_3 -Typus, enthalten aber weder anthropogen produziertes Tritium noch eine nachweisbare ^{14}C -Konzentration (in bezug auf die vorliegenden Bestimmungen). Diese Grundwässer können aufgrund der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nicht mit einer Entwicklung durch die aktuellen, lokalen Niederschläge (mit $\delta^2\text{H}$ um -70%), sondern nur durch Niederschläge eines kaltzeitlichen Klimas (mit $\delta^2\text{H}$ um -90% , nach B. W. BERTLEFF et al., 1987) erklärt werden.



Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse in einem Quellgrundwassergebiet der Oberen Süßwassermolasse (schematisches Querprofil; schraffiert; undurchlässige Horizonte).



Darstellung der Grundwasservorkommen in einem Quellgrundwassergebiet der Oberen Süßwassermolasse (schematisches Querprofil; schraffiert; undurchlässige Horizonte; strichliert: Fläche des freien Grundwasserspiegels).

Fig. 3.9: Schematische Darstellung der möglichen hydrodynamischen Beziehungen der einzelnen grundwasserleitenden Horizonte innerhalb der Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse (W. BALDERER, 1983).

[Eine zumindest theoretisch mögliche alternative Erklärung der Entstehung dieser Grundwässer ist aber nicht ganz auszuschließen: die Möglichkeit einer Infiltration von Oberflächenwasser aus Limmat, Zürichsee oder Bodensee, welches selbst bei aktuellen Bedingungen ebenfalls ähnlich „leichte“ $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wie kaltzeitlich gebildete Grundwässer aufweist. Diese Möglichkeit würde bestehen, falls angenommen wird, daß ein solches Wasser durch erfolgten Ionenaustausch ebenfalls bereits zum Grundwasser vom Na-HCO_3 -Typus geworden ist, und entsprechend der Infiltrationsperiode, Verweilzeit und hydrochemischer Entwicklung kein anthropogen produziertes Tritium sowie ^{14}C -Konzentration an resp. unterhalb der Nachweisgrenze aufweist. Auch in diesem Fall ist eine relative Klassierung – Grundwasser mit größerer Verweilzeit als die vorangehend dargestellten Gruppen von Grundwässern – möglich.

Einzig eine Verknüpfung mit der Epoche mit kaltzeitlichen Klimabedingungen im Sinne einer eindeutigen ja/nein-Systemantwort ist in diesem Fall nicht möglich. Da sich jedoch durch Edelgasuntersuchungen an vergleichbaren Grundwässern aus der Molasse und dem Malm in Südbayern und Oberösterreich (J. RUDOLPH et al.,

1983, L. EICHINGER et al., 1983, J. E. GOLDBRUNNER, 1984, J. N. ANDREWS et al., 1985, 1987) Infiltrationstemperaturen ergaben, welche um 5 bis 7° C niedriger sind als die Bodentemperaturen unter aktuellen klimatischen Bedingungen (mit +7 bis +9° C), ist zumindest tendenziell die Annahme einer Infiltration unter kaltzeitlichen Bedingungen auch für diese aus der OMM der Nordschweiz untersuchten Grundwässer zu bevorzugen. Da diese Interpretation in Übereinstimmung mit den gemessenen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie dem Resultat der ^{14}C -Bestimmungen ist (auch in Analogie mit J. RUDOLPH et al., 1983), wird in der anschließenden Interpretation von dieser Hypothese einer kaltzeitlichen Infiltration dieser Grundwässer vom Na-HCO_3 -Typus aus der OMM ausgegangen.]

Im hydrodynamischen Sinne zeigen diese OMM-Wässer vom Na-HCO_3 -Typus, daß in den betreffenden Entnahmezonen der einzelnen Bohrungen hydrodynamische Verhältnisse herrschen, welche erlauben, daß Grundwässer unbeeinflusst von oberflächennahen Beimischungen während längerer Zeiträume im betreffenden Aquifer zirkulieren können. In diesen Bereichen sind deshalb entweder absteigend oder subhorizontal verlaufende Fließlinien anzunehmen, welche zu regionalen bis intermediären hydrodynamischen Fließsystemen gehören.

– Das aus der Tiefbohrung 2 Tiefenbrunnen (Zürich) entnommene Grundwasser (mit Entnahmezone innerhalb der OMM und der obersten Meter der USM) gehört bereits zum Typus der Na-Cl -Wässer und weist mit rund 56 mval/l eine fast viermal höhere Gesamtmineralisation als das OMM-Grundwasser in der 2 km entfernten Bohrung 1 Aqvi auf. Ebenso wie die Grundwässer der vorangehend dargestellten Gruppe weist das Grundwasser 2 Tiefenbrunnen kein anthropogen produziertes Tritium und eine ^{14}C -Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze auf. Entsprechend der chemischen Beschaffenheit und den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten stellt das Grundwasser 2 Tiefenbrunnen eine Mischung zwischen ursprünglichem, wesentlich höher mineralisiertem Formationswasser und einem schwach mineralisierten Grundwasser vom Na-HCO_3 -Typus dar (z.B. könnte entsprechend den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und der Gesamtmineralisation das Grundwasser 2 Tiefenbrunnen eine Mischung zwischen dem Grundwasser 304/1,2 Schafisheim vom Na-Cl -Typus und dem Grundwasser 128 Mainau, welches zum Na-HCO_3 -Typus gehört, darstellen.)

Entsprechend dem postulierten Modellkonzept der hydrodynamischen Fließsysteme (in Fig. 3.8) könnte dieses Grundwasser 2 Tiefenbrunnen nun aus dem Übergangsbereich des Interface zwischen dem stark mineralisierten, ehemaligen salinen Formationswasser vom Na-Cl -Typus zu den darüberliegenden, schwächer mineralisierten Grundwässern vom Na-HCO_3 -Typus stammen. Da in diesem Bereich des Interface eine Mischungszone entsprechend dem Effekt der hydrodynamischen Dispersion bei Grundwasserströmungen mit differentiell unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten anzunehmen ist, dessen vertikale Ausdehnung entsprechend den Beobachtungen in Küstengebieten (E. CUSTODIO, 1975) von der Durchlässigkeit und Klüftung des betreffenden Aquifergesteins abhängig ist, kann das Grundwasser 2 Tiefenbrunnen auch in hydrodynamischem Sinne als Mischung verstanden werden. In diesem Fall würde das Grundwasser 2 Tiefenbrunnen zeigen, daß eine Mischung dieser beiden Wassermassen in regionalen Fließsystemen, wie es dem theoretischen Entstehungskonzept entspricht, keine nachweisbare ^{14}C -Konzentration enthält, solange keine zusätzliche oberflächennahe Beimischung vorhanden ist. In diesem Fall würde das Tiefengrundwasser 2 Tiefenbrunnen einer Herkunft (innerhalb des Entnahmebereiches) innerhalb des Mischungssaumes (resp. Übergangsbereiches) des Interface zwischen dem höher mineralisierten ehemaligen Formationswasser

vom Na-Cl-Typus und dem darüberliegenden, schwachmineralisierten Grundwasser vom Na-HCO₃-Typus bei vorwiegend horizontalen bis subhorizontalen Fließrichtungen entsprechen.

– Grundwässer vom Na-Cl-Typus aus den Bohrungen 141 Eglisau 1, 304/1,2 Schafisheim und 302/5-9 Weiach enthalten kein anthropogen produziertes Tritium, weisen jedoch mittelgroße bis große ¹⁴C-Konzentrationen auf. Wie in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, stellen diese Wässer Mischungen verschiedener Wassertypen dar (vom salinen Na-Cl-Typus mit dem Austauschwasser vom Na-HCO₃-Typus und dem oberflächennahen Ca-HCO₃-Typus). Deshalb weisen diese drei Grundwässer als resultierende Mischungen entsprechend der Herkunft der einzelnen Mischungskomponenten unterschiedliche δ²H- und ¹⁸O-Werte innerhalb des in Fig. 3.5 dargestellten Mischungsbereiches auf.

Ausgehend vom dargestellten konzeptuellen Modell der hydrodynamischen Fließsysteme in Fig. 3.8 stellen diese Grundwässer, deren Entnahmestellen (insbesondere Weiach und Eglisau 1) in der Nähe der regionalen Exfiltrationszone gelegen sind, Mischungen schwach mineralisierter Grundwässer aus regionalen und intermediären Fließsystemen (und wahrscheinlich sogar einzelner Komponenten aus den am nächsten gelegenen lokalen Fließsystemen) mit dem stärker mineralisierten Grundwasser vom Na-Cl-Typus (im Bereich des Mischungssaumes des Interface) dar.

– Aus dieser nun dargestellten Diskussion der einzelnen untersuchten Grundwässer und ihrer hydrodynamischen Stellung geht hervor, daß keine direkten Informationen über die Beschaffenheit des eigentlichen, unverdünnten salinen, hochmineralisierten, ursprünglichen Formationswassers vorliegen, aus welchem durch Mischungsprozesse die beobachteten Grundwässer vom Na-Cl-Typus entstanden sind. Es stellt sich die Frage, ob dieses ursprüngliche Formationswasser überhaupt noch existiert oder ob dieses bereits weitgehend auf die Werte der Konzentrationen und der Beschaffenheit der untersuchten Grundwässer vom Na-Cl-Typus innerhalb des gesamten Speicherbereiches des vom Malm begrenzten Molassebeckens verdünnt worden ist.

Aufgrund hydrodynamischer Überlegungen ist, wie bereits erwähnt, anzunehmen, daß innerhalb dieses höher mineralisierten Grundwassers vom Na-Cl-Typus (mit höherer Dichte) Ausgleichsströmungen stattfinden, welche durch die vorhandene Strömung entlang des Interface und dem damit verbundenen Mischungsprozeß zu einer stetigen Verdünnung dieses tieferen Grundwassers, bestehend aus ehemaligem evolviertem Formationswasser, führen. Andererseits ist aufgrund dieses Modellkonzeptes mit Dichteströmungen zu rechnen. Damit wäre aber anzunehmen, daß im tiefsten zentralen Bereich des USM-Beckens (mit einer Tiefe der begrenzenden Malmoberfläche von bis gegen 2000 m unterhalb Meeresniveau) stark mineralisierte saline Formationswässer vom Na-Cl-Typus vorhanden sein müßten, welche dem ursprünglichen, jedoch durch ausgeprägte Wasser-Gestein-Wechselwirkung sich ständig weiterentwickeltem Formationswasser entsprechen dürften. Zu dieser These führt auch die vorangehend dargestellte hydrodynamische Überlegung, daß praktisch kein ungemischtes Tiefengrundwasser vom Na-Cl-Typus in der regionalen Exfiltrationszone austreten kann, da das Vorflutniveau entsprechend dem Potential des schwach mineralisierten Rheins zu hoch liegt und zugleich die als Stauer wirkenden Schichten des Malms gegen N zum Rhein hin ansteigen. Aufgrund dieser Überlegungen stellt dieses postulierte tiefe „Beckenwasser“ als ungemischtes Endglied der Grundwässer vom Na-Cl-Typus ein eigentliches „connate water“ oder eingeschlossenes Formationswasser dar, das sich durch ausgeprägte Gestein-Wasser-Wechsel-

wirkung weiterentwickelt hat, wobei, wie die in diesen untersuchten Grundwässern von Weiach und Schafisheim enthaltenen H_2S , CO_2 und Methangase zeigen, ausgeprägte Reduktionsprozesse ablaufen (W. BALDERER, 1990).

Wie diese unter hydrodynamischem Gesichtspunkt durchgeführte Interpretation der Isotopenwerte und der chemischen Beschaffenheit der einzelnen untersuchten Grundwässer zeigt, lassen sich sämtliche Merkmale mit dem dargestellten konzeptuellen hydrodynamischen Modell gemäß Fig. 3.8 vereinbaren. Es soll nun deshalb versucht werden, die aus diesem Modellkonzept hervorgehenden Konsequenzen sowohl in bezug auf die vorangegangene Entwicklung der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse bis zum heutigen Zustand als auch in bezug auf die zukünftige Entwicklung kurz als Abriss darzustellen.

3.4. Resultierende Entwicklung der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse als Konsequenz des postulierten konzeptuellen hydrodynamischen Interpretationsmodells

Ausgehend von der generellen Situation nach der Ablagerung der Schichtkomplexe der Oberen Süßwassermolasse (OSM) zu Beginn des Frühquartärs ergeben sich aufgrund des postulierten hydrodynamischen Interpretationsmodells folgende Hypothesen zur Entwicklung der Grundwässer innerhalb des Mittelländischen Molassebeckens (am Beispiel der Region der Nordostschweiz):

Phase 1:

Nach erfolgter Ablagerung der OSM (und z.T. schon während der Bildung dieser terrestrischen Ablagerungen) bilden sich darin durch Infiltration der Niederschläge Grundwasservorkommen. Da die liegenden Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse (OMM) und der Unteren Süßwassermolasse (USM), welche bedingt durch die marinen Ablagerungsbedingungen während der Bildung der OMM mit salinem, marinem bis brackischem Formationswasser erfüllt worden sind (da eine gewisse Mischung mit den ursprünglichen Wässern innerhalb der USM anzunehmen ist), kommt es im Kontakt mit dem durch Versickerung der Niederschläge innerhalb der Ablagerungen der OSM gebildeten Grundwasser zur Ausbildung eines sog. Interface. Die Lage dieses Interface zwischen zwei Flüssigkeiten (Wässern) mit verschiedener Dichte ist gegeben durch ein hydrodynamisches Gleichgewicht entsprechend der Theorie von M. K. HUBBERT (1940). Dabei prägt die räumliche Verteilung des hydraulischen Potentials entsprechend der Topographie der piezometrischen Fläche des Grundwasserspiegels (resp. des hydraulic head) den Verlauf (resp. die Topographie) dieser Grenzfläche oder Interface.

Die Topographie des Grundwasserspiegels (als Grenzfläche zwischen der ungesättigten zu der gesättigten Zone, mit $p = p_{atm} = 0$) stellt dabei im Bereich der morphologisch anstehenden Ablagerungen generell ein Abbild der Morphologie der Geländeoberfläche dar, jedoch mit in Abhängigkeit von der vertikalen Infiltrationsrate und der Durchlässigkeit der Gesteine, mehr oder weniger gedämpftem (smoothed) Relief. Das Interface als Grenzfläche zwischen dem schwach mineralisierten, durch Infiltration der Niederschläge und Oberflächenwässer gebildeten Grundwasser und dem salinen, hoch mineralisierten Formationswasser ist nun seinerseits vom hydraulic head, d.h. vom Grundwasserspiegel oder piezometrischen Niveau, abhängig. In anschaulichem Sinne stellt dabei das Interface eine Art Spiegelbild oder Negativabdruck der Grundwasserspiegeloberfläche dar. (Ein anschau-

liches Beispiel dafür ist z.B. der „Süßwassertropfen“ unterhalb einer ozeanischen Insel mit einem Hügel im Zentrum. Der Verlauf des Interface ist dabei durch die Infiltration der Niederschläge auf dieser Insel resp. die positive Aufwölbung des Grundwasserspiegels gegeben und entweder mit der bekannten Näherungsformel nach GHYBEN-HERZBERG, 1889, 1901, oder exakt nach dem Konzept von M. K. HUBBERT, 1940, berechenbar.) Damit ist aber auch der generelle Verlauf des Interface von N nach S gegeben, indem die Geländeoberfläche und damit auch der hydraulic head gegen S ansteigt. Entsprechend dem Gesetz von M. K. HUBBERT, 1940, muß das Interface nach S generell absinken (resp. einfallen).

Phase 2:

Der Prozeß des hydrologischen Kreislaufes mit Niederschlag, Verdunstung, Infiltration, Oberflächenabfluß und Exfiltration von Grundwasser setzt sich fort entsprechend den lokal gegebenen, zeiträumlich variierenden hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen. Dieser Vorgang setzt sich auch während des Pleistozäns fort, d.h. während der verschiedenen alternierenden Eiszeiten und Interglazialperioden (Warmzeiten).

In dieser Phase führte wahrscheinlich die z.T. sehr hohe Eisbedeckung (im Sinne einer hydrostatischen Überlast) zusammen mit erodierten, übertieften Tälern, hohen Niederschlagsmengen und den resultierenden Schmelzwässern bei gleichzeitig eher reduzierter Verdunstung zu einer gegenüber heutigen aktuellen Verhältnissen wesentlich höheren Speisung der Grundwasservorkommen u.a. auch innerhalb der Ablagerungen der Molasse. Es ist deshalb anzunehmen, daß der gesättigte Bereich innerhalb der Ablagerungen der Molasse zu dieser Zeitperiode eher höher lag, was nun aber auch einer höheren Lage des Grundwasserspiegels, d.h. der Fläche des hydraulic head während dieser Phase, entspricht.

Durch diese Vorgänge wurde aber das Interface im Sinne einer Ausgleichsbewegung entsprechend tiefer gedrückt bis weit in die Ablagerungen der OMM und sogar der USM hinein, je nach den lokal herrschenden Potentialverhältnissen.

Durch Volumenausgleich wurde dabei (entsprechend der durch die Kompression bewirkten Erhöhung des hydrostatischen Druckes innerhalb des Formationswassers) ein Teil des Formationswassers entweder über die zu dieser Zeitperiode existierenden Vorfluter (Exfiltrationsniveaus) entsprechend der Lage der Flüsse nach außen an die Oberfläche abgegeben, oder ist eventuell sogar über bestehende tektonische Störungszonen mit hydraulischer Kommunikation in tiefere Aquifers injiziert worden. (Die Konsequenzen aus diesem postulierten Vorgang müssen noch weiter abgeklärt werden, u.a. auch durch hydrodynamische Modellierungen. Dies ist, wie in H. SCHMASSMANN et al., 1984, S. 239, erwähnt wird, eventuell für die Quellen von Baden zu postulieren.)

Phase 3:

In der Nacheiszeit führte die globale Erwärmung infolge des Klimawechsels zu einem allgemeinen Abschmelzen des Eises und zum Rückzug der Gletscher. Dadurch ist die Überlast weggefallen. Durch die Überdeckung der Felsoberfläche durch diverse Ablagerungen mit der Auffüllung der Talrinnen, Verlandung von Seen, wurde außerdem die Speisung der Molasse im großen und ganzen wahrscheinlich eher verkleinert. Damit ergab sich aber innerhalb der Festgesteinsablagerungen der Molasse eine gewisse Erniedrigung der Fläche des hydraulic head, d.h. der Oberfläche des Grundwasserspiegels. Dies führte nun aber erneut zu einer hydrodynamischen Ausgleichsbewegung, wobei sich das Interface aufwärts, d.h., zu einer neuen, höheren

Position hin verlagerte, als Anpassung an die veränderten hydrodynamischen Bedingungen. Durch diese Verlagerung des Interface wurde eine ausgeprägte Mischungszone im Übergangsbereich zwischen dem salinen Formationswasser vom Na-Cl-Typus und dem überlagernden, wahrscheinlich zur Hauptsache pleistozän infiltrierten, schwach mineralisierten Grundwasser erzeugt. Gleichzeitig wurde innerhalb der lokalen Fließsysteme, d.h. innerhalb des Bereiches, welcher etwa mit den morphologisch anstehenden Molasseschichten übereinstimmt, das pleistozän infiltrierte Grundwasser innerhalb kürzester Zeit durch holozän gebildetes Wasser ersetzt (resp. herausgespült). (Wie aus dieser Überlegung hervorgeht, reflektieren die Grundwässer innerhalb der lokalen hydrodynamischen Fließsysteme immer die aktuellen herrschenden Infiltrationsbedingungen).

Phase 4:

Im heutigen aktuellen beobachtbaren rezenten Zustand sind die pleistozän infiltrierten Grundwässer teilweise noch innerhalb von intermediären, größtenteils jedoch nur noch innerhalb der regionalen hydrodynamischen Fließsysteme mit subhorizontalen Fließlinien anzutreffen. Da im Bereich der Exfiltrationszonen die lokalen, intermediären und regionalen Fließsysteme sich vereinigen, sind in diesem Bereich die ursprünglichen, ungemischten, pleistozän infiltrierten Grundwässer vom Na-HCO₃-Typus herausgespült bzw. ersetzt worden. Relikte dieser pleistozänen Wässer vom Na-HCO₃-Typus sind jedoch noch innerhalb des Mischungssaumes des Interface als Mischungskomponente vorhanden, wie z.B. in den Wässern von Eglisau.

Phase 5:

Aus den beobachteten Vorgängen und Gesetzmäßigkeiten kann auch der Verlauf der zukünftigen Entwicklung im generellen Sinne prognostiziert werden: Die im aktuellen Zustand innerhalb der intermediären und vorwiegend regionalen hydrodynamischen Fließsysteme vorhandenen Grundwässer der pleistozänen Infiltrationsperiode vom Na-HCO₃-Typus werden allmählich ganz aus dem Bereich der intermediären Fließsysteme verdrängt. Dabei greift die Ausspülung des pleistozän infiltrierten Grundwassers von der regionalen Exfiltrationszone rückschreitend auf immer längere hydrodynamische Fließlinien über (verbunden mit dem gleichzeitigen Auftreten von Ca-HCO₃-Wässern oberhalb des Interface-Mischungssaumes im oberflächennahen Bereich resp. von Na-HCO₃-Wässern, welche unter aktuellen Bedingungen gebildet worden sind und ¹⁴C in höherer Konzentration aufweisen, analog den Grundwässern aus dem Milchbucktunnel). Entlang des Interface ist verbunden mit dem Ausströmen der schwach mineralisierten Grundwässer (pleistozäner und holozäner Infiltration) an den regionalen Exfiltrationszonen eine stetige Zunahme der Verdünnung des salinen Formationswassers, verbunden mit einer immer größeren vertikalen Ausdehnung der Mischungszone zu erwarten. Dabei setzt sich möglicherweise der Vorgang der Aufwärtsbewegung des Interface als Ausgleichsbewegung zum Übergang von den pleistozänen zu den aktuellen holozänen Bedingungen (mit Erniedrigung) des hydraulischen Heads noch weiter fort. Dieser Prozeß wird wahrscheinlich längerfristig durch die bereits einige Jahrzehnte andauernde bzw. nun neu beginnende Nutzung der Grundwässer in der OMM und der USM noch intensiviert. Die dadurch bewirkte lokale Erniedrigung des hydraulischen Potentials (Heads) führt insbesondere in der Umgebung der einzelnen Fassungsstandorte mit der Zeit zu Aufwölbungen des Interface, verbunden mit einer Vergrößerung des Mischungssaumes, d.h. der Aktivierung der bereits ablaufenden

Mischungsprozesse zwischen Wässern vom Na-HCO₃- bzw. dem Ca-HCO₃-Typus mit dem höher mineralisierten Grundwasser vom Na-Cl-Typus.

Als Folge dieser Mischungsprozesse werden in den Wässern vom Na-Cl-Typus vermehrt Beimischungen jüngerer oberflächennahen Grundwassers auftreten. Solche Beimischungen jüngerer oberflächennaher Grundwässer sind bis jetzt aufgrund der analysierten ¹⁴C-Konzentrationen im Grundwasser 141 Eglisau 1 zu konstatieren sowie aufgrund der lokalen natürlichen hydrogeologischen Verhältnisse in den Grundwässern aus der USM und dem Malm der Nagra-Bohrungen Schafisheim und Weiach. Dabei kann im Falle von Eglisau 1 diese Beimischung jüngerer Grundwassers entweder durch die natürliche Fließbewegung innerhalb eines lokalen Fließsystems, welches in die regionale Exfiltrationszone mündet, bedingt sein, eventuell jedoch intensiviert durch die Nutzung dieses Grundwassers aus der USM in vier resp. drei Bohrungen sowie den fast gleichzeitig erfolgten Aufstau des Rheins durch den Bau des Kraftwerks Eglisau. (Die Rolle der glazial übertieften und mit quartären Ablagerungen aufgefüllten Talrinnen muß dagegen für eine detailliertere Interpretation mit Hilfe von hydrodynamischen Simulationsmodellen noch weiter untersucht werden).

Von allen diesen Einflüssen jedoch relativ unberührt bleibt das im zentralen und tiefen Beckenbereich der Molasse noch vorhandene, wahrscheinlich gegenüber dem USM-Grundwasser 304/1 Schafisheim noch wesentlich stärker mineralisierte ehemalige evolvierte Formationswasser. Außer einer gewissen im Laufe der Zeit zunehmenden Verdünnung als Folge des Mischungsprozesses entlang des Interface, bleibt dieses Grundwasser aufgrund der gegebenen geologischen Struktur sowie der durch die Dichtedifferenz bedingten negativen Potentialdifferenz zum regionalen Vorflutniveau praktisch immobil innerhalb des Beckens gefangen. Ein allmählicher Verlust an gelösten Bestandteilen erfolgt dabei einzig über Mischung am Interface, verbunden mit dem Abfluß innerhalb des Mischungssaumes, wobei diesem Vorgang insbesondere das aufwärts gerichtete auskeilende Ende des Interface als sog. „Biseau salé“ entlang der aufsteigenden, an der Oberfläche austreichenden Malmstruktur ausgesetzt ist (wobei innerhalb dieser Malmstruktur der oberste verkarstete Bereich in der Region der regionalen Exfiltrationszone des Rheins reaktiviert worden ist).

Zusammenfassung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, für die Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse der Nordschweiz die spezifisch hydrogeologischen Aspekte darzustellen, welche durch die Anwendung der Isotopenmethoden in Kombination mit hydrochemischen Untersuchungen gewonnen werden können.

Innerhalb der Ablagerungen der Molasse können insgesamt drei verschiedene chemische Typen von Grundwässern beobachtet werden:

- a) Ca-(Mg)-HCO₃-Wässer generell innerhalb des Bereiches der morphologisch anstehenden Molasse sämtlicher drei lithostratigraphischer Einheiten OSM, OMM und USM,
- b) Na-HCO₃-Wässer generell in den unterhalb des heutigen aktuellen morphologischen Basisniveaus der Täler vorhandenen Ablagerungen der Molasse und des Malms,

- c) Na-Cl-Wässer, welche wesentlich stärker mineralisiert sind, in den unterhalb des Basisniveaus der Täler vorhandenen Formationen der OMM, USM und des offenen, verkarsteten, mit der USM in Verbindung stehenden Malms. Dieser Na-Cl-Typus ist aufgrund der vorliegenden Beobachtungen in größerer Tiefe als die vorangehend beschriebenen zwei Wassertypen vorhanden, stellt also das eigentliche Basisgrundwasser des Molasse-Malm-Systems dar, welches diese beiden anderen Grundwassertypen stets unterlagert.

Diese hydrochemischen Verhältnisse stellen nun in Kombination mit den Informationen der Isotopenuntersuchungen den Ausgangspunkt für die Interpretation der hydrodynamischen Vorgänge hinsichtlich der qualitativen Beschreibung der Fließsysteme dar. Dabei wird der Versuch gewagt, für diese Tiefengrundwässer in der Molasse und im Malm hydraulische und hydrogeologische Daten und Beobachtungen als zusätzliche Stütze (jedoch streng jede Vermischung vermeidend) mitzubenützen, um die hydrochemischen Aussagen an einem quasi unabhängigen Maßstab zu messen (wobei auch die Auswirkungen der tiefen, aus quartären Lockergesteinen bestehenden Talfüllungen diskutiert werden). Als Resultat dieser Überlegungen wird anschließend ein resultierendes konzeptuelles Interpretationsmodell vorgestellt, um darauf basierend eine Rekonstruktion der vorangehenden und zukünftigen resultierenden Entwicklung der Grundwässer innerhalb der Ablagerungen der Molasse zu postulieren. In diesem Aspekt liegt nun das größte Potential der Anwendung der Isotopenmethoden, welches es in zukünftigen interdisziplinären Studien in Kombination mit der Anwendung von hydrodynamischen Simulationsmodellen noch weiter auszuloten gilt. Dies ist insbesondere bei der Planung und Ausführung von Projekten von Bedeutung, von welchen potentielle Einflüsse auf die natürlichen Systeme über Zeiträume von Jahrtausenden bis Jahrmillionen zu erwarten sind.

Literatur

- ANDREWS, J. N., J. E. GOLDBRUNNER, W. G. DARLING, P. J. HOOKER, G. B. WILSON, M. J. YOUNGMAN, L. EICHINGER, W. RAUERT & W. STICHLER (1985): A radiochemical, hydrochemical, and dissolved gas study of groundwaters in the Molasse basin of Upper Austria. – E.P.S.L., 73 (1985), 317–332.
- ANDREWS, J. N., M. J. YOUNGMAN, J. E. GOLDBRUNNER, & W. G. DARLING (1987): The Geochemistry of Formation Waters in the Molasse Basin of Upper Austria. – Environ Geol. Water Sci., Vol. 10, No 1, 43–57.
- BALDERER, W. (1979): „Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau)“^a. – Manuscript de thèse, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 1, 2, Neuchâtel.
- BALDERER, W. (1979): Die Obere Süßwassermolasse als hydrogeologisches Gesamtsystem. – Bull. Centre d'Hydrogéologie, No 3, 27–39, Neuchâtel, Suisse.
- BALDERER, W. (1981): Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau). – Gas – Wasser – Abwasser, 1981/3, Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- BALDERER, W. (1983): Hydrogeologie der Oberen Süßwassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz). – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 34/35, 15–54, Graz.
- BALDERER, W. (1983): Bedeutung der Isotopenmethoden bei der hydrogeologischen Charakterisierung potentieller Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle. – Nagra Techn. Ber., NTB 83-04, Dezember 1983, Nagra, Baden.
- BALDERER, W. (1984): Hydrogeologische Gesamtsysteme in quartären Lockergesteinsablagerungen. – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 36, 115–125, Graz.
- BALDERER, W. (1984): To the Concept of Interpretation of the Results of Isotope and Hydrochemical Determinations for the Definition and Characterization of the Natural Conditions in Geological

- Formations. – Bull. du Centre d'Hydrogéologie, No. 5, University of Neuchâtel, Switzerland.
- BALDERER, W. (1985): The NAGRA investigation project for the assessment of repositories for high-level radioactive waste in geological formations. – *Mineralogical Magazine*, April 1985, Vol. 49, 281–288.
- BALDERER, W. (1985): Sondierbohrung Böttstein, Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen zur hydrogeologischen Charakterisierung der Tiefengrundwässer. – Nagra Techn. Ber., NTB 85-06, January 1985, Nagra, Baden.
- BALDERER, W. (1986): Signification de l'âge moyen de l'eau souterraine donné par les isotopes radioactifs. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, No. 6, 43–66, Suisse.
- BALDERER, W. (1989): Hydrochemie der Quellen der Oberen Süßwassermolasse im Einzugsgebiet des Aubaches (Schweiz). – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 40, 49–74, Graz.
- BALDERER, W. (1989): Zur Anwendung der Isotopenmethoden für die hydrogeologische Charakterisierung der Tiefengrundwässer am Beispiel der Region Nordschweiz. – Habilitationsschrift ETHZ, 1989 (unveröff.).
- BALDERER, W. (1990): Paleoclimatic Trends Deduced in Groundwaters within Swiss Molasse Basin as Evidence for the Flow Systems Definition. – Proc. Int. Conf. on Water Res. in Mountainous Regions, XXIInd Congress of IAH, Lausanne, Switzerland.
- BALDERER, W. (1990): Past and Future Evolution of Flow Systems as Response to Changing Climatic Conditions and Anthropogenic Influences (Implications Derived from Hydrogeological, Isotope and Hydrochemical Investigations of the Molasse Deposits of the Northeastern Part of Switzerland). – Proc. Int. Conf. on Water Res. in Mountainous Regions, XXIInd Congress of IAH, Lausanne, Switzerland.
- BALDERER, W., J.-Ch. FONTES, J. L. MICHELOT & D. ELMORE (1986): Isotopic Investigations of the Water-Rocksystem in the Deep Crystalline Rock of Northern Switzerland. – Special Paper, 33, Saline Waters and Gases in Crystalline Rocks, Geol. Ass. of Canada.
- BALDERER, W., W. RAUERT & W. STICHLER (1987): Environmental Isotope study of the Deep Groundwaters in Northern Switzerland. – International Symposium on the use of Isotope Techniques in Water Resources Development, IAEA-SM-299/114, Vienna.
- BALDERER, W. & F. J. JR. PEARSON (1990): Isotopic Composition of Groundwater, Chapt. 3.2. in: PEARSON, F. J. JR., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN & A. GAUTSCHI (1990): Isotope Hydrogeology of Northern Switzerland. – Nagra Technical Report, NTB 88-01, in prep., Nagra, Baden.
- BALDERER, W., F. J. JR. PEARSON & S. SOREAU (1990): Sulphur and Oxygen Isotopes in Sulphate and Sulphide, Chapt. 7.1. in: PEARSON, F. J. JR., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN & A. GAUTSCHI (1990): Isotope Hydrogeology of Northern Switzerland. – Nagra Technical Report, 88-01, in prep., Nagra, Baden.
- BARKER, J. F., P. FRITZ & R. M. BROWN (1978): Carbon-14 Measurements in Aquifers with Methane. – IAEA-SM-228/33, Vienna.
- BATH, A. H., W. M. EDMUNDS & J. N. ANDREWS (1979): „Paleoclimatic trends deduced from the hydrochemistry of a triassic sandstone aquifer, U.K.“. – *Isotope Hydrology*, 1978, 545–568, IAEA, Vienna.
- BATSCHKE, H., F. BAUER, H. BEHRENS, K. BUCHTELA, H. J. DOMBROWSKI, R. GEISLER, M. A. GEY, H. HÖTZL, F. HRIBAR, W. KÄSS, J. MAIRHOFER, V. MAURIN, H. MOSER, F. NEUMAIER, J. SCHMITZ, W. A. SCHNITZER, A. SCHREINER, H. VOGG, & J. G. ZOTL (1970): Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967–1969. – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 22, 5–159, Graz.
- BAUER, F., R. BENISCHKE, F. P. BUB, A. BURGER, H. DOMBROWSKI, R. GOSPODARIĆ, H. HÖTZL, F. HRIBAR, W. KÄSS, L. KIRALY, Ch. LEIBUNDGUT, H. P. LEDITZKY, I. MÜLLER, H. PERLEGA, P. RAMSPACHER, U. SCHÖTTERER, U. SIEGENTHALER, H. ZOJER, J. G. ZOTL & M. ZUPAN (1980): Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 32, 5–100, Graz.
- BAUER, F., H. BEHRENS, W. DROST, W. KÄSS, Ch. LEIBUNDGUT, H. MOSER, W. PERLEGA, V. RAJNER, D. RANK, W. STICHLER & H. R. WERNLI (1981): Tracerhydrologische Untersuchungen im Langental (Schweiz). – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 33, 5–123, Graz.
- BAUMANN, A. R. (1987): Geologie und Hydrogeologie des Embracher Tales und des Unteren Tösstales (Kt. Zürich) – Diss. ETH Nr. 8357.
- BEAR, J. (1972): Dynamics of fluids in porous media. – Amer. Elsevier, New York, London, Amsterdam.

- BEAR, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. – Mc. Graw Hill inc.
- BERTLEFF, B. W. (1984): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. – Diss. natur.-math. Gesamtfak. Univ. Heidelberg.
- BERTLEFF, B. W. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. – *Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 12, 1–271, Freiburg i. Brsg.
- BERTLEFF, B. W., J. E. GOLDBRUNNER, W. STICHLER, J. N. ANDREWS & G. DARLING (1987): Characterization of Deep Groundwater in South Germany and Upper Austria by Means of Isotopic and Hydrochemical Investigations. – Proceedings of Symp. Isotope Techn. in Water Resources Development, IAEA-SM-299/8P, 705–706, Vienna.
- BERTLEFF, B. W., K. HEDIN, I. STÖBER, G. STRAYLE, J. WERNER, L. EICHINGER, H. MOSER, W. RAUERT, W. STICHLER (1988): Flow System Investigations in the Karstified Thermal Malm Aquifer in the Western Part of the South German Molasse Basin. – Proc. 5th Int. Symp. on Underground Water Tracing, 363–372, SUWT, Athens.
- BÜCHI, U. P. (1974): Pionierbohrung auf ein tief gelegenes Wasservorkommen in Zürich. – *NZZ* 311, 19.
- BÜCHI, U. P. (1975): Wasser und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum. – *Inst. bauwiss. Forsch.*, 36, 5–20, Zürich.
- BÜCHI, U. P. & S. SCHLANKE (1977): Zur Paläontologie der schweizerischen Molasse. – *Erdöl-Erdgas-Zeitschrift*, 93, Sonderausgabe, 57–68.
- BÜRGISSER, H. M., H. FURRER & K. A. HÜNERMANN (1983): Stratigraphie und Säugetierfaunen der mittelmiozänen Fossilfundstellen Hüllstein und Martinsbrünneli (Obere Süßwassermolasse, Nordostschweiz). – *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 76/3, 733–762.
- CADISCH, J. (1937): Geologie der Schweizer Mineral- und Heilquellen. Geologische Charakteristik der Schweizerischen Mineral- und Heilquellen. – In: NUSSBERGER, G. (Hrsg.): *Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz*, 21–64, Bern.
- CLAYPOOL, G. E., W. T. HOLSER, I. R. KAPLAN, SAKAI, HITOSCHI & ZAK (1980): The age of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. – *Chem. Geology*, 28, 199–260.
- CLAYTON, R. N., I. FRIEDMANN, D. GRAF, T. K. MAYEDA, W. F. MEENTS & N. F. SHIMP (1966): The origin of saline formation waters, I. isotopic composition. – *J. Geophys. Res.*, 71, 3869–3882, Richmond.
- CRAIG, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. – *Science*, 133, 1702–1703.
- CRAIG, H. (1966): Isotopic compositions and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. – *Science*, 154, 1544–1548.
- CUSTODIO, E. (1975): Les nappes côtières. – AIRH/SIA, Rapperswil.
- DAANSGARD, W. (1974): Stable isotopes in precipitation. – *Tellus*, 16/4, 436 p.
- DEINES, P., D. LANGMUIR, R. S. HARMON (1974): Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters. – *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 38, 1147–1164.
- DIEBOLD, P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz: Strömungsverhältnisse und Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – *Mitt. aarg. natf. Ges.*, 31, 11–52.
- DONATSCH et al. (1981): Die Grundwasserverhältnisse im Rheintal beim Kernkraftwerk Leibstadt. – *Gas – Wasser – Abwasser*, 61/12.
- EICHINGER, L., W. RAUERT, W. STICHLER, B. W. BERTLEFF & R. EGGER (1984): Comparative study of different aquifer types in central Europe using environmental isotopes. – *Isotope Hydrology*, 1983, 271–289, IAEA, Wien.
- FONTES, J.-Ch. (1979): Hydrogéologie: Un champ privilégié pour l'utilisation de la technique des isotopes du milieu. – Implications de l'Hydrogéologie dans les autres Sciences de la Terre (I.F.L.E.S. Symposium), Montpellier (France), 11.–16. Septembre 1978, *Memoire hors série CERGH-USTL Montpellier*, 589–590.
- FONTES, J.-Ch. (1983): Dating of groundwater. – *Guidebook and Nuclear Techniques in Hydrology*, 1983, IAEA, Vienna.
- FONTES, J.-Ch. & R. GONFIANTINI (1967): Fractionnement isotopique de l'hydrogène dans l'eau de cristallisation du gypse. – *C. R. Seance Acad. Sci., Sér. D.* 265, 4–6.
- FONTES, J.-Ch., G. C. BORTOLAMI & G. M. ZUPPI (1978): Hydrologie isotopique du massif du Mont-Blanc. – *Isotope Hydrology*, 1978 (Proc. Symp. Neuherberg, 1978), Vol. 2, Vienna.
- FONTES, J.-Ch. & J. M. GARNIER (1979): Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of the existing models and a new approach. – *Water Resour. Res.*, Vol. 15, No. 2, Washington D.C.

- FREIMOSER, M. & Th. LOCHER (1980): Gedanken zur pleistozänen Landschaftsgeschichte im nördlichen Teil des Kantons Zürich aufgrund hydrogeologischer Untersuchungen. – *Eclogae Geol. Helv.*, Vol. 73, 251–270.
- FREIMOSER, M., Th. LOCHER, A. VON MOOS, M. A. GAUTSCHI & C. SCHINDLER (1976): Die Grundwasserhältnisse im unteren Glattal und Windlacherfeld. – Unveröff. Bericht, Büro Dr. von Moos AG.
- FRITZ, P. & J. C. FONTES (1980): Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. – Vol. 1, Elsevier, Amsterdam.
- FRITZ, P., J. C. FONTES, S. K. FRAPE, J. L. LOUVAT, J. L. MICHELOT & W. BALDERER (1989): The isotope geochemistry of Carbon in groundwater at Stripa. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 53, 1765–1775.
- GEYH, M. (1972): On the determination of the initial ^{14}C content in groundwater. – Proc. 8th Int. Conf. Radiocarbon Dating (New Zealand), 369–380.
- GHYBEN, B. W. (1989): Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam. – Kunst. Inst. Ing. Tijdschrift, 21 p, Den Haag.
- GOLD, T. (1985): Genesis of commercial gas deposits and their relation ship to a mantle source. Workshop on Symposium: Occurrence and Genesis of brines and gases in crystalline rocks. – Fredericton-85-Joint annual Meeting of the Geological Association of Canada.
- GOLD, T. & S. SOTER (1980): The Deep Earth Gas Hypothesis. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, Vol. 46, Nr. 111, Oktober 1980, 11–35.
- GOLDBRUNNER, J. E. (1984): Zur Hydrogeologie des oberösterreichischen Molassebeckens. – *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 36, 83–102, Graz.
- HAUG, A. (1985): Feldmethoden zur Grundwasserentnahme aus Tiefbohrungen und zur hydrochemischen Überwachung der Bohrspülungen. – Nagra Techn. Ber., NTB 85-07, Nagra, Baden.
- HERZBERG, A. (1901): Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. – *Journ. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, Vol. 44, 815–819.
- HÖGL, O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. – Haupt, Bern und Stuttgart.
- HUBBERT, M. K. (1940): Theory of ground-water motion. – *Journ. of Geology*, Vol. 48, Nr. 8, 785–944.
- HUG, J. (1907): Geologie der nördlichen Teile des Kantons Zürich. – *Beitr. z. geolog. Karte der Schweiz*, N.E., Lief. 15.
- HUG, J. (1917): Die Grundwasserströme der Schweiz, insbesondere des Kantons Thurgau. – *Mitt. der Thurg. Natf. Ges.*
- HUG, J. (1918): Grundwasservorkommnisse der Schweiz. – *Ann. der Schweiz, Landeshydrographie*, Bd. III.
- HUG, J. (1919): Die Schweiz im Eiszeitalter. – Rascher, Zürich.
- HUG, J. & A. BEILICK (1934): Die Grundwasser-Verhältnisse des Kantons Zürich. – *Beitr. Geologie Schweiz, geotechn. Ser., Hydrol.*, 1.
- HÜRLIMANN, Brauerei (1988): Tranken schön die Mastodonten „Aqui“. – Inserat NZZ.
- HÜRLIMANN, Brauerei (1989): Aqui, Geschichten aus dem Zürcher Untergrund. – Brauerei Hürlimann AG.
- IAEA (1981): Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water cycle. – IAEA Technical Reports Series, No. 210.
- IAEA (1983): Palaeoclimates and palaeowaters: A collection of environmental isotope studies. – Proc. of an Advisory group Meeting, Vienna, 25.–28. Nov. 1980.
- ISENSCHMID, Ch. (1986): Hydrochemisches Untersuchungsprogramm: Inventar der Probeentnahmestellen des Regionalprogramms. – Nagra, unveröff. Bericht, Nagra, Baden.
- ISLER, A., F. PASQUIER & M. HUBER (1984): Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000 (mit angrenzenden Gebieten von Baden-Württemberg). – Hrsg. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) & Schweiz. Geol. Komm. Bern.
- JACKLI, H. & Th. KEMPF (1972): Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100 000, Blatt Nr. 31, Bözberg-Beromünster. – Schweiz. Geotechn. Komm. u. Schweiz. Geol. Komm.
- KEMPF, Th. (1981): Kanton Aargau, Grundwasserkarte 1:25 000, Blatt Aarau. – Baudep. Kanton Aargau.
- KEMPF, Th., M. FREIMOSER, P. HALDIMANN, V. LONGO, E. MÜLLER, C. SCHINDLER, G. STYGER & I. WYSSLING (1986): Die Grundwasservorkommen im Kanton Zürich. *Erl. z. Grundwasserkarte 1:25 000, Schweiz.* – Schweiz. Geotechn. Komm. u. Schweiz. Geol. Komm.
- KARREBERG (1981): Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine.
- KIRALY, L. (1978): "La notion d'unité hydrogéologique, essai définition". – *Bull. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 2, 83–216.

- LANGGUTH, H. R. & R. VOIGT (1980): Hydrogeologische Methoden. – Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- LEMCKE, K. (1973): Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. – *Geologica Bavaria*, 69, 5–48.
- LEMCKE, K. (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. – *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, 42/103, 9–18.
- LOOSLI, H. H., B. E. LEHMANN & G. DAPPEN (1990): Dating by Radionuclides. – In: PEARSON, F. J. Jr., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, A. MATTER, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN, & A. GAUTSCHI (1990): Isotope Hydrogeology of Northern Switzerland, Nagra Technical Report, NTB 88-01, in prep., Nagra, Baden.
- MATOUSEK, F. (1989): Erschließung von Tiefem Grundwasser in Seon/Phase II: Sondierbohrung SB1/Musterplatz Seon. – *Hydrogeol. Ber. Nr. W203.5B*, 8. 9. 1989 (unveröff.).
- MATTER, A., H. ISCHI, H.-R. BLÄSI, J. MEYER & Tj. PETERS (1988): Sondierbohrung Weiach – Geologie. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-01, Nagra, Baden.
- MATTER, A., Tj. PETERS, Ch. ISENSCHMID, H.-R. BLÄSI & H.-J. ZIEGLER (1988): Sondierbohrung Riniken – Geologie. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-02, Nagra, Baden.
- MATTER, A., Tj. PETERS, H.-R. BLÄSI, F. SCHENKER & H. P. WEISS (1988): Sondierbohrung Schafisheim – Geologie. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-03, Nagra, Baden.
- MICHELOT, J. L. (1982): Evolution temporelle des teneurs en isotopes stables et en tritium des eaux du tunnel du Mont-Blanc. Estimation des paramètres hydrauliques à l'échelle d'un massif cristallin. – Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, Orsay.
- MÜLLER, W. H., M. HUBER, A. ISLER & P. KLEBOTH (1984): Erläuterung zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1 : 100 000. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 84-25, Nagra, Baden.
- NAEF, H., P. DIEBOLD & S. SCHLANKE (1985): Sedimentation und Tektonik der Nordschweiz. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 85-14, Nagra, Baden.
- NAGRA (1985): Sondierbohrung Böttstein. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 85-12, Nagra, Baden.
- NAGRA (1986): Sondierbohrung Weiach. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-06, Nagra, Baden.
- NAGRA (1988): Sondierbohrung Riniken. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-07, Nagra, Baden.
- NAGRA (in Vorb.): Sondierbohrung Schafisheim. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-08, Nagra, Baden.
- NAGRA (1986): Sondierbohrung Kaisten. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-09, Nagra, Baden.
- NAGRA (in Vorb.): Sondierbohrung Leuggern. Bau- und Umweltaspekte, Bohrtechnik. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 86-10, Nagra, Baden.
- NAGRA (1985): Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. – *Nagra Projektbericht*, NGB 85-01, Nagra, Baden.
- NAGRA (1985): Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. – *Nagra Projektbericht*, NGB 85-04, Nagra, Baden.
- NAGRA (1985): Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. – *Nagra Projektbericht*, NGB 85-08, January 1985, Nagra, Baden.
- NAGRA (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. – *Nagra Techn. Ber.*, NTB 88-25, Nagra, Baden.
- NAGRA (1989): Datenbank des Hydrochemischen Untersuchungsprogrammes. – *Nagra*, NIB 89-06, Nagra, Baden.
- NAGRA (1989): Untersuchungsregionen/Potentielle Wirtgesteine/Standortregionen erster Priorität. – In: *Nagra informiert*, Nr. 1, März 1989, Nagra, Baden.
- NAGRA (1989): Hydraulische Tests und Fluid Logging/Hydraulische Druckhöhen/Hydrochemische Analyse. – In: *Nagra informiert*, Nr. 3+4, Dezember 1989, Nagra, Baden.
- NIELSEN, H. (1979): Sulfur Isotopes. – In: JÄGER, E. & J. C. HUNZIKER (Eds.): *Lectures in Isotope Geology*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- NIR, A. (1964): On the Interpretation of Tritium „Age“ Measurements of Groundwater. – *Journ. of Geophys. Res.*, Vol. 69/12, 2589–2595.
- NIR, A. & S. LEWIS (1975): On tracer theory in geophysical systems in the steady and non-steady state. Part I. – *Tellus*, 27, 372–382, Stockholm.

- PEARSON, F. J. Jr. (1965): Use of C-13/C-12 ratios to correct radiocarbon ages of material initially diluted by limestone, in Radiocarbon and Tritium Dating. – Proceedings of 6th International Conference on Radiocarbon, 37–366, Pullman, Wash.
- PEARSON, F. J. Jr., J. L. LOLCAMA (1986): Chemistry of Ground Waters in the Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten and Leuggern boreholes: A hydrochemically Consistent Data Set. – Nagra Techn. Ber., NTB 86-19, April 1986, Nagra, Baden (Draft version).
- PEARSON, F. J. Jr., J. L. LOLCAMA & A. SCHOLTIS (1989): Chemistry of Waters in the Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten and Leuggern boreholes: A hydrochemically Consistent Data Set. – Nagra Technical Report, NTB 86-19, June 1989, Nagra, Baden.
- PEARSON, F. J. Jr., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, A. MATTER, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN & A. GAUTSCHI (1990): Isotope Hydrogeology of Northern Switzerland. – Nagra Technical Report, NTB 88-01, in prep., Nagra, Baden.
- PEKDEGER, A. & W. BALDERER (1987): The occurrence of saline groundwaters and gases in the crystalline rocks of northern Switzerland. – Special Papers, 33, Saline water and gases in crystalline rocks, Geol. Ass. of Canada, 157–174.
- PETERS, Tj., A. MATTER, H.-R. BLÄSI & A. GAUTSCHI (1985): Sondierbohrung Böttstein – Geologie. – Nagra Techn. Ber., NTB 85-02, Nagra, Baden.
- PETERS, Tj., A. MATTER, H.-R. BLÄSI, J. MEYER & H. J. ZIEGLER (1988): Sondierbohrung Kaisten – Geologie. – Nagra Techn. Ber., NTB 86-04, Nagra, Baden.
- PETERS, Tj., A. MATTER, Ch. ISENSCHMID, H.-R. BLÄSI, J. MEYER & Ch. MEYER (1988): Sondierbohrung Leuggern – Geologie. – Nagra Techn. Ber., NTB 86-05, Nagra, Baden.
- RAUBER, D., H. H. LOOSLI & H. SCHMASSMANN (1990): Noble Gases in Groundwater, chapt. 3.3. in: PEARSON, F. J. Jr., W. BALDERER, H. H. LOOSLI, B. E. LEHMANN, Tj. PETERS, H. SCHMASSMANN & A. GAUTSCHI (1990): Isotope Hydrogeology of Northern Switzerland. – Nagra Technical Report, NTB 88-01, in prep., Nagra, Baden.
- RUDOLPH, J., H. K. RATH & C. SONNTAG (1983): „Noble gases and stable isotopes in C-14-dated paleowaters from Central Europe and the Sahara“. – Proc. Int. Symp. IAEA, Vienna, 1983.
- SCHMASSMANN, H. (1990): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär und Malm-Aquifere. – Nagra Techn. Ber., NTB 88-07, in prep., Nagra, Baden.
- SCHMASSMANN, H., W. BALDERER, W. KANZ & A. PEKDEGER (1984): Regionale Untersuchungen über die Beschaffenheit der Tiefengrundwässer. – Nagra Techn. Ber., NTB 84-21, Nagra, Baden.
- SCHOELLER, H. (1962): Les eaux souterraines. – 642 p, Paris (Masson).
- SIEBER, N. (1988): Geothermie Bohrung Hohstrasse-Kloten. – Geol. und hydrogeol. Gutachten (unveröff.).
- SIEGENTHALER, U. & U. SCHOTTERER (1977): „Hydrologische Anwendungen von Isotopenmessungen in der Schweiz“. – Gas – Wasser – Abwasser, Nr. 7.
- SIEGENTHALER, U. & H. OESCHGER (1980): „Correlation of O-18 in precipitation with temperature and altitude“. – Nature, 285–314.
- SIEGENTHALER, U., U. SCHOTTERER & H. OESCHGER (1983): Sauerstoff-18 und Tritium als natürliche Tracer für Grundwasser. – Gas – Wasser – Abwasser, 63, 477–483.
- STICHLER, W., W. RAUERT, S. WEISE, M. WOLF, G. KOSCHEL, P. STIER, R. PRESTEL, K. HEDIN, B. W. BERTLEFF (1987): Isotopen-hydrologische und hydrochemische Untersuchungen zur Erkundung des Fließsystems im Malmkarstaquifer des süddeutschen Alpenvorlands. – Z. dt. geol. Ges., 138, 387–398, Hannover.
- TOTH, J. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. – Journ. of Geophys. Res., 67/11, 4375–4387.
- TOTH, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. – Journ. of Geophys. Res., 68/16, 4795–4812.
- TOTH, J. (1970): Relation between electric analogue patterns of groundwaterflow and accumulation of hydrocarbons. – Canad. Journ. of Earth Scienc., 7, 988 p.
- TRUESDELL, A. H. & B. E. JONES (1974): WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. – J. Res. U.S. Geol. Surv., 2 (2), 233–248.
- UDLUFT, P. (1975): Das tiefere Grundwasser zwischen Vindelicischem Rücken und Alpenrand. – Geol. Jb., C 11, 3–29, Hannover.
- UDLUFT, P. (1981): Die Süß-Salzwassergrenze Süddeutschlands als Ausdruck der Grundwasserdynamik. – Z. dt. geol. Ges. 132, 623–636, Hannover.

- VILLINGER, E. (1972): Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb. – Geol. Jb., C 2, 153–188, Hannover.
- VILLINGER, E. (1973): Hydrogeologie. – In: Erläuterungen zu Blatt 7721 Gammertingen, Geol. Kt. Baden-Württemberg 1 : 25 000, 26–47, Freiburg i. Brsg.
- VILLINGER, E. (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW Deutschland). – Geol. Jb., C 18, 3–93, Hannover.
- WEISE, S., M. WOLF, P. FRITZ, W. RAUFERT & W. STICHLER (1989): Isotopenhydrologische Untersuchungen im Süddeutschen Molassebecken. – Abschlußber. des Forschungsvorhabens „Hydrogeotherm. Energiebilanz. – Geol. Landesamt Baden-Württemberg.
- WIGLEY, T. M. L., L. N. PLUMMER & F. J. JR. PEARSON (1978): Mass transfer and carbon isotope evolution in natural water systems. – Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 42, 1117–1139.
- WITHERSPOON, P. A. (1966): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions of the mathematical model. – Water Resour. Res., 2/4, 631–656, Washington D.C.
- WITHERSPOON, P. A. (1967): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of watertable configuration and subsurface permeability variation. – Water Resour. Res., 3/2, 623–634, Washington D.C.
- WITHERSPOON, P. A. (1968): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretations. – Water Resour. Res., 4/3, 581–590, Washington D.C.
- WITTWER, C. (1986): Hydrochemische Analysen von Grundwässern der Sondierbohrungen. – Nagra Techn. Ber., NTB 85-49, Nagra, Baden.
- ZÖTL, J. G. (1972): Karsthydrogeologie. – 291 S, Wien-New York (Springer).

Summary

The aim of this publication is to deduce the specific hydrogeological aspects of the deep groundwaters within the consolidated deposits of the Molasse and the Malm in Northern Switzerland from the application of isotope methods in combination with hydrogeochemical investigations.

Within the deposits of the Molasse and the underlying karstified limestones of the Malm three different chemical types of groundwater have been observed:

- a) Ca-(Mg)-HCO₃-type waters, generally occurring within the range of the morphologically outcropping Molasse deposits (above the bottoms of the valleys) of all the lithostratigraphic units of the Upper Freshwater Molasse (OSM), the Upper Marine Molasse (OMM) and the Lower Freshwater Molasse (USM),
- b) Na-HCO₃-type waters occurring within the deposits of the Molasse and the karstified part of the underlying Malm, generally in situations where these formations are situated below the actual base level of the valleys,
- c) Na-Cl-type waters, which are much more heavily mineralized and occur (based on the existing information from boreholes) in greater depth than the two other types of groundwater described above. These Na-Cl-type waters are therefore representing the characteristic deep groundwater (basin water) of the Molasse-Malm-System, which underlies the two other types of groundwater.

The observed hydrochemical conditions represent, if combined with the results of the investigations by isotope methods, the key for interpretation with respect to the configuration of the hydrodynamic flow systems. The resulting information is first checked against a qualitative evaluation of the existing hydrodynamic data of the involved formations, considering also the role of the deep valley fillings consisting of unconsolidated quaternary deposits. Finally, all these considerations are unified in postulating a conceptual interpretation model which is used to reconstruct the ongoing hydrodynamic evolution of the groundwaters within the formation of the Molasse and Malm. Apart from outlining past developments and the present state, even probable future developments are prognosticated.

Within this perspective lies the biggest potential use of isotope methods, which should be stressed by further interdisciplinary studies in close contact with hydrodynamic modelling. In particular, this is of vital importance for projects dealing with the impact of man on natural systems, where time ranges of thousands or even millions of years are concerned.

Dank

Forschung lebt heute von der interdisziplinären Auseinandersetzung. Die Diskussion mit Fachkollegen der verschiedensten Fachrichtungen von der nuklearen Geophysik bis zur Geologie, Petrographie, Hydrochemie und Hydrogeologie, ja sogar bis zur Geomikrobiologie, bildet die vitale Voraussetzung für die Bearbeitung von Gesamtstudien auf dem Gebiet der Hydrogeologie. In diesem Sinne möchte ich zuerst meinem ehemaligen Vorgesetzten, Herrn Prof. H. OESCHGER, und meinem jetzigen Chef, Herrn Prof. C. SCHINDLER, für die gute Zusammenarbeit und das Verständnis für meine Arbeit danken. Ebenso möchte ich den verantwortlichen Mitarbeitern der Nagra, Dr. C. Mc COMBIE, Dr. M. THURY, Dr. A. GAUTSCHI, Dr. A. SCHOLTIS und Dr. J. C. ALDER, für die gute Zusammenarbeit und die Möglichkeit, diese Arbeit durchzuführen, danken. Weiters möchte ich für die verschiedenen Diskussionen danken, den Herren Prof. J. C. FONTES, Dr. J. L. MICHELOT, Paris, Prof. P. FRITZ, W. RAUERT, W. STICHLER, Neuherberg, Prof. H. LOOSLI, Prof. A. MATTER, Tj. PETERS, Dr. B. LEHMANN, Dr. U. SIEGENTHALER, U. SCHOTTERER, Bern, Dr. J. J. N. ANDREWS, A. H. BATH, Dr. F. J. JR. PEARSON, Huston, Prof. KRUMBEIN, Oldenburg, Dr. H. SCHMASSMANN, Liestal. Einen großen Dank möchte ich Frau SEELHOFER ausdrücken für das Schreiben des Manuskripts mit Sorgfalt und Hingabe.

Mein großer Dank gilt aber ganz besonders meiner Familie, meiner Ehefrau, meinen drei Kindern, meinem Vater und meinen Schwiegereltern, welche zu dem notwendigen persönlichen Umfeld für das Gelingen dieser Arbeit viel beigetragen haben.