

# **Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag**

M. Selg, J. Heinz, C. Mair & M. Bauer

## **Stichwörter**

Kluft- und Karstgrundwasser, Südwestdeutschland, Oberjura, Pflanzenschutzmittel, Isotopen

## **Zusammenfassung**

Der Aquifer in den Kalksteinen des Oberjura der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland) birgt mehrere Milliarden m<sup>3</sup> Grundwasser und wird intensiv für die öffentliche Trinkwasserversorgung genutzt. Hydrodynamisch handelt es sich um ein Doppelporositäts-Medium. Feine Klüfte bilden das Speichervolumen, während Karstwegsamkeiten für die Entwässerung sorgen. Hier werden hohe Fließgeschwindigkeiten gemessen. Deshalb werden Karstaquifere im Allgemeinen als anfällig für Verunreinigungen angesehen, weil diese rasch Wasserfassungen erreichen können.

Trotzdem wird das im Maisanbau eingesetzte und 1991 verbotene Pestizid Atrazin immer noch in Quellen und selbst in Brunnen nachgewiesen, die 200 m und mehr unter die Grundwasseroberfläche reichen. Daher hat sich die vorliegende Arbeit mit der Altersstruktur und der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers auseinandergesetzt. Diesbezüglich kamen Isotopen-Methoden zum Einsatz (<sup>18</sup>O, <sup>3</sup>H, <sup>85</sup>Kr, <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>He) sowie der Spurenstoff Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Es zeigte sich, dass sich das Grundwasser aus Tiefbrunnen mit großen Einzugsgebieten generell aus mindestens zwei Komponenten zusammensetzt. Eine

---

Anschriften der Verfasser:

M. Selg, & M. Bauer

Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.

J. Heinz, & C. Mair

Hydroisotop GmbH, Woelkestr. 9, 85301 Schweitenkirchen

tritiumfreie Komponente macht 10-70 % des Grundwassers aus (Grundwasserverweilzeit größer als 50 Jahre bis mehrere 1000 Jahre). Die tritiumhaltige Komponente hat eine Mittlere Verweilzeit von etwa 10-20 Jahren. Trotz Verkarstung spielt kurzfristiger Karstgrundwasserabfluss mit Aufenthaltszeiten im Untergrund von Stunden bis einigen Tagen keine größere Rolle. Sein Anteil an der Quellschüttung beträgt nur wenige Prozent.

Diese Resultate machen den anhaltenden Pestizidaustrag verständlich. Darauf aufbauend kann der zukünftige Pestizidaustrag prognostiziert werden. Er wird im ungünstigsten Fall noch bis zu 25 Jahren andauern. Was die Vulnerabilität anbelangt, sind hohe Verweilzeiten eine zweischneidige Angelegenheit. Solange ein Schadstoffeintrag nicht direkt in eine Karststruktur erfolgt, droht kein schneller Transport zur Wasserfassung. Es bleibt genügend Zeit für Prozesse wie Schadstoffabbau und Adsorption. Werden allerdings persistente Schadstoffe eingetragen, wird ihr Austrag lange andauern. Da der Großteil der Porosität von Klüften und nicht von Karststrukturen gebildet wird, kommt diesem Prozess große Bedeutung zu.

## ***Age composition of the groundwater in the Upper Jurassic Karst aquifer of the Swabian Alb and its relevance for the ongoing pesticide output***

### ***Key words***

*Karst groundwater, Southwest Germany, Upper Jurassic, Pesticides, Isotopes*

### ***Abstract***

*The Upper Jurassic limestone aquifer of the Swabian Alb (SW-Germany) contains several billion m<sup>3</sup> of groundwater and is intensely used for the public water supply. Hydrodynamically it represents a double porosity medium. Joints are responsible for its storage capacity while karst conduits mark the drainage pathways. High flow velocities can be found in these karst conduits. Due to this karst aquifers are usually thought to be highly vulnerable because pollutions can quickly reach wells.*

*Nevertheless atrazine, a pesticide mainly used for corn-growing which was prohibited in 1991, is still found in springs and even wells reaching as far as 200 m and more below water table. As a consequence this work focussed on the age structure and mean residence time of the groundwater using isotope methods (<sup>18</sup>O, <sup>3</sup>H, <sup>85</sup>Kr, <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>He) as well as the trace compound SF<sub>6</sub>. It was found that groundwater from deep wells and large recharge areas is generally a mixture of at least two components. One of them is free of tritium and making up 10-70% of the groundwater. The other one containing tritium gives mean resi-*

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

*dence times in the order of 10-20 years. Despite karstification short termed groundwater discharge with transit times in the range of hours to several days doesn't play a major role. Its contribution to spring discharge is in the order of a few percent only.*

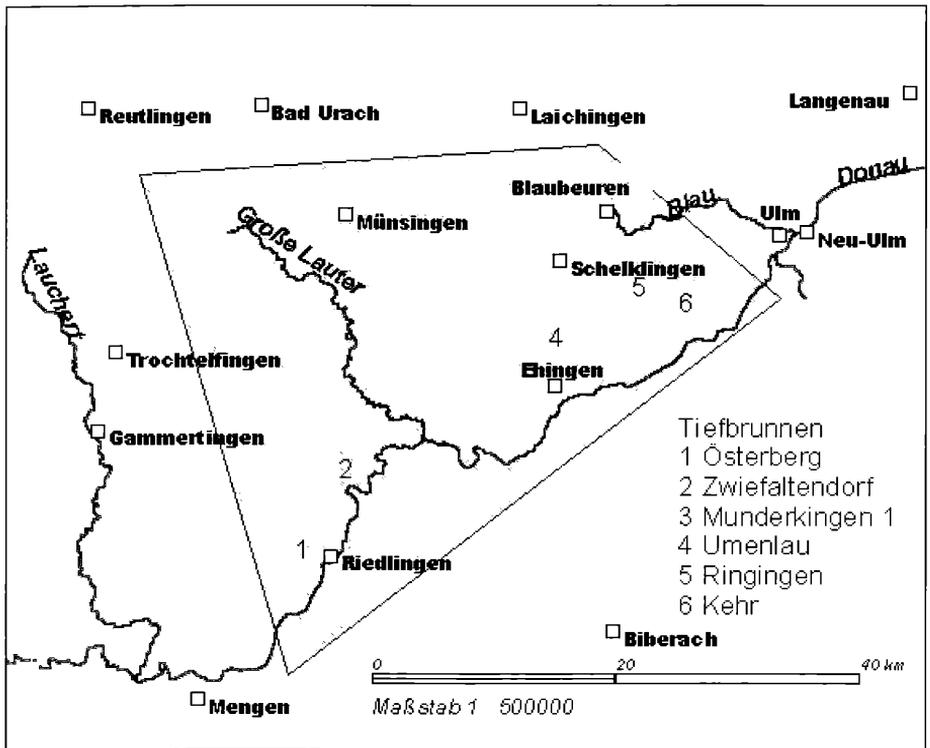
*These findings make the ongoing pesticide output of the wells understandable. Based on these results the future pesticide output can be predicted. In the worst case it will last for up to 25 years. As far as vulnerability is concerned, high groundwater ages are somehow ambivalent. As long as karst structures are not directly involved at the site of pollution no fast transfer to a water plant has to be feared and there is plenty of time for adsorption and decay. But in case of a pollution with persistent substances their appearance in the groundwater will last for a long time. As the major fraction of porosity is made up of joints and not by karst conduits the latter aspect seems to be of great relevance.*

## 1. Einleitung

In nahezu allen Tiefbrunnen der Mittleren Schwäbischen Alb im Gebiet zwischen Riedlingen und Erbach werden auch 12 Jahre nach Verbot des Pflanzenschutzmittels (PSM) Atrazin noch dessen Rückstände im Grundwasser nachgewiesen. Dies erstaunt umso mehr, da das Bild des betroffenen Grundwasserleiters, der klüftige und verkarstete Oberjura, von schnellen Stoffumsätzen geprägt scheint. Neben der raschen Reaktion des Karsts auf Niederschlagsereignisse und Schneeschmelze, die durch zahlreiche Markierungsversuche mit Nachweis maximaler Abstandsgeschwindigkeiten von im Mittel 100 m/h belegt ist, scheinen demnach auch noch langfristige Speicherprozesse eine bedeutende Rolle zu spielen, die bisher nur wenig Beachtung fanden.

In der vorliegenden Studie wird der Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjura im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb zwischen Riedlingen und Erbach im Hinblick auf langfristige Speicherprozesse näher untersucht (vgl. Abb. 1). Hierzu wird das im Grundwasser enthaltene Atrazin sowie das Abbauprodukt Desethylatrazin als flächenhafter Tracer genutzt.

Um die langfristigen Speicherprozesse auch quantitativ beschreiben zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen zur Grundwasseraltersstruktur durchgeführt. Bereits vorangegangene Untersuchungen an Quelfassungen im Bereich der Reutlinger Alb haben gezeigt, dass die Mittlere Verweilzeit des Grundwassers eine wichtige Rolle für den anhaltenden Atrazin-Austrag spielt (vgl. BAUER et al. 2002). Ziel der hier vorgestellten Studie waren eine Bestandsaufnahme der PSM-Gehalte im tiefen Abschnitt des Aquifers sowie die Erstellung einer Prognose über deren zukünftige Konzentrationsentwicklung. Auftraggeber war die Gewässerdirektion Donau/Bodensee (Bereich Ulm). Ausgeführt wurde das Untersuchungsprogramm vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) in Zusammenarbeit mit der Fa. Hydroisotop GmbH (Emmendingen/Schweitenkirchen) im Zeitraum Februar 2002 bis Februar 2003. Die Untersuchungsergebnisse sind detailliert in einem gemeinsamen Bericht von LGRB und Hydroisotop dokumentiert und ausgewertet (LGRB/Hydroisotop 2004). Die wesentlichen Ergebnisse dieses Berichts werden hier zusammenfassend vorgestellt.



**Abb. 1:** Lage des Untersuchungsgebietes mit Darstellung ausgewählter Tiefbrunnen.

Die Untersuchungen haben sich auf 6 Tiefbrunnen konzentriert (vgl. Tab. 1), die nach einer Vorstudie und Voruntersuchungen aus einer größeren Anzahl von Tiefbrunnen ausgewählt wurden. Zusätzlich wurden Untersuchungen an Quellen und weiteren Brunnen der näheren Umgebung durchgeführt.

**Tab. 1** Tiefbrunnen im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb, die im Hinblick auf PSM-Gehalte näher untersucht wurden.

Bezeichnung	Wasserversorgung	Archivnummer LGRB
TB Österberg	Riedlingen	BO7822/132
TB Zwiefaltendorf	Riedlingen	BO7723/155
TB Munderkingen	Munderkingen	BO7723/123
TB Umenlau	Ehingen	BO7624/10
TB Ringingen	Erbach	BO7625/24
TB Kehr	Erbach	BO7624/18

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

Die betroffenen Wasserversorger und ihre Wassermeister haben diese Untersuchungen tatkräftig unterstützt. Herr Dr. Schlosser (Bundesamt für Strahlenschutz, Freiburg) und Herr Dr. Oster (Spurenstofflabor Dr. Oster, Wachenheim) haben freundlicherweise wichtige Input-Daten (Tritium bzw. SF<sub>6</sub>- und FCKW-Gehalte der Niederschläge) zur Verfügung gestellt, wofür Ihnen die Autoren zu Dank verpflichtet sind.

### Anwendungszeitraum von Atrazin

Der Wirkstoff Atrazin, ein Pflanzenschutzmittel (PSM), das hauptsächlich im Maisanbau eingesetzt wird, ist seit den 1950-er Jahren auf dem Markt. Nach Angaben des Amtes für Landwirtschaft, Landschafts- und Bodenkultur Münsingen (ALLB) wird Mais auf der Schwäbischen Alb seit etwa 1960 auf einem Anteil von ca. 5 % der Ackerfläche angebaut. Man muss davon ausgehen, dass seit dieser Zeit Atrazin dort auch ausgebracht wurde und damit ins Grundwasser gelangte. Wann, wo und mit welchen Mengen Atrazin ausgebracht wurde, ist im Einzelnen nicht mehr nachvollziehbar.

Mit Inkrafttreten der SchALVO (Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung) am 01.01.1988 wurde die Anwendung von Atrazin und einer Reihe anderer Pflanzenschutzmittel in Wasserschutzgebieten verboten. Gleichzeitig begann die regelmäßige Überprüfung der Wasserfassungen auf diese Stoffe, da die Problematik bereits früh auch für Baden-Württemberg erkannt wurde (GIESSL 1988, GIESSL & HURLE 1984, HURLE 1982, HURLE et al. 1987, VILLINGER 1987). Es stellte sich heraus, dass auch im Grundwasser der Schwäbischen Alb Pflanzenschutzmittel weit verbreitet auftreten. Oft lagen die Gehalte über den seit 01.10.1986 geltenden Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (0,1 µg/l für den Einzelstoff und 0,5 µg/l für die Summe). Das Spektrum beschränkte sich dabei weitgehend auf den Wirkstoff Atrazin und sein Abbauprodukt Desethylatrazin.

Mit der SchALVO und letztlich mit dem allgemeinen Ausbringungsverbot für Atrazin im März 1991 verband sich die Hoffnung, das Problem der Atrazin-Auswaschung ins Grundwasser flächendeckend unterbinden zu können. Diese Hoffnung hat sich nur teilweise erfüllt. Während in Böden Atrazin und seine Abbauprodukte nicht mehr nachgewiesen werden können, hält die Belastung des Grundwassers auch heute noch, ca. 12 Jahre nach dem Anwendungsverbot, weiter an.

## 2. Hydrogeologie

Die Einzugsgebiete der einzelnen Brunnen erstrecken sich über den Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb zwischen Karstwasserscheide Rhein/Donau und der Donau selbst, die regionale Vorflut für den Kluft- und Karstgrundwasserleiter ist (Abb. 1). In östliche Richtung grenzen die Brunneneinzugsgebiete an das Einzugsgebiet des Blautopfs, in westliche an das von Kesselquelle, Zwiefalter Aachquelle und Wimsener Höhlenquelle.

Der Oberjura besteht im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb aus einem ca. 400-500 m mächtigen Schichtpaket aus Kalksteinen, Dolomiten und Kalkmergelsteinen. Er bildet die Hochfläche der Schwäbischen Alb und taucht nach Südost unter die Molasse ab. Er ist insbesondere im Ausstrichbereich stark geklüftet und verkarstet und bildet daher einen ergiebigen Kluft- und Karstgrundwasserleiter. Eine ausführliche Beschreibung seiner Hydrogeologie findet sich in VILLINGER (1977, 1987). Nachfolgend soll hier nur eine kurze Zusammenfassung der hydrogeologischen Situation wieder gegeben werden.

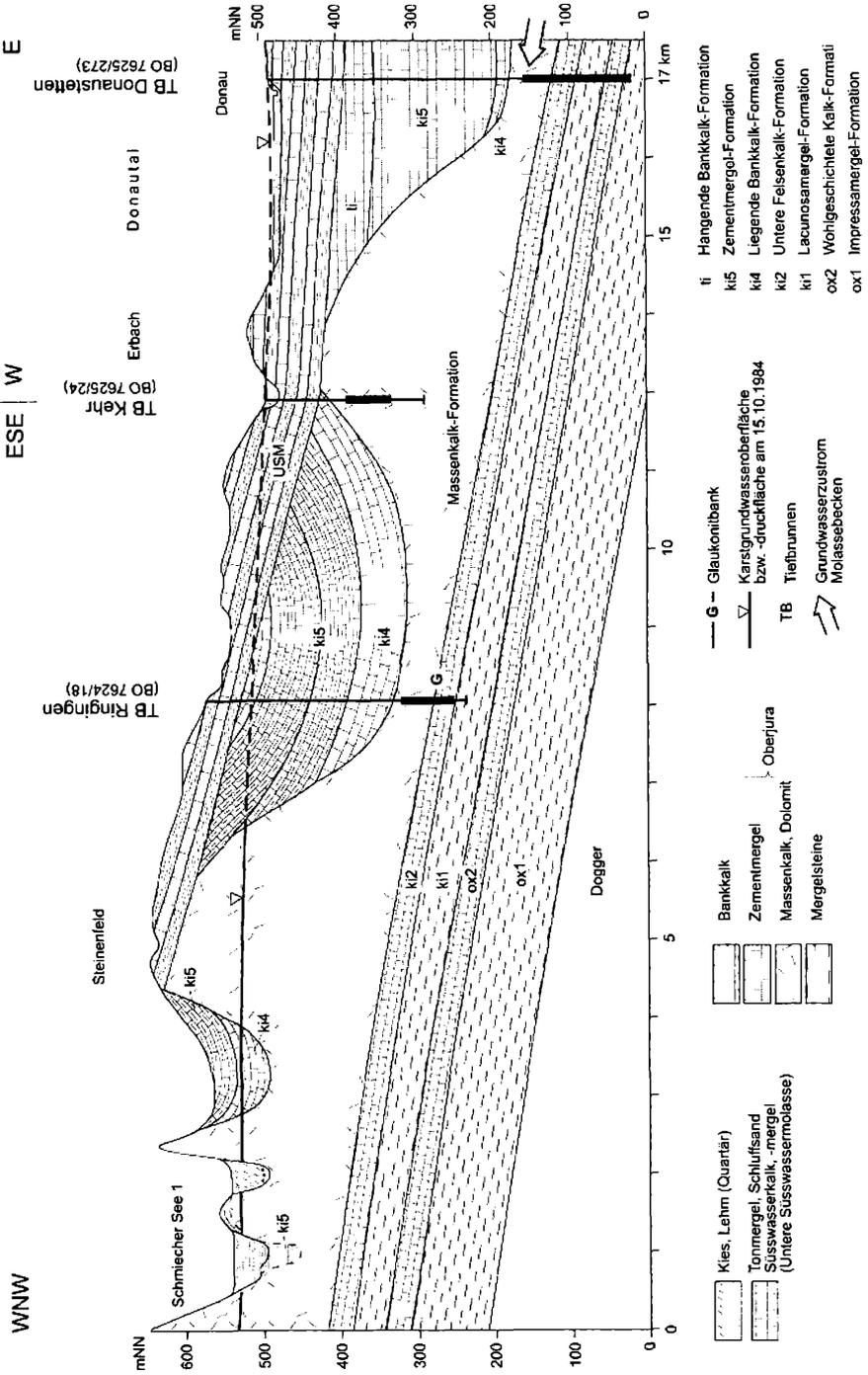


Abb. 2.: Hydrogeologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet bei Erbach.

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

Sohlschicht des Grundwasserzirkulationssystems ist die Impressamergel-Formation (Oxford-Mergel), die Basalschicht des Oberjura (vgl. Abb. 2). Bedingt durch das überregionale Abtauchen der Schichten reicht die Verkarstung in südöstlicher Richtung stratigraphisch betrachtet nicht mehr bis in diese Tiefe. Hier übernimmt die Lacunosamergel-Formation des Kimmeridgiums die Funktion der Sohlschicht bzw. bildet eine Stockwerkstrennung zwischen dem oberen Karstgrundwasserstockwerk und einem unteren Kluftgrundwasserstockwerk in der Wohlgeschichteten Kalk-Formation (Oxfordkalke).

In einer nördlichen, den Albtrauf begleitenden Zone haben sich die Vorfluter bis auf die Sohlschicht eingeschnitten. Dieser Bereich wird als Seichter Karst bezeichnet. Südlich davon erreichen die Täler die Sohlschicht nicht mehr. Es ist die Zone des Tiefen Karsts, der in eine Offene Zone (keine wesentliche Überlagerung) und eine Überdeckte Zone (geschlossene Verbreitung gering durchlässiger Deckschichten) weiter untergliedert wird. Die Aquifermächtigkeit dürfte im Mittel bei ca. 100 m liegen, wobei lokal beträchtliche Schwankungen auftreten. Auf der Albhochfläche beträgt der Flurabstand des Grundwassers mehrere Zehnermeter, z. T. über 100 m.

Zum nutzbaren Hohlraumvolumen liegen Angaben von verschiedenen Autoren vor. Die Ergebnisse variieren nur geringfügig zwischen rund 1 und 4 % (SAUTER 1992, STRAYLE 1970, TEUTSCH 1988, VILLINGER 1977, WEIDENBACH 1954). Dieses Hohlraumvolumen ist durch die mehr oder weniger großen Karstgerinne charakterisiert, d.h. die korrosiv erweiterten Wegsamkeiten. Daneben besteht ein ausgeprägtes, viel englumigeres Kluftnetz, das jedoch hydraulisch an die Karstgerinne angeschlossen ist. Letzteres repräsentiert den überwiegenden Teil des Gesamthohlraumvolumens und damit das eigentliche Speichervermögen des Aquifers. Sein Wasser wird nur relativ langsam abgegeben und wird daher als langfristiges Karstwasser bezeichnet. Das Grundwasser, das in die Karstgerinne gelangt, kann dort mit hoher Geschwindigkeit abfließen. Dieser Teil des Systems macht aber nur 1 % des durchflusswirksamen Hohlraumvolumens aus (SAUTER 1992).

Nach VILLINGER (1977) nimmt der Anteil des kurzfristigen, schnell abfließenden Karstwassers vom Seichten Karst zur Überdeckten Zone des Tiefen Karsts hin ab. Nach den Ergebnissen numerischer Modelle (TEUTSCH 1988) liegen die Anteile des kurzfristigen Karstwassers im Seichten Karst bei etwa 35 % (Einzugsgebiete Echazquelle und Reißbachquelle). In der Offenen Zone des Tiefen Karsts (Zwiefalter Achquelle) sind es nur noch 10 % (TEUTSCH 1988:140). Diese Zahlen liegen etwas unter den Abschätzungen von VILLINGER (1977).

In der vorliegenden Studie wird für die Altersgliederung der Grundwasserkomponenten folgende Terminologie verwendet:

- **Altes Grundwasser**

Dieses Grundwasser weist ein hohes Alter von mehr als 50 Jahren auf. Es ist nicht mehr an die aktuellen Infiltrationsprozesse angebunden und ist frei von Tracern wie Tritium,  $^{85}\text{Kr}$  und  $\text{SF}_6$ . Eine Datierung kann mit der Kohlenstoff-14-Methode erfolgen.

- **Junges Grundwasser**

Die Jungwasserkomponente wird in folgende Teilkomponenten untergliedert:

a) **Langfristiges Karstgrundwasser**

Das langfristige Karstgrundwasser weist ein Alter von mehreren Monaten bis mehreren Zehner Jahren auf. Es wurde nach 1953 neugebildet und ist damit jünger als 50

Jahre. Daher zeigt es je nach „Alter“ bestimmte Gehalte der Datierungstracer Tritium,  $^{85}\text{Kr}$  und  $\text{SF}_6$ , die aus entsprechenden Einträgen aus der Atmosphäre resultieren.

#### b) Kurzfristiges Karstgrundwasser

Das kurzfristige Karstgrundwasser ist ohne große Verzögerung an das saisonale Niederschlagsgeschehen angebunden. Diese Anbindung kommt in jahreszeitlichen Variationen der Gehalte an stabilen Isotopen (z.B.  $^{18}\text{O}$ ) zum Ausdruck. Die Verweilzeit dieser Komponente im Aquifer beträgt maximal wenige Monate. Als Direktabfluss kann der Anteil bezeichnet werden, dessen Verweilzeit Stunden bis wenige Tage beträgt.

Die untersuchten Brunnen liegen alle im Übergangsbereich von der Offenen zur Überdeckten Zone des Tiefen Karsts. Geographisch liegen alle Tiefbrunnen nahe der Donau (Abb. 1), die näherungsweise die Grenze zwischen dem oberflächennahen Grundwasser-Zirkulationssystem der Schwäbischen Alb und dem thermalen System des Alpenvorlandes markiert. Das stark gespannte thermale System des Molassebeckens lässt sich hydrochemisch und isotopisch deutlich von den rezenten Grundwässern abgrenzen (GEYH & GROSCHOPF 1978, BERTLEFF 1986, PRESTEL 1990).

Die mit Hilfe früherer geophysikalischer Bohrlochuntersuchungen festgestellten Wasserzutritte in die Brunnen liegen mit einer Ausnahme (TB Munderkingen 1: ca. 45 m) mehr als 100 m unter dem jeweiligen Ruhewasserspiegel. Am tiefsten reicht der Br. Zwiefaltendorf, wo die Wasserzutritte ca. 235-255 m unter dem Ruhewasserspiegel liegen. Stratigraphisch liegen die Zutritte zwischen Kimmeridgium 2 und 4, ohne Bevorzugung eines bestimmten Horizontes. Faziell liegen die Zutritte oft, aber nicht ausschließlich, in Massenkalken (dolomitisiert oder dedolomitisiert). Damit reicht keiner der Brunnen bis auf die Sohlschicht des Aquifers, die hier im Süden der Schwäbischen Alb von den Lacunosamer-geln (Kimmeridgium 1) gebildet wird.

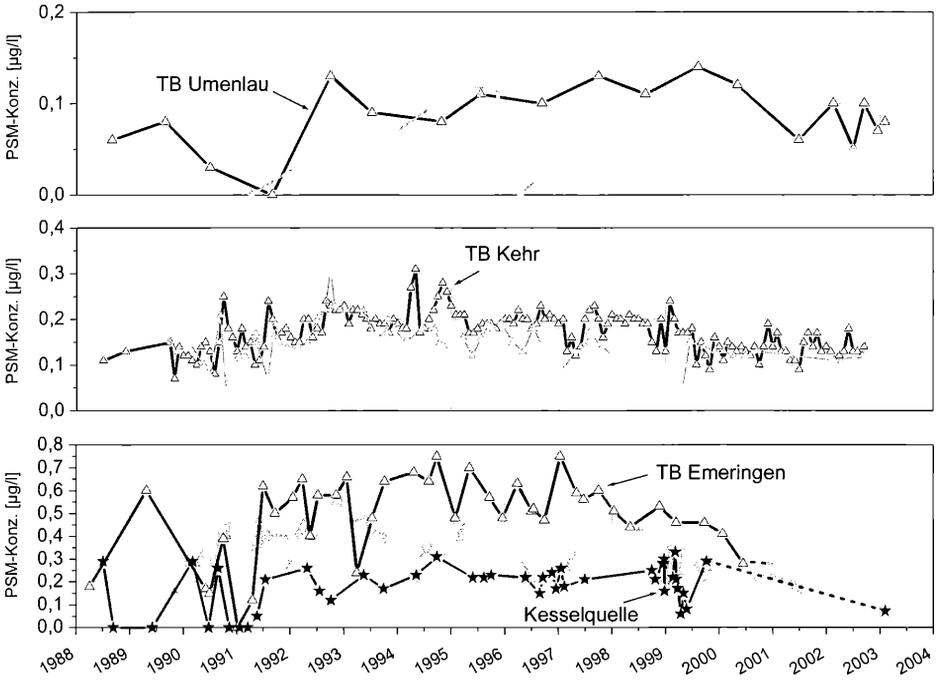
### 3. Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 PSM-Gehalte

Die Tiefbrunnen (TB) im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb wurden vor rund 20-30 Jahren gebaut, in der Hoffnung, in größerer Tiefe des z. T. über 200 m mächtigen Aquifers anthropogen unbeeinflusstes und hygienisch einwandfreies Grundwasser zu erschließen. Aber schon die ersten Analysen auf PSM, die mit Inkrafttreten der SchALVO im Jahr 1988 durchgeführt wurden zeigten, dass diese Hoffnung insgesamt nicht gerechtfertigt war. Die seitdem an diesen Tiefbrunnen durchgeführten PSM-Analysen spiegeln ein heterogenes Bild dieser Schadstoffgehalte im Grundwasser wider (vgl. Abb. 3).

Es gibt Tiefbrunnen, die frei von PSM sind (z. B. TB Österberg, TB Rottenacker). Weitere Brunnen weisen einen seit Mitte der 90-er Jahre rückläufigen Trend auf (vgl. Abb. 3). Im TB Munderkingen-1 stiegen die Summengehalte bis Ende 1992 auf rund  $0,3 \mu\text{g/l}$  an und sind seither rückläufig. Eine ähnliche Ganglinie zeigt der TB Ringingen. Dort sind die PSM-Gehalte seit etwa Anfang 1993 rückläufig, als maximale Konzentrationen von rund  $0,55 \mu\text{g/l}$  gemessen wurden. In beiden Brunnen lag Desethylatrazin in den letzten Jahren dauerhaft unter dem TrinkwV-Grenzwert von  $0,1 \mu\text{g/l}$ , Atrazin unter  $0,05 \mu\text{g/l}$ . Ähnlich sind die Verhältnisse im TB Kehr. Dort ist seit ca. 1995 ein rückläufiger Trend zu beobachten. Die

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag



**Abb. 3:** PSM-Ganglinien ausgewählter Tiefbrunnen und Quellen im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb.

maximale Konzentration lag bei etwa 0,3 µg/l. Desethylatrazin liegt heute noch im Bereich des Grenzwertes, Atrazin liegt bei <0,05 µg/l.

Die PSM-Gehalte im **TB Zwiefaltendorf** stiegen nach Beginn der Messungen (1991) zunächst rasch bis auf 0,17 µg/l an. Mit dem Abbauprodukt Desethylatrazin wurde der Grenzwert nach der Trinkwasserverordnung überschritten. Die Gehalte gingen jedoch ebenso rasch wieder zurück und sind seit Jahren auf niedrigem Niveau stabil, wobei Atrazin nicht mehr nachgewiesen wurde. Für den **TB Umenlau** war bis zum Jahr 2000 noch ein steigender Trend festzustellen, der sich jedoch während des Untersuchungszeitraums umkehrte. Maximal wurden hier 0,14 µg/l erreicht. Mittlerweile kann man davon ausgehen, dass sich auch hier ein dauerhaft rückläufiger Trend eingestellt hat. Grenzwerte wurden nicht überschritten.

Die insgesamt höchsten Atrazingehalte wurden im **TB Emeringen** gemessen, der aufgrund der ungenügenden Datengrundlage aber nicht näher untersucht wurde. Insgesamt zeigen die PSM-Gehalte der Tiefbrunnen keine wesentlichen Unterschiede zu den PSM-Gehalten der Quellen im Landkreis Reutlingen (BAUER et al. 2002). Zum Vergleich ist in Abbildung 3 die PSM-Ganglinie der Kesselquelle bei Zwiefalten mit dargestellt.

### 3.2 Niederschlags- und Abflussgeschehen im Untersuchungszeitraum

Zur Beschreibung des Niederschlagsgeschehens wurden die Messungen des Deutschen Wetterdienstes an der Station Münsingen erfasst. Die Niederschlagsmenge im Untersuchungszeitraum (06.02.2002 – 06.02.2003) war mit 1317 mm um ca. 42 % bzw. um rund 400 mm höher als das langjährige Mittel (1951-80: 926 mm). Der Untersuchungszeitraum muss daher als extrem nass bezeichnet werden, wobei die Niederschläge gut über das ganze Jahr verteilt waren (vgl. Abb. 4).

Die Grundwasserneubildung auf der Mittleren Schwäbischen Alb beträgt etwa 400 mm im langjährigen Mittel (VILLINGER 1987; ARMBRUSTER 2001). Da die reelle Evapotranspiration nur relativ geringen Schwankungen unterliegt, ist als Folge der hohen Niederschläge im Untersuchungszeitraum mit einer etwa um den Faktor 2 gegenüber dem langjährigen Mittel erhöhten Grundwasserneubildung zu rechnen.

Quellschüttungs-Messungen der amtlichen Messstelle „Wimsener Höhlenquelle“ wurden ebenfalls ausgewertet. Die Quelle hat insbesondere in den Frühjahrs-, Herbst- und Wintermonaten stark auf Niederschläge angesprochen; die höchsten Quellschüttungen traten im November auf (Abb. 4). Die mittleren Tagesabflüsse variierten im Untersuchungszeitraum zwischen 445 und 2015 l/s, der mittlere Abfluss betrug 970 l/s. Gegenüber dem langjährigen Mittel (1985-94: 540 l/s) bedeutet dies ein Plus von 80 %. Damit wird bestätigt, dass die erhöhten Niederschläge im Vergleich zu einem Normaljahr zu einem nahezu doppelt so hohen Quellafluss geführt haben.

Trotz des ausgesprochenen Nassjahres kam es von Mai bis September 2002 zu einer anhaltenden Entleerung des Aquifers. Die Gegenüberstellung der Quellschüttungsganglinie mit den Wasserstandsganglinien der untersuchten Tiefbrunnen zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung (Abb. 4). Die Wasserstandsganglinien der Tiefbrunnen spiegeln sowohl die längerfristigen Trends der Quellschüttungsganglinie als auch Reaktionen auf einzelne Starkregenereignisse wider, allerdings mit deutlicher Dämpfung. Hydraulische Reaktionen im oberflächennahen Karstgrundwasser beeinflussen demnach auch das tiefe Karstgrundwasser (Druckübertragung).

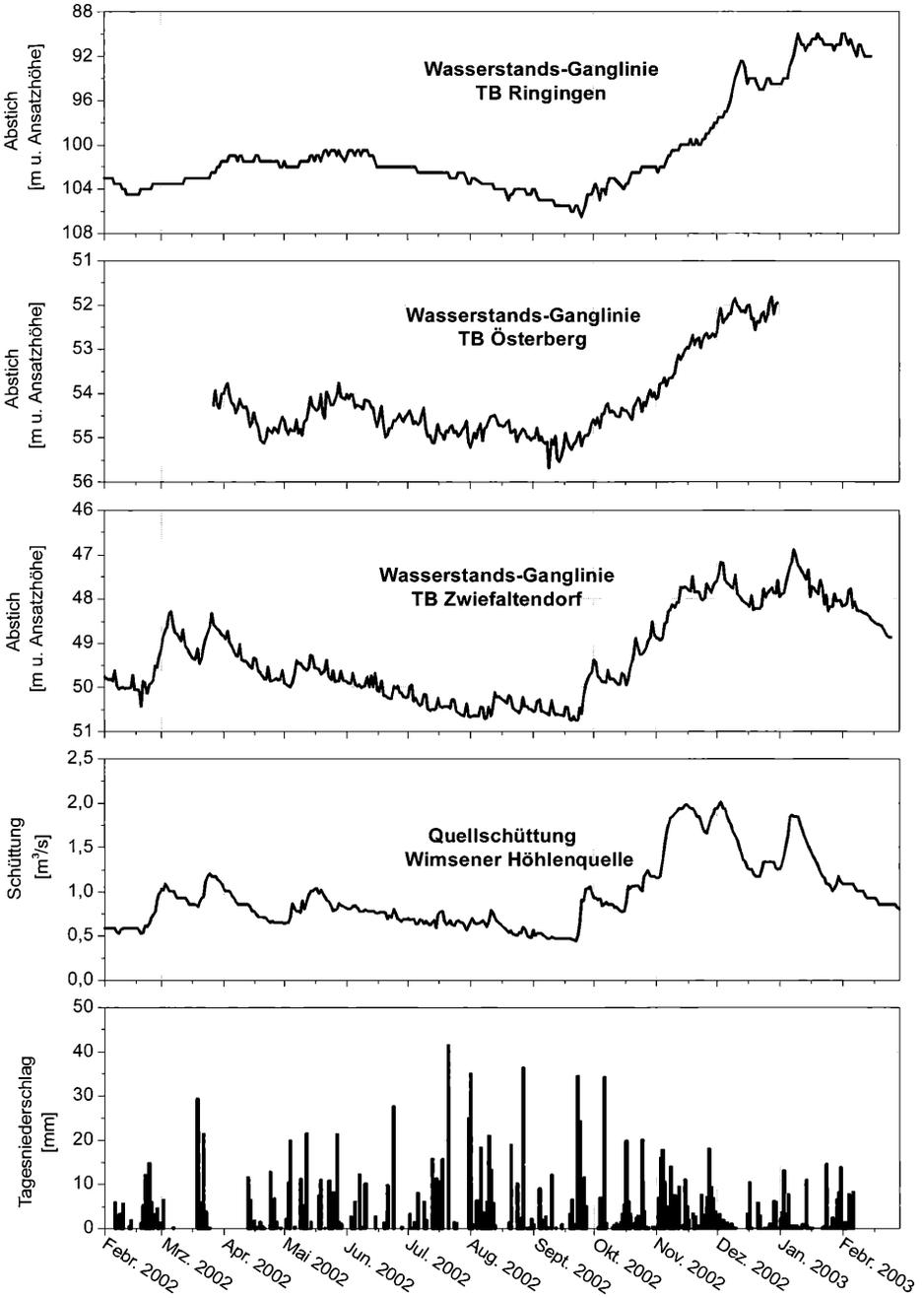
### 3.3 Abflusseparation anhand der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte

Zur Identifizierung möglicher kurzzeitiger Variationen in der Komponenten- und Alterszusammensetzung der tiefen Karstgrundwässer, insbesondere von schnell zufließendem oberflächennahem Grundwasser, wurden an 6 Tiefbrunnen und am Blautopf sowie am Niederschlagswasser der Station Münsingen einjährige Zeitreihenuntersuchungen des Sauerstoff-18-Gehaltes durchgeführt (wöchentliche Probenahme). Solche Messungen erlauben es in der Regel, sowohl kurzfristige (innerhalb von Tagen bis Wochen stattfindende) als auch saisonale Variationen bei der Grundwasserneubildung qualitativ und quantitativ zu beschreiben.

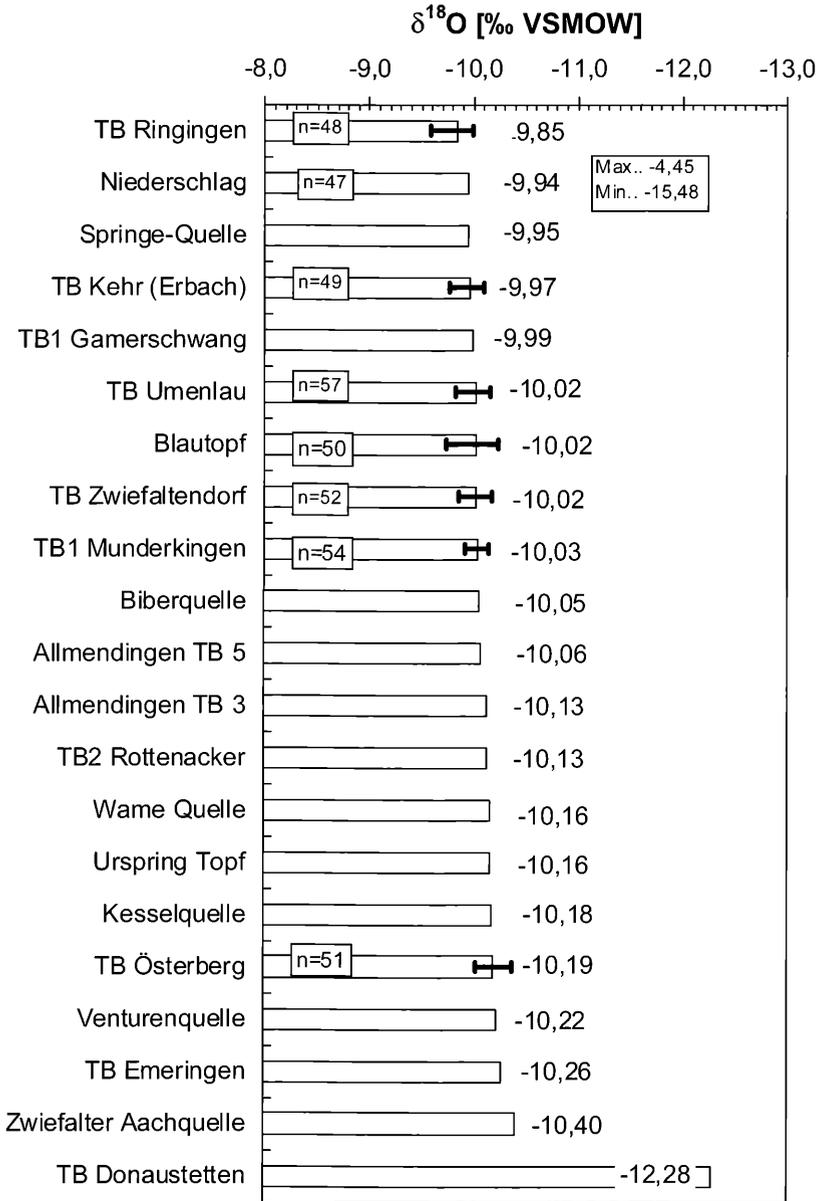
#### $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge

Im Untersuchungszeitraum wurden  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in einem Bereich von -15,48 bis - 4,45 ‰ VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water, nachfolgend immer als „‰“ abgekürzt) gemessen. Der auf der Basis der Niederschlagshöhen gewichtete Mittelwert für den Untersuchungszeitraum beträgt -9,94 ‰, die Schwankungsbreite 11,03 ‰ (vgl. Abb. 5).

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag



**Abb. 4:** Niederschlag (Station Münsingen) sowie Ganglinien von Quellschüttung (Zwiefalter Aach, Abfluss der Wimsener Höhlenquelle) und Grundwasserstand (TB Ringingen, Zwiefaltendorf und Österberg).



**Abb. 5:** δ<sup>18</sup>O-Werte ausgewählter Brunnen- und Quellwässer im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb (Mittelwerte; für die wöchentlich untersuchten Messstellen ist zusätzlich der Variationsbereich der Messwerte angegeben, ansonsten Einzelwerte von Probenahmen im Februar 2002; analytische Messgenauigkeit: ± 0,15 ‰).

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

Die gewichteten mittleren  $\delta^{18}\text{O}$ -Monatswerte im Niederschlag variieren zwischen -5,91 ‰ (Juni 2002) und -13,95 ‰ (Februar 2003). Damit ist ein deutlich ausgeprägter, charakteristischer Jahresgang festzustellen, mit höheren  $\delta$ -Werten im Sommer als im Winter. Ab August bis Ende des Untersuchungszeitraums im Februar 2003 ist ein anhaltender Trend zu leichteren Isotopensignaturen zu erkennen. Das im Untersuchungszeitraum neu gebildete Grundwasser zeigte somit ausgeprägte kurzzeitige Variationen der Isotopengehalte und einen über mehrere Monate anhaltenden, abfallenden Trend ab Juni 2002. Es war somit isotopisch deutlich markiert.

### $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Grundwassers

Um einen regionalen Überblick zu den Sauerstoff-18-Gehalten im Karstgrundwasser zu erhalten, wurden die Proben von 22 Brunnen- und Quellwässern im Gebiet Reutlingen-Zwiefalten-Riedlingen-Erbach im Zeitraum 19.-21.02.2003 auf ihren Sauerstoff-18-Gehalt untersucht (vgl. Abb. 5). Die Messwerte liegen in einem engen Bereich zwischen -9,85 und -10,40 ‰, wobei für einmalig untersuchte Fassungen Einzelwerte, für die 6 näher untersuchten Tiefbrunnen und den Blautopf Mittelwerte und Variationsbreiten aus ca. 50 Untersuchungen dargestellt sind. Lediglich der TB Donaustetten weist eine deutlich leichtere  $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopensignatur von -12,28 ‰ auf, was mit einem Grundwasserzustrom aus dem südlichen Molassebecken erklärt werden kann (eiszeitliche Grundwasserneubildung; vgl. BERTLEFF 1986).

Die am Blautopf gemessenen  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte liegen in einem Wertebereich zwischen -9,73 ‰ und -10,24 ‰ und zeigen damit eine erstaunlich geringe Variationsbreite von nur 0,51 ‰ (vgl. Abb. 9 und 12), was aufgrund der bekannten starken Schüttungsschwankungen nicht erwartet wurde. Die Variationsbreiten der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Grundwässer der näher untersuchten Tiefbrunnen sind noch geringer. Sie liegen zwischen 0,2 und 0,5 ‰ und damit im Bereich bzw. etwas oberhalb der analytischen Messgenauigkeit ( $\pm 0,15$  ‰).

In Anbetracht des langen Zeitraumes und des großen Untersuchungsgebietes sind die Variationsbreiten der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sehr gering. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sowohl für den Blautopf als auch für die Tiefbrunnen kurzfristige Abflusskomponenten nur mit untergeordneten Anteilen zum unterirdischen Abfluss beitragen.

Eine detaillierte Auswertung der einzelnen Ganglinien in Verbindung mit Mischungsrechnungen erlaubt die Abschätzung des Grundwasseranteils, der nur eine geringe Aufenthaltszeit im Untergrund aufweist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Hierbei wurden die Messstellen in drei Gruppen untergliedert. Die Messstellen der Gruppe 1 zeigen mögliche direkte Zuflussanteile von ca. 3-8 ‰ und enthalten auch kurzfristige Zuflusskomponenten mit Anteilen von 1-3 ‰. Die Brunnen der Gruppe 2 zeigen eventuelle geringe direkte Zuflussanteile, jedoch keine kurzfristigen Komponenten. Der TB Österberg (Gruppe 3) zeigt weder direkte noch kurzfristige Zuflussanteile. Bei den genannten Prozentanteilen an direkten und kurzfristigen Zuflussanteilen handelt es sich um Maximalwerte, da deren Berechnung aufgrund der geringen Variationen bei den  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten mit Unsicherheiten behaftet ist.

**Tab. 2** Qualitative Beschreibung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Ganglinien (Variationsbreite, jahreszeitliche Schwankungen, Amplitude jahreszeitlicher Variationen, zeitliche Verzögerung gegenüber Niederschlägen) sowie Berechnung von direkten und kurzfristigen Abflusskomponenten nach der linearen Mischungsformel (zu Details siehe: LGRB/HYDROISOTOP 2004).

	Gruppe 1				Gruppe 2		Gruppe 3
	Blautopf	Munder- kingen 1	Zwiefal- tendorf	Ring- ingen	Umenlau	Kehr	Österberg
Filter [m u. Gel.]		123-281	280-310	250-320	100-150	100-150	161-206
Variationsbreite während des Untersuchungsjahres [%]	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,25	0,1
Jahreszeitliche Schwankungen	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Amplitude der jahreszeitl. Schwankungen [%]	0,1	0,05	0,05	0,07			
Zeitliche Verzögerung zum Niederschlagsinput [Monate]	2	4	4	5,5			
Möglicher Anteil des direkten Abflusses [%] (MVZ Tage/Wochen)	8	7	8	2-3	4	5	
Möglicher Anteil des kurzfristigen Abflusses [%] (MVZ Wochen/wenige Monate)	2-3	1	2	1-2			

### 3.4 Tritium-Gehalte im Grundwasser

Um eine Klassifizierung der Grundwässer im Altersbereich Jahre bis wenige Jahrzehnte vornehmen zu können, wurden im Untersuchungszeitraum 2002/2003 die 6 Tiefbrunnen und der Blautopf an mehreren Stichtagen auf ihren Tritiumgehalt untersucht. Zusätzlich wurden im regionalen Umfeld an weiteren 18 Quellen und Tiefbrunnen an wenigstens zwei Stichtagen Tritiummessungen durchgeführt. Die Tritiumgehalte liegen insgesamt zwischen <0,7 (TB Donaustetten) und 17,1 TU (Kesselquelle). Die Untersuchung von Proben verschiedener Monate erbrachte keine oder nur geringe Variationen beim Tritiumgehalt (festgestellte Variationsbreite bei den Tritiumgehalten: 1,0 bis 3,6 TU; Messfehler: zwischen  $\pm$  0,5 und 1,7 TU; Nachweisgrenze: 0,7 TU).

Die wiederholten Tritiumuntersuchungen weisen demnach übereinstimmend mit den  $\delta^{18}\text{O}$ -Reihenuntersuchungen sowohl für den Blautopf als auch die 6 Tiefbrunnen auf gleich bleibende Komponentenzusammensetzung und Altersstruktur dieser Grundwässer hin. Beim Blautopf zeigt sich während des Untersuchungszeitraumes allerdings ein Trend zu leicht ansteigenden Tritiumgehalten (von ca. 10 TU auf ca. 12 TU), was jedoch wegen des zeitlich begrenzten Untersuchungszeitraums nicht näher interpretiert werden kann.

Die untersuchten Brunnen und Quellen können hinsichtlich der Tritiumwerte in 3 Gruppen und damit in drei „Altersklassen“ unterteilt werden (s. Abb. 6; vgl. MOSER & RAU-ERT 1980):

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

### **Gruppe 1: Tritiumgehalte < 0,7 TU (d. h. < Nachweisgrenze)**

Im Grundwasser des TB Donaustetten konnte kein Tritium festgestellt werden. Das Wasser ist folglich vor 1953 gebildet worden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von BERTLEFF (1986).

### **Gruppe 2: Tritiumgehalte >6 bis <10 TU**

Hierzu gehören der TB Österberg und die Bohrung Warme Quelle bei Algershofen. Die Tritiumgehalte dieser Grundwässer sind geringer als in den aktuellen Niederschlägen. Dies zeigt, dass die Grundwässer aus mindestens 2 Komponenten bestehen:

- einer jüngeren tritiumführenden Komponente (Jungwasser, nach 1953 neu gebildet)
- einer Komponente aus altem, vor 1953 gebildetem und daher tritiumfreiem Wasser

### **Gruppe 3: Tritiumgehalte >10 TU**

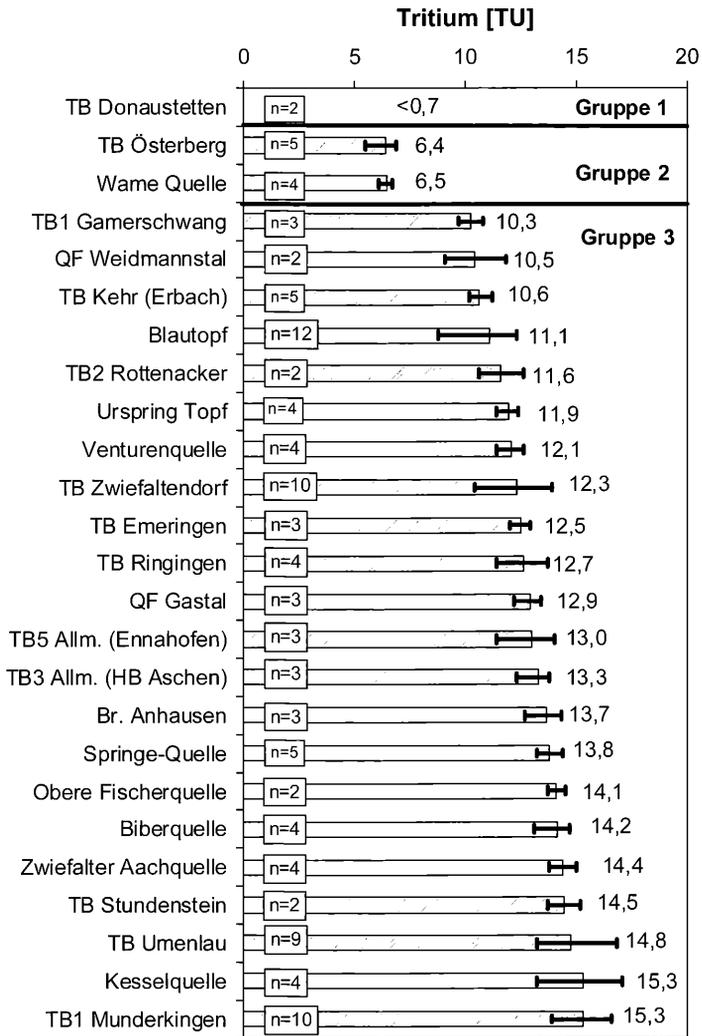
Die Tritiumgehalte dieser Grundwässer liegen im Bereich der aktuellen Niederschläge oder darüber. Bei Annahme, dass hier lediglich eine Grundwasserkomponente vorliegt, können unter Verwendung des Exponentialmodells (EM) und einer Inputkurve (Tritiumgehalte des Niederschlags in Steißlingen) Mittlere Verweilzeiten (MVZ) von 2-6 Jahren (bei 10-12 TU) bis 10-12 Jahren (bei 15-17 TU) berechnet werden.

Zu beachten ist dabei jedoch, dass es sich bei der Gruppe 3 um völlig unterschiedliche Standorte von Brunnen und Quellen handelt, die sowohl bezüglich der hydraulischen Anbindung an das Karstwassersystem als auch bei der Alterszusammensetzung der Grundwässer große Unterschiede aufweisen (siehe dazu auch BAUER et al. 2002). Zu dieser Gruppe gehören sowohl Quellen in geringer Entfernung zur kontinentalen Karstgrundwasserscheide (z. B. QF Weidmannstal bei Gomadingen) als auch Überlaufquellen des Tiefen Karsts (z. B. QF Glastal, Obere Fischerquelle, Kesselquelle) und einige Tiefbrunnen mit Zuflussbereichen in Tiefen von bis zu 200-300 m unter Gelände (z. B. TB Ringingen).

Für alle Brunnen- und Quellwässer der Gruppen 2 und 3 ist eine eindeutige Altersansprache alleine anhand der Tritiumgehalte nicht möglich, da nicht zwischen Einkomponenten und Mehrkomponenten-Mischwässern mit Beteiligung einer tritiumfreien Komponente unterschieden werden kann. Da für die vorliegenden Untersuchungen detaillierte Angaben zur Altersstruktur notwendig waren, wurden zusätzliche Bestimmungen weiterer Datierungstracer (z. B.  $^{85}\text{Kr}$ ,  $\text{SF}_6$ ) durchgeführt, die in Kombination mit dem Tritiumgehalt eine eindeutige Altersansprache ermöglichen.

## **3.5 $\text{SF}_6$ - und $^{85}\text{Kr}$ -Untersuchungen**

Sowohl fluoridierte Chlorkohlenwasserstoffe (FCKW's) als auch Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) und das Krypton-Isotop  $^{85}\text{Kr}$  sind Stoffe, die aufgrund anthropogener Immissionen in die Atmosphäre gelangen. Während die Einträge von FCKW's mittlerweile rückläufig sind (was deren Eignung als Datierungstracer einschränkt), steigen die von  $\text{SF}_6$  und  $^{85}\text{Kr}$  weiter an. In Abhängigkeit von Luftdruck und Temperatur lösen sich diese Spurenstoffe auch in den Niederschlägen und gelangen somit ins Grundwasser. Da die atmosphärischen Gehalte dieser Tracer bekannt sind und diese nur geringen räumlichen Variationen unterliegen, können Eintragsraten in das Grundwasser berechnet werden. Ebenfalls möglich ist somit die Berechnung von Grundwasserverweilzeiten (OSTER 1994; OSTER et al. 1996; CLARK & FRITZ 1997; BUSENBERG & PLUMMER 2000). Da es sich um gasförmige



**Abb. 6:** Tritiumgehalte ausgewählter Brunnen- und Quellwässer im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb; jeweils Darstellung von Mittelwert und Variationsbreite; zur Gruppeneinteilung siehe Text; n = Anzahl der untersuchten Proben; schräge Schraffur: Tiefbrunnen im Raum Riedlingen-Erbach; vertikale Schraffur: Quellen im Raum Riedlingen-Erbach; ohne Schraffur: Quellen und Brunnen im Bereich der Reutlinger Alb.

Tracer handelt, unterliegen diese Methoden einigen Restriktionen, die für die Untersuchungen zu berücksichtigen waren.

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

In der vorliegenden Studie wurden SF<sub>6</sub>-Messungen wiederholt an den 6 Hauptbrunnen sowie einigen weiteren Quellen und Brunnen durchgeführt. Die untersuchten Fassungen sind in Abbildung 7 dokumentiert. <sup>85</sup>Kr wurde wegen der hohen Kosten nur einmalig an 8 ausgewählten Tiefbrunnen gemessen.

### SF<sub>6</sub>-Gehalt

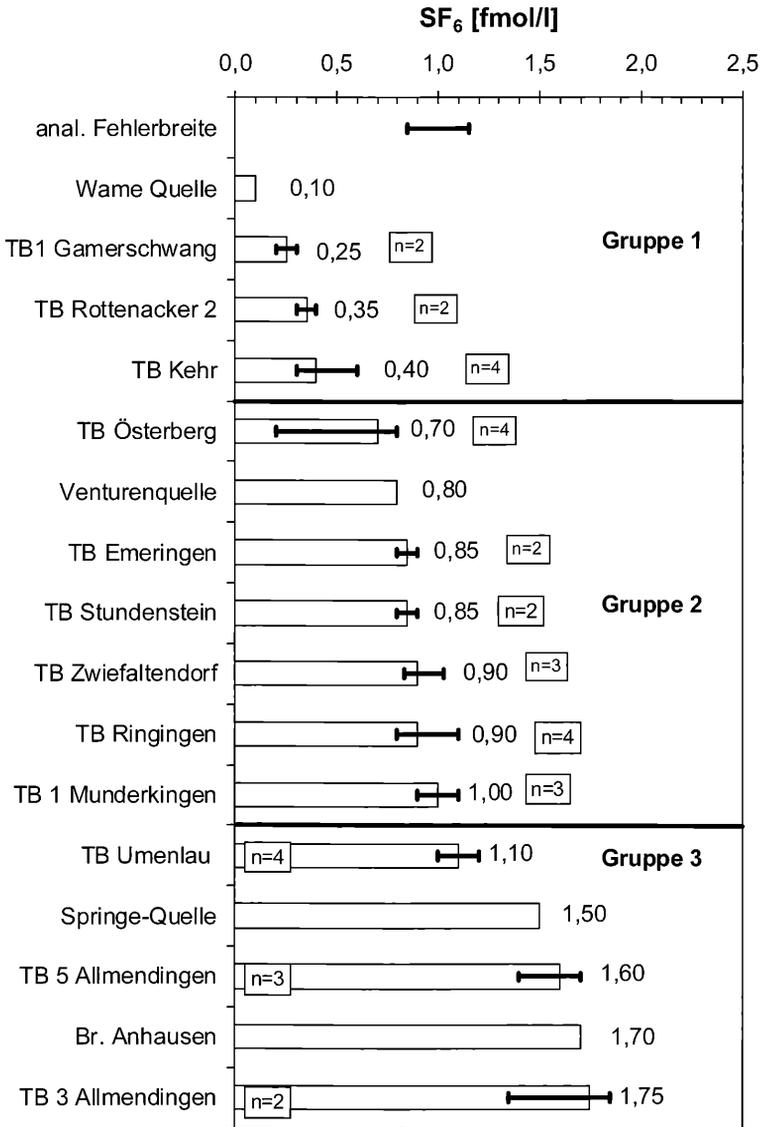
Die SF<sub>6</sub>-Gehalte der untersuchten Brunnen und Quellen liegen zwischen 0,1 und 1,9 fmol/l. Aufgrund der ansteigenden Inputfunktion weisen hohe SF<sub>6</sub>-Gehalte auf niedrige Grundwasserverweilzeiten, geringe Gehalte dagegen auf hohe Verweilzeiten hin. Die Analyseergebnisse erlauben eine Gliederung der untersuchten Brunnen und Quellen in drei Gruppen (Abb. 7).

Alle untersuchten Grundwasserproben weisen SF<sub>6</sub>-Gehalte auf, die kleiner als die in aktuell gebildeten Grundwässern sind. Die Mehrzahl der Messungen lieferte SF<sub>6</sub>-Werte im Bereich zwischen 0,7 und 1,9 fmol/l, wobei die Messwerte durch Untersuchungen an verschiedenen Stichtagen insgesamt gut bestätigt werden konnten. Im Vergleich zu diesen Werten würde sich in einem aktuell neu gebildeten Grundwasser im Lösungsgleichgewicht mit dem aktuellen SF<sub>6</sub>-Gehalt der Atmosphäre ein SF<sub>6</sub>-Gehalt von 2,0 bis 2,2 fmol/l einstellen. Unter Annahme eines Einkomponentenmodells mit exponentieller Alterszusammensetzung können aus SF<sub>6</sub>-Daten größenordnungsmäßig Werte für die mittlere Grundwasserverweilzeit berechnet werden (vgl. Tab. 3).

**Tab. 3** Gruppierung der untersuchten Brunnen und Quellen anhand der SF<sub>6</sub>-Gehalte sowie Berechnung von mittleren Verweilzeiten für die Annahme von Einkomponentensystemen und Gültigkeit des Exponentialmodells (SF<sub>6</sub>-Werte für eine Höhe von 600 m NN; angenommene Grundwassertemperatur im Tiefen Karst: 12 °C)

<b>Gruppe 1</b>	<b>Gruppe 2</b>	<b>Gruppe 3</b>
SF <sub>6</sub> <b>0,1 bis 0,5</b> fmol/l (Mittelwert)	SF <sub>6</sub> <b>&gt;0,5 bis 1,0</b> fmol/l (Mittelwert)	SF <sub>6</sub> <b>&gt;1,0 bis 1,9</b> fmol/l (Mittelwert)
Bohrung Warme Quelle*)	TB Österberg	TB Munderkingen 1
TB Gamerschwang	TB Ringingen	TB Umenlau
TB Rottenacker 2	TB Zwiefaltendorf	TB Allmendingen 5
TB Kehr	Venturenquelle	Springequelle
	TB Emeringen	Br. Anhausen
	TB Stundenstein	TB Allmendingen 3
<b>Berechnung der Grundwasserverweilzeit für die Annahme eines Einkomponentensystems sowie Gültigkeit des Exponentialmodells</b> Mittlere Grundwasserverweilzeit		
ca. > 50 Jahre	ca. >20 bis 50 Jahre	ca. 5 bis 20 Jahre

\*) SF<sub>6</sub>-Gehalte wahrscheinlich zu niedrig, da Druckentgasung des Wassers



**Abb. 7:** Darstellung der Ergebnisse der SF<sub>6</sub>-Untersuchungen (Mittelwerte, n = Anzahl der untersuchten Proben, der Variationsbereich der untersuchten Proben ist anhand von Fehlerindikatoren dargestellt; die Messgenauigkeit beträgt 0,1-0,2 fmol/l; fmol = femtomol).

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

Die nach dem EM bestimmten MVZ stellen Mindestwerte dar, da alleine anhand von  $SF_6$ -Daten nicht ausgeschlossen werden kann, dass Mehrkomponenten-Mischwässer mit Beteiligung einer älteren,  $SF_6$ -freien Komponente vorliegen.

Für die Brunnen der Gruppe 1 zeigen die geringen  $SF_6$ -Gehalte ( $< 0,5$  fmol/l) daher entweder ein altes Grundwasser an, oder sie weisen auf einen großen Anteil einer  $SF_6$ -freien Grundwasserkomponente hin (neugebildet vor 1968). Die relativ hohen Werte der Gruppe 3 ( $> 1$  fmol/l) deuten demgegenüber auf jüngere Grundwässer bzw. einen kleinen Anteil einer  $SF_6$ -freien Komponente hin. Es kann hier aber auch eine sehr junge Komponente zu einer etwas älteren, ebenfalls  $SF_6$ -führenden Grundwasserkomponente zugemischt sein. Die genaue Bestimmung der Mischungsverhältnisse kann daher nur anhand des Vergleichs mit den Tritium- und  $^{85}Kr$ -Messungen durchgeführt werden (s.u.).

### **Krypton-85-Gehalt**

Die  $^{85}Kr$ -Gehalte der untersuchten Brunnen liegen zwischen ca. 10 und 70 dpm/ml Kr (dpm = desintegrations per minute). Aufgrund der steigenden  $^{85}Kr$ -Gehalte in der Atmosphäre, die im wesentlichen aus den Wiederaufbereitungsanlagen von Kernbrennstäben stammen, weisen hohe  $^{85}Kr$ -Gehalte auf niedrige Grundwasserverweilzeiten, geringe Gehalte dagegen auf hohe Verweilzeiten hin. Ein aktuell aus Niederschlägen neu gebildetes Grundwasser weist einen  $^{85}Kr$ -Gehalt von ca. 80 dpm/ml Kr auf (vgl. Abb. 8). Den Messwerten entsprechend, lassen sich die Brunnen zu 3 Gruppen zusammenfassen.

### **Gruppe 1: 10 bis 15 dpm/ml Kr; TB Kehr, TB Rottenacker 2**

Die Gehalte sind sehr gering und zeigen damit alte Grundwässer bzw. einen hohen Anteil einer  $^{85}Kr$ -freien Grundwasserkomponente an. Unter Annahme des Einkomponentensystems (EM) würde die Berechnung eine Mittlere Verweilzeit von ca. 50 Jahren liefern.

### **Gruppe 2: 30 bis 40 dpm/ml Kr; TB Zwiefaltendorf, TB Umenlau, TB Ringingen, TB Munderkingen**

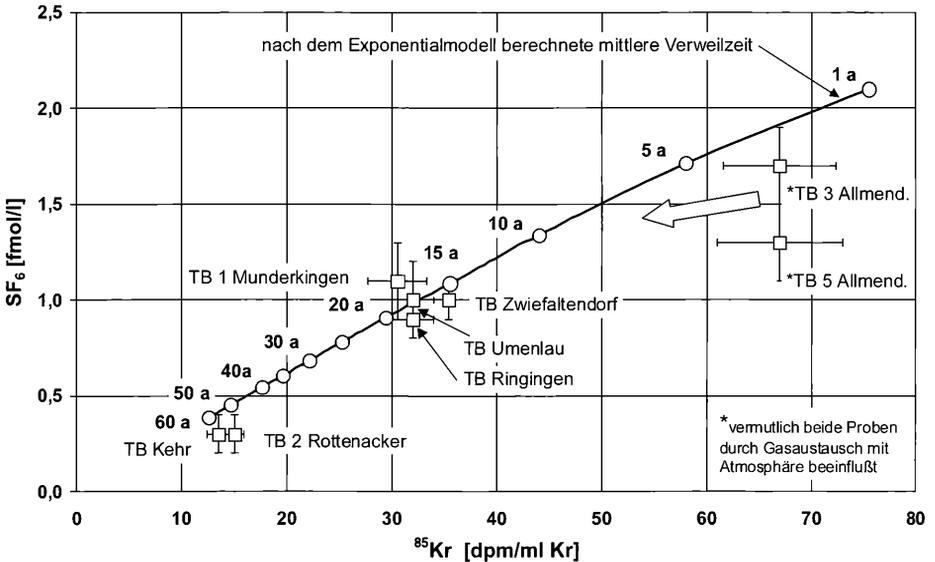
Die Gehalte liegen noch deutlich unter den für ganz junge Grundwässer geltenden Werten. Unter der stark vereinfachenden Annahme, dass es sich hier nicht um Mischwässer handelt, kann nach dem EM eine MVZ in der Größenordnung von 10-30 Jahren berechnet werden.

### **Gruppe 3: 60 bis 70 dpm/ml Kr; TB Allmendingen-3 und -5**

Für die TB Allmendingen-3 und -5 ergibt sich mit 67 dpm/ml Kr ein übereinstimmender, relativ hoher  $^{85}Kr$ -Gehalt, der auf eine niedrige mittlere Verweilzeit von ca. 4 Jahren (Exponentialmodell) oder auf eine Überhöhung des  $^{85}Kr$ -Gehaltes durch verstärkten Gasaustausch zwischen Atmosphäre und dem zu den Brunnen strömenden Grundwasser hinweisen kann. Eindeutige Aussagen zur Grundwasseraltersstruktur und quantitative Angaben zum Mischungsverhältnis der Komponenten können auch hier nur in Kombination mit den Ergebnissen der anderen Methoden abgeleitet werden.

### **Diskussion**

Die Lage der gemessenen  $SF_6$ - und  $^{85}Kr$ -Werte zeigt überwiegend eine gute Übereinstimmung mit der Modellkurve (vgl. Abb. 8). Daraus folgt, dass die  $SF_6$ - und  $^{85}Kr$ -Daten kongruente Ergebnisse bei der Bestimmung der Altersstruktur liefern.



**Abb. 8:** Korrelation der SF<sub>6</sub> und <sup>85</sup>Kr-Gehalte sowie Modellkurve für verschiedene Mittlere Grundwasserverweilzeiten nach dem Exponentialmodell.

Die Auswertung der SF<sub>6</sub>- und <sup>85</sup>Kr-Messungen zeigt, dass für einige der Tiefbrunnen relativ hohe Grundwasserverweilzeiten anzunehmen sind, die in scheinbarem Gegensatz zu den Ergebnissen der Tritiumuntersuchungen stehen, nach denen diese Tiefbrunnen Tritiumgehalte entsprechend der aktuellen Niederschläge aufweisen. Für die Brunnen mit einerseits unauffälligen Tritiumgehalten (ca. 10-12 TU), andererseits jedoch vergleichsweise niedrigen SF<sub>6</sub>- und <sup>85</sup>Kr-Gehalten kann deshalb angenommen werden, dass es sich um Mehrkomponenten-Mischwässer mit Anteilen einer relativ alten Grundwasserkomponente handelt (tritium-, SF<sub>6</sub>- und <sup>85</sup>Kr-frei). Eine genaue Bestimmung von Grundwasseralter und Mischungsanteil der Komponenten ist nur über eine Modellierung möglich (s.u.).

## 4. Modellierung der Altersstruktur

### 4.1 Zielsetzung

Im Folgenden werden die am Fließsystem des Oberjuras beteiligten Grundwässer im Hinblick auf ihre Altersstruktur und Komponentenzusammensetzung näher charakterisiert. Die Kenntnisse zur Alterszusammensetzung bilden die wesentliche Basis für die Prognose-rechnungen zur Entwicklung der PSM-Gehalte im Grundwasser des Tiefen Karsts. Zunächst werden die Grundlagen für die Altersmodellierung dargestellt und danach die Grundwasseraltersberechnungen für die Brunnen mit verschiedenen Modellansätzen durchgeführt und diskutiert.

## 4.2 Methodik und Modellkalibrierung

Bei der Modellierung wurden die Gehalte an  $\text{SF}_6$  und  $^{85}\text{Kr}$  als Kalibrierungsparameter für die aus den Tritiumgehalten abgeleiteten Verweilzeiten und Mischungsverhältnisse verwendet. Eine Angabe zur mittleren Verweilzeit eines Grundwassers sowie dem Mischungsverhältnis verschiedener Grundwasserkomponenten kann nur dann als eindeutig angesehen werden, wenn alle hier genannten Datierungsmethoden zum gleichen Ergebnis führen. Um diese Ergebnisse weiter abzusichern, wurden zusätzlich die für einige Brunnen vorhandenen älteren Tritiumwerte in die Modellierung mit einbezogen. Die Gültigkeit einer Modellannahme ist vor allem in den Fällen gut belegt, in denen das Modell auch die Tritiumgehalte der vergangenen Jahrzehnte wiedergeben kann.

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass sich der Grundwasserabfluss im Oberjura aus Grundwasserkomponenten unterschiedlichen Alters zusammensetzt. Mögliche Anteile von sehr jungen Komponenten wurden in Kap. 3.3 näher beschrieben, sie spielen hier mit maximalen Anteilen von bis zu 8 % keine wesentliche Rolle. Es dominieren daher alte (> 50 Jahre) und langfristige Grundwasserkomponenten (mittlere Grundwasserverweilzeit weniger als 50 Jahre).

Für die Modellierung der Tritiumdaten wurden die aus der Literatur bekannten konzeptionellen Black-Box-Modelle angewendet (z. B. DVWK 1995, MALOSZEWSKI & ZUBER 1996) und die Güte der Anpassung der berechneten Modellfunktionen an die gemessenen Tritiumgehalte bewertet. Die Berechnungen wurden mit dem Programm MULTIS durchgeführt (RICHTER & SZYMCZAK 1992).

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Altersmodellierung exemplarisch für zwei der näher untersuchten Tiefbrunnen vorgestellt (TB Ringingen und Kehr). Die ausführliche Diskussion der Modellergebnisse ist bei LGRB/HYDROISOTOP (2004) dokumentiert. Die Ergebnisse der Modellierung zu allen weiteren Brunnen und Quellen sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

## 4.3 Modellergebnisse für den TB Ringingen

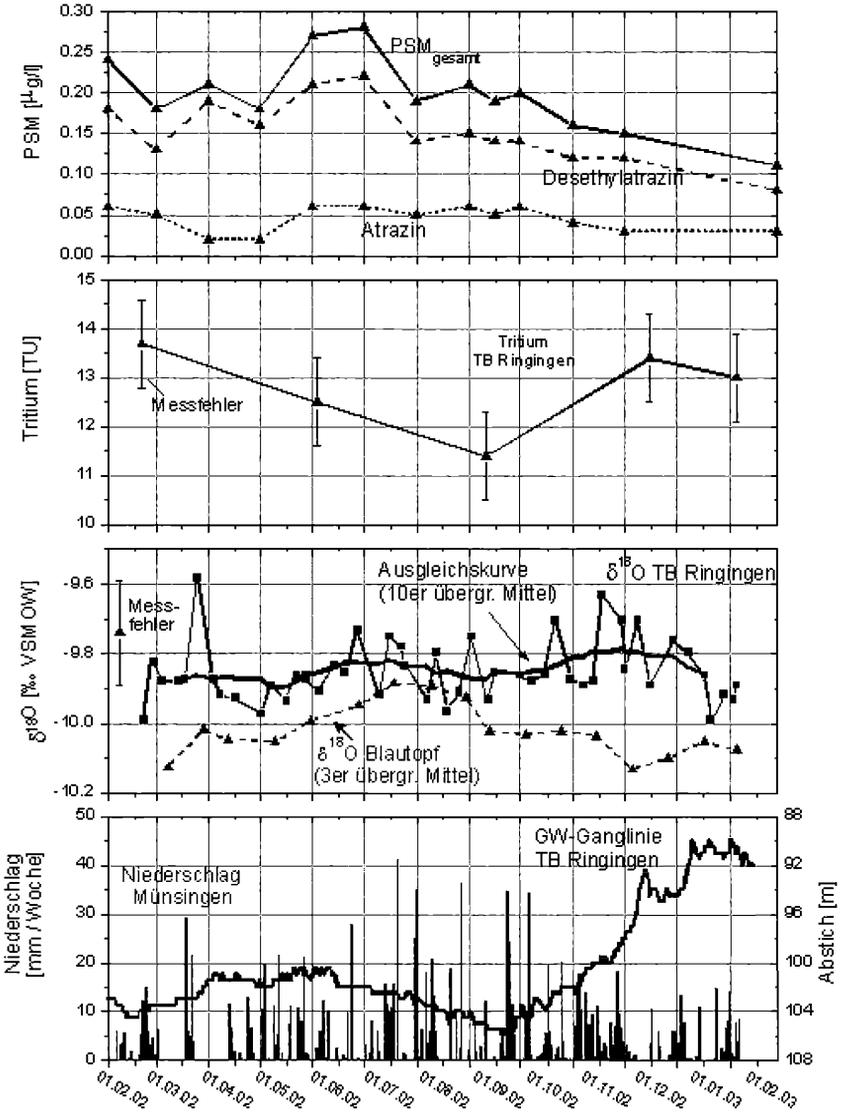
Die im Zeitraum 2002-2003 gemessenen Tritiumgehalte (11,4 bis 15 TU; vgl. Abb. 9) liegen im oberen Bereich der aktuellen Niederschläge (ca. 10-14 TU) bzw. etwas darüber. Die Berechnungen nach dem Exponentialmodell anhand der aktuellen Werte erbringt eine Mittlere Verweilzeit von ca. 8 Jahren.

Unter Einbeziehung der älteren Tritiumdaten ergibt sich nach dem EM eine MVZ von 6 oder 55 Jahren (Abb. 10). Die Parallelschaltung mit einer tritiumfreien Komponente (EM//M(0)) erbringt einen Zuflussanteil von 70 % bis 80 % mit einer MVZ von 12 bis 25 Jahren. Die Auswertung der  $\text{SF}_6$ - und  $^{85}\text{Kr}$ -Daten ergibt ähnliche Ergebnisse. Die Messwerte dieser Tracer lassen sich mit einer MVZ von ca. 10 Jahren bis ca. 18 Jahren und Anteilen von mehr als 75 % der tracerhaltigen Komponente nachbilden.

**Tab. 4** Zusammenstellung der Ergebnisse der Altersmodellierung (in Klammer Wert für beste Anpassung); EM = Exponentialmodell, M(0) = tritiumfreie Komponente; aus: LGRB/Hydroisotop 2004).

Bezeichnung	Berechnung Altersstruktur	Anteil tritiumfrei [%]	MVZ der Jungwasser-Komponente [a]	Bemerkung
TB Österberg	EM//M(0)	50-75 (65)	5-15 (13)	vermutlich Veränderung der Altersstruktur
TB Umenlau	EM//M(0)	10	15	
TB Munderkingen 1	EM//M(0)	15-20 (21)	14-18 (18)	
TB Ringingen	EM//M(0)	20-30 (30)	12-15 (15)	
TB Kehr	EM//M(0)	40-50 (54)	24-28 (26)	vermutlich Veränderung der Altersstruktur
TB Zwiefaltendorf	EM//M(0)	25-30 (28)	12-16 (12)	
TB Allmendingen 3 und 5	EM//EM	0	Komp. 1: ca.1-2 Komp. 2: ca.18-21	Komp. 1: ca. 30-50 % Komp. 2: ca. 50-70 %
TB Rottenacker 1	EM//M(0)	40-50	25-35	zusätzliche Bestimmung von SF <sub>6</sub> bzw. <sup>85</sup> Kr notwendig
TB Rottenacker 2	EM//M(0)	40	35	vermutlich Veränderung der Altersstruktur
TB Emeringen	EM//M(0)	15-20	17	
Br. Anhausen	EM	0	max. 12	
Springequelle	EM	0	6-7	
TB Gamerschwang	EM//M(0)	35	25-30 (25)	
Venturenquelle	EM//M(0)	40-50 (40)	25-35 (30)	
Bohrung Warme Qu.	EM//M(0)	50-70 (60)	6-25 (15)	Alterstruktur nicht eindeutig bestimmbar; SF <sub>6</sub> -Gehalt durch Entgasung verm. verfälscht
Urspringtopf	EM	0	< 5	zusätzliche Bestimmung von SF <sub>6</sub> bzw. <sup>85</sup> Kr notwendig
TB Stundenstein	EM//M(0)	20-25 (25)	12-15 (15)	
TB Donaustetten		100		keine Tritiumgehalte nachgewiesen; Grundwasser wurde vor 1953 gebildet
Biberquelle	EM	0	12	
Kesselquelle	EM	0	14	überhöhter <sup>85</sup> Kr-Wert; Berechnungen auf Basis der gemessenen Tritiumgehalte
Blautopf	EM//M(0)	20	13	
Zwiefalter Achquelle	EM	0	13	
Obere Fischerquelle	EM	0	10	
QF Glastal	EM	0	9	
QF Weidmannstal	EM	0	< 3	

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

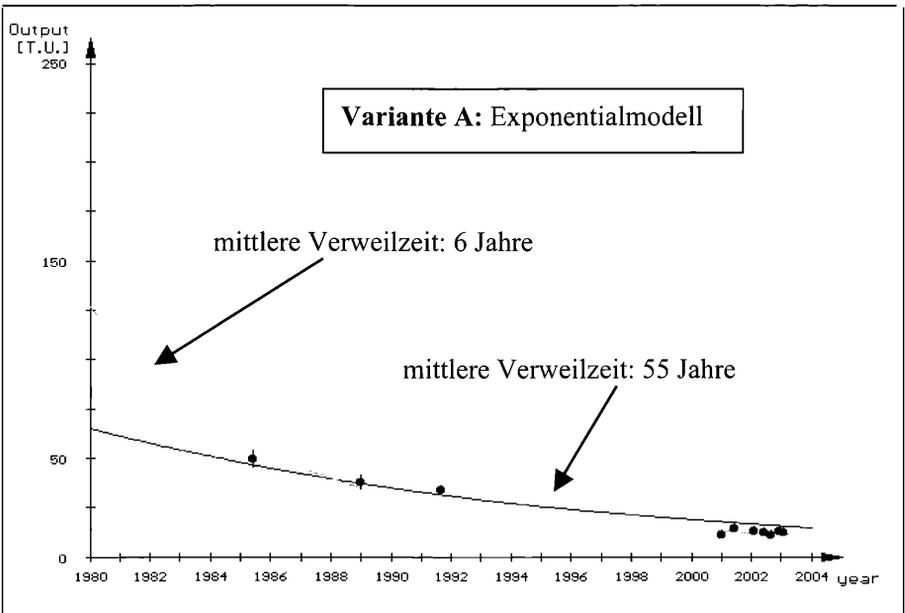


**Abb. 9:** TB Ringingen; Ganglinien von Niederschlag, Grundwasserstand,  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Tritium- und PSM-Gehalten.

Die beste Anpassung der Messwerte aller drei Datierungstracer wird erreicht, wenn man für einen Anteil von ca. 70 bis 80 % des Grundwassers eine MVZ von 12 bis 15 Jahren annimmt. Die übrigen 20 bis 30 % des Grundwassers bestehen aus einer tritium- und spurengasfreien Komponente (Abb. 11). Die Gastracer ergeben insgesamt etwas geringere Verweilzeiten und etwas höhere Jungwasseranteile. Dies kann am unterschiedlichen Eintrags-

mechanismus im Vergleich zum Tritium liegen. Auf der Grundlage von Tritiumdaten wird die Verweilzeit des Grundwassers ab Einsickerung in den Boden berechnet. Mit den hier verwendeten Gastracern  $\text{SF}_6$  und  $^{85}\text{Kr}$  wird wegen des anhaltenden Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Bodenluft in der ungesättigten Zone die Verweilzeit ab Erreichen der Grundwasseroberfläche berechnet. Methodisch bedingt liefert die Tritiummethode daher immer vergleichsweise etwas höhere Werte für das Grundwasseralter.

Zusammenfassend ergibt sich, dass aus dem TB Ringingen ein Grundwasser gefördert wird, das überwiegend aus einer jungen Komponente (MVZ 12-15 Jahre, Anteil 70-80 %) besteht. Die ältere Komponente ohne Tritium und Spurengase weist einen Anteil von 20-30 % auf. Nach dieser Alterstruktur ist für den TB Ringingen noch bis 2020 mit einem PSM-Austrag zu rechnen (s.u.). Die Anteile an sehr jungem Grundwasser sind mit ca. 2-3 % gering (Tab. 2).

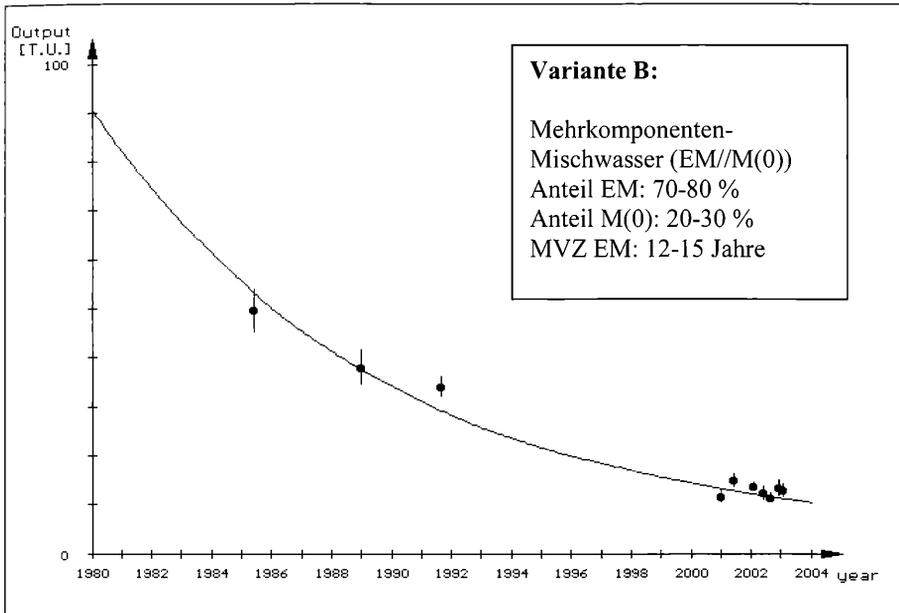


**Abb. 10:** TB Ringingen, Modellierung von Grundwasseralter und Komponentenzusammensetzung, Variante A (Einkomponentensystem, siehe Text).

#### 4.4 Modellergebnisse für den TB Kehr

Die im Jahr 2001 und 2002 bis Anfang 2003 gemessenen Tritiumgehalte liegen mit 10,2 bis 11,4 TU im Bereich der aktuellen Niederschläge (Abb. 12). Die Berechnung auf der Grundlage der aktuellen Werte erbringt Mittlere Verweilzeiten von 1 Jahr oder ca. 100 Jahren nach dem Exponentialmodell. Unter Berücksichtigung der älteren Tritiumwerte ergibt sich eine MVZ von ca. 100 Jahren (Abb. 13, Variante A). Eine modellhafte Erfassung ist auf Grundlage der Tritium-Gehalte allein aber nur unzureichend.

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag



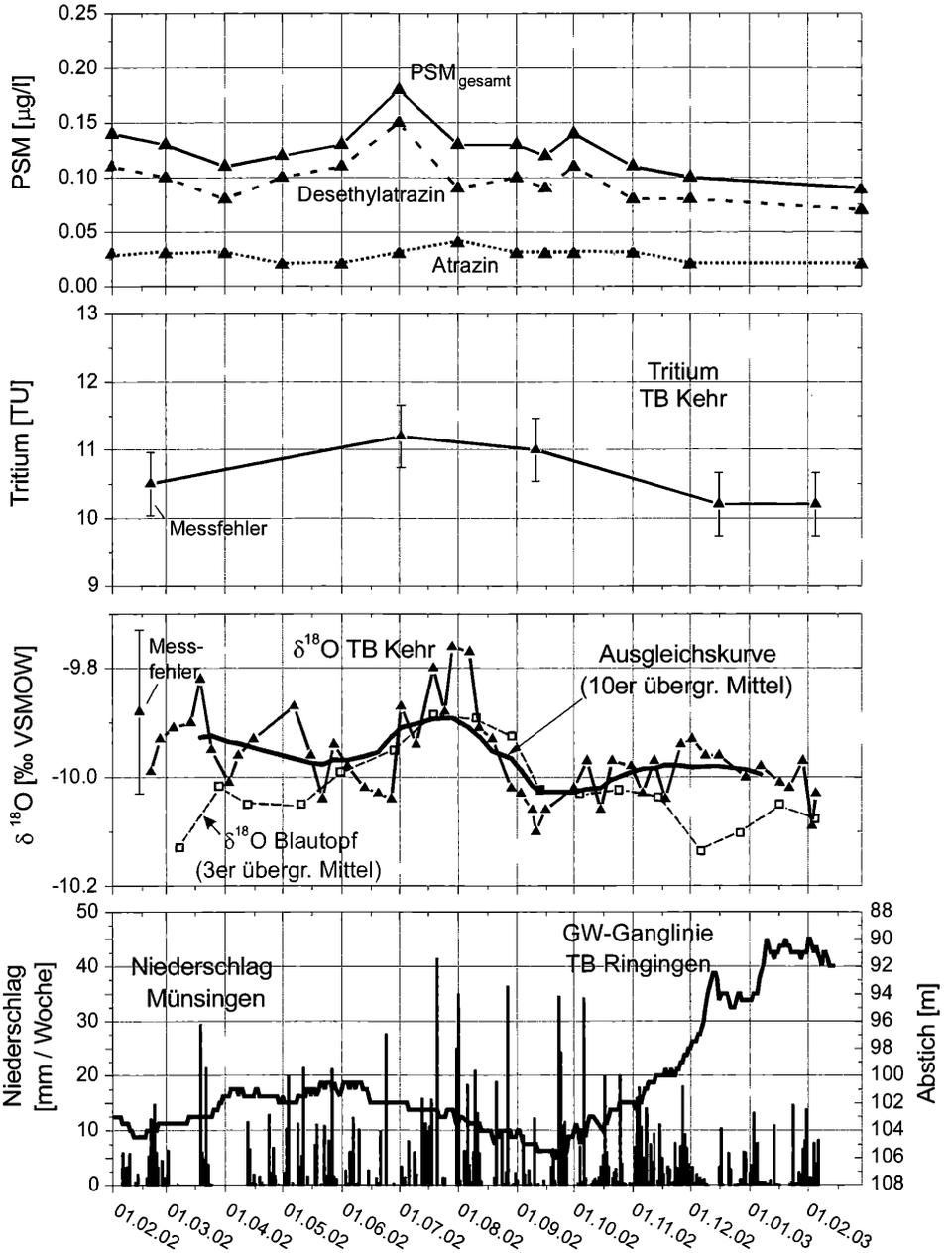
**Abb. 11:** TB Ringingen, Modellierung von Grundwasseralter und Komponentenzusammensetzung, Variante B (Mehrkomponenten-Mischwasser-System, siehe Text).

Da die Tritiumgehalte in den 80-er und 90-er Jahren deutlich kleiner als in den damaligen Niederschlägen waren, muss hier jedoch von einem Mehrkomponentensystem mit Beteiligung einer tritiumfreien Komponente ausgegangen werden. Die Berechnung für ein parallel geschaltetes EM//M(0)-Modell erbringt einen Zuflussanteil des EM von 44 % mit einer MVZ von ca. 37 Jahren (Abb. 13, Variante B). Für diese Modellvariante ergeben sich Konzentrationen für  $\text{SF}_6$  von ca. 0,25 fmol/l und für  $^{85}\text{Kr}$  von ca. 8 dpm/ml Kr, die etwas kleiner als die tatsächlichen Messwerte sind ( $\text{SF}_6$ :  $0,3 \pm 0,1$  fmol/l;  $^{85}\text{Kr}$ :  $13,5 \pm 1,1$  dpm/ml Kr), was methodische Ursachen hat.

In Abb. 13 ist zu erkennen, dass die älteren Tritiumwerte insgesamt nur schlecht durch die Modellfunktion angepasst werden. Zieht man für die Kalibrierung nur die neueren Tritiumwerte ab 1993 heran, so ergeben sich für die MVZ und den Anteil der jungen Grundwasserkomponente jeweils etwas größere Werte. Die beste Anpassung wird ermittelt für eine Mittlere Verweilzeit von etwa 24 bis 28 Jahren und einem Anteil der tritiumführenden Komponente von ca. 50 bis 60 % (Abb. 14).

Für das Grundwasser aus dem TB Kehr wurde auch der Gehalt an  $^{14}\text{C}$  analysiert (57,6 pmc; siehe: LGRB/HYDROISOTOP 2004). Unter Berücksichtigung des tritiumführenden Mischungsanteils (ca. 50 %), der vermutlich etwas höhere  $^{14}\text{C}$ -Gehalte mitbringt, kann von einem Gehalt für den tritiumfreien Anteil von ca. 40 %-modern ausgegangen werden. Daraus berechnet sich ein Alter für die tritiumfreie Komponente von rd. 5.000 Jahren ( $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt 75 %-modern).

Zusammenfassend lässt sich das heutige Grundwasser des TB Kehr als eine 2-Komponentenmischung aus einer jungen Grundwasserkomponente mit einem Anteil von 50



**Abb. 12:** TB Kehr; Ganglinien von Niederschlag, Grundwasserstand,  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten sowie Tritium- und PSM-Gehalten.

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

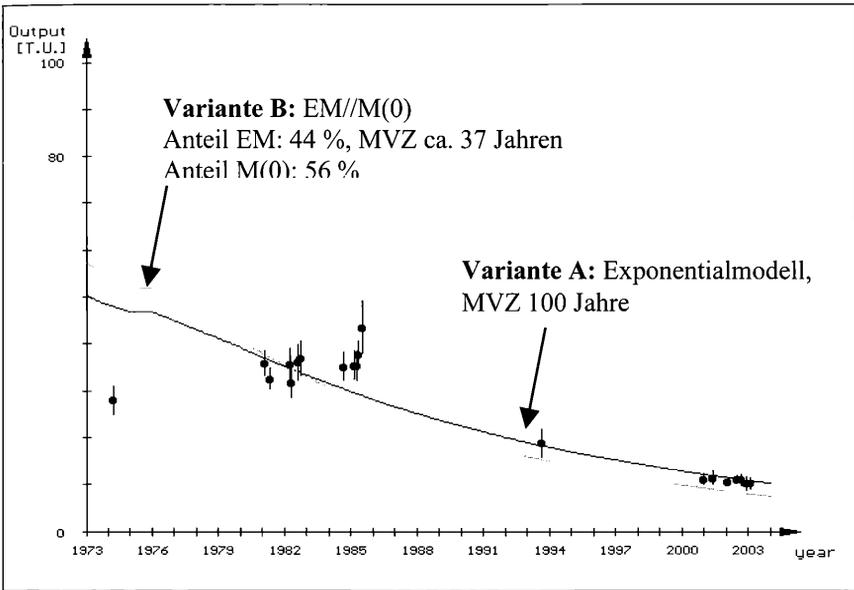


Abb. 13: TB Kehr; Modellierung von Grundwasseralter und Komponentenzusammensetzung, Varianten A und B (siehe Text).

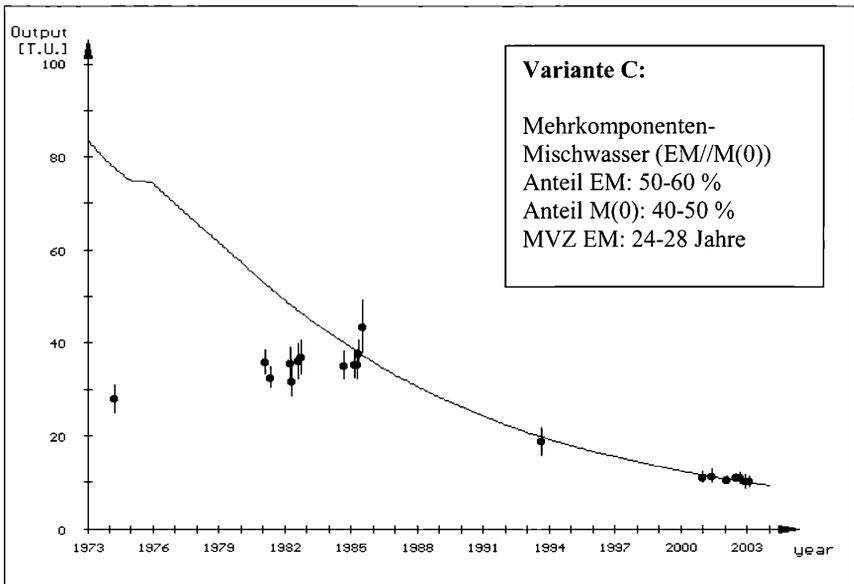


Abb. 14: TB Kehr; Modellierung von Grundwasseralter und Komponentenzusammensetzung, Variante C (siehe Text).

bis 60 % und einer Mittleren Verweilzeit von etwa 24 bis 28 Jahren beschreiben. Die tritium- und spurengasfreie Komponente weist ein Alter von rund 5.000 Jahren auf (Anteil 40 bis 50 %). Mögliche Anteile an sehr jungem Grundwasser (direktes bzw. kurzfristiges Grundwasser) sind mit max. 5 % anzugeben (vgl. Tab. 2).

Die älteren Tritiumwerte vor 1985 lassen sich auf Basis der zugrunde gelegten konzeptionellen Black-Box-Modelle zusammen mit den aktuellen Daten nur sehr schlecht beschreiben. Auch die Auswertung eines älteren  $^{85}\text{Kr}$ -Wertes aus dem Jahr 1985 (6,1 dpm/ml Kr; BERTLEFF 1986) erbringt hier keine Klärung. Dies weist auch darauf hin, dass durch die Bewirtschaftung des TB Kehr wahrscheinlich insbesondere in den Anfangsjahren eine Veränderung der Alterstruktur hervorgerufen und dabei zunehmend jüngerer Wasser gefördert wurde.

Auf Grund der Alterstruktur muss noch bis zum Jahr 2030 mit einem PSM-Austrag im TB Kehr gerechnet werden (s.u.). Anteile an sehr jungem Grundwasser sind mit max. 5 % nachweisbar (vgl. Tab. 2).

## 5. Diskussion der Modellergebnisse und Regionalisierung

Die Ergebnisse der Modellierung der Altersstruktur zeigen, dass sich das tiefe Karstgrundwasser im Untersuchungsgebiet aus mehreren Komponenten unterschiedlichen Alters zusammensetzt. Es unterscheidet sich dadurch wesentlich von oberflächennah austretenden Karstquellen (LGRB/Hydroisotop 2000). Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich der schon im Bereich der Reutlinger Alb festgestellte Trend einer Zunahme der Grundwasserverweilzeit, ausgehend von der Wasserscheide im Norden hin zur Donau im Süden bestätigt.

Insbesondere die Tiefbrunnen im Untersuchungsgebiet Riedlingen-Erbach besitzen relativ große Einzugsgebiete und erfassen tiefliegende Aquiferabschnitte. Das Zirkulationssystem ist jedoch nicht homogen. Entsprechend der lokalen Situation können den Tiefbrunnen unterschiedlich alte Komponenten zuströmen. Dies ist charakteristisch für ein System mit kombinierter Entwässerung von Lösungshohlräumen (hoher Durchsatz, geringes Speichervolumen) und von Kluftsystemen (geringer Durchsatz, hohes Speichervolumen).

Während für die Quellen und flachen Brunnen auf ein einfaches Exponentialmodell (Einkomponentensystem) zur Beschreibung von Grundwasseralter und Komponentenzusammensetzung zurückgegriffen werden kann, sind zur Bestimmung der Grundwasseraltersstruktur der Tiefbrunnen mindestens Zweikomponentenmodelle notwendig, wobei insbesondere der Zumischung einer alten, tritiumfreien Komponente Rechnung getragen werden muss. Grundsätzlich können mit der hier durchgeführten Modellierung nur die beiden wesentlichen Komponenten erfasst werden.

Insgesamt lassen sich innerhalb des Untersuchungsgebietes markante Variationen hinsichtlich der Verweilzeit und der Zumischung von alten tritiumfreien Grundwasserkomponenten feststellen. Die Standorte lassen sich regional in vier Gruppen unterteilen (Abb. 15):

### **Gruppe 1:**

*Quellen und flache Brunnen der Offenen Zone des Tiefen Karsts:*

*QF Weidmannstal, Urspringtopf, Springequelle, QF Glastal, Obere Fischerquelle, Zwielfalter Achquelle, Kesselquelle, Br. Anhausen, Biberquelle*

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

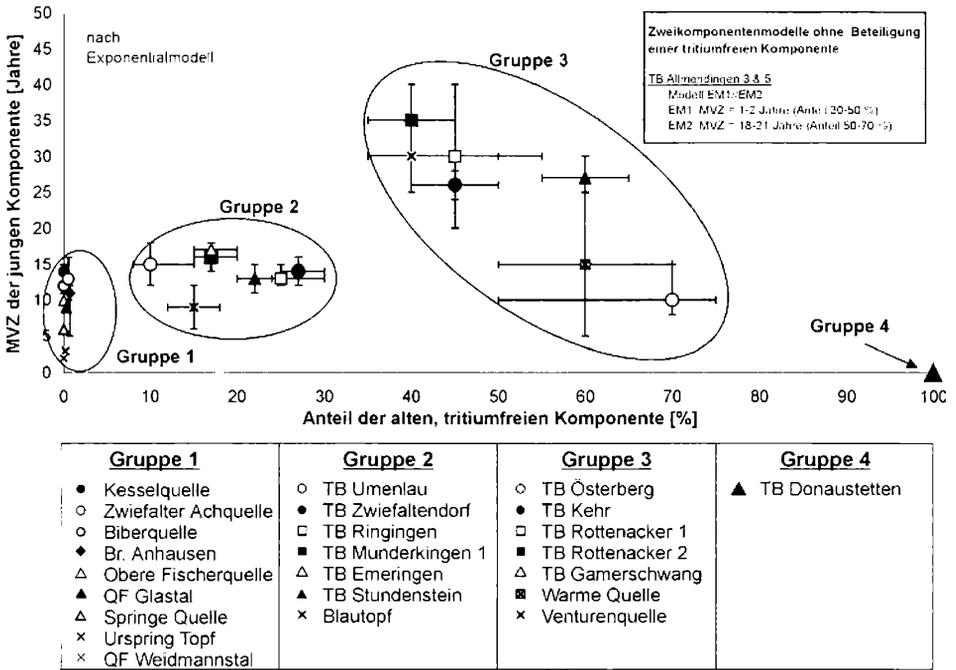


Abb. 15: Regionale Gliederung der Karstgrundwässer im Bereich der Mittleren Schwäbischen Alb anhand Altersstruktur und Komponentenzusammensetzung in vier Gruppen.

Generell ist eine Zunahme der Grundwasserverweilzeit von Norden nach Süden zu erkennen. Im Norden sind die Quellen und der Br. Anhausen an relativ flach zirkulierende Grundwassersysteme angeschlossen, deren MVZ von wenigen Jahren (QF Weidmannstal) bis max. 14 Jahren beträgt. Die Grundwasserzirkulation kann für die Standorte der Gruppe 1 mit einem Einkomponentensystem modelliert werden (Exponentialmodell).

**Gruppe 2:**

*Tiefbrunnen und Quellen der Offenen Zone des Tiefen Karsts bzw. des Grenzbereichs zur Überdeckten Zone:*

*TB Munderkingen 1, TB Zwiefaltendorf, TB Ringingen, TB Emeringen, TB Stundenstein, Biberquelle, Blautopf*

Anhand der kombinierten Auswertung mehrerer Datierungstracer können die Grundwässer dieser Standorte durch ein Mischsystem aus einer jungen, tritiumführenden Grundwasserkomponente und einer alten, tritiumfreien Komponente charakterisiert werden.

Die MVZ der jungen Komponente beträgt ca. 10-20 Jahre. Mit einem Anteil von 70 bis 90 % dominiert sie den Gesamtabfluss des Mischsystems deutlich. Je nach lokaler Situation kann hier z. T. relativ oberflächennah zirkulierendes Grundwasser, das an die rezenten Neubildungsprozesse angeschlossen ist, angetroffen werden. Wie die Ergebnisse der  $\delta^{18}\text{O}$ -

Zeitreihen zeigen, kann mit kurzfristigen und direkten Abflusskomponenten bis zu 8 % gerechnet werden.

Neben dieser jungen Komponente liegen auch Anteile von altem, tritiumfreiem Grundwasser vor (0-30 %). Dies zeigt, dass die Tiefbrunnen und Quellen auch tiefe Aquiferabschnitte mit langsamer zirkulierendem Grundwasser erschließen. Wie der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt am TB Munderkingen 1 anzeigt, handelt es sich bei der tritiumfreien Komponente um maximal wenige hundert bis max. 2.000 Jahre altes Grundwasser.

Inwieweit an diesen Standorten ein Einfluss von thermalem Karstgrundwasser aus dem Molassebecken eine Rolle spielt, kann anhand der hydrochemischen Beschaffenheit der Grundwässer abgeleitet werden. Wie BERTLEFF (1986) auf der Basis großräumiger Untersuchungen im Karstwassersystem des Oberjuras feststellte, treten in den thermalen Karstwässern im Verhältnis zum Calcium erhöhte Gehalte an Magnesium auf (Prozess der inkongruenten Dolomitlösung). Charakteristische Vertreter der thermalen Komponente sind die Thermalwasserbrunnen Saulgau 1 und 3 (Abb. 16).

In Abbildung 16 sind die Calcium/Magnesium-Verhältnisse gegen die aus der Altersmodellierung ermittelten Anteile von tritiumfreien Komponenten aufgetragen. Zusätzlich wurden als charakteristischer Vertreter für thermales Karstgrundwasser (ca. 10.000 Jahre alt) die Werte für den TB Saulgau 1 miteingezeichnet (100 % tritiumfrei, molares Ca/Mg-Verhältnis von 2). Das molare Ca/Mg-Verhältnis spiegelt die Veränderungen der Sättigungszustände der beiden Hauptminerale des Oberjuras, Kalzit und Dolomit, wider. Bei kalten Grundwässern des Oberjurakarsts liegt Kalzit meist bereits im Bereich der Sättigung, Dolomit ist in der Regel deutlich untersättigt (PRESTEL 1990). Es resultiert ein relativ hohes Ca/Mg-Verhältnis ( $> 5$ ). Eine weitere Kalzitlösung erfolgt nicht mehr, Dolomit kann jedoch bei Durchströmen eines dolomitischen Aquiferabschnittes weiterhin gelöst werden. Dadurch werden Calciumionen in Lösung gebracht, was zu einer Übersättigung und Ausfällung von Kalzit bei gleichzeitig fortschreitender Lösung von Dolomit führt (inkongruentes Lösungsverhalten). Bei sehr langen Grundwasserverweilzeiten und Präsenz beider Minerale stellt sich ein Gleichgewicht für Ca/Mg von  $\sim 1,2$  bis  $1,3$  bei  $50-60\text{ °C}$  ein. Diese Tendenz gibt auch Abbildung 16 wieder. Bereits mit geringfügig zunehmender Temperatur nimmt das Ca/Mg-Verhältnis stark ab. Abweichungen können durch die Lithologie des Aquifers (wenig Dolomit) oder durch den Einfluss von Ionenaustauschprozessen bzw. Zumischung von Austauschwässern der Molasse verursacht werden.

Für die Grundwässer der Tiefbrunnen Ringingen, Zwiefaltendorf und Munderkingen-1 liegen die Ca/Mg-Verhältnisse zwischen 7 und 11. Dies wird als Hinweis gewertet, dass die alte Grundwasserkomponente ausschließlich aus kaltem Karstgrundwasser aus dem Norden besteht.

### **Gruppe 3:**

*Quellaufbrüche und Tiefbrunnen im Übergangsbereich von Offener zu Überdeckter Zone des Tiefen Karsts nahe der Donau*

*TB Rottenacker 1 und 2, TB Kehr, TB Gamerschwang, TB Österberg, Bohrung Warme Quelle, Venturenquelle*

Die Grundwässer dieser Gruppe werden ebenfalls durch ein Zweikomponentensystem mit tritiumführender und tritiumfreier Komponente charakterisiert, jedoch ist der Anteil der alten, tritiumfreien Komponente deutlich erhöht (40-70 %). Die Verweilzeit der

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

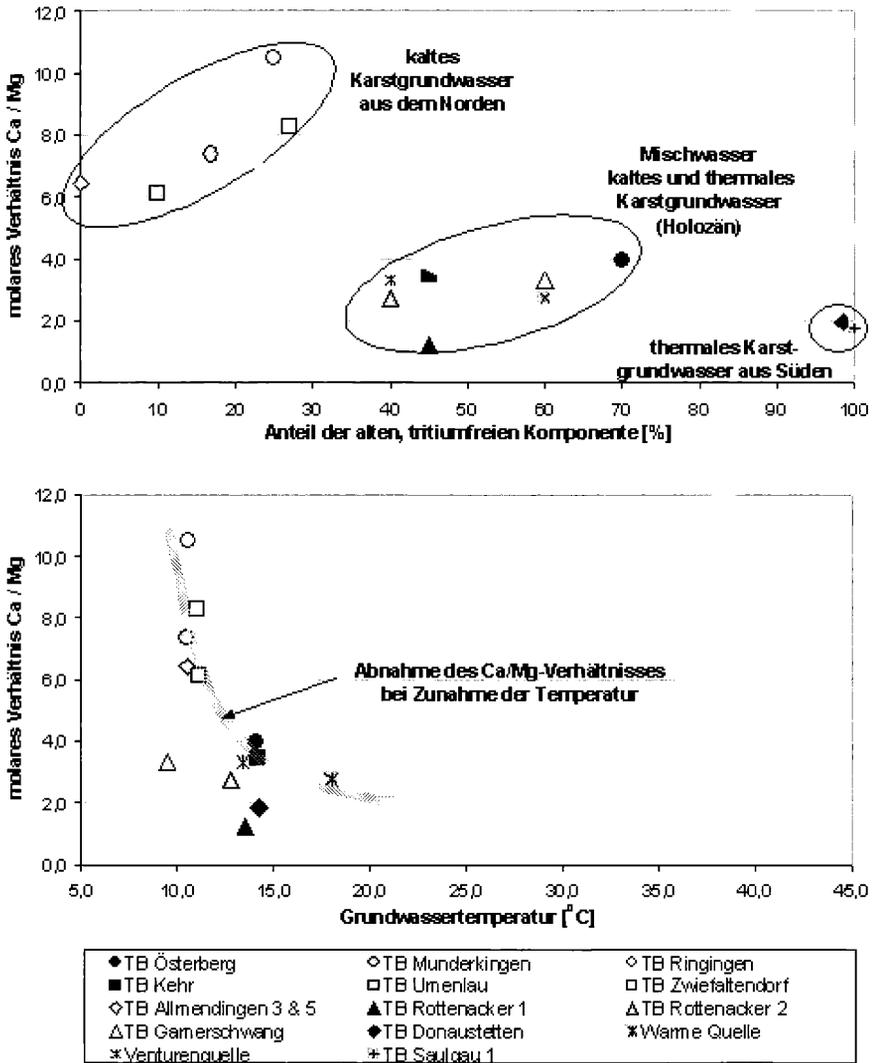


Abb. 16: Gegenüberstellung des Ca/Mg-Ionenverhältnisses und der Wassertemperatur mit dem Anteil an tritiumfreiem Karstgrundwasser.

Jungwasserkomponente ist für die meisten Standorte mit 25-35 Jahren auch relativ hoch. Durch die Nähe zum regionalen Vorfluter Donau sind an diesen Standorten bevorzugt aufsteigende Grundwasserströme zu erwarten, wodurch hier tief zirkulierende, alte Grundwasserkomponenten dominieren. Eine Ausnahme stellt der TB Österberg dar. Die tritiumführende Komponente weist hier eine MVZ von 5-15 Jahren auf. Der Tiefbrunnen erfasst damit relativ flach zirkulierendes Grundwassers, welches noch an die rezenten Neubildungsbedin-

gungen angeschlossen ist. Der hohe Anteil an tritiumfreien Grundwasser zeigt jedoch auch an diesem Standort eine Dominanz der tiefen bzw. aufsteigenden Grundwasserkomponenten.

Wie die  $^{14}\text{C}$ -Gehalte der TB Kehr und Österberg zeigen, sind für die alten Grundwasserkomponenten Verweilzeiten von rund 5.000 Jahren anzunehmen (LGRB/HYDROISOTOP 2004). Dies wird auch durch die, im Vergleich zur Gruppe 2 auffallend kleinen molaren Ca/Mg-Verhältnisse zwischen 1,6 und 4,0 angezeigt. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass je ähnlicher die Grundwässer denen der TB Saulgau 1 sind, desto größer ist der Einfluss der thermalen Karstwasserkomponente aus dem Süden. Insbesondere für die tritiumfreie Komponente des TB Rottenacker 1 muss mit einem hohen Anteil der aus dem Beckeninneren zuströmenden Komponente gerechnet werden. Diese Annahme wird durch  $^{14}\text{C}$ -Bestimmungen aus den 80er Jahren (28-30 pmc) bestätigt, als für den TB Rottenacker 1 Verweilzeiten von 10.000 – 15.000 Jahren bestimmt wurden (BERTLEFF 1986).

Auch für die anderen Standorte der Gruppe 3, insbesondere für den TB Österberg und den TB Kehr, muss aufgrund des kleinen Ca/Mg-Verhältnisses davon ausgegangen werden, dass hier bereits ein mit dem thermalen System südlich der Donau vergleichbarer, als gering einzustufender Grundwasserabfluss erfolgt. Da die Donau im Bereich der Molasse nicht mehr Vorflut sein dürfte, kann auch eine Unterströmung der Donau und Zumischung von Grundwasser aus dem Süden vorliegen. Die durch die  $^{14}\text{C}$ -Methode ermittelten Grundwasser-Modellalter sind vermutlich als Mischalter zwischen kalter (bzw. nördlicher) und thermaler (bzw. südlicher) Karstwasserkomponente (holozänes Alter) zu sehen. Auch die Grundwassertemperaturen an den Standorten der Gruppe 3 sind im Vergleich zu denen der Gruppe 2 erhöht, was wiederum für Anteile einer thermalen Karstgrundwasserkomponente spricht (vgl. Abb. 16 rechts). Auffällig sind insbesondere die relativ hohen Temperaturen der Bohrung Warme Quelle (ca. 18 °C).

#### **Gruppe 4:**

##### *Überdeckte Zone des Tiefen Karsts, thermale Grundwasserkomponente TB Donaustetten*

Dieser Tiefbrunnen erfasst ausschließlich altes, sehr langsam zirkulierendes Oberjura-Grundwasser. Eine tritiumführende Jungwasserkomponente konnte nicht nachgewiesen werden. Das Verhältnis von Calcium und Magnesium entspricht dem des Grundwassers im TB Saulgau 1. Wie die hohen Natriumkonzentrationen (55 mg/l) jedoch anzeigen, wird das Grundwasser durch Ionenaustauschwässer (Natriumhydrogenkarbonatwässer) aus der Molasse beeinflusst. Der TB Donaustetten stellt daher ein typisches Austrittsgebiet von langsam zirkulierenden Grundwasserkomponenten aus dem Oberjura-Grundwasserleiter des Beckeninneren dar. Eine sehr hohe Verweilzeit des Grundwassers wurde schon anhand der Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte in den 80er Jahren angenommen. BERTLEFF (1986) berechnete Alter > 25.000 Jahre.

## **6. Prognoserechnungen zum zukünftigen PSM-Austrag**

Die Prognoserechnungen für den weiteren PSM-Austrag an den 6 Hauptstandorten werden auf der Basis der ermittelten Grundwasseraltersstruktur durchgeführt. Hierfür gilt es, den

nicht im Detail bekannten Eintrag der PSM ins Grundwasser mittels einer geeigneten Eintragsfunktion zu beschreiben.

### 6.1 Kalibration der PSM-Eintragskurve

Es wird davon ausgegangen, dass sich als Folge wechselnder Flächennutzung und der Vermischung des auf verschiedenen Flächen neu gebildeten Grundwassers im Aquifer von mittleren, für das gesamte Brunneneinzugsgebiet geltenden Eintragswerten ausgegangen werden kann.

Die PSM-Gehalte der untersuchten Brunnen betragen nach den aktuellen Analysen zwischen 0,05 und 0,20  $\mu\text{g/l}$ . Diese Werte können als Mindestwerte für den flächenhaften Eintrag angesehen werden. Wenn zusätzlich ein „Verdünnungsfaktor“ für die Beteiligung von altem Grundwasser (tritiumfrei, daher auch ohne PSM) angenommen wird, kann der flächenhafte Mindesteintrag abgeschätzt werden.

Da Desethylatrazin durch Abbau aus Atrazin entsteht, wird für die Prognoseberechnungen die Summe beider Stoffe berücksichtigt. Vereinfachend wird weiterhin angenommen, dass ein wesentlicher Abbau von Desethylatrazin nicht erfolgt und nach 1991 kein Atrazin mehr eingesetzt wurde.

Der Anteil an Grundwasser aus dem Zeitraum 1960-1991 ergibt sich aus der Integration der Funktion der Altersverteilung, die auf der Grundlage von Datierungstracern bestimmt wurde (vgl. Abb. 11 und 14).

Die PSM-Ganglinien der Förderbrunnen lassen sich durch vier Merkmale beschreiben (vgl. Abb. 3):

- Dauer und Verlauf der Phase des Anstiegs der PSM-Gehalte im Grundwasser
- maximal erreichter PSM-Gehalt im Grundwasser
- Zeitpunkt des maximalen PSM-Gehaltes im Grundwasser
- Ausmaß der Konzentrationsabnahme nach dem Atrazinverbot 1991

Für alle untersuchten Tiefbrunnen liegen Kontrollmessungen der PSM-Gehalte in der Regel erst ab Ende der 80-er Jahre vor, als die Untersuchung von PSM im Rahmen der SchALVO vorgeschrieben wurde. Für alle untersuchten Brunnen zeichnen sich in dieser ersten Beobachtungsphase innerhalb weniger Jahre stark ansteigende Konzentrationen ab. Ebenfalls zeichnet sich ab, dass die maximalen Konzentrationen erst einige Jahre nach Anordnung des Atrazinverbots erreicht werden. Danach gehen die PSM-Gehalte in den Förderwässern unterschiedlich schnell zurück.

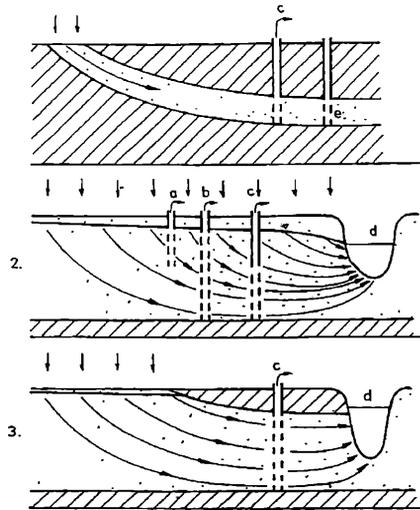
Von keinem der Einzugsgebiete liegen Informationen darüber vor, in welchem Zeitraum und welchem Umfang Atrazin verwendet wurde. Die für die Modellierung der zukünftigen PSM-Gehalte notwendige Eintragsfunktion ist daher nicht bekannt. Durch Betrachtung verschiedener potentieller Eintragsvarianten wird nachfolgend untersucht, welchen Einfluss die Eintragsfunktion für die Prognoseberechnung hat. Hierbei werden folgende stark vereinfachten Fälle betrachtet:

Variante 1: gleichmäßiger Eintrag im Zeitraum 1960-1991 (Blocksignal)

Variante 2: allmählich steigender Eintrag ab 1960 bis 1991 (ansteigende Funktion)

Für die Altersstruktur der Grundwässer wird weiterhin vereinfachend angenommen, dass diese für junge Grundwasserkomponenten im wesentlichen durch das Exponentialmodell beschrieben werden kann (d.h. flächenhafte Grundwasserneubildung im gesamten Ein-

zugsgebiet, Brunnen erfasst den gesamten Grundwasserabstrom am Standort; vgl. Abb. 17). Ebenfalls geprüft wurde der Modellansatz, dass im Grundwasser Anteile an tritium-freiem Grundwasser enthalten sind. Diese Modellvariante führt aber lediglich zu einer Dämpfung bei den PSM-Ganglinien.



**Abb. 17:** Schematische Schnitte durch Brunneneinzugsgebiete (aus MALOSZEWSKI & ZUBER 1996; a, b und c = Pumpbrunnen; d = Fließgewässer).

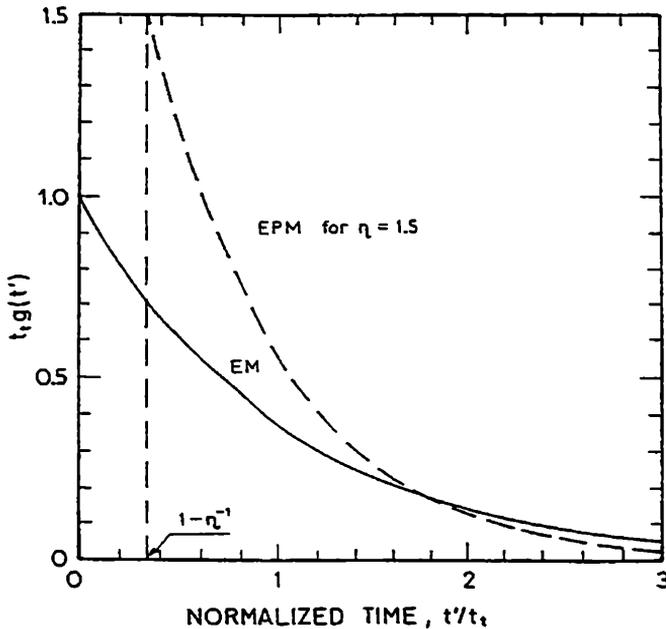
1: Piston-Flow-Modell; die Neubildung im Einzugsgebiet erfolgt annähernd punktuell auf relativ kleiner Teilfläche und strömt von hier zum Förderbrunnen, ohne Zumischung weiterer Grundwasserkomponenten.

2: Exponentialmodell; im gesamten Einzugsgebiet wird Grundwasser neu gebildet und strömt zum Förderbrunnen; der Brunnen erhält auch Zuflussanteile aus dem unmittelbar benachbarten Brunnenumfeld; das EM gilt streng genommen nur für vollkommene Brunnen.

3: In Serie geschaltetes Exponential-/Piston-Flow-Modell; die Grundwasserneubildung erfolgt auf relativ großer Einzugsgebietsfläche, der Grundwasserstrom taucht jedoch in Brunnennähe unter einer Überdeckung ab. Unter der Überdeckung erfolgt keine weitere Zumischung von lokal neu gebildetem Grundwasser mehr. Das im Aquifer unter der Überdeckung abströmende Grundwasser unterliegt nur noch einer Alterung; die sich bis hier nach dem Exponentialmodell ergebende Altersverteilung wird im weiteren modelltechnisch nach dem Piston-Flow-Modell behandelt.

Ergänzend wurde der Fall geprüft, dass im Nahbereich der Brunnen wegen Überdeckung oder brunnentechnischer Absperrung keine Zuflüsse von Jungwasserkomponenten möglich sind (vgl. Abb. 17 und 18). Dieser Modellfall wird durch ein Exponentialmodell mit in Serie geschaltetem Piston-Flow-Modell beschrieben (EPM). Dieser Modellansatz geht davon aus, dass das in Brunnennähe neu gebildete Grundwasser nicht zum Förderbrunnen abströmt; solche Fälle sind z.B. gegeben bei artesischen Quellen oder bei Grundwasserüberdeckung mit Geringleitern. Durch Variation des PM-Anteils am EPM wird bei gleich-

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

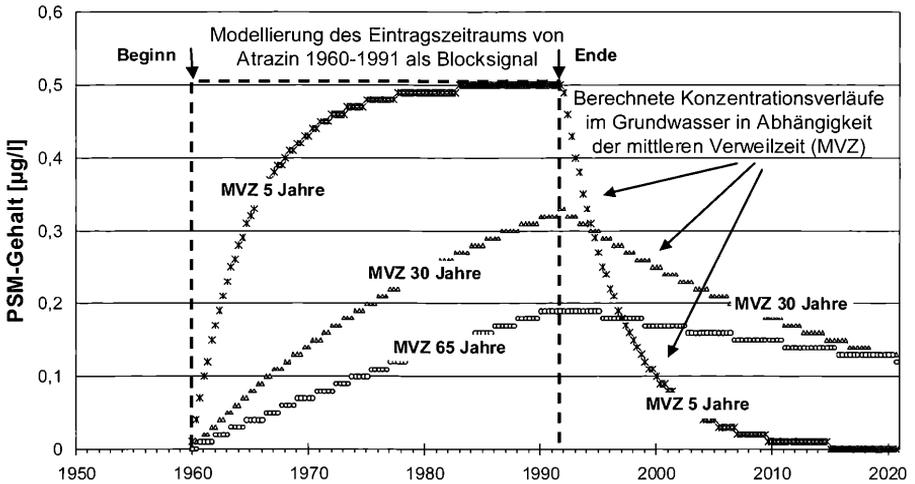


**Abb. 18:** Schematischer Vergleich der Altersstruktur der Modellvarianten Exponentialmodell (EM) und Exponentialmodell mit in Serie geschaltetem Piston-Flow-Modell (EPM); in der Abbildung ist der Fall für ein Verhältnis von  $n = 1,5$  dargestellt, d.h. der Anteil des EM am Gesamtmodell der Altersstruktur beträgt 67 %. Durch das EPM wird modelltechnisch der Anteil an Jungwasser bei der Komponentenzusammensetzung reduziert, zu Gunsten von älteren Grundwasserkomponenten (aus: MALOSZEWSKI & ZUBER 1996;  $t'$  = Zeit, variabel;  $g(t')$  = Ergebnisfunktion, welche die Zeitverteilung eines Tracers mit Tracereingabe zum Zeitpunkt  $t' = 0$  zu Versuchsende beschreibt, Zeitangabe in 1/Jahre;  $t_1$  = Mittlere Verweilzeit;  $\eta$  = Verhältnis des Gesamtaquifervolumens zu dem Volumenanteil mit exponentieller Verteilung der Fließzeiten).

bleibender Mittlerer Verweilzeit der Flächenanteil simuliert, der nicht zur Neubildung des Förderwassers beiträgt. Hohe PM-Anteile bedeuten hierbei große brunnennahe Flächen ohne Neubildung. Geringe PM-Anteile (<20-30 % PM am EPM) weisen bei großen Brunneneinzugsgebieten darauf hin, dass nur im näheren Umfeld der Tiefbrunnen keine Jungwasserzuflüsse erfolgen. Der Modellfall mit geringen PM-Anteilen an einem EPM lässt sich jedoch bei der hier gegebenen Datengrundlage nicht eindeutig von einem EM unterscheiden.

## 6.2 Variantenuntersuchung zur PSM-Eintragsfunktion

Für die Variantenuntersuchungen wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass nach 1991 Atrazin nicht mehr wesentlich zum Einsatz kam und dass es aus Boden und ungesättigter Zone innerhalb weniger Jahre ins Grundwasser verlagert wurde.



**Abb. 19:** Modellkurven für konstanten Atrazin-Eintrag von 1960 bis 1991 nach dem Exponentialmodell und berechnete Konzentrationsverläufe im Grundwasser in Abhängigkeit der mittleren Verweilzeit (MVZ = mittlere Verweilzeit).

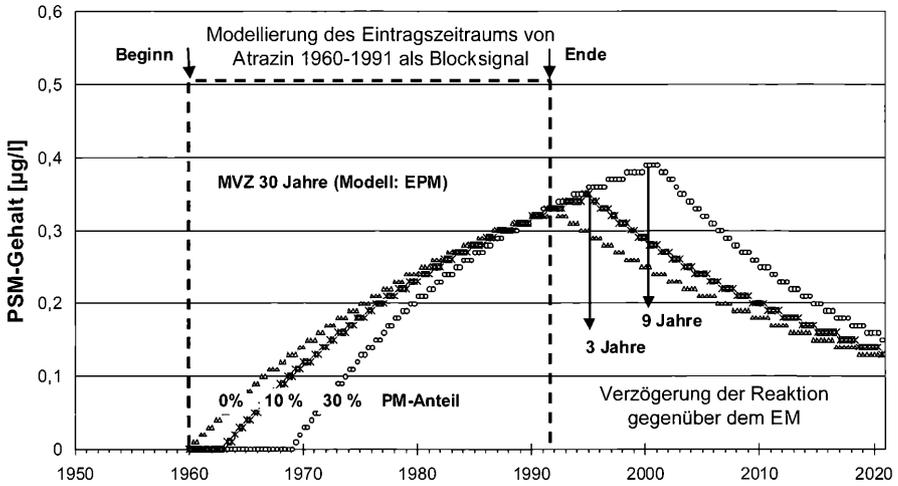
### **Variante 1: konstanter Eintrag gleicher Höhe (vgl. Abb. 19 und 20)**

Wenn als Randbedingungen des Modells ein Blocksignal für den PSM-Eintrag und eine exponentielle Altersverteilung des Grundwassers angenommen werden, ergibt sich für den PSM-Gehalt im Grundwasser ein langsamer exponentieller Konzentrationsanstieg ab 1960, der sich allmählich der Maximal-Konzentration der Eintragsfunktion annähert. Die Näherung erfolgt um so schneller, je jünger das Grundwasser ist. Ab dem Zeitpunkt, ab dem kein Atrazin mehr ins neu gebildete Grundwasser gelangt, nehmen die PSM-Gehalte im Grundwasser auch wieder ab, da beim EM auch immer Anteile an jungem, PSM-freiem Grundwasser enthalten sind, die relativ schnell einen Verdünnungseffekt im Grundwasser bewirken. Der Konzentrationsrückgang ist auch hier wieder direkt vom Grundwasseralter abhängig und verläuft umso schneller, je jünger das Grundwasser ist.

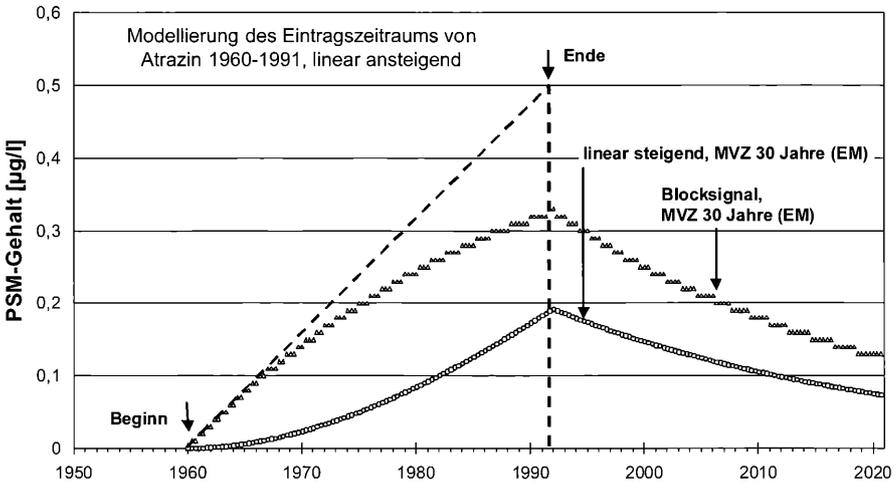
Wenn anstatt des EM ein EPM angenommen wird, führt der Eintrags-Stop nicht sofort zu abnehmenden PSM-Gehalten im Grundwasser (vgl. Abb. 20). In Abhängigkeit des PM-Anteils braucht die Jungwasserkomponente einen längeren Zeitraum bis zum Erreichen des Brunnens. In diesem Zeitraum steigen die Konzentrationen weiter an und nehmen anschließend im Vergleich zum EM zunächst schneller ab.

Beim EPM-Modell wird davon ausgegangen, dass im näheren Brunnenumfeld neu gebildetes Grundwasser nicht zum Brunnen gelangt. Auch die jüngsten dem Brunnen zuströmenden Grundwasseranteile müssen demnach einen längeren Fließweg zurücklegen und unterliegen damit einer merklichen Alterung. Für längere Betrachtungszeiträume gleichen sich die Modellkurven für EM und EPM jedoch weitgehend an (bei vergleichsweise geringen PM-Anteilen am EPM).

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag



**Abb. 20:** Modellkurven für konstanten Atrazin-Eintrag von 1960 bis 1991 nach dem in Serie gekoppelten Exponential-/Piston-Flow-Modell und berechnete Konzentrationsverläufe im Grundwasser in Abhängigkeit der mittleren Verweilzeit (EM = Exponentialmodell; PM = Piston-Flow-Modell, EPM = Exponentialmodell mit in Serie geschaltetem Piston-Flow-Modell; MVZ = mittlere Verweilzeit).



**Abb. 21:** Modellkurven für ansteigenden Atrazin-Eintrag im Zeitraum 1960 bis 1991 nach dem Exponentialmodell und berechnete Konzentrationsverläufe im Grundwasser in Abhängigkeit der mittleren Verweilzeit (EM = Exponentialmodell; MVZ = mittlere Verweilzeit).

### **Variante 2: allmählich steigender Eintrag (vgl. Abb. 21)**

Wenn ein kontinuierlich steigender PSM-Input ab 1960 und eine Grundwasseraltersstruktur nach dem EM angenommen werden, führt dies im wesentlichen zu einer Dämpfung bei den PSM-Gehalten im Grundwasser. Die Gangliniencharakteristik ist vergleichbar der Variante 1 und ist geprägt durch langsamen Konzentrationsanstieg bis 1991 und anschließend exponentieller Abnahme. Eine zusätzliche PM-Komponente würde auch hier eine Verschiebung der maximalen PSM-Konzentration über den Eintrags-Stop hinaus bewirken.

### **Diskussion und Bewertung der Eintragsvarianten und Vergleich mit den Messwerten**

Die Betrachtung der Modellvarianten zeigt, dass bei Annahme einer exponentiellen Altersstruktur prinzipiell Konzentrationsanstiege der PSM ab 1960 und fallende Konzentrationen nach Ausbringungsverbot beschrieben werden können. Der Verlauf der Eintragsfunktion spielt daher nur eine untergeordnete Rolle und kann stark vereinfacht als Blocksignal angenommen werden. Die über das Jahr 1991 hinaus ansteigenden PSM-Gehalte weisen für einige Brunnen darauf hin, dass diese keine bzw. nur stark untergeordnete Anteile an Jungwasserkomponenten enthalten und das Exponentialmodell somit nur näherungsweise zur Beschreibung der Grundwasseraltersstruktur geeignet ist.

Die geringe Verzögerungszeit von wenigen Jahren weist jedoch darauf hin, dass der PM-Anteil am EPM bezüglich Alterstruktur und MVZ nur von untergeordneter Bedeutung ist, für die qualitative Beschreibung der Austragsfunktion jedoch berücksichtigt werden muss. Eine diesbezügliche Ausnahme stellt der Tiefbrunnen Umenlau dar, wo das Konzentrationsmaximum erst Ende der 90-er Jahre erreicht wurde (s. u.).

Bei einigen Tiefbrunnen (insbesondere Kehr und Ringingen) ist ein sehr steiler Anstieg der PSM-Gehalte zu Beginn der Untersuchungen (ab 1988/89) zu erkennen. Eine Modellierung dieser steilen Anstiege zeigt, dass hierfür ab etwa 1980 stark zunehmende Einträge bei gleichzeitig relativ geringen MVZ (max. 10 Jahre) angenommen werden müssten. Diese Annahmen sind nicht konform mit den gemachten Beobachtungen und Messungen.

Die Ursachen für diesen schnellen Konzentrationsanstieg können nicht abschließend geklärt werden. Die schnellen Konzentrationsanstiege werden daher bei der weiteren Modellierung nicht berücksichtigt. Als Eintragsfunktion wird näherungsweise für alle Brunnen einheitlich ein Blocksignal angenommen.

## **7. Prognoseergebnisse**

Auf der Grundlage der für die Tiefengrundwässer berechneten Altersstruktur, des abgeschätzten flächenhaften PSM-Eintrags sowie der Annahme einer Blockfunktion (Eintragszeitraum 1960–1991) für den PSM-Eintrag werden im folgenden Kapitel modellhafte Austragsfunktionen für die sechs zu untersuchenden Tiefbrunnen berechnet und den tatsächlichen Messwerten gegenüber gestellt. Kurzfristige Variationen der PSM-Gehalte, die in allen Ganglinien zu erkennen sind, werden nicht berücksichtigt. Sie können unterschiedlicher Ursache sein und lassen sich nicht näher abschätzen (meteorologische Verhältnisse, Flächennutzung, etc.).

Da im Grundwasser der Tiefbrunnen die Konzentrationen für Atrazin und Desethylatrazin meist unterhalb des Grenzwertes von  $0,1 \mu\text{g/l}$  liegen, wird im Folgenden die Prognose

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

für eine dauerhafte Unterschreitung eines PSM-Gehaltes (Summe Atrazin und Desethylatrazin) von 0,04 µg/l angenommen (entsprechend der doppelten derzeitigen Nachweisgrenze der Einzelkomponenten). Die Berechnungen wurden auf der Grundlage der mit Datierungstracern bestimmten Grundwasseraltersstruktur durchgeführt. Ergänzend wurden Berechnungen unter Berücksichtigung eines PM-Anteils durchgeführt. Der Prognose der zukünftigen PSM-Gehalte werden daher zwei verschiedene Modellvarianten zugrunde gelegt, die beide mit den Datierungstracern konsistent und hydrogeologisch plausibel sind. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 22 und 23 dargestellt.

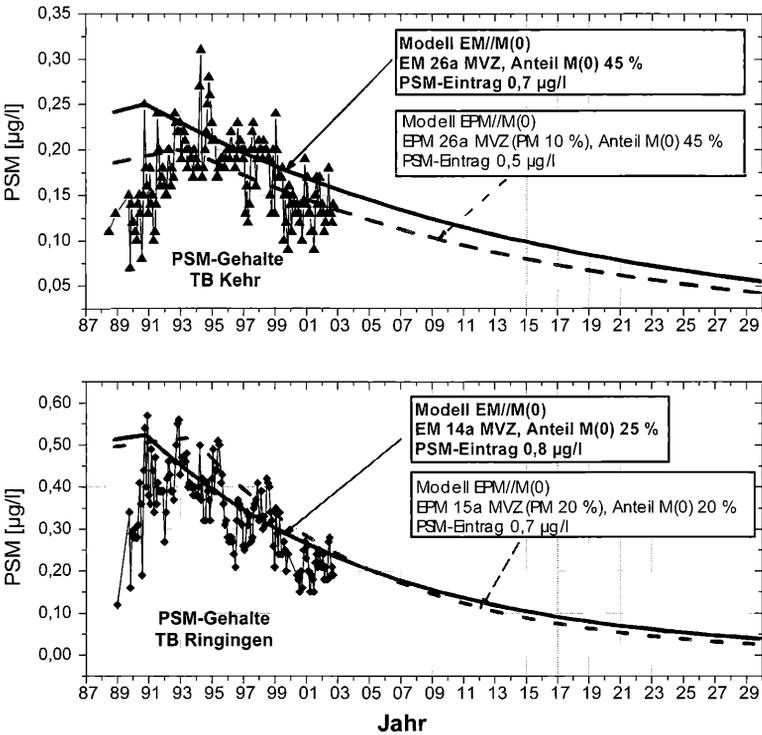


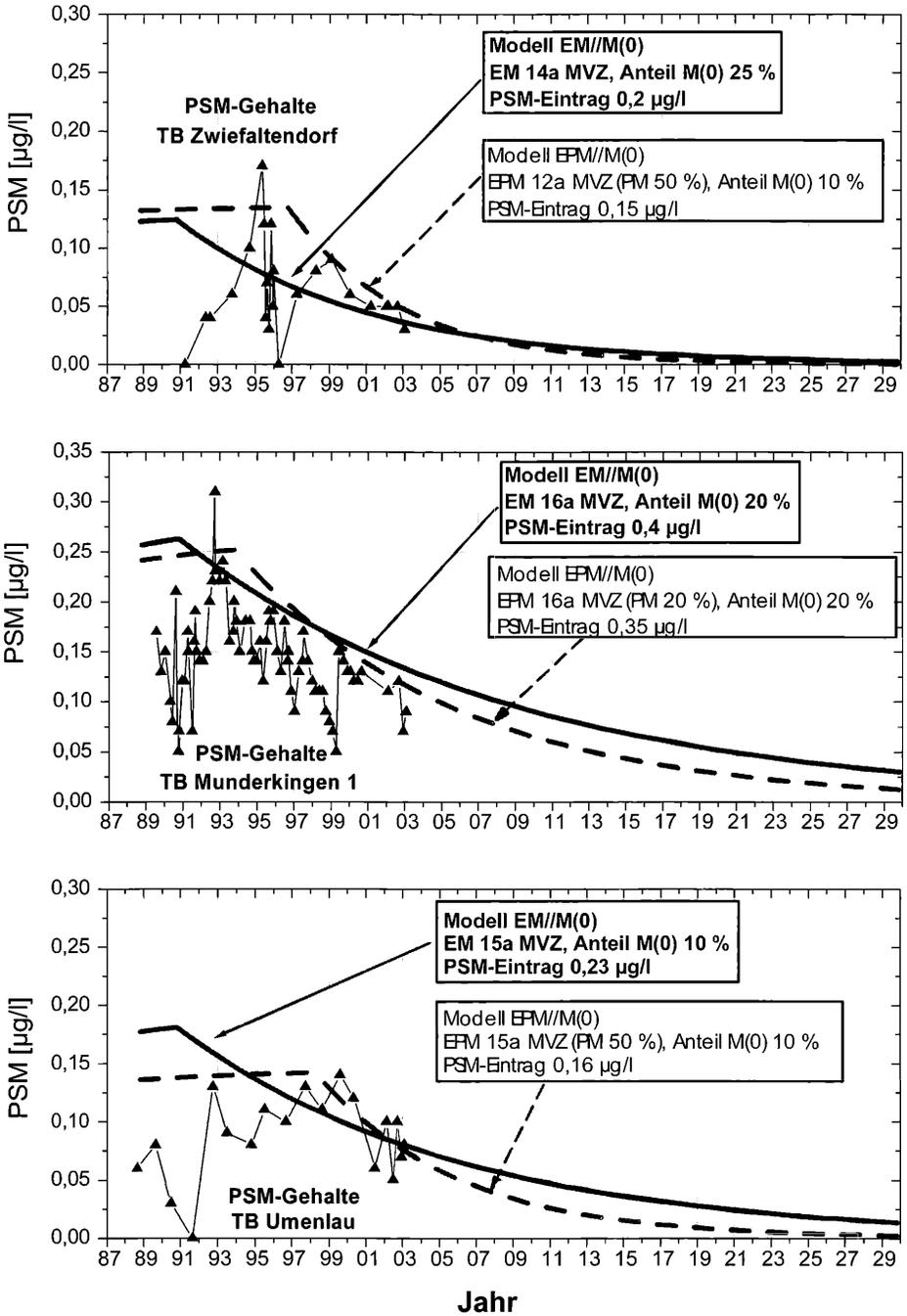
Abb. 22: Ergebnisse der Prognoseberechnungen zum weiteren PSM-Austrag im Grundwasser für die TB Kehr und Ringingen (Berechnung jeweils für zwei unterschiedliche Prognosemodelle)

Da am Grundwasser des TB Österberg bisher keine PSM-Gehalte nachgewiesen wurden und die ermittelte Altersstruktur einen Austrag zukünftig nicht erwarten lässt, entfällt für diesen Standort die Prognoseberechnung.

**TB Zwiefaltendorf**

Vom TB Zwiefaltendorf liegen jährlich 1-2 PSM-Analysen vor. Die Messungen zeigen bis 1995 auf ca. 0,15 µg/l ansteigende Werte, danach eine allmählich Abnahme bis 0,05 µg/l, bei insgesamt großen Schwankungen der Messwerte.

Die auf Basis der ermittelten Altersstruktur (EM 14 a; ca. 25 % tritiumfrei) berechnete PSM-Austragskurve zeichnet den Trend der abnehmenden Gehalte am Standort Zwiefalten-



**Abb. 23:** Ergebnisse der Prognoseberechnungen zum weiteren PSM-Austrag im Grundwasser für die TB Zwiefaltendorf, Munderkingen-1 und Umenlau (Berechnung jeweils für zwei unterschiedliche Prognosemodelle).

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

dorf gut nach; die Anstiegsphase bis 1995 lässt sich allerdings nicht reproduzieren. Ein alternatives Modell (EPM, PM = 50 %; M(0) = 10%), das auch konsistent mit den Ergebnissen der SF<sub>6</sub>- und <sup>85</sup>Kr-Messungen ist, kann den PSM-Anstieg bis 1995 besser nachvollziehen. Hinsichtlich der mittel- bis langfristigen Prognose liefern beide Modelle vergleichbare Ergebnisse. Im Brunnen Zwiefaltendorf ist etwa ab 2005 mit einer dauerhaften Unterschreitung eines PSM-Gehaltes im Förderwasser von 0,04 µg/l zu rechnen.

### **TB Munderkingen 1**

Für den TB Munderkingen 1 liegen mehrere jährliche PSM-Analysen pro Jahr vor, die bis 1993 auf ca. 0,25 µg/l steigende und danach langsam abnehmende Werte zeigen. Die berechnete PSM-Austragskurve spiegelt den abnehmenden Trend der PSM-Gehalte sehr gut wider. Der um ca. 2 Jahre verzögerte Kulminationspunkt der PSM-Ganglinie lässt sich durch einen geringen PM-Anteil von 20 % beschreiben, der noch im Fehlerbereich bei der Bestimmung der Grundwasseraltersstruktur liegt. Die Modellberechnungen zeigen, dass nicht vor 2015 mit einer dauerhaften Unterschreitung von PSM-Gehalten von 0,04 µg/l zu rechnen ist.

### **TB Umenlau**

Für den TB Umenlau liegen jährliche PSM-Gehaltsmessungen vor, die bis zum Jahr 2000 auf ca. 0,15 µg/l ansteigende Werte zeigen. Erst ab 2001 sinken die Messwerte, wobei sich noch kein Trend abzeichnet. Die Modellrechnungen der PSM-Gehalte auf der Grundlage der Grundwasseraltersstruktur liefert nur eine mäßige Anpassung an die Messwerte. Mögliche Ursachen hierfür können die geringe Datendichte bei den PSM-Werten sein. Nach bisherigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass ein PSM-Gehalt im Grundwasser von 0,04 µg/l frühestens ab 2007, spätestens ab 2013 dauerhaft unterschritten wird.

### **TB Kehr**

Die nahezu monatlich gemessenen PSM-Gehalte zeigen einen relativ steilen Konzentrationsanstieg auf 0,2-0,3 µg/l im Jahr 1995 und seither einen sehr langsamen Konzentrationsrückgang. Der langjährige Trend der PSM-Gehalte wird durch die Prognoseberechnung mit dem Exponentialmodell sehr gut wiedergegeben. Mit der konstanten Eintragskonzentration von ca. 0,7 µg/l liegen die mittleren PSM-Gehalte des TB Kehr im Bereich der berechneten Austragskurve.

Die Verschiebung des Kulminationspunkts um ca. 4 Jahre lässt sich durch Berücksichtigung eines EPM mit einem PM-Anteil von ca. 10 % besser modellieren. Wie Abbildung 22 zeigt, ist mit beiden Modellen eine gut abgesicherte Prognose der zukünftigen PSM-Gehalte möglich. Eine Unterschreitung eines PSM-Summenwertes von 0,04 µg/l zeichnet sich nach den Modellberechnungen erst ab ca. 2030 ab.

### **TB Ringingen**

Die monatlich vorliegenden PSM-Gehalte zeigen einen relativ steilen Konzentrationsanstieg auf ca. 0,5 µg/l im Jahr 1993 und seither einen relativ schnellen Konzentrationsrückgang (vgl. Abb. 22). Auf Basis einer PSM-Eintragsfunktion von 0,8 µg/l und der ermittelten Altersstruktur können sowohl die aktuellen Messwerte als auch der PSM-Verlauf relativ gut modelliert werden.

Um den Kulminationspunkt an den gemessenen PSM-Verlauf anzupassen, wurde zusätzlich ein EPM mit einem PM-Anteil von 15-20 % berechnet. Der Anteil an Grundwasser aus dem Zeitraum 1960-1991 bzw. die berechnete PSM-Eintragsfunktion verändern sich dadurch nur geringfügig. Wie Abbildung 22 zeigt, werden mit diesem Modell insbesondere die erhöhten PSM-Gehalte nach 1991 besser beschrieben. Beide Modellkurven liefern eine übereinstimmende mittel- bis langfristige Prognose. Eine dauerhafte Unterschreitung eines PSM-Gehaltes von 0,04 µg/l ist etwa ab 2020 zu erwarten.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Trotz eines Verbotes des Pflanzenschutzmittels Atrazin im Jahr 1991 treten immer noch markante Konzentrationen von Atrazin und seines Abbauproduktes Desethylatrazin in den Tiefbrunnen und Quellen des Karstsystems der Schwäbischen Alb auf. Da der Oberjura-Karst als Zweiporositäts-Medium gilt, weist dies auf die hohe Bedeutung der Speichermatrix (Kluftsystem) für die Massenbilanz beim Grundwasserdurchfluss hin. Ziel dieser Studie war es daher, mittels detaillierter Erfassung der Grundwasseraltersstruktur das anhaltende Auftreten der Schadstoffe zu analysieren und Prognosen für den weiteren Austrag durchzuführen.

Die Erfassung der Altersstruktur des Grundwassers erfolgte i. W. mittels isotopehydrologischer Methoden. Es zeigte sich, dass bei den untersuchten Standorten überwiegend komplexe Mischwassersysteme vorliegen, deren Komponentenzusammensetzung nur durch eine kombinierte Analyse von mehreren Datierungstracern ( $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) bestimmt werden konnte.

Die sogenannte Jungwasserkomponente weist in den Tiefbrunnen des Tiefen Karsts eine Verweilzeit von wenigen Jahrzehnten (ca. 10-35 Jahre) auf. Daneben treten alte (> 50 Jahre) Grundwasserkomponenten auf, deren Verweilzeiten bis mehrere tausend Jahre betragen können. Schnell abfließende Grundwasserkomponenten (Verweilzeit von Tagen bis einigen Wochen) sind dagegen mengenmäßig zu vernachlässigen (< max. 8 %).

Auf Basis der Altersstruktur konnte der zukünftige PSM-Austrag erfolgreich modelliert werden. Die Berechnungen wurden dabei an den gemessenen PSM-Daten verifiziert. Die Prognoseberechnungen zeigen, dass noch mit einem langjährigen Austrag von PSM im Grundwasser des Tiefen Karsts zu rechnen ist, da Grundwasserkomponenten aus dem Ausbringungszeitraum von Atrazin (1960-1991) immer noch mit beträchtlichen Anteilen im Zirkulationssystem vorhanden sind.

Eingang des Manuskripts: 02.07.2004

## Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

Tab. 5 Grundlagen für die Prognoseberechnung und Beurteilung der Entwicklung des PSM-Austrags.

BRUNNEN	Altersstruktur			Konzentration und zeitliche Verteilung der PSM			Aussagen zur Prognoseberechnung	
	MVZ [Jahre]	Anteil PM an Komp. 1 [%]	Anteil Komp. 1 [Jahre]	Anteil des Grund- wassers aus dem Zeitraum 1960- 1991 [%]	aktuelle PSM- Gehalte [µg/l]	PSM-Eintrags- gehalt berechnet für 1960-1991 [µg/l]	berechneter Kulmi- nationsspunkt der PSM-Austrags- kurve	Anpassung der Modellkurve an generellen PSM- Trend (1995-2003)
Kehr	26	0	55	> 50	0,13	0,7	1991	mäßig
Kehr*	26	10	55	> 50	0,13	0,48	1993	gut
Munderkingen- 1	16	0	80	> 50	0,12	0,4	1991	mäßig
Munderkingen- 1	16	20	80	> 50	0,12	0,35	1993	gut
Ringingen	14	0	75	> 50	0,20	0,8	1991	gut
Ringingen	15	20	80	> 50	0,20	0,7	1993	gut
Umenlau	15	0	90	> 50	0,08	0,28	1991	schlecht
Umenlau*	15	50	90	> 50	0,08	0,16	1998	gut
Zwiefaltendorf	14	0	75	> 50	0,05	0,2	1991	mäßig
Zwiefaltendorf*	12	50	90	> 50	0,05	0,15	1996	gut

\* Altersmodell angepasst an die gemessenen PSM-Gehalte (zusätzlicher Anteil einer PM-Komponente)

## Angeführte Schriften

- ARMBRUSTER, V. (2001): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg.- Diss. Univ. Freiburg, 135 S.
- BAUER, M., SELG, M. & EICHINGER, L. (2002): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasser des Oberjura Bereich Lkr. Reutlingen.- Abh. Landesamt f. Geol., Rohst. u. Bergbau B.-W., 15: 149-221, 39 Abb., 10 Tab., Freiburg i. Br.
- BERTLEFF, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. - Abh. geol. Landesamt B.-W., 12: 1-271, 64 Abb., 15 Tab., 8 Anl.; Freiburg i. Br.
- BUSENBERG E. & PLUMMER L.N. (2000): Dating young groundwater with sulfur hexafluorid: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. Water Resources Research, Vol 36, No. 10: 3011-3030
- CLARK I.D. & FRITZ P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, New York, 1-328
- DVWK (1995) Speicher-Durchfluss-Modelle zur Bewertung des Stoffein- und Stoffaus-trags in unterschiedlichen Grundwasser-Zirkulationssystemen. - DVWK Fachausschuss "Grundwassererkundung", 118 S., 47 Beil., 11 Tab.; Bonn.
- GEYH, M. A. & GROSCHOPF, P. (1978): Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb.- Abh. geol. Landesamt B.-W., 8: 7-58, 9 Abb., 5 Tab.; Freiburg i. Br.
- GISSL, H. (1988): Über das Vorkommen ausgesuchter Pflanzenschutzmittel im Wasser unter besonderer Berücksichtigung des Grundwassers. Diss. Univ. Hohenheim; 139 S., 11 Abb., 50 Tab.
- GISSL, H. & HURLE, K. (1984): Pflanzenschutzmittel und Grundwasser: Untersuchungen zum Vorkommen des Herbizids Atrazin im Grundwasser der Schwäbischen Alb. - Agrar- und Umweltforsch. Bad. - Württ., 8, 80 S.; Stuttgart (Ulmer).
- HURLE, K. (1982): Untersuchungen zum Abbau von Herbiziden in Böden. - Acta Phytomedica, 8: 5-120, 37 Abb., 31 Tab.; Berlin und Hamburg.
- HURLE, K., GIEßL, H. & Kirchhoff, J. (1987): Über das Vorkommen einiger ausgewählter Pflanzenschutzmittel im Grundwasser. In: Grundwasserbeeinflussung durch Pflanzenschutzmittel (Hrsg.: G. MILDE & P. FRIESEL), Schr.-R. Verein Wabolu, 68: 169-190; Stuttgart.
- LGRB/HYDROISOTOP (2000): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasser des Oberjura - Bereich Lkr. Reutlingen.- Unveröff. Bericht, 46 S., 40 Anl., Anhang; Freiburg/Schweitenkirchen.

Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag

---

- LGRB/HYDROISOTOP (2004): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjura – Alb-Donau-Kreis und Lkr. Biberach - Unveröff. Bericht, 66 S., 42 Anl., Anhang; Freiburg/Schweitenkirchen.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1996): Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data.- IAEA-TECDOC-910, 51 S., zahlreiche Abb., Anhang; Wien.
- MOSER, H. & RAUERT, W. (1980) Isotopenmethoden in der Hydrologie. - 400 S., 227 Abb., 32 Tab.; Berlin, Stuttgart (Gebr. Borntraeger).
- OSTER, H. (1994): Datierung von Grundwasser mittels FCKW: Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen. Dissertation Universität Heidelberg
- OSTER, H., SONNTAG, C. & MÜNNICH, K. O. (1996): Groundwater age dating with chlorafluorocarbons.- Water Resources Research, 32/10: 2989-3001, 16 Abb., 3 Tab.
- PRESTEL, R. (1990): Untersuchungen zur Genese von Malm-Karbonatgesteinen und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken.- Diss. Univ. Stuttgart, 217 S., 80 Abb., 32 Tab.
- RICHTER, J. & SZYMCZAK, P. (1992): MULTIS, ein Computerprogramm zur Auswertung isotopehydrologischer Daten auf der Grundlage gekoppelter konzeptioneller Boxmodelle. - Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie.
- SAUTER, M. (1992): Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW.Germany). Tüb. geowiss. Arb., C 13: 150 S., 82 Abb., 19 Tab.; Tübingen.
- STRAYLE, G. (1970): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Ebinger Alb (Schwäbischer Jura). - Jh. geol. Landesamt B. -W., 12: 109-206, 29 Abb.; Freiburg i. Br.
- TEUTSCH, G. (1988): Grundwassermodelle im Karst: Praktische Ansätze am Beispiel zweier Einzugsgebiete im Tiefen und Seichten Malmkarst der Schwäbischen Alb. - Diss. Univ. Tübingen; 205 S., zahlr. Abb. und Tab., Anhang.
- VILLINGER, E. (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW-Deutschland). - Geol. Jb., C 18: 3-93, 9 Abb., 11 Tab., 2 Taf.; Hannover.
- VILLINGER, E. (1987): Pflanzenschutzmittel und Grundwasserschutz in Baden-Württemberg. Ein Beitrag aus hydrogeologischer Sicht.- gwf Wasser Abwasser, 128/12, 629-635, 2 Abb., 1 Tab., München, Oldenbourg.
- WEIDENBACH, F. (1954): Über einige Wasserbohrungen im Jura Ein Beitrag zum Karstwasserproblem der Schwäbischen Alb. - Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., NF 36: 54-73, 2 Abb.; Stuttgart.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2005

Band/Volume: [95](#)

Autor(en)/Author(s): Selg M., Heinz Jürgen, Bauer Michael

Artikel/Article: [Die Altersstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und deren Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag 1-45](#)