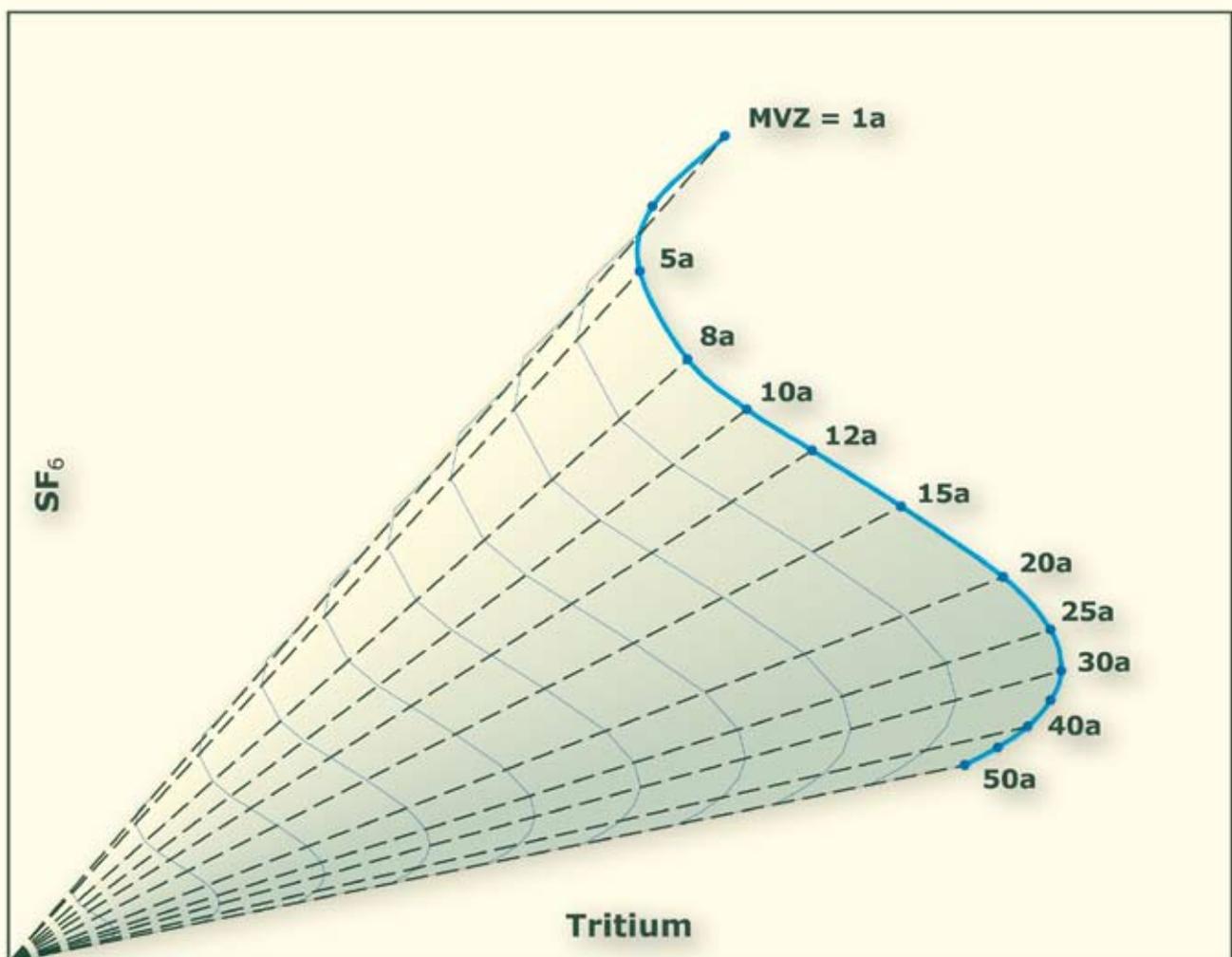


# Verweilzeiten des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern in Baden-Württemberg







# Verweilzeiten des Grundwassers in oberflächennahen Grundwasserleitern in Baden-Württemberg

Bearbeiter:

VOLKER ARMBRUSTER, BRUNO BERTLEFF,  
HANS PLUM & RUPERT PRESTEL

Regierungspräsidium Freiburg – Abteilung 9:  
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RPF-LGRB)

und

JÜRGEN HEINZ, ERICH BINDER, MICHAEL  
HEIDINGER und LORENZ EICHINGER

Hydroisotop GmbH Schweitenkirchen  
– Laboratorium zur Bestimmung von Isotopen in Umwelt und Hydrologie –

LGRB-Fachbericht	1/2008	31 S.	4 Abb.	5 Tab.	Freiburg i. Br., April 2008
------------------	--------	-------	--------	--------	--------------------------------



- Herausgeber: REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG – Abteilung 9  
LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU – LGRB  
Albertstraße 5, 79104 Freiburg i. Br.  
Telefon: (07 61) 208-3000  
Telefax: (07 61) 208-3029  
E-Mail: [abteilung9@rpf.bwl.de](mailto:abteilung9@rpf.bwl.de)  
Internet: <http://www.rp-freiburg.de>
- Bearbeiter: Dr. VOLKER ARMBRUSTER, Dr. BRUNO BERTLEFF, Dr. HANS PLUM und Dr. RUPERT PRESTEL  
(alle RPF-LGRB) und  
  
Dr. JÜRGEN HEINZ, ERICH BINDER, MICHAEL HEIDINGER und Dr. LORENZ EICHINGER  
(alle Hydroisotop GmbH – Laboratorium zur Bestimmung von Isotopen in Umwelt  
und Hydrologie, Woelkestraße 9, 85301 Schweitenkirchen)
- Redaktion: Dipl.-Ing. (FH) Bettina Schmücking (RPF-LGRB)
- Graphik: Hydroisotop GmbH, Dipl.-Ing. (FH) BETTINA SCHMÜCKING (RPF-LGRB)
- DTP: BRIGITTE WOLF (RPF-LGRB)
- Druck: RP- und Polizeidruckerei, Bissierstraße 7, 79114 Freiburg i. Br.
- Ausgabe: April 2008

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Mittlere Verweilzeit des Grundwassers .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Ermittlung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers .....</b>	<b>9</b>
3.1	Umwelttracer für oberflächennahe Grundwässer .....	9
3.2	Speicher-Durchfluss-Modelle .....	11
3.3	Kombination verschiedener Tracermethoden .....	11
<b>4</b>	<b>Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg .....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Mittlere Verweilzeiten des oberflächennahen Grundwassers in den hydrogeologischen Einheiten Baden-Württembergs .....</b>	<b>15</b>
5.1	Bisherige Untersuchungen .....	15
5.2	Neuere Untersuchungen .....	15
5.2.1	Methodik .....	15
5.2.2	Ergebnisse .....	16
5.3	Zusammenfassende Übersicht .....	21
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>27</b>
	<i>Literatur .....</i>	<i>29</i>
	Abkürzungen .....	31





# 1 Einführung

Im Jahr 2000 wurde vom Europäischen Parlament die EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL 2000) verabschiedet mit dem Ziel, innerhalb der EU einen guten quantitativen und qualitativen Grundwasserzustand zu bewahren bzw. wiederherzustellen. Die festgeschriebenen Maßnahmen sehen eine Erstbewertung des Grundwasserzustandes, eine Ausweisung von Risikogebieten, eine Monitoringphase und schließlich die Sanierung verunreinigter Grundwasserkörper vor.

Im Zusammenhang mit dem Monitoring und der Sanierung des Grundwasserzustands ergeben sich Fragen nach dem Alter des Grundwassers. Insbesondere zwei Fragestellungen erfordern Kenntnisse über die Verweilzeit des Grundwassers im Untergrund.

- Beim **Monitoring** werden in den Risikogebieten Grundwasseraufschlüsse beprobt und u. a. auf ihre Nitratkonzentration untersucht, um das Ausmaß und die zeitliche Veränderung der Verunreinigung durch flächenhaften Eintrag aus der Landwirtschaft festzustellen. Zur Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung werden in den Einzugs- bzw. Zustromgebieten der beprobten Messstellen die Nitratreinträge bilanziert. Dies kann für unterschiedlich weit zurückliegende Zeitpunkte geschehen. Um zu entscheiden, welcher Zeitpunkt für die Korrelation mit der aktuellen Grundwasserbeschaffenheit eher heranzuziehen ist, ist eine ungefähre Vorstellung über die Verweilzeit des Wassers im Untergrund erforderlich, denn sie ist ein Maß für die zeitliche Verzögerung, mit

der sich ein bestimmter Eintrag an der Erdoberfläche in der Grundwasserbeschaffenheit bemerkbar macht.

- Bei der anschließenden **Sanierungsphase** werden Maßnahmen getroffen, um den Eintrag von Schadstoffen in das Grundwasser zu verringern bzw. zu verhindern. Dazu gehören z. B. die Reduzierung der Düngegaben, eine Änderungen der Landbewirtschaftung oder die Umwandlung von Acker- in Grünland. Für die Erfolgskontrolle ist ein wichtiger Aspekt die zeitliche Verzögerung, mit der sich die getroffenen Maßnahmen in der Grundwasserbeschaffenheit bemerkbar machen können. Um eine realistische Vorstellung von den Antwortzeiten des Grundwassers zu gewinnen, wird ebenfalls die Verweilzeit des Wassers im Untergrund vom Ort des Eintrags bis zum Erreichen der jeweiligen Kontrollmessstelle benötigt.

Eine vergleichbare Problematik stellt sich z. B. auch bei der Bewertung der Ergebnisse des Grundwassergütemessnetzes des Landes Baden-Württemberg, das durch die LUBW betrieben wird. In beiden Fällen geht es schwerpunktmäßig um die Beschaffenheit des oberflächennahen Grundwassers und die Zeitspanne zwischen Input und Output.

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung ist es, die bisherigen Erkenntnisse über die Verweilzeit der oberflächennahen Grundwässer in Baden-Württemberg darzustellen und zu bewerten. Dazu wurden die Untersuchungsergebnisse aus regionalen Studien gezielt durch Bestimmungen der Mittleren Verweilzeit (MVZ) an 29 ausgewählten Grundwasseraufschlüssen ergänzt (Hydroisotop 2007).





## 2 Mittlere Verweilzeit des Grundwassers

Das Grundwasser, das in einer Quelle zu Tage tritt oder aus einem Brunnen bzw. einer Grundwasser-messstelle gefördert wird, besteht aus einer Mischung von Grundwasserkomponenten unterschiedlichen Alters. Deren Verweilzeit im Untergrund setzt sich aus der Verweilzeit des Wassers in der Ungesättigten Zone und im Grundwasserraum zusammen. Die Verteilung der Komponenten, ihre Verweilzeiten und die resultierende Mittlere Verweilzeit (MVZ; für die genaue Definition siehe DVWK 1995) werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst:

- Art und Umfang der Grundwasserneubildung, hydraulische Verbindungen von Grundwasserstockwerken (Leakage-Phänomene, Cross-Formation-Flow, laterale Zuflüsse im Einzugsgebiet, hydraulische Verbindungen zu oberirdischen Gewässern)
- Überlagerungssituation des Grundwasserleiters im Einzugsgebiet, Grundwasserflurabstand
- Speicher- und Durchflusseigenschaften des Grundwasserleiters
- Entfernung des Grundwasseraufschlusses von hydraulisch wirksamen Rändern bzw. von der Wasserscheide; Größe des Einzugsgebiets
- Räumliche Ausdehnung des jeweiligen Grundwasserfließsystems (lokal, regional, überregional), hydrogeologische Position (seichte/tiefe Grundwasserverhältnisse)
- Art des angeschlossenen Grundwasserfließsystems bzw. Anschluss des Grundwasseraufschlusses an den Grundwasserleiter, Tiefe der Probenahme
- Art und Umfang der Bewirtschaftung des untersuchten Grundwasserkörpers
- Klimatische und hydrologische Verhältnisse zum Zeitpunkt der Probenahme

Da es aus Kostengründen nicht möglich ist, alle Gütemessstellen auf ihre Mittlere Verweilzeit zu untersuchen, wird der Versuch unternommen, typische Mittlere Verweilzeiten für oberflächennahe Grundwasserfließsysteme in den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in Baden-Württemberg abzuschätzen. Dabei wird vorausgesetzt, dass zumindest statistisch ähnliche Neubildungsbedingungen sowie Speicher- und Durchflusseigenschaften in einer hydrogeologischen Einheit zu Grundwasserfließsystemen mit ähnlichen Eigenschaften und typischen Mittleren Verweilzeiten führen.





### 3 Ermittlung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers

#### 3.1 Umwelttracer für oberflächennahe Grundwässer

Die Ermittlung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers stützt sich auf Umwelttracer, die mit der Grundwasserneubildung in das Grundwasser eingetragen werden, deren Konzentration in der Atmosphäre zeitliche Variationen aufweist und die nach Eintritt in den Untergrund keinen oder bekannten gesetzmäßigen Veränderungen unterliegen. Für oberflächennahe Grundwasser-Zirkulationssysteme mit kurzen Verweilzeiten werden in erster Linie Tritium, in jüngerer Zeit auch Krypton-85, Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid verwendet.

##### Tritium ( $^3\text{H}$ )

Tritium ist das radioaktive Isotop des Wasserstoffs ( $^3\text{H}$ ) und besitzt eine Halbwertszeit von 12,3a. Der natürliche Tritium-Gehalt im Niederschlag beträgt 5 TU (1 TU = 0,119 Bq/l). Als Folge der Kernwaffenversuche in den 1950er- und 1960er-Jahren stieg die Tritium-Konzentration im Niederschlag zeitweise auf mehrere 1000 TU an. Die aktuellen Niederschläge weisen immer noch leicht erhöhte Werte von ca. 10 TU auf.

Der zeitliche Verlauf der Tritium-Konzentration im Niederschlag wird an ausgewählten Stationen, u. a. in Karlsruhe und Weil am Rhein, durch die IAEA und die Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz gemessen. Um stets aktuelle Daten zur Verfügung zu haben, werden von der Firma Hydroisotop in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Strahlenschutz für weitere Niederschlagsstationen, z. B. in Freiburg und Steißlingen, Tritium-Messreihen ermittelt.

Oberflächenahes Grundwasser, das nicht durch Uferfiltrat beeinflusst ist und ausschließlich aus Niederschlag neugebildet wird, weist heute meist Tritium-Konzentrationen zwischen 10 und 25 TU auf, was einer Mittleren Verweilzeit zwischen etwa ein und 30 Jahren entspricht. Bei Mittleren Verweilzeiten über 30 Jahren nehmen die Tritium-Gehalte im Grundwasser wieder ab, da dieses dann größere Anteile an Tritium-freiem, d. h. vor 1953 gebildetem Grundwasser enthält. Tritium-freie Grundwässer enthalten keine nach 1953 neu gebildeten Komponenten.

##### Krypton-85 (Kr-85 bzw. $^{85}\text{Kr}$ )

Das Edelgasisotop Krypton-85 ( $^{85}\text{Kr}$ , Kr-85) mit einer Halbwertszeit von 10,8 Jahren gelangt ausschließlich aus kerntechnischen Anlagen (Wiederaufbereitung) in die Atmosphäre. Die Aktivität von Krypton-85 wird in dpm/ml Kr angegeben (dpm = Zerfälle pro Minute). 60 dpm/ml entsprechen einer Aktivität von 1 Bq/ml.

Der Konzentrationsverlauf von  $^{85}\text{Kr}$  in der Atmosphäre ist wegen des weltweit zunehmenden Kernbrennstoffverbrauchs seit Mitte der 50er-Jahre monoton steigend. Der Input von  $^{85}\text{Kr}$  weist keine größeren regionalen Unterschiede auf und ist gut bekannt. Für ein Grundwasser im Lösungsgleichgewicht mit dem aktuellen  $^{85}\text{Kr}$ -Gehalt der Atmosphäre gilt ein Gehalt von ca. 90 dpm/ml Kr.

Krypton löst sich im Niederschlag und wird über die Grundwasserneubildung in das Grundwasser eingetragen. Ein Nachteil von  $^{85}\text{Kr}$  als Tracer ist allerdings, dass es sich um ein gasförmiges Isotop handelt, das nicht wie Tritium Bestandteil des Wassermoleküls ist. Kommt es zu einem Gasaustausch zwischen dem Grundwasser und der Luft in der Ungesättigten Zone oder in einem Brunnen, kann dadurch der  $^{85}\text{Kr}$ -Gehalt im Grundwasser erhöht werden. In solchen Fällen ist die  $^{85}\text{Kr}$ -Konzentration nicht mehr oder nur noch eingeschränkt für die Bestimmung der Mittleren Verweilzeit des Grundwassers geeignet.

Bei der Verwendung von  $^{85}\text{Kr}$  als Tracer für die Altersbestimmung ist zu berücksichtigen, dass hier die isotopische Uhr erst ab dem Zeitpunkt läuft, ab dem das Sickerwasser den Grundwasserspiegel erreicht und kein Gasaustausch mit der Bodenluft mehr stattfindet. Im Gegensatz zur Tritium-Uhr, die mit dem Einsickern des Niederschlagswassers in den Untergrund startet, liefert die Altersbestimmung mit  $^{85}\text{Kr}$  Verweilzeiten ohne Berücksichtigung der Passage des Sickerwassers durch die Ungesättigte Zone.

##### Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub> bzw. SF<sub>6</sub>) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)

Die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) F11, F12 treten seit den 40er- und 50er-Jahren des vorigen Jahrhunderts, der Fluorchlorkohlenwasserstoff F113 und Schwefelhexafluorid SF<sub>6</sub> seit den 70er-Jahren als Folge ihrer zunehmenden Verwendung vermehrt in der Atmosphäre auf. Während die FCKW-Konzentration jedoch wegen ihres seit etwa 10 Jahren abnehmenden Einsatzes derzeit stagniert oder bereits wieder rückläufig ist, steigt der SF<sub>6</sub>-Gehalt noch weiter stetig an.

Die Konzentrationen der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (F11, F12 und F113) werden in pmol/l (pmol = picomol, entsprechend  $10^{-12}$  mol), die Konzentration von SF6 in fmol/l (fmol = femtomol, entsprechend  $10^{-15}$  mol) angegeben.

lungsflächen, Kanalisation, Abwasser) zu FCKW-Gehalten im Grundwasser führen, die deutlich über dem heutigen atmosphärischen Eintrag liegen. In beiden Fällen ist eine Datierung mit Hilfe der FCKW nicht oder nur stark eingeschränkt möglich.

**Tab. 1** Datierungsmöglichkeiten oberflächennaher Grundwässer mit Hilfe von Umwelttracern (Hydroisotop 2007).

Datierungstracer	Vorteile	Nachteile	Beurteilung
<b>Tritium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– optimales Tracerverhalten</li> <li>– einfache Probenahme</li> <li>– kostengünstige und zeitnahe Messung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Differenzierung junger Grundwässer &lt; 12 Jahre nur eingeschränkt möglich</li> <li>– Mehrdeutigkeiten bei Auswertungen, wenn nur ein Tritiumwert vorliegt</li> <li>– ältere Tritiumdaten oder weitere Datierungstracer notwendig für detaillierte Auswertung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– in Kombination mit älteren Tritiumdaten oder weiteren Datierungstracern sehr gut geeignet</li> </ul>
<b>FCKW</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kostengünstige und zeitnahe Messung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Störungen durch anthropogene Eintragsquellen und Abbauprozesse</li> <li>– Differenzierung junger Grundwässer &lt; 10 Jahre nicht möglich</li> <li>– Überhöhung durch Atmosphärenkontakt z. B. bei der Probenahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– für Datierung der aktuell untersuchten Grundwässer <i>nicht</i> geeignet</li> <li>– wichtiger Parameter zur Erkennung von geringsten Schadstoffeinträgen</li> </ul>
<b>SF6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kostengünstige und zeitnahe Messung</li> <li>– keine Abbauprozesse bekannt</li> <li>– zur Datierung junger Grundwässer &lt; 10 Jahre geeignet</li> <li>– lokale SF6-Eintragsquellen sehr selten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Störungen durch Sorptionsprozesse insbesondere in Gebieten mit erhöhten Anteilen von organischem Material (Oberschwaben, Rheintal)</li> <li>– Überhöhung durch Atmosphärenkontakt z. B. bei der Probenahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zur Datierung junger Grundwässer gut geeignet</li> <li>– in einzelnen Gebieten Verfälschungen möglich</li> </ul>
<b>Krypton-85</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– keine Abbau- und Sorptionsprozesse bekannt</li> <li>– zur Datierung junger Grundwässer &lt; 10 Jahre geeignet</li> <li>– keine lokalen Eintragsquellen</li> <li>– auch bei Entgasungsprozessen anwendbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– hoher Zeit- und Kostenaufwand</li> <li>– geringfügige Verfälschungen durch Atmosphärenkontakt nicht auszuschließen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zur Datierung junger Grundwässer sehr gut geeignet</li> </ul>

FCKW und SF6 lösen sich im Niederschlag und werden wie  $^{85}\text{Kr}$  mit dem Sickerwasser in das Grundwasser eingetragen. Auch hier startet die Uhr erst nach Übertritt des Sickerwassers in das Grundwasser.

Die FCKW können einerseits einem natürlichen Abbau unterliegen, andererseits kann ein konzentrierter lokaler FCKW-Eintrag (Deponie, Sied-

Atmosphärische Überhöhungen von SF6 können – wie bei allen Gastracern – durch Kontakt des Grundwassers mit der Atmosphäre entstehen. Dieser Prozess tritt z. B. im Bereich von flachen Quellen auf, kann jedoch auch in tiefen Brunnen (z. B. durch einplätscherndes Grundwasser) hervorgerufen werden. Anthropogene Überhöhungen durch lokale SF6-Quellen kommen nur vereinzelt vor. Nach den bisherigen Erkenntnissen wird SF6



mikrobiologisch nicht abgebaut, Sorptionsprozesse können jedoch insbesondere in Gesteinen, reich an organischem Material, nicht ausgeschlossen werden.

Eine Zusammenstellung der Datierungsmöglichkeiten der verschiedenen Umwelttracer und Hinweise auf mögliche Einschränkungen bei der Anwendung gibt Tab. 1.

### 3.2 Speicher-Durchfluss-Modelle

Für die Ermittlung der Mittleren Verweilzeit eines Grundwassers in einem Grundwasserkörper werden der Tracer-Input (Konzentration des Tracers in der Atmosphäre bzw. im Niederschlag) und Traceroutput (Konzentration des Tracers in der beprobten Quelle oder Grundwassermessstelle) in ihrer zeitlichen Variation verglichen. Dies erfolgt mit Hilfe sogenannter Speicher-Durchfluss-Modelle (SD-Modelle). SD-Modelle beschreiben in idealisierter Weise den Weg der Wasserteilchen einer Probe vom Ort der Grundwasserneubildung bis zur Probenahmestelle. Dabei werden die Vorgänge der Grundwasserneubildung sowie die Fließ- und Transportvorgänge im Grundwasserleiter nicht diskret modelliert, sondern durch bestimmte Modellvorstellungen integral beschrieben. Diese betreffen die Altersverteilung der verschiedenen Wasserteilchen im Grundwasserkörper. Eichparameter und Zielgröße der Modellierung ist die Mittlere Verweilzeit.

Zur Bestimmung der Mittleren Verweilzeit werden am häufigsten das Piston-Flow-Modell, das Exponentialmodell oder eine Kombination der beiden Modelle verwendet.

#### Piston-Flow-Modell (PFM)

Das Piston-Flow-Modell beschreibt eine Grundwasserströmung, die näherungsweise durch eine Strombahn charakterisiert werden kann und bei der sich alle Wasserteilchen konvektiv bewegen, ohne sich zu durchmischen (DVWK 1995). Bei Tracern, die keine Veränderungen im Grundwasserleiter erfahren, entspricht die Input-Funktion der Output-Funktion, lediglich zeitlich versetzt um die Mittlere Verweilzeit. Bei radioaktiven Tracern wird die Konzentrationsveränderung zwischen Input und Output durch das Gesetz des radioaktiven Zerfalls beschrieben. Das Piston-Flow-Modell ist anwendbar, wenn die Grundwasserneubildung bzw. der Tracereintrag auf kleinen Flächen und in geringmächtige Grundwasserleiter erfolgt und auf dem Weg zur Probenahmestelle keine weitere Grundwasserneubildung stattfindet.

#### Exponentialmodell (EM)

Im Gegensatz dazu geht das Exponentialmodell von einer exponentiellen Verteilung der Alter der Wasserteilchen in einem Grundwasserkörper aus, die einerseits auf die in der Regel mit der Tiefe abnehmende Durchlässigkeit eines Grundwasserleiters zurückzuführen ist, andererseits mit der zunehmenden Länge der Fließwege in tieferen Zonen mächtiger Grundwasserumsatzräume begründet wird (DVWK 1995). Vorbedingung für die Anwendung des Exponentialmodells ist, dass im gesamten Einzugsgebiet der Tracer mit der Grundwasserneubildung in das Grundwasser gelangt.

#### Kombiniertes Exponential-Piston-Flow-Modell (EPM)

Entsprechen die Verhältnisse im Einzugsgebiet der Probenahmestelle weder den Annahmen für das Piston-Flow-Modell noch für das Exponentialmodell, lassen sich häufig bessere Ergebnisse durch die Kombination beider Modelle erreichen. Dabei werden Piston-Flow-Modell und Exponentialmodell in beliebiger Reihenfolge seriell miteinander verknüpft.

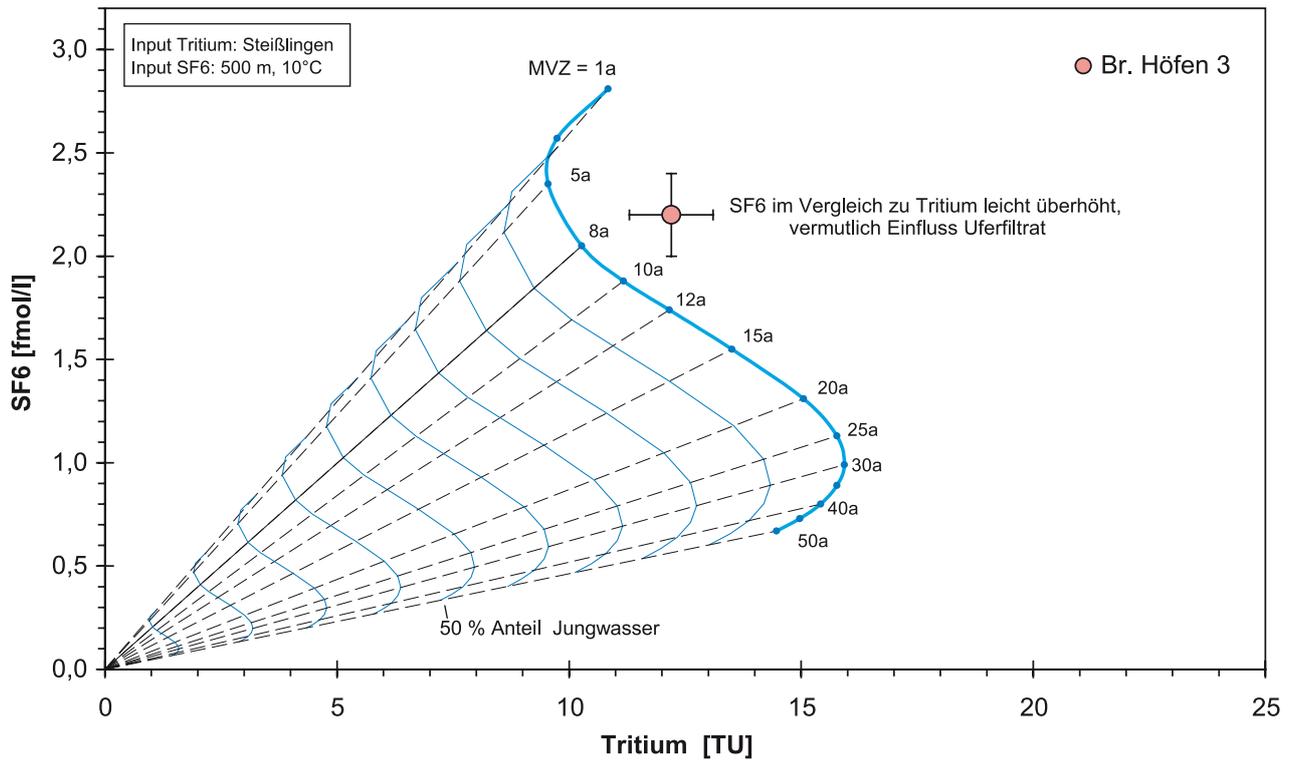
### 3.3 Kombination verschiedener Tracermethoden

Die verschiedenen Tracer erfassen schwerpunktmäßig unterschiedliche Eigenschaften des Grundwasserfließsystems, werden von den hydrogeologischen und hydrologischen Randbedingungen unterschiedlich stark beeinflusst und können durch unterschiedliche Fehlerquellen verfälscht werden. Eine vielversprechende Vorgehensweise stellt deshalb die Kombination verschiedener Tracerverfahren dar, die es erlaubt, die Schwächen der verschiedenen Verfahren zu erkennen und auszugleichen.

Die kombinierte Auswertung von Tritium mit SF<sub>6</sub> und Krypton-85 erfolgt graphisch in Form sogenannter Harfendiagramme. Hiermit ist es möglich, die unterschiedlichen Altersbestimmungen zu vergleichen und komplexe Komponentenzusammensetzungen zu identifizieren.

Für die Konstruktion der Harfendiagramme werden anhand der Inputkonzentrationen die zu erwartenden Output-Konzentrationen der verschiedenen Datierungstracer für diskrete Verweilzeiten zwischen 1 und 50 Jahren berechnet und gegeneinander aufgetragen (Abb. 1). Der äußerste Linienzug repräsentiert Grundwasser, die altersmäßig nur aus einer Komponente bestehen. Tritium- und Spurengasfreies Grundwasser (älter als 50 Jahre) liegen auf

Abb. 1 Kombinierte Auswertung von Tritium und SF6/Kr-85 mittels Harfendiagramm am Beispiel Brunnen Höfen 3.



dem Nullpunkt des Diagramms. Liegt ein Grundwasser links oder unterhalb der äußeren Randkurve, handelt es sich um ein Mischwasser verschieden alter Komponenten. In manchen Fällen liegen Grundwässer auch rechts der äußeren Randkurve. Dies ist häufig bei sehr jungen Grundwässern und Ein-

zugsgebieten mit großen Flurabständen zu beobachten und resultiert aus den unterschiedlichen Verweilzeiten, die mittels Tritium (in der Ungesättigten Zone und im Grundwasserraum) und Spurengasen (nur im Grundwasserraum) erfasst werden. Ähnlich macht sich auch ein Uferfiltrateinfluss bemerkbar.



## 4 Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg

Hydrogeologischer Bezug für die Beschreibung der Mittleren Verweilzeiten sind die 22 hydrogeologischen Einheiten, wie sie auf der Basis der Geo-

logischen Übersichtskarte 1 : 500 000 (GÜ 500) abgegrenzt wurden und in der Hydrogeologischen Übersichtskarte von Baden-Württemberg (HÜ 500) dargestellt sind (LGRB 2002; Tab. 2). Bestimmungen der Mittleren Verweilzeit liegen allerdings in erster Linie für die Grundwässer in den Grundwasserleitern vor, während die Mittleren Verweilzeiten für Grundwasservorkommen in Grundwassergeringleitern nur in Ausnahmefällen ermittelt wurden.

Tab. 2 Hydrogeologische Einheiten 1 : 500000 in Baden-Württemberg und Klassifikation nach der Gebirgsdurchlässigkeit.

Kürzel, Farbe	Bezeichnung der Hydrogeologischen Einheit	Klassifikation nach Gebirgsdurchlässigkeit
Hy 1	Quartäre und jungtertiäre Deckschichten <sup>1</sup>	GWG
Hy 2	Quartäre Beckensedimente, Moränensedimente und tiefgründig verwitterte Deckenschotter	GWG
Hy 3	Quartäre / Pliozäne Kiese und Sande (Oberrheingraben)	Poren-GWL
Hy 4	Fluvioglaziale Kiese und Sande (Alpenvorland)	Poren-GWL
Hy 5	Jungquartäre Flussskiese und -sande	Poren-GWL
Hy 6	Junge Magmatite	GWG
Hy 7	Tertiär im Oberrheingraben	GWG
Hy 8	Obere Meeresmolasse	Poren-/Kluft-GWL/GWG
Hy 9	Übrige Molasse	GWG
Hy 10	Oberjura, schwäbische Fazies	Kluft-/Karst-GWL
Hy 11	Oberjura, rauracische Fazies	Kluft-/Karst-GWL
Hy 12	Oberjura, helvetische Fazies <sup>2</sup>	GWG
Hy 13	Mittel- und Unterjura	GWG
Hy 14	Oberkeuper und oberer Mittelkeuper	Poren-/Kluft-GWL/GWG
Hy 15	Gipskeuper und Unterkeuper	Kluft-GWL/GWG
Hy 16	Oberer Muschelkalk	Kluft-/Karst-GWL
Hy 17	Mittlerer Muschelkalk	GWG
Hy 18	Unterer Muschelkalk	Kluft-/Karst-GWL
Hy 19	Oberer Buntsandstein	Kluft-GWG/GWL
Hy 20	Mittlerer und Unterer Buntsandstein	Kluft-GWL
Hy 21	Paläozoikum, Kristallin	GWG
Hy 22	Trias, ungegliedert	GWG / GWL
GWL GWG GWL / GWG	Grundwasserleiter ( $k_f > 10^{-5}$ m/s); blau: Porengrundwasserleiter, dunkelgrün: Kluft-, Karstgrundwasserleiter Grundwasserleiter ( $k_f < 10^{-5}$ m/s); braun Wechsellagerung zwischen Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern oder Gebirgsdurchlässigkeit um $10^{-5}$ m/s und nicht eindeutig zuzuordnen; gelbgrün	

<sup>1</sup> abgedeckte Karte: Deckschichten sind in der HÜ 500 nicht dargestellt

<sup>2</sup> in Baden-Württemberg ausschließlich unter mächtiger Molasse-Überdeckung, Alpenvorland





## 5 Mittlere Verweilzeiten des oberflächennahen Grundwassers in den hydrogeologischen Einheiten Baden-Württembergs

### 5.1 Bisherige Untersuchungen

Angaben zu Mittleren Verweilzeiten finden sich in vielen Ergebnisberichten regionaler hydrogeologischer Untersuchungen. In den meisten Fällen wurden jedoch schwerpunktmäßig tiefe Grundwasservorkommen mit entsprechend langen Verweilzeiten untersucht (z. B. die Grundwasservorkommen in der Molasse oder im Oberjura im Molassebecken; BERTLEFF 1986, BERTLEFF et al. 1987, PRESTEL 1990). Demgegenüber gibt es für oberflächennahe Grundwasservorkommen nur vergleichsweise wenige systematische Untersuchungen. Ein Grund dafür dürfte auch sein, dass eine Datierung mittels Tritium in jüngerer Zeit wegen der nur noch geringen Veränderungen der Input-Konzentrationen zunehmend schwieriger und ungenauer geworden ist.

Die Angaben, die in Abschn. 5.3 zusammenfassend dargestellt sind, stammen überwiegend aus Hydrogeologischen Kartierungen und Erkundungen. Daneben wurden auch die Ergebnisse lokaler Untersuchungen, die meist im Zusammenhang mit der Abgrenzung von Wasserschutzgebieten durchgeführt wurden, berücksichtigt.

Die angeführten Werte der Mittleren Verweilzeit basieren nahezu ausschließlich auf Tritium-Zeitreihen, die mittels Speicher-Durchflussmodellen ausgewertet wurden. Neben der Hydrogeologischen Einheit wurden in der Regel keine weiteren Einflussgrößen (Kap. 2) für die Interpretation der Mittleren Verweilzeiten herangezogen. So können hier oft nur Werte oder Wertebereiche für typische Aufschlusssituationen in der jeweiligen hydrogeologischen Einheit genannt werden.

### 5.2 Neuere Untersuchungen

#### 5.2.1 Methodik

Zur Ergänzung und Plausibilisierung der Literaturdaten wurden 30 Grundwasseraufschlüsse beprobt und die Proben auf Tritium, z. T. zusätzlich auch auf

Spurengase (FCKW, SF<sub>6</sub>) untersucht. Die Untersuchungen wurden von der Firma Hydroisotop im Auftrag des Regierungspräsidiums Freiburg, Abt. 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bericht der Firma Hydroisotop vom 26.02.2007 ausführlich dokumentiert (Hydroisotop 2007) und werden im Folgenden kurz referiert.

Die Auswahl der untersuchten Grundwasseraufschlüsse orientierte sich an folgenden Vorgaben:

- Lage in einem Risikogebiet nach EU-Wasserrahmenrichtlinie
- Brunnen, die aufgrund der Fördersituation die Altersstruktur im Grundwasserkörper integral erfassen
- Brunnen mit gutem Grundwasseranschluss
- Tritium-Daten früherer Untersuchungen vorhanden

Auf die Untersuchung von Quellen wurde verzichtet, da ein Kontakt des Quellwassers mit der Atmosphäre am Quellaustritt die Spurengaskonzentrationen möglicherweise verfälscht.

Zum Zeitpunkt der Probenahme (im Juni 2006) herrschten Trockenwetterbedingungen. Die ermittelten Mittleren Verweilzeiten repräsentieren somit überwiegend den langfristigen Grundwasserabfluss.

Insgesamt erfolgte die Bestimmung der Mittleren Verweilzeit und der Altersstruktur nach folgenden Schritten:

- Beurteilung der hydrogeologischen Situation der Probenahmestelle und Entscheidung über die Art des Speicher-Durchflussmodells
- Modellierung für den aktuell ermittelten Tritium-Gehalt
- Verifizierung des Modells anhand älterer Tritium-Werte
- Vergleich mit den Auswerteergebnissen benachbarter, hydrogeologisch vergleichbarer Standorte
- Verifizierung der Ergebnisse durch eine kombinierte Auswertung von Tritium und SF<sub>6</sub>/Kr-85

Regional liegen die untersuchten Probenahmestellen in folgenden, im Rahmen der Bearbeitung der Wasserrahmenrichtlinie großenteils als Risikogebiete eingestuften Regionen:

- Südlicher Oberrheingraben
- Nördlicher Oberrheingraben
- Kraichgau
- Main-Tauber-Gebiet
- Alpenvorland
- Schwäbische Alb (nur ältere Daten)

Betroffene Grundwasserleiter sind die Quartären/Pliozänen Sande und Kiese im Oberrheingraben, die fluvioglazialen Kiese im Alpenvorland, der Oberjura, der Ober- und obere Mittelkeuper, der Gipskeuper und Unterkeuper, der Obere Muschelkalk, der Obere Buntsandstein sowie der Mittlere und Untere Buntsandstein.

## 5.2.2 Ergebnisse

### Tritium

Die in der Studie gemessenen Tritium-Konzentrationen schwanken zwischen 6 und 19 TU, der analytische Fehler liegt zwischen 0,4 und 1,4 TU und die Bestimmungsgrenze beträgt 0,6 TU.

Die überwiegende Anzahl der Tritium-Gehalte liegt zwischen 10 und 12 TU (Abb. 2). Diese Werte entsprechen damit den mittleren Tritium-Gehalten der Niederschläge der letzten Jahre. Daraus lassen sich überschlägig Mittlere Verweilzeiten zwischen Monaten und 12 bis 14 Jahren abschätzen (1-Komponentenmodell). Bei Werten <10 TU und >16 TU ist eine Modellierung mit Hilfe eines einfachen 1-Komponenten-Systems nicht mehr möglich.

### SF6

Die gemessenen SF6-Konzentrationen überdecken mit Werten zwischen 0,4 und 5,2 fmol/l ein weites Spektrum. Die analytische Messgenauigkeit beträgt je nach Konzentration 0,1 bis 0,5 fmol/l (Abb. 3).

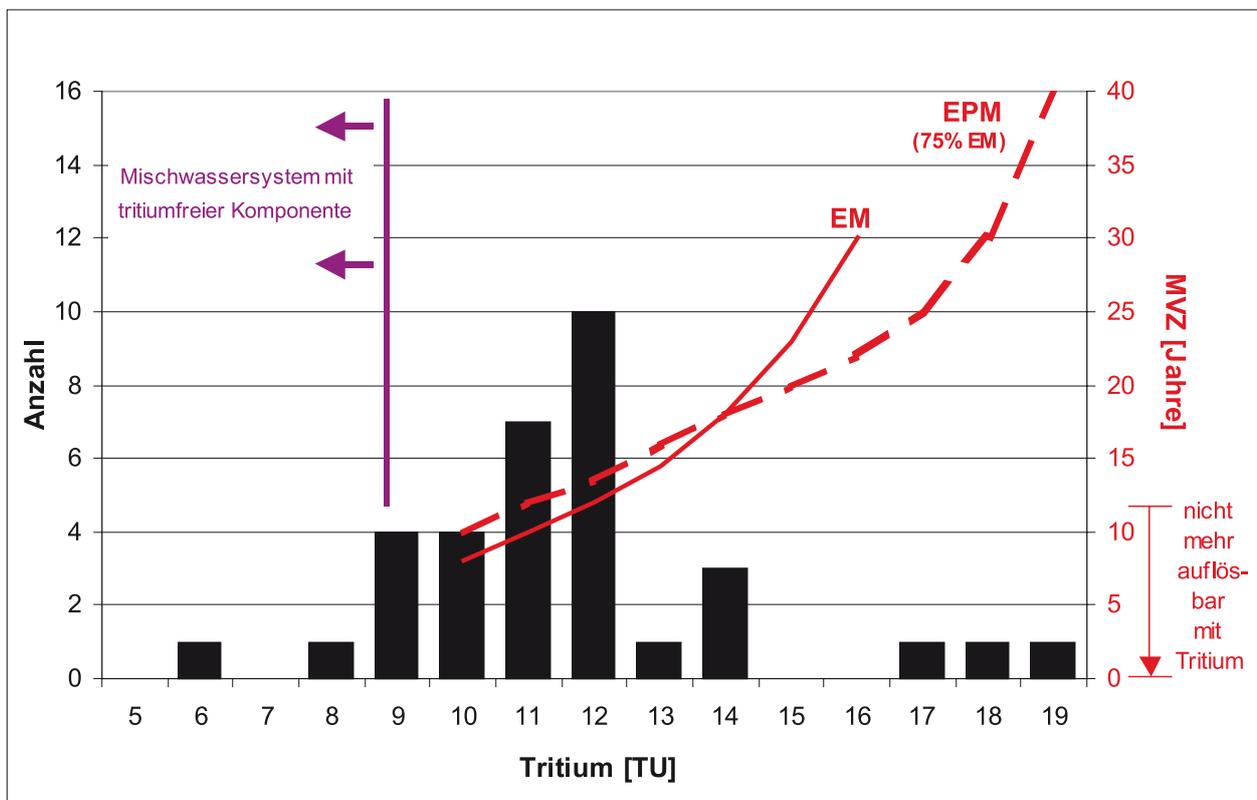


Abb. 2 Häufigkeitsverteilung der in der Untersuchung 2006 bestimmten Tritium-Gehalte und zugehörige Mittlere Verweilzeit (Annahme: 1-Komponenten-Modell).



Insgesamt sind die SF6-Gehalte für junge Grundwässer gering, wodurch sich im Vergleich zu den Ergebnissen der Tritium-Gehalte höhere Verweilzeiten ergeben. Die Diskrepanz ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass der SF6-Eintrag durch die Trockenjahre 2003 und 2004 maßgeblich beeinflusst wurde, während sich dieser Effekt beim Tritium wegen der in den letzten Jahren praktisch konstanten Tritium-Konzentration im Niederschlag nicht bemerkbar macht. Bei einigen Standorten im Oberrheingraben und in Oberschwaben ergeben

her angezweifelt. Die Kr-85-Untersuchungen dienen in diesen beiden Fällen zur Verifizierung der Ergebnisse der Tritium- und SF6-Messungen.

Der aktuelle Kr-85-Gehalt in der Atmosphäre beträgt ca. 85 bis 90 dpm/ml. Beim Standort im Sattenbeurer Feld wurde eine Kr-85-Konzentration von  $69,4 \pm 3,4$  dpm/ml gemessen, was einem jungen Grundwasseralter entspricht und gut mit den Ergebnissen der Tritium-Untersuchungen korrespondiert. Für SF6 sind in diesem Gebiet daher

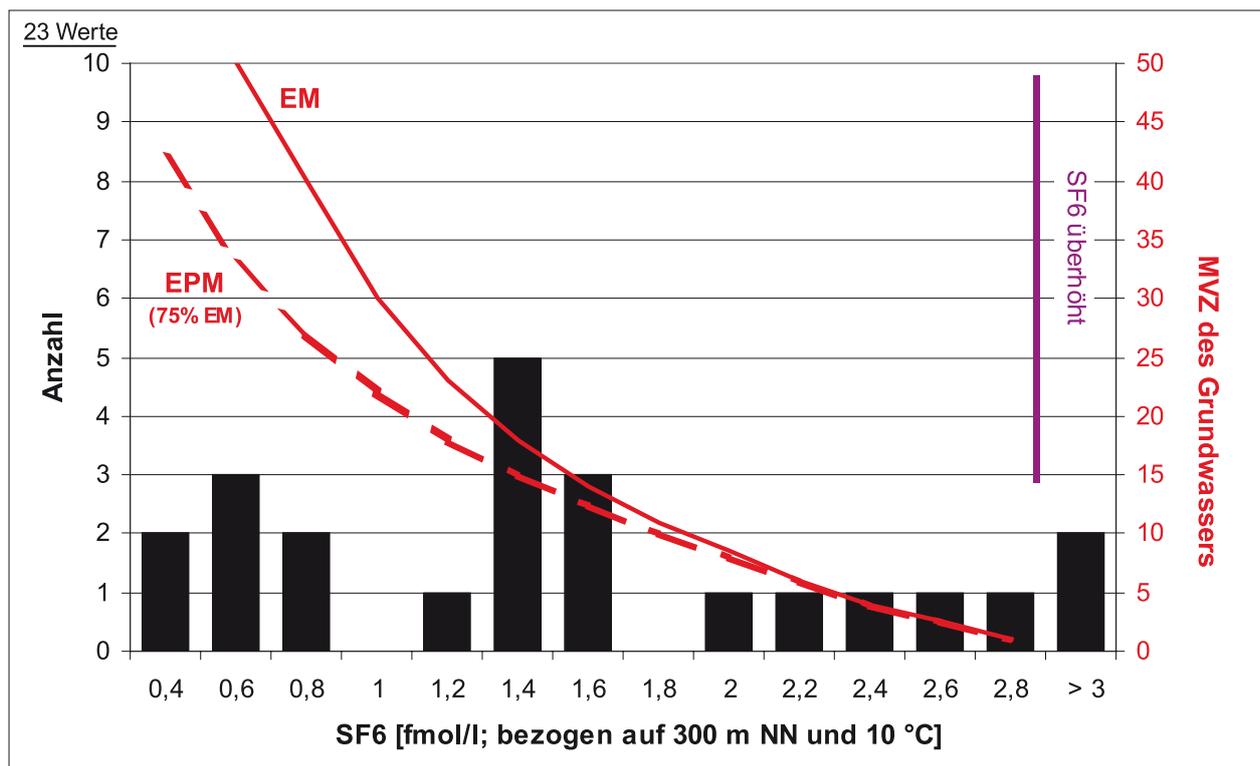


Abb. 3 Häufigkeitsverteilung der in der Untersuchung 2006 bestimmten SF6-Gehalte und zugehörige Mittlere Verweilzeit (Annahme: 1-Komponenten-Modell).

sich u. a. durch Vergleich mit den Ergebnissen der Kr-85-Untersuchungen zudem deutliche Anhaltspunkte für eine Verfälschung der SF6-Konzentration durch Sorption an organischem Material im Gestein.

### Krypton-85

Aufgrund des großen Kosten- und Zeitaufwands wurden Kr-85-Untersuchungen nur an zwei Standorten in Oberschwaben (Sattenbeurer Feld und Ostrachtal) durchgeführt. Bei beiden Standorten sind im Einzugsgebiet anmoorige und moorige Böden weit verbreitet. Frühere SF6-Untersuchungen, welche im Vergleich zu den Ergebnissen für Tritium höhere Mittlere Verweilzeiten ergaben, wurden da-

Sorptionsprozesse angezeigt. Im Ostrachtal beträgt der Kr-85-Gehalt  $20 \pm 10$  dpm/ml. Trotz der vergleichsweise geringen Messgenauigkeit ist die resultierende Mittlere Verweilzeit von ca. 20 bis 40 Jahren nicht als verfälscht anzusehen und liegt in der gleichen Größenordnung wie die früher mittels SF6 ermittelten Mittleren Verweilzeiten.

### FCKW

Die Ergebnisse der aktuellen FCKW-Untersuchungen sind in Tab. 3 zusammengestellt. Gelb markiert sind die Werte, die deutlich über der maximalen FCKW-Konzentration in der Atmosphäre liegen oder für die sich aufgrund des Vergleichs mit den Ergebnissen anderer Umwelttracer Hinweise auf

**Tab. 3** Ergebnisse der FCKW-Spurenstoffuntersuchungen (2006) und Beurteilung hinsichtlich sekundärer Überprägung (zusätzliche FCKW-Quellen, Abbauprozesse); Hydroisotop (2007).

Labor-Nr. Hydroisotop	Bezeichnung der Probenahmestelle	F12	F11	F113
		[pmol/l]		
173982	Br. 1 WW Ried (west)	0,6	0,6	0,05
173985	Br. Weisweil	2,4	1,1	0,04
173987	GWM 105/019-0	32,0	22,0	0,32
173973	TB2 Hohlebachgruppe	5,4	8,4	0,35
173981	GWM 1/99 Kronau	0,2	0,1	0,05
173964	GWM 2 flach Kronau	3,9	12,0	0,22
173972	Br. W 1 Karlsruhe	7,0	3,4	0,19
173958	Br. Appendorf	28,0	5,9	0,09
173960	GWM 4 Biberach	12,0	135,0	0,25
173961	Br. II Eichen Stafflangen	0,7	0,4	0,03
173963	Br. 3 Höfen	11,0	37,0	0,80
173968	TB Mörsbach	1,7	2,7	0,17
173983	GWM 2 Zaisenhausen	0,3	0,4	0,10
173984	GWM 1 Zaisenhausen	2,6	5,2	0,47
173969	Br. Große Hohle	1,2	2,0	0,11
173965	Br. 1 Schmalenstein	14,0	8,8	1,80
173967	Br. 1 Pflanzwiesen	24,0	95,0	16,00
173974	Br. II Grünfeldhausen	3,1	4,5	0,90
173975	Br. Ilmspan	2,4	4,0	0,33
173976	Br. Großrinderfeld/Beunth	3,7	4,3	0,32
173977	Br. Tiefental	1,1	2,3	0,90
173978	Br. Sachsenhausen	2,5	5,2	0,43
	maximaler atmosphärischer Eintrag	3,0	6,5	0,60

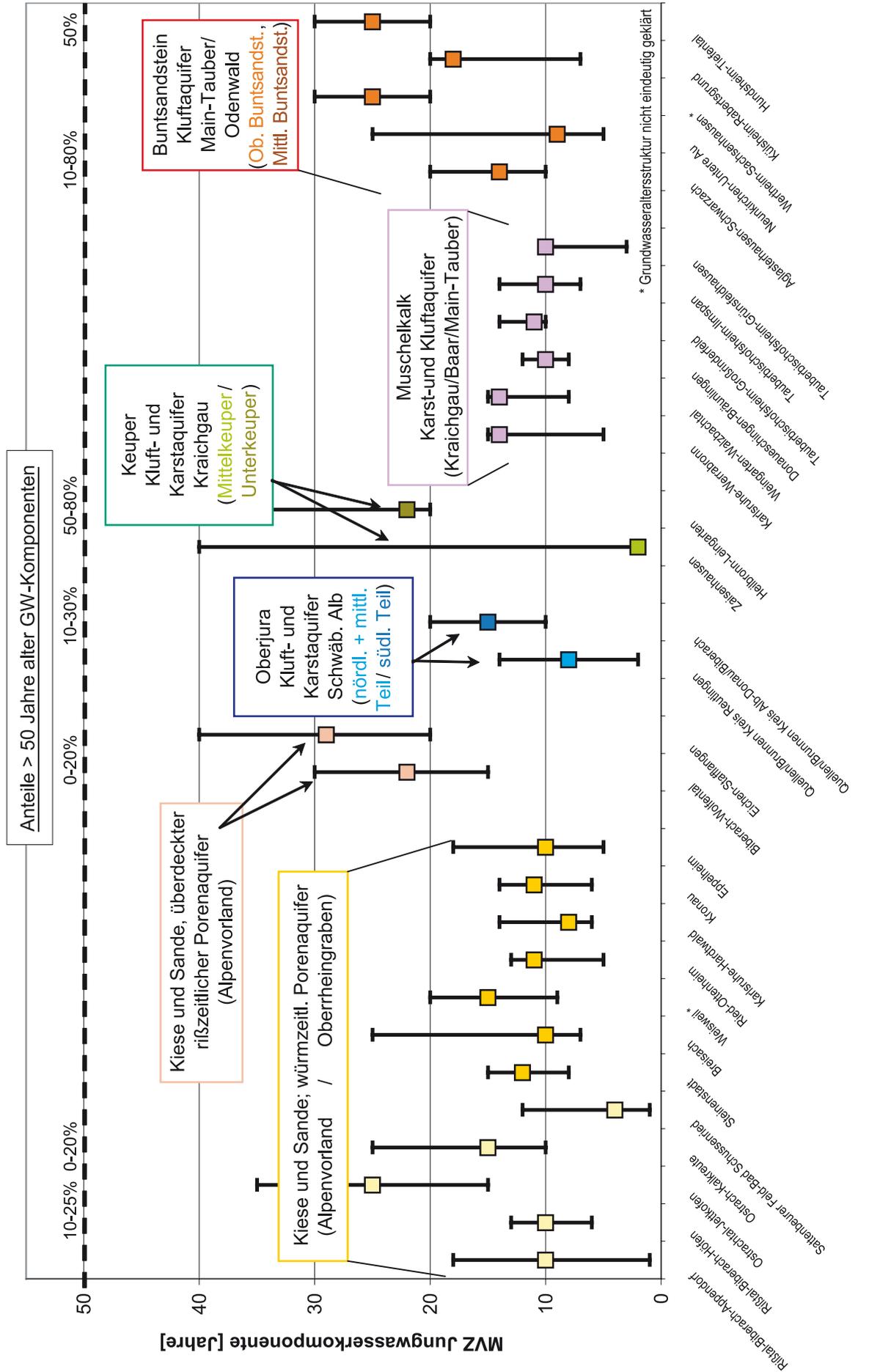
Werte überhöht
Abbauprozesse angezeigt
Überhöhung angezeigt

markante sekundäre Überprägungen ergeben. Die Zusammenstellung zeigt, dass in den meisten Grundwasserleitern die FCKW nicht zur Altersdatierung des Grundwassers herangezogen werden können.

Die Ergebnisse der Bestimmungen der Alterstruktur für die verschiedenen Grundwasseraufschlüsse finden sich in Tab. 4 und graphisch in Abb. 4.



Abb. 4 Graphische Darstellung der Mittleren Verweilzeiten oberflächennaher Grundwässer in Baden-Württemberg; Untersuchungen der Firma Hydroisotop 2006 (Hydroisotop 2007).



**Tab. 4** Ergebnisse der Ermittlung der Altersstruktur oberflächennaher Grundwässer in Baden-Württemberg; Untersuchungen der Firma Hydroisotop 2006 (Hydroisotop 2007).

Untersuchungsgebiet/ GW-Aufschluss	geologische Einheit	Berechnung GW-Altersstruktur	MVZ Jungwasser- komponenten [Jahre]		Anteil 3H-freie GW- Komponenten > 50 Jahre [%]
			beste Anpassung	Spektrum/ Umfeld	
EM = Exponential-Modell EPM = EM u. Pistonflow-Mod. M(0) = Anteil altes GW					
<b>Ergebnisse von aktuellen Untersuchungsstandorten</b>					
<b>Alpenvorland</b>					
Rißtal/Biberach - Br. Appendorf	würmzeitl. Kiese	EM	10	1-18	0
Rißtal/Biberach - Br. Höfen III	würmzeitl. Kiese	EM	10	6-13	0
Ostrachtal - Br. Jettkofen II	würmzeitl. Kiese	EM	25	15-35	10-25
Sattenbeurer Feld - Br. Schussenried-3	würmzeitl. Kiese	EM	4	1-12	0
Biberach/Wolfental - Quellsammler/GWM4	rißzeitl. Kiese, überdeckt	EPM (50 % EM) // M(0)	22	15-30	0-20
Eichen/Stafflangen - Br. II	rißzeitl. Kiese, überdeckt	EPM (50% EM)	29	20-40	0-10
<b>Oberheingraben Süd</b>					
Steinenstadt - TB II	würmzeitl. Kiese (OKL)	EPM (75% EM)	12	8-15	0
Breisach - GWM 105/019	würmzeitl. Kiese (OKL)	EM	10	7-25	0
Weisweil - Br. Weisweil/Bauer *	würmzeitl. Kiese (OKL)	EPM (75 % EM)	(15)	(9-18)	(0)
Ried-Ottenheim - TB 2 (West)	würmzeitl. Kiese (OKL)		10	5-13	0
<b>Oberheingraben Nord</b>					
Karlsruhe-Hardtwald - Br. W1, N2	würmzeitl. Kiese (OKL+MKL)	EM	8	6-14	0
Kronau - GWM 2flach, GWM 1/99	würmzeitl. Kiese (OKL)	EM	11	6-14	0
Eppelheim - Br. 1	würmzeitl. Kiese (OKL)	EM	10	5-18	0
<b>Kraichgau</b>					
Karlsruhe - Quelle Werrabronn	Ob. u. Mittl. Muschelkalk	EPM (50% EM)	14	5-15	0
Walzbachtal - Br. 1 Schmalenst. u. Pfalz Wies.	Ob. u. Mittl. Muschelkalk	EPM (75% EM)	14	8-15	0
Zaisenhäuser - TB Mörsbach	Mittelkeuper	EM	2	2-40	0
Heilbronn/Leingarten - Br. Große Hohle	Unterkeuper	EPM (50%)//M(0)	22	20-40	50-80
<b>Main-Tauber</b>					
Tauberbischofsheim - Br. Großrinderfeld	Ob. u. Mittl. Muschelkalk	EM	11	10-14	0
Tauberbischofsheim - Br. Ilmspan	Mittlerer Muschelkalk	EM	10	7-14	0
Tauberbischofsheim - Br. Grünsfeldhausen II	Mittlerer Muschelkalk	EM	10	7-10	0-10
Wertheim - Br. Sachsenhausen *	Oberer Buntsandstein	EM	(25)	(20-30)	(30%)
Külsheim - Br. Rabertsgrund	Oberer Buntsandstein	EPM (60% EM)	18	7-20	0
Hundsheim - Br. Tiefental	Mittlerer Buntsandstein	EPM (50% EM) // M(0)	25	20-30	50
<b>Ergebnisse aus weiteren Untersuchungsprojekten</b>					
<b>Schwäbische Alb</b>					
Quellen u. Brunnen Kreis Reutlingen	Oberjura, Seichter Karst	EM	8	2-14	0
Quellen u. Brunnen Kreis Alb-Donau/Biberach	Oberjura, Tiefer Karst	EM	15	10-20	10-30
<b>Neckar-Odenwald</b>					
Schwarzach - TB Aglasterhausen I u. II	Oberer Buntsandstein	EM	12	10-18	10-70
Neunkirchen - TB Untere Au	Ob. u. Mittl. Buntsandstein	EM	5	2-15	20-80
<b>Baar-Heuberg</b>					
Donaueschingen/Bräunlingen - TB Ebermann	Ob. u. Mittl. Muschelkalk	EM	10	8-12	0
<b>Alpenvorland</b>					
Ostrach/Kalkreute - Br. Spitzbreite	würmzeitl. Kiese, überdeckt	EM	15	10-25	0-20

\* Altersstruktur nicht eindeutig geklärt



## 5.3 Zusammenfassende Übersicht

In Tab. 5 sind die Ergebnisse von Untersuchungen zur Altersstruktur der oberflächennahen Grundwässer in Baden-Württemberg zusammenfassend dargestellt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Studien zeigen teilweise eine deutliche Streubreite, wohl zurückzuführen auf die unterschiedlichen hydrogeologischen und hydrologischen Randbedingungen der untersuchten Grundwasseraufschlüsse bei den einzelnen Studien. Trotzdem lassen sich zusammen mit den Ergebnissen der aktuell durchgeführten Untersuchungen (Kap. 5.2) für die wichtigen Grundwasserleiter Baden-Württembergs Gesetzmäßigkeiten hinsichtlich der Altersstruktur der oberflächennahen Grundwässer feststellen.

### Quartäre Kiese und Sande (Oberrheingraben, Alpenvorland)

Die oberflächennahen Grundwässer in den quartären Porengrundwasserleitern im Oberrheingraben weisen Mittlere Verweilzeiten von im Mittel 10 Jahren mit Schwankungen zwischen 5 und 15 Jahren auf. In Einzelfällen wurden auch Mittlere Verweilzeiten bis zu 25 Jahren festgestellt. Insgesamt ist eine tiefenabhängige Altersschichtung innerhalb der mächtigen Grundwasserleiter zu erwarten.

Als maßgebliche Einflussgrößen lassen sich die Verbreitung von geringdurchlässigen Deckschichten, die Tiefe der Grundwasserentnahme und die Lage des Grundwasseraufschlusses zur Wasserscheide, d.h. die Größe des Einzugsgebiets, nennen. Die angesichts der meist nur geringmächtigen Deckschichten und der großen Durchlässigkeiten hohen Mittleren Verweilzeiten dürften wohl auf das große Speichervolumen der Porengrundwasserleiter zurückzuführen sein, woraus ein großer Umsatzraum für das Grundwasser resultiert.

Ist der Grundwasserleiter durch geringdurchlässige Zwischenschichten in Grundwasserstockwerke gegliedert wie im nördlichen Oberrheingraben, nimmt die Mittlere Verweilzeit unterhalb der Trennschichten sprunghaft zu. So betragen die Mittlere Verweilzeiten im Mittleren Kieslager bereits  $\gg 50$  Jahre (z. T.  $> 1000$  a). Im Vergleich zu den Festgesteinsgrundwasserleitern sind die Variationsbreiten der Mittleren Verweilzeit in den untersuchten Porengrundwasserleitern gering.

Im Alpenvorland betragen die Mittleren Verweilzeiten der oberflächennahen Grundwässer im Mittel

ebenfalls etwa 10 Jahre und variieren etwa zwischen 4 und 15 Jahren. Wichtige Einflussgrößen sind auch hier geringdurchlässige Deckschichten (Moränen- oder Beckensedimente) sowie die Lage des Grundwasseraufschlusses zur Wasserscheide und zu hydraulisch wirksamen Rändern.

In den Tälern stehen die Grundwasservorkommen meist mit oberirdischen Fließgewässern in hydraulischem Kontakt. Der Einfluss von kurzfristigem, direktem Uferfiltrat führt in aller Regel zu einer Verjüngung des Grundwassers.

Eine Sonderstellung nehmen im Bereich von Biberach untersuchte Grundwasservorkommen ein, die durch mehrere 10er-Meter mächtige Moränenablagerungen überdeckt sind. Die ermittelten Mittleren Verweilzeiten liegen hier bei ca. 20 bis 30 Jahren. Zusätzlich wurden z. T. Grundwasserkomponenten mit einem Alter  $> 50$  Jahren nachgewiesen. Diese alten Anteile könnten aus den Deckschichten, den geringdurchlässigen Schichten im Grundwasserleiter und aus der unterlagernden Molasse stammen. Vergleichsweise alte Grundwässer sind auch in den tieferen Bereichen pleistozäner Becken zu finden (z. B. Singener Becken).

### Oberjura

Im Oberjura-Karstgrundwasserleiter der Schwäbischen Alb ist generell eine Zunahme der Mittleren Verweilzeiten des Grundwassers von Norden nach Süden festzustellen. Im Norden nahe der Karstwasserscheide im Bereich des Seichten Karsts und der Offenen Zone des Tiefen Karsts betragen die Mittleren Verweilzeiten ca. 2 bis 6 Jahre. Für Brunnen und Quellen mit größeren Einzugsgebieten und damit großen Umsatzräumen im mittleren Teil der Schwäbischen Alb liegen die Mittleren Verweilzeiten bei 5 bis 15 Jahren. Neben der langfristigen Grundwasserkomponente mit einer Verweilzeit von Jahren können in den vergleichsweise flachen Grundwasserzirkulationssystemen als Folge von Starkniederschlägen oder Schneeschmelze kurzfristige Abflusskomponenten mit Mittleren Verweilzeiten von Tagen bis Monaten auftreten. Ihr Anteil am Gesamtabfluss reicht maximal bis etwa 30%.

Am Südrand der Schwäbischen Alb im Grenzbe-  
reich zum Überdeckten Karst betragen die Mittleren Verweilzeiten 10 bis 20 Jahre, wobei zusätzlich eine  $> 50$  Jahre alte Grundwasserkomponente mit Anteilen bis 30% auftritt. Diese findet sich vor allem in Brunnen mit vergleichsweise schlechtem Grundwasseranschluss bzw. mit Anschluss an aufsteigende Tiefenwasserfließsysteme nahe der Donau. Demgegenüber tritt bevorzugt in stark schütten-  
den Quellen mit Anschluss an ein weit entwickeltes

**Tab. 5** Ergebnisse von Untersuchungen zur Altersstruktur der oberflächennahen und der nutzbaren tiefen Grundwässer in Baden-Württemberg.

Hydrogeologische Einheit	Ergebnisse der Untersuchungen mit Quellenangabe
Quartäre und jungtertiäre Deckschichten	keine systematischen Untersuchungen bekannt
Quartäre Becken- und Moränensedimente	keine systematischen Untersuchungen bekannt
Quartäre/pliozäne Sande und Kiese (Oberrheingraben)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• im OKL: MVZ &lt; 50 a (HGK 1987)</li> <li>• im OKL: überwiegend MVZ = 2 – 15 a, vereinzelt größer (Hydroisotop 1992)</li> <li>• &lt; 40 m Tiefe (OKL?): überwiegend MVZ = 5 – 15 a; für Entnahmetiefen &gt; 40 m (MKL?): überwiegend MVZ &gt; 100 a (Hydroisotop 1992)</li> <li>• im MKL und tiefer: MVZ bis &gt; 50 a (HGK 1987)</li> <li>• im MKL und tiefer: MVZ bis &gt; 1000 a (HGK 1988)</li> </ul>
Fluvioglaziale Kiese und Sande (Alpenvorland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klettgaurinne: bei vergleichsweise großen Flurabständen (20 – 50 m): MVZ = 4 – 10 a, bei zusätzlicher Überdeckung der Kiese durch Seesedimente: MVZ = 11 a (HGK 1992)</li> <li>• Zartener Becken: MVZ = 1 – 4 a (HERDEG 1993)</li> <li>• Oberes Argental: MVZ &lt; 4 a (HGK, in Vorbereitung)</li> <li>• Argendelta: MVZ = 4 – &lt; 15 a (WATZEL 1994)</li> <li>• Quellen: MVZ = 5 – 15 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• Brunnen in Becken und tiefen GW-Stockwerken: MVZ &gt; 50 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• Singener Beckenkomplex: MVZ ≤ 5 – 20 a, z. T. auch MVZ &gt; 40 a in Abhängigkeit von der Tiefenlage und den Gesteinsdurchlässigkeiten (Stadtwerke Singen 1996)</li> <li>• Kiesfeld Engen – Neuhausen – Welchingen – Ehingen: MVZ = 6 – 8 a (DICKEL 1993)</li> <li>• Schussental (würmeiszeitliche Kiese unter 20 m Moränenüberdeckung): MVZ = 8 – 15 a (Hydroisotop 2002)</li> </ul>
Jungquartäre Flusskiese und -sande	keine systematischen Untersuchungen bekannt
Junge Magmatite	keine systematischen Untersuchungen bekannt
Tertiär im Oberrheingraben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ = 5 – 25 a (Hydroisotop 1987)</li> </ul>
Obere Meeresmolasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für oberflächennahe Grundwässer keine systematischen Untersuchungen bekannt; mit zunehmender Überdeckung durch Obere Süßwassermolasse: MVZ &gt; 10 000 a (BERTLEFF 1986, BERTLEFF et al. 1993)</li> </ul>
Übrige Molasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quelfassungen in der OSM: MVZ = 5 – 10 a</li> <li>• Brunnen in der OSM: MVZ = 15 – 25 a</li> <li>• Tiefbrunnen in der OSM: MVZ = 30 – &gt; 80 a, z. T. &gt; 10 000 a</li> </ul>
Oberjura, Schwäbische Fazies	<p><b>Karstquellen: meist Anschluss an hochdurchlässige weit entwickelte Karstsysteme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seichter Karst (Albnordrand): MVZ = 14 – 18 a (HGK 2002)</li> <li>• Tiefer Karst (Albsüdrand): MVZ = 22 – 77 a (HGK 2002)</li> <li>• Tiefer Karst (Mittlere Alb): MVZ = 2 – 30 a (je nach Abstand von der Karstwasserscheide im Norden (LGRB &amp; Hydroisotop 2000, 2004))</li> <li>• Seichter Karst und Tiefer Karst (Mittlere Alb und Ostalb): Je nach Abstand von der Karstwasserscheide: MVZ = 5 – 15 a (Hydroisotop 2007)</li> </ul>



Hydrogeologische Einheit	Ergebnisse der Untersuchungen mit Quellenangabe
Oberjura, Schwäbische Fazies	<p><b>Brunnen: Entwässerung je nach Grundwasseranschluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ = 47 – 62 a (HGK 2002)</li> <li>• MVZ = 12 – 16 a, nahe der Donau mit Aufstieg von Tiefenwasserkomponente: MVZ &gt; 50 a – &gt; 100 a (LGRB &amp; Hydroisotop 2000, 2004)</li> <li>• Vergleichsweise große Variation. Seichter Karst (Albnordrand): MVZ = 2 – 20 a; Tiefer Karst (Albsüdrand) MVZ = 20 – &gt; 50 a Am Albsüdrand, Donauried: Brunnen mit größeren Anteilen von altem tritiumfreiem Wasser (LGRB &amp; Hydroisotop 2000, 2004; Hydroisotop 2007)</li> </ul> <p><b>Von Molasse überdeckter Tiefer Karst:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ &gt; 1 000 – &gt; 10 000 a (BERTLEFF 1986, BERTLEFF et al. 1987, 1988, 1993, PRESTEL 1990)</li> </ul>
Oberjura, Rauracische Fazies	keine systematischen Untersuchungen bekannt
Oberjura, Helvetische Fazies	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ &gt; 10 000 a bis tertiäres Wasseralter (BERTLEFF 1986, BERTLEFF et al. 1987, 1988, 1993, PRESTEL 1990)</li> </ul>
Mittel- und Unterjura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ = 4 – 10 a (Hydroisotop 1992)</li> <li>• MVZ = 8 – 25 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• MVZ &lt; 50 a (bis 15 m), darunter (15 – 20 m) MVZ &gt;&gt; 50 a; im unverwitterten Gebirge (ab 25 – 30 m Tiefe) MVZ &gt; 1 Mio. a (GLA 1992, HEKEL 1994)</li> </ul>
Oberkeuper und oberer Mittelkeuper	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ = 3 – 8 a, z. T. MVZ bis 20 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• MVZ = 2 – 9 a (Hydroisotop 1992)</li> <li>• flache Grundwasserfließsysteme MVZ = 3 – 7 a; tieferreichende Grundwasserfließsysteme MVZ = 35 – 80 a (UFRECHT 1987)</li> </ul>
Gipskeuper und Unterkeuper	<ul style="list-style-type: none"> <li>• überwiegend (80% der untersuchten Proben): MVZ &lt; 2 a (HGK 1995)</li> <li>• MVZ = 8 – 10 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• MVZ = 3 – 11 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Oberer Muschelkalk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bei starker Verkarstung (50 % der untersuchten Wässer): MVZ &lt; 2 a (HGK 1995)</li> <li>• bei geringerer Verkarstung und Überdeckung mit mächtigerem Keuper: MVZ = 2 – 5 a (HGK 1995)</li> <li>• MVZ = 3 – 8 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• Quellen: MVZ = 2 – 9 a; tiefe Brunnen: z. T. jung mit MVZ &lt; 10 a, z. T. alt mit MVZ &gt; 50 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Mittlerer Muschelkalk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quellen (hydrogeologische Zuordnung unsicher): MVZ = 4 – 9 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Unterer Muschelkalk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quellen (hydrogeologische Zuordnung unsicher): MVZ = 2 – 8 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Oberer Buntsandstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quellen: MVZ = 3 – 11 a; z. T. auch MVZ &gt; 60 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Mittlerer und Unterer Buntsandstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MVZ &lt; 3 a bis 4 – 8 a, z. T. bis 20 a; in tiefer Position (Seewiesenquellen) MVZ = 8 – 10 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• MVZ extrem groß (tertiäres Wasseralter) in tiefer Lage (Geothermiebohrung Bruchsal 1a; BERLEFF et al. 1987, 1988)</li> <li>• Quellen: MVZ = 4 – 7 a; z. T. auch MVZ &gt; 60 a (Hydroisotop 1992)</li> </ul>
Paläozoikum, Kristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• oberflächennahe Fließsysteme: MVZ = 3 – 8 a, z. T. MVZ bis 20 a (Hydroisotop 1987)</li> <li>• MVZ extrem groß (tertiäres Wasseralter) in tiefer Lage (im Perm in der Geothermiebohrung Bruchsal 2; BERLEFF et al. 1987)</li> </ul>
Trias, ungegliedert	keine systematischen Untersuchungen bekannt

Karstsystem eine direkte junge Abflusskomponente auf, die bei Hochwasser 5 bis 10% ausmachen kann.

Nach den bisherigen Erkenntnissen der Untersuchungen der Altersstruktur besteht das Grundwasser im Tiefen Karst des Oberjuras aus langfristigem Grundwasser, das im Kleinkluftnetz und den lehmigen Kluffüllungen über Jahre bis Jahrzehnte gespeichert ist. Die schnellen Abflusskomponenten spielen trotz Verkarstung mengenmäßig nur eine untergeordnete Rolle.

Für die Mittlere Verweilzeit im Oberjura der Schwäbischen Alb sind die Lage zur Wasserscheide, d. h. die Größe des Einzugsgebiets und der Grundwasseranschluss der Quelle oder des Brunnens an hochdurchlässige Abflussbahnen maßgebliche Einflussgrößen. Sind diese Parameter bekannt, lassen sich die Mittleren Verweilzeiten relativ zuverlässig abschätzen.

### Keuper

Für die Grundwasservorkommen in den Sandsteinen des Oberkeupers und des oberen Mittelkeupers wurden geringe Mittlere Verweilzeiten von zwei bis neun Jahren und nur in Ausnahmefällen Werte bis 20 Jahren ermittelt.

Die Entwässerung der Kluffundwasserleiter erfolgt überwiegend über Schichtquellen mit kleinen Einzugsgebieten und geringen Schüttungsraten von wenigen Litern pro Sekunde (l/s). Ein Grund für die geringe Größe der Einzugsgebiete ist die geringe Mächtigkeit der Grundwasserleiter, die dazu führt, dass selbst an Störungen mit kleineren Versatzbeiträgen der Grundwasserleiter gegen Grundwassergeringleiter versetzt wird. Bei Brunnen dürfte die Güte des Grundwasseranschlusses ausschlaggebend sein. Nur in besonderen tektonischen Positionen, z. B. in tektonischen Mulden, können sich Fließsysteme mit längeren Verweilzeiten ausbilden.

Die Grundwasservorkommen in den Kluff- und Karstgrundwasserleitern im Gips- und Unterkeuper weisen ganz überwiegend geringe Mittlere Verweilzeiten von <2 Jahren auf. Es handelt sich um kleinräumige Grundwasserkörper, die wie die Vorkommen im Oberkeuper und oberen Mittelkeuper oft tektonisch begrenzt sind. Wie insgesamt bei den Kluff- und Karstgrundwasserleitern ist der Grundwasseranschluss des Brunnens oder der Quelle eine wichtige Einflussgröße für die Mittlere Verweilzeit.

Höhere Mittlere Verweilzeiten von 20 bis 40 Jahren und bis 70% Tritium-freies Grundwasser mit einem Alter >50 Jahren wurde im Bereich der

Heilbronner Mulde festgestellt. Diese hohen Grundwasseralter stehen in Zusammenhang mit den besonderen tektonischen Verhältnissen, die hier die Ausbildung tiefreichender Grundwasserfließsysteme ermöglichen.

### Muschelkalk

Die 2006 durchgeführten Untersuchungen (Hydroisotop 2007) liefern vergleichsweise große und einheitliche Mittlere Verweilzeiten für Grundwasservorkommen im Oberen Muschelkalk von 10 bis 14 Jahren. Alle neu untersuchten Brunnen besitzen hohe Ergiebigkeiten und große Einzugsgebiete, die zudem zu großen Teilen von Lösssedimenten überdeckt sind.

Dass im Oberen Muschelkalk auch Grundwässer mit einer anderen Altersstruktur auftreten, zeigen die Ergebnisse anderer Untersuchungen (Tab. 5). Hierbei schwanken die Mittleren Verweilzeiten generell zwischen <2 und etwa 10 Jahren.

Insgesamt sind für die Grundwasservorkommen im Oberen Muschelkalk sehr uneinheitliche Mittlere Verweilzeiten zu erwarten. Wichtige Einflussgrößen sind die Größe des Einzugsgebiets, der Grundwasseranschluss der Probenahmestelle und vor allem auch die Überdeckungssituation im Einzugsgebiet (Überlagerung durch Lösssedimente bzw. Unterkeuper).

Vergleichbare Verhältnisse dürften für den Unteren Muschelkalk vorliegen, wohingegen die Grundwasserzirkulation im Mittleren Muschelkalk bereits deutlich eingeschränkt sein dürfte (die Untersuchung an einem Brunnen im Main-Tauber-Kreis ergab eine Mittlere Verweilzeit von 30 Jahren mit markanten Anteilen Tritium-freien Wassers).

### Buntsandstein

Die für die Grundwässer im Buntsandstein ermittelten Mittleren Verweilzeiten überdecken eine große Spannweite zwischen wenigen Jahren und 10 bis 20 Jahren, vereinzelt auch > 50 Jahren. Verantwortlich sind die unterschiedlichen Wasserwegsamkeiten im Buntsandstein. Während sich das Grundwasser auf den Großklüften und Störungen mit hohen Fließgeschwindigkeiten bewegt und der Grundwasserumsatz in vergleichsweise kurzen Zeiträumen stattfindet, erfolgt die Grundwasserbewegung auf den Kleinklüften sehr langsam und der Grundwasserumsatz ist sehr eingeschränkt. Typisch für den Buntsandstein ist, dass in unmittelbarer Nachbarschaft alte Grundwässer und junge Grundwässer vorkommen, die in den Grundwasseraufschlüssen je nach Grundwasseranschluss zu unterschied-



lichen Anteilen erschlossen werden. Weitere maßgebende Einflussgröße für die Mittlere Verweilzeit ist die Überlagerung durch Lösssedimente, Röttonen oder Unteren Muschelkalk.

### **Grundwassergeringleiter**

In Grundwassergeringleitern erfolgt der Grundwasserumsatz nur sehr oberflächennah. Für Lockergesteine (z. B. Beckensedimente) gibt es nur sehr wenige Untersuchungen, die bereits in geringer Tiefe sehr große Mittlere Verweilzeiten ergaben. Für Festgesteine sind die Untersuchungsergebnisse der Opalinuston-Studie (GLA 1992, HEKEL 1994) typisch. Unter einer geringdurchlässigen stark verwitterten Bodenbildung folgt eine Auflockerungszone, die im Opalinuston etwa bis 20 m Tiefe reicht und in der ein

gewisser Grundwasserumsatz stattfindet. In dieser Zone liegt die Mittlere Verweilzeit noch < 50 Jahre, allerdings ist eine deutliche Zunahme der Mittleren Verweilzeit mit der Tiefe zu beobachten. Im darunter folgenden unverwitterten Gestein herrschen praktisch stagnierende Grundwasserverhältnisse mit Mittleren Verweilzeiten > 1 Mio. Jahre.

Etwas andere Verhältnisse finden sich im Kristallin. Für oberflächennahe Fließsysteme in der Verwitterungszone und im aufgelockerten Gebirgsbereich betragen die Mittleren Verweilzeiten 3 bis 8 Jahre, in mächtigen Schuttdecken auch bis 20 Jahre. Mit zunehmender Tiefe steigen die Mittleren Verweilzeiten generell an und sind in starkem Maße vom Grundwasseranschluss des jeweiligen Brunnens abhängig.





## 6 Schlussfolgerungen

Als Fazit der Untersuchungen der Mittleren Verweilzeit kann festgehalten werden, dass die oberflächennahen Grundwässer in Baden-Württemberg nicht zwangsläufig „jung“ sind. Die Mittleren Verweilzeiten schwanken in den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten zwischen wenigen Jahren und mehreren Jahrzehnten. In einzelnen Fällen war der sogenannten Jungwasserkomponente auch noch altes Grundwasser mit Mittleren Verweilzeiten >50 Jahre beigemischt.

Als maßgebliche Einflussgrößen wurden in den bisherigen Studien identifiziert:

- Grundwasserneubildungsbedingungen (Deckschichten, Grundwasserflurabstand, Oberflächenwassereinfluss)
- Speichereigenschaften des Grundwasserleiters (Porosität, Größe des Einzugsgebiets)
- Grundwasserdynamik (hydraulische Durchlässigkeiten, Fließgradienten, Grundwasserentnahmen)
- Größe der Grundwasserfließsysteme (lokal, regional, überregional)
- Probenahmebedingungen (Grundwasseranschluss des Brunnens oder der Grundwassermessstelle, hydrologische Verhältnisse)

Diese Faktoren sind in den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in unterschiedlichem Maße relevant. So sind bei den Porengrundwasserleitern neben den hydraulischen Kennwerten die Mächtigkeit und Ausbildung der Deckschichten sowie die Größe des Einzugsgebiets ausschlaggebend. Das große Porenvolumen und der große resultierende Speicherraum führen bei relativ geringer Fließdynamik zu vergleichsweise hohen Mittleren Verweilzeiten und bei geringer Heterogenität zu geringen Schwankungsbreiten.

Die Grundwasserfließsysteme in den Kluft-/Karstgrundwasserleitern (Oberjura, Oberer Muschelkalk) verfügen meist ebenfalls über einen großen Grundwasserspeicher, der im Wesentlichen aus großen Einzugsgebieten resultiert. Deshalb ist hier für die Mittlere Verweilzeit des Grundwassers vor allem die Lage des Grundwasseraufschlusses zur Grundwasserscheide und zu den Aquiferrändern ausschlaggebend.

Bei den Kluftgrundwasserleitern (Keuper, Buntsandstein) ist vor allem der Grundwasseranschluss der Quelle, des Brunnens oder der Grundwassermessstelle entscheidend. Wegen der ausgeprägten Inhomogenitäten der Leiter- und Speichereigenschaften treten lateral auf engem Raum große Unterschiede in der Altersstruktur des Grundwassers auf. Diese sind auch für die große Spannbreite der Mittleren Verweilzeit in den Grundwasseraufschlüssen und die große Unsicherheit hinsichtlich einer Prognose für eine Probenahmestelle verantwortlich.

Bezüglich der Beurteilung von Stoffverlagerungen, beispielsweise von Nitrat oder PSM, ist anzumerken, dass die Mittlere Verweilzeit des Wassers im Untergrund nur ein Parameter ist, der diese Prozesse beeinflusst. Neben Ab- und Umbauprozessen kann vor allem die Zwischenspeicherung von Schadstoffen im Boden, in der Ungesättigten Zone und im Grundwasserleiter den Schadstoffaustrag erheblich beeinflussen. In den Porengrundwasserleitern ist in vielen Fällen mit ersten Austrägen eines eingetragenen Schadstoffs nach einigen Jahren zu rechnen, während für den Großteil der Schadstoffe Antwortzeiten von 10 bis 20 Jahren realistisch sind. Bei den Kluft- und Karstgrundwasserleitern sind wegen der meist vorhandenen sehr kurzfristigen Abflusskomponenten erste Reaktionen bereits sehr bald zu erwarten, während auch hier je nach hydrogeologischer Situation wesentliche quantitative Austräge erst nach 10 Jahren und mehr auftreten dürften. Die vollständige Sanierung eines Grundwasservorkommens wird sich, wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, in den meisten Fällen über viele Jahrzehnte hinziehen (LGRB & Hydroisotop 2000).





## Literatur

- BERTLEFF, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malmkarst des West-Teils des süd-deutschen Molassebeckens. – Abh. Geol. L.-Amt Baden-Württ., **12**: 271 S., 64 Abb., 15 Tab.; Freiburg i. Br.
- , HAMMER, W., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., STOBBER, I., STRAYLE, G. & VILLINGER, E. (1987): Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. Eine Übersicht. – Z. dt. geol. Ges., **138**: 411 – 423, 8 Abb., 1 Tab.; Hannover
- , JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. Eine Übersicht. – Jh. geol. L.-Amt Baden-Württ., **30**: 27 – 116, 30 Abb., 6 Tab.; 1 Taf., 2 Beil.; Freiburg i. Br., Hannover.
- , EICHINGER, L., ELLWANGER, D., SZENKLER, C., TRIMBORN, P. & WOLFENDALE, N. (1993): Interpretation of hydrochemical and hydroisotopical measurements on paleogroundwaters in Oberschwaben, South German Alpine foreland, with focus on Quaternary geology. – In: Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and atmosphere, Proceed. internat. Symp. Vienna 1993, IAEA-SM-329/63: 337 – 357, 11 Abb., 1 Tab.; Vienna.
- DICKEL, T. (1993): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung unter Berücksichtigung der punktuellen Gefährdung von infiltrierenden Oberflächengewässern. – Dipl. Arb. Univ. Freiburg: 118 S.; Freiburg i. Br.
- DVWK (1995): Speicher-Durchfluss-Modelle zur Bewertung des Stoffein- und Stoffaustrages in unterschiedlichen Grundwasser-Zirkulationssystemen. – DVWK-Schr., **109**: 95 S., 47 Abb., 11 Tab.; Bonn.
- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, **L 327**, 43. Jg., 22. Dezember 2000.
- GLA (1992): Forschungsprojekt „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“. – Abschlußbericht: 190 S.; Freiburg i. Br.
- HEKEL, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). – Tüb. Geowiss. Arb., **C 18**: 170 S., 131 Abb., 12 Tab.; Tübingen.
- HERDEG, U. (1993): Untersuchungen zu den Grundwasserfließsystemen im Bereich der Wasserwerke von Freiburg i. Br. auf der Grundlage isotopenhydrologischer und geologischer Daten. – Diss. Univ. Freiburg: 231 S.; Freiburg i. Br.
- HGK (1985): Heilbronner Mulde: 121 S., 54 Abb., 21 Tab., 13 Kt.; Freiburg i. Br.
- (1987): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum – Situation heute, Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen: 107 S., 42 Abb., 16 Tab., 12 Kt.; Stuttgart, Wiesbaden, Mainz.
- (1988): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Raum Karlsruhe-Speyer – Analyse des Ist-Zustands: 111 S., 23 Abb., 9 Tab., 13 Kt.; Freiburg i. Br.
- (1992): Klettgau: 70 S., 28 Abb., 14 Tab., 11 Kt.; Freiburg i. Br.
- (2002): Ostalb: 66 S., 23 Abb., 20 Tab., 10 Kt.; Freiburg i. Br. (RPF-LGRB)
- (in Vorb.): Isny; Freiburg i. Br. (RPF-LGRB).
- HÖLTING, B., HAERTLÉ, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K.H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W. & WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb., **C 63**: 5 – 24, 5 Tab.; Hannover.
- Hydroisotop (1987): Ergebnisse der Isotopengehaltsbestimmungen im Rahmen des Grundwassergüteprogramms. – Intern. Ber.: 14 S.; Attenkirchen
- (1992): Grundwasserbeschaffenheitsmessnetz Baden-Württemberg Ergebnisse von Tritium- und Sauerstoff-18-Gehaltsbestimmungen. – Intern. Ber.; Schweitenkirchen. – [unveröff.]
- (2002): Wasserschutzgebiet Kümmerazhofen und Gaisbeuren, Untersuchungen zur Nitratproblematik im Grundwasser. – Intern. Ber., Schweitenkirchen. – [unveröff.]
- (2007): Ermittlung der Grundwasserverweilzeiten oberflächennaher Aquifereinheiten in Baden-Württemberg. – Ber. i. A. des RPF-LGRB, Bearb.: HEINZ, J., BINDER, E., HEIDINGER, M. und EICHINGER, L.: 49 S., 3 Abb., 4 Tab., 44 Anl.; Schweitenkirchen.



- LGRB (2002): Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg. – LGRB-Ber. i. A. des UVM: 30 S., 5 Tab., 11 Anl., 15 Kt.; Freiburg i. Br. – [unveröff.]
- (2004): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjura – Alb-Donau-Kreis und Landkreis Biberach. – Abschlußbericht: 66 S.; Freiburg i. Br.
- (2005): Hydrogeologische Grundlagen für eine Optimierung der Wasserversorgung für den Landkreis Schwäbisch Hall. – Untersuchung i. A. des UVM: 19 S., 2 Abb., 3 Tab., 6 Anl.; Freiburg i. Br.
- LGRB & Hydroisotop (2000): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjura – Bereich Landkreis Reutlingen. – Abschlußbericht: 46 S.; Freiburg i. Br.
- PRESTEL, R. (1990): Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgesteinen und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. – Diss. Univ. Stuttgart: 217 S., 80 Abb., 8 Tab.; Stuttgart.
- Stadtwerke Singen [Hrsg.] (1996): Grundwasserbewirtschaftungskonzept Singen: 119 S.; Singen.
- UFRECHT, W. (1987): Zur Hydrogeologie und Hydrochemie des Sandsteinkeupers in Mittel- und Ostwürttemberg. – Diss. Univ. Stuttgart: 136 S.; Stuttgart.
- WATZEL, R. (1994): Stofftransportmodellierung im Grundwasser des Argendeltas unter Verwendung des Umweltisotops Tritium. – Diss. Univ. Freiburg: 147 S.; Freiburg i. Br.



## Abkürzungen

Br.	Brunnen
dpm	Zerfälle pro Minute ( <b>disintegration per minute</b> )
DVWK	<b>Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.</b> , Bonn (seit 01/2000: DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.)
EM	<b>Exponential-Modell</b>
EMP	<b>Exponential-Modell und Piston-Flow-Modell</b>
FCKW	<b>Fluorchlorkohlenwasserstoff(e)</b>
fmol	<b>femtomol</b> (entsprechend $10^{-15}$ mol)
GLA	<b>Geologisches Landesamt Baden-Württemberg</b> , Freiburg i. Br. (seit 07/1998: LGRB, seit 01/2005: RPF-LGRB)
GÜ 500	<b>Geologische Übersichtskarte 1 : 500 000</b>
GW	<b>Grundwasser</b>
GWM	<b>Grundwassermessstelle</b>
HGK	<b>Hydrogeologische Kartierung</b>
HÜ 500	<b>Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 500 000</b>
IAEA	Internationale Atomenergieorganisation, Wien ( <b>International Atomic Energy Agency</b> )
LfU	<b>Landesanstalt für Umweltschutz</b> (seit 01/2006: LUBW)
LGRB	<b>Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg</b> , Freiburg i. Br. (bis 06/1998: GLA, seit 01/2005: RPF-LGRB)
LUBW	<b>Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg</b> , Karlsruhe (bis 12/2005: LfU, seit 01/2006: LUBW)
MVZ	<b>Mittlere Verweilzeit(en)</b>
PFM	<b>Piston-Flow-Modell</b>
pmol	<b>picomol</b> (entsprechend $10^{-12}$ mol)
PSM	<b>Pflanzenschutzmittel</b>
SD-Modelle	<b>Speicher-Durchfluss-Modelle</b>
SF6	<b>Schwefelhexafluorid</b>
TB	<b>Tiefbrunnen</b>
TU	tritium <b>units</b> (1 TU = 0,1119 Bq/l)
u. Gel.	unter <b>Gelände</b>
UVM	<b>Umwelt- und Verkehrsministerium Baden-Württemberg</b> (1997 – 2005: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg seit 2005: Umweltministerium Baden-Württemberg)





## **LGRB – Informationen des Regierungspräsidium Freiburg · Abteilung 9**

Bis Heft 9 Informationen des GLA – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg · Bis Heft 15  
Informationen des LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

 <b>Heft 6</b> (1994)	Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen 114 S., 65 Abb., 11 Tab.	10,- €
 <b>Heft 10</b> (2001)	Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser 64 S., 42 Abb., 15 Tab., 1 CD-ROM	10,- €
 <b>Heft 12</b> (1999)	Freiburg im Breisgau — Geologie und Stadtgeschichte 60 S., 28 Abb., 2 Tab., 1 Taf., Beilage: 2 Kt.	5,- €
 <b>Heft 15</b> (2004)	Exotische Gehölze im Kirchheimer-Arboretum Freiburg 36 S., 48 Abb.	5,- €
 <b>Heft 16</b> (2005)	Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg 79 S., 46 Abb.	10,- €
 <b>Heft 17</b> (2005)	Ergebnisse neuer Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg 150 S., 17 Abb., 7 Tab., 3 Taf.	10,- €
 <b>Heft 18</b> (2006)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006 202 S., 209 + 12 Abb., 15 Tab., 1 Kt.	10,- €
 <b>Heft 19</b> (2007)	Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg) 130 S., 118 Abb., 12 Tab.	10,- €
 <b>Heft 20</b> (2008)	Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg 106 S., 79 Abb., 21 Tab., 1 Kt.	15,- €
 <b>Heft 21</b> (2008)	Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse 82 S., 36 Abb., 3 Tab im Anh., 10 Beil.	15,- €

*Preise zuzüglich Versandkosten.*

Nicht aufgeführte Heft-Nummern sind zurzeit vergriffen.