



**SPURENSTOFFLABOR**

**Bornweg 10  
67157 Wachenheim  
Telefon 0 63 22/94 38 0  
Fax 0 63 22/98 02 26  
eMail: [REDACTED]**

**Laborbericht:        Altersbestimmung an Grundwässern  
                         im Stadtgebiet von Oberursel (Hessen)**

**Berichterstatter: [REDACTED]**

**Auftraggeber:        HG Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH  
                         35394 Gießen**

**Datum:                18.05.2016**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Interpretation</b>	<b>2</b>
3.1	FCKW-Überhöhung im Grundwasser . . . . .	2
3.2	Altersbestimmung des Wassers . . . . .	3
3.3	Einbeziehung der FCKW-Überhöhung . . . . .	5
3.4	Einbeziehung der elektrischen Leitfähigkeit . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Fazit</b>	<b>8</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>9</b>

## Laborbericht:

# Altersbestimmung an Grundwässern im Stadtgebiet von Oberursel (Hessen)

## 1 Einführung und Zielsetzung

Im Auftrag des Büros HG GmbH, Gießen, wurde im Projekt Oberursel (Hessen), an Proben aus verschiedenen Brunnen und Messstellen im Stadtgebiet eine Altersbestimmung mit Hilfe der Umwelttracer FCKW F12, F11, F113 und Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) durchgeführt.

## 2 Messergebnisse

Tabelle 1: Messergebnisse der FCKW-/ $\text{SF}_6$ -Analysen der Wasserproben im Projekt 'Oberursel'. Die Probennahme erfolgte durch den Auftraggeber.

Bezeichnung	Probennahme- datum	FCKW-Konz. [pmol/l]			$\text{SF}_6$ -Konz. in fmol/l
		F12	F11	F113	
Br.1	27.11.2015	12 $\pm$ 3	0,25 $\pm$ 0,05	6 $\pm$ 1	0,2 $\pm$ 0,1
Br.2	27.11.2015	6,8 $\pm$ 0,4	0,28 $\pm$ 0,05	14 $\pm$ 3	<0,1
Br.3 neu	27.11.2015	1,2 $\pm$ 0,1	0,09 $\pm$ 0,05	0,7 $\pm$ 0,1	<0,1
Br.4	27.11.2015	6,8 $\pm$ 0,4	2,9 $\pm$ 0,3	19 $\pm$ 4	0,2 $\pm$ 0,1
Br.5	27.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,1
Br.6	27.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,1
Br.7	27.11.2015	4,0 $\pm$ 0,2	0,05 $\pm$ 0,05	15 $\pm$ 3	<0,1
GWM2 Aden. tief	29.09.2015	34 $\pm$ 7	20 $\pm$ 5	ca. 115	0,4 $\pm$ 0,1
GWM2/2007	28.08.2015	17 $\pm$ 4	72 $\pm$ 22	34 $\pm$ 11	0,6 $\pm$ 0,1
GWM3	03.11.2015	80 $\pm$ 24	19 $\pm$ 4	11 $\pm$ 3	2,0 $\pm$ 0,3
GWM4/2007	10.08.2015	11 $\pm$ 3	53 $\pm$ 16	ca. 150	2,6 $\pm$ 0,3
GWM6/2007	04.12.2015	19 $\pm$ 4	2,8 $\pm$ 0,3	1,2 $\pm$ 0,2	2,4 $\pm$ 0,3
GWM Holzweg	14.09.2015	34 $\pm$ 7	38 $\pm$ 12	36 $\pm$ 11	0,8 $\pm$ 0,1
KB1 Aden. flach	14.10.2015	71 $\pm$ 22	10 $\pm$ 2	1,7 $\pm$ 0,2	1,5 $\pm$ 0,2

### 3 Interpretation

Die zeitliche Struktur von Grundwässern kann mit Hilfe der FCKW-/SF<sub>6</sub>-Methode untersucht werden. Der FCKW-Gehalt in altem Grundwasser, das vor über 70 Jahren gebildet wurde, ist Null. Dagegen haben alle jüngeren Wässer messbare FCKW-Gehalte. Der Eintrag von SF<sub>6</sub> in das Grundwasser erfolgt entsprechend seit ca. 1970. Der zeitliche Verlauf der FCKW- und SF<sub>6</sub>-Konzentration wurde mit Hilfe des globalen atmosphärischen Anstiegs rekonstruiert. Es ergeben sich folgende übergeordnete Befunde:

- In den Wässern von Brunnen 5 und 6 wurden FCKW- bzw. SF<sub>6</sub>-Gehalte gefunden die unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 pmol/l bzw. 0,1 fmol/l liegen.
- In allen anderen Grundwässern wurden signifikante Gehalte von FCKW und SF<sub>6</sub> gefunden. Dies belegt, dass in diesen Grundwässern junge Wasserkomponenten mit einer Laufzeit von weniger als 70 bzw. 40 Jahren vorhanden sind.
- In den meisten Wässern wurden überhöhte FCKW-Gehalte gefunden.

#### 3.1 FCKW-Überhöhung im Grundwasser

Im Wasser der meisten Brunnen/Messstellen wurde ein höherer F12-, F11- und F113-Gehalt gefunden als aufgrund der atmosphärischen Randbedingung maximal möglich ist (FCKW-Excess). Z.B. liegt der F12-Gehalt in der Messstelle GWM2 tief (Adenauer) um über 25.000% höher als ein rezentes Wasser aufweisen kann. Auch die anderen FCKW-Spezies sind an dieser Messstelle überhöht. Die insgesamt gefundenen überhöhten Werte sind in der folgenden Tabelle 2 fett gedruckt. Wichtig ist, dass an keinem der untersuchten Wässer ein überhöhter SF<sub>6</sub>-Gehalt gefunden wurde.

Aus der FCKW-Überhöhung kann geschlossen werden, dass im Untersuchungsgebiet zusätzlich ein anthropogen bedingter FCKW-Eintrag in das Grundwasser erfolgt ist. Im allgemeinen kommen hierfür Oberflächengewässer, Altlasten, Deponien, Gewerbe/Industrie und Abwässer in Betracht.

An dieser Stelle erscheint es wichtig darauf hin zu weisen, dass die festgestellte FCKW-Überhöhung selbst keine hygienische oder toxische Relevanz aufweist. Prinzipiell sind die FCKW aber sehr empfindliche Indikatoren für die Detektion und die Beobachtung solcher anthropogenen Beeinflussungen von Wässern (=Frühwarnindikator). Die Frühwarnfunktion rührt neben der empfindlichen Messbarkeit auch daher, dass die FCKW ein nahezu ideales Transportverhalten im Grundwasser aufweisen. Im Gegensatz zu Substanzen wie z.B. CKW werden die FCKW gar nicht

Tabelle 2: Überhöhte FCKW-Konzentrationen sind fett gedruckt.

Bezeichnung	Probennahme- datum	FCKW-Konz. [pmol/l]			SF <sub>6</sub> -Konz. in fmol/l
		F12	F11	F113	
Br.1	27.11.2015	<b>12 ±3</b>	0,25 ±0,05	<b>6 ±1</b>	0,2 ±0,1
Br.2	27.11.2015	<b>6,8 ±0,4</b>	0,28 ±0,05	<b>14 ±3</b>	<0,1
Br.3 neu	27.11.2015	1,2 ±0,1	0,09 ±0,05	0,7 ±0,1	<0,1
Br.4	27.11.2015	<b>6,8 ±0,4</b>	2,9 ±0,3	<b>19 ±4</b>	0,2 ±0,1
Br.5	27.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,1
Br.6	27.11.2015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,1
Br.7	27.11.2015	<b>4,0 ±0,2</b>	0,05 ±0,05	<b>15 ±3</b>	<0,1
GWM2 Aden. tief	29.09.2015	<b>34 ±7</b>	<b>20 ±5</b>	<b>ca. 115</b>	0,4 ±0,1
GWM2/2007	28.08.2015	<b>17 ±4</b>	<b>72 ±22</b>	<b>34 ±11</b>	0,6 ±0,1
GWM3	03.11.2015	<b>80 ±24</b>	<b>19 ±4</b>	<b>11 ±3</b>	2,0 ±0,3
GWM4/2007	10.08.2015	<b>11 ±3</b>	<b>53 ±16</b>	<b>ca. 150</b>	2,6 ±0,3
GWM6/2007	04.12.2015	<b>19 ±4</b>	<b>2,8 ±0,3</b>	<b>1,2 ±0,2</b>	2,4 ±0,3
GWM Holzweg	14.09.2015	<b>34 ±7</b>	<b>38 ±12</b>	<b>36 ±11</b>	0,8 ±0,1
KB1 Aden. flach	14.10.2015	<b>71 ±22</b>	<b>10 ±2</b>	<b>1,7 ±0,2</b>	1,5 ±0,2

oder nur wenig retardiert. D.h. sie laufen der eigentlichen Schadstofffahne voraus und sind deshalb als Überwachungsparameter geeignet.

Darüberhinaus ist der FCKW-Excess quasi eine ortsspezifische Markierung, die wie ein Farbstoff angesehen werden kann. D.h. es sind damit hydrogeologische Informationen ableitbar.

### 3.2 Altersbestimmung des Wassers

Aufgrund der überwiegend vorhandenen anthropogenen Beeinflussung der Wässer bzgl. F12, F11 und F113 ist eine Altersbestimmung mit diesen Tracern hier nicht möglich. Auch ist teilweise ein natürlicher Abbau von z.B. F11 im Aquifer möglich. Insofern beruht die Datierung in den meisten Fällen allein auf dem Parameter SF<sub>6</sub>. Eine Kontrolle durch andere Tracer ist somit hier nicht möglich, wodurch sich eine Restunsicherheit bzgl. der Interpretation ergibt (siehe Anhang 3).

Die Altersbestimmung wird mit dem Piston-flow Modell durchgeführt. Für die Berechnung des Eintrages der Spurenstoffe in das Grundwasser wurde von einer geringmächtigen ungesättigten Bodenzone ausgegangen. D.h. es wird angenommen, dass die Spurengase ohne größere zeitliche Verzögerung durch den Transport in der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser eingetragen werden. Für die Datierung wurde eine Temperatur bei der Grundwasserneubildung von 9°C und eine Bildungshöhe von 300m NN zugrunde gelegt.

Mit den oben definierten Randbedingungen sowie den gemessenen Tracer-Gehalten läßt sich für die Grundwässer das Modellalter ableiten. In der 5. Spalte der folgenden Tabelle 3 ist das Modellalter der verschiedenen Tracer für die untersuchten Wässer aufgelistet.

*Tabelle 3: Modellalter berechnet mit dem Piston-Flow Modell (PFM). Temperatur 9°C; Bildungshöhe von 300m NN (Erläuterungen hierzu siehe im Text).*

Bezeichnung	verwendete Tracer	Modellansatz	Modellalter in Jahren	1 $\sigma$ -Stdabw. in Jahren
Br.1	F11 SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 46	$\pm 9$
Br.2	F11	PFM	ca. 54	–
Br.2	SF <sub>6</sub>	PFM	>40	–
Br.3 neu	F11	PFM	ca. 59	–
Br.3 neu	SF <sub>6</sub>	PFM	>40	–
Br.4	F11 SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 39	$\pm 2$
Br.5	F11	PFM	>70	–
Br.5	SF <sub>6</sub>	PFM	>40	–
Br.6	F11	PFM	>70	–
Br.6	SF <sub>6</sub>	PFM	>40	–
Br.7	F11	PFM	ca. 62	–
Br.7	SF <sub>6</sub>	PFM	>40	–
GWM2 Adenauerallee tief	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 33	–
GWM2/2007	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 30	–
GWM3	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 17	–
GWM4/2007	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 11	–
GWM6/2007	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 13	–
GWM Holzweg	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 28	–
KB1 Adenauerallee flach	SF <sub>6</sub>	PFM	ca. 21	–

Insgesamt liegen die Modellalter zwischen rund 10 und über 70 Jahren. In der letzten Spalte ist die 1 $\sigma$ -Standardabweichung der Modellalter angegeben. Es muß betont werden, dass dies keine Fehlerangabe ist. Vielmehr soll diese Angabe lediglich die Güte der Übereinstimmung der Modellalter, die mit den verschiedenen unabhängigen Tracern erhalten wurden, beschreiben. Eine kleine Standardabweichung weist auf eine gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Tracern hin und gibt damit einen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Datierung. Aufgrund der FCKW-Kontamination ist dies hier nur für zwei der untersuchten Wässer möglich.

Es ist nicht auszuschließen, dass ein natürlicher FCKW-Abbau im Aquifer erfolgt. Ein solcher natürlicher Abbau kann erfolgen, wenn das Wasser frei von gelöstem

Sauerstoff ist. Hiervon ist im Allgemeinen eher F11 betroffen. Das F11-Modellalter ist dann scheinbar zu hoch.

### 3.3 Einbeziehung der FCKW-Überhöhung

Die Übertragung der Ergebnisse der Altersbestimmung auf die FCKW-Überhöhung ermöglicht eine zeitliche Strukturierung der FCKW-Überhöhung bzw. des FCKW-Eintrages. In dem folgenden Diagrammen (Bild 1 bis 3) sind die ermittelten Modellalter gegen die Gehalte der FCKW F12, F11 und F113 aufgetragen.

Bild 1: In dem nebenstehenden Diagramm ist F12-Gehalt gegen das Modellalter der Wasser aufgetragen.

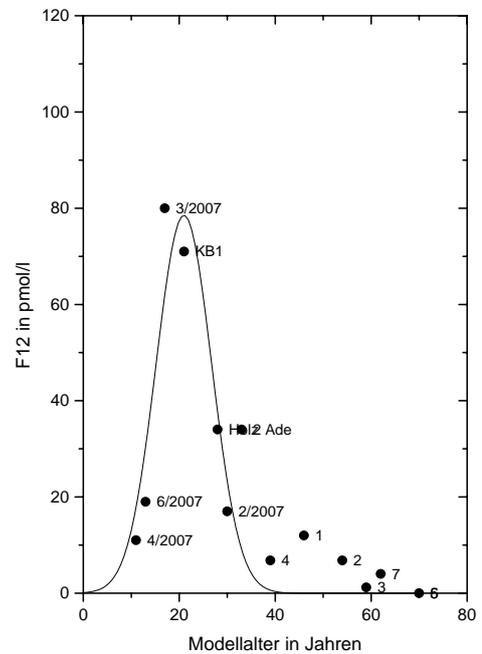


Bild 2: Analoges Bild für F11.

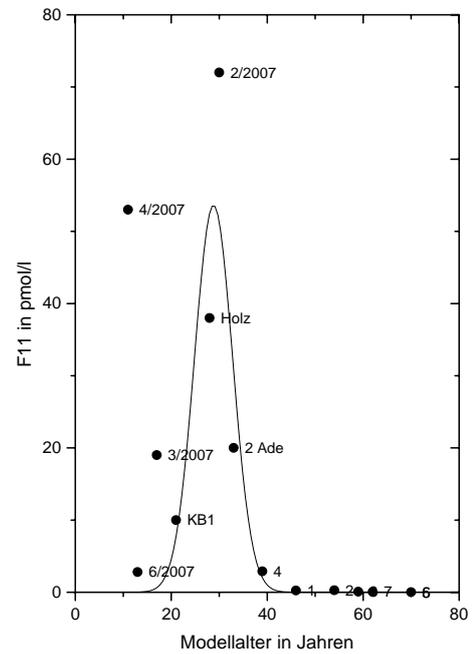
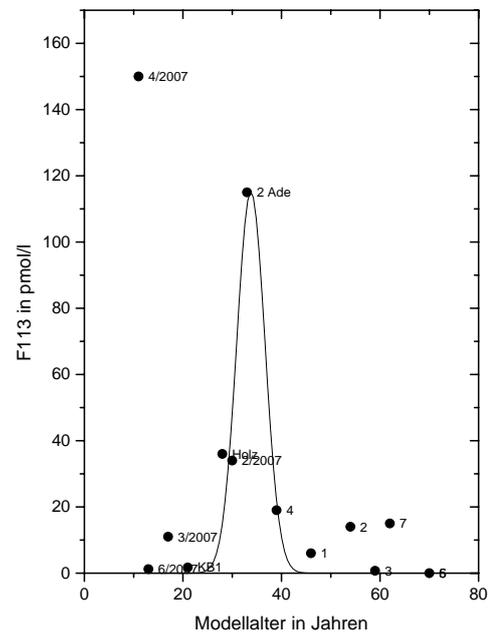


Bild 3: Analoges Bild für F113.



Auffällig ist, dass die Parameter F11 und F113 im Altersbereich von 30 bis 35 Jahren ein Maximum aufweisen. D.h. Wasserkomponenten mit diesem Alter führen die höchsten Konzentrationen mit sich. Dagegen ist das Maximum für F12 eher bei 20 Jahren. Ob dies ein signifikanter, d.h. belastbarer Unterschied ist, muß z.Zt. offen bleiben.

Weiterhin ist auffällig, dass die Messstelle GWM 4/2007 aus dem F11/F113-Raster herausfällt. Es deutet sich an, dass diese Messstelle jüngeres Grundwasser mit hohen Gehalten an FCKW erschließt (und auch Tetra).

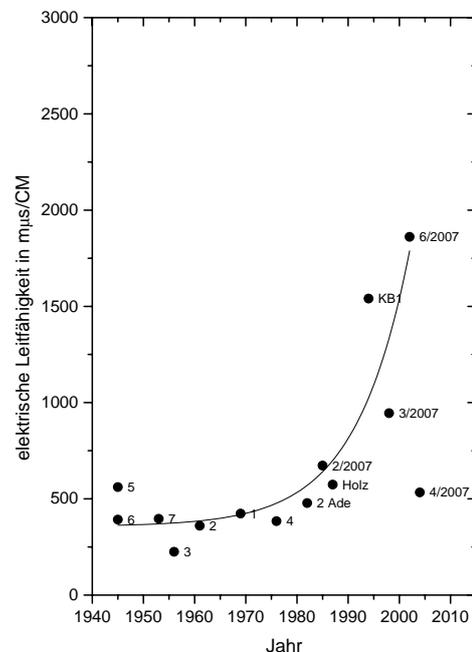
Möglicherweise sind hier in den Diagrammen Messstellen/Brunnen eingetragen, die bzgl. des Strömungsregimes nicht zusammengehören und somit nicht vergleichbar sind. Dies bedarf einer weiterführenden hydrogeologischen Betrachtung.

### 3.4 Einbeziehung der elektrischen Leitfähigkeit

Die Verknüpfung zwischen dem Wasseralter und der elektrischen Leitfähigkeit der Wässer zeigt, dass jüngere Wässer eine vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Dieser Zusammenhang könnte mit der Genese eines urbanen Grundwassers, das mit der Zeit höhere Lösungsinhalte mit sich führt, erklärt werden.

Aus dieser allgemeinen Struktur scheint die Messstelle GWM 4/2007 herauszufallen. Aus dieser Sicht der Dinge handelt es sich eher um ein junges Grundwasser, das ohne den urbanen Einfluß (erhöhter Lösungsinhalt) gebildet wurde. Dies könnte auf ein anderes Bildungsgebiet hindeuten. Hier bedarf es einer weiterführenden hydrogeologischen Bewertung.

Bild 3: In dem nebenstehenden Diagramm ist die elektrische Leitfähigkeit gegen das Bildungsjahr des Grundwassers aufgetragen (=2015-Modellalter).



## 4 Fazit

In fast allen untersuchten Grundwässern wurden signifikante Gehalte von FCKW bzw.  $\text{SF}_6$  gefunden. Dies belegt, dass in diesen Grundwässern junge Wasserkomponenten mit einer Laufzeit von weniger als 40 bzw. 70 Jahren vorhanden sind. Lediglich in den Wässern von Brunnen 5 und 6 wurden FCKW- bzw.  $\text{SF}_6$ -Gehalte gefunden, die unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Aufgrund der überwiegend vorhandenen Störungen/Beeinflussungen der Wässer bzgl. FCKW ist eine Altersbestimmung mit diesen Tracern hier nicht möglich. Insofern beruht die Datierung in den meisten Fällen allein auf dem Parameter  $\text{SF}_6$ . Eine Kontrolle durch andere Tracer ist somit hier nicht möglich.

Die Altersbestimmung mit dem Piston-Flow-Modell ergab, dass die Wässer ein Modellalter zwischen rund 10 und über 70 Jahren aufweisen.

Im Grundwasser des Untersuchungsgebietes ist eine anthropogen erzeugte Überhöhung der verschiedenen FCKW vorhanden. Die festgestellte FCKW-Überhöhung selbst hat in diesem Konzentrationsbereich keine hygienische Relevanz.

Zusammen mit dem Modellalter ergeben sich Hinweise, dass die maximalen F12-Überhöhungen bzw. Einträge vor ca. 20 Jahren erfolgt sind, während die F11-/F113-Einträge eher in einem Zeitfenster von 30 bis 35 Jahren liegen.

Die elektrische Leitfähigkeit der Wässer nimmt mit abnehmendem Alter zu. Dieser Zusammenhang könnte mit der Genese eines urbanen Grundwassers, das mit der Zeit höhere Lösungsinhalte mit sich führt, erklärt werden.

erstellt:



## A Anhang

### Anhang 1: Methodische Grundlagen

#### FCKW und SF<sub>6</sub>

Grundlage für den Einsatz der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) als Datierungs- bzw. Transporttracer ist der globale zeitliche Anstieg der FCKW-Konzentration in der Atmosphäre. Das Vorkommen der FCKW in der Atmosphäre ist mit dem Beginn der industriellen FCKW-Produktion in den dreißiger Jahren verknüpft. Die FCKW werden als Treib-, Kühl- und Lösungsmittel verwendet und letztlich in die Atmosphäre freigesetzt. Seitdem steigt die atmosphärische Konzentration der beiden FCKW-Spezies F12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) und F11 (CCl<sub>3</sub>F) aufgrund ihrer vergleichsweise großen atmosphärischen Lebensdauer von 50–100 Jahren monoton an. Eine signifikante Emission der FCKW-Spezies F113 (C<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>3</sub>) erfolgt dagegen erst seit rund 30 Jahren.

Als einzig bekannte Senke der FCKW gelten photokatalytische Prozesse in der Stratosphäre. Die damit verbundene Bildung von reaktivem Chlor in der Stratosphäre führte zu einer dramatischen Veränderung des (polaren) Ozonhaushalts. Neben den atmosphärischen Spurengasen CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O tragen die FCKW auch zum Treibhauseffekt der Atmosphäre bei. Diese ernste Beeinflussung der globalen Atmosphäre führte zu einem weltweiten Übereinkommen zur Reduzierung der Produktion von vollhalogenierten FCKW.

Die dominierende SF<sub>6</sub>-Emission beruht auf der Verwendung als elektrisches Isolationsgas in der Hochspannungstechnik. Weitere Freisetzungen in die Atmosphäre erfolgen bei der Aluminium- und Magnesiumproduktion. Die atmosphärische Lebensdauer dieses Gases beträgt mehr als 3000 Jahre. Seit den Siebziger Jahren steigt die globale atmosphärische SF<sub>6</sub>-Konzentration stark an (über 5%/Jahr). Aktuell wird eine globale Konzentration von rund 7 ppt gemessen.

Ausgehend von dem Reservoir 'Atmosphäre' dringt das zeitabhängige Signal der FCKW bzw. SF<sub>6</sub> durch Gasaustausch und interne Transportprozesse in das Grundwasser ein. Abhängig von der atmosphärischen Gas-Konzentration wird das Sickerwasser in der ungesättigten Bodenzone durch Gasaustausch mit FCKW und SF<sub>6</sub> beladen. Nach der Grundwasserneubildung ist das derart markierte Grundwasser von weiterem Gasaustausch mit der Atmosphäre isoliert. D.h. vergleichsweise altes Grundwasser enthält weniger gelöste FCKW/SF<sub>6</sub>, weil bei dessen Bildung der atmosphärische Pegel niedriger war. Bei bekanntem zeitlichem Verlauf der Konzentration in der Atmosphäre ist also eine Datierung des Grundwassers möglich.

Neben diesem natürlich zustande gekommenen FCKW-Gehalt im Wasser, der eine Datierung erlaubt, lassen sich aus überhöhten FCKW-Gehalten anthropogene Beeinflussungen z.B. durch Deponien, Leckagen in Abwasserkanälen usw. empfindlich identifizieren.

## **Tritium**

Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium ( $^3\text{H}$  oder T) wird durch Wechselwirkung der Höhenstrahlung mit den 'Luftmolekülen' der oberen Atmosphäre gebildet. Mit einer radioaktiven Lebensdauer von 17,9 Jahren zerfällt Tritium in das stabile Edelgas Helium-3 ( $^3\text{He}$ ). Tritium wird nach seiner Bildung zu Wasser oxidiert und nimmt als HTO-Molekül am irdischen Wasserkreislauf teil. Der natürliche Tritiumpegel ist ca. 3 bis 5 TU. Die Tritiumeinheit von 1 TU entspricht einem T/H-Isotopenverhältnis von  $10^{-18}$ . Umgerechnet ergibt 1 TU eine spezifische Aktivität von 0,119 Bq/l.

Neben der natürlichen Tritiumkomponente wurde in den fünfziger und sechziger Jahren bei den oberirdischen Kernwaffentests zusätzlich Tritium, sogenanntes 'Bomben-Tritium', freigesetzt. Dieses Bomben-Tritium führte zeitweise zu einem um 3 Größenordnungen über dem natürlichen Pegel liegenden Tritium-Gehalt im Niederschlag. Dadurch erfolgte eine scharfe zeitliche Markierung des Wassers im irdischen Wasserkreislauf.

Der Eintrag des radioaktiven Tritium in das Grundwasser erfolgt über den Pfad Niederschlag-Sickerwasser-Grundwasser. Für die Interpretation der Tritiumkonzentration im Grundwasser wird deshalb die mittlere jährliche Tritium-Aktivität des Niederschlags aus den letzten 4 Jahrzehnten zugrunde gelegt. Auf dem Höhepunkt der oberirdischen Kernwaffentests Anfang der sechziger Jahre stieg die Tritiumkonzentration im Niederschlag auf das 1000fache des natürlichen Pegels an. Seit dem Teststopp nimmt die Konzentration ab. Heute beträgt der Tritiumgehalt im Niederschlag ca. 7 TU.

## **Stabile Isotope**

Die isotopische Zusammensetzung der Wassermoleküle ( $^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ ;  $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ ;  $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ ; usw. ) bestimmt die physikalischen Eigenschaften des Wassers (z.B. Dampfdruck, Gefrierpunkt). Dies führt zu einer räumlichen und zeitlichen Variation der Gehalte der stabilen Isotope Deuterium ( $^2\text{H}$ ) und Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ ) in den verschiedenen Teilen des hydrologischen Kreislaufs. Der Isotopengehalt eines jungen, flachen Grundwasserleiters wird hauptsächlich vom langfristigen, mittleren Gehalt im Niederschlagswasser bestimmt. Abweichungen von dem gebietstypischen Isotopengehalt können Auskunft über die hydrologischen Bedingungen bei der Infiltration oder die

Genese des Wassers geben. Damit sind also aus dem gemessenen Isotopengehalt Kenntnisse über die Herkunft des Wassers ableitbar.

Die Isotopenverhältnisse  $R$  ( $=^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  bzw.  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ) werden wegen ihrer geringen Schwankungsbreite im allgemeinen als Promille-Abweichung ( $\delta$ -Notation) von einem Meerwasser-Standard (SMOW) angegeben:

$$\delta_{\text{Probe}} = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000 \quad [\text{in } \text{‰}]$$

Messdaten eines weltweiten Messnetzes zeigen, daß die  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$ -Gehalte der Niederschlagswässer im Mittel auf einer Geraden mit der Steigung 8 liegen (Niederschlagsgerade):

$$\delta^{2\text{H}} = 8 \cdot \delta^{18\text{O}} + 10$$

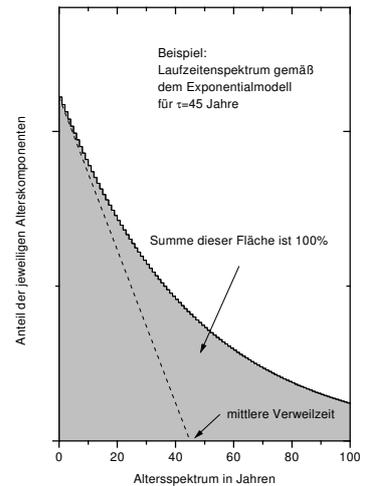
## Anhang 2: Standardmodelle

Um von der gemessenen FCKW-Konzentration im Wasser zu einer Altersbestimmung zu gelangen, muß eine Modellvorstellung über das Strömungsverhalten im Grundwassersystem benutzt werden. Es wird im Folgenden das Exponentialmodell und das Piston-Flow Modell angewandt.

### Exponentialmodell (EM)

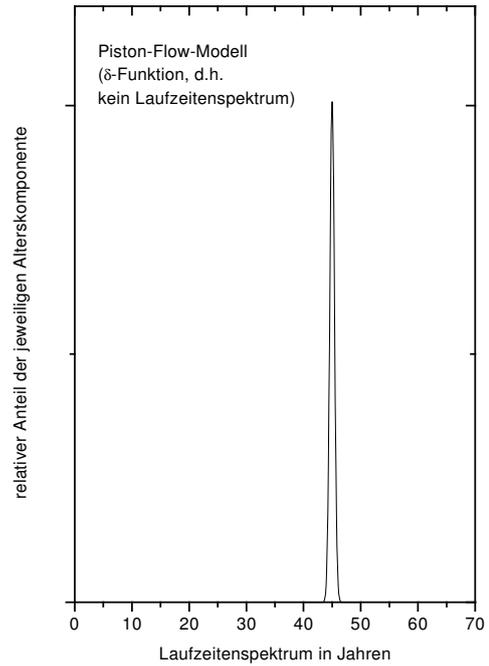
Das **Exponentialmodell** unterstellt eine scheinbar vollständige Mischung im Reservoir. Äquivalent und realistischer bedeutet dies eine exponentielle Verteilung der Länge der Laufzeiten des Wassers vom Ort der Infiltration bis zur Quelle/Brunnen. Das Exponentialalter entspricht der *mittleren Verweildauer* des Wassers im Grundwasserreservoir.

Zur Veranschaulichung des Exponentialmodells wurde für eine mittlere Verweilzeit von 45 Jahren das Altersspektrum des geförderten Mischwassers berechnet und graphisch dargestellt (siehe nebenstehendes Bild). Wesentlich hierbei ist, daß der Anteil der Wasserkomponenten mit dem Alter  $t$  exponentiell abnimmt ( $\sim \exp(-t/\tau)$ ), wobei die mittlere Verweilzeit  $\tau$  ist. D.h. je kleiner die mittlere Verweilzeit ist, desto größer sind die Anteile von jungen Wässern. Umgekehrt, mit zunehmender mittlerer Verweilzeit wird der Anteil von älteren Wässern größer. Da diese alten Wasserkomponenten geringe FCKW-Gehalte aufweisen oder sogar FCKW-frei sind, wird der FCKW-Gehalt im Brunnenmischwasser zu kleineren Werten verschoben.



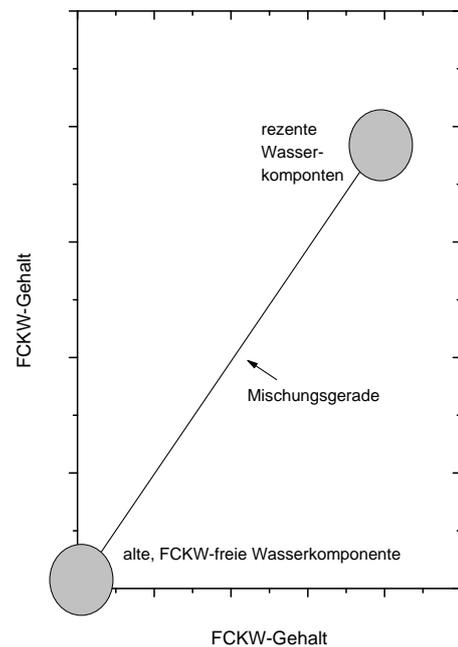
## Piston-Flow-Modell (PFM)

Unter dem Aspekt der Mischung im Aquifer stellt das sogenannte Piston-Flow-Modell genau das Gegenteil zum Exponentialmodell dar. Anstelle einer scheinbar vollständigen Mischung im Reservoir, unterstellt das Piston-Flow-Modell keinerlei Mischungsvorgänge. Diese Modellvorstellung kann mit einem Wasserpaket, das sich ohne Stoffaustausch mit den benachbarten Wasserpaketen durch den Aquifer bewegt, versinnbildlicht werden.



## Zwei-Komponenten-Modell (ZKM)

Bei dem Zwei-Komponenten-Modell wird davon ausgegangen, daß es sich bei dem untersuchten Wasser um ein Mischwasser handelt, das aus einer alten, FCKW-freien Komponente (Alter >70 Jahre) und einer rezenten Komponente (angenommene mittlere Verweilzeit wenige Jahre) besteht.



## Anhang 3: Randbedingungen

Die FCKW-/SF<sub>6</sub>-Datierungsmethode umfaßt im Idealfall vier voneinander unabhängige Tracer (F12, F11, F113 und SF<sub>6</sub>). Dies führt einerseits zu vier unabhängig bestimmbaren Modellaltern und liefert andererseits Hinweise, welches der Standardmodelle am Besten für die Interpretation geeignet ist. Mögliche Störungen sind:

- FCKW-Abbau
- FCKW-Überhöhungen
- SF<sub>6</sub>-Überhöhungen
- Entgasungseffekte

Da insgesamt vier voneinander unabhängige Tracer zur Verfügung stehen (F12, F11, F113, SF<sub>6</sub>), die unterschiedliches Eintragsverhalten haben, besteht selbst bei 'schwierigen' Untersuchungsgebieten unter Umständen die Möglichkeit eine Datierung durchzuführen. Dafür müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Methodisch bedingt muß der Tracergehalt im Grundwasser unterhalb der maximal möglichen Gleichgewichtskonzentration liegen.
- Es müssen mindestens 2 Tracer zum gleichen/ähnlichen Alter des Grundwassers führen (Kontrollfunktion). Im anderen Falle gibt es eine nicht-spezifizierbare Restunsicherheit.

## Anhang 4: Umrechentabellen

Bezeichnung	Name	chemische Formel	Umrechen- tabelle
Dichlordifluormethan	F12	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	$1 \text{ pmol/l} = 121 \text{ pg/l} = 121 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{g/l}$
Trichlorfluormethan	F11	$\text{CCl}_3\text{F}$	$1 \text{ pmol/l} = 137 \text{ pg/l} = 137 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{g/l}$
1,1,2-Trichlor-1,2,2-trifluorethan	F113	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$	$1 \text{ pmol/l} = 187 \text{ pg/l} = 187 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{g/l}$
Schwefelhexafluorid	–	$\text{SF}_6$	$1 \text{ fmol/l} = 146 \text{ fg/l} = 146 \cdot 10^{-9} \text{ } \mu\text{g/l}$

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	
Milli	m	$10^{-3}$	0,001
Mikro	$\mu$	$10^{-6}$	0,000 001
Nano	n	$10^{-9}$	0,000 000 001
Piko	p	$10^{-12}$	0,000 000 000 001
Femto	f	$10^{-15}$	0,000 000 000 000 001