

# Isotopenhydrologische Untersuchungen im Raum Stuttgart–Ludwigsburg–Leonberg

*Isotope Hydrology of the Stuttgart–Ludwigsburg–Leonberg Area*

M. A. GEYH<sup>1)</sup> & H. KÖHLE<sup>2)</sup>

## Inhalt

	Seite
1. Die hydrogeologische Situation des Untersuchungsgebietes .....	75
2. Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen .....	78
2.1. Zur Hydrochemie .....	78
2.2. Isotopenhydrologische Befunde .....	78
3. Diskussion der Ergebnisse .....	79
3.1. Neugebildetes Grundwasser im offenen und teilweise bedeckten Karst	79
3.2. Karstwasser des überdeckten Bereiches .....	86
3.3. Cannstatter Mineralwässer .....	90
4. Schlußfolgerung .....	90
Zusammenfassung .....	91
Literatur .....	91
Abstract .....	92
Dank .....	92

## 1. Die hydrogeologische Situation des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt in Südwestdeutschland. Die beprobten Brunnen und Quellen sind aus Fig. 1 zu entnehmen. Der Grundwasserleiter ist der Hauptmuschelkalk, der mehrere Vorfluter hat: das Enztal, das Neckartal und lokale Karstquellen. Das Einzugsgebiet der Cannstatter Mineralquellen befindet sich im südlichen Teil (Fig. 1) und umfaßt das Gebiet 2, den S und SE des Gebietes 3 und schließt den überdeckten Teil des Aquifers (Gebiet 5) ein.

Die Mineralquellen von Cannstatt gehören mit einer Schüttung von etwa 300 l/s (W. CARLE et al., 1969) zu den größten Europas. Im Neckartal bei Stuttgart tritt Wasser aus einer Anzahl von Brunnen und in mehreren wilden Quellen im Flußbett des Neckars aus. Einige Kilometer westlich werden dem Muschelkalk um die 100 l/s

<sup>1)</sup> Prof. Dr. Mebus A. GEYH, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Alfred-Bentz-Haus, Postfach 510153, D-3000 Hannover 51.

<sup>2)</sup> Dr. Hans KÖHLE, Neckarhalde 18, D-7400 Tübingen.

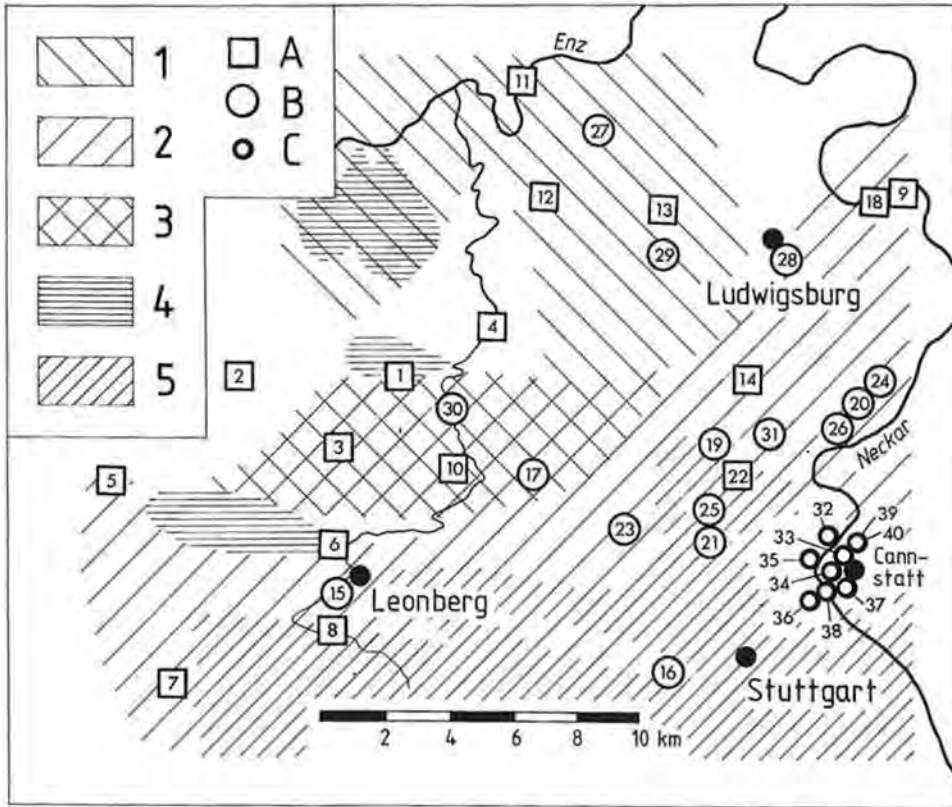


Fig. 1: Karte des Untersuchungsgebietes in SW-Deutschland mit den Brunnen und Quellen, die beprobt worden sind. Sie erfaßt den Hauptmuschelkalk, der Hauptgrundwasserleiter ist und Vorfluter im Enztal (1) und Neckartal (2) hat, die beide zusätzlich vom Gebiet (3) gespeist werden. In diesem Gebiet kommen auch mehrere Karstquellen (4) vor. Im Gebiet (5) ist das Grundwasser gespannt.

Grundwasser für industrielle Zwecke entnommen, die der Schüttung der Cannstatter Mineralquellen entzogen werden (W. CARLE & W. STRÖBEL, 1969). Diese Entnahme wurde in den letzten Jahren immer mehr gedrosselt.

Untersuchungen an den Travertinen im Neckartal zeigen, daß deren Bildung schon im frühen Pleistozän begann und sich die Chemie und die Schüttung der Mineralwässer seither kaum verändert hat (W. REIFF 1955, 1965, 1973, 1981).

Im Gebiet von Bad Cannstatt werden hydrochemisch zwei Grundwassertypen unterschieden:

- a) Karstwasser mit niedrigem Mineralgehalt im N und im Zentrum,
- b) Grundwasser im S mit hohem Mineralgehalt und teilweise viel Kohlensäure.

Nach der alten Vorstellung von M. FRANK et al. (1968) bewegt sich das Grundwasser zwischen dem Einsickerungsgebiet und den Cannstatter Mineralquellen auf zwei Hauptwegen (Fig. 2):

- 1) Süßes Karstwasser mit niedrigen  $\text{SO}_4^{2-}$ - und  $\text{Cl}^-$ -Gehalten fließt im N unter dem Schwäbisch-Fränkischen Sattel entlang einer Störung des herzynischen Grabensystems (Filder Graben),

2) mineralisiertes und gespanntes Grundwasser mit hohen Sulfat- und Chloridgehalten fließt im S unter einer relativ hohen Bedeckung aus obertriassischen und jurassischen Sedimenten.

Nach neueren Vorstellungen, die auf E. VILLINGER (1982a und 1982b) und W. CARLE (1982) zurückgehen, dürfte der höher mineralisierte Anteil weit aus dem S, aus dem Bereich der Schwäbischen Alb und dem Albvorland kommen. Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich aber auf den westlichen Teil des Einzugsgebietes der Cannstatter Mineralquellen und deren näheren Umgebung, wo relativ gering mineralisierte Grundwässer mit vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeiten vorkommen. Der langsame Zustrom von hochmineralisiertem Grundwasser aus dem S ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

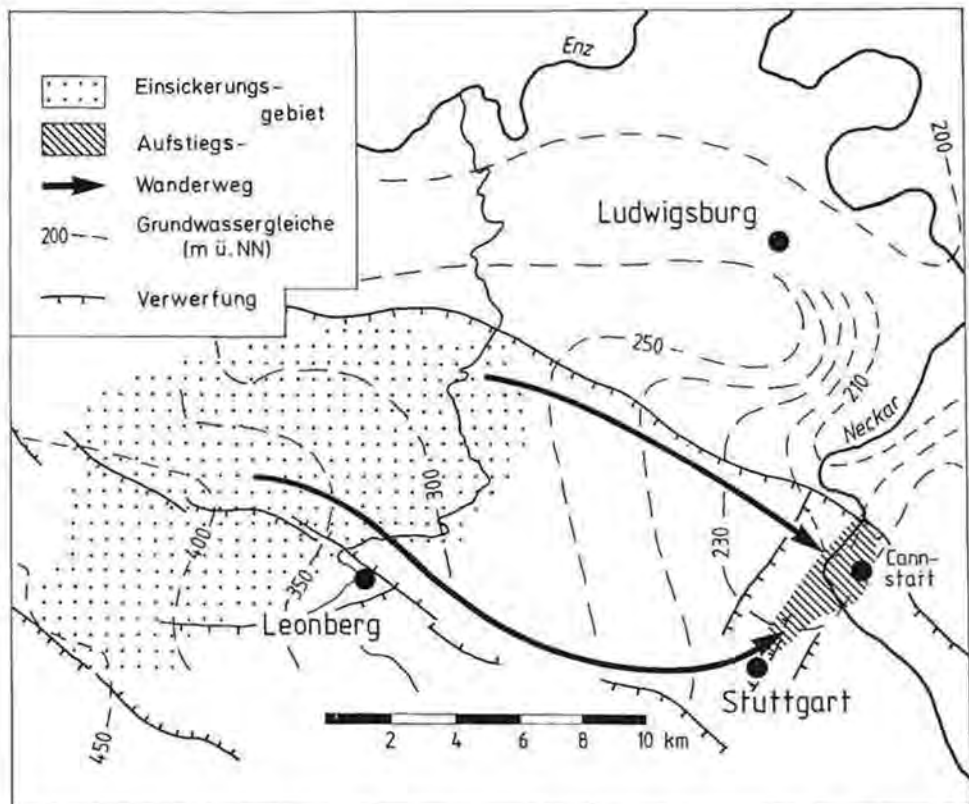


Fig. 2: Hydrogeologische Vorstellung nach M. FRANK et al. (1968) über den Ursprung und die Bewegung der Grundwässer vom Einsickerungsgebiet im Strohgäu zum Aufstiegsgebiet von Cannstatt.

Den wichtigsten Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet bildet der Hauptmuschelkalk. Er ist etwa 90 m mächtig und besteht hauptsächlich aus Kalkstein und etwas Dolomit an der Basis und im oberen Teil. Das Hangende besteht aus einer Folge von etwa 20 m mächtigen Tonsteinen, Sandsteinen und Dolomiten des Lettenkeuper. 40 bis 60 m mächtiger Mittlerer Muschelkalk bildet das Liegende. Er besteht überwiegend aus Tonstein, aber auch Gips und Salz. Der oberste Teil des Liegenden ist

stellenweise mit dem Grundwasserleiter hydraulisch verbunden. Löss bis zu 5 m Mächtigkeit bedeckt den größten Teil des Untersuchungsgebietes.

Der ausstreichende Hauptmuschelkalk westlich von Stuttgart wird als Einsickerungsgebiet der Cannstatter Mineralwässer angesehen (Fig. 1). Alle typischen Erscheinungsformen des offenen Karstes treten dort auf. Höhlensysteme sind lokal entwickelt, und die Grundwasserfließgeschwindigkeit ist nach Färbeversuchen hoch. Sie kann bis 200 m/h betragen (H. KÖHLE, 1980). Nach Abschätzungen von K. KNOBLICH (1964) braucht das Grundwasser etwa 12 Jahre vom Einsickerungsgebiet bis zu den Cannstatter Quellen. W. CARLE et al. (1969) geben 13 Jahre Fließzeit für das niedrig mineralisierte Grundwasser im N und 19 Jahre für das höher mineralisierte im S an. Das Einzugsgebiet ist 130 (K. KNOBLICH, 1964) bis 150 km<sup>2</sup> (W. CARLE et al., 1969) groß. Im nördlichen Teil (Fig. 1) sind die leicht löslichen Bestandteile des Grundwasserleiters seit langem gelöst und wegtransportiert. Im SE kommen noch Sulfate und Chloride im Mittleren Muschelkalk vor.

Die tiefe Erosionsrinne des Neckars und zwei Bruchzonen, die das Gebiet von Bad Cannstatt queren, ermöglichen dem Grundwasser an die Oberfläche zu treten. Dabei entgast das unter Druck gelöste CO<sub>2</sub>.

## 2. Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen

### 2.1. Zur Hydrochemie

Hydrochemische Einzelanalysen wurden seit Anfang der sechziger Jahre an Proben aus Brunnen und Quellen durchgeführt. Es gibt keine Langzeituntersuchung irgend eines Brunnenwassers oder eine einmalige gemeinsame Untersuchung aller Brunnen. Nicht einmal eine Zusammenstellung der hydrochemischen Ergebnisse lag bisher vor. Die Tab. 1 ist ein erster Versuch, erfasst aber wegen der Schwierigkeit der Beschaffung von Daten jeweils nur eine Analyse. Zur hydrochemischen Unterscheidung der Grundwässer in drei Typen dienten vor allem die elektrische Leitfähigkeit und der CO<sub>2</sub>-Gehalt. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt in Bewegungsrichtung des Grundwassers zu den Vorflutern hin zu. Das gerade neugebildete Grundwasser hat elektrische Leitfähigkeiten unter 1000 µS/cm (Gruppe A). Im bedeckten Grundwasserleiter tritt „süßes“ Grundwasser mit elektrischen Leitfähigkeiten bis 2600 µS/cm auf (Gruppe B). Die Cannstatter Mineralwässer (Gruppe C) haben elektrische Leitfähigkeiten über 1200 µS/cm und zeitlich wenig variierende Gehalte an freiem CO<sub>2</sub> von meist über 1300 mg/l. Der Mineralgehalt ist zeitlich ebenfalls gleichbleibend.

### 2.2. Isotopenhydrologische Befunde

Zwischen 1970 und 1977 wurden umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen im westlichen Teil des Einzugsgebietes durchgeführt (W. KRIELE, 1976, H. KÖHLE, 1980), die auch einige Analysen von Umwelteisotopen einschlossen. 1970 wurden 12 Isotopenproben aus den Cannstatter Mineralquellen untersucht. Weitere 27 Proben kamen 1973 vom Zentrum und E des Einzugsgebietes hinzu. 1977 wurde mit 15 Proben auch ein Gebiet nördlich des eigentlichen Einzugsgebietes der Cannstatter Mineralquellen erfasst. Vom Januar 1983 stammen die Proben der meisten δ<sup>18</sup>O-

Analysen. 1984 wurden von einigen Brunnen isopenhydrologische Wiederholungsanalysen durchgeführt.

Die Analysen erfaßten  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  und  $^{18}\text{O}$ . Die  $^{14}\text{C}$ - und  $^{13}\text{C}$ -Bestimmungen wurden an den aus jeweils 60 l extrahierten Ausfällungen der anorganischen Kohlenstoffverbindungen durchgeführt. Proportionalzählrohre standen für die  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Messungen zur Verfügung. Die Isotopenverhältnisse des Sauerstoffs und Kohlenstoffs wurden mit einem Micromass-Massenspektrometer VG 602 B bestimmt. In Tab. 2 sind die Untersuchungsergebnisse aufgelistet.

### 3. Diskussion der Ergebnisse

#### 3.1. Neugebildetes Grundwasser im offenen und teilweise bedeckten Karst

In diesem Gebiet kommen Karstwässer mit hohen Hydrogenkarbonatgehalten mit bis 250 mg/l Sulfat und hohen, stark schwankenden Nitratgehalten vor. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt von W nach E in Fließrichtung leicht zu.

Es wurde der Versuch unternommen, aus den  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -gehalten mit dem Exponentialmodell (E. ERIKSSON, 1968) mittlere Verweilzeiten (MVZ) der Langzeitkomponente (Trockenwetterabfluß; M. A. GEYH, 1980) und die  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalte  $c_i$  groß zu ermitteln (Tab. 2 A; M. A. GEYH & P. GROSCOPF, 1978).

Die MVZ ist u. a. ein Maß für die Größe des Einzugsgebietes,  $c_i$  spiegelt die pedologische Situation der Einzugsgebiete wider (M. A. GEYH, 1972). Der  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt der gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen im gerade neugebildeten Grundwasser bezieht sich auf die Zeit vor 1950. Außer im Kristallin ist  $c_i$  kleiner als der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ , der mit 100 pmc (percent modern carbon) definiert ist. Der Grund dafür ist, daß fossile Karbonate ohne  $^{14}\text{C}$  an der Grundwasserneubildung beteiligt werden (K. O. MÜNNICH, 1957). Im offenen Karst liegen die  $c_i$ -Werte zwischen 55 und 75 pmc (M. A. GEYH, 1972).

Nach dem Exponentialmodell besteht Karstwasser aus verschiedenen Anteilen, die sich in verschieden weiten Klüften und Spalten bewegen und mischen. Dazu tragen Kanalisierung ebenso wie Dispersion bei (I. NERETNIEKS et al., 1982). Der Anteil, der durch weite Spalten und Klüfte kommt, fließt schnell, ist daher jung und groß. Aus den engeren kommt vergleichsweise wenig Grundwasser mit größerer MVZ. Für natürliche Kluftsysteme ergeben sich angenäherte Exponentialkurven, wenn die individuellen Anteile über den Laufzeiten aufgetragen werden.

Als Folge der Atombombenversuche und neuerdings der Aktivitäten der Nuklearindustrie liegen der  $^3\text{H}$ -Gehalt im Niederschlag und der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt im Boden- $\text{CO}_2$  über den natürlichen Niveaus von einigen TU bzw. 100 pmc. Beide haben sich überdies von Jahr zu Jahr verändert, weswegen diese Isotope als hydrologische Tracer geeignet sind. Die atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Einträge bilden die Inputfunktionen, die zur Anwendung des Exponentialmodells bekannt sein müssen. Für Tritium liegen für Süddeutschland seit 1970 von der meteorologischen Station Niederstotzingen  $^3\text{H}$ -Meßergebnisse vor. Für die Zeit davor wurde auf eine Veröffentlichung von Y. ATAKAN et al. (1970) zurückgegriffen (Fig. 3). Die  $^{14}\text{C}$ -Inputkurve des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  der Nordhalbkugel wurde von R. NYDAL & K. LÖVSETH (1983) übernommen.

Tab. 1: Hydrochemische Ergebnisse von Grundwässern aus dem Raum Stuttgart–Ludwigsburg–Leonberg.

## A Frisch neugebildetes Grundwasser des offenen und teilweise bedeckten Karstes

Nr.	Brunnen	Geol	GOF	T	WOF	Q l/s	Lf µS/cm	t °C	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	CO <sub>2</sub> mg/l	Datum
1	Ohnewald Hemmingen	mo	338	80	270	1	571	8,9	326	49	43	64	?	10. 02. 74
2	Haldenwaldmühle Heimerd.	mo/mm	294	10	292	20	715	10,4	397	93	18	13	43	05. 02. 73
3	Rombold Hirschlanden	mo	370	60	312	0	726	?	409	44	40	41	15	25. 06. 85
4	Seegärten Schieberd.	mo	254	26	251	6	739	11,6	332	91	31	15	31	11. 06. 74
5	Strudelbachquelle Flacht	mo	411	16	404	10	780	10,1	390	102	46	13	22	06. 02. 73
6	Lettenbergquelle Höf.	mo	339	0	339	9	790	10,0	442	49	37	26	43	13. 06. 73
7	TB Renningen	mo	403	112	370	?	790	10,1	424	130	17	25	17	06. 02. 73
8	Schneider Leonberg	mo/ku	366	45	335	1	910	10,5	439	140	44	5	?	26. 05. 75
9	Langwid I Ludwigsburg	mo	212	47	198	30	925	9,7	445	91	58	40	?	03. 12. 86
10	Rauns Ditzingen	mo	301	87	266	10	943	12,2	400	200	33	20	36	10. 06. 74
11	TB III Bissingen	mo	186	66	184	12	960	12,0	?	189	39	?	?	31. 08. 77
12	TB II Markgröningen	mo	253	104	210	2	970	?	468	150	49	28	51	30. 01. 86
13	Zipperle Asberg	mo	266	55	226	3	?	?	464	135	44	56	?	28. 04. 67
14	Stotz Kornwestheim	mo/ku	303	130	223	10	?	10,0	427	?	?	?	?	07. 07. 64

Erklärungen: TB = Tiefbrunnen, Geol = Geologie (mo = Hauptmuschelkalk, mm = Mittlerer Muschelkalk, ku = Lettenkeuper), GOF = Geländeoberfläche in Meter über Meeresspiegel, T = Tiefe in Meter, WOF = mittlere Grundwasseroberfläche in Meter über Meeresspiegel, Q = mittlere Entnahmemenge in l/s, Lf = elektrische Leitfähigkeit in µS/cm, t = Temperatur in °C.

**B** Karstwasser des bedeckten Karstes

Nr.	Brunnen	Geol	GOF	T	WOF	Q l/s	Lf µS/cm	t °C	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	CO <sub>2</sub> mg/l	Datum
15	Record Gummiwerke	mo	381	100	332	1,4	845	12,1	427	88	51	?	?	06. 02. 73
16	Paul-Gerhard-Platz	mo	305	82	238	0,1	930	16,8	421	178	22	7	?	17. 04. 73
17	Blauäcker	mo	303	104	260	16	954	11,4	436	152	47	?	?	11. 12. 73
18	Salzweg	mo	287	104	224	0,1	1.030	13,0	424	274	32	6	?	17. 03. 73
19	Freibad Ludwigsburg	mo/mm	199	10	196	50	1.020	11,1	421	240	52	27	?	03. 12. 86
20	Klemm Stuttgart	mo	258	79	207	1	1.217	?	403	415	43	1	?	09. 01. 85
21	Roser Stuttgart-Feuerbach	mo/ku	274	102	228	40	1.270	16,1	400	432	42	23	15	15. 04. 85
22	Kelterplatz Stuttgart	mo	259	78	232	4	1.272	?	427	241	62	38	?	08. 06. 84
23	Schützenhaus	mo	323	88	250	0,1	1.281	13,0	451	415	26	?	?	22. 02. 74
24	Sonnenhof Aldingen	mo	255	82	207	10	1.315	?	1.196	500	19	?	154	1965
25	Bosch	mo	?	150	232	?	1.430	15,6	430	605	27	9	?	17. 04. 73
26	Hechtstraße Stuttgart	mo	264	104	207	7	1.445	?	403	458	40	6	?	14. 07. 83
27	Kirschenau Tamm	mo	249	139	200	4	?	?	390	?	27	0	?	30. 07. 62
28	Unifranck Ludwigsburg	mo	292	102	235	6	?	?	371	87	88	32	?	15. 07. 76
29	WZG Möglingen	mo	308	123	210	6	1.892	?	1.074	850	17	?	?	?
30	Glemstal	mo/mm	380	46	265	0,1	2.200	11,7	397	1.168	47	?	?	26. 03. 73
31	Reibedanz Zazenhausen	mo/mm	251	103	215	10	2.642	?	473	875	310	2	?	08. 06. 75

**C** Cannstatter Mineralwässer

Nr.	Brunnen	Geol	GOF	T	WOF	Q l/s	Lf µS/cm	t °C	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Cl <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	CO <sub>2</sub> mg/l	Datum
32	Mombachquelle	mo/ku	?	?	0	30	1.210	13,1	421	370	41	21	85	17. 04. 73
33	Kellerbrunnen	mo	217	54	0	5,7	1.290	14,4	512	381	53	4	78	06. 03. 52
34	Schiffmanquelle	mo/mm	?	?	0	?	1.406	?	488	436	78	1	?	10. 01. 85
35	Maurischer Garten	mo	?	34	?	22	1.880	16,1	561	641	129	0,2	?	17. 04. 73
36	Berg-Südquelle	mo	223	?	0	?	4.905	21,0	1.235	1.094	1.062	?	1.652	1960
37	Veielbrunnen	ku	218	27	0	1,4	5.060	17,1	1.193	849	1.032	3	1.397	16. 04. 85
38	Leuzequelle	mo	219	2	0	41	5.140	18,8	1.089	987	1.039	2	1.309	15. 04. 85
39	Wilhelmsbrunnen	mo	222	69	0	0	6.410	17,2	1.229	1.191	1.383	3	1.408	16. 04. 85
40	Gottlieb Daimler	mo/mm	222	135	0	0,3	11.300	17,8	1.287	1.125	3.868	5	265	16. 04. 85

Tab. 2: Isotopenhydrologische Ergebnisse von Grundwässern aus dem Raum Stuttgart-Ludwigsburg-Leonberg.

**A** Frisch neugebildetes Grundwasser des offenen und teilweise bedeckten Karstes

Nr.	Hv	Jahr	Brunnen	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$^{14}\text{C}$ -Akt. pmc	$^3\text{H}$ TU	MVZ. $c_i$ (pmc)			$\delta^{18}\text{O}$ ‰
							60	65	70	
1	8.590	1977	Ohnewald Hemmingen	-11,4	72,0 ± 1,0	88	28	-	-	-8,87
2	5.707	1973	Haldenwaldmühle Heim.	-12,5	83,7 ± 0,8	148	11	-	-	-8,92
2	13.401	1984	"	-11,5	88,6 ± 1,4	61	-	11	-	-9,17
3	8.589	1977	Rombold Hirschlanden	-12,3	70,3 ± 0,8	91	28	-	-	-8,57
4	8.577	1977	Seegärten Schwieberd.	-14,5	82,1 ± 0,9	77	2	24	35	-8,39
5	3.674	1970	Strudelbachquelle Flacht	-12,8	73,2 ± 1,4	132	19	-	-	-
5	7.051	1973	"	-12,8	78,4 ± 0,9	126	18	-	-	-8,75
5	13.406	1984	"	-12,3	76,2 ± 1,0	63	20	-	-	-9,16
6	5.702	1973	Lettenbergquelle Höf.	-13,8	94,8 ± 1,1	139	-	9	14	-9,11
7	5.700	1973	TB Renningen	-13,1	76,2 ± 1,6	120	19	-	-	-8,69
7	13.408	1984	"	-12,3	79,8 ± 0,6	66	-	29	-	-9,07
8	8.581	1977	Schneider Leonberg	-16,4	83,5 ± 0,5	89	2	22	-	-8,21
9	8.587	1977	Langwid I Ludwigsburg	-12,8	100,7 ± 1,2	132	-	8	9	-8,62
10	3.673	1970	Rauns Ditzingen	-13,0	76,2 ± 1,0	51	-	-	60	-8,36
10	13.404	1984	"	-12,3	75,8 ± 1,2	49	-	50	-	-8,77
11	8.578	1977	TB III Bissingen	-14,7	79,6 ± 0,5	82	20	28	-	-8,18
12	8.574	1977	TB II Markgröningen	-15,3	87,6 ± 0,6	89	-	17	25	-8,01
13	8.576	1977	Zipperle Asberg	-14,1	82,5 ± 0,6	125	12	-	-	-8,60
14	8.570	1977	Stotz Kornwestheim	-12,2	69,7 ± 0,4	122	?	?	?	-

**B** Karstwasser des bedeckten Karstes: Berechnung der Mischungsanteile  $Q_a$  und des Alters  $A$  des fossilen Grundwassers unter der Annahme von Grundwasserneubildung zwischen Oktober und März, einem  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt  $c_i$  von 65 pmc und mittleren Laufzeiten von 11 und 14 Jahren des jungen Grundwassers

Nr.	Hv	Jahr	Brunnen	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$^{14}\text{C}$ -Akt. pmc	$^3\text{H}$ TU	Mischungsanteil				$\delta^{18}\text{O}$ ‰
							$Q_a$		$A$		
							11 a	14 a	11 a	14 a	
15	7.699	1973	Record Gummiwerke	-12,9	77,3 ± 0,6	109	63	∞	?	?	-8,47
16	5.698	1973	Paul-Gerhard-Platz	-11,3	60,6 ± 0,3	107	64	∞	?	∞	-8,49
17	7.049	1973	Blauäcker	-14,1	76,7 ± 1,8	71	86	21.000	21	10.500	-8,14
18	5.697	1973	Salzweg	-13,0	65,1 ± 1,0	73	75	∞	19	∞	-9,47
19	8.588	1977	Freibad Ludwigsburg	-14,9	82,1 ± 1,4	75	55	16.000	83	20.000	-7,76
20	8.591	1977	Klemm Stuttgart	-10,7	45,7 ± 0,6	50	70	∞	89	∞	-8,11
21	3.672	1970	Roser	-11,2	68,5 ± 1,0	98	8	∞	?	?	-8,32
21	13.403	1984	"	-11,1	65,7 ± 0,8	99	?	∞	?	∞	-8,85
22	8.582	1977	Kelterplatz Stuttgart	-14,1	77,2 ± 0,8	51	69	8.000	88	10.000	-8,36
23	7.050	1973	Schützenhaus	-13,1	62,8 ± 1,2	29	90	8.000	68	5.500	-8,13
24	8.580	1977	Sonnenhof Aldingen	-11,7	62,2 ± 1,1	55	67	18.000	88	20.000	-8,72
25	5.709	1973	Bosch	-11,8	60,9 ± 1,2	134	54	∞	?	?	-
26	8.583	1977	Hechtstraße Stuttgart	- 9,9	21,9 ± 0,4	7	96	15.000	98	15.000	-7,98
27	8.575	1977	Kirschenau Tamm	-12,6	54,1 ± 0,7	27	84	9.000	94	10.000	-7,92
28	8.571	1977	Unifranck Ludwigsb.	-13,6	67,8 ± 0,4	72	56	∞	84	∞	-8,74
29	8.573	1977	WZG Möglingen	-12,8	62,5 ± 0,8	43	74	11.000	90	12.000	-8,74
30	5.703	1973	Glemstal	-11,6	63,7 ± 0,8	55	81	18.000	39	12.000	-
31	8.579	1977	Reibedanz Zazenh.	-10,9	67,5 ± 0,9	81	51	∞	82	∞	-8,01



C Cannstatter Mineralwässer

Nr.	Hv	Jahr	Brunnen	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$^{14}\text{C}$ -Geh. pmc	$^3\text{H}$ TU	$\delta^{18}\text{O}$ ‰
32	5.708	1973	Mombachquelle	-12,5	68,2 ± 1,0	58	-8,26
32	13.383	1984	"	-12,2	72,2 ± 1,2	43	-8,73
33	3.670	1970	Kellerbrunnen	- 5,5	66,7 ± 1,7	12	-8,56
33	13.380	1984	"	- 9,2	52,6 ± 1,1	24	-9,24
34	3.671	1970	Schiffmannquelle	- 9,1	46,2 ± 5,1	6	-8,46
34	13.384	1984	"	- 7,8	39,6 ± 0,7	17	-8,98
35	7.046	1973	Maurischer Garten	- 7,1	36,4 ± 1,1	8	-8,68
35	13.389	1984	"	- 4,3	34,5 ± 0,5	19	-8,89
36	3.665	1970	Berg-Südquelle	+ 1,2	25,9 ± 2,6	3	-9,09
36	13.391	1984	"	+ 3,2	8,6 ± 0,6	8	-9,64
37	3.667	1970	Veielbrunnen	+ 3,0	18,2 ± 1,2	5	-8,86
37	13.386	1984	"	+ 3,2	7,7 ± 1,3	16	-9,08
38	3.666	1970	Leuzequelle	+ 2,4	23,7 ± 3,0	2	-9,02
38	13.382	1984	"	+ 3,6	8,0 ± 0,8	9	-9,41
39	3.669	1970	Wilhelmsbrunnen	+ 4,3	14,6 ± 1,6	6	-9,02
39	13.387	1984	"	+ 5,2	6,2 ± 0,6	12	-9,51
40	3.668	1970	Gottlieb Daimler	- 1,4	20,2 ± 1,8	3	-8,89
40	13.378	1984	"	- 1,4	9,1 ± 0,2	2	-9,56

Mit den  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Ergebnissen von wenigstens zwei Quellen des gleichen Einzugsgebietes kann  $c_t$  und die MVZ ermittelt werden (M. A. GEYH & P. GROSCHOPF, 1978). Eine größere Zahl von Entnahmestellen sollte untersucht werden, um eine Kontrolle zu erhalten, ob die Anwendung des Exponentialmodells überhaupt erlaubt ist. Dies ist der Fall, wenn sich für ein hydrogeologisch einheitliches Einzugsgebiet nahe beieinander liegende  $c_t$ -Werte ergeben.

Die Isotopenergebnisse von 19 Wasserproben (Gruppe A) aus 14 Entnahmestellen wurden mit dem Exponentialmodell ausgewertet. Die erhaltenen mittleren Verweilzeiten und  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalte sind in Tab. 2 angegeben. Die meisten MVZ, die von 2 bis 50 Jahre reichen, werden für  $c_t$ -Werte zwischen 60 und 65 pmc erhalten, die auch durch die Ergebnisse von Wiederholungsanalysen nach einem Jahrzehnt ausreichend gut bestätigt wurden.

Eine weitere Einengung der  $c_t$ -Werte ist nicht möglich. Sie fallen aber in den für offenen Karst typischen Bereich und rechtfertigen damit unabhängig von den anderen Befunden die Anwendung des Exponentialmodells. Der o. g.  $c_t$ -Wertebereich zeichnet sich auch graphisch in der Auftragung der Tritiumwerte über den  $^{14}\text{C}$ -Gehalten ab (Fig. 4). Erwähnenswert ist die Beobachtung, daß zwischen den Entnahmen in den siebziger Jahren und 1984 die Tritiumgehalte der jungen Karstwässer entsprechend dem Exponentialmodell abgenommen, hingegen die der hochmineralisierten zugenommen haben. Dies ist am ehesten noch mit einer „piston-flow“-ähnlichen Bewegung des Grundwassers zu erklären. Die in den mittsechziger Jahren neugebildeten Grundwässer mit ihren extrem hohen Tritiumgehalten haben danach erst 1984 die Cannstatter Mineralquellen erreicht.

Der  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt scheint vom Zentrum in Richtung E von 60 auf 65 pmc anzuwachsen. Da die meisten der Beprobungsstellen außerhalb des Zentrums liegen, wird als gebietsspezifischer Wert 65 pmc angenommen.

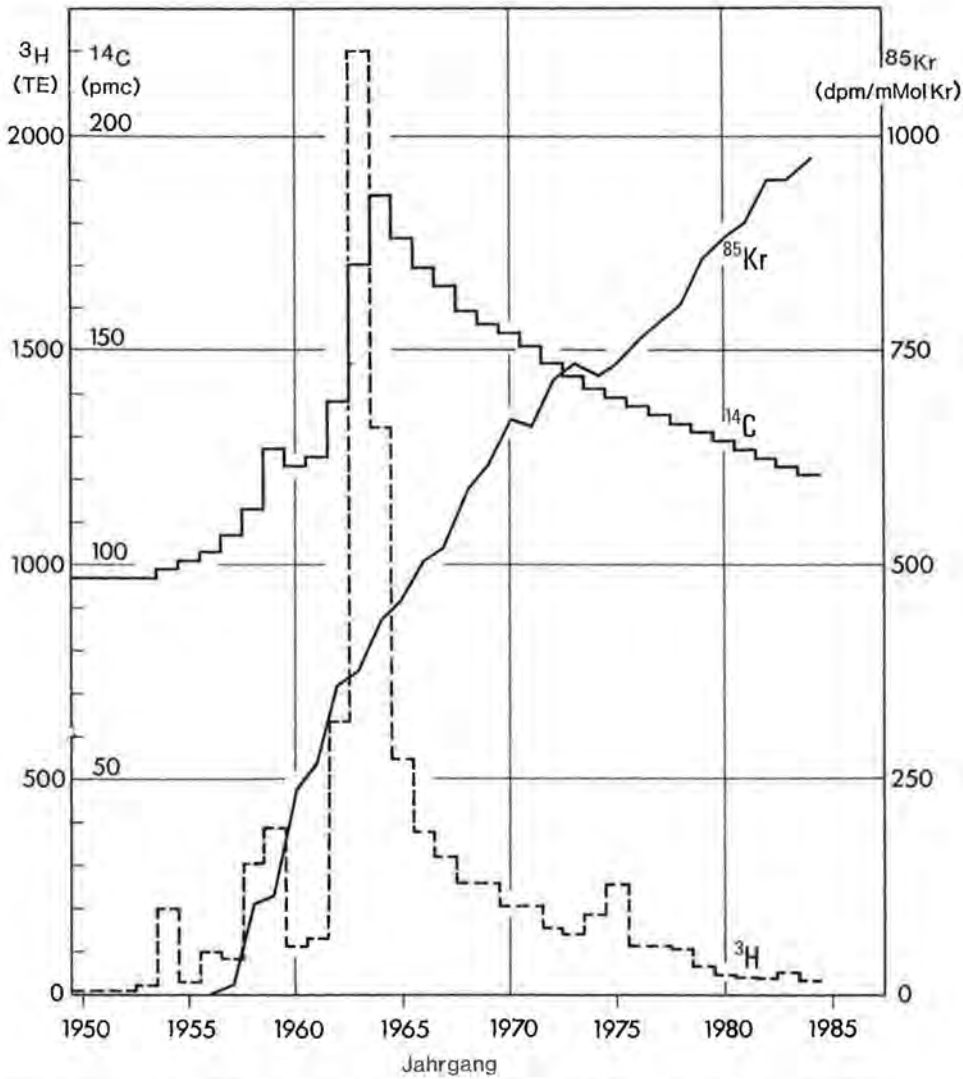


Fig. 3:  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Inputfunktionen für Süddeutschland nach R. NYDAL & K. LÖVSETH (1983) bzw. nach Y. ATAKAN et al. (1974) und seit 1970 nach eigenen Meßergebnissen von Niederschlagswässern aus Niederschlagszungen. Außerdem ist die  $^{85}\text{Kr}$ -Inputfunktion für Mitteleuropa angegeben, die ein großes isotopehydrologisches Potential hat.

Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte streuen zwischen  $-8,0$  und  $-9,4\text{‰}$  in einem weiteren Rahmen als man meßtechnisch erwarten würde. Die kleinsten Werte werden mit Beimischungen isotopisch leichter Winterniederschläge erklärt, also kurzer Einsickerungs- bzw. Verweilzeit. Darauf weisen auch hohe und schwankende Nitratgehalte hin. Der gebietspezifische  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert von  $-8,23 \pm 0,15\text{‰}$  wurde aus den höchsten Werten berechnet.

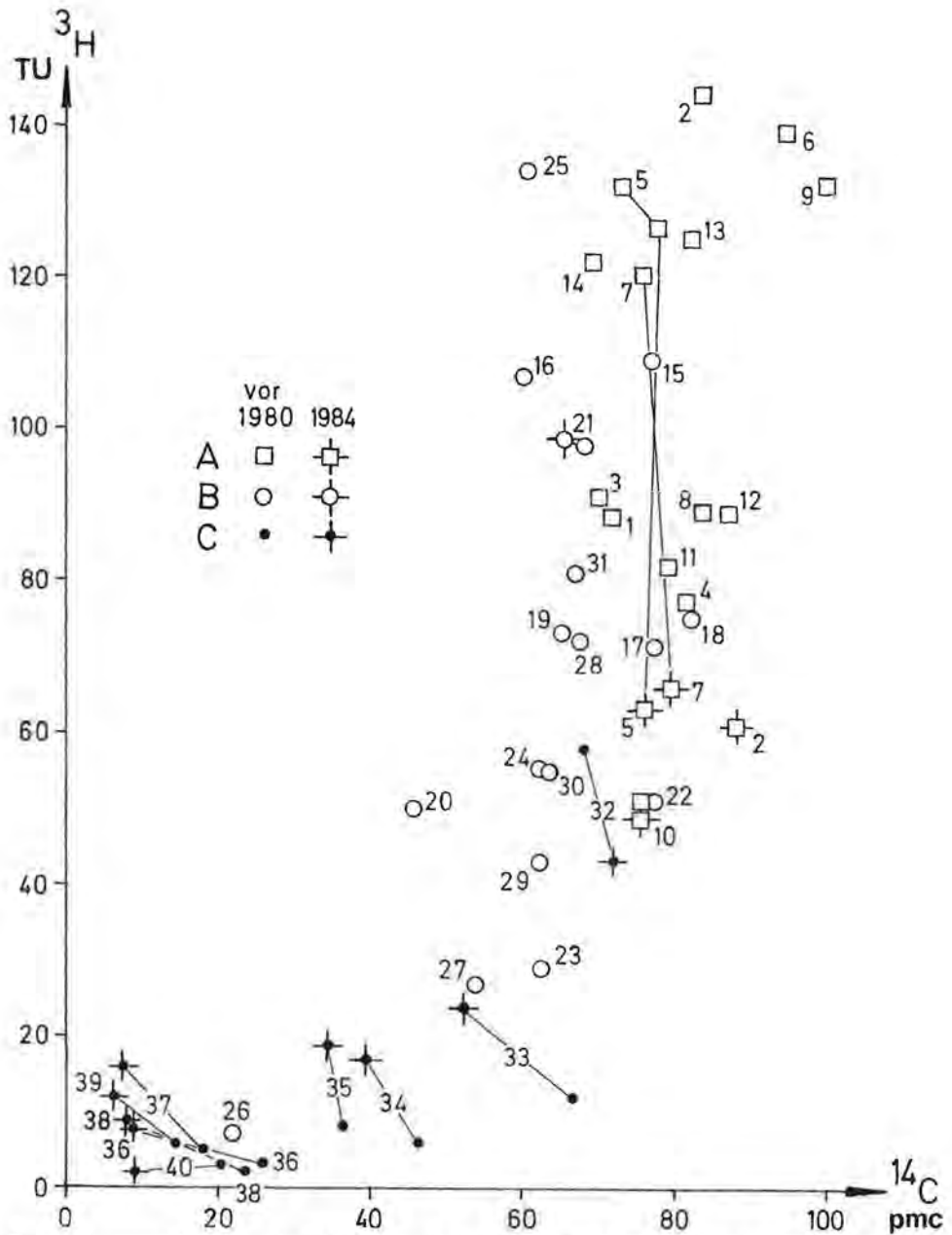


Fig. 4: Zusammenhang zwischen Tritium- und Radiokohlenstoffgehalten von Grundwässern aus dem Raum Stuttgart-Ludwigsburg-Leonberg. Deutlich zeichnet sich eine  $^{14}\text{C}$ -Anfangskonzentration von 65 pmc ab.

### 3.2. Karstwasser des überdeckten Bereiches

Das Grundwasser im überdeckten Bereich zeigt tendenziell eine höhere Mineralisation als das aus dem nicht oder kaum bedeckten. Die elektrische Leitfähigkeit nimmt deshalb in Richtung der Bewegung des Grundwassers nach E hin zu. Die ebenfalls vorhandenen Nitrate weisen ebenso wie die Tritiumgehalte darauf hin, daß auch sehr junges Grundwasser vorkommt. Dies muß im überdeckten Karst nicht ungewöhnlich sein, wie Untersuchungen in der Senne gezeigt haben (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1987). Bei den drei höher mineralisierten Grundwässern (Nr. 31–33) mit Sulfatgehalten über 800 mg/l ist sulfatreiches Wasser aus dem Mittleren Muschelkalk beteiligt.

Der Nachweis hoher Tritiumgehalte bei vergleichsweise niedrigen  $^{14}\text{C}$ -gehalten, der sich abzeichnende lineare Trend zwischen  $^{14}\text{C}$ -gehalten und elektrischer Leitfähigkeit (Fig. 5) legt eine Mischung von altem, höher mineralisiertem Grundwasser mit jungem Grundwasser nahe.

Vor mehr als 20 Jahren wurde von C. JOB & J. ZÖTL (1969) erstmals versucht, die  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Gehalte von Grundwässern aus stark zerklüfteten Felssystemen zu verwenden, um eine Zweikomponentenmischung aus süßem und thermalem Grundwasser zu quantifizieren. R. A. DOWNING et al. (1977) interpretierten später die Isotopenergebnisse von Grundwässern aus der gesättigten Zone im Kristallin als Mischung aus schnell fließendem Grundwasser im Hauptklufsystem und langsam fließendem im Netzwerk miteinander verbundener Mikropalte und Poren.

Um solche Zweikomponentenmischungen aufzuschlüsseln zu können, müssen die Eingangsdaten der jungen Komponente abschätzbar sein. Die Art, wie sie rekonstruiert werden können, wurde in unserem Fall aus der Änderung der Tritiumwerte zwischen 1970 und 1984 abgeleitet. Für die Brunnen 25 und 27 sowie die Brunnen der Gruppe C nahm der Tritiumgehalt in dieser Zeit um einen Faktor 2–3 zu (Fig. 4). Dies

Tab. 3: Zerfallskorrigierte Dreijahresmittel der  $^3\text{H}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Eingangswerte in TU bzw. pmc für verschiedene Laufzeiten l in Jahren und  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Eingangswerte für  $c_1 = 65$  pmc und Grundwasserneubildung zwischen Oktober und März.

l a	Tritium- Dreijahresmittelwerte				Radiokohlenstoff- Dreijahresmittelwerte				Jahr	$^{14}\text{C}$ -	$^3\text{H}$ -
	1970	1973	1977	1984	1970	1973	1977	1984		Eingangswerte	
	TU				pmc					pmc	TU
0	112	110	113	33	101	96	88	80	1969	102	159
1	125	100	120	35	104	98	90	81	1970	101	97
2	138	108	119	27	106	100	92	82	1971	99	131
3	243	94	80	34	110	101	94	83	1972	96	107
4	516	105	88	44	115	104	96	84	1973	94	113
5	695	116	80	43	115	106	98	86	1974	96	85
6	652	206	87	50	107	110	100	87	1975	94	221
7	346	436	75	76	93	115	101	88	1976	89	98
8	123	588	84	81	83	115	104	90	1977	87	49
9	96	552	93	81	81	107	106	92	1978	86	78
10	106	293	164	54	78	93	110	93	1979	85	55
11	98	104	349	59	75	83	115	96	1980	84	45
12	38	81	470	54	69	81	115	98	1981	82	33
13	20	89	441	58	67	78	106	100	1982	81	22
14	13	83	234	51	64	75	93	101	1983	80	62
15	7	32	83	57	63	69	83	104	1984	79	21

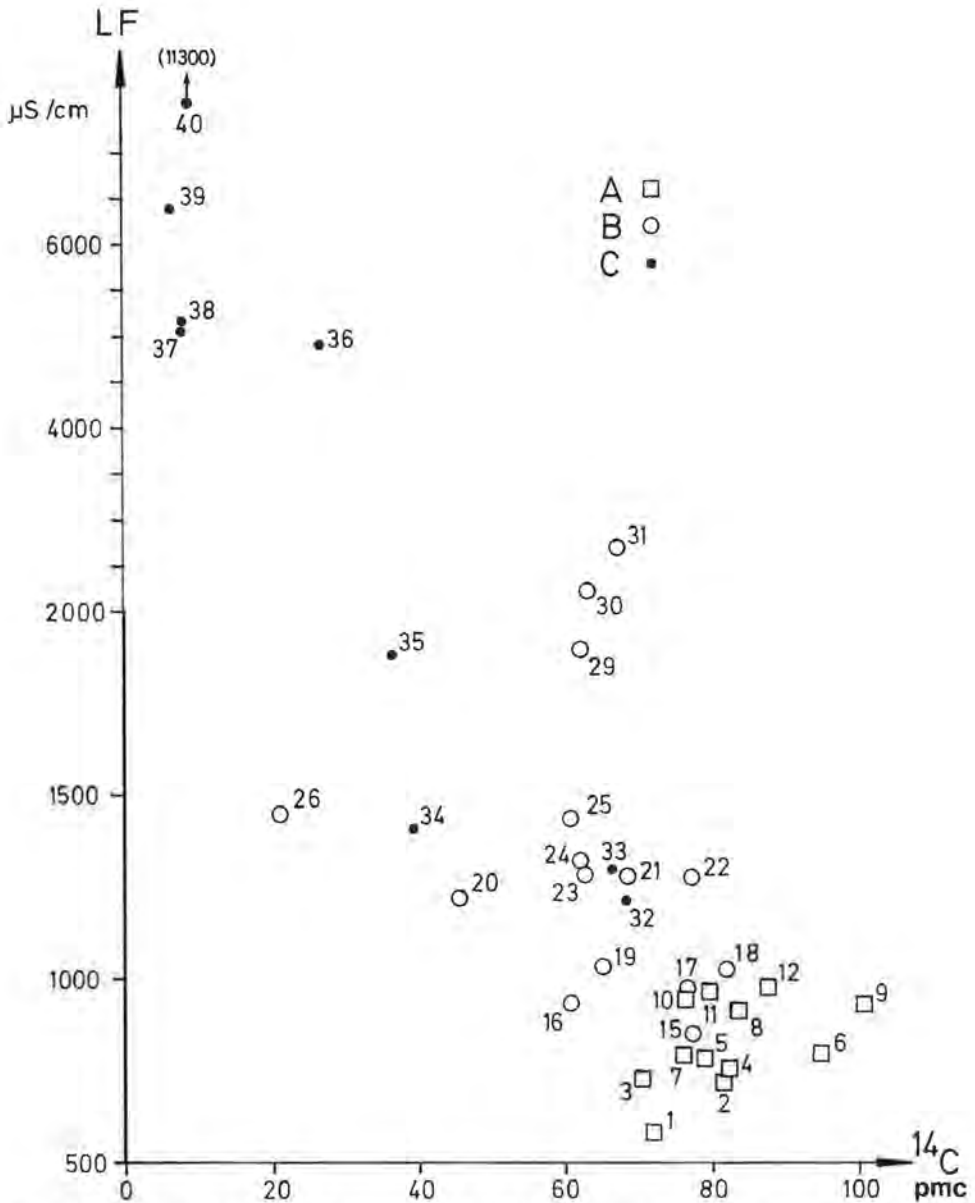


Fig. 5: Linearer Trend zwischen elektrischer Leitfähigkeit und  $^{14}\text{C}$ -Gehalt von Grundwässern aus dem Raum Stuttgart-Ludwigsburg-Leonberg.

läßt sich nicht mit dem Exponentialmodell nachvollziehen, wohl aber unter der Annahme einer Wasserbewegung, die mit dem piston-flow-Modell beschrieben werden kann. Möglicherweise wäre eine noch bessere Modellierung mit dem Dispersionsmodell gegeben. Zu dessen Anwendung reichen aber je zwei, in verschiedenen Jahren ermittelte Isotopenwerte pro Brunnen nicht aus. Wir haben deshalb nur die fließenden Dreijahresmittel aus den  $^{14}\text{C}$ - und  $^3\text{H}$ -Eingangswerten berechnet (Tab. 3). Für Lauf-

zeiten zwischen 11 und 14 Jahren ergibt sich eine Zunahme der Tritiumgehalte für die in Frage kommenden Entnahmehahre, die der gefundenen Zunahme in den Proben entsprechen könnte. Dies trifft sowohl für ganzjährige wie auch begrenzte Grundwasserneubildung zu. Es ist interessant, daß auch W. CARLE & W. STRÖBEL (1969) eine Laufzeit von 12 Jahren abgeschätzt hatten.

Mit dieser Annahme wird der Versuch unternommen, eine Mischung aus tritiumhaltigem jungem und tritiumfreiem altem Grundwasser zu simulieren. Der  $^{14}\text{C}$ -Anfangsgehalt wird mit 65 pmc angenommen. Der  $^3\text{H}$ -Einganggehalt wurde für Laufzeiten von 11 und 14 Jahren bestimmt. Der Anteil der jungen Komponente,  $Q_j$ , ergibt sich dann aus dem Tritiumgehalt der Probe:

$$\text{Gleichung 1: } Q_j = \frac{c_{\text{Probe}}}{c_j} = 1 - Q_a$$

$Q_a$  ist der Anteil alten Grundwassers mit dem  $^{14}\text{C}$ -Gehalt  $c_a$ :

$$\text{Gleichung 2: } c_a = \frac{c_{\text{Probe}} - c_j}{q_a} \times (1 - Q_a)$$

Das Alter  $A$  der alten Komponente ergibt sich aus

$$\text{Gleichung 3: } A = 8270 \times \log \frac{c_i}{c_a}$$

Die Gleichungen enthalten keine Korrektur, die unterschiedliche Hydrogengehalte der einzelnen Komponenten berücksichtigt. Dies war in unserem Fall unnötig, da die mittleren  $\text{HCO}_3^-$ -Gehalte der Grundwässer der Gruppe B und der Gruppe A von 413 bzw. 427 mg/l quasi übereinstimmen und die Streuung der Einzelwerte um die beiden Mittelwerte (mit Ausnahme der Probe Nr. 29) nicht größer als  $\pm 6\%$  ist. P. G. DIEDERICH & D. HEBERT (1977) haben mit einem ähnlichen Ansatz gearbeitet.

Die mit den Gleichungen 1–3 erhaltenen Ergebnisse sind im Tabelle 2 B enthalten. Die Alter der alten Komponente lassen keine vernünftige regionale Verteilung erkennen. Das überrascht nicht. An den  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Wiederholungsanalysen läßt sich nämlich auch ablesen, daß sich die Mischverhältnisse zeitlich stark geändert haben. Sicher ist, daß der Trockenwetterabfluß meist holozänen Alters ist und sein Anteil in den Brunnenproben oft einige Zehner Prozent beträgt. Da die Abstandsgeschwindigkeit der alten Komponente danach um bis zwei Größenordnungen kleiner als die der jungen Komponente ist, sind die berechneten Anteile in den Brunnenwässern größer als im Quellwasser, wo maximal einige Prozent zu enthalten sind. Eine naheliegende Erklärung ist, daß sich die aus Brunnen und Quellen entnommenen Proben in ihrer Alterszusammensetzung unterscheiden. Die Ergebnisse der Berechnungen weichen übrigens nur wenig voneinander ab, wenn anstelle der auf Oktober bis März begrenzten Grundwasserneubildung in der kühlen Jahreszeit von einer ganzjährigen ausgegangen wird.

Fig. 6 stellt stark schematisiert den Aufbau eines Karstbrunnens dar. Die natürliche Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers nimmt nach unten hin ab (J. C. VOGEL, 1970), was im Untersuchungsgebiet durch Tritiummessungen in Beobachtungsbrunnen unterschiedlicher Tiefe bestätigt wurde. Durch die Tätigkeit der Pumpe am Boden des Brunnens, aus dem z. B. 1 l/s entnommen werden soll, muß Grundwasser mit einer Geschwindigkeit von 220 m/a durch die Oberfläche eines 90 m hohen Zylinders von

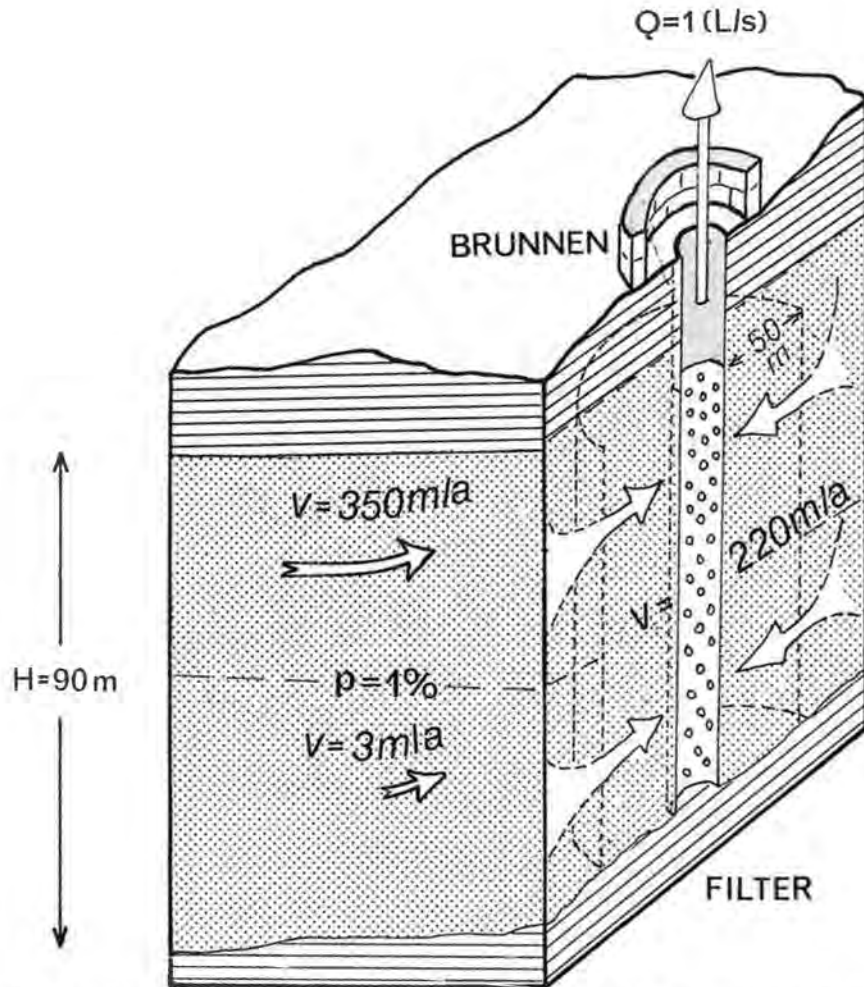


Fig. 6: Schematische Darstellung eines Brunnens, in dem durch den Betrieb der Pumpe das tiefe, langsam bewegte Grundwasser beschleunigt wird und sich dessen Anteil in der gepumpten Probe im Verhältnis zum schneller bewegten Grundwasser des oberen Teils des Grundwasserleiters merklich erhöht.

einem Radius von 50 m fließen, wenn das Hohlräumvolumen gleichmäßig 1% beträgt und die hydraulische Durchlässigkeit entlang der Längsachse gleich groß ist. Mit anderen Worten – die alte Komponente wird beschleunigt. Die junge hat schon eine ausreichend große Geschwindigkeit. Das Verhältnis des Anteils der jungen zu dem der alten Komponente wird im Brunnenwasser im Vergleich zu dem von Quellwasser erniedrigt. Diese qualitative Vorstellung wurde mehrfach in aufgebohrten Quelltöpfen bestätigt gefunden. Die aus ihnen entnommenen Proben hatten  $^{14}\text{C}$ -Wasseralter, die wesentlich über denen der ursprünglichen Quellwässer lagen (z. B. M. A. GEYH & P. GROSCOPF, 1978).

Die entwickelte Vorstellung hat Auswirkungen auf die Interpretation isotopehydrologischer und hydrochemischer Daten von Proben, die aus Brunnen und Quellen entnommen worden sind. Die tatsächlichen MVZ der ersteren sind häufig größer

als die der letzteren, weil die alte Komponente gegenüber der jungen in gepumpten Grundwasserproben im Vergleich zu natürlichen Quellwässern überrepräsentiert ist. Bei hydrochemischen Analysen ergeben sich ebenfalls Unterschiede und möglicherweise Fehldeutungen, sofern die alte Komponente höher mineralisiert ist.

### 3.3. Cannstatter Mineralwässer

Die Cannstatter Mineralwässer sind hoch mineralisiert und haben kaum schwankende  $\text{CO}_2$ -Gehalte. Der Nitratgehalt der untersuchten Proben liegt mit Ausnahme des der Mombachquelle, bei der eine Zumischung junger Keuperwässer angenommen wird, unter 5 mg/l. Fossiles  $\text{CO}_2$ , das aus der Tiefe aufsteigt, löst Kalkstein, führt zu einer Erniedrigung der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte und Erhöhung der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte. Eine Korrektur der eingetretenen Verkleinerung der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte ist nicht möglich. Die 1984 entnommenen Proben haben deutlich kleinere  $^{14}\text{C}$ -Gehalte, aber nur vereinzelt wesentlich höhere  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte, was auf eine möglicherweise vorhandene jahreszeitliche Abhängigkeit der Isotopenwerte hinweist. Sie steht freilich in Widerspruch zu den gleichbleibenden Mineral- und  $\text{CO}_2$ -Gehalten der Cannstatter Mineralwässer.

Eine Umrechnung der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte in Wasseralter ist unter den gegebenen Verhältnissen nicht möglich und angebracht. Der Hauptanteil des geschütteten Wassers wird aber kaum wesentlich älter als 100 Jahre sein.

Nach den neueren hydrogeologischen Vorstellungen (Fig. 2) stammen die von den Cannstatter Mineralquellen geschütteten Grundwässer (Tab. 1 C) überwiegend vom südlichen Grundwasserzufluß. Es müssen aber auch sehr junge Grundwässer enthalten sein, wie die hohen  $^3\text{H}$ -Gehalte nahelegen. Ihr Anteil wird relativ groß sein, weil auf dem viele Kilometer langen Weg zu den Cannstatter Quellen Tritium durch radioaktiven Zerfall verlorenght.

Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Proben sind kleiner als in den vorher besprochenen Gebieten. Es ist daher anzunehmen, daß der andere Hauptteil der Schüttung pleistozäne Grundwässer sind, die kleinere  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte haben als holozäne Grundwässer (A. H. BATH et al., 1979, B. BLAVOUX & P. OLIVE, 1981). Dies unterstützt ebenfalls die neueren Vorstellungen, nach denen sehr alte, hochmineralisierte Grundwässer aus dem S unter hoher Keuper- und Jurabedeckung zufließen.

## 4. Schlußfolgerung

Die hydrochemischen und isotopehydrologischen Analysenergebnisse stehen mit der hydrogeologischen Vorstellung über den Ursprung und die Bewegung der Grundwässer im Cannstatter Raum qualitativ in Einklang. Ein methodisch wichtiges Ergebnis ist, daß die hydrochemischen und isotopehydrologischen Ergebnisse von zusammengehörigen Brunnen- und Quellwasserproben aus stark zerklüfteten Karstsystemen unterschiedlich interpretiert werden müssen.



## Zusammenfassung

Die hydrogeologischen Untersuchungen zum Ursprung und zur Bewegung des Grundwassers im Grundwasserleiter des Hauptmuschelkalkes (Mittlere Trias) in der Region Stuttgart, Ludwigsburg und Leonberg schlossen sporadisch durchgeführte hydrochemische und umweltisotopen-hydrologische ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) Analysen ein, deren Ergebnisse zusammengefaßt und soweit als möglich interpretiert werden. Drei Grundwassertypen sind unterscheidbar: A – Frisch neugebildetes Grundwasser im offenen und teilweise bedeckten Karst, B – Grundwasser im überdeckten Karst und C – kohlenstoffhaltiges Mineralwasser der Cannstatter Quellen. Die isotopehydrologischen und hydrochemischen Ergebnisse stehen in Einklang mit der hydrogeologischen Vorstellung über den Ursprung und die Bewegung der Grundwässer in der Umgebung von Bad Cannstatt.

## Literatur

- AYAKAN, Y., W. ROETHER, K. O. MÜNNICH & G. MATTHESS (1974): The Sandhausen shallow-groundwater tritium experiment. - *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, 1974, 21-43, IAEA, Wien.
- BATH, A. H., W. M. EDMUNDS & J. N. ANDREWS (1979): Paleoclimatic trends deduced from the hydrochemistry of a Triassic sandstone aquifer, United Kingdom. - *Isotope Hydrology*, 1978, 545-568, IAEA, Wien.
- BLAVOUX, B. & P. OLIVE (1981): Radiocarbon dating of groundwater of the aquifer confined in the lower Triassic Sandstones of the Lorraine Region, France. - *J. Hydrol.*, **54**, 167-183, Amsterdam.
- CARLE, W. (1982): Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg (II). - *Geol. Jb.*, **C 31**, 3-72, Hannover.
- CARLE, W. & W. STRÖBEL (1969): Hydrogeologisches Gutachten über den Schutz der Heilquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt und Stuttgart-Berg. - *Geol. Landesamt Baden-Württemberg, unveröff. Bericht*, 33 S., Stuttgart.
- CARLE, W., W. REIFF & W. STRÖBEL (1969). Führer zu den Exkursionen anlässlich der 90. Tagung des Oberrheinischen Geologischen Vereins in Ludwigsburg und Stuttgart vom 8.-12. April 1969. - *Arb. Geol. Paläont. Inst. Univ. Stuttgart, N.F.*, **57**, 87 S., Stuttgart.
- DIEDERICH, P. G. & D. HERBERT (1987): Methodische Aspekte isotopehydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen an einem Karstgrundwasserleiter der DDR. - *Freiberger Forschungshefte*, **C 417**, 76-92, Freiberg.
- DOWNING, R. A., D. B. SMITH, F. J. PEARSON & R. L. OTLET (1977): The age of groundwater in the Lincolnshire limestone, England and its relevance to the flow mechanism. - *J. Hydrol.*, **33**, 201-216, Amsterdam.
- ERIKSSON, E. (1958): The possible use of tritium for estimating groundwater storage. - *Tellus*, **10**, 472-478, Stockholm.
- FRANK, M., W. STRÖBEL & V. ALDINGER (1968): Die Mineralquellen von Stuttgart-Bad Cannstatt-Berg. Geschichte, Hydrogeologie und Chemismus. - *Jb. für Statistik und Landeskunde Baden-Württemberg*, **12**, 70 S., Stuttgart.
- GEYH, M. A. (1972): Basic studies in hydrology and  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  measurements. - *Proc. 24<sup>th</sup> Int. Geol. Congr.*, **11**, 227-234, Montreal.
- GEYH, M. A. (1980): Interpretation of environmental isotopic groundwater data. - *Arid-Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques*, 31-46, IAEA, Wien.
- GEYH, M. A. & P. GROSCHOPF (1978): Isotopephysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb. - *Abh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **8**, 7-58, Freiburg im Brsg.
- GEYH, M. & G. MICHEL (1987): Grundwasserbewirtschaftung und Isotope. - *Z. dt. geol. Ges.*, **138**, 261-271, Hannover.
- JOB, C. & J. ZÖTL (1969): Zur Frage der Herkunft des Gasteiner Thermalwassers. - *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, **21**, 51-115, Graz.

- KNOBELICH, K. (1964): Über die Grundwasserverhältnisse im Stadtgebiet Stuttgart. - Arb. Geol.-Paläont. Inst. TH Stuttgart, N.F., 47, 163 S., Stuttgart.
- KÖHLE, H. (1980): Hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Stuttgart-Bad Cannstatter Mineralquellen. - Doktor-Arbeit, 446 S., Tübingen.
- KRIELE, W. (1976): Hydrogeologische Untersuchungen im Muschelkalkkarst des westlichen unteren Gäus zwischen Pforzheim, Vaihingen/Enz und Sindelfingen. - Doktor-Arbeit, 179 S., Tübingen.
- MÜNNICH, K. O. (1957): Altersbestimmung von hartem Grundwasser. - Naturwissenschaften, 44, 44-45, Heidelberg.
- NERETNIEKS, I., T. ERIKSEN & P. TÄHTINEN (1982): Tracer movement in a single fissure in granitic rock: some experimental results and their implication. - Water Res., 18, 849-858, Washington.
- NYDAL, R. & K. LÖVSETH (1983): Tracing bomb  $^{14}\text{C}$  in the atmosphere 1962-1980. - J. Geophys. Res., 88, 3621-3642, Richmond.
- REIFF, W. (1955): Über den pleistozänen Sauerwasserkalk von Stuttgart-Münster-Bad Cannstatt. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., 37, 56-91, Stuttgart.
- REIFF, W. (1965): Das Alter der Sauerwasserkalke von Stuttgart-Münster-Bad Cannstatt-Untertürkheim. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., 47, 111-134, Stuttgart.
- REIFF, W. (1973): Bericht über die von der DEUQUA-Tagung 1972 durchgeführte Exkursion zu den Travertinen von Stuttgart. - Eiszeitalter u. Gegenwart, 23/24, 410-412, Öhringen.
- REIFF, W. (1981): Reste der Urmenschen im Travertin von Stuttgart-Bad Cannstatt. - Blätter des Schwäb. Albvereins, 86, 81-86, Stuttgart.
- VILLINGER, E. (1982a): Hydrogeologische Aspekte zur geothermischen Anomalie im Gebiet Urach-Boll am Nordrand der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland). - Geol. Jb., C 32, 3-41, Hannover.
- VILLINGER, E. (1982b): Grundwasserbilanzen im Karstaquifer des Oberen Muschelkalks im Oberen Gäu (Baden-Württemberg). - Geol. Jb., C 32, 43-61, Hannover.
- VOGEL, J. C. (1970): Carbon-14 dating of groundwater. - Isotope Hydrology, 1970, 225-237, IAEA, Wien.

## Abstract

The hydrogeologic studies on the origin and movement of the mineralized groundwater from the Middle Triassic (Hauptmuschelkalk) limestone aquifer in the region of Stuttgart, Ludwigsburg and Leonberg, Federal Republic of Germany, included sporadic hydrochemical and isotope hydrological analyses ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ). Three types of groundwater are distinguished: A - recently recharged groundwater from open and partly covered karst, B - groundwater from the covered karst, and C - mineral water with high  $\text{CO}_2$  content discharged from the Cannstatt springs. The isotope hydrological and hydrochemical results are in agreement with the hydrogeological concept describing the origin and movement of the groundwater in the Bad Cannstatt area.

## Dank

Diese Untersuchung wurde von Prof. Dr. W. REIFF, dem Leiter der Zweigstelle Stuttgart des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, begonnen und über die vielen Jahre hinweg mit Interesse verfolgt. Dr. W. SCHOLZ wird für die gründliche Durchsicht des Manuskripts und viele wertvolle Anregungen gedankt. Die Daten von 1984 wurden uns freundlicherweise von der Stadt Stuttgart und dem Geologischen Landesamt Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Den Betreibern der Brunnen sei für die Möglichkeit gedankt, Proben zu entnehmen. Mit dieser Aufgabe haben sich Frau J. SIELMANN und Herr E.-W. SCHULZ, beide Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, verdient gemacht.