

Nachhaltige Bewirtschaftung des gespannten und gepumpten Karstgrundwasservorkommens im Paderborner und Bielefelder Raum nach isotopenhydrologischen Ergebnissen

*Isotopic Evidence for Sustainable Production of Groundwater
from a Confined Karst Aquifer
in the Paderborn and Bielefeld Region*

M. A. GEYH¹⁾ & G. MICHEL²⁾

Inhalt

	Seite
1. Zur Geschichte der Trinkwasserversorgung	6
2. Hydrogeologische Situation	6
3. Hydrogeologische Überlegungen zur Karstgrundwassernutzung	8
4. Isotopenhydrologische Untersuchungen	11
4.1. ¹⁴ C- und ^{δ13} C-Analysen	14
4.1.1. Stadtwerke Paderborn	15
4.1.2. Stadtwerke Bielefeld	17
4.1.3. Gemeinsamkeiten	18
4.2. Tritiumanalysen	19
4.3. ^{δ18} O-Langzeitbeobachtungen	20
4.3.1. Niederschläge	20
4.3.2. Stadtwerke Bielefeld	38
4.3.3. Gemeinsamkeiten	42
5. Diskussion	42
5.1. Hydraulisches Modell	42
5.2. Wasserentnahmen und Abfluß der Pader-Quellen	49
6. Folgerungen und Nutzungsempfehlungen	51
Zusammenfassung	52
Literatur	52
Summary	54
Dank	54

¹⁾ Prof. Dr. Mebus A. GEYH, Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Postfach 51 153, D 30 631 Hannover.

²⁾ Prof. Dr. Gert MICHEL, Dreeschen 36, 29 451 Dannenberg-Streetz.

1. Zur Geschichte der Trinkwasserversorgung

Die seit der Karolingischen Zeit auch wegen ihrer starken Karstquellen bekannte Stadt Paderborn hat bereits zu Beginn dieses Jahrhunderts weitblickend mit der Modernisierung ihrer Trinkwasserversorgung begonnen, nachdem 1898 in der damals 22 000 Einwohner zählenden Stadt eine Typhusepidemie 234 Erkrankungen mit 32 Toten gefordert hatte (A. GÄRTNER, 1902). Im August 1902 wurde die in Deutschland erste Ozonanlage der Firma Siemens & Halske eingesetzt, um weiterhin das Karstgrundwasser der Pader-Quellen für die Trinkwasserversorgung verwenden zu können. Die Karstquellen schütten im langjährigen Mittel 200 Mio. m³/a bzw. 6,32 m³/s, maximal 14,03 m³/s und minimal 3,34 m³/s.

Wegen der nach Ende des Zweiten Weltkrieges schnell wachsenden Bevölkerung und der steigenden zivilisatorischen Ansprüche mußte an eine Erweiterung der Trinkwasserversorgung gedacht werden. Im Jahr 1967 entschloß sich der damalige Direktor der Stadtwerke Paderborn, Dipl.-Ing. T. HEDERER, am Diebesweg eine Tiefbohrung (PB 1) bis unter den Emscher-Mergel in das gespannte Karstgrundwasser niederzubringen (T. HEDERER, 1977). Nach der verbreiteten geologischen Lehrmeinung war dort Sole zu erwarten (Fig. 1), wie sie im Münsterländer Becken überall vorkommt (G. MICHEL, 1983a, 1983b). Es kam anders – aus der Bohrung floß artesisch qualitativ hochwertiges, nicht versalztes Karstgrundwasser in großen Mengen aus. Die folgenden Tiefbohrungen in der weiteren Umgebung erwiesen sich als ebenso ergiebig und das angetroffene Karstgrundwasser als qualitativ hochwertig.

Auf dem Gelände Diebesweg wurde der Grundstein für die heutige Trinkwasserversorgung von Paderborn gelegt. Im Jahre 1992 gaben die Stadtwerke Paderborn einen Zusammendruck der zu diesem Thema relevanten wissenschaftlichen Publikationen heraus (vgl. STADTWERKE PADERBORN GMBH, 1992).

Zwischen 1970 bis 1976 wurde die jährliche Pumprate auf 10 Mio. m³ gesteigert und dann bis 1990 nahezu konstant gehalten. Ab 1991 wurden zur Schonung des Karstgrundwasservorkommens die Entnahmen für die Trinkwasserversorgung schrittweise zurückgenommen. Im Jahr 1998 betrug die Förderung lediglich noch 7 Mio. m³/a.

Der Erfolg der Stadtwerke Paderborn mit der Erschließung „süßen“ Karstgrundwassers am Ostrand des Münsterländer Beckens veranlaßte die Nachbarstadt Bielefeld ab 1978 ebenfalls im Aquifer unter dem Emscher-Mergel systematisch nach tiefem Karstgrundwasser für die Trinkwasserversorgung zu bohren. Seit den 80er Jahren werden dort zusätzlich rund 10 Mio. m³/a Karstgrundwasser gefördert.

2. Hydrogeologische Situation

Die hydrogeologische Situation der Karstgrundwasservorkommen nördlich von Paderborn und westlich von Bielefeld ist in Fig. 1 dargestellt. Im W liegt das vom Emscher-Mergel überdeckte Münsterländer Becken, dessen hochversalztes Mineralwasser (Sole) noch bis in unser Jahrhundert hinein an vielen Orten, nur wenige Zehnerkilometer von Paderborn entfernt, in natürlichen Quellen austrat (z. B. Salzkotten, Bad Sassendorf) und z. T. zur Salzgewinnung genutzt wurde. Vermutlich als Folge der Sumpfungmaßnahmen des Steinkohlebergbaus in Nordrhein-Westfalen wurde der hydrostatische Druck in der Beckenstruktur soweit abgesenkt, daß damit das Versiegen der meisten

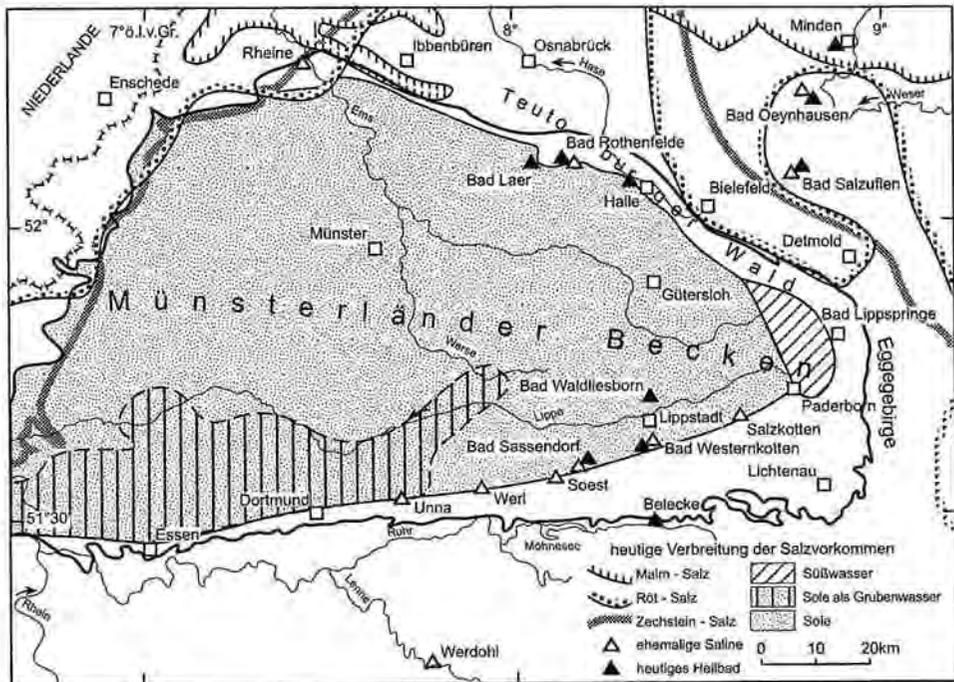


Fig. 1: Das Vorkommen von Sole im Münsterländer Becken und von süßem Karstgrundwasser im östlichen Teil zwischen Bielefeld und Paderborn (G. MICHEL, 1983a, 1983b).
 The occurrence of saline groundwater in the Münsterland basin and fresh groundwater in the karst aquifer system in the eastern part of the basin between Bielefeld and Paderborn (G. MICHEL, 1983a, 1983b).

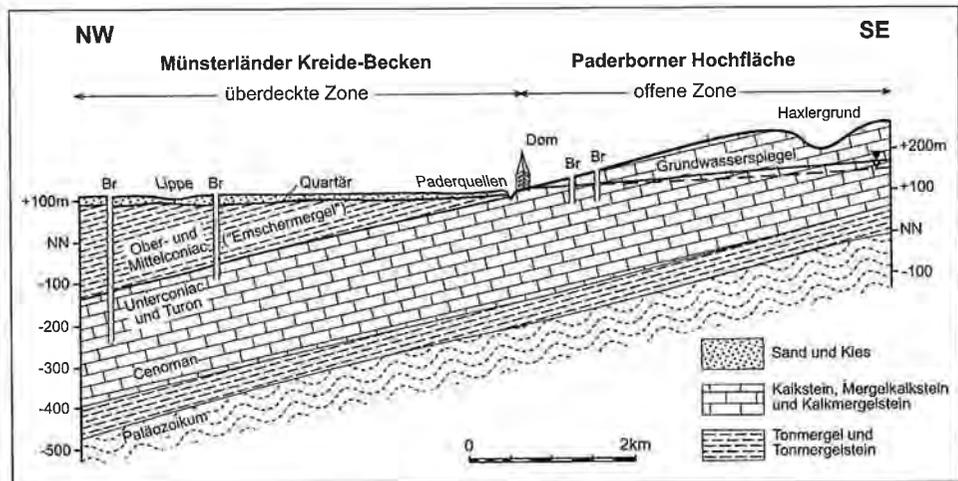


Fig. 2: Schematisierter hydrogeologischer Schnitt durch den Karstaquifer im Stadtgebiet von Paderborn (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979).
 Schematic hydrogeological section through the karst aquifer in Paderborn (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979).

Solequellen in diesem Gebiet erklärt wird (G. MICHEL & W. STRUCKMEIER, 1985, W. STRUCKMEIER, 1990).

Gespanntes, nicht mineralisiertes, „süßes“ Karstgrundwasser, das sowohl von den Stadtwerken Paderborn als auch Bielefeld gepumpt wird, ist in einer schmalen Kalotte im Turon-Cenoman-Aquifer unter dem Emscher-Mergel verbreitet. Nach der hydrochemischen Kartierung in der weiteren Umgebung von Paderborn hat diese Zone im N eine Breite von etwa 1 km (Stukenbrock – siehe auch Fig. 6) und nimmt im S auf 10 km (Paderborn) zu.

Eine hydrogeologische Vorstellung vom Grundwasserneubildungsgebiet vermittelt der geologische Schnitt zwischen Teutoburger Wald und dem mit Emscher-Mergel überdeckten Münsterländer Becken (Fig. 2).

Das Einzugsgebiet befindet sich auf der Paderborner Hochfläche und im weiter östlich gelegenen Eggegebirge. In der offenen Zone am Nordwestrand der Paderborner Hochfläche und in Taleinschnitten sind mehrere ergiebige Karstquellen bekannt, so in Bad Lippspringe (Fig. 4; H. STILLE, 1903, M. E. BAŞKAN, 1970, M. KOCH & G. MICHEL, 1972, E. P. LÖHNERT, 1990).

Im W schließt sich an das gespannte süße Karstgrundwasser eine geringfügig schmalere Zone mit höher konzentriertem Chloridwasser an. Sie erstreckt sich im Bereich von Schloß Neuhaus – Fischteiche – Warme Pader und bildet den Übergang zum Solevorkommen des Münsterländer Beckens.

Im E in Bad Lippspringe steigt auf Störungen thermales Sulfatwasser auf (Arminius-, Liborius- und Martinus-Quelle).

3. Hydrogeologische Überlegungen zur Karstgrundwassernutzung

Nach den einschlägigen hydrogeologischen Erfahrungen wird das von den Stadtwerken Paderborn und Bielefeld genutzte Karstgrundwasser vor rezenter Kontamination (Nitrat, Pestizide) als geschützt angesehen, da es von dem bis zu mehreren 100 m mächtigen Emscher-Mergel überdeckt und daher gespannt ist. Die geringe Breitenausdehnung dieser Süßwasserzone von etwa 5 km bei Paderborn zwischen den Chlorid- und den Sulfatgrundwasservorkommen erklärt die ernst zu nehmenden Bedenken der Hydrogeologen und Wasserwirtschaftler, daß die Wasserentnahmen die Sole mobilisieren und damit das Süßwasservorkommen verkleinern oder kontaminieren könnten. Legt man eine flächenmäßige Erstreckung des Süßwasservorkommens im Paderborner Raum von $6000 \times 5000 \text{ m}^2$ und eine Mächtigkeit des genutzten Grundwasserleiters von 250 m zugrunde, ergeben sich für ein angenommenes realistisches Hohlraumvolumen von 3 % 225 Mio. m^3 süßes Grundwasser. Seit Beginn der Förderung haben die Stadtwerke Paderborn rund 235 Mio. m^3 tiefes Grundwasser gefördert. Ohne Neubildung wäre das Vorkommen heute bereits erschöpft. Für den Bielefelder Raum liefert die Abschätzung ein ähnliches Ergebnis.

Entgegen aller Vorbehalte hat die hydrochemische Langzeitbeobachtung in der Nähe der Süßwasser-Salzwasser-Grenze bisher keine Mobilisierung erkennen lassen, also auch keine unmittelbare Gefährdung durch Versalzung nachgewiesen. Ein Grund dafür ist die große Rate des in der Paderborner Hochfläche und im Eggegebirge neugebildeten Karstgrundwassers, die sich in der starken mittleren Schüttung der Pader-Quellen von 200 Mio. m^3/a widerspiegelt. Die Entnahmen durch die Stadtwerke Paderborn machen davon gerade einmal 5 % aus. Trotz der großen Variationsbreite meint E. P. LÖHNERT

(1990), daß sich die jährliche Wasserentnahme von 10 Mio. m³ der Stadtwerke Paderborn in der Abnahme der mittleren monatlichen Schüttung der Quellen zwischen 1976 und 1980 gegenüber 1959 und 1975 erkennen läßt. C. STRUCK (1999) hat schlüssig nachgewiesen, daß die zeitweise Abnahme der Schüttung eine Folge unterdurchschnittlicher Niederschläge in der Mitte der 70er Jahre war (Kap. 5.2.). Dieser Unterschied wäre nicht aufgetreten, hätte E. P. LÖHNERT (1990) die gesamte, ihm zur Verfügung stehende Zeitreihe bis 1982 verwendet. Es trifft mithin entgegen anderslautender Aussagen (W. STRUCKMEIER, 1990) auch für die Pader-Quellen zu, daß deren Schüttung – wie bei anderen Karstquellen auch – im wesentlichen von den Niederschlägen (Fig. 3) bestimmt wird.

Als methodisch unabhängiges Instrumentarium zur Klärung der hydrogeologischen Situation wurde schon vor 25 Jahren an einer Vielzahl von Brunnen und aufgebohrten Quellen (Tab. 1) mit isopenhydrologischen Untersuchungen begonnen, die in der Folgezeit kontinuierlich fortgesetzt worden sind (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1974, 1979, 1983, 1987).

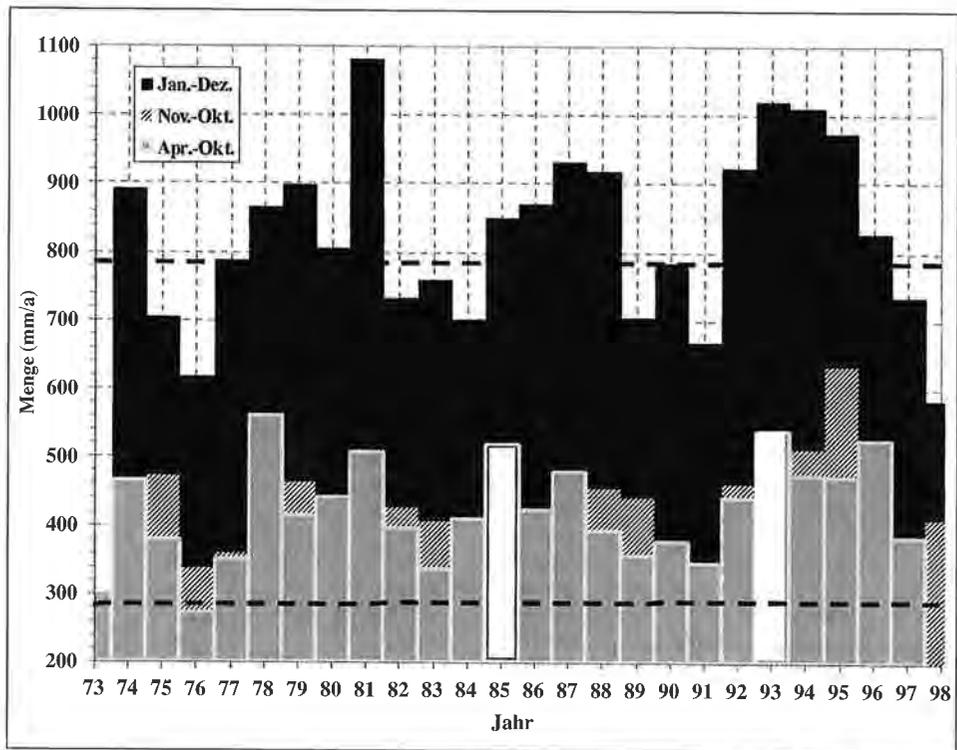


Fig. 3: Ganzjährige, winterliche und sommerliche Niederschläge der meteorologischen Station Paderborn P 9 für die Jahre 1973–1998, von denen in den weiß markierten Jahren junge Grundwässer im gepumpten Grundwasser isotopisch nachgewiesen worden sind. In diesen Jahren gab es extreme Sommerniederschläge nach mehreren vorangegangenen Trockenjahren. Annual, winter and summer precipitation at the Paderborn P 9 meteorological station for the period 1973 to 1998. The columns marked in white belong to years with extreme high summer precipitation after many preceding years of drought. As a result, very young groundwater was pumped from the confined aquifer.

Tab. 1: Geographische und technische Angaben zu den Entnahmestellen. TuG – Brunnentiefe in m u.G., Jahr – Baujahr, Qu. – Quelle, Br. – Förderbrunnen, aBr. – artesisch ausfließender Brunnen, GwM – Grundwassermessstelle, TK – topographische Karte 1:25 000.
 Geographical and technical information on the sampled wells. TuG – well depth in m below surface, Jahr – year of construction, Qu. – spring, Br. – production well, aBr. – artesian well, GwM – groundwater measuring point, TK – topographic map 1:25,000.

Nr.	Entnahmestelle	rechts	hoch	TuG	Art	Jahr
Gebiet Paderborn (Lage TK 4218 Paderborn)						
1	Rotheborn-Quelle	3488130	5731370	0	Qu.	
2	Jordan-Quelle	3488070	5738960	0	Qu.	
3	Alte Brauerei	3482480	5730820	80	Br.	1967
4	WW Lippspringe flach	3487540	5738600	28	Br.	
5	WW Lippspringe tief	3487540	5738600	65	Br.	
6	Padulus-Quelle	3480360	5734710	192	Qu.	1947
7	Jacobs	3482220	5734530	196	aBr.	1947
8	Fischteiche	3481921	5733947	132	aBr.	1934
9	Pädagogische HS	3482420	5732500	55	aBr.	1961
10	Warme Pader	3483800	5731960	0	Qu.	
11	Arminius-Quelle	3487790	5738600	9	Qu.	1832
12	Liborius-Quelle	3487775	5738475	27	Qu.	1902
13	Martinus-Quelle	3486940	5739250	500	Qu.	1962
14	PB 1	3484106	5736805	248	Br.	1970
15	PB 2	3483640	5736950	212	Br.	1968
16	PB 3	3483990	5737000	300	Br.	1972
17	PB 4	3483980	5736995	300	Br.	1972
18	PB 5	3484024	5737045	335	Br.	1973
19	PB 6	3484035	5737175	390	Br.	1974
20	PB 12	3483823	5736541	315	Br.	1981
21	PB 15	3483900	5736365	204	Br.	1971
22	PB 22	3483720	5736770	379	Br.	1977
23	PB 40	3485116	5738158	410	Br.	1975
24	PB 43	3485070	5738370	231	Br.	1970
25	PB 45	3485270	5738465	234	Br.	1970
26	Bödecker	3484435	5734530	83	aBr.	1916
27	Penn Elastic	3482840	5734800	194	Br.	1978
28	DB Ausbauwerk	3482995	5733400	82	Br.	
29	Habichtssee	3481520	5736600	311	Br.	1980
30	Otilien-Quelle	3482225	5732600	0	Qu.	
31	Brechmann	3484405	5734202	73	Br.	
32	Westfleisch	3482560	5728700	139	Br.	
33	Niesenteich-Quelle	3484460	5733130	0	Qu.	
34	Burlington	3484920	5733300	59,5	Br.	
Gebiet Bielefeld (Lage TK 4118 Bielefeld)						
1	BI 3	3480360	5745710	470	Br.	1980
2	BI 4	3479180	5749750	678	GwM	1976
3	BI 5	3480820	5750800	504	Br.	1976
4	BI 6	3480230	5751440	380	Br.	1977
5	BI 181	3480370	5749980	31	Br.	1950
6	BI 182	3480480	5750100	41	Br.	1950
7	Hirsch-Quelle	3476870	5754290		Qu.	
8	BI 8	3476410	5753740	87	Br.	

4. Isotopenhydrologische Untersuchungen

Isotopenhydrologische Analysen bieten sich an, wenn die Hydrogeologen die anstehenden Fragen mit ihrem klassischen Instrumentarium – hydrogeologische, geohydraulische und hydrochemische Methoden – nicht eindeutig klären können (H. MOSER & W. RAUERT, 1980). Üblich sind neben Messungen der ^{14}C -Werte der im Grundwasser gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen (dissolved inorganic carbon compounds – DIC, also vor allem HCO_3^- und CO_2) die kostenmäßig günstigen Bestimmungen der stabilen Isotope des Sauerstoffs ($\delta^{18}\text{O}$), Wasserstoffs ($\delta^2\text{H}$) und Kohlenstoffs ($\delta^{13}\text{C}$) sowie von Tritium (^3H), siehe M. A. GEYH & G. MICHEL (1991). Aus den ^{14}C - und ^3H -Ergebnissen (Tab. 2) können unter günstigen Umständen Mittlere Verweilzeiten (MVZ), vgl. auch M. A. GEYH & J. MAIRHOFER (1970), M. A. GEYH & P. GROSCHOFF (1978), P. MALOSZEWSKI (1994), DVWK (1995), bzw. Grundwasseralter abgeleitet werden.

Die Ziele der isotopenhydrologischen Untersuchungen am tiefen gespannten und gepumpten Karstgrundwasser waren seitens der angewandten Hydrogeologie und der Stadtwerke klar definiert worden:

- Abschätzung des Alters bzw. der Alterszusammensetzung des Karstgrundwassers,
- Einschätzung der Möglichkeit einer Mobilisierung der benachbarten Sole sowie
- Beurteilung des Gefährdungspotentials durch anthropogene Kontaminationen.

Seit dem Beginn der Untersuchungen im Jahr 1972 sind bis jetzt 156 ^{14}C - und 160 ^3H -Messungen sowie $\delta^{13}\text{C}$ -, 2270 $\delta^{18}\text{O}$ - bzw. $\delta^2\text{H}$ -Bestimmungen durchgeführt worden. Dabei waren insgesamt 42 Entnahmestellen im Raume Paderborn und Bielefeld inklusive dreier Wetterstationen einbezogen.

Tab. 2: ^{14}C -, $\delta^{13}\text{C}$ - und ^3H -Ergebnisse von den Paderborner und Bielefelder Gebieten. Laborcode: Hv – Hannover, Bh – Buchholz. (Fortsetzung S. 12–14.)
 ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ and ^3H results from the Paderborn and Bielefeld study areas. Laboratory code: Hv – Hannover, Bh – Buchholz. (Continuation p. 12–14.)

Entnahmestelle	Hv	Bh	Monat/ Jahr	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Wert [pMC]	^{14}C -Alter [Jahre v.h.]	^3H -Wert [TU]
Paderborn/Grundwasser des offenen Karsts							
Rotheborn-Quelle	4644	1251	11/71	-10,8	61,8 ± 0,7	3865 ± 90	59,5 ± 2,1
Rotheborn-Quelle	8866	3584	05/78	-13,4	75,4 ± 1,0	2275 ± 100	69,8 ± 2,2
Rotheborn-Quelle	11053	4920	09/81	-11,0	52,8 ± 0,9	5125 ± 135	24,4 ± 1,4
Jordan-Quelle	4087	898	02/71	-12,4	79,5 ± 1,1	1850 ± 105	114,1 ± 2,3
Jordan-Quelle	8863	3581	05/78	-13,8	85,5 ± 1,1	1255 ± 105	75,8 ± 2,5
Jordan-Quelle	11049	4916	09/81	-14,2	71,4 ± 0,9	2710 ± 100	51,4 ± 1,7
Brauerei	4645	1252	11/71	-9,0	79,6 ± 0,9	1825 ± 95	116,2 ± 3,0
Brauerei	8854	3572	05/78	-13,7	72,2 ± 0,7	2620 ± 80	77,4 ± 2,5
WW Lippspringe flach	4650	1257	11/71	-9,2	59,2 ± 1,0	4215 ± 135	108,7 ± 2,2
WW Lippspringe flach	8860	3578	05/78	-11,9	58,7 ± 0,9	4285 ± 125	63,9 ± 1,5
WW Lippspringe flach	6842	1940	05/78	-13,6	70,3 ± 1,0	2835 ± 115	91,0 ± 2,6
Brechmann	9514	3936	03/79	-8,1	29,9 ± 0,5	9690 ± 135	18,0 ± 1,4
Westfleisch	8853	3571	05/78	-12,9	64,5 ± 1,0	3530 ± 120	35,8 ± 1,0
Niesenteich	8865	3582	05/78	-12,6	62,9 ± 1,0	3725 ± 120	57,7 ± 2,0
Burlington 1	7814	2818	11/76		64,1 ± 0,8	3565 ± 95	64,6 ± 2,3
Burlington 2	7815	2819	11/76	-12,8	70,3 ± 0,9	2835 ± 100	65,9 ± 1,6

Entnahmestelle	Hv	Bh	Monat/ Jahr	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Wert [pMC]	^{14}C -Alter [Jahre v.h.]	^3H -Wert [TU]
Paderborn/Chlorid-Wasser im bedeckten Karst							
Padulus-Quelle	4081	892	02/71	-16,8	18,0 ± 0,8	13700 ± 240	3,8 ± 0,6
Padulus-Quelle	8856	3574	05/78	-3,9	16,7 ± 0,7	14340 ± 340	< 2,6
Padulus-Quelle	11051	4918	09/81	-5,3	16,2 ± 0,5	14635 ± 250	6,3 ± 1,1
Padulus-Quelle	14413	7141	07/86	-2,9	16,2 ± 0,4	14615 ± 175	6,1 ± 0,9
Jacobs	4083	894	02/71	-12,2	38,6 ± 0,9	7945 ± 190	23,9 ± 0,8
Jacobs	4659	1260	11/71	-17,3	36,9 ± 0,4	8010 ± 80	24,2 ± 1,2
Jacobs	8855	3573	05/78	-8,5	34,4 ± 0,9	8560 ± 180	28,7 ± 1,6
Jacobs	9516	3938	03/79	-9,2	35,1 ± 0,4	8400 ± 95	31,9 ± 0,9
Jacobs	11063	4929	09/81	-8,5	33,2 ± 0,7	8845 ± 170	33,0 ± 1,5
Jacobs	14424	7137	07/86	-8,2	33,8 ± 0,6	8725 ± 145	26,5 ± 1,5
Fischteiche	4080	891	02/71	-7,5	31,1 ± 0,7	9390 ± 170	17,1 ± 0,7
Fischteiche	8857	3575	05/78	-6,7	31,4 ± 0,8	9265 ± 210	28,2 ± 0,9
Fischteiche	11050	4917	09/81	-8,1	28,9 ± 0,6	9965 ± 165	25,6 ± 1,5
Fischteiche	14412	7140	07/86	-4,9	28,9 ± 0,5	9970 ± 130	17,3 ± 1,5
Päd. Hochschule	4639	1246	11/71	-12,2	34,6 ± 0,4	8530 ± 110	17,0 ± 1,0
Päd. Hochschule	8858	3576	05/78	-7,3	35,0 ± 0,6	8440 ± 135	26,5 ± 1,6
Päd. Hochschule	14422	7135	07/86	-7,1	33,4 ± 0,5	8815 ± 115	22,1 ± 1,5
Warme Pader	4643	1250	11/71	-14,3	47,7 ± 0,4	5950 ± 75	42,6 ± 1,8
Warme Pader	8867	3585	05/78	-9,2	37,1 ± 0,6	7960 ± 130	33,5 ± 1,7
Warme Pader	11052	4919	09/81	-8,1	37,1 ± 0,8	7970 ± 165	46,0 ± 1,6
Ottilien-Quelle	4082	893	02/71	-12,8	35,0 ± 1,3	8420 ± 285	16,9 ± 0,9
Ottilien-Quelle	14423	7136	07/86	-5,1	27,8 ± 0,4	10285 ± 125	19,9 ± 1,4
Paderborn/Sulfat-Wasser im überdeckten Karst							
Arminius-Quelle	4649	1256	11/71	-14,3	13,7 ± 1,1	15900 ± 670	< 1,6
Arminius-Quelle	8861	3579	05/78	-1,6	8,1 ± 1,0	20180 ± 910	< 2,5
Arminius-Quelle	9512	3934	03/79	-1,7	7,4 ± 1,3	20910 ± 1330	< 1,2
Arminius-Quelle	11065	4931	09/81	-1,9	14,2 ± 0,5	15650 ± 270	< 2,3
Arminius-Quelle	14411	7139	07/86	-1,2	7,7 ± 0,3	20630 ± 270	< 2,2
Liborius-Quelle	4648	1255	11/71	-14,7	35,8 ± 3,4	8260 ± 790	< 2,2
Liborius-Quelle	8862	3580	05/78	-1,0	5,9 ± 0,9	22750 ± 1140	< 2,5
Liborius-Quelle	9511	3933	03/79		15,2 ± 2,1	15100 ± 1020	3,9 ± 0,7
Liborius-Quelle	11066	4932	09/81	-0,6	8,4 ± 0,5	19950 ± 435	6,7 ± 0,6
Martinus-Quelle	4086	897	02/71	-16,2	8,3 ± 0,6	20040 ± 610	< 1,6
Martinus-Quelle		1253	02/75				< 1,6
Martinus-Quelle	11064	4931	09/81	-2,9	8,8 ± 0,3	19520 ± 320	< 2,3
Paderborn/Karstwasser im überdeckten Bereich							
PB 1	4079	890	02/71		45,2 ± 0,6	6375 ± 95	14,3 ± 0,9
PB 1	4651	1258	11/71	-11,8	43,7 ± 0,5	6645 ± 95	24,9 ± 1,0
PB 1	6844	2350	02/75		42,9 ± 0,6	6790 ± 105	24,9 ± 0,9
PB 1	8849	3567	05/78	-10,3	39,5 ± 0,7	7465 ± 135	23,5 ± 1,5
PB 1	9510	3932	03/79	-8,6	40,0 ± 1,0	7355 ± 200	21,8 ± 1,4
PB 1		7398	11/85				19,8 ± 0,8
PB 1		7399	12/85				17,3 ± 1,4
PB 1	14417	7145	07/86	-9,2	39,8 ± 0,6	7400 ± 120	19,1 ± 1,4
PB 1	22096	12468	06/97	-10,2	39,1 ± 0,4	7545 ± 90	10,6 ± 1,5
PB 2	4078	889	02/71	-17,3	47,3 ± 1,0	6020 ± 170	47,7 ± 1,2
PB 2	8845	3563	05/78	-11,1	43,7 ± 0,8	6660 ± 150	70,5 ± 1,4
PB 2		3585	05/78				33,5 ± 1,8
PB 2	11057	4924	09/81	-10,2	44,3 ± 0,8	6535 ± 140	42,7 ± 1,6
PB 2	22103	12475	06/97	-10,2	44,7 ± 0,6	6470 ± 105	19,8 ± 1,4
PB 3	4084	895	02/71	-8,4	36,0 ± 0,4	8210 ± 90	17,6 ± 0,7

Entnahmestelle	Hv	Bh	Monat/ Jahr	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Wert [pMC]	^{14}C -Alter [Jahre v.h.]	^3H -Wert [TU]
PB 3	4895	13037	01/71	-10,6	44,8 ± 0,9	6455 ± 160	25,6 ± 1,4
PB 3	8847	3565	05/78	-10,6	41,9 ± 0,7	6995 ± 130	43,5 ± 1,9
PB 3	11059	4925	09/81	-11,6	46,8 ± 0,8	6100 ± 145	41,7 ± 0,8
PB 3	14415	7143	07/86	-10,4	43,6 ± 0,6	6660 ± 115	26,1 ± 1,5
PB 3	22098	12470	06/97	-10,6	44,0 ± 0,6	6605 ± 115	14,6 ± 1,5
PB 4	7998	2975	12/76	-9,5	46,3 ± 0,8	6815 ± 120	49,0 ± 1,1
PB 4	8846	3564	05/78		44,0 ± 0,7	6190 ± 140	43,5 ± 1,9
PB 4	14414	7142	06/86	-10,6	47,2 ± 0,6	6580 ± 130	37,4 ± 0,5
PB 4	22097	12469	06/97	-10,6	47,0 ± 0,6	6070 ± 110	15,9 ± 1,5
PB 5	8848	3566	05/78	-11,4	39,7 ± 0,7	7420 ± 130	19,7 ± 0,8
PB 5	14416	7144	07/86	-9,5	42,8 ± 0,6	6015 ± 95	16,6 ± 0,7
PB 5	22099	12471	06/97	-10,1	38,5 ± 0,6	7655 ± 130	12,5 ± 1,0
PB 6	6492	2214	03/75	-8,5	33,2 ± 0,4	8855 ± 85	17,2 ± 1,3
PB 6	9509	3931	03/79	-10,6	37,3 ± 0,5	7920 ± 100	20,8 ± 0,8
PB 6	14425	7147	07/86	-10,5	38,8 ± 0,6	7615 ± 120	16,6 ± 0,7
PB 6	22101	12473	06/97	-10,5	39,2 ± 0,9	7510 ± 185	13,5 ± 1,5
PB 7	22102	12474	06/97	-10,7	44,5 ± 0,5	6505 ± 85	17,1 ± 1,6
PB 12	7400		11/85				29,6 ± 1,6
PB 12	7401		12/85				30,9 ± 1,6
PB 12	14418	7146	07/86	-10,6	46,2 ± 0,5	6210 ± 90	30,0 ± 0,9
PB 12	22095	12467	06/97	-10,5	43,4 ± 0,5	6715 ± 95	23,2 ± 1,1
PB 15	4652	1259	11/71	-9,8	41,8 ± 0,4	7020 ± 80	25,9 ± 0,9
PB 22	8844	3562	05/78	-11,3	45,5 ± 0,7	10315 ± 170	54,5 ± 1,4
PB 22	11058	4925	09/81	-9,0	50,2 ± 0,7	12870 ± 140	41,7 ± 0,8
PB 22	14426	7148	07/86	-9,4	48,9 ± 0,7	10135 ± 130	35,3 ± 1,6
PB 22	22094	12466	06/97	-11,0	48,3 ± 0,6	5845 ± 90	20,6 ± 1,6
PB 40	6843	2349	02/75	-11,7	42,1 ± 0,7	6950 ± 140	25,8 ± 1,5
PB 43	8851	3569	05/78	-9,5	28,9 ± 0,6	9960 ± 160	8,9 ± 0,7
PB 45	4085	896	02/71	-11,8	26,4 ± 0,7	6265 ± 130	8,7 ± 0,9
PB 45	7997	2974	05/78	-8,4	28,2 ± 0,7	5540 ± 110	21,9 ± 1,6
PB 45	8850	3568	05/78	-7,9	17,3 ± 0,7	5745 ± 115	6,0 ± 0,9
PB 45	9513	3935	03/79	-9,6	27,7 ± 0,6	10700 ± 210	7,0 ± 1,2
PB 45	11060	4926	09/81	-8,8	20,2 ± 0,4	10170 ± 205	4,1 ± 1,2
PB 45	14410	7138	07/86	-8,4	28,3 ± 0,4	14065 ± 330	6,4 ± 0,7
PB 45	22104	12476	06/97	-8,5	23,5 ± 0,4	11645 ± 150	< 1,4
Bödecker	4641	1248	11/71	-17,7	48,1 ± 0,4	5885 ± 65	24,5 ± 0,8
Bödecker	8864	3582	05/78	-10,8	42,8 ± 0,7	6825 ± 135	21,3 ± 0,9
Penn Elastic	8859	3577	05/78	-8,4	29,5 ± 0,7	9800 ± 180	7,2 ± 1,4
Penn Elastic	9515	3937	03/79	-9,2	35,6 ± 0,4	8285 ± 95	5,3 ± 0,6
Penn Elastic	11062	4928	09/81	-9,5	29,5 ± 0,6	9820 ± 160	5,3 ± 0,6
Penn Elastic	14421	7134	07/86	-8,0	33,0 ± 0,5	8905 ± 115	12,0 ± 1,2
DB Ausbauwerk	4638	1245	11/71	-12,8	47,2 ± 0,6	6030 ± 100	32,6 ± 1,0
DB Ausbauwerk	8852	3570	03/79	-11,3	48,5 ± 1,0	5815 ± 165	41,9 ± 1,8
Habichtssee	10804		05/78	-6,4	19,4 ± 0,3	13150 ± 115	
Habichtssee	10805	4740	05/78	-6,6	18,3 ± 0,4	13650 ± 155	< 1,2
Habichtssee	11061	4927	05/78	-7,2	18,7 ± 0,5	13460 ± 230	20,1 ± 1,3
Habichtssee	14420	7133	07/86	-5,5	19,3 ± 0,4	13240 ± 160	11,0 ± 0,8
Habichtssee	22100	12472	06/97	-6,6	19,6 ± 0,4	13095 ± 165	9,1 ± 1,4
Bielefelder Region							
BI 1	8849	3567	05/78	-10,3	39,5 ± 0,7	7465 ± 135	23,5 ± 1,5
BI 1	14419	7132	07/86	-7,8	35,0 ± 1,0	8425 ± 230	31,1 ± 1,6
BI 3	10828	4787	03/81	-9,0	42,5 ± 0,8	6885 ± 150	35,4 ± 1,5
BI 3	11005	4909	09/81	-10,3	40,7 ± 0,5	7220 ± 95	35,7 ± 0,8

Entnahmestelle	Hv	Bh	Monat/ Jahr	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Wert [pMC]	^{14}C -Alter [Jahre v.h.]	^3H -Wert [TU]
BI 3	11788	5239	07/82	-9,3	41,9 ± 0,9	6980 ± 170	36,5 ± 1,6
BI 3	14407	7129	07/86	-7,8	41,6 ± 0,6	7055 ± 110	28,9 ± 1,6
BI 3	17640	9548	04/91	-7,0	40,8 ± 0,4	7200 ± 75	26,7 ± 1,3
BI 3	19185	10658	06/93	-7,9	42,4 ± 0,6	6900 ± 115	20,4 ± 1,4
BI 3	20551	11461	02/95	-8,9	41,6 ± 0,9	7040 ± 175	14,4 ± 1,3
BI 3	21956	12414	06/97	-9,1	41,6 ± 0,6	7055 ± 110	13,5 ± 1,0
BI 4	19184	10657	06/93	-0,7	10,7 ± 0,2	17960 ± 175	15,6 ± 1,2
BI 4	20552	11462	02/95	-3,1	17,6 ± 0,8	13930 ± 355	11,3 ± 1,2
BI 4	21957	12415	06/97	-3,5	14,5 ± 0,5	15530 ± 250	12,1 ± 1,5
BI 5	4088	899	10/71	-6,6	24,6 ± 0,6	11255 ± 200	26,5 ± 1,0
BI 5	7459	2717	04/76	-11,2	60,5 ± 0,9	4035 ± 115	99,0 ± 2,5
BI 5	8394	3270	08/77		56,1 ± 0,6	4640 ± 80	86,8 ± 2,4
BI 5	8656	2995	03/78	-12,4	60,3 ± 1,0	4070 ± 130	85,9 ± 2,6
BI 5	9199	3658	09/78	-13,2	42,1 ± 5,0	6950 ± 900	77,5 ± 1,4
BI 5	9953	4157	11/79		59,9 ± 0,7	4120 ± 90	76,9 ± 2,4
BI 5	10829	4788	03/81	-11,7	60,4 ± 0,9	4050 ± 125	65,9 ± 1,0
BI 5	11789	5240	07/82	-8,3	58,5 ± 0,7	4310 ± 100	53,6 ± 1,7
BI 5	14408	7130	07/91	-10,9	63,1 ± 0,8	3705 ± 80	38,7 ± 1,6
BI 5	17641	9550	04/91	-11,7	60,8 ± 0,6	3995 ± 100	26,3 ± 1,5
BI 5	19183	10656	06/93	-11,0	63,8 ± 0,6	3605 ± 75	18,3 ± 1,3
BI 5	20553	11463	02/95	-12,2	65,7 ± 1,1	3360 ± 130	16,4 ± 1,3
BI 5	21958	12416	06/97	-12,4	64,8 ± 0,8	3490 ± 100	16,6 ± 1,6
BI 6	8237	3231	05/77	-9,1	21,4 ± 0,6	12390 ± 235	38,8 ± 1,1
BI 6	9975	4200	11/79	-8,5	36,0 ± 0,7	8215 ± 165	60,6 ± 2,2
BI 6	10830	4787	03/81	-9,7	43,1 ± 0,8	6755 ± 150	60,1 ± 1,8
BI 6	11790	5241	07/82	-8,1	45,6 ± 0,9	6310 ± 160	53,6 ± 1,7
BI 6	14409	7131	07/86	-9,2	52,9 ± 0,7	5120 ± 100	36,3 ± 0,9
BI 6	15411	7942	04/88	-10,4	51,6 ± 1,0	5315 ± 145	33,3 ± 1,8
BI 6	17642	9549	04/91	-10,2	50,5 ± 0,5	5495 ± 80	26,7 ± 1,5
BI 6	19182	10655	06/93	-9,7	51,3 ± 0,8	5360 ± 120	22,1 ± 1,4
BI 6	20554	11464	02/95	-10,8	52,8 ± 0,8	5115 ± 125	17,5 ± 1,3
BI 6	21959	12417	06/97	-11,1	51,4 ± 0,7	5345 ± 115	15,2 ± 1,5
BI 8	19514		10/93	-4,4	16,8 ± 0,3	14330 ± 130	
BI 8	20555	11465	02/95	-3,1	15,0 ± 0,5	15260 ± 275	8,5 ± 1,2
BI 8	21960	12418	06/97	-3,3	14,6 ± 0,3	15430 ± 185	7,5 ± 1,4
BI 181	11006	4910	09/81	-13,1	46,2 ± 0,8	6195 ± 140	77,4 ± 1,3
BI 182	11007	4911	09/81	-12,3	40,0 ± 0,6	7360 ± 125	75,7 ± 2,0
Hirsch-Quelle	10670	4702	11/80	-11,9	61,2 ± 0,6	3940 ± 85	65,1 ± 1,9
Hirsch-Quelle	11010	4914	09/81	-12,9	57,8 ± 1,1	4410 ± 160	61,4 ± 1,8
Hirsch-Quelle	20557	11468	04/95	-11,9	65,3 ± 1,0	3415 ± 115	14,6 ± 1,3

4.1. ^{14}C - und $\delta^{13}\text{C}$ -Analysen

Seit 1972 (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979) werden in nicht ganz regelmäßigen, etwa fünfjährigen Abständen ^{14}C -Analysen an den gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen vorgenommen. Methodisch bedingt sind die daraus abgeleiteten konventionellen ^{14}C -Wasseralter immer höher als die tatsächlichen Wasseralter. Nach unseren Erfahrungen sind für Grundwässer, die im nackten, also völlig unbedeckten Karst neugebildet werden, bis 5500 Jahre von den konventionellen ^{14}C -Altern (M. A. GEYH, 1972) abzuziehen. In den mit Löss bedeckten Gebieten sind es 1300 Jahre (J. C. VOGEL & D. B. BREDENKAMP, 1970). Für die Paderborner Hochfläche und für das Eggegebirge,

die beide mit einer gering mächtigen Bodenschicht bedeckt sind, liegen die Korrekturwerte zwischen 1300 und 3000 Jahren. Weitere Verstellungen der ^{14}C -Wasseralterskala sind nicht zu erwarten, weil die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der untersuchten süßen Grundwasserleiter weitgehend ausschließen. Da das **gepumpte Karstgrundwasser**, wie später nachgewiesen wird, aus **verschieden alten Komponenten** zusammengesetzt ist, kann auch eine Korrektur ohnehin keine realistischen Grundwasseralter liefern, die den komplexen Zusammensetzungen gerecht werden würde.

4.1.1. Stadtwerke Paderborn

Die Ergebnisse der seit 1972 regelmäßig durchgeführten ^{14}C -, ^3H - und $\delta^{13}\text{C}$ -Untersuchungen im Raum Paderborn (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979) sind in Tab. 2 zu-



Fig. 4: Lage des Untersuchungsgebietes im Bereich der Stadtwerke Paderborn mit Probenahmestellen für isotopehydrologische Analysen (G. MICHEL, 1982).
Location of the Paderborn study area and sampling sites for isotope hydrological analyses (G. MICHEL, 1982).

sammengestellt. Die Entnahmestellen sind in Fig. 4 eingezeichnet. Für die von den Paderborner Stadtwerken artesisch ausfließenden und gepumpten süßen Karstwässer ergaben sich konventionelle ^{14}C -Wasseralter zwischen 5500 und 8000 Jahren, was hydrogeologisch aufgrund der mächtigen Emscher-Mergelbedeckung plausibel erschien (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1974). Die tatsächlichen Grundwasseralter betragen dann für den gespannten, überdeckten Bereich des Grundwasserleiters immer noch 2500 bis 5000 Jahre. Daraus läßt sich die maximale natürliche Neubildungsrate des gespannten Karstgrundwassers im hydraulisch ungestörten System schätzen. Für das angenommene Hohlräumvolumen von 3 % und das damit geschätzte Volumen des tiefen Grundwassers von 225 Mio. m^3 ergibt sich bei Division durch 2500 bzw. 5000 Jahre eine jährliche Neubildungsrate von 45 000 bzw. 90 000 m^3/a , das entspricht einer plausiblen scheinbaren Abstandsgeschwindigkeit von 1–2 m/a .

Die bis heute durchgeführten Wiederholungsuntersuchungen lassen für die meisten Brunnenwässer der Stadtwerke Paderborn trotz großer Variationen trendmäßig weder eine Zunahme noch eine Abnahme der ^{14}C -Wasseralter erkennen (Fig. 5).

Es gibt zwei Ausnahmen: die Brunnen PB 22 der Stadtwerke Paderborn und der Brunnen der Firma Penn Elastic. Die konventionellen ^{14}C -Wasseralter der beiden PB-Brunnen steigen zwischen 1977 und 1980 erst deutlich an und fallen dann steil ab. Ab 1980 nehmen sie erneut zu. Es folgt eine allmähliche Abnahme bis 1986 und anschließende Zunahme. Allerdings war der zeitliche Abstand der ^{14}C -Analysen zu groß, um ein schnelleres Auf und Ab ausschließen zu können. Entscheidend ist, daß langfristig die ursprünglichen ^{14}C -Wasseralter immer wieder erreicht worden sind.

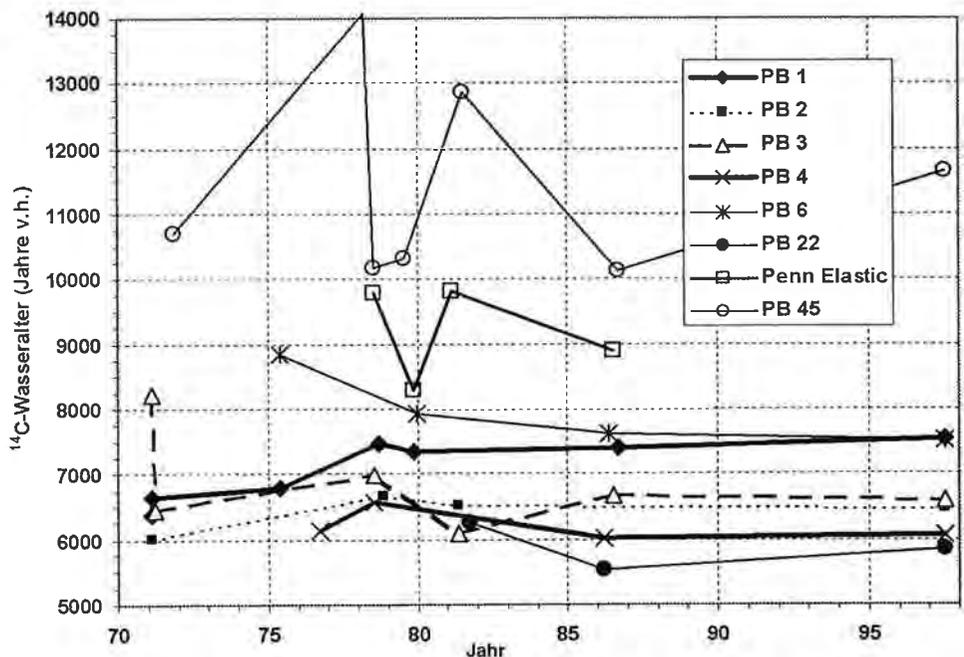


Fig. 5: Änderung der konventionellen ^{14}C -Wasseralter von DIC der untersuchten Tiefbrunnen der Stadtwerke Paderborn und der Firma Penn Elastic.
Changes in the conventional ^{14}C groundwater ages determined on dissolved inorganic carbon in samples taken from deep wells of the Paderborn waterwork and the Penn Elastic company.

Die anfangs starke Abnahme und das allmähliche Einpendeln auf ein nahezu gleichbleibendes ^{14}C -Wasseralter nach dem Niederbringen des Brunnens PB 6 ist repräsentativ für alle Neubohrungen. Dieser Trend erklärt sich aus der Mobilisierung bevorzugt junger Grundwässer (M. A. GEYH & H. KÖHLE, 1989).

Der Vergleich der Änderung der konventionellen ^{14}C -Wasseralter mit der Niederschlagskurve (Fig. 3) legt den Schluß nahe, daß die ^{14}C -Wasseralter nach ausgeprägten Niederschlagsdefiziten wie 1975/1976 und 1982/1984 mit einer zeitlichen Verzögerung von ein bis zwei Jahren abnehmen und nach „Erholung“ der meteorologischen Situation wieder zunehmen. Offensichtlich wird nach verringerter Karstgrundwasserneubildung vorrangig älteres Grundwasser, bei Zunahme der Niederschläge über das langjährige Mittel vorrangig jüngerer Grundwasser gepumpt.

4.1.2. Stadtwerke Bielefeld

Seit 1976 werden in nahezu regelmäßigen Abständen isopenhydrologische Untersuchungen auch an geförderten und artesisch ausfließenden Grundwässern der Stadtwerke Bielefeld durchgeführt. Die Entnahmestellen der Proben sind aus Fig. 6 zu er-

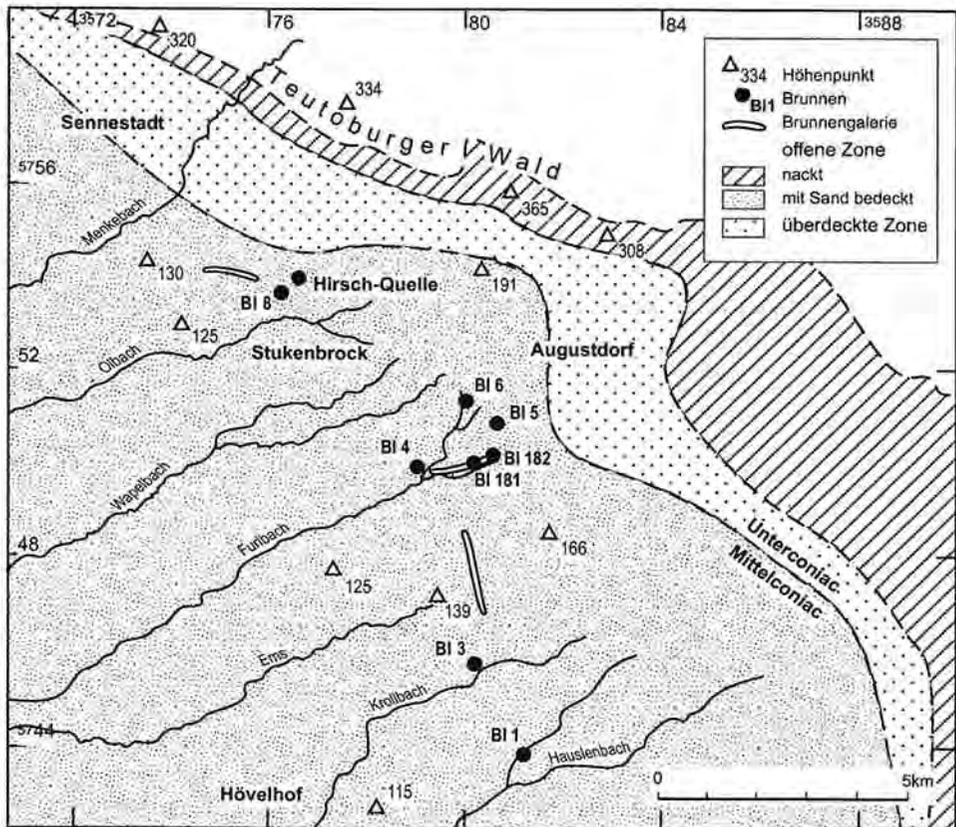


Fig. 6: Lage des Untersuchungsgebietes im Bereich der Stadtwerke Bielefeld mit Probenahmestellen für isopenhydrologische Analysen (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1983).
 Location of the Bielefeld study area and the sampling sites for the isotope hydrological analyses (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1983).

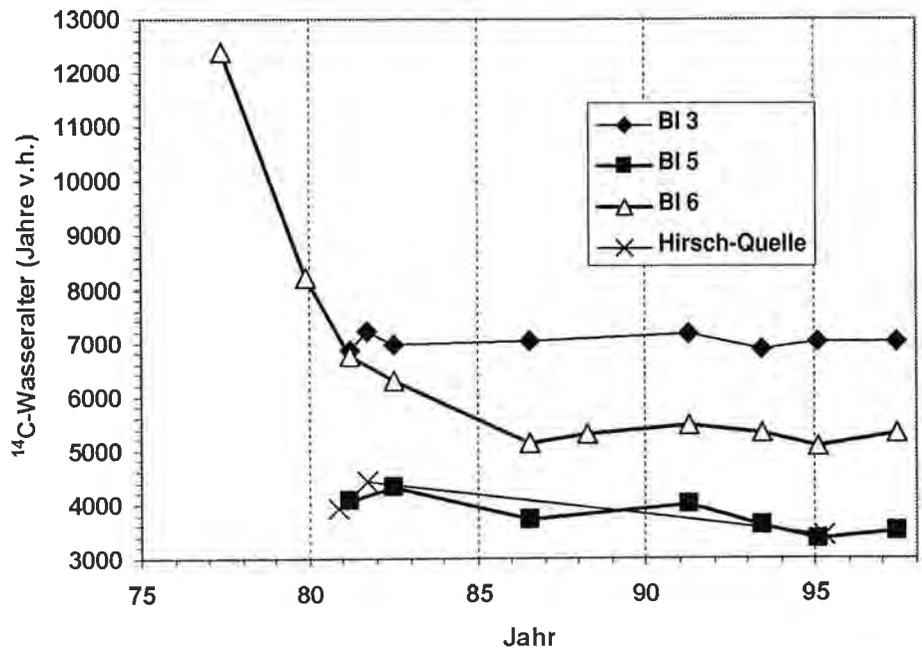


Fig. 7: Änderung der konventionellen ^{14}C -Wasseralter der untersuchten Brunnen der Stadtwerke Bielefeld und der Hirsch-Quelle.

Changes in the conventional ^{14}C groundwater ages of the wells from Bielefeld waterwork and the Hirsch Spring.

sehen. Die Änderungen der konventionellen ^{14}C -Wasseralter der Brunnenwässer (BI) sind in Fig. 7 dargestellt. Sie sind kleiner als die der Paderborner Grundwässer (Fig. 5). Die tatsächlichen ^{14}C -Wasseralter sind sogar um bis zu 2000 Jahre geringer. Bei Anwendung der oben genannten Korrekturwerte betragen sie nur 500–4000 Jahre. Für den Brunnen BI 6 und die Hirsch-Quelle deutet sich ein Trend stetig abnehmender ^{14}C -Wasseralter an. Der Anteil des alten Grundwassers wäre danach merklich zurückgegangen. Der Verlauf des ^{14}C -Wasseralters für den Brunnen BI 6 ähnelt dem des Brunnen PB 6 und mag eine analoge Ursache haben.

4.1.3. Gemeinsamkeiten

Die konventionellen ^{14}C -Wasseralter der meisten Paderborner und Bielefelder Grundwässer decken die Altersbereiche von 5500–8000 ^{14}C -Jahre bzw. 3500 und 7000 ^{14}C -Jahre ab. Die unterschiedliche Entfernung der Förderbrunnen vom entsprechenden Einzugsgebiet mag dafür verantwortlich sein. Sie ist im Paderborner Raum größer als im Gewinnungsgebiet der Stadtwerke Bielefeld.

Die Sulfatwässer haben wesentlich höhere ^{14}C -Wasseralter als die Süßwässer (Tab. 2). Sie liegen sogar weit über 20 000 Jahre. Da sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte beider nicht deutlich unterscheiden, darf eine Neubildung der Sulfatwässer im Pleistozän ausgeschlossen werden. Die Sulfatwässer und die „süßen“ Grundwässer könnten beide sogar gleiche Grundwasseralter haben. Aufgrund der relativ positiven $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ist eine Überhöhung der konventionellen ^{14}C -Wasseralter als Folge der sekundären Lösung fossiler Karbonate im Grundwasserleiter anzunehmen.

Die Chloridwässer, mit Ausnahme des Padulus-Brunnens, haben ähnliche ^{14}C -Wasseralter wie die Süßwässer (Tab. 2). Das Padulus-Wasser ist rund 5000–6000 ^{14}C -Jahre älter.

Nach diesen Überlegungen wurden sowohl die Sulfat- und Chloridgrundwässer als auch das gespannte süße Grundwasser im Holozän neugebildet. Die konventionellen ^{14}C -Wasseralter haben sich im Laufe des Beobachtungszeitraums nicht außerhalb der meßtechnisch bedingten Schwankungsbreite verändert (Tab. 2).

4.2. Tritiumanalysen

Obgleich wegen der mächtigen Überdeckung durch den hydraulisch sehr dichten Emscher-Mergel und wegen des großen Abstands von einigen Kilometern zum offenen Karst hydrogeologisch nicht zu vermuten war, daß in dem entnommenen Wasser auch Anteile junger Grundwässer enthalten sind, wurde in ihnen Tritium (^3H) gefunden (Tab. 2; M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979, 1983, 1987). Dies ist ein sicherer Nachweis, daß in den untersuchten Proben Grundwasser enthalten war, das nach 1963 neugebildet worden ist (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1991). Die Tritiumwerte sind so hoch, daß die Anteile jungen Grundwassers einige Zehnerprozent betragen. Wegen der komplizierten ^3H -Eintragskurve (Fig. 8) sind quantitative Abschätzungen nur möglich, wenn man die altersmäßige Zusammensetzung der entnommenen Grundwässer genau kennt. Das ist bei den von uns untersuchten Grundwässern nur bedingt der Fall.

Die Wasserentnahmen haben den ursprünglichen Zustand des gespannten Karstaquifersystems geohydraulisch so stark verändert, daß die Zusammensetzung durch

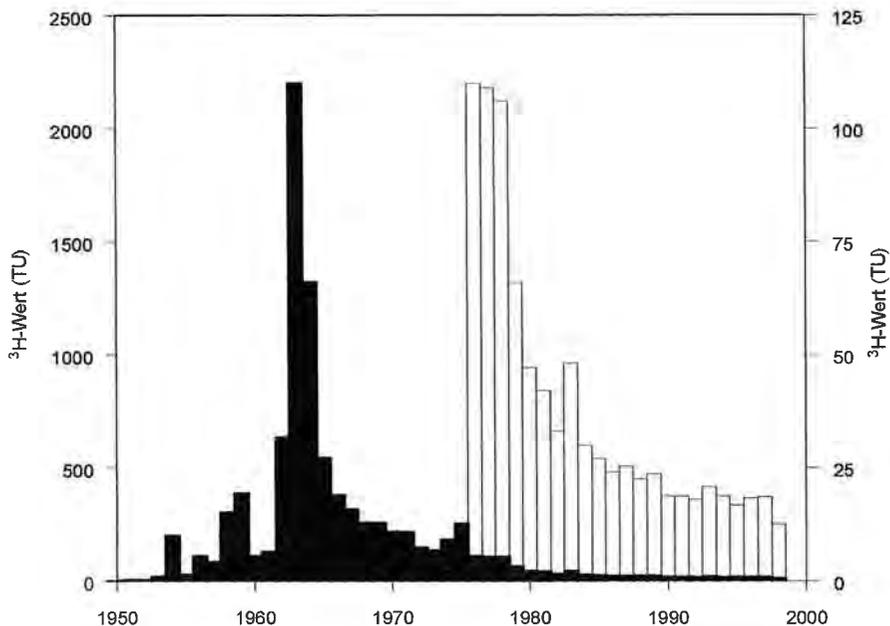


Fig. 8: ^3H -Eintragskurve für Niederschläge in Mitteleuropa. Für den Zeitraum nach 1975 wurde eine gedehnte Skala benutzt.
Tritium input curve for precipitation in Central Europe. An extended Y scale is used from 1975 onwards.

das einfache Exponentialmodell nicht zu beschreiben ist (M. A. GEYH & H. KÖHLE, 1989). Aus den ^{14}C - und ^3H -Werten des Trockenwetterabflusses der aus Karstquellen ausfließenden Grundwässer lassen sich mit diesem Modell in anderen Fällen mittlere Verweilzeiten (MVZ) berechnen oder wenigstens abschätzen (vgl. M. A. GEYH & J. MAIRHOFER, 1970, M. A. GEYH & P. GROSCOPF, 1978, J. RICHTER et al., 1993, P. MALOSZEWSKI, 1994, J. RICHTER, 1995, DVWK, 1995). Kompliziertere Modelle, die in der Lage wären, die ermittelten Isotopensignaturen nachzubilden, können zwar erdacht werden. Sie beschreiben aber wegen der zunehmenden Zahl von anzunehmenden geohydraulischen Parametern kaum die Realität (N. ORESKES et al., 1994) und liefern wasserwirtschaftlich kaum belastbare Aussagen.

4.3. $\delta^{18}\text{O}$ -Langzeitbeobachtungen

4.3.1. Niederschläge

Nachdem mit Hilfe von Tritium nachgewiesen worden war, daß neben Grundwasser mit einem Alter von einigen Jahrtausenden auch eine bedeutende, nur Jahre bis Jahrzehnte alte Komponente enthalten ist, blieb zu prüfen, ob nicht auch noch jüngeres Grundwasser entnommen wird. Zur Beantwortung dieser Frage bot sich isotopenhydrologisch als einzige Alternative die Langzeitbeobachtung von $\delta^{18}\text{O}$ bzw. $\delta^2\text{H}$ an, wobei die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte in Tab. 3 aufgelistet sind.

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge ändern sich zyklisch mit der mittleren Jahrestemperatur. Für Zeitreihen von mehreren Jahren ergibt sich für die Mittelwerte eine strenge Korrelation, die in erster Näherung einer Sinuskurve entspricht. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sind in den Wintermonaten am kleinsten und in den Sommermonaten am höchsten. Abweichungen ergeben sich, wenn die Niederschläge unterschiedlicher Herkunft sind. H. HÜBNER et al. (1979) haben dazu in Mitteldeutschland eine systematische Studie durchgeführt.

Am Westhang des Teutoburger Waldes dominieren atlantische Niederschläge aus dem W. Bei bestimmten Wetterlagen erreichen ihn aber auch Wolkenfelder aus dem E, die infolge eines größeren Kontinentaleffekts isotopisch leichter sind, also deutlich negativere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte haben. Damit könnten die beiden $\delta^{18}\text{O}$ -Minima im Sommer 1990 und 1993 der Niederschläge der Wetterstation Stukenbrock (Fig. 9) zusammenhängen. Im Winter 1991 wurde umgekehrt ein sehr positives Isotopensignal beobachtet. Die Niederschläge werden aus dem wärmeren S gekommen sein. Weitere singuläre Niederschlagsereignisse mit ungewöhnlichen oder abweichenden Isotopensignaturen sind in Fig. 9 nicht erkennbar, weil über einen Monat gesammelte Niederschlagsproben untersucht worden sind, bei denen einzelne Regenfälle mit ungewöhnlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten nicht ins Gewicht fallen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse der monatlichen Niederschläge von der Wetterstation Stukenbrock der Stadtwerke Bielefeld und der meteorologischen Station Lichtenau bei Paderborn (Fig. 9) sind trendmäßig sehr ähnlich. Vor 1992 liegen aus dem Bielefelder Raum keine Ergebnisse vor.

Figur 3 zeigt für 1975/1976, 1982/1984 (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1987) und für 1989/1991 ausgeprägte Niederschlagsdefizite, die in den Folgejahren wieder ausgeglichen worden sind. Die geohydraulische Situation hat sich im Paderborner Raum zusätzlich dadurch geringfügig geändert, daß dort 1990 die jährliche Entnahme von 10 auf 8 Mio. m^3 zurückgenommen worden ist.

Bei direkter Grundwasserneubildung durch Niederschläge im offenen Karst lassen sich mittlere Verweilzeiten von Quellwässern und oberflächennahen Grundwässern

Tab. 3: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Grundwässer und Niederschläge im Bielefelder und Paderborner Untersuchungsgebiet. (Fortsetzung S. 22–31.)
 $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater and precipitation in the study areas of Bielefeld and Paderborn. (Continuation p. 22–31.)

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld						Paderborn									
	Bl 3	Bl 4	Bl 5	Bl 6	Bl 181	Bl 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
03/10/84								-8,58	-7,94	-8,33		-7,79	-8,20	-7,99	-5,80	
17/10/84								-8,29	-8,38	-8,33		-7,97	-8,39	-8,07	-5,78	
31/10/84								-8,41	-7,88	-8,17		-7,87	-7,79	-8,08	-5,45	
14/11/84								-8,18	-7,87	-8,02		-7,85	-8,12	-8,01	-8,19	
28/11/84								-7,85	-8,06	-7,92		-8,06	-8,26	-8,35	-4,86	
12/12/84								-8,36	-8,24	-9,32		-8,31	-12,41	-7,47	-7,79	
27/12/84								-8,13	-9,74	-8,28		-7,99	-8,06	-10,43	-10,43	
09/01/85								-7,89	-8,33	-8,13		-8,27	-6,08	-8,02	-14,04	
23/01/85								-7,88	-8,49	-8,07		-8,27	-4,73	-8,40	-11,04	
06/02/85								-7,69	-8,13	-8,06		-8,07	-6,71	-8,01	-7,59	
20/02/85								-7,52	-8,11	-7,87		-8,37	-7,06	-7,90	-3,23	
06/03/85								-8,08	-8,06	-8,16		-6,99	-5,55	-8,15	-8,99	
20/03/85								-8,07	-7,89	-8,00		-8,13	-8,18	-8,15	-11,74	
03/04/85								-8,08	-8,34	-8,09		-8,23	-8,38	-8,01	-8,93	
17/04/85								-8,02	-7,50	-8,09		-8,04	-7,94	-8,23	-9,69	
02/05/85								-8,06	-7,85	-8,11		-8,45	-7,89	-7,69	-8,20	
15/05/85								-8,17	-7,95	-8,07		-8,19	-7,93	-8,30	-7,62	
29/05/85																
16/10/85								-8,11	-7,96	-7,84		-8,14	-6,85	-7,82	-3,73	
30/10/85								-8,19	-8,33	-6,40		-7,78	-9,52	-9,25	-9,25	
13/11/85								-8,01	-8,01	-7,99		-7,06	-9,29	-8,25	-5,69	
27/11/85								-8,13	-7,21	-7,98		-7,95	-8,17	-7,97	-12,72	
11/12/85								-8,04	-8,21	-8,08		-8,03	-8,15	-12,24	-12,24	
18/12/85																
24/12/85								-7,95	-8,25	-8,13		-8,09	-8,15	-5,71	-4,66	
08/01/86								-8,24	-8,05	-8,10		-7,94	-8,02	-8,15	-8,50	
22/01/86								-8,15	-8,05	-8,17		-7,09	-7,87	-7,98	-7,98	
05/02/86								-8,19	-7,86	-7,98		-7,79	-7,84	-8,07	-9,12	
12/02/86																

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Snuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
20/07/88		-7,49	-8,36	-8,19	-8,05	-8,05	-7,67									-8,09
03/08/88		-7,55	-8,36	-8,12	-7,91	-8,03	-7,79									-7,49
17/08/88		-8,05	-8,39	-8,04	-8,21	-8,12	-7,79									-6,72
31/08/88		-8,04	-8,49	-8,17	-8,27	-8,13	-7,97									-8,95
14/09/88																-7,69
28/09/88																-6,96
12/10/88																-7,97
09/11/88																-7,96
23/11/88																-5,85
07/12/88																-12,03
17/12/88																-7,92
04/01/89																-4,44
18/01/89																-6,02
01/02/89																-7,00
15/02/89																-5,11
01/03/89																-7,97
29/03/89																-7,04
12/04/89																-5,83
26/04/89																-7,37
10/05/89																-12,48
24/05/89																-11,51
07/06/89																-9,96
21/06/89																-2,84
05/07/89																-7,56
02/08/89																-5,60
30/08/89																-11,33
13/09/89																-10,13
27/09/89																-6,31
11/10/89																-7,22
25/10/89																-5,37
08/11/89																-8,14

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]																
	Bielefeld							Paderborn									
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Suken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9	
22/11/89																	
06/12/89																	
20/12/89																	
03/01/90		-8,08	-8,45	-8,40	-8,32		-8,01	-8,71	-8,44	-7,86			-7,91	-7,83	-8,03	-5,87	
17/01/90							-8,36		-8,47	-8,19						-3,92	
31/01/90							-7,27		-8,35	-8,23						-13,32	
14/02/90		-8,10	-8,40	-7,30	-8,06		-6,74	-10,54	-8,28	-8,28			-7,99	-7,90	-7,98	-13,03	
28/02/90		-8,05		-7,15	-8,21		-8,00		-8,48	-8,21						-3,79	
08/03/90							-7,78	-4,86	-7,27	-8,24				-7,84	-8,01	-9,02	
14/03/90																-6,10	
27/03/90																	
14/04/90		-8,08	-8,40	-8,38			-8,33	-6,84	-8,43	-8,23			-7,94	-7,76	-7,98	-7,77	
25/04/90							-8,09	-7,29	-8,31	-8,26			-7,89	-7,92	-8,02	-4,21	
09/05/90		-8,06	-8,35	-7,70	-8,14		-8,04	-4,59	-8,29	-8,27						-5,33	
23/05/90		-8,05	-8,60	-8,38	-8,14		-8,04	-4,13	-8,46	-8,18						-10,88	
06/06/90		-8,25	-8,50	-8,40	-8,06		-8,00	-5,99	-8,38	-8,12			-7,96	-7,86	-7,98	-6,79	
20/06/90		-6,40	-8,50	-6,20	-8,15				-8,34	-8,17			-8,03	-7,85	-7,98	-4,70	
04/07/90									-8,21	-8,38						-5,72	
18/07/90		-6,50	-7,48	-6,94	-8,15		-8,00	-3,48	-8,28	-8,34			-7,98	-7,92	-8,02	-5,04	
01/08/90									-8,19	-8,31			-7,59	-7,94	-8,03	-3,48	
15/08/90		-7,98					-8,14	-14,86	-8,28	-8,28						-4,04	
29/08/90		-7,95	-8,47	-8,20	-8,19		-8,10		-8,25	-8,21						-6,34	
12/09/90			-8,26	-8,52	-6,15				-8,31	-8,21						-6,61	
26/09/90		-8,08	-6,73	-8,26				-2,54	-8,25	-8,18			-8,06	-7,87	-8,02	-5,06	
07/10/90								-3,60	-8,19							-16,52	
10/10/90		-6,80	-9,00	-5,34	-8,09		-5,39		-8,24	-8,17						-5,80	
24/10/90		-8,15	-6,40	-8,31			-5,74	-12,50	-8,19	-8,19							
07/11/90								-4,60	-8,19	-8,19							
20/11/90		-6,55	-8,92	-7,85			-6,57	-10,20	-8,40	-8,14						-8,46	
05/12/90		-8,07	-8,43	-6,30			-7,99	-7,04	-8,31	-8,12						-10,41	
19/12/90			-8,32	-8,18			-6,14	-9,03								-10,10	

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Suiken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
02/01/91	-8,20	-7,78	-8,51	-6,25			-7,94	-4,18	-8,31		-8,33		-7,92	-7,92	-8,04	-8,62
16/01/91			-8,50	-8,27			-8,26	-8,46	-8,34							-10,09
20/01/91																-7,46
30/01/91			-8,44	-8,10			-8,12	-12,99								-14,64
13/02/91			-7,60				-8,02	-13,25								-14,49
27/02/91			-8,10	-8,25			-6,73	-5,96	-8,25							-8,97
13/03/91			-7,78	-8,54			-8,10	-8,39	-8,39	-8,27						-8,43
27/03/91			-8,38	-6,45			-8,08	-8,38	-8,38	-8,22						-5,00
10/04/91			-8,30	-7,85			-4,45	-5,07	-8,35							-8,03
24/04/91			-8,25	-8,43			-8,02	-10,78	-8,34							-8,07
08/05/91			-8,20	-7,80			-8,03	-8,39	-8,39							-9,13
22/05/91			-8,20	-8,40		-8,14	-7,63	-7,83	-8,34							
05/06/91			-8,15	-7,92			-8,21	-4,42	-8,28							
19/06/91			-8,17	-8,38			-8,18	-5,73	-8,50	-8,20						-4,78
03/07/91			-8,16	-8,40			-6,53	-3,33	-8,51	-8,14						-7,96
17/07/91			-8,16	-8,40			-8,09	-5,86	-8,47	-8,16						-8,03
31/07/91			-8,14	-8,30			-8,17	-5,41	-8,41	-7,27						-5,95
01/08/91			-7,97													
14/08/91			-8,05	-8,35			-8,08	-3,20	-8,43	-8,16						-4,29
28/08/91			-8,00	-8,30			-8,11	-2,18	-8,48	-8,18						-5,49
11/09/91			-8,35	-8,32			-8,03	-5,33	-8,47	-8,14						-3,30
25/09/91			-8,35				-8,07	-7,33	-8,40	-8,34						-5,85
01/10/91			-8,30	-8,45			-8,32		-8,40	-8,33						-8,35
23/10/91				-8,31					-8,35	-8,29						-8,32
06/11/91				-8,37					-8,36	-8,20						-8,51
20/11/91				-8,34					-8,32	-8,19						-9,47
04/12/91									-12,37	-8,36						-9,55
18/12/91									-8,30	-8,21						-9,90
02/01/92									-8,30	-8,17						-8,26
08/01/92				-8,30					-8,39	-8,16						-8,27
15/01/92			-8,36	-8,31			-7,99	-7,97	-8,36	-8,18						-6,12
									-8,39	-8,40						-8,23

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
29/01/92		-8,25		-8,37	-8,12	-8,24		-8,37		-8,37	-8,16	-8,34	-7,92	-8,06	-8,18	-6,49
12/02/92		-8,31			-8,16					-8,36	-8,16	-8,33	-7,92	-8,06	-8,20	-6,77
26/02/92					-8,13	-8,22		-8,00		-8,33	-8,29	-8,30	-7,92	-7,92	-8,19	-7,52
11/03/92			-8,26					-9,47		-8,36	-8,21	-8,33	-7,92	-7,96	-8,11	-9,51
25/03/92		-8,31								-8,31	-8,21	-7,66	-7,88	-8,01	-8,08	-7,65
08/04/92				-8,31		-8,17				-8,37	-8,16	-8,34	-7,87	-8,10	-8,10	-12,40
22/04/92										-8,45	-8,16	-8,17	-7,87	-7,50	-8,10	-7,50
06/05/92				-8,29	-8,10					-8,37	-8,16	-8,31	-7,94	-8,04	-8,08	-5,40
20/05/92				-8,26				-9,53		-8,36	-8,19	-8,31	-7,92	-8,13	-8,13	-7,02
24/06/92				-8,29	-8,22	-8,35		-4,53		-8,29	-7,86		-7,89	-8,06	-8,11	-9,50
22/07/92				-8,33	-8,23	-8,39	-8,00	-7,81	-8,20	-8,20	-7,89		-7,89	-8,00	-8,12	-9,39
05/08/92				-8,34	-8,14	-8,34	-8,05	-3,21	-8,18	-8,18	-7,83		-7,92	-7,95	-8,04	-4,64
19/08/92				-8,37	-8,16	-8,28	-7,97	-7,97	-8,18	-8,18	-7,89		-7,89	-7,97	-8,08	-5,39
02/09/92				-8,36	-8,13	-8,35	-8,16	-9,99	-8,14	-8,14	-7,99		-7,84	-7,84	-8,06	-5,78
08/09/92				-8,34	-8,12	-8,35	-8,13			-8,13			-7,85	-7,86	-8,05	-8,08
16/09/92				-8,36	-8,12	-8,31	-8,09	-5,42		-8,09	-7,99			-7,86	-8,03	-7,83
30/09/92				-8,34	-8,11	-8,31	-8,06	-4,90		-8,06	-8,04			-7,86	-7,95	-5,18
14/10/92				-8,30	-8,09	-8,33	-8,04	-8,17		-8,04	-8,06			-7,86	-8,04	-3,26
28/10/92				-8,32	-8,08	-8,33	-8,05	-11,43		-8,36	-8,06			-7,85	-8,06	-8,94
11/11/92				-8,33	-8,10	-8,29	-8,01	-9,69		-8,14	-7,97			-7,81	-7,99	-10,59
25/11/92				-8,33	-8,16	-8,22	-7,99	-8,26		-8,18	-8,04			-7,82	-7,99	-14,58
09/12/92				-8,31	-8,16	-8,21	-7,98	-8,07		-8,20	-8,04			-7,84	-7,99	-7,05
22/12/92				-8,33	-8,15	-8,40	-8,00	-9,62		-8,34	-8,04			-7,81	-8,04	-9,25
06/01/93				-8,34	-8,18	-8,37	-8,00	-11,08		-8,25	-7,97			-7,83	-8,07	-19,60
20/01/93				-8,33	-8,14	-8,37	-8,09	-8,37		-8,19	-8,06			-7,83	-7,99	-5,07
03/02/93				-8,27	-8,12	-8,29	-8,12	-10,36		-8,03	-8,06			-7,94	-8,09	-5,37
17/02/93				-8,40	-8,12	-8,27	-8,07	-7,55		-8,21	-8,24			-7,96	-8,12	-7,37
03/03/93				-8,41	-8,09	-8,29	-8,00	-7,23		-8,21	-8,01			-7,94	-8,18	
17/03/93				-8,43	-8,19	-8,29	-8,02	-6,97		-8,17	-8,19			-8,19	-8,12	
31/03/93	-8,05			-8,42	-8,20	-8,27	-7,99	-6,46		-8,17	-8,11			-7,96	-8,14	-7,63
14/04/93				-8,41	-8,17	-8,34	-8,12	-6,12		-8,26	-8,18			-7,80	-8,15	-9,09

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
27/04/93		-7,88	-8,16	-8,33	-8,16	-8,28	-8,16	-3,82	-8,29	-8,16			-8,18	-8,00	-8,14	-9,68
12/05/93		-7,88	-8,28	-8,31	-8,16	-8,25	-8,16	-6,56	-8,26	-8,11			-8,21	-7,97	-8,17	-9,66
26/05/93		-7,89	-8,24	-8,33	-8,21	-8,25	-8,25	-8,08	-8,23	-8,08			-8,14	-8,05	-8,11	-9,61
08/06/93		-7,86	-8,24	-8,32	-8,23	-8,31	-8,31	-8,06	-8,15	-8,06			-8,15	-8,07	-8,11	
23/06/93		-7,81	-8,21	-8,32	-8,18	-8,32	-8,32	-8,03	-8,16	-8,03			-8,17	-7,93	-8,13	
07/07/93		-7,83	-8,19	-8,28	-8,17	-8,32	-8,32	-8,05	-8,13	-8,05			-8,03	-7,91	-8,18	
21/07/93		-7,77	-8,19	-8,34	-8,22	-8,30	-8,30	-7,93	-8,13	-7,93			-8,05	-7,94	-8,12	
04/08/93		-7,79	-8,16	-8,31	-8,15	-8,30	-8,30	-8,05	-8,16	-8,05			-8,16	-7,85	-8,12	
18/08/93		-7,80	-8,25	-8,28	-8,18	-8,23	-8,23	-8,07	-8,31	-8,07			-8,28	-8,00	-8,00	
31/08/93		-7,82	-8,16	-8,31	-8,17	-8,21	-8,21	-8,07	-8,62	-8,07			-8,22	-8,22	-8,08	
15/09/93			-8,12	-8,31	-8,20	-8,14	-8,14	-8,06	-8,20	-8,06			-8,22	-8,21	-8,07	-5,45
28/09/93			-8,09	-8,31	-8,14	-8,14	-8,14	-8,08	-8,13	-8,08			-8,14	-8,16	-8,07	-7,99
13/10/93	-8,10	-7,87	-8,12	-8,30	-8,23	-8,16	-8,23	-8,00	-8,22	-8,11	-8,14	-8,14	-8,20	-8,20	-8,04	-10,51
27/10/93		-7,88	-8,34	-8,23	-8,23	-8,10	-8,23	-8,09	-8,22	-8,12	-8,11	-8,07	-8,21	-8,21	-8,03	-10,67
10/11/93	-8,05	-7,87	-8,34	-8,22	-8,23	-8,13	-8,23	-8,06	-8,23	-8,06	-8,10	-8,06	-8,06	-8,25	-8,05	-10,43
24/11/93	-8,06	-7,84	-8,28	-8,18	-8,20	-8,14	-8,20	-8,08	-8,25	-8,08	-8,10	-8,01	-8,01	-8,25	-8,08	-11,44
08/12/93	-8,06	-8,10	-8,32	-8,18	-8,21	-8,13	-8,21	-8,10	-8,23	-8,09	-8,09	-8,00	-8,00	-8,21	-8,07	-11,43
22/12/93	-8,01	-8,23	-8,33	-8,13	-8,19	-8,15	-8,19	-8,09	-8,20	-8,13	-8,23	-8,00	-8,00	-8,20	-8,08	-8,62
05/01/94	-8,02	-8,19	-7,99	-8,16	-8,18	-8,18	-8,18	-9,56	-8,15	-9,56	-8,24	-7,98	-7,98	-8,17	-7,90	-20,65
19/01/94	-8,01	-8,22	-8,32	-8,13	-8,20	-8,10	-8,20	-8,14	-8,20	-8,12	-8,19	-8,12	-8,12	-8,20	-8,11	-12,07
02/02/94	-8,05	-8,20	-7,98	-8,13	-8,20	-8,21	-8,20	-7,92	-8,25	-8,20	-8,22	-8,03	-8,03	-8,26	-8,00	-10,89
16/02/94	-8,06	-8,20	-7,91	-8,07	-8,03	-8,23	-8,23	-7,88	-8,25	-7,88	-8,20	-8,20	-8,22	-8,22	-7,96	-7,71
02/03/94	-8,05	-7,99	-7,76	-8,38	-8,00	-8,17	-8,17	-7,86	-8,21	-7,86	-8,20	-8,20	-8,24	-8,24	-7,91	-6,88
16/03/94	-8,02	-7,95	-7,90	-8,42	-8,02	-8,22	-8,22	-7,88	-8,16	-4,62	-8,18	-8,18	-8,22	-8,22	-7,91	
29/03/94	-8,01	-7,92	-7,94	-8,37	-8,02	-8,33	-8,33	-7,91	-8,11	-10,96	-8,18	-8,18	-8,22	-8,22	-7,94	-7,35
13/04/94	-8,00	-7,98	-7,92	-8,34	-7,98	-8,30	-8,30	-7,96	-8,14	-8,56	-8,21	-8,21	-8,22	-8,22	-8,05	-7,31
27/04/94	-7,99	-7,97	-8,00	-8,33	-7,97	-8,26	-8,26	-7,92	-8,13	-6,88	-8,24	-8,24	-8,25	-8,25	-8,09	-2,34
10/05/94	-7,95	-7,99	-8,27	-8,27	-7,97	-8,38	-8,38	-7,98	-8,14	-5,24	-8,22	-8,22	-8,25	-8,25	-8,04	-6,46
25/05/94	-8,05	-7,96	-7,97	-8,22	-8,22	-8,27	-8,27	-7,95	-8,11	-5,24	-8,24	-8,24	-8,19	-8,19	-8,04	-6,10
8/06/94	-8,06	-7,86	-7,83	-8,34	-8,22	-8,39	-8,22	-7,94	-8,05	-6,67	-8,23	-8,23	-8,06	-8,06	-8,05	-6,10
22/06/94	-8,04	-7,86	-7,97	-8,37	-8,26	-8,35	-8,26	-7,99	-8,02	-3,98	-8,26	-8,26	-7,97	-7,97	-8,07	-6,03

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
06/07/94	-7,94	-7,83	-7,97	-8,36	-8,29	-8,20	-8,23	-6,32	-8,01	-7,92		-8,25		-7,97	-8,01	-5,70
20/07/94	-7,90	-7,84	-7,91	-8,32	-8,28	-8,18	-8,08	-3,99	-8,03	-7,92		-8,23	-8,08	-7,94	-8,08	-5,40
03/08/94	-7,87	-7,83	-8,00	-8,27	-8,25	-8,42	-8,19	-5,07	-8,13			-8,10	-8,17	-7,92	-7,95	-4,86
07/08/94	-7,82	-7,82	-8,00	-8,31	-8,21	-8,39	-8,01	-6,47	-8,02	-7,92		-8,12	-8,11		-8,01	-5,51
31/08/94	-7,81	-7,85	-7,88	-8,21	-8,25	-8,36	-8,22	-7,09	-7,98			-8,10	-8,09	-8,09	-8,06	-4,59
14/09/94	-7,80	-7,84	-7,94	-8,17	-8,28	-8,29	-8,22	-12,03	-8,06			-8,01	-8,08	-8,10	-8,04	-8,00
28/09/94	-7,80	-7,73	-7,85	-8,13	-8,24	-8,34	-8,01	-8,34	-7,93			-7,97	-8,05		-8,07	
12/10/94	-8,52	-7,98	-7,92	-7,62	-8,12	-8,23	-8,34	-8,18	-7,93			-7,95	-8,05	-8,10	-8,11	-7,84
26/10/94	-7,01	-7,90	-7,90	-7,97	-8,11	-8,11	-8,29	-8,13	-7,91	-7,94		-7,99	-8,06	-8,11	-8,08	-7,88
09/11/94		-7,73	-8,04	-8,12	-8,29	-8,20	-8,23	-8,72	-7,96	-7,95		-7,99	-8,06	-8,11	-8,11	-5,91
23/11/94	-7,98	-7,73	-7,85	-8,12	-8,30	-8,27	-8,22	-5,61	-7,95	-7,95		-6,88	-8,00	-8,11	-8,00	-8,52
07/12/94	-7,99	-7,69	-7,94	-8,11	-8,07	-8,17	-8,16	-8,92	-7,89	-7,95		-7,95	-8,00	-8,05	-7,90	-8,24
21/12/94	-8,00	-7,98	-8,02	-8,09	-8,13	-8,16	-8,15	-10,28	-7,90	-7,98		-7,93	-8,00	-8,03	-7,90	-10,74
18/01/95	-7,79	-7,77	-7,90	-8,17	-8,02	-8,17	-8,17	-10,08	-8,18	-8,02		-8,19	-8,21	-8,28	-7,99	-10,83
31/01/95	-7,78	-7,87	-7,83	-8,14	-8,03	-8,14	-8,11	-11,17	-8,30	-7,93		-8,15	-8,22	-8,27	-8,02	-10,85
14/02/95	-7,88	-7,81	-7,64	-8,17	-8,05	-8,11	-8,12	-7,42	-8,30			-8,21	-7,68	-8,27	-7,69	-10,06
28/02/95	-7,90	-7,86	-7,86	-8,19	-7,93	-8,11	-8,10	-9,49	-8,26	-7,89		-8,22	-8,22	-8,27	-8,06	-9,08
15/03/95	-7,88	-7,83	-7,82	-8,10	-8,02	-8,20	-8,05	-11,11	-8,25	-7,84		-8,21	-8,26	-8,22	-8,03	-9,41
28/03/95	-7,89	-7,79	-7,84	-8,17	-8,02	-8,29	-8,00	-8,39	-8,29	-7,85		-8,22	-8,25	-8,24	-8,00	-9,45
12/04/95	-8,21	-8,16	-8,32	-8,39	-8,06	-8,27	-8,12	-12,32	-8,31	-7,94		-8,11	-8,20	-8,24	-8,00	-9,06
19/04/95								-9,44	-8,30	-7,95		-8,20	-8,22	-8,26	-7,97	-8,75
03/05/95	-8,18	-8,08	-8,28	-8,33	-8,19	-8,36	-8,15	-8,45	-8,27	-7,87		-8,20	-8,15	-8,23	-7,99	-8,80
17/05/95								-12,34	-8,22	-7,95		-8,20	-8,19	-8,29	-8,07	-8,83
31/05/95								-6,30	-8,13	-7,82		-8,10	-8,21	-8,26	-8,08	-8,47
14/06/95	-8,20	-8,10	-8,29	-8,35	-8,14	-8,30	-8,12	-7,76	-8,25	-7,80		-8,13	-8,19	-8,26	-8,04	-7,21
28/06/95								-3,95	-8,17	-7,89		-8,20	-8,11	-8,23	-7,97	-8,24
12/07/95								-4,58	-8,18	-7,82		-8,14	-8,17	-8,24	-7,93	-5,91
26/07/95								-2,40	-8,19	-7,82		-8,36	-8,20	-8,22	-7,91	-6,61
09/08/95	-8,14	-8,07	-8,25	-8,26	-8,11	-8,27	-8,08	-5,54	-8,19			-8,27	-8,19	-8,22	-7,93	-6,12
23/08/95								-9,08	-8,26	-8,05		-8,28	-8,16	-8,15	-8,30	-5,96
06/09/95	-8,12	-8,07	-8,29	-8,23	-8,35	-8,22	-8,03	-6,84	-8,25	-8,03		-8,32	-8,20	-8,20	-8,30	-6,44

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]														
	Bielefeld							Paderborn							
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche
20/09/95	-8,26	-8,06	-8,28	-8,34	-8,27	-8,25	-6,99	-8,20	-7,86		-8,36		-8,21	-8,26	-7,21
04/10/95	-8,24	-8,08	-8,28	-8,30	-8,29	-8,19	-8,23	-8,22	-7,95		-8,38		-8,10	-8,19	-7,62
18/10/95	-8,25	-8,05	-8,24	-8,33	-8,27	-8,23	-8,22	-8,10	-7,90		-8,33		-8,12	-8,18	-7,08
02/11/95	-8,27	-8,06	-8,26	-8,27	-8,21	-8,11	-20,27	-8,10	-8,19		-8,20	-8,17	-8,27	-8,15	-6,93
15/11/95	-8,21	-8,04	-8,25	-8,33	-8,15	-8,10	-11,44	-8,12	-8,14						-6,26
29/11/95	-8,18	-8,00	-8,25	-8,30	-8,28	-8,27	-5,75	-8,12	-8,15				-8,24	-8,12	-7,12
13/12/95	-8,23	-8,07	-8,22	-8,27	-8,21	-8,11	-12,07	-8,10	-8,15				-8,30	-8,28	-7,04
10/01/96	-8,21	-8,04	-8,25	-8,33	-8,15	-8,10	-20,27	-8,10	-8,15				-8,25	-8,23	-8,73
24/01/96	-8,18	-8,00	-8,22	-8,20	-8,21	-8,20	-11,36	-8,25	-8,17				-8,25	-8,21	-8,61
07/02/96	-8,23	-7,97	-8,22	-8,20	-8,21	-8,20	-6,27	-8,21	-8,15				-8,22	-8,25	-8,61
21/02/96	-8,19	-8,00	-8,19	-8,12	-8,22	-8,10	-7,68	-8,19	-8,04				-8,25	-8,21	-9,86
06/03/96	-8,18	-8,00	-8,19	-8,12	-8,22	-8,10	-7,98	-8,19	-8,10				-8,25	-8,21	-9,84
21/03/96	-8,19	-8,00	-8,19	-8,12	-8,22	-8,10	-5,27	-8,19	-8,04				-8,25	-8,21	-9,82
03/04/96	-8,18	-8,00	-8,19	-8,12	-8,22	-8,10	-9,26	-8,19	-8,10				-8,25	-8,21	-7,17
20/04/96	-8,16	-8,03	-8,17	-8,24	-8,31	-8,11	-7,13	-8,17	-8,10				-8,20	-8,16	-7,28
02/05/96	-8,28	-7,90	-8,11	-8,09	-8,06	-8,15	-4,90	-8,16	-8,15				-8,21	-8,16	-6,59
12/06/96	-8,20	-7,95	-8,18	-8,03	-8,09	-8,33	-6,24	-8,09	-8,08				-8,21	-8,16	-4,58
26/06/96	-8,20	-7,95	-8,18	-8,03	-8,09	-8,33	-6,86	-8,09	-8,08				-8,02	-8,08	-7,03
10/07/96	-8,20	-7,95	-8,17	-8,05	-8,08	-8,17	-5,51	-8,07	-8,09				-8,15	-8,09	-5,31
17/07/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,09	-8,08	-8,17	-9,89	-8,07	-8,09				-8,01	-8,09	-10,16
07/08/96	-8,20	-7,95	-8,17	-8,05	-8,08	-8,17	-7,67	-7,97	-8,00				-8,03	-7,99	-9,30
14/08/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,49	-7,97	-8,00				-8,17	-7,99	-7,47
21/08/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,03	-8,17	-9,58
04/09/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71
10/09/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71
19/09/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71
02/10/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71
09/10/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71
16/10/96	-8,18	-8,03	-8,11	-8,08	-8,11	-8,18	-6,87	-6,87	-8,00				-8,17	-7,99	-5,71

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld							Paderborn								
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
30/10/96	-8,08	-8,04	-8,20	-8,06	-8,13	-8,19	-8,17	-6,00	-8,10	-7,96		-8,03	-7,96	-8,13	-7,98	-7,68
06/11/96								-13,38								-12,39
13/11/96								-10,28								-9,36
27/11/96																
04/12/96	-8,17	-8,00	-8,18	-8,06	-8,13	-8,15	-8,19	-5,80	-8,07	-8,05		-8,12	-8,03	-8,17	-8,00	-9,03
11/12/96								-12,65								-9,16
27/12/96	-8,09	-7,99	-8,16	-8,06	-8,09	-8,14	-8,04	-12,86	-8,15	-7,98		-8,14	-7,96	-8,10	-7,99	-12,24
08/01/97								-12,58								-12,85
22/01/97	-7,97	-8,12	-8,13	-8,08	-8,10	-8,19	-8,14	-10,54	-8,10	-7,98		-8,02	-7,90	-8,14	-8,17	-14,71
05/02/97								-7,34								-9,53
19/02/97	-8,00	-8,01	-8,14	-8,08	-8,14	-8,14	-8,00	-6,09	-8,14	-7,99		-8,11	-7,96	-8,06	-8,18	-7,88
05/03/97								-4,89								-3,80
20/03/97	-8,03	-8,06	-8,16	-8,09	-8,11	-8,16	-8,16	-4,92	-8,15	-8,04		-8,06	-8,05	-8,03	-8,20	-4,06
02/04/97								-6,34								-4,87
16/04/97	-8,02	-8,05	-8,14	-8,07	-8,13	-8,13	-8,17	-6,82	-8,13	-7,96		-8,09	-7,97	-8,13	-8,09	-7,34
14/05/97								-6,81								-4,06
28/05/97	-8,01	-8,01	-8,18	-8,10	-8,15	-8,12	-8,19	-5,31	-8,17	-8,07		-8,08	-7,94	-8,12	-7,93	-5,14
11/06/97	-8,14	-8,03	-8,18	-8,12	-8,08	-8,13	-8,02	-8,74	-8,14	-7,94		-8,11	-7,94	-8,12	-8,04	-8,15
25/06/97								-6,97								-8,75
09/07/97	-8,15	-8,02	-8,18	-8,08	-8,15	-8,12	-8,03	-4,88	-8,15	-8,03		-8,10	-8,12	-8,14	-8,08	-6,92
23/07/97	-8,19	-8,02	-8,20	-8,13	-8,10	-8,15	-7,99	-7,55	-8,14	-8,09		-8,00	-7,99	-8,09	-8,06	-6,87
06/08/97								-4,30								-6,41
20/08/97	-7,93	-8,07	-8,21	-8,09	-8,15	-8,14	-7,94	-6,72	-8,15	-8,05		-8,00	-7,99	-8,09	-8,06	-7,12
03/09/97								-7,31								-6,88
17/09/97	-8,09	-8,04	-8,26	-8,14	-8,16	-8,15	-8,05	-11,09	-8,14	-8,08		-8,03	-8,01	-8,07	-8,08	-7,13
15/10/97								-10,69								-8,34
29/10/97								-11,88								-9,96
12/11/97																
19/11/97																
26/11/97																
10/12/97	-8,12	-8,03	-8,46	-8,16	-8,13	-8,16	-7,99		-8,13	-8,02		-7,97	-7,98	-8,08	-8,04	

Tag/ Monat/Jahr	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]															
	Bielefeld								Paderborn							
	BI 3	BI 4	BI 5	BI 6	BI 181	BI 182	Hirsch- Quelle	Stuken- brock	Rothe- born	PB 1	PB 3	PB 4	PB 12	PB 22	Fisch- teiche	P 9
23/12/97	-8,13	-8,06	-8,19	-8,13	-8,14	-8,15	-8,11	-10,20	-8,18	-8,03		-8,04	-7,99	-8,09	-8,03	-9,51
07/01/98	-7,95	-8,10	-8,08	-8,20	-8,17	-8,18	-8,15	-10,07	-8,21	-7,97		-8,02	-8,00	-8,11	-8,00	-9,67
04/02/98	-8,00	-8,05	-8,13	-8,09	-8,17	-8,17	-8,17	-7,48	-8,21	-7,98		-7,98	-7,97	-8,02	-8,04	-12,60
18/02/98	-8,02	-8,05	-8,10	-8,15	-8,02	-8,19	-8,17	-5,97	-8,20	-7,95		-7,99	-8,03	-8,00	-8,09	-9,08
04/03/98	-8,11	-8,01	-8,13	-8,13	-8,08	-8,18	-8,06	-4,83	-8,24	-7,98		-8,00	-8,08	-8,04	-8,03	-7,51
18/03/98	-8,03	-8,00	-8,10	-8,15	-8,03	-8,22	-7,98	-12,19	-8,27	-7,95		-7,99	-8,02	-8,03	-8,06	-7,48
15/04/98	-8,19	-8,18	-8,28	-8,18	-8,29	-8,42	-8,27	-9,21	-8,27	-7,95		-7,97	-8,02	-8,03	-8,03	-7,25
29/04/98	-8,17	-8,18	-8,29	-8,22	-8,25	-8,41	-8,26	-5,34	-8,27	-7,95		-7,97	-8,02	-8,03	-8,06	-7,28
13/05/98	-8,2	-8,17	-8,3	-8,23	-8,24	-8,44	-8,33	-4,07	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-6,25
27/05/98	-8,19	-8,18	-8,29	-8,22	-8,29	-8,42	-8,27	-6,74	-8,27	-7,96		-7,99	-8,02	-8,03	-8,06	-7,12
10/06/98	-8,17	-8,17	-8,32	-8,24	-8,29	-8,43	-8,27	-6,00	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,03	-5,05
08/07/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-5,43	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
24/06/98	-8,2	-8,17	-8,3	-8,23	-8,24	-8,44	-8,33	-4,37	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
22/07/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,29	-8,43	-8,27	-4,40	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
05/08/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-7,86	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
19/08/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-14,60	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
02/09/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-7,86	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
16/09/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-12,00	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
30/09/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-7,28	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
14/10/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-5,79	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
28/10/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-9,11	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
11/11/98	-8,19	-8,17	-8,29	-8,22	-8,24	-8,44	-8,33	-10,32	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
25/11/98	-8,21	-8,18	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-9,07	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
09/12/98	-8,18	-8,16	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-7,25	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
21/12/98	-8,18	-8,16	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-8,87	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
06/01/99	-8,18	-8,16	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-10,53	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
20/01/99	-8,23	-8,20	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-7,18	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
03/02/99	-8,23	-8,20	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-6,10	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
17/02/99	-8,23	-8,20	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-6,10	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46
03/03/99	-8,23	-8,20	-8,27	-8,23	-8,27	-8,45	-8,27	-6,10	-8,27	-7,96		-7,98	-8,02	-8,03	-8,06	-5,46

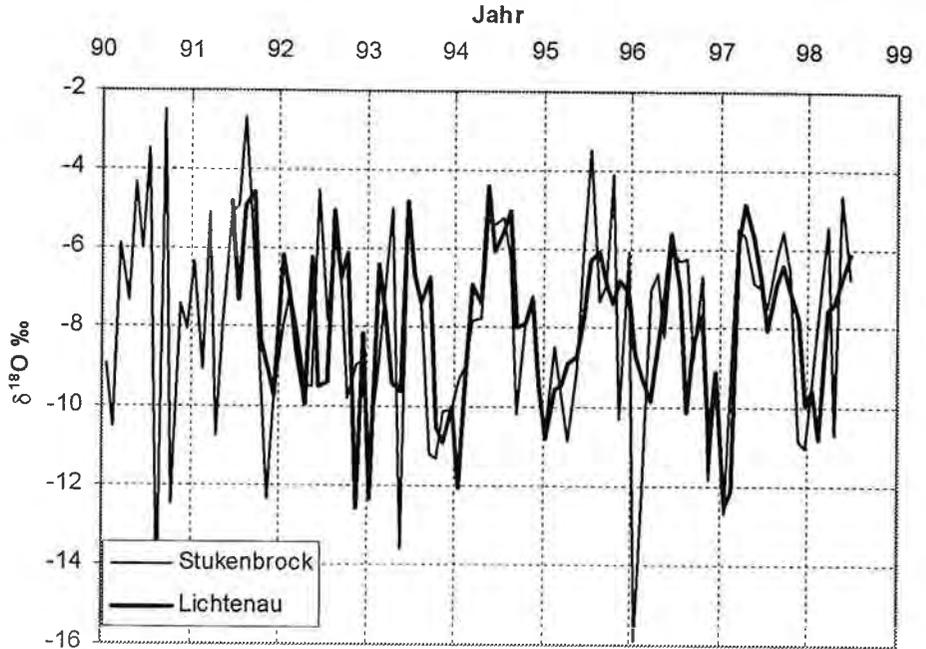


Fig. 9: $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge von den Wetterstationen Stukenbrock im Raum Bielefeld und Lichtenau südlich von Paderborn.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation samples from the Stukenbrock meteorological station near Bielefeld and the Lichtenau station south of Paderborn.

aus dem Verhältnis der Amplituden ihrer monatlichen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und denen der Niederschläge mit Hilfe des Exponentialmodells schätzen (H. OESCHGER & U. SIEGENTHALER, 1972). Durch Dispersion kommt es nämlich in der gesättigten Zone zu einer Mischung verschieden alter Grundwässer, die zu einer Dämpfung (f) der $\delta^{18}\text{O}$ -Amplitude (A) und zu einer Phasenverschiebung (ϕ) von Quell- bzw. Brunnenwasser gegenüber dem Niederschlag führt. Theoretisch ergibt sich die mittlere Verweilzeit (MVZ) aus

$$\text{MVZ} = \frac{\sqrt{\left(\frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}}\right)^2 - 1}}{2\pi} \text{ und}$$

$$\text{MVZ} = 2\pi \sin(\phi)$$

Diese theoretischen Beziehungen sind in Fig. 10 graphisch dargestellt; die Beziehung zwischen MVZ und Phasenverschiebung in Fig. 11.

Bezieht man die Ungenauigkeit der $\delta^{18}\text{O}$ -Wertbestimmung von $\pm 0,1$ ‰ ein, sind MVZ von Grundwässern anhand der Amplitudenschwächung zwischen wenigen Monaten bis etwa vier Jahren zu schätzen. Für das Untersuchungsgebiet sind die Langzeitparameter der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge der Wetterstationen Lichtenau und Stukenbrock in der Tab. 4 zusammengestellt. Aus Fig. 11 geht hervor, daß die maximale Phasenverschiebung ϕ drei Monate beträgt. Ist sie höher, sind die geohydraulischen Voraussetzungen für Anwendung des Exponentialmodells nicht erfüllt.

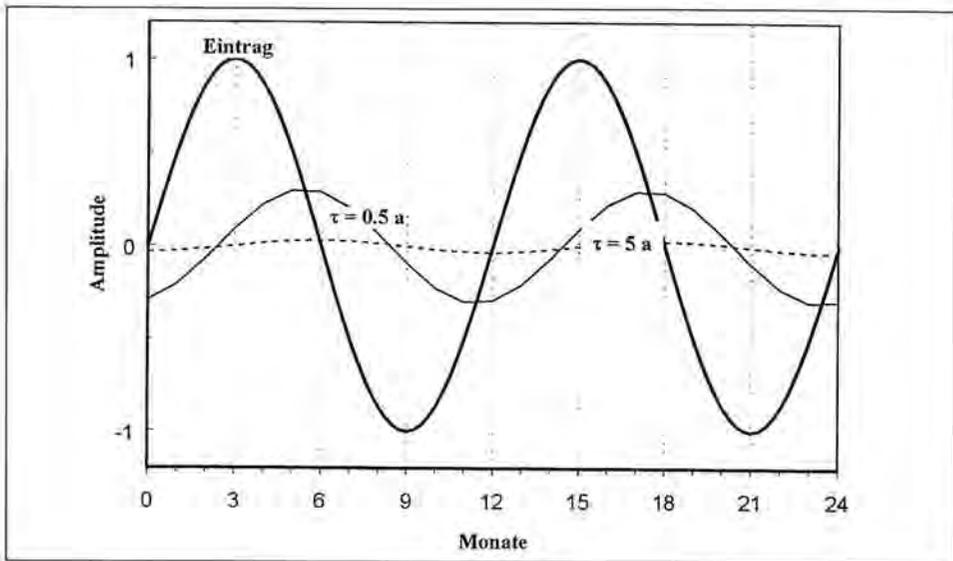


Fig. 10: Dämpfung der $\delta^{18}\text{O}$ -Amplitude und Phasenverschiebung im Quellwasser gegenüber denen des Niederschlags (Eintrag) in Abhängigkeit von der MVZ nach dem Exponentialmodell (H. OESCHGER & U. SIEGENTHALER, 1972). Die Maxima entsprechen etwa dem Monat August, die Minima dem Monat Februar.

Attenuation of the amplitude and phase shift of the $\delta^{18}\text{O}$ values for spring water relative to those of precipitation as a function of mean residence time (MRT) according to the exponential model (H. OESCHGER & U. SIEGENTHALER, 1972). The maxima and minima correspond to the months August and February, respectively.

Die ersten $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmungen waren an einmal monatlich entnommenen Proben vorgenommen worden (Fig. 12). Nach etwa neun Monaten wurde im Juni 1985 in den $\delta^{18}\text{O}$ -Reihen aller Entnahmestellen quasi zeitgleich mindestens ein Gipfel gefunden, der überhalb die meßtechnische Fehlerbreite von $\pm 0,1\text{‰}$ reichte. Unmittelbar vorher gab es einen Starkregen, dessen Niederschlagsmenge weit über dem langjährigen monatlichen Mittel lag. Sein $\delta^{18}\text{O}$ -Wert wich um -1‰ deutlich vom Durchschnitt aller untersuchten Grundwässer ab, der bei -8‰ liegt. Die markanten Isotopensignale nahe bei -7‰ konnten also nicht von diesem isotopisch leichten Juniregen herrühren. Er wird aus dem E gekommen sein. Das positive $\delta^{18}\text{O}$ -Signal mußte von Grundwasser stammen, das im Frühjahr oder Frühsommer neugebildet worden war. Ab Herbst 1985 beruhigte sich der $\delta^{18}\text{O}$ -Verlauf und blieb bis etwa 1992 oder 1993 im Rahmen der meßtechnischen Unsicherheiten auf gleichem Niveau.

Tab. 4: Amplituden der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Niederschläge der Wetterstationen Lichtenau und Stukenbrock.

Amplitude of the course of the $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation at the meteorological stations Lichtenau and Stukenbrock.

Station	Höhe [m NN]	Niederschlag [mm/a]	Maximum [‰]	Minimum [‰]	Amplitude [‰]	Zeitraum
Lichtenau	340	905	-4 bis -5	-11 bis -12	-7	1975-1995
Stukenbrock	137	880	-2 bis -3	-12 bis -13	-10	1990-1996

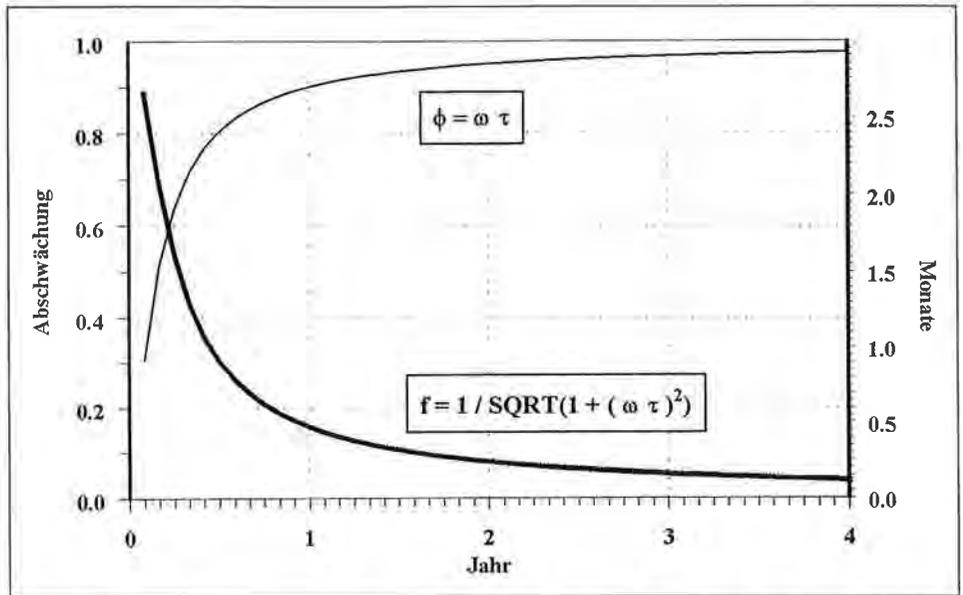


Fig. 11: Theoretische Beziehung zwischen mittlerer Verweilzeit (MVZ), Dämpfung f des $\delta^{18}\text{O}$ -Jahresgangs bzw. der Phasenverschiebung ϕ von Quellwässern gegenüber denen des Niederschlags entsprechend dem Exponentialmodell (nach H. OESCHGER & U. SIEGENTHALER, 1972).
 Theoretical relationship between mean residence time (MRT), attenuation f of the $\delta^{18}\text{O}$ curve and the phase shift ϕ of spring water relative to those of precipitation according to the exponential model (from H. OESCHGER & U. SIEGENTHALER, 1972).

Die Möglichkeit, daß probenahmebedingte oder meßtechnische Schwierigkeiten für das quasi synchrone Auftreten des anomalen Isotopensignals im Juni 1985 verantwortlich gewesen sein könnten, wurde nach strenger Überprüfung durch Wiederholungsmessungen und Nachkalibration des verwendeten Massenspektrometers und der eingesetzten Standards ausgeschlossen.

Die Fortsetzung der Dauerbeobachtung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wurde zu einem Geduldsspiel, sowohl für die Probenehmer der Stadtwerke Paderborn und Bielefeld als auch für die Analytiker des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben. Es erklärt, warum die Probensammlung zwischendurch – so um 1990 – zeitweise unterbrochen wurde.

Die Zeitreihen mußten aber fortgesetzt werden, da nicht reproduzierbare Beobachtungen wissenschaftlich nicht belastbar sind. Um den Gesamtaufwand auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu beschränken, wurde die Dauerbeprobung und -messung im Umfeld von Paderborn ab 1993 auf sechs Entnahmestellen beschränkt.

In den Jahren 1992 und 1993 war es dann wieder so weit. Bei allen Brunnen traten in etwa zeitgleich, nur unwesentlich zueinander verschoben, gleichgerichtete und weniger negative Isotopensignale auf. Bei all diesen Vergleichen wird davon ausgegangen, daß sich das $\delta^{18}\text{O}$ -Signal des Niederschlags mit einer zeitlichen Verzögerung Δt und mit einem Prozentanteil (ΔA) in den Amplituden A der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven der Grundwässer wiederfinden läßt.

Die Ergebnisse für die untersuchten Entnahmestellen sind in Fig. 13–16 dargestellt. Charakteristisch für dieses Ereignis war, daß die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Grundwässer und

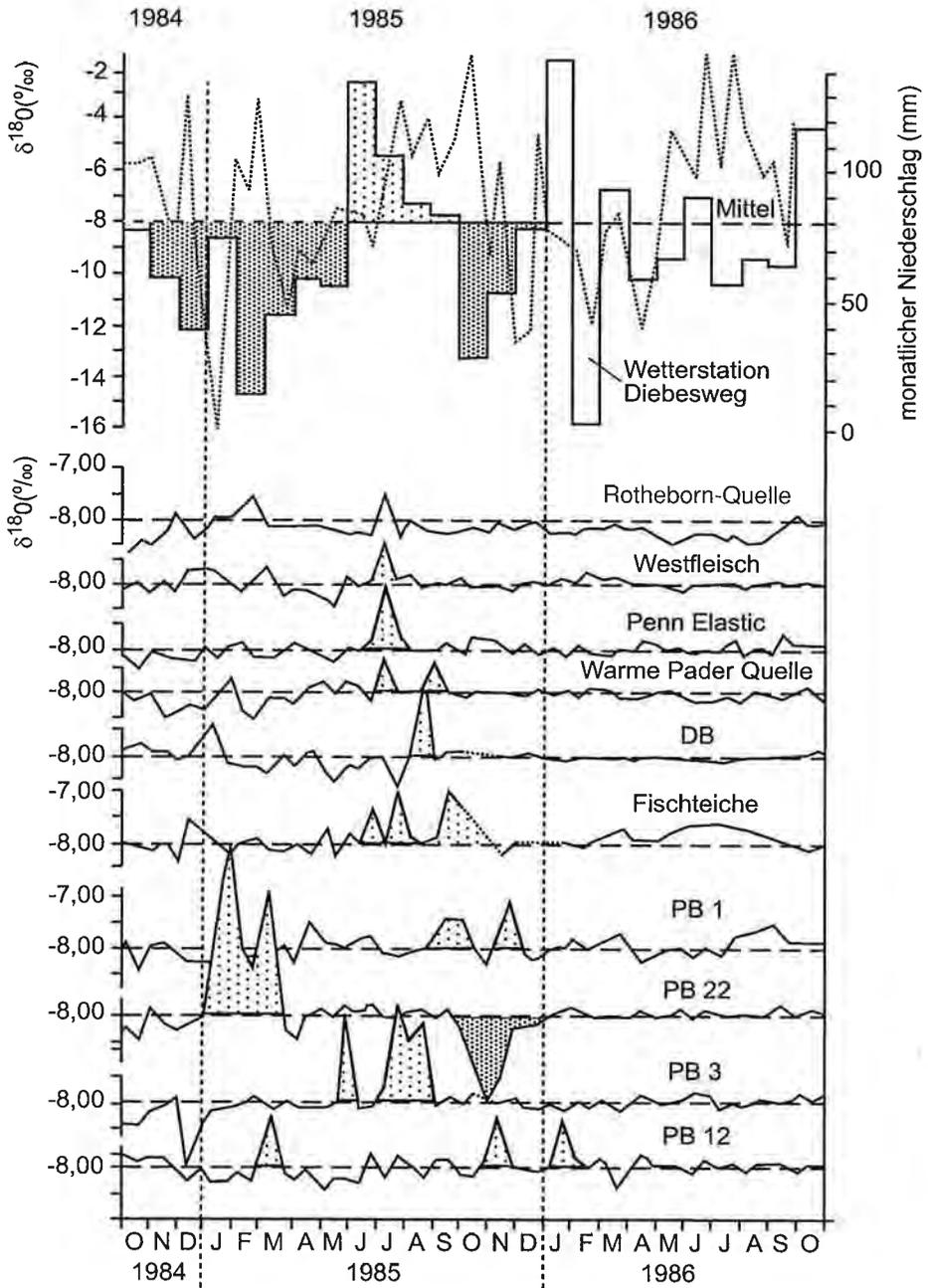


Fig. 12: Änderung der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (gestrichelte Linie) von gepumpten Grund- und Quellwässern aus acht Brunnen, zwei Quellen und des Niederschlags (monatliche Mittel, Stufenlinie) im Raum Paderborn (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1987).
 Changes in the $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater (eight wells, dotted line) and spring water (two springs) and precipitation (monthly mean, step function) in the Paderborn area (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1987).

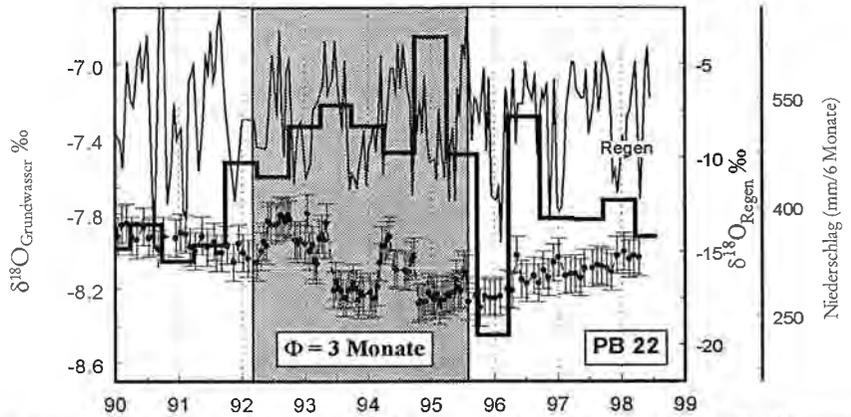


Fig. 13: Zeitlicher Gleichlauf der monatlichen Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen PB 22 der Stadtwerke Paderborn für den Zeitraum von Februar 1992 bis Juni 1995. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um drei Monate verschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 4 % ganz junges Grundwasser enthalten. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.
 $\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from well PB 22 of the Paderborn waterwork. The curve of the pumped groundwater has the same form as that for precipitation with a phase lag of three months between February 1992 to June 1995. The amplitudes of the groundwater indicate a component of about 4 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in the summer and winter.

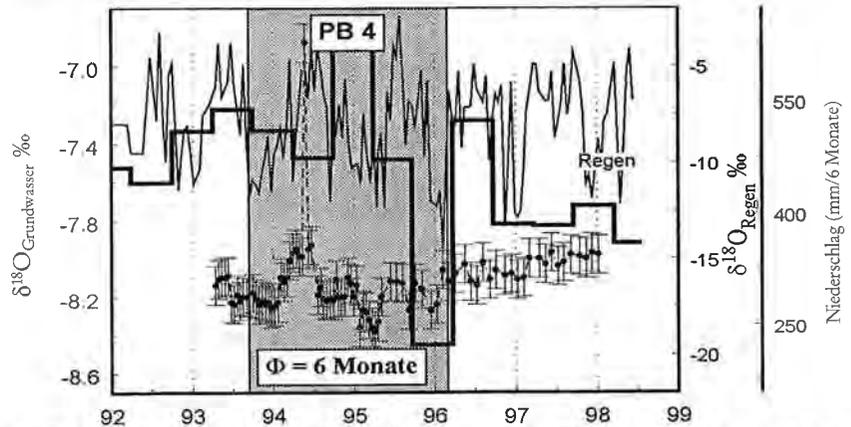


Fig. 14: Zeitlicher Gleichlauf der monatlichen Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen PB 4 der Stadtwerke Paderborn für den Zeitraum von spätestens Oktober 1993 bis Februar 1996. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um sechs Monate verschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 4 % ganz junges Grundwasser enthalten. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.
 $\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from well PB 4 of the Paderborn waterwork. The curve for the well water has the same form as that for precipitation with a phase lag of six months between October 1993 to February 1996. The amplitudes for the well water indicate a component of about 4 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in the summer and winter.

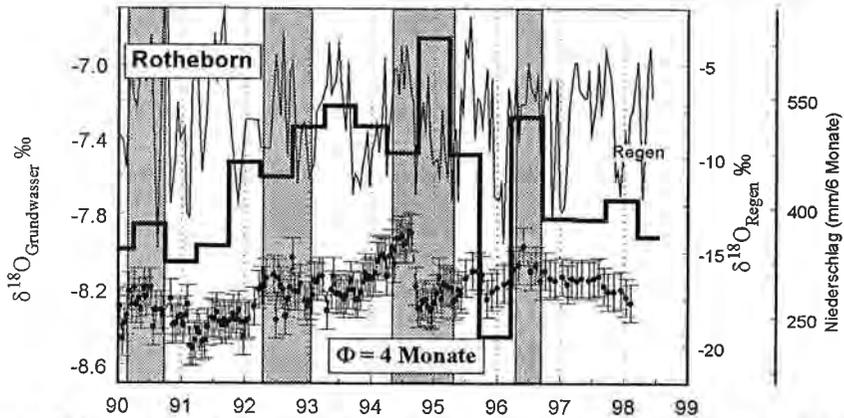


Fig. 15: Mehrfach unterbrochener zeitlicher Gleichlauf der monatlichen Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus der Quelle Rotheborn der Stadtwerke Paderborn für den Zeitraum von 1990 bis 1996. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um vier Monate verschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 4,5 % ganz junges Grundwasser enthalten. Dies gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from the Rotheborn Spring of the Paderborn waterworks for the period 1990 to 1996. The curve for the spring water shows similar pattern with that for precipitation (with a phase lag of four months). The amplitudes for the groundwater indicate a component of about 4.5 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in summer and winter.

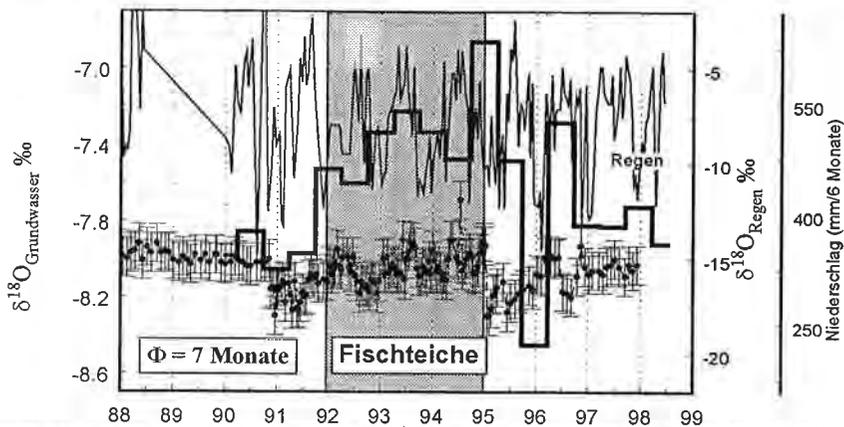


Fig. 16: Zeitlicher Gleichlauf der monatlichen Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen Fischteiche für den Zeitraum vom Anfang 1992 bis Ende 1994. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um sieben Monate verschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 3 % ganz junges Grundwasser enthalten. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from "Fischteiche well" for the period January 1992 to December 1994. The curve for the well has the same form as that for precipitation (with a phase lag of seven months). The amplitudes for the well water indicate a component of about 3 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in summer and winter.

Niederschläge über mehr als zwei Jahre miteinander korreliert blieben. Danach fielen die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der meisten Grundwässer innerhalb der meßtechnisch bedingten Fluktuation auf den $\delta^{18}\text{O}$ -Regionalwert zurück. Dieser Ablauf, der dem von 1985 ähnelt, erlaubt, die geohydraulischen Vorgänge des untersuchten Karstaquifersystems zu ergründen.

Der Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven des Niederschlags und des Brunnenwassers ist nicht für alle Entnahmestellen gleichermaßen deutlich ausgeprägt. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihen der Brunnenwässer sind zu der Zeitreihe des Niederschlags wenig korreliert. Die genaue Festlegung des Beginns oder des Ende des Ereignisses fällt für den Brunnen PB 22 (Fig. 13) sowie Fischteiche (Fig. 16) leicht. Bei dem Brunnen PB 4 (Fig. 14) ist die Ermittlung des Anfangs unsicher, weil Proben vor 1993 fehlen. Deutlich tritt hervor, daß das Niveau der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte nach dem Ereignis positiver ist als unmittelbar davor. Ein gutes Beispiel liefern die Quelle Rotheborn (Fig. 15), aber auch PB 4. Beim Brunnen PB 22 nimmt die $\delta^{18}\text{O}$ -Amplitude während der Ereignisse zwischen 1992 und 1995 stetig ab. Zu den nicht gepumpten, aber artesisch auslaufenden Entnahmestellen gehören die Fischteiche. Dieser Brunnen ist 132 m tief. Das zugehörige $\delta^{18}\text{O}$ -Signal ist stark verwischt. Rotheborn ist eine natürliche Karstquelle. Bei ihr zeigten sich zwischen 1990 und 1996 immer wieder, möglicherweise unterbrochene Korrelationen zu der $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe des Niederschlags.

4.3.2. Stadtwerke Bielefeld

Im Jahre 1988 hatten sich die Bielefelder Stadtwerke der $\delta^{18}\text{O}$ -Langzeitstudie im Raum Paderborn mit sieben Brunnen angeschlossen. Sie sind von analogen wasserwirt-

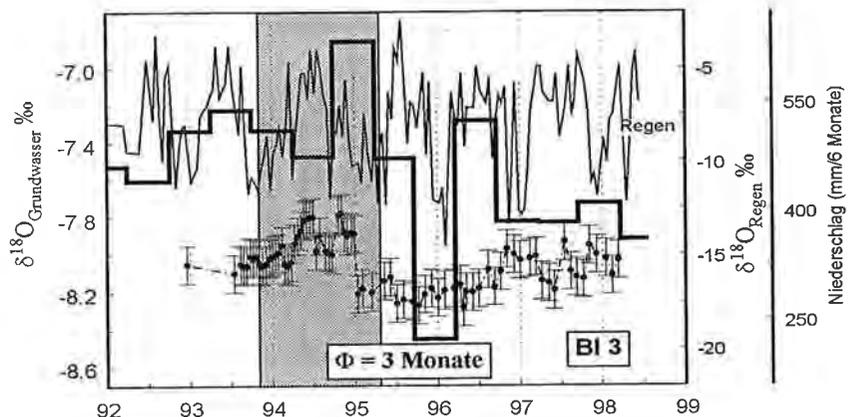


Fig. 17: Zeitlicher Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen BI 3 der Stadtwerke Bielefeld für den Zeitraum von spätestens November 1993 bis April 1995. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um drei Monate phasenverschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 4 % ganz junges Grundwasser enthalten. Vor und nach diesem Ereignis verteilen sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb der meßtechnischen Streubreite. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from well BI 3 of the Bielefeld waterwork for the period November 1993 to April 1995. The curve for the well shows the same form as that for precipitation (with a phase lag of three months). The amplitudes for the well water indicate a component of about 4 % very young water. The stepwise representation of the precipitation indicates the semi-annual mean precipitation in the summer and winter.

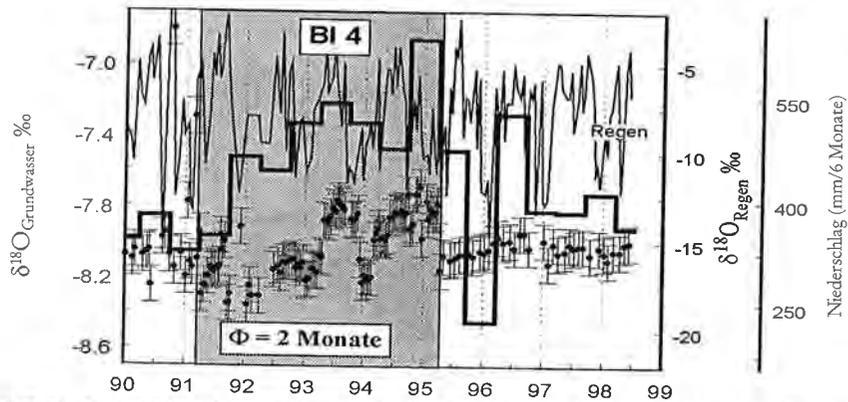


Fig. 18: Zeitlicher Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen BI 4 der Stadtwerke Bielefeld für den Zeitraum vom Februar 1991 bis Februar 1995. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um zwei Monate phasenverschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 5 % ganz junges Grundwasser enthalten. Vor und nach diesem Ereignis verteilen sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb der messtechnischen Streubreite. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from well BI 4 of the Bielefeld waterwork for the period February 1991 to February 1995. The curve for the well water exhibits the same form as that for precipitation (with a phase lag of about two months). The amplitudes for the well water indicate a component of about 5 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in summer and winter.

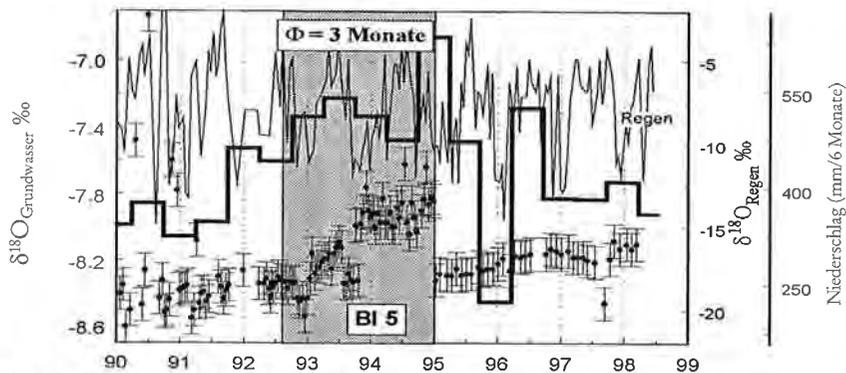


Fig. 19: Zeitlicher Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Brunnen BI 5 der Stadtwerke Bielefeld für den Zeitraum von Juli 1992 bis Ende 1994. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um drei Monate phasenverschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 5 % ganz junges Grundwasser enthalten. Vor und nach diesem Ereignis bleiben die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb ihrer messtechnischen Streubreite, wenngleich auf unterschiedlichem Niveau, konstant. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from well BI 5 of the Bielefeld waterwork for the period July 1992 to December 1994. The curve for the well water shows the same form as that for precipitation (with a phase lag of about three months). The amplitudes for the well water indicate a component of about 5 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in summer and winter.

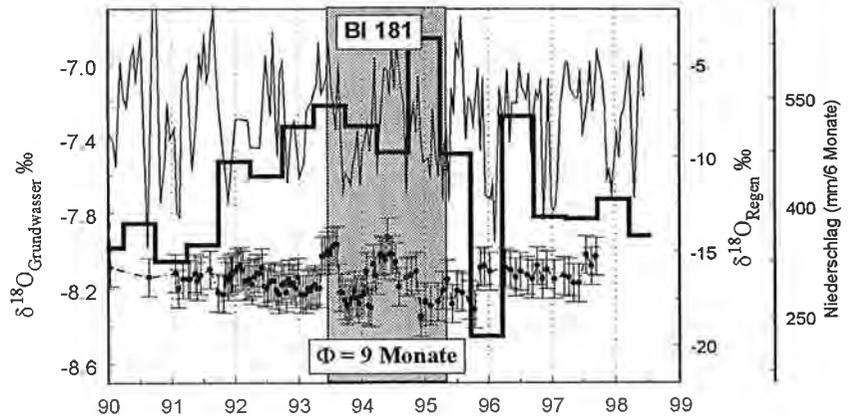


Fig. 20: Zeitlicher Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des gepumpten Grundwassers aus dem Flachbrunnen BI 181 der Stadtwerke Bielefeld für den Zeitraum von März 1993 bis Anfang 1995. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve für das Brunnenwasser ist gegenüber der des Niederschlags um neun Monate phasenverschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 2,5 % ganz junges Grundwasser enthalten. Vor und nach diesem Ereignis bleiben die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb ihrer messtechnischen Streubreite, wenngleich auf unterschiedlichem Niveau, konstant. Die Stufenlinie gibt den mittleren Niederschlag im sommerlichen und winterlichen hydrologischen Halbjahr wieder.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from the shallow well BI 181 of the Bielefeld waterworks for the period March 1993 to January 1995. The curve for the well shows the same form as that for precipitation (with a phase lag of about nine months). The amplitudes for the well water indicate a component of about 2.5 % very young water. The stepwise representation shows the semi-annual mean precipitation in the summer and winter.

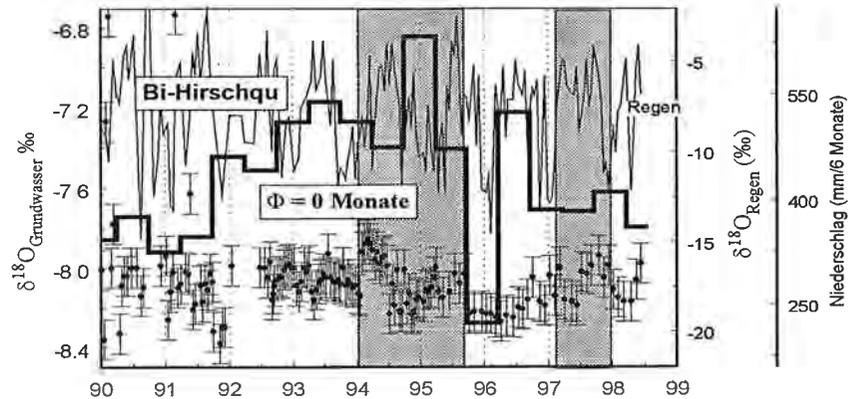


Fig. 21: Zeitlicher Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Niederschlags und des Quellwassers der Hirsch-Quelle für den Zeitraum von Januar 1994 bis September 1995 und von Jänner bis Dezember 1997. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve des Quellwassers ist gegenüber der des Niederschlags nicht phasenverschoben. Nach den $\delta^{18}\text{O}$ -Amplituden waren in ihm etwa 4 % ganz junges Grundwasser enthalten. Vor und nach diesem Ereignis bleiben die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte innerhalb ihrer messtechnischen Streubreite, wenngleich auf unterschiedlichem Niveau, konstant.

$\delta^{18}\text{O}$ values for precipitation and groundwater from the Hirsch Spring for the period January 1994 to September 1995 and January 1994 to December 1997. The curve for the spring water has the same form as that for precipitation (with no phase lag). The amplitudes for the well water indicate a component of about 4 % very young water.

schaftlichen Problemen wie die Stadtwerke Paderborn betroffen. Die hydrogeologische Situation ist vergleichbar. Die Lage der untersuchten Brunnen sowie der Hirsch-Quelle zum Einzugsgebiet ist aus Fig. 6 zu ersehen. Die ersten Proben aus den Jahren 1988 bis 1992 mußten leider verworfen werden, weil sie unsachgemäß entnommen und gelagert worden waren.

In Bielefeld trat im Januar/Februar 1993 bei allen Entnahmestellen etwa gleichzeitig ein nur unwesentlich phasenverschobenes, gleichgerichtetes Isotopensignal auf. Die Fig. 17–21 stellen Auswertungsergebnisse (Tab. 5) graphisch dar.

Der Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven des Niederschlags und der Brunnenwässer ist im Bielefelder Raum für alle Entnahmestellen stärker ausgeprägt als im Paderborner Raum. Im Brunnen BI 3 (Fig. 17) erhöht sich der $\delta^{18}\text{O}$ -Wert erst im Februar 1994. Vorher entnommene Proben fehlen.

Der Gleichlauf bricht Anfang 1995 ab, also viel früher als im Paderborner Raum. Der Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte für die Förderbrunnen BI 4 (Fig. 18) und BI 5 (Fig. 19) setzt in der zweiten Hälfte von 1992 ein und endet im Dezember 1994 bzw. Januar 1995. Es fällt wieder auf, daß die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte vor Beginn des Ereignisses stärker negativ waren als danach.

Kleinere Störungen werden in den Ruhephasen immer wieder beobachtet. Sie sind aber so schwach ausgeprägt, daß eine eindeutige Zuordnung zu den Änderungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihe des Niederschlags kaum möglich ist.

Die Phasenverschiebung der $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihen für den Flachbrunnen BI 181 (Fig. 20) gegenüber dem Niederschlag ist im Vergleich zu der der Tiefbrunnenwässer wesentlich größer. Das Isotopensignal ist ansonsten sehr gut ausgeprägt. In der Hirsch-Quelle (Fig. 21) wurden zwei Korrelationen erhalten. Sie verschwinden aber in etwa gleichzeitig mit denen der Tiefbrunnen.

Tab. 5: Ergebnisse der gemeinsamen Auswertung der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven des Niederschlags, einiger gepumpter und artesischer Brunnenwässer sowie von Quellwässern für den Zeitraum der Gleichläufigkeit beider Wassergewinnungsgebiete.
Results of the common evaluation of the $\delta^{18}\text{O}$ curves of precipitation, several pumped and artesian groundwater and spring water samples for the same observation period of both study areas.

Brunnen	Tiefe [m]	Abstand [m]	Max. [‰]	Min. [‰]	Anteil [%]	Phase [Monate]	Nachweis	Zeitraum
Paderborn								
PB 1	248	3000	-8,2	-7,8	4,0	5	schwach	01/1992–04/1995
PB 4	300	3000	-8,3	-7,9	4,0	6	schwach	02/1991–02/1995
PB 12	315	3000	-8,3	-7,7	5,5	5	schwach	11/1991–12/1995
PB 22	379	3000	-8,2	-7,8	4,0	3	ausgeprägt	02/1992–06/1995
Fischteiche	0		-8,2	-7,9	3,0	7	schwach	01/1992–01/1995
Rotheborn	?		-8,3	-7,9	4,5	4	ausgeprägt	01/1990–07/1996
Bielefeld								
BI 3	470	5000	-8,3	-7,8	4,0	3	ausgeprägt	11/1993–04/1995
BI 4	678	3300	-8,3	-7,7	5,0	2	ausgeprägt	01/1992–12/1994
BI 5	504	1060	-8,3	-7,7	5,0	3	ausgeprägt	07/1992–11/1994
BI 6	380	1800	-8,4	-8,1	2,5	4	ausgeprägt	06/1992–12/1994
BI 181	31	1360	-8,3	-8,0	2,5	9	ausgeprägt	03/1993–12/1994
BI 182	41	1670	-8,5	-8,5	3,3	6	ausgeprägt	01/1993–11/1994
Hirsch-Quelle	0	500	-8,4	-7,9	4,0	0	ausgeprägt	01/1994–12/1995

4.3.3. Gemeinsamkeiten

Der phasenverschobene Gleichlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Kurven des Niederschlags und des gepumpten Wassers ist für die Brunnen der Stadtwerke Paderborn weniger stark ausgeprägt als für die der Bielefelder Stadtwerke. Das könnte mit dem größeren räumlichen Abstand zwischen dem Zentrum des Einzugsgebiets und den Entnahmestellen im Paderborner Raum im Vergleich zum Bielefelder Raum zusammenhängen. Die Auswirkungen der Dispersion sind deshalb hier stärker ausgeprägt als dort. Im Widerspruch dazu steht allerdings, daß das synchrone Isotopensignal in Paderborn ein Jahr früher auftritt als in Bielefeld. Möglicherweise ist hierfür die stärkere Neubildung von Grundwasser im Paderborner Raum gegenüber dem Bielefelder Raum maßgeblich, weil die Fläche des Einzugsgebiets ausgedehnter ist. Die Pumpratzen beider Stadtwerke sind bis 1990 vergleichbar. Danach hat Paderborn die Entnahme um 20 % reduziert.

Die Anteile des aus Niederschlägen neugebildeten, sehr jungen Grundwassers liegen in Paderborn mit durchschnittlich 4,5 % um $\sim 0,5$ % höher als in Bielefeld (Tab. 5). Das unterstützt die Vorstellung, daß das Isotopensignal von der Größe des Einzugsgebiets abhängt. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Phasenverschiebung ist für die in Paderborn gepumpten Grundwässer mit drei bis sieben Monaten wesentlich größer als für den Bielefelder Raum mit zwei bis vier Monaten. Ebenso verhält es sich bei der Dauer des Gleichlaufes. Bei einigen Entnahmeorten traten mehrere, zeitlich unterbrochene Korrelationen auf. Das Isotopensignal der Niederschläge tritt in der Hirsch-Quelle noch später auf als in allen anderen Entnahmestellen, dafür aber ohne Phasenverschiebung.

5. Diskussion

Zur Deutung dieses bisher nur einmal beschriebenen, zeitlich begrenzt aufgetretenen isotopehydrologischen Phänomens (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1987) wurde ein hydraulisches Modell nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren entwickelt, mit dem sich alle Beobachtungen, zumindest qualitativ, nachvollziehen und beschreiben lassen.

5.1. Hydraulisches Modell

In einem offenen isotropen Grundwasserleiter gleicher Mächtigkeit und flächenhafter Grundwasserneubildung nimmt das Grundwasseralter vertikal mit der Tiefe zu (J. C. VOGEL, 1970), sofern das Kluftvolumen exponentiell abnimmt. Diese Vorstellung wurde in verschiedenen offenen Karstaquifereen bestätigt (z. B. J. C. VOGEL & D. B. BREDEKAMP, 1970). Geht, wie in unserem Fall, ein offener Grundwasserleiter in einen geschlossenen über, staut sich das Grundwasser unter natürlichen Bedingungen auf. Es bilden sich Quelllinien. Der Grundwasserabfluß in unserem Untersuchungsgebiet wird durch den geohydraulisch schlecht durchlässigen Aquitard, den Emscher-Mergel, gebremst. Das Grundwasseralter nimmt mit wachsender Entfernung von der offenen Zone rasch zu (M. A. GEYH & G. MICHEL, 1979). Die Klüfte und die Matrix der Gesteine werden nahezu gleich schnell durchflossen.

In unserer Beschreibung wird die vertikale ^{14}C -Wasseralterszunahme stark vereinfacht dreifachgegliedert (Fig. 22–25). Dieses Vorgehen bezieht sich auf die von den wichtigsten Isotopenmethoden erfaßten Altersbereiche. In dem offenen Bereich des Karstaquifersystems befindet sich in der obersten Schicht wenige Monate bis zu vier Jahre

altes Grundwasser, das sich an jahreszeitlich ändernden $\delta^{18}\text{O}$ -Werten identifizieren läßt. Die darunter befindliche Zwischenzone enthält Jahre bis etwa viele Jahrzehnte altes Grundwasser, das mit Tritiummessungen erkannt wird. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte entsprechen ab hier dem Regionalwert und ändern sich mit wachsender Tiefe nicht mehr. Viele Jahrhunderte bis Jahrtausende altes Grundwasser befindet sich in der tiefsten Zone. Das Grundwasser ist tritiumfrei, und sein Alter läßt sich mit der ^{14}C -Methode bestimmen (Fig. 22). In natürlichen Fließsystemen sind selbstverständlich nicht nur drei, sondern sehr viele, verschieden alte Grundwasserkomponenten beteiligt, die sich in den unterschiedlich durchlässigen Klüften bewegen.

Die natürliche geohydraulische Situation wird gestört, sobald Brunnen durch den Aquitard (hier Emscher-Mergel) niedergebracht und in Betrieb genommen werden. Es entsteht ein hydraulischer Kurzschluß zwischen dem Grundwasserleiter und der Geländeoberfläche. Das normalerweise kaum oder nur langsam fließende gespannte Grundwasser wird durch das Abpumpen beschleunigt und bewegt sich auf bevorzugten Fließbahnen (preferential flow path), den weitesten Klüften. In ihnen befindet sich das jüngste Grundwasser des Systems. Das älteste befindet sich in der Gesteinsmatrix (Fig. 23).

Nach der Inbetriebnahme eines Brunnens stellt sich zwischen den beiden, ganz verschiedenen alten Komponenten ein stationäres Mischgleichgewicht zwischen Zufluß und Entnahme ein. Das ursprünglich hohe Grundwasseralter nimmt auf einen quasi konstanten Wert ab (Fig. 5: PB 6 und Fig. 7: BI 6).

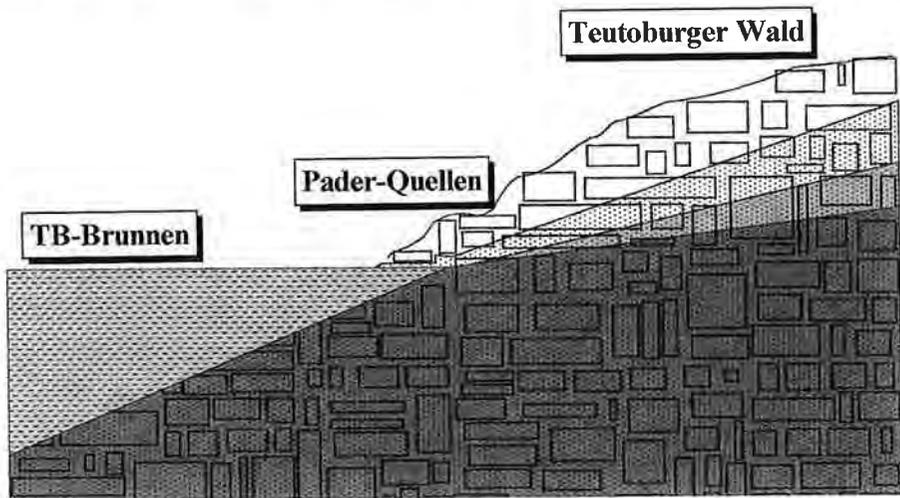


Fig. 22: Stark schematisierte Darstellung der vertikalen gleichmäßigen Alterszunahme des Karstgrundwassers mit der Tiefe in einem Karstgrundwasserleiter unter natürlichen Bedingungen (ohne Brunnen). Das jüngste Karstwasser, nur Tage bis Monate alt (gepunktet) liegt über dem Jahre bis Jahrzehnte altem Grundwasser (hellgrau). Jahrhunderte bis Jahrtausende altes Grundwasser (dunkelgrau) befindet sich im Liegenden. Der Emscher-Mergel ist als hellgrau strichlierte Fläche dargestellt.

Schematic representation of the uniform increase in age of the groundwater with depth in a karst aquifer under natural conditions (no wells). The youngest water, a few days to several months (dotted), overlies water with an age of several years to several decades (light grey). At the bottom of the aquifer the groundwater age is several hundred to several thousand years (dark grey). The Emscher Marl is shown as gray area with broken lines.

Diese generelle geohydraulische Vorstellung hat sich vielfach bestätigt. Die Abnahme des ^{14}C -Wasseralters nach Inbetriebnahme eines Brunnens ist in unserem Fall durch den Brunnen BI 6 (Fig. 7) belegt. Unmittelbar nach seiner Fertigstellung betrug das ^{14}C -Wasseralter 12 000 Jahre v.h. In der Folgezeit nahm es auf 5500 ^{14}C -Jahre ab und blieb dann nahezu konstant. Zum Vergleich: In der Schwäbischen Alb erhöhten sich die ^{14}C -Wasseralter von Quellwässern immer, wenn sie aufgebohrt wurden (M. A. GEYH & P. GROSCOPF, 1978, M. A. GEYH & H. KÖHLE, 1989). Durch das Pumpen wird bevorzugt tiefes Grundwasser gefördert, das wesentlich älter ist als das oberflächennahe Grundwasser (M. A. GEYH & H. KÖHLE, 1989).

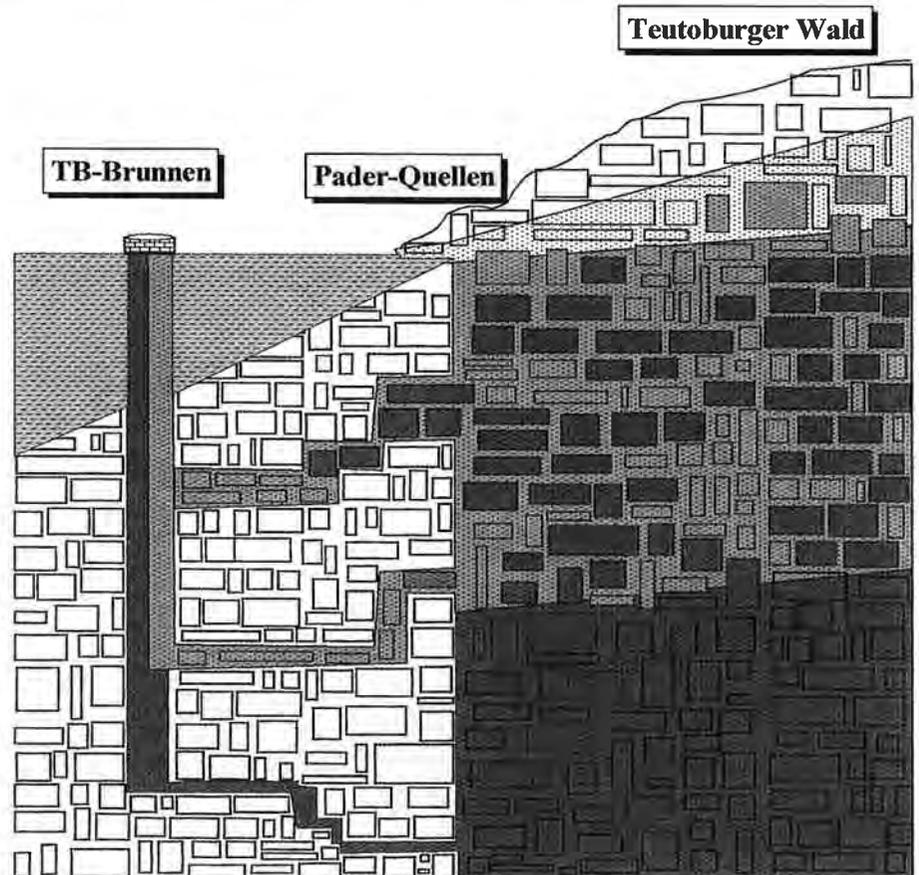


Fig. 23: Stark schematisierte Darstellung der vertikalen Altersverteilung des Karstgrundwassers bei normaler Langzeitwetterlage im hydraulisch gestörten System. Im Brunnen wird eine Mischung aus tiefen, Jahrtausende altem (dunkelgrau) und flacherem, Jahrzehnte altem (hellgrau) Grundwasser gefördert. Das Jahre alte und bis wenige Monate junge Grundwasser (gepunktet) tritt in den Pader-Quellen aus. Der Emscher-Mergel ist als grau strichlierte Fläche dargestellt. Schematic diagram of the distribution of groundwater age with depth in a hydraulically disturbed karst aquifer under normal weather conditions over a long period of time. The wells produce a mixture of decades old shallow water (light grey) and deep water thousands of years old (dark grey). Water with an age between several years and a few weeks (dotted) issues from the Pader Springs. The Emscher Marl is shown as grey area with broken lines.

Das höchste ^{14}C -Wasseralter von 24 700 Jahre aller Entnahmestellen hat eine Probe aus der Grundwassermessstelle BI 8 geliefert. Es blieb zwischen 1982 und 1986 unverändert. Ein Grund mag die große Entfernung zu den Förderbrunnen sein, ein anderer die unmittelbare Nähe zur Süßwasser-Sole-Grenze. Entscheidend ist freilich, daß dieser Brunnen nicht gepumpt wird, also sein natürlicher Grundwasserzustrom nicht beschleunigt ist. Das gleiche trifft für die artesischen Brunnen BI 181 und BI 182 zu, bei denen sich das $\delta^{18}\text{O}$ -Signal des Niederschlags gegenüber den Förderbrunnen um fast die doppelte Zeit verzögert. Sie werden nicht immer gepumpt.

In einem geohydraulisch stark gestörten System wird die ursprüngliche vertikale ^{14}C -Wasseraltersverteilung verwischt. Dies wurde beim Tiefbrunnen PB 4 bestätigt, als eine neue Pumpe eingesetzt werden mußte. Nach Ausbau der alten Pumpe wurden mit einer Fernsehkamera vier starke Karstwasserzutritte in Tiefen von 280, 267, 255 und 239 m unter Gelände festgestellt. In diesen Tiefen wurden ohne Packer Proben für komplette isotopehydrologische Analysen entnommen. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Tab. 6: ^{14}C -, ^3H -, $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der im Brunnen PB 4 aus verschiedenen Tiefen entnommenen Proben. pMC ist die Einheit der ^{14}C -Aktivität; junger Kohlenstoff mit dem Alter Null hat eine spezifische ^{14}C -Aktivität von 100 pMC. Hv – internationaler Code des ^{14}C -Labors Hannover.

^{14}C -, ^3H -, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of groundwater samples collected at different depths in the well PB 4. pMC is the unit of ^{14}C activity; young carbon with an age of zero has 100 pMC by definition. Hv – international code of the ^{14}C laboratory Hannover.

Hv	Teufe [m]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	^3H [TU]	^{14}C [pMC]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Wasseralter [Jahre v.h.]
16750	238,5	-7,78	20,2 ± 1,5	45,0 ± 1,3	-10,2	6410 ± 215
	255,0	-7,85	22,8 ± 1,4	—	-10,7	—
	266,5	-7,63	25,4 ± 1,4	—	-10,7	—
16753	280,0	-7,73	22,6 ± 1,4	47,5 ± 1,3	-10,7	5975 ± 200

Alle Isotopenwerte, aber auch die hydrochemische Zusammensetzung, stimmen innerhalb der Fehlergrenzen überein. Es wird ausgeschlossen, daß dafür die nicht völlig auszuschließende vertikale Vermischung während der Probenahme verantwortlich zu machen ist. Das Grundwasser fließt artesisch von unten nach oben aus. Hätte es einen Grundwasseralters-Gradienten gegeben, wären unterschiedliche ^{14}C -Werte gefunden worden. Wir nehmen eine Vermischung schon vor dem Ausbau der Pumpe durch die Wasserentnahmen an. Die $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zeigen sowieso keine Tiefenabhängigkeit, weil das Grundwasser nur im Holozän und im gleichen Einzugsgebiet neugebildet worden ist.

Brunnen entnehmen bevorzugt Grundwasser aus den vernetzten Klüften und senken den Karstgrundwasserspiegel ab; bei dem Brunnen BI 6 immerhin um 50 m. Es kommt zu einer Mischung zwischen verschiedenen alten Grundwässern. Solange sich der dynamische Karstgrundwasserspiegel nicht ändert, bleibt die vertikale altersmäßige Grundwasserschichtung, damit auch das Mischungsverhältnis und die Isotopenzusammensetzung des gepumpten Grundwassers zeitlich weitgehend unverändert. Das vertikal nach unten abfließende, langsam alternde Grundwasser wird oben ständig durch junges, neugebildetes ersetzt. Selbst in den Sommermonaten oder nach längeren Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen, in denen der Grundwasserspiegel um weitere viele Zehnermeter absinkt, braucht sich daran nichts zu ändern (Fig. 24).

Das überlagernde, ganz junge Grundwasser nimmt mengenmäßig durch Entnahme oder Alterung schnell ab und oberflächennahe Klüfte fallen zeitweise trocken, die vorher mit leicht „gealtertem“ Karstgrundwasser gefüllt waren. Werden zu einem solchen Zeitpunkt Markierungsversuche im offenen Karst vorgenommen, kann in gepumpten Brunnen ein Signal erwartet werden, wie es E. P. LÖHNERT (1992) am Ende der niederschlagsarmen Jahre 1989 bis 1991 im Mai 1991 für die Brunnen PB 1 und PB 12 erhalten hat. Ein erneuter Versuch während des Maximums der niederschlagsreichen Periode zwischen 1992 und 1996 (W. KÄSS et al., 1996) verlief hingegen erwartungsgemäß negativ.

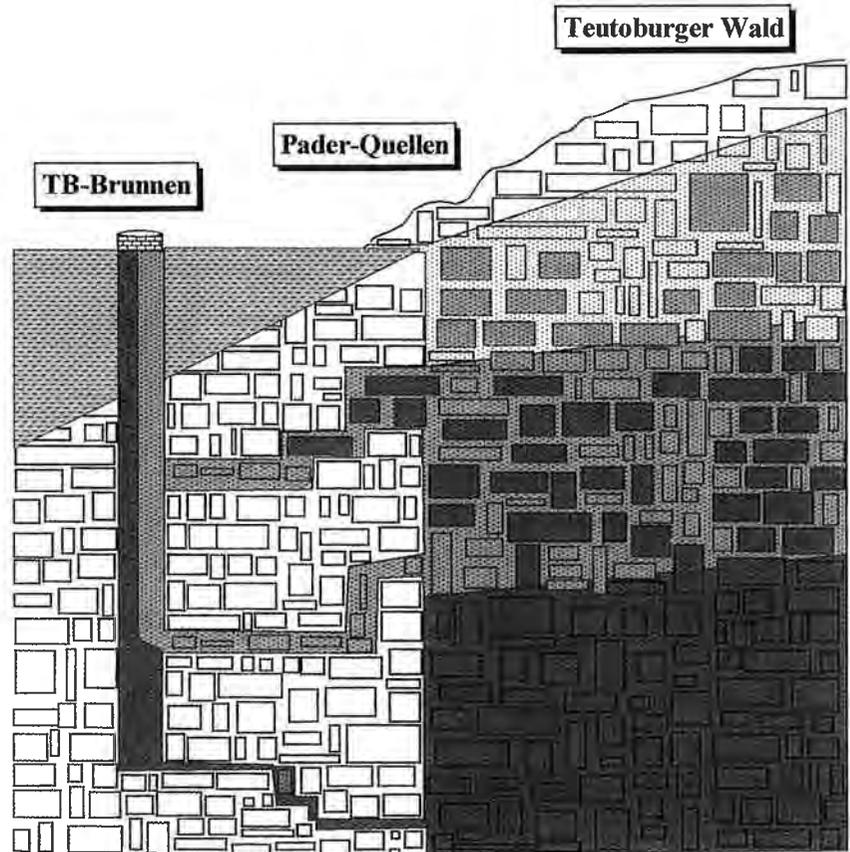


Fig. 24: Stark schematisierte Darstellung der vertikalen Altersverteilung des Karstgrundwassers nach langen Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen und gefallenem Karstwasserspiegel. Die altersmäßige Zusammensetzung und damit die Isotopenwerte des gepumpten Grundwassers haben sich nicht geändert. Das Karstwasservorkommen enthält allerdings nur noch wenige Wochen bis Monate alte Grundwässer (gepunktet). In bestimmten Bereichen werden Klüfte trocken gefallen sein. Der Emscher-Mergel ist als grau strichlierte Fläche dargestellt.

Schematic diagram of the distribution of groundwater age with depth after a long period of precipitation below average and a lower karst groundwater level. The age of the groundwater and the isotope values of the pumped groundwater show little change. There is little water with an age of a few weeks to several months (dotted). In some areas, fractures contain no water. The Emscher Marl is shown as gray area with broken lines.

Wenn in die wasserfrei gewordenen Klufräume bei extrem tiefem Karstgrundwasserspiegel plötzlich durch einen Starkregen ganz junges Sickerwasser einfließt, erscheint es mit geringer zeitlicher Verzögerung im Brunnenwasser (Fig. 25). Distanzen von vielen Kilometern werden in nur wenigen Wochen bis Monaten hydraulisch überbrückt. Sichtbar wird dies in dem vorgestellten, phasenverschobenen, aber ansonsten synchronen Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihen der Brunnenwässer mit dem der Niederschläge.

Die damit ermittelten Laufzeiten stimmen mit denen des Markierungsversuchs von E. P. LÖHNERT (1992) ziemlich genau überein. In Quellen und vor allem in Beobach-

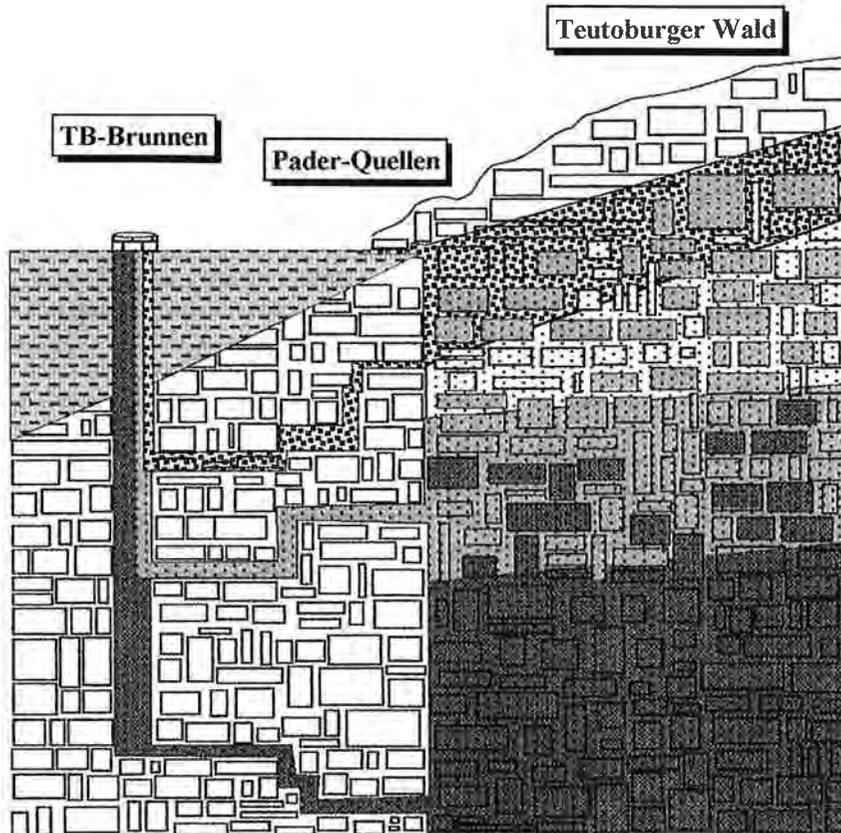


Fig. 25: Stark schematisierte Darstellung der vertikalen Altersverteilung des Karstgrundwassers nach einer langen niederschlagsarmen Periode. Der im offenen Karst stark gefallene Karstwasserspiegel wurde durch einen plötzlichen Starkregen und entsprechender Grundwasserneubildung schnell angehoben. Das ganz junge Grundwasser (groß gepunktet) gelangt innerhalb weniger Monate über vernetzte weite Klüfte schnell zu den Förderbrunnen, in denen vorher älteres Grundwasser geflossen ist. Die Isotopenzusammensetzung verschiebt sich deutlich in Richtung der jüngsten Grundwässer. Der Emscher-Mergel ist als grau strichlierte Fläche dargestellt. Schematic diagram of the distribution of groundwater age with depth after a long period of low precipitation. The considerably low groundwater table in the open karst areas rose rapidly after a heavy rainfall. The very young groundwater (at dotted) flows within a few months to the wells through the network of fractures that normally contain older groundwater (light grey). The isotopic composition shifts distinctly towards very young groundwater. The Emscher Marl is shown as gray area with broken lines.

tungsbrunnen sind die Laufzeiten nach dieser Vorstellung begrifflicherweise wesentlich länger.

Steigt nach einem solchen Niederschlagsereignis der Karstgrundwasserspiegel wieder durch vergrößerte, lang andauernde Grundwasserneubildung an, stellt sich die vertikale Altersschichtung mit zunehmender Alterung des Grundwassers nach einiger Zeit erneut ein.

Die entwickelte Vorstellung zur Deutung dieses Phänomens, das bisher nur zweimal – nämlich 1985 und 1992 bis 1995 – beobachtet worden ist, wird durch eine weitere Beobachtung gestützt. Die Niederschlagsverteilungen der Sommer- und Winterniederschläge sowie die des ganzen Jahres (Fig. 3) zeigen, daß es ausschließlich intensive Sommer-niederschläge sind, nach denen anomale $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopensignale beobachtet werden können. Unsere geohydraulische Vorstellung liefert auch eine Erklärung, warum das gepumpte Wasser eine niedrigere Wassertemperatur hat als nach der Tiefe der Brunnen und dem Temperaturgradienten nach zu erwarten wäre (M. BREITHAUER, 1994). Die ergiebigen Grundwasserzuflüsse in den Bohrungen erfolgen im Winter durch Karst-röhren und wenige Großklüfte, die zur Oberfläche hydraulische Anschlüsse haben.

Aus den beobachteten Phasenverschiebungen von üblicherweise meist mehr als drei Monaten ist ein weiterer wichtiger wasserwirtschaftlicher Schluß zu ziehen. Im Exponentialmodell wird Karstgrundwasser als eine Mischung aus unendlich vielen, verschieden alten Komponenten beschrieben. Die jüngste Komponente ist ein Jahr alt oder noch jünger. Wenn ein solches Karstgrundwasser in ein überdecktes, artesisch gespanntes Karstaquifersystem eintritt, ändert sich die Isotopenzusammensetzung nur noch durch radioaktiven Zerfall, Dispersion und Mischung. Die nach dem Exponentialmodell maximal mögliche Phasenverschiebung von drei Monaten (Fig. 11) verlängert sich um die Laufzeit des Grundwassers in der überdeckten Zone. Danach ist die jüngste Komponente eines Karstgrundwassers mit einer Phasenverschiebung von vier Monaten wenigstens einen Monat (mit aller Unsicherheit der zeitlichen Bestimmung) im überdeckten Bereich unterwegs. Eine denkbare bakteriologische Belastung des Grundwassers wird sich in dieser Zeit abbauen. Trotzdem sollten beide Stadtwerke während Sommermonaten nach niederschlagsarmen Zeiten und plötzlichen Starkregen bakteriologische Kontrolluntersuchungen veranlassen, um jedes Risiko auszuschließen.

Die Beobachtung von H. STILLE (1903), daß die Pader-Quellen auf gefallene Niederschläge mit einer Verzögerung von drei bis vier Monaten reagieren, deckt sich sicher nicht zufällig mit unserer Beobachtung, daß die Phasenverschiebung des Isotopensignals zwischen drei und sieben Monaten liegt.

Auch die von E. P. LÖHNERT (1992) ermittelten Laufzeiten des Markierungsstoffes von zwei bis drei Monaten bis zu den Brunnen PB 1 und PB 12 sind mit den unsrigen von fünf und sieben Monaten vergleichbar. Man muß nach dem Exponentialmodell die maximal mögliche Laufzeit von drei Monaten abziehen, um die Laufzeit der schnellsten Komponente zu ermitteln, mit der der Markierungsstoff zum Brunnen getragen wird.

Abschließend stellt sich die Frage, ob es Zufall ist, daß das entdeckte Phänomen der Einspeisung ganz jungen Karstgrundwassers in den gespannten Grundwasserleiter nicht öfters als ein oder zweimal pro Jahrzehnt auftritt. Die Reaktionsschnelligkeit eines Karstaquifersystems spiegelt sich in der mittleren Verweilzeit des Grundwassers wider. In einem durch die Brunnen geohydraulisch gestörten Grundwasserleiter mit 3 % Hohlraumvolumen und einer Mächtigkeit von 350 m befindet sich eine Wassersäule von 10 500 mm. Entsprechend beträgt die MVZ bei 400 mm jährlicher Grundwasserneubildung (E. P. LÖHNERT, 1993) $10\,500/400 = 26$ Jahre. Systeme mit so großen MVZ puf-

fern kurzfristige Änderungen ab und reagieren nur auf langandauernde Ereignisse, wie z. B. mehrjährige, ausgesprochen niederschlagsarme Perioden. Fallen reichlich Niederschläge, sorgt ein erhöhter Abfluß der Karstquellen für einen schnellen hydrostatischen Ausgleich im offenen Karst mit immer wesentlich kürzerer MVZ. Das Paderborner offene Karstaquifersystem hat nach dem kombinierten Piston-Flow-Exponentialmodell eine MVZ von weniger als einem Jahr (E. P. LÖHNERT & F.-J. STRUFFERT, 1996), die eine Größenordnung kleiner als die des gespannten Karstaquifersystems ist.

Das wiederholte Verschwinden und Wiederauftauchen des Phänomens, daß ganz junges Grundwasser von den Brunnen gefördert worden ist, belegt, daß das Paderborner und das Bielefelder Karstaquifersystem über Jahrzehnte betrachtet durch die Wasserentnahmen nicht überansprucht worden sind und deshalb eine Mobilisierung des benachbarten Salzwassers auch zukünftig bei gleichbleibender Pumprate nicht zu besorgen ist.

Im übrigen haben wir auch in anderen Gebieten mit überdeckten geklüfteten Grundwasserleitern, wie in der Sabkha der Azraq-Quellen in Jordanien, schnelle Wasserwegsamkeiten bei hohen Wasserentnahmen nachgewiesen (K. FRÖHLICH et al., 1987, B. Th. VERHAGEN et al., 1991). Es ist daher zu empfehlen, unsere Untersuchungsergebnisse im tiefen Karst am Ostrand des Münsterländer Beckens zum Anlaß zu nehmen, die bisherige konservative hydrogeologische Lehrmeinung über den Grundwasserschutz von gespannten Karstaquifersystemen zu überdenken.

5.2. Wasserentnahmen und Abfluß der Pader-Quellen

E. P. LÖHNERT (1990) unterzog die publizierten Abflußdaten des Paderpegels „Paderborn 1“ für die Zeiträume 1959 bis 1975 und 1976 bis 1980 einer karsthydrologischen Auswertung und stellte eine deutliche Änderung des Abflußverhaltens durch die Wasserentnahmen im Bereich der überdeckten Zone des tiefen Karstes fest. Das von ihm errechnete Defizit von 10 Mio. m³/a schrieb er der Wasserförderung der Stadtwerke Paderborn zu. Dieses bei der Schüttung der Pader-Quellen von rund 200 Mio. m³/a erstaunlich genaue Ergebnis war zu überprüfen (C. STRUCK, 1999), da ein möglicher Einfluß der Niederschläge, wie man ihn für quasi alle Karstquellen anzunehmen hat, nicht berücksichtigt worden war. Die Pader-Quellen selbst könnten allerdings eine Ausnahme sein (W. STRUCKMEIER, 1990).

In Fig. 26 werden die jährlichen Niederschläge der meteorologischen Station Stukenbrock mit den Niedrigabflüssen des Pegels „Paderborn 1“ verglichen. Beide Kurven sind sehr gut miteinander korrelierbar. Unter Berücksichtigung eines zweijährigen Mittels (gleitendes Mittel) beträgt der Korrelationskoeffizient 0,85.

Dieses Ergebnis bedeutet, daß die Niederschläge bei den Abflußbetrachtungen von E. P. LÖHNERT (1990) hätten berücksichtigt werden müssen. Da dies nicht geschah, sind die Vorstellungen von W. STRUCKMEIER (1990) und E. P. LÖHNERT (1990) über das Abflußverhalten der Pader-Quellen in Frage zu stellen (C. STRUCK, 1999).

Die erneute Auswertung der Abflußdaten, analog zu E. P. LÖHNERT (1990), bestätigte seine Ergebnisse. Allerdings zeigt sich, daß das Abflußdefizit bei Verwendung der auch für ihn zugänglichen Daten aus den Jahren 1981 und 1982 verschwindet (Fig. 27), als die Niederschläge ab dem Jahr 1978 wieder auf das mittlere jährliche Niveau zugenommen hatten.

Da die Entnahmen der Stadtwerke in all den Jahren gleich geblieben sind, ist eine Beeinflussung des Abflusses der Pader-Quellen durch die Förderung nicht erkennbar. Ungeklärt bleiben die Gründe, warum E. P. LÖHNERT (1990) die Auswertung 1980 abgebrochen hat. Die für die Nutzung des tiefen Grundwassers folgenschwere Behaup-

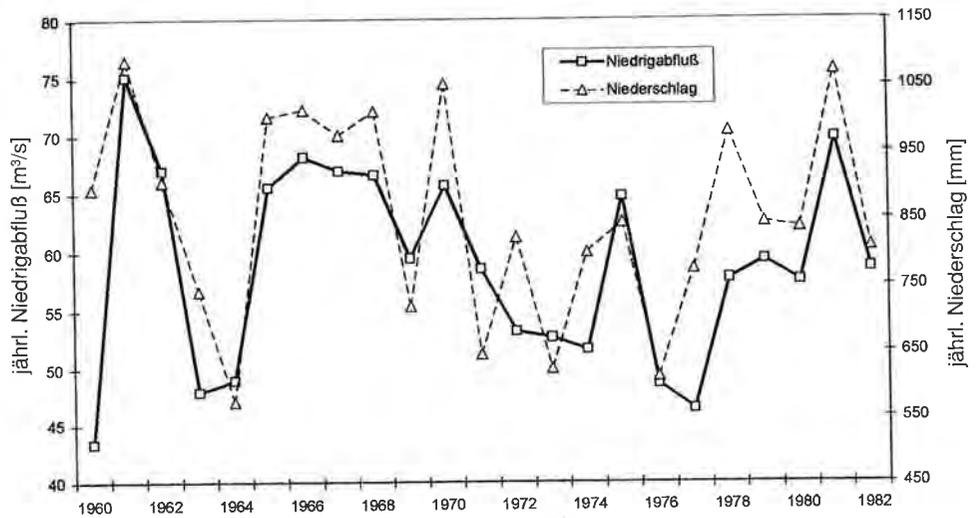


Fig. 26: Vergleich zwischen jährlichen Niederschlägen der Station Stukenbrock und den jährlichen Niedrigabflüssen des Pegels „Paderborn 1“ im Zeitraum 1960 bis 1982 (C. STRUCK, 1999). Comparison of the annual precipitation at the Stukenbrock meteorological station with the annual low water levels at the „Paderborn 1“ gauging station from 1960 to 1982 (C. STRUCK, 1999).

ung von E. P. LÖHNERT (1990), daß die Förderung die Schüttung der Pader-Quellen nachweislich verringert hat, ist mit unseren Untersuchungen eindeutig auf eine nicht nachvollziehbare Einschränkung des vorhandenen Datenpools zurückzuführen.

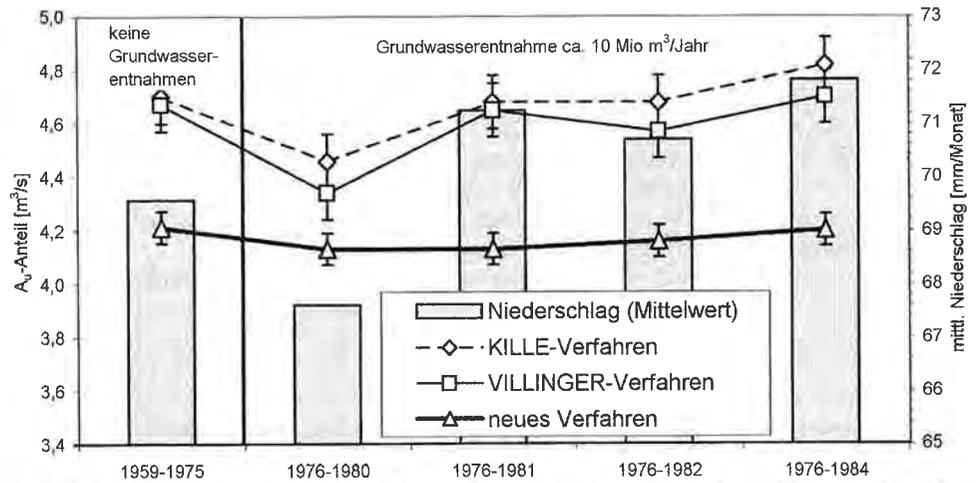


Fig. 27: Nach verschiedenen Verfahren ermittelte A_n -Anteile in Gegenüberstellung mit dem Niederschlag für die Zeiträume 1959 bis 1975, 1976 bis 1980 (E. P. LÖHNERT, 1990), 1976 bis 1981, 1976 bis 1982 und 1976 bis 1984 (C. STRUCK, 1999). The proportion of A_n determined by various methods in comparison with measured precipitation for the period 1959 to 1975, 1976 to 1980 (E. P. LÖHNERT, 1990), 1976 to 1981, 1976 to 1982, and 1976 to 1984 (C. STRUCK, 1999).

6. Folgerungen und Nutzungsempfehlungen

Die isotopehydrologischen Ergebnisse, insbesondere die Langzeit- $\delta^{18}\text{O}$ -Bestimmungen, an Proben aus Brunnen und Quellen der Stadtwerke Paderborn und Bielefeld sowie an Quellwässern und an Niederschlägen haben grundlegend neue Erkenntnisse über gespannte Karstaquifersysteme erbracht:

- Aus dem mit Emscher-Mergel überdeckten, verkarsteten Grundwasserleiter am Ostrand des Münsterländer Beckens wird normalerweise Jahre bis mehrere Jahrtausendealtes Grundwasser gepumpt.
- Nach langjährigem Niederschlagsdefizit erhöhen sommerliche Starkregen den weit abgesenkten Karstgrundwasserspiegel so stark, daß im gepumpten Grundwasser ganz junges Sickerwasser mit Anteilen von bis zu 5 % und mehrmonatigen Verzögerungen auftritt. Diese Beobachtung deckt sich mit dem um etwa drei Monate verzögerten Ansprechen der Schüttung der Pader-Quellen auf Niederschläge. Eine akute Gefahr einer bakteriologischen Kontamination des gespannten Karstgrundwassers besteht weder nach unseren Ergebnissen noch nach den Ergebnissen von Markierungsversuchen. Allerdings werden Kontrolluntersuchungen in Sommern nach niederschlagsarmen Perioden empfohlen.
- Die in zwei Jahrzehnten gemachte Beobachtung, daß die ^{14}C -Wasseralter der gepumpten Karstgrundwässer immer wieder zu ihrem Anfangswert zurückkehren (PB 45, Penn Elastic), unterstützt die aus $\delta^{18}\text{O}$ -Langzeitbeobachtungen gezogene Schlußfolgerung, daß sich natürlich und künstlich abgesenkte Karstgrundwasserspiegel im Teutoburger Wald nach einiger Zeit wieder normalisieren. Die Änderungen der ^{14}C -Wasseralter bestätigen, daß in niederschlagsarmen Perioden vermehrt älteres, in niederschlagsreichen Perioden frisch neugebildetes Grundwasser gepumpt wird. Die mittelfristige Stabilität des geohydraulischen Systems schließt die Möglichkeit einer Mobilisierung der hochmineralisierten Grundwässer in der Nachbarschaft weitgehend aus.
- Die starken Änderungen der ^{14}C -Wasseralter weisen die Brunnen PB 45 und Penn Elastic als geeignete Monitorbrunnen aus, um den geohydraulischen Zustand des Karstaquifersystems zu verfolgen. Es werden monatliche $\delta^{18}\text{O}$ -Analysen und ^{14}C -Wasseraltersbestimmungen im einjährigen Abstand ohne zeitliche Begrenzung empfohlen.
- Das entdeckte Phänomen, daß unter bestimmten geohydraulischen Bedingungen in gespannten und genutzten Karstaquifersystemen ganz junge Karstwässer über große Entfernungen fließen können, verlangt nach einer Revision der gängigen hydrogeologischen Vorstellung eines eingeschränkten Grundwasserschutzes. Eine befristete Reduzierung der Entnahmen in Sommermonaten nach vorangegangenem mehrjährigem Niederschlagsdefizit und plötzlichen Starkniederschlägen kann Gefährdungen vermeiden helfen.
- Der behauptete Nachweis einer Reduzierung der Schüttung der Pader-Quellen durch die Trinkwasserentnahme der Stadtwerke Paderborn ist das Ergebnis einer nicht korrekten Auswertung mit einer dazu wenig geeigneten Methode. Die Schüttungsänderung ist zweifelsfrei die Folge eines vorangegangenen Niederschlagsdefizits (C. STRUCK, 1999).

Zusammenfassung

Seit den klassischen Untersuchungen von H. STILLE Anfang dieses Jahrhunderts haben sich Hydrogeologen dem Paderborner Karstgrundwassersystem mit einem Einzugsgebiet von mindestens 360 km² immer wieder mit den verschiedensten Methoden angenommen. Seit 1968 wurde im überdeckten Teil des etwa 350 m mächtigen, lokal verkarsteten Kalkstein-Aquifers gespanntes Süßwasser mit mehreren Tiefbrunnen durch die Stadtwerke Paderborn und Bielefeld erschlossen. Sie pumpen jährlich etwa 18 Mio. m³ Grundwasser für die Trinkwasserversorgung.

Dieser nachhaltige hydraulische Eingriff in das vorher ungestörte tiefe Fließsystem wurde von Anfang an von hydrochemischen und isopenhydrologischen Dauerbeobachtungen begleitet. Die qualitative Auswertung der Analysenergebnisse bestätigt die Befürchtung nicht, daß sich die Süßwasser-Salzwasser-Grenzfläche durch die Grundwasserentnahmen zum Einzugsgebiet hin verschiebt. Allerdings liefern hohe ¹⁴C-Alter zwischen 6000 und 8000 Jahren der im Grundwasser gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen und erhöhte Tritiumwerte sichere Hinweise, daß im gepumpten Grundwasser beträchtliche Anteile enthalten sind, die nach 1963 neugebildet worden sind und die mittlere Verweilzeiten von wenigen Jahrzehnten haben. Die Isotopenzusammensetzung des Sauerstoffs lieferte darüberhinaus zweimal Hinweise, daß nach längeren Trockenzeiten und im Sommer plötzlich auftretenden Starkregen bis zu 5 % nur wenige Monate altes Grundwasser gepumpt wird. Es verschwindet, sobald sich die Grundwasserneubildung wieder auf das mittlere Niveau oder darüber einstellt.

Die über Jahrzehnte währende Beständigkeit der altersmäßigen Zusammensetzung des gepumpten Karstgrundwassers liefert einen belastbaren Beleg, daß die Grundwasserentnahmen in der derzeitigen Höhe das natürliche geohydraulische System nicht stören und eine zum Einzugsgebiet gerichtete Bewegung des mineralisierten Grundwassers nicht zu befürchten ist.

Literatur

- BAŞKAN, M. E. (1970): Hydrogeologische Verhältnisse am Südostrand des Münsterschen Kreidebeckens und im Eggegebirge unter besonderer Berücksichtigung der Karsthydrologie.– Fortschr. Geol. Rheinl. u. Westf., 17, 537–576, 11 Abb., 6 Tab., 3 Taf., Krefeld.
- BREITHAUER, M. (1994): Erfassung und Bewertung hydrogeologischer Daten des Paderborner Aquifersystems.– Unveröff. Diplomarbeit, 216 S., 37 Abb., 11 Tab., 1 Anl., Universität Münster.
- DVWK (1995): Speicher-Durchfluß-Modelle zur Bewertung des Stoffein- und Stoffaustrags in unterschiedlichen Grundwasser-Zirkulationssystemen.– DVWK-Schriften, 109, 95 S., 47 Abb., 11 Tab., 2 Anh., Bonn.
- FRÖHLICH, K., M. A. GEYH, B. Th. VERHAGEN & K. WIRTH (1987): Isotopenhydrologische Methoden zur Begutachtung von Grundwasser in Trockengebieten. Entwicklung eines Instrumentariums für die Beurteilung gefährdeter Vorkommen.– Forschungsberichte des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit, Bd. 85, 179 S., 58 Abb., 3 Tab., 8 Anh., Köln (Weltforum-Verlag).
- GÄRTNER, A. (1902): Die Quellen in ihren Beziehungen zum Grundwasser und zum Typus.– Klin. Jb., 9, 335–498, 22 Abb., 12 Ktn., Jena (Fischer).
- GEYH, M. A. (1972): Basic studies in hydrology and ¹⁴C and ³H measurements.– Proc. XXIV Int. Geol. Congr., 11, 227–234, 6 Abb., 1 Tab., Montreal.
- GEYH, M. A. & P. GROSCHOPF (1978): Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb.– Abh. geol. L.-Amt Bad. Würt., 8, 7–58, 9 Abb., 4 Tab., Freiburg i. Brsg.

- GEYH, M. A. & H. KÖHLE (1989): Isotopenhydrologische Untersuchungen im Raum Stuttgart-Ludwigsburg-Leonberg.– Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **40**, 75–92, 6 Abb., 3 Tab., Graz.
- GEYH, M. A. & J. MAIRHOFER (1970): Der natürliche Carbon-14 und Tritium-Gehalt der Wässer.– Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, **22**, 63–81, 8 Abb., 2 Tab., Graz.
- GEYH, M. A. & G. MICHEL (1974): Isotopen- und Hydrochemie des tieferen Grundwassers im Raum Paderborn.– Fortschr. Geol. Rheinl. u. Westf., **20**, 67–78, 5 Abb., 2 Tab., Krefeld.
- GEYH, M. A. & G. MICHEL (1979): Hydrochemische und isotopenphysikalische Entwicklung des Grundwassers im Paderborner Aquifer.– GWF (Gas- und Wasserfach), **120**, 576–582, 5 Abb., 2 Tab., München.
- GEYH, M. A. & G. MICHEL (1983): Tiefes Grundwasser in der Senne.– Z. dt. geol. Ges., **134**, 885–903, 5 Abb., 4 Tab., Hannover.
- GEYH, M. A. & G. MICHEL (1987): Grundwasserbewirtschaftung und Isotope.– Z. dt. geol. Ges., **138**, 261–271, 4 Abb., Hannover.
- GEYH, M. A. & G. MICHEL (1991): Überwachung der Grundwasserqualität mit Hilfe von Tritium-Analysen.– GWF (Gas- und Wasserfach), **132**, 454–455, München.
- HEDERER, T. (1977): Trinkwasser aus tiefem Karst der Paderborner Hochfläche.– 72 S., 10 Abb., Paderborn (Schöningh).
- HÜBNER, H., P. KOWSKI, W.-D. HERMICHEN, W. RICHTER & H. SCHÜTZE (1979): Regional and temporal variations of deuterium in precipitation and atmospheric moisture of Central Europe.– Isotope Hydrology **1978**, Vol. I, 289–304, 7 Abb., 4 Tab., Wien (IAEA).
- KÄSS, W., E. P. LÖHNERT & A. WERNER (1996): Der jüngste Markierungsversuch im Karst von Paderborn (Nordrhein-Westfalen).– Grundwasser, **1** (2), 83–89, 6 Abb., 2 Tab., Heidelberg (Springer).
- KOCH, M. & G. MICHEL (1972) mit Beiträgen von SCHRÖTHER, R. & K. VOGEL: Hydrogeologische Karte des Kreises Paderborn und der angrenzenden Gebiete 1 : 50 000, Erläuterungen.– 82 S., 15 Abb., 5 Tab., 2 Taf., Krefeld.
- LÖHNERT, E. P. (1990): Beitrag zur Geohydrologie des Karst-Aquifersystems von Paderborn (Nordrhein-Westfalen).– N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **181**, 519–530, 7 Abb., 1 Tab., Stuttgart.
- LÖHNERT, E. P. (1992): Tracing of the Paderborn karst aquifer system (Westphalia, Germany): A critical review.– In: HÖTZL, H. & A. WERNER (1992, eds.): Tracer Hydrology.– 243–250, Rotterdam (Balkema).
- LÖHNERT, E. P. (1993): New results on Cretaceous limestone karst in Westphalia, Germany.– In: IAHS (1993): Hydrogeological Processes in Karst Terranes.– IAHS Publ., **207**, 405–412, 6 Abb., 2 Tab., Wallingford/UK.
- LÖHNERT, E. P. & F.-J. STRUFFERT (1996): Umweltisotope in den Quellwässern der Pader (Paderborn, Nordrhein-Westfalen).– Geol. Jb. A **144**, 255–270, 11 Abb., 2 Tab., Hannover.
- MALOSZEWSKI, P. (1994): Mathematical Modelling of Tracer Experiments in Fissured Aquifers.– Freiburger Schriften zur Hydrologie, **2**, 107 S., 48 Abb., 15 Tab., Freiburg i. Brsg.
- MICHEL, G. (1982): Hydrogeologie.– In: SKUPIN, K. (1982): Erläuterungen Blatt 4218 Paderborn.– Geol. Kt. Nordrh. Westf. 1 : 25 000, Erl., 4218 Paderborn, 92–107, 4 Abb., 6 Tab., Krefeld.
- MICHEL, G. (1983a): Die Sole im Münsterland – woher, wohin?– Heilbad u. Kurort, **35**, 66–76, 7 Abb., 3 Tab., Gütersloh.
- MICHEL, G. (1983b): Die Sole des Münsterländer Kreide-Beckens.– N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **166** (1), 139–159, 5 Abb., 2 Tab., Stuttgart.
- MICHEL, G. & W. STRUCKMEIER (1985): The cretaceous basin of Münster – a general groundwater system in response to multiple impacts (water supply, spas, deep mining).– Hydrology in the Service of Man, Mém. Assoc. internat. Hydrogéol., **18** (2), 150–159, 4 Abb., 3 Tab., Cambridge.
- MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrogeologie.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. **8**, 400 S., 227 Abb., 32 Tab., Berlin/Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- OESCHGER, H. & U. SIEGENTHALER (1972): Umweltisotope im Dienste der Hydrologie und Ausblick auf neue Methoden.– GWF (Gas- und Wasserfach), **113**, 501–508, 15 Abb., 1 Tab., München.
- ORESQUES, N., K. SHRADER-FRECHETTE & K. BELITZ (1994): Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences.– Science, **263**, 641–646.
- RICHTER, J. (1995): Methodische und regionale Beiträge zur Auswertung von Umweltisotopendaten in der Hydrogeologie.– Beiträge zur Hydrogeologie, **46**, 89–195, 51 Abb., 32 Tab., 2 Taf., Graz.

- RICHTER, J., P. SZYMCZAK, T. ABRAHAM & H. JORDAN (1993): Use of combinations of lumped parameter models to interpret groundwater isotopic data.– *Journal of Contaminant Hydrology*, **14**, 1–13, Amsterdam (Elsevier).
- STADTWERKE PADERBORN GMBH (1992): *Tiefes Grundwasser in Paderborn*.– 224 S., zahlr. Abb. u. Tab., Paderborn (Bonifatius Druck).
- STILLE, H. (1903): *Geologisch-hydrologische Verhältnisse im Ursprungsgebiete der Paderquellen zu Paderborn*.– *Abh. kgl. preuß. geol. L.-Anst., N.F.*, **38**, 129 S., 3 Abb., 6 Taf., Berlin (Nachdruck 1976 im *Geol. Jb.*, **C14**, Hannover).
- STRUCK, C. (1999): *Zur Schüttung von Karstquellen und zur Hydrochemie des gepumpten Karstwassers im Paderborner Raum*.– Unveröff. Diplom-Arbeit, 77 S., 43 Abb., 12 Tab., Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Hannover.
- STRUCKMEIER, W. (1990): *Wasserhaushalt und hydrologische Systemanalyse des Münsterländischen Beckens*.– *LWA-Schriften-Reihe*, **45**, 72 S., 21 Abb., 13 Tab., 5 Ktn., Düsseldorf (L.-Amt Wasser und Abfall, Nordrhein-Westfalen).
- VERHAGEN, B. Th., M. A. GEYH, K. FRÖHLICH & K. WIRTH (1991): *Isotope Hydrological Methods for the Quantitative Evaluation of Ground Water Resources in Arid and Semi-arid Areas. Development of a Methodology*.– 164 S., 58 Abb., 3 Tab., 8 Anh., Köln (Ministry of Economic Cooperation).
- VOGEL, J. C. (1970): *Dating of groundwater*.– *Isotope Hydrology 1970*, 225–239, 8 Abb., 5 Tab., Wien (IAEA).
- VOGEL, J. C. & D. B. BREDEKAMP (1970): *Study of a dolomitic aquifer with carbon-14 and tritium*.– *Isotope Hydrology 1970*, 349–372, 8 Abb., 5 Tab., Wien (IAEA).

Summary

The Paderborn karst groundwater system has been studied with many different methods since the classic study by H. STILLE at the beginning of the twentieth century. About 18 million m³ of fresh water have been pumped annually since 1968 from deep wells in the confined, locally karstified about 350 m in thickness limestone aquifer, which has a recharge area of at least 360 km².

Chemical and isotopic composition of the groundwater system has been monitored since pumping begun. The qualitative evaluation of the analyses results do not confirm the concern that the fresh water/saline water interface would move towards the well fields. Nevertheless, high ¹⁴C ages between 6000 and 8000 years obtained on dissolved inorganic carbon compounds and elevated tritium values strongly indicate that the pumped groundwater contains a considerable proportion of groundwater that was recharged after 1963 and that has mean residence times of only a few decades. Moreover, the oxygen-18 composition provided indications (twice) that groundwater was pumped that contained up to 5 % young components (only a few months old) from heavy rainfall events that followed long dry periods. This component disappeared as soon as groundwater recharge returned to normal.

The little change in the age of the pumped groundwater over a period of several decades is reliable evidence that the present groundwater production is not disturbing the natural geohydraulic system and that mineralized groundwater is not moving towards the well fields.

Dank

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Theo HEDERER (†), ehemaliger Direktor der Stadtwerke Paderborn, der die Isotopenarbeit wesentlich unterstützte. Sein Nachfolger, Herr Dipl.-Ing. Jürgen RINNEBERG, steigerte das Interesse und richtete einen Arbeitskreis ein, der wesentlich dazu beitrug, daß diese Arbeit trotz der nicht endenwollenden Meßreihen fortgesetzt wurde. Herr Dipl.-Ing. Wilfried HANDROCK und Herr Dr. Andreas THIEL-BÖHM haben diese Tradition fortgesetzt. Herrn Michael

BERNEMANN danken wir für die sorgfältige Probenahme über all die vielen Jahre. Herr Dipl.-Geol. Olaf KULACZEWSKI von den Stadtwerken Bielefeld hat sich diesem Arbeitskreis angeschlossen und damit wesentlich zum Erfolg beigetragen.

Wir danken allen Mitarbeitern des ^{14}C -Labors Hannover, die an den isotoopenhydrologischen Analysen beteiligt waren.