

6 Untersuchungsergebnisse

6.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der durchgeführten Feld- und Laboruntersuchungen sind in Monographien, getrennt für jeden Baggersee, umfassend in Tabellen und Graphiken dokumentiert (LGRB 2000). Hier werden nur die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen aufgeführt.

Eine Übersicht über die chemische Beschaffenheit der See- und Grundwässer gibt Tab. 6. Sie enthält, jeweils getrennt für das Grundwasser im Zu- und im Abstrom sowie den Baggersee, die Mittelwerte der verschiedenen Inhaltsstoffe. Die für die Mittelwertbildung verwendeten Daten sind aus Tab. 7 ersichtlich. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass den Mittelwerten z. T. eine unterschiedliche Anzahl von Messwerten zugrunde liegt und dass die Mess-

werte teils für unterschiedliche Probenahmezeitpunkte und Entnahmetiefen stehen. Die Mittelwerte in Tab. 6 sind somit nicht in jedem Fall uneingeschränkt vergleichbar.

6.2 Oberstromiges Grundwasser

6.2.1 Grundwassertemperatur

Die mittleren Temperaturen der vom See unbeeinflussten Grundwässer schwankten zwischen 10,8 und 12,7 °C und damit im Wertebereich natürlicher oberflächennaher Grundwässer (LfU 1994). In den Temperatur-Tiefenprofilen der meisten Grundwassermessstellen tritt im Sommer in der Wassersäule ober-

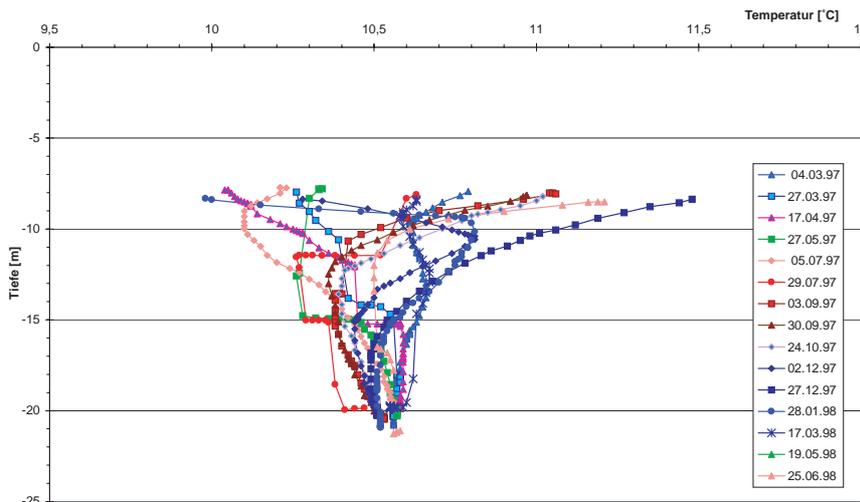


Abb. 23: Temperatur-Tiefenprofile in der Grundwassermessstelle GWM KA 1 im Zustrombereich des Eppelsees

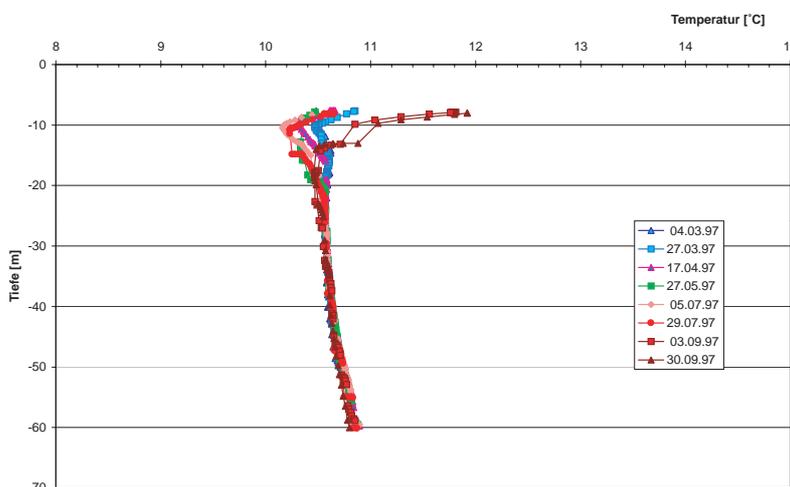


Abb. 24: Temperatur-Tiefenprofile der tiefen Grundwassermessstelle GWM KA 2 im Umfeld des Eppelsees

Temperaturgradient im Profilschnitt von 40–60 m 1,3 °C/100 m

Tab. 6: Mittlere chemische Beschaffenheit des oberstromigen Grundwassers, des Seewassers und des unterstromigen Grundwassers für die im Rahmen des KaBa-Projekts untersuchten Baggerseen; Zuordnung der Messstellen für die Mittelwertbildung siehe Tab. 7
alle Angaben, soweit nicht anders angegeben, in mg/l

Baggersee	Situation	SW [%]	T [°C]	LF [µS/cm]	O ₂	pH [-]	GH [°dH]	Ca	Mg	Na	K	Fe	Mn	NH ₄	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	H ₂ SiO ₃
Leissee	GWo	0	11,2	600	0,2	6,8	15,0	93	6,3	11,1	5,1	12,5	1,6	0,67	17,7	43,0	309	1,0	21
	See	100	8,9	600	4,2	7,6	(14,2)	90	7,0	17,7	3,8	5,1	1,6	0,49	21,6	32,1	277	0,03	18
	GWu30	≈100	10,7	546	1,2	7,3	14,0	89	6,3	15,5	3,6	3,2	0,46	0,43	20,9	35,4	272	0,9	12
	GWu200	80	12,3	519	0,2	7,3	13,3	85	4,9	15,5	2,8	3,9	0,36	0,20	21,5	40,9	246	0,5	12
	GWu500	10 – 20	12,1	576	2,3	7,3	15,2	103	6,0	15,1	2,2	1,3	0,06	0,06	27,6	45,9	274	2,3	12
Epplesee	GWo	0	11,1	687	1,0	7,0	18,4	123	6,7	20,6	2,2	0,25	0,23	0,01	21,3	57,3	349	4,5	17
	See	100	9,6	425	9,5	8,0	(10,8)	69	5,1	9,9	1,5	0,12	0,01	0,04	16,1	56,6	163	0,1	4
	GWu20	≈100	11,7	449	0,3	7,6	11,6	76	4,8	9,8	1,9	0,68	0,06	0,07	19,3	63,1	173	0,8	10
	GWu100	≈100	12,4	449	0,7	7,5	12,1	77	8,4	8,5	1,7	0,70	0,05	0,08	18,2	62,7	173	2,7	13
Waldsee/ Hesselhurst	GWo	0	10,8	652	0,2	6,9	18,1	104	12,2	14,0	1,9	10,3	0,96	0,37	15,7	41,2	357	0,6	25
	See	100	11,0	318	6,9	7,6	9,8	58	6,2	10,0	2,6	0,06	0,46	0,18	17,6	25,4	177	1,5	12
	GWu20		11,5	490	0,3	7,1	12,8	82	5,3	11,3	4,3	2,4	0,65	0,54	19,5	40,4	234	0,9	19
Binninger Baggersee	GWo		11,5	731	5,3	7,1	21,9	104	30,5	4,9	1,9	n n	n n	n n	22,5	41,5	376	25,5	16
	See	100	12,8	323	11,5	8,1	9,5	44	14,3	8,3	1,4	0,01	0,03	0,07	21,1	29,3	152	0,6	0,3
	GWu20	≈100	17,6	360	3,5	7,8	9,5	45	14,0	8,4	2,0	n n	n n	n n	21,7	29,2	157	0,3	5
	GWu500		12,3	538	5,6	7,3	15,4	85	14,5	6,2	1,9	0,04	n n	n n	18,6	38,8	262	8,9	11
Apostelsee	GWo	0	12,7	884	8,5	7,4	24,1	138	22,8	16,6	10,1	0,07	n n	n n	36,3	82,5	400	27,4	18
	See	100	11,7	593	10,7	7,6	17,9	95	24,3	15,3	7,7	0,01	0,01	0,07	35,1	106	243	23,4	2
	GWu40	≈100	14,3	717	3,5	7,4	18,6	96	23,7	15,0	6,5	0,03	n n	0,01	35,1	107	248	19,8	4
Waldsee/ Emmendingen	GWo	0	12,5	219	2,6	6,1	5,0	24	5,3	9,6	1,8	0,01	0,01	n n	12,1	21,3	74,5	9,5	19
	GWoD	0	11,5	637	0,2	6,6	14,5	68	21,8	20,4	25,5	1,96	2,40	1,45	22,7	8,7	368	0,2	15
	See	100	13,6	265	7,5	7,3	6,5	32	8,1	12,1	6,1	0,07	0,10	0,06	14,9	20,0	126	0,3	n n
	GWu50	60 – 80	10,8	309	0,7	6,6	7,3	33	10,4	13,2	3,2	0,84	0,22	0,02	16,9	25,2	129	4,3	18
Bechinger See	GWo	0	11,2	736	5,2	7,3	21,5	116	22,8	8,0	4,4	0,03	0,01	n n	24,4	41,7	362	32,2	16
	See	100	14,0	339	12,2	7,6	9,4	36	18,8	6,8	1,5	0,01	n n	0,03	22,0	36,7	132	3,1	0,4
	GWu50	≈100	12,2	425	2,6	7,6	11,8	58	16,4	6,0	1,7	0,04	n n	n n	22,5	37,5	190	2,3	7
	GWu200	80 – 90	11,5	498	1,2	7,5	14,1	75	16,0	6,3	1,7	0,05	n n	n n	22,7	41,9	233	3,4	10
Alter Vogel- baggersee	GWo	0	14,9	626	2,1	7,4	13,5	67	7,7	48,7	3,2	0,02	0,02	n n	67,6	26,9	231	1,9	10
	See	100	8,4	642	3,8	7,6	(11,2)	67	7,9	53,6	4,0	0,02	0,56	0,58	82,3	23,8	203	0,3	12
	GWu30	?	11,9	622	0,7	7,5	11,5	69	7,6	46,0	4,1	0,15	0,33	0,14	75,8	28,2	210	1,2	10
	GWu150	50	10,6	625	0,2	7,4	11,2	65	7,9	48,3	4,3	0,02	0,23	0,06	77,2	26,9	210	0,2	10

Erläuterungen

Situation: GWo – Grundwasser oberstromig; GWoD – Grundwasser oberstromig mit Deponieeinfluss (beim Waldsee/Emmendingen); See – Baggersee; GWu50 – Grundwasser unterstromig in etwa 50 m Entfernung

SW – Seewasseranteil

Angaben: () – Gesamthärte, berechnet aus Calcium und Magnesium; n n – Inhaltstoff nicht nachweisbar

Tab. 7: Für die Mittelwertbildung in Tab. 6 verwendete Daten

Übersichtsanalysen mit sehr eingeschränktem Parameterumfang wurden nicht berücksichtigt; * für die Seewasserbeschaffenheit wurden z. T. Analysedaten der LfU Baden-Württemberg verwendet; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 6

Baggersee	Situation	Messstellen	Messzeitraum (Anzahl der Messungen)
Leissee*	GWo	P 3, P 5, P 38, P 39	14.07.95 – 14.03.96 (7)
	See		14.01.97 – 14.01.98 (39)
	GWu30	GWM 70, 71	14.07.95 – 20.01.98 (13)
	GWu200	GWM 73, 74, 75, 76	13.07.95 – 19.01.98 (16)
	GWu500	GWM 78, 79; Hori. Br.	13.07.95 (3)
Epplesee*	GWo	KA 1	21.04.97 – 13.01.98 (4)
	See		15.01.97 – 19.11.98 (69)
	GWu20	KB 1/97	14.10.97 – 02.06.98 (12)
	GWu100	KA 4, KA 5, SB2/97	21.04.97 – 02.06.98 (21)
Waldsee/Hesselhurst	GWo	0148/114, Tbr. Waltersweiler	15.09.97 – 08.06.98 (3)
	See		06.05.97 – 16.06.98 (15)
	GWu20	GWM 3, KB 3/97	15.09.97 – 08.06.98 (14)
Binninger Baggersee	GWo	P 7	28.04.97 – 08.09.97 (2)
	See		21.04.97 – 10.12.97 (8)
	GWu20	P 11	30.06.97 – 01.12.97 (3)
	GWu350	P 10	28.04.97 – 01.12.97 (4)
	GWu500	TBr.	28.04.97 – 01.12.97 (4)
Apostelsee	GWo	PW Apostelsee	05.05.97 – 15.06.98 (5)
	See		06.05.97 – 16.06.98 (15)
	GWu40	KB 2/97, SB 1/97	01.10.97 – 15.06.98 (18)
Waldsee/Emmendingen	GWo	P 27	06.05.97 – 10.03.98 (4)
	GWoD	P 8 (3 – 9 m)	06.05.97 – 03.03.98 (4)
	See		06.05.97 – 08.12.97 (8)
	GWu50	P _{Wald} P 23	06.05.97 – 10.03.98 (8)
Bechinger See	GWo	Br. 2 Fronreute	28.04.97 – 02.12.98 (4)
	See		21.04.97 – 09.12.98 (7)
	GWu50	P 19	29.04.97 – 01.12.98 (4)
	GWu200	P 17, P 18	29.04.97 – 01.12.98 (8)
Alter Vogelbaggersee	GWo	GWM A 1	07.05.97 – 09.06.98 (5)
	See		14.01.97 – 14.01.98 (39)
	GWu30	KB 4/97	13.10.97 – 09.06.98 (6)
	GWu150	GWM 0348	05.05.97 – 09.06.98 (5)

flächennah eine Erwärmung auf (Abb. 23). Die hohe mittlere Temperatur in der oberstromigen Messstelle des Alten Vogelbaggersees wird durch die geringe Tiefe der Messstelle von nur 2 m verursacht. Häufig ist spätestens ab etwa 20 m Tiefe der Übergang in die „neutrale Zone“ zu erkennen, in der keine nennenswerten jährlichen Temperaturschwankungen mehr auftreten. Bei tieferen Grundwassermessstellen zeigen sich zudem die Auswirkungen der geothermischen Tiefenstufe (Abb. 24). Eine vertikale Strömung in der Messstelle führt zu einer ausgeglichenen Temperaturverteilung über das gesamte Tiefenprofil (Abb. 25).

6.2.2 Allgemeine hydrochemische Charakteristik

Die mittleren Werte der elektrischen Leitfähigkeit liegen zwischen etwa 600 und 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, eine Größenordnung, wie sie typisch für oberflächennahe, mäßig bis deutlich anthropogen beeinflusste Grundwässer in karbonatischen Grundwasserleitern ist. Eine Ausnahme bildet mit 219 $\mu\text{S}/\text{cm}$ das Grundwasser oberstromig des Waldsees/Emmendingen. Ursache für die deutlich kleinere elektrische Leitfähigkeit ist ein Zustrom von gering mineralisiertem Grundwasser von Osten, aus dem Bereich des Elz-Grötter-Schwemmfächers, der aus karbonatfreiem Schwarzwaldmaterial aufgebaut ist.

Vom hydrochemischen Typ her handelt es sich bei fast allen untersuchten Grundwässern um Ca-HCO_3 -Wässer (Abb. 26). Solche Wässer sind charakteristisch für oberflächennahe karbonatische Grundwasserleiter, wie sie die pleistozänen Sande und Kiese darstellen. Ausnahmen sind die Grundwässer

aus dem Umfeld des Waldsees/Emmendingen ($\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Wasser) und des Alten Vogelbaggersees ($\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-Cl}$ -Wasser). Beim Waldsee sind die geringe Gesamtmineralisation und der daraus resultierende abweichende Grundwassertyp eine Folge der Karbonatarmut des Gesteins, beim Alten Vogelbaggersee ist der Einfluss des Rheins für den abweichenden Grundwasserchemismus verantwortlich.

Bezüglich des Redox-Milieus besitzen die Grundwasserleiter im Umfeld von drei Baggerseen (Binninger Baggersee, Apostelsee und Bechinger See) aerobe Verhältnisse, zwei Baggerseen (Waldsee/Emmendingen und Alter Vogelbaggersee) zeigen geringe Sauerstoff-Konzentrationen (2,6 und 2,1 mg/l) und die übrigen drei Baggerseen weitgehend anaerobe Bedingungen (Leissee, Epplesee und Waldsee/Hesselhurst).

Beim Waldsee/Emmendingen überlagern die Auswirkungen der unmittelbar oberstromig des Sees gelegenen Altlast die regionale Grundwasserbeschaffenheit.

6.2.3 Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Gesamthärte, pH-Wert

Die mittleren Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat variieren im unbeeinflussten Grundwasser zwischen 24 und 138 mg/l (Ca), 5,3 und 30,5 mg/l (Mg) sowie 74,5 und 400 mg/l (HCO_3). Diese Inhaltsstoffe sind überwiegend Produkte der Karbonatlösung aus dem Gestein. Zusätzlich dürfte noch ein geringer Anteil aus anthropogenen Quellen stammen.

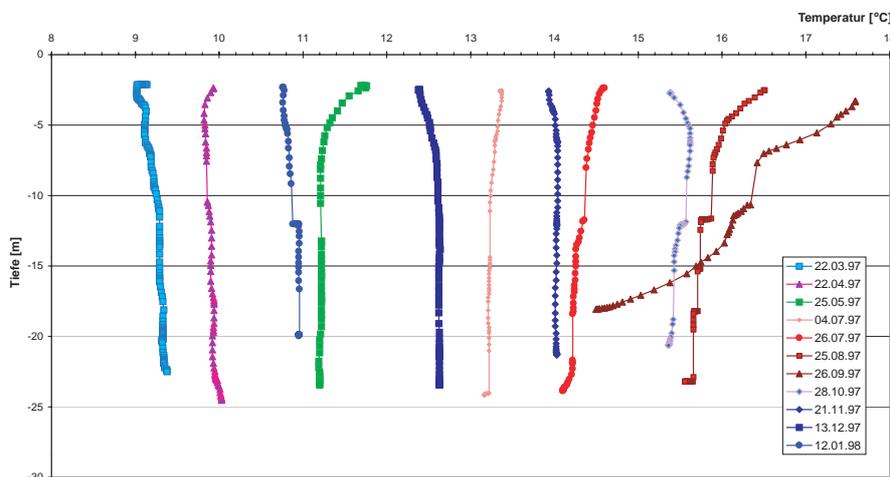


Abb. 25: Temperatur-Tiefenprofile der Messstelle GW M P 27 im Anstrombereich des Waldsees/Emmendingen
Ausgeglichene Temperaturverteilung infolge Vertikalströmung

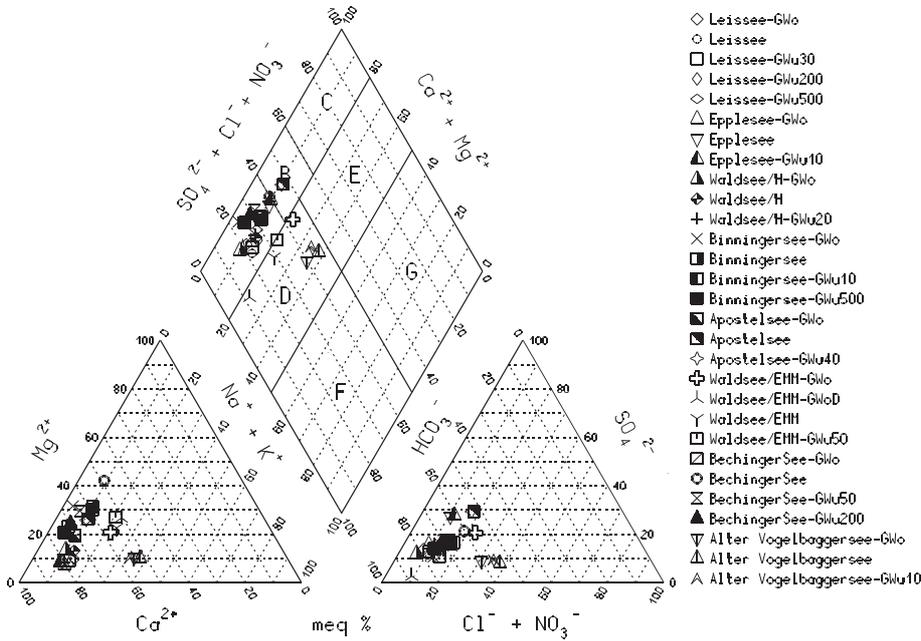


Abb. 26: PIPER-Diagramm für die unterschiedlichen Grund- und Seewässer

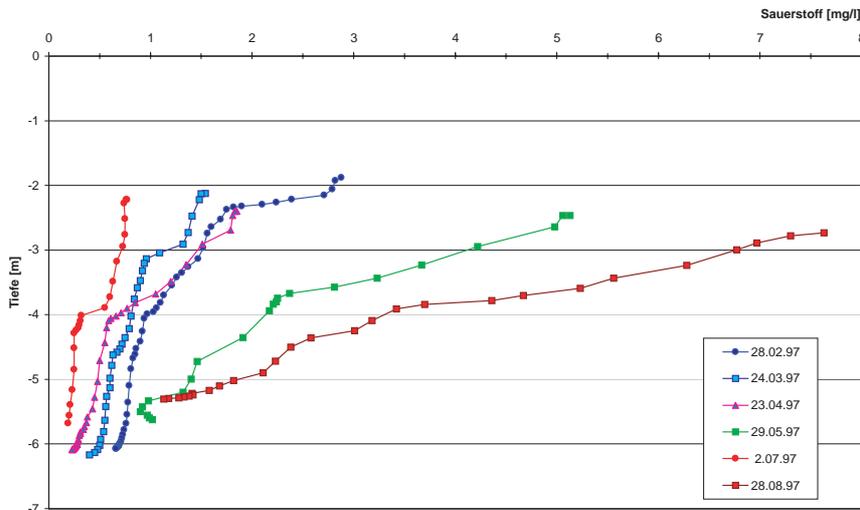


Abb. 27: Tiefenprofile der Sauerstoffkonzentrationen in der GWM 0148/114-5 oberstromig des Waldsees/Hesselhurst (reduzierendes Milieu)

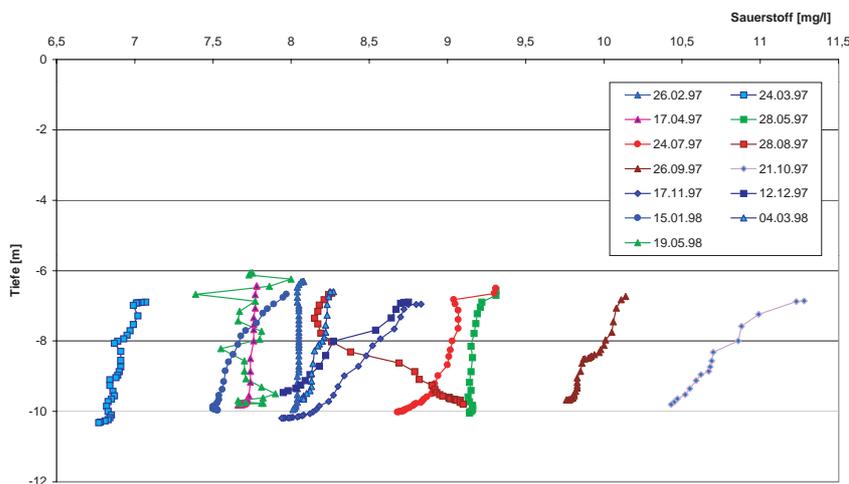


Abb. 28: Tiefenprofile der Sauerstoffkonzentrationen in der GWM P 27 oberstromig des Apostelsees (oxidierendes Milieu)

In nahezu allen Grundwasserproben wurden mittlere pH-Werte von 6,8–7,4 gemessen. Die mittlere Gesamthärte variiert zwischen 13,5 und 24,1 °dH, entsprechend den Konzentrationen von Calcium und Magnesium.

Im Grundwasser oberstromig des Waldsees/Emmendingen sind aufgrund der Karbonatarmut des Gesteins (Kap. 5.6) die Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat mit Werten von 24 mg/l, 5,3 mg/l und 74,5 mg/l deutlich geringer als in den übrigen untersuchten Grundwässern. Vor dem Übertritt in den See erfährt das ursprünglich sehr weiche Wasser jedoch durch die oberstromig gelegene Altlast eine starke anthropogene Aufhärtung. Die Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat steigen dabei auf 68 mg/l, 21,8 mg/l und 368 mg/l, die Gesamthärte auf 14,5 °dH und der pH-Wert auf 6,6 (Tab. 6).

Vergleichsweise geringe Ca-, Mg- und HCO_3^- -Konzentrationen sind auch im Umfeld des Alten Vogelbaggersees zu beobachten. Sie gehen auf einen deutlichen Einfluss durch Rheinuferfiltrat zurück.

6.2.4 Sauerstoff

Hohe Sauerstoff-Konzentrationen von im Mittel 5,2–8,5 mg/l wurden für das oberstromige Grundwasser von Binninger Baggersee, Apostelsee und Bechinger See gemessen. Sie stehen in Zusammenhang mit den häufig geringen Gehalten an organischem Material in den Kiesvorkommen im Alpenvorland (Binninger Baggersee, Bechinger See) oder sind auf einen sauerstoffreichen Randzufluss in den Oberrheingraben (Apostelsee) zurückzuführen. Geringere Sauerstoff-Konzentrationen zwischen 2,1 und 2,6 mg/l finden sich im Umfeld des Waldsees/Emmendingen und des Alten Vogelbaggersee, nahezu sauerstofffreie Verhältnisse im Leissee, Eppensee und Waldsee/Hesselhurst. Sie sind auf die meist hohen Gehalte an organischen Bestandteilen in den Kies- und Sandvorkommen im Oberrheingraben, speziell im Bereich der Kinzig–Murg-Rinne, zurückzuführen.

Die Sauerstoff-Tiefenprofile, die in den Grundwassermessstellen aufgenommen wurden, lassen auf die Bedingungen im Grundwasserleiter nur im Bereich der jeweiligen Filterstrecke schließen. Meist sind die Sauerstoff-Konzentrationen nahe der Grundwasseroberfläche größer als in tieferen Abschnitten des Grundwasserleiters, ein Effekt, der wohl überwiegend auf den Zufluss von sauerstoffreichem

Sickerwasser im Zuge der Grundwasserneubildung zurückgeht (Abb. 27, 28). Auch eine Lösung von Sauerstoff aus der Bodenluft könnte diesen Befund hervorrufen.

6.2.5 Stickstoff, Schwefel

Stickstoff und Schwefel sind Redox-sensitive Parameter, deren Konzentration und Speziesverteilung nicht nur durch die Größe des Eintrags, sondern ganz wesentlich durch das Redox-Milieu im Grundwasserleiter gesteuert wird.

Der Stickstoff im Grundwasser stammt nur in geringem Umfang aus dem Niederschlag und aus geogenen Quellen, der Haupteintrag erfolgt über die landwirtschaftliche Nutzung. Im Oberrheingraben wurden im Sickerwasser unter einzelnen landwirtschaftlich genutzten Flächen Nitrat-Konzentrationen von 120 mg/l und mehr nachgewiesen (LfU 1994). Die mittleren Nitrat-Konzentrationen zwischen 26 und 32 mg/l, die in den Grundwasserleitern mit oxidierenden Verhältnissen (Binninger Baggersee, Apostelsee, Bechinger See; Tab. 6) gemessen wurden, dürften etwa die tatsächliche Belastungssituation in den jeweiligen Gebieten widerspiegeln.

In den übrigen Grundwasserleitern wird das Nitrat zum Teil oder fast vollständig durch Denitrifikation abgebaut. Die verbliebenen Nitrat-Konzentrationen schwanken hier durchschnittlich zwischen 9,5 und 0,2 mg/l. Bei der Nitrat-Reduktion kann unter stark reduzierenden Bedingungen Ammonium entstehen. Höhere Ammonium-Konzentrationen finden sich denn auch nur in Grundwasserleitern mit reduzierenden Bedingungen, die höchsten mittleren Konzentrationen wurden im Umfeld des Leissees mit 0,67 mg/l ermittelt. Noch höhere Konzentrationen (bis 1,45 mg/l) traten unmittelbar unterstromig der Altlast beim Waldsee/Emmendingen auf.

Sulfat kann bereits in vergleichsweise hohen Konzentrationen im Niederschlag enthalten sein. Mit einem geringen zusätzlichen Beitrag aus anthropogenen Quellen lassen sich Konzentrationen in der Größenordnung von 40–50 mg/l erklären, wie sie in den meisten untersuchten Grundwässern nachgewiesen wurden. Die deutlich niedrigeren mittleren Konzentrationen von 27 bzw. 21,3 mg/l im Umfeld des Alten Vogelbaggersees und des Waldsees/Emmendingen stehen mit dem Zustrom sulfatärmerer Grundwasserkomponenten in Zusammenhang. Die sehr hohen Konzentrationen von > 80 mg/l im Umfeld des Apo-

stelsees beruhen auf dem Zustrom einer sulfatreichen Grundwasserkomponente aus der Vorbergzone.

Eindeutige Auswirkungen einer Sulfat-Reduktion sind nur unterstromig der Altlast beim Waldsee/Emmendingen nachweisbar. Die mittleren Sulfat-Konzentrationen sinken hier auf 8,7 mg/l ab. Sulfidschwefel, der als Produkt der Sulfat-Reduktion entsteht, konnte im Grundwasser nur qualitativ in einigen Proben im Umfeld des Leissees nachgewiesen werden, ein Hinweis darauf, dass eine Sulfat-Reduktion in den untersuchten Grundwasserleitern in großem Umfang nicht stattfindet.

6.2.6 Eisen, Mangan

Die mittleren Konzentrationen von Eisen und Mangan erreichen in den reduzierten Grundwässern Werte bis maximal 12,5 bzw. 2,4 mg/l (Umfeld Leissee bzw. unterstromig der Altlast beim Waldsee/Emmendingen). Demgegenüber waren in den oxidierten Grundwässern Eisen und Mangan nur in Spuren oder nicht nachweisbar (Tab. 6).

Bei reduzierenden Verhältnissen überwiegen die leichtlöslichen Fe(II)- und Mn(II)-Verbindungen, während sich unter oxidierenden Verhältnissen die geringlöslichen Fe(III)- und Mn(IV)-Verbindungen (Oxidhydrate und Hydroxide) bilden.

6.2.7 Natrium, Kalium, Chlorid

Die mittleren Konzentrationen von Natrium, Kalium und Chlorid schwanken in den untersuchten Grundwässern in folgenden Bereichen: Na von 4,9 mg/l (Binnerer Baggersee) bis 48,7 mg/l (Alter Vogelbaggersee), K von 1,8 mg/l (Waldsee/Emmendingen oberstromig der Altlast) bis 10,1 mg/l (Apostelsee) und Cl von 12,1 mg/l (Waldsee/Emmendingen) bis 67,6 mg/l (Alter Vogelbaggersee), siehe Tab. 6.

Die unterschiedlichen Na-, K- und Cl-Konzentrationen spiegeln die jeweilige anthropogene Belastung der verschiedenen Grundwässer wider. Als Quellen für diese Inhaltsstoffe kommen u. a. diffuse Einträge durch landwirtschaftliche Nutzung und aus besiedelten Gebieten in Frage.

Die hohen, etwa äquivalenten Na- und Cl-Konzentrationen im Grundwasser oberstromig des Alten Vogelbaggersees sind auf den Einfluss der Salzfracht im Rheinuferfiltrat zurückzuführen. Die sehr hohe mitt-

lere K-Konzentration von 25,5 mg/l oberstromig des Waldsees/Emmendingen ist eindeutig eine Auswirkung der dortigen Altlast.

6.2.8 Silizium

Silizium wurde in den Grundwässern im Mittel in Konzentrationen zwischen 15 und 21 mg/l (als H_2SiO_3) gemessen. Die geringe H_2SiO_3 -Konzentration im Umfeld des Alten Vogelbaggersees (10 mg/l) geht auf eine Verdünnung des Grundwassers durch Rheinuferfiltrat zurück.

Das Silizium im Grundwasser stammt aus der Silikatverwitterung und ist geogenen Ursprungs (LfU 1994).

6.2.9 Spurenelemente

An Spurenelementen wurden P, Pb, Al, Hg, Cr und As, am Leissee auch F untersucht. Die Konzentrationen dieser Inhaltsstoffe lagen überwiegend im Bereich oder unter der Bestimmungsgrenze. Eine zusammenfassende Übersicht gibt Tab. 8.

Phosphor trat nur im Umfeld des Leissees und unmittelbar unterstromig der Altlast beim Waldsee/Emmendingen in nachweisbaren Konzentrationen auf. Diese Grundwässer sind durch stark reduzierende Bedingungen geprägt (Kap. 6.2.2, 6.2.4), unter denen es zu einer Mobilisierung des ansonsten im Boden überwiegend fixierten Phosphors kommt.

Blei, Aluminium, Quecksilber und Chrom konnten nicht oder nur in Spuren nachgewiesen werden. Die Konzentrationen bewegen sich in der Größenordnung der geogenen Hintergrundwerte. Unterhalb der Altlast beim Waldsee/Emmendingen sind allenfalls leicht erhöhte Chrom-Konzentrationen festzustellen.

Höhere Arsen-Konzentrationen über der Nachweisgrenze finden sich oberstromig des Waldsees/Hesselhurst und des Waldsees/Emmendingen und in größerer Tiefe oberstromig des Epplensees (Kap. 7.4). Im Umfeld des Waldsees/Hesselhurst und des Epplensees ist das Arsen geogener Herkunft. Beim Waldsee/Emmendingen sind die erhöhten Arsen-Konzentrationen eindeutig auf die dortige Altlast zurückzuführen.

Fluor wurde nur im Umfeld des Leissees untersucht. Die Konzentrationen liegen dort im mittleren Größenbereich, wie er für oberflächennahe Grundwässer typisch ist (LfU 1994).

Tab. 8: Übersicht über die Konzentration von Spurenstoffen in den vom See unbeeinflussten Grundwässern
Angaben in µg/l

Baggersee		P	Pb	Al	Hg	Cr	As	F
Leissee		180 – 650	ng	ng	ng	ng	ng	90 – 113
Epplesee		nn	nn – 4,1	nn – 32	nn	nn – 0,8	nn – 2,9	ng
Waldsee/Hesselhurst		nn	nn	nn – 19	ng	nn – 2,8	3,1 – 6,7	ng
Binninger Baggersee		nn	nn – 2,5	6 – 26	nn	nn – 1,3	nn	ng
Apostelsee		nn	nn – 6,6	nn – 17	nn	nn – 6	nn	ng
Waldsee Emmen- dingen	oberstromig der Altlast	nn	nn – 3,2	nn – 10	nn	nn – 3,5	nn	ng
	unterstromig der Altlast	340 – 438	nn – 3,2	nn – 14	nn	nn – 14,4	12 – 19,6	ng
Bechinger See		nn	nn – 3,9	10 – 34	nn	nn – 10,8	nn	ng
Alter Vogelbaggersee		nn	nn – 5	nn – 26	nn – 0,4	nn	nn	ng

nn – nicht nachweisbar; ng – nicht gemessen

6.3 Baggerseen

6.3.1 Grundwasserzustromraten, Mittlere Aufenthaltszeiten

Die Grundwasserzustromraten zu den Baggerseen wurden einerseits anhand der vorliegenden hydrogeologischen Kennwerte (Tab. 4), andererseits aus den gemessenen Isotopengehalten überschlagsmäßig ermittelt (Kap. 3.3.4).

Die hydraulisch und isotopehydrologisch ermittelten Grundwasserzustromraten zeigen eine weitgehende Übereinstimmung (Tab. 9). Die größeren

Schwankungsbreiten bei den hydraulisch ermittelten Werten resultieren aus der Unsicherheit bezüglich der k_f -Werte. Die größten Zustromraten in der Größenordnung von 40 l/s ergeben sich für Leissee, Epplesee und Apostelsee, die kleinste Zustromrate mit 3 l/s für den Waldsee/Emmendingen. Aus den geringen Unterschieden zwischen den hydraulisch abgeschätzten Zustromraten und den isotopeisch bilanzierten Zustromraten kann gefolgert werden, dass die untersuchten Baggerseen noch gut an das Grundwasser angeschlossen sind.

Die Grundwasserzutritte in die Seen dürften in der Regel nicht gleichmäßig über den gesamten Zustrom-

Tab. 9: Bilanzgrößen für die untersuchten Baggerseen
Mittlere Aufenthaltszeiten berechnet aus den isotopeisch bilanzierten Zustromraten

Baggersee	Fläche [ha]	mittlere Tiefe [m]	Seevolumen [Mio m ³]	Grundwasserzustromrate nach DARCY [l/s]	Grundwasserzustromrate aus Isotopendaten [l/s]	Mittlere Aufenthaltszeit
Leissee	8,75	13,3	1,16	4–50	45	0,82
Epplesee	33,2	16,3	5,4	34	38	4,52
Waldsee/Hesselhurst	5,24	13,3	0,7	14,5	16,6	1,33
Binninger Baggersee	14,9	10	1,5	5,35 *	5,4	8,75
Apostelsee	6,4	19,8	1,3	24–48	40	1,0
Waldsee/Emmendingen	2,5	5	1,2	3,3	3,1	1,28
Bechinger See	10,4	10	1	6,5	6,5	5,1
Alter Vogelbaggersee	3,5	12,2	0,43	31	> 20	< 0,68

* Grundwasserneubildungsrate für den Tiefbrunnen „Im Sand“ ermittelt über eine Wasserbilanz

querschnitt erfolgen. Vielmehr ist angesichts der nachgewiesenen Anisotropien zu erwarten, dass einzelne Horizonte mit erhöhter Durchlässigkeit bevorzugt werden. Die Ausbreitung des Grundwassers im See hängt dann vom Niveau der Grundwasserzutritte und den Dichteverhältnissen im See ab. Hinweise gibt es sowohl für eine Unterschichtung wie für eine Einschichtung. So wurde eine Unterschichtung im Leissee mittels Markierungsversuchen nachgewiesen (Institut f. Hydrologie 1997). Die Ausbreitung des isotopisch leichten Grundwassers über der Seesohle zeigt sich auch deutlich in den $\delta^{18}\text{O}$ -Tiefenprofilen des Leisesees. Andererseits lässt sich nur durch Einschichtung in einem höheren Niveau erklären, dass z. B. die Seewassertemperatur im tieferen Bereich des Apostelsees und des Waldsees/Hesselhurst ganzjährig unter der Grundwassertemperatur liegt.

Direkt nachweisbar ist dieser Vorgang anhand der $\delta^{18}\text{O}$ -Tiefenprofile, in denen die Horizonte im See mit bevorzugter Grundwassereinschichtung durch niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte markiert sind (Abb. 29).

Die berechneten mittleren Aufenthaltszeiten des zuströmenden Grundwassers im jeweiligen Baggersee liegen zwischen 8,75 a für den Binninger Baggersee und $< 0,77$ a für den alten Vogelbaggersee (Tab. 9). Der Epplesee besitzt das größte Seevolumen, der Waldsee/Emmendingen hat ein sehr kleines Seevolumen bei einem vergleichsweise großen Grundwasserdurchsatz. Die mittleren Aufenthaltszeiten beschreiben die tatsächlichen Verhältnisse jedoch nur unzureichend, da bei der Berechnung vorausgesetzt wird, dass der gesamte Wasservorrat im See gleichmäßig am Umsatz teilnimmt.

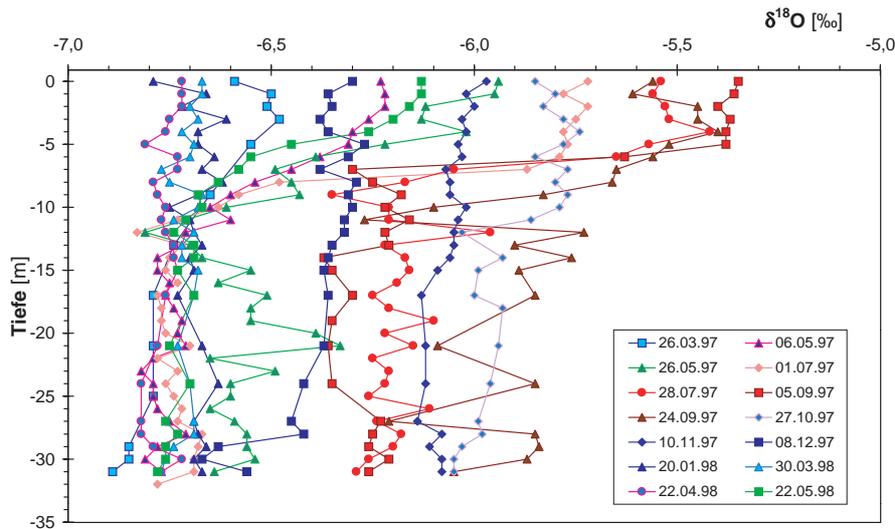


Abb. 29: $\delta^{18}\text{O}$ -Tiefenprofile im Waldsee/Hesselhurst

$\delta^{18}\text{O}$ -Minima im Teufenbereich um 10 m als Folge der Einschichtung von isotopisch leichtem Grundwasser

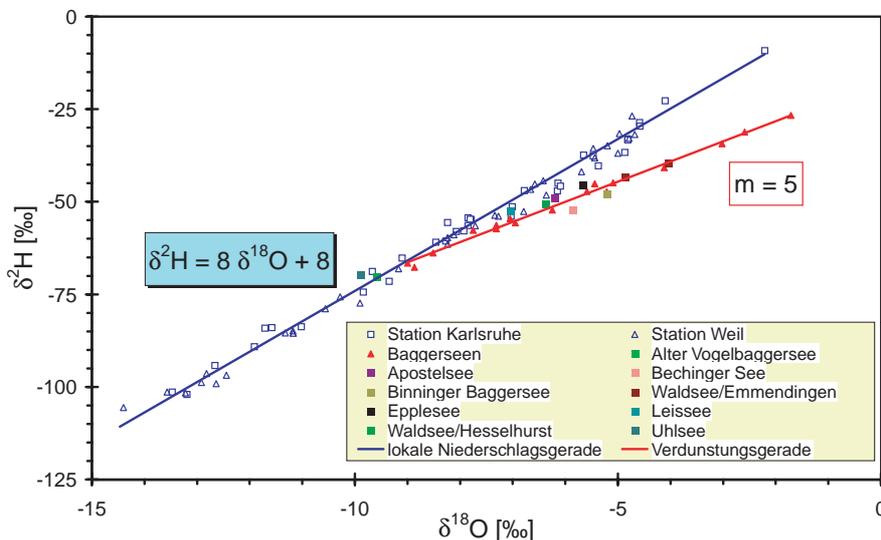


Abb. 30: Lage der Baggerseewässer im $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm

Aus den gemessenen Temperatur-Tiefenprofilen ist jedoch erkennbar, dass häufig in den tiefen Bereichen Zonen mit weitgehend stagnierenden Verhältnissen existieren, in denen ein Wasseraustausch aufgrund der Temperatur- und Dichteunterschiede zwischen kälterem Seewasser und wärmerem Grundwasser zeitweise nicht oder nur sehr langsam erfolgt. Entsprechend schneller muss der Umsatz oberflächennah erfolgen.

Das Ausmaß der Isotopenfraktionierung (Tab. 10, Abb. 30) ist mit Werten um 4 – 4,5 ‰ für Binnerer Baggersee, Waldsee/Emmendingen und Bechinger See am größten. Diese Seen besitzen vergleichsweise große Seeflächen und kleine Seevolumen. Beim Waldsee/Emmendingen kommt eine zusätzliche ¹⁸O-Anreicherung des Grundwassers durch den oberstromig gelegenen Badensee hinzu (Kap. 5.6). Beim Epplensee, dem Waldsee/Hesselhurst und dem Apostelsee beträgt das Ausmaß der Isotopenfraktionierung nur etwa 2–2,5 ‰, beim Leissee, einem Baggersee mit sehr gutem Grundwasseranschluss und hohem Grundwasserdurchsatz, sogar nur 0,73 ‰. Die fehlende oder nur sehr geringe Isotopenfraktionierung im Alten Vogelbaggersee steht im Zusammenhang mit dem hohen Anteil isotopisch leichten Rheinuferfiltrats im Seewasser.

6.3.2 Seewassertemperatur

Die mittleren Seewassertemperaturen (Tab. 6) schwanken zwischen 8,4 und 14,0 °C. Verglichen mit den oberstromigen Grundwassertemperaturen sind sie teils kleiner (Leissee, Epplensee, Apostelsee, Alter Vogelbaggersee), teils größer (Waldsee/Hesselhurst, Binnerer Baggersee, Waldsee/Emmendingen, Bechinger See).

Aussagekräftiger als absolute Temperaturunterschiede, die stark von den Messorten und -zeitpunkten abhängen, sind die jahreszeitlichen Temperaturänderungen in den Baggerseen. In allen Seen war eine vergleichbare Entwicklung zu beobachten.

Im Frühjahr bildet sich eine Temperaturschichtung mit einer erwärmten, oberflächennahen Schicht (Epilimnion), einer Übergangszone mit einem steilen Temperaturgradienten (Metalimnion) und einer tiefen Zone mit niedrigen Temperaturen (Hypolimnion) aus, die über die Sommermonate hinweg stabil bleibt. Diese Stagnationsphase beginnt in den Seen mit großem Grundwasserdurchsatz (Leissee, Epplensee, Apostelsee und Alter Vorgelbaggersee) etwa im März, in den Seen mit geringerem Grundwasserdurchsatz

Tab. 10: ^{δ18}O-Gehalte im oberstromigen Grundwasser und im Seewasser nach erfolgter Durchmischung im Herbst
Ausmaß der Isotopenfraktionierung im Seewasser im Vergleich zum Grundwasser; alle Angaben in ‰

See	^{δ18} O-Gehalte im oberstromigen Grundwasser	^{δ18} O-Gehalte im Baggersee	Ausmaß der Isotopenfraktionierung*
Leissee	-7,86	-7,13	0,73
Epplensee	-8,25	-5,64	2,61
Waldsee/ Hesselhurst	-8,22	-5,79	2,43
Binnerer Baggersee	-9,20	-5,04	4,16
Apostelsee	-7,67	-5,65	2,02
Waldsee/ Emmendingen	-8,27	-3,66	4,61
Bechinger See	-9,29	-5,48	3,81
Alter Vogelbaggersee	-10,00	-9,98	0,02

* Differenz zwischen den ^{δ18}O-Gehalten im oberstromigen Grundwasser und den ^{δ18}O-Gehalten im Seewasser, Absolutwert

(Waldsee/Hesselhurst, Binnerer Baggersee, Waldsee/Emmendingen, Bechinger See) meist erst im April/Mai. Im Herbst setzt dann allmählich eine Auflösung der Sprungschicht ein. Bei den flacheren Seen wird eine vollständige Durchmischung des Seewasserkörpers meist bereits im September erreicht, bei den tiefen Seen erst im November/Dezember. Wie Abb. 31 zeigt, erreicht die Vollzirkulation in den tiefen Seen nicht in allen Jahren den Seeboden.

Das Epilimnion reicht in den meisten Fällen bis etwa 5–7 m Tiefe, die maximalen Temperaturen steigen hier im Sommer bis rund 25 °C. Das darunter folgende Metalimnion endet im allgemeinen in etwa 10–15 m Tiefe. In diesem Bereich besteht im Sommer ein Temperaturgefälle von maximal 16–17 °C. Im darunter folgenden Hypolimnion liegen die Temperaturen weitgehend konstant etwa zwischen 5 und 8 °C (Abb. 32).

Lediglich im Epplensee sind größere Abweichungen von der generellen Entwicklung zu beobachten, zurückzuführen auf den laufenden Kiesabbau und die dadurch verursachte zusätzliche Wasserbewegung im See.

6.3.3 Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Gesamthärte, pH-Wert

Die im Seewasser nachgewiesenen Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat vari-

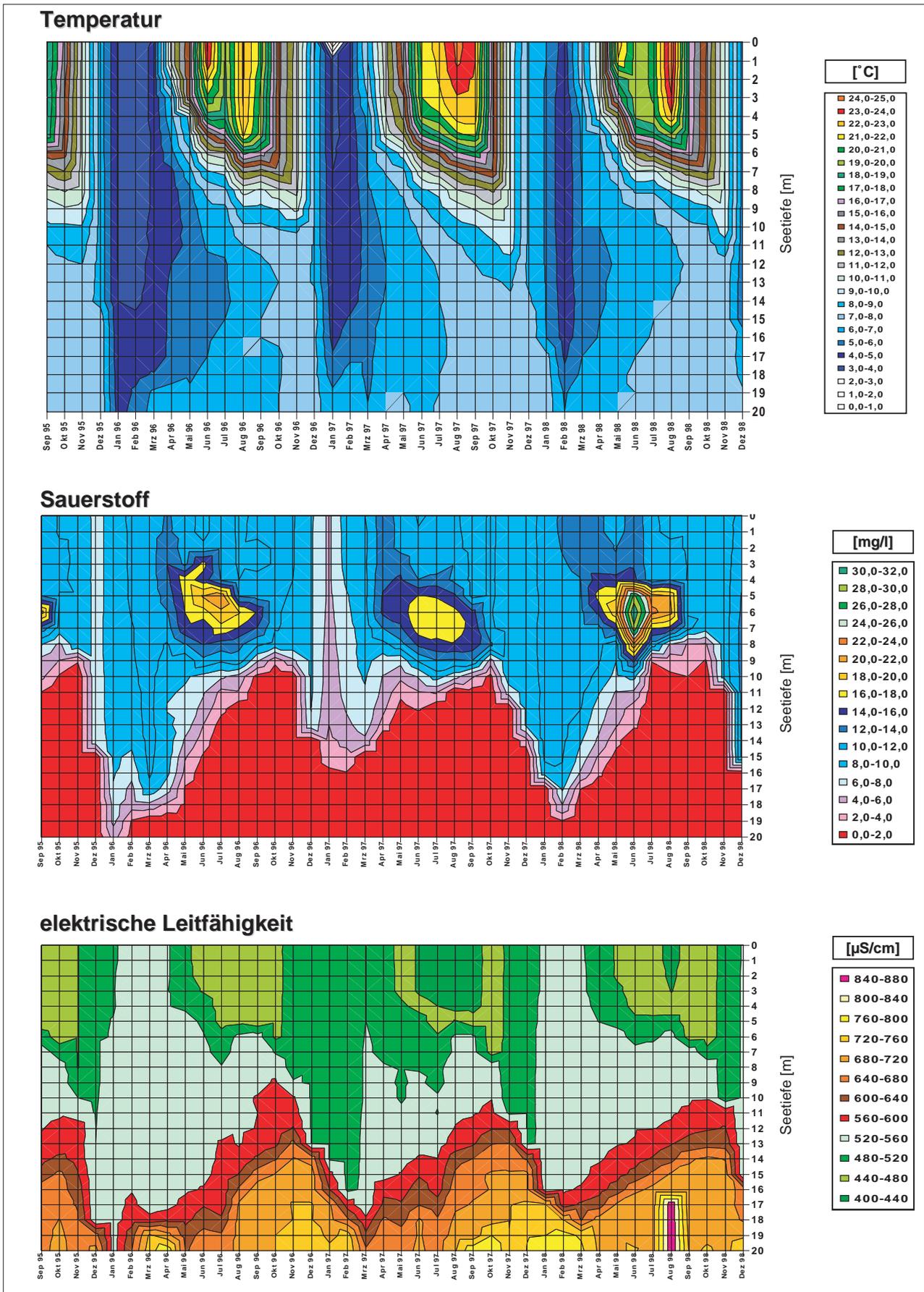


Abb. 31: Temperatur, Sauerstoff und elektrische Leitfähigkeit im Leissee im Zeitraum von 1995–1998 (Quelle: LFU)

ieren im Mittel zwischen 32 und 95 mg/l, 5,1 und 24,3 mg/l sowie 126 und 277 mg/l. Im Vergleich zum oberstromigen Grundwasser ist damit ein deutlicher Rückgang zu erkennen, in der Regel um etwa 50 %. Nur im Leissee und Alten Vogelbaggersee ist der Rückgang mit etwa 10 % deutlich geringer.

Die Gesamthärte als Summenparameter von Calcium und Magnesium zeigt eine analoge Entwicklung. Die pH-Werte variieren zwischen 7,3 und 8,1. Sie sind im Mittel um 0,15 größer, verglichen mit den pH-Werten im Grundwasser.

Ursache für diese Entwicklung ist die physikalische Belüftung des Sees. Aufgrund des großen Kontrastes zwischen dem CO₂-Partialdruck der Bodenluft, der maßgeblichen Gasphase für das Grundwasser, und dem CO₂-Partialdruck der Atmosphäre, mit dem der See in Kontakt steht, entweicht CO₂ aus dem Seewasser (Kap. 3.2.2). Da die CO₂-Löslichkeit mit steigender Temperatur abnimmt, wirkt sich der Ef-

fekt der CO₂-Entgasung besonders im Sommer aus. Daneben wird beim Aufbau von Biomasse im See CO₂ gebunden. Auch dieser Effekt tritt verstärkt in den Sommermonaten auf.

Der CO₂-Verlust führt zu einer Fällung von Calciumkarbonaten im See, verbunden mit einer Konzentrationsabnahme von Calcium und Hydrogenkarbonat. Parallel dazu nehmen die summarischen Parameter Gesamthärte und elektrische Leitfähigkeit ab. Die Enthärtung des zufließenden Grundwassers im See erfolgt bevorzugt im Epilimnion (Kap. 3.2.2, Abb. 31, 33).

Bei einigen Seen ist unmittelbar über dem Seeboden wieder eine umgekehrte Entwicklung mit einem Anstieg der Ca- und HCO₃-Konzentrationen und der elektrischen Leitfähigkeit sowie einer Abnahme des pH-Werts zu erkennen, hervorgerufen durch den Abbau organischer Substanz in den Seesedimenten und der damit verbundenen Freisetzung von CO₂ (Abb. 33),

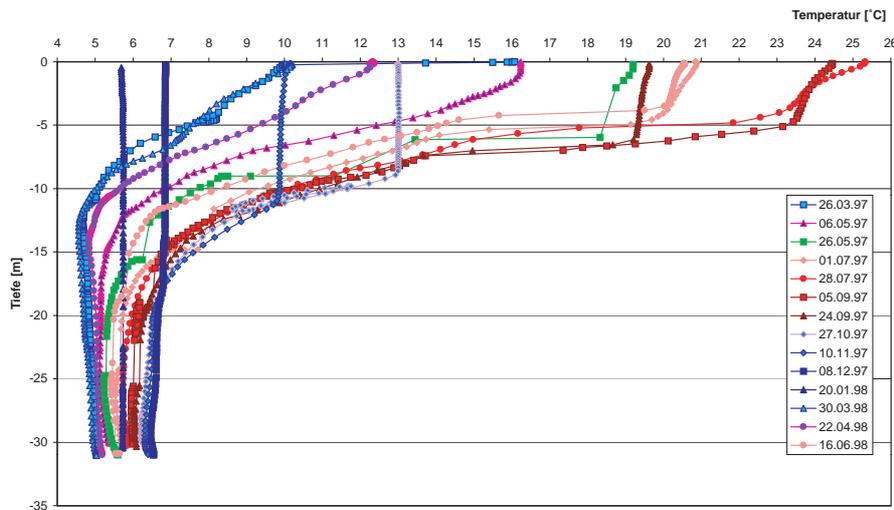


Abb. 32: Temperatur-Tiefenprofile im Waldsee/Hesselhurst

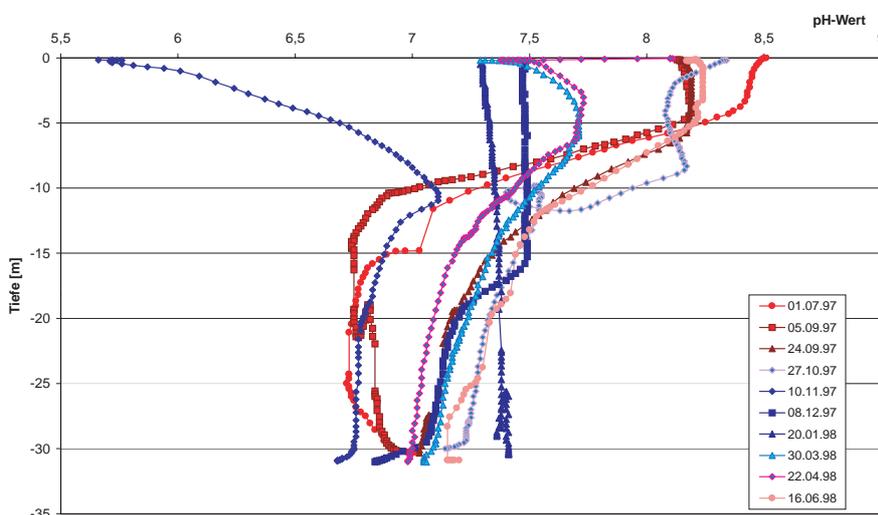


Abb. 33: Tiefenprofile der pH-Werte im Waldsee/Hesselhurst für den Zeitraum 01.07.1997–16.06.1998

gefolgt von einer Rücklösung von Calcium aus dem Seesediment.

6.3.4 Sauerstoff

Die mittleren Sauerstoff-Konzentrationen des Seewassers liegen zwischen 4,2 (Leissee) und 12,2 mg/l (Bechinger See). Werte über 10 mg/l treten in den Seen auf, die von einem aeroben Grundwasser angeströmt werden (Binninger Baggersee, Apostelsee und Bechinger See, Tab. 6).

Im Vergleich zum Grundwasser sind die Sauerstoff-Konzentrationen im Seewasser immer deutlich höher. Ursache ist die Belüftung des Sees, die sowohl physikalisch durch Sauerstoff-Aufnahme an der Seeoberfläche als auch biologisch durch Sauerstoff-Freisetzung in Zusammenhang mit dem Algenwachstum erfolgt.

Im jahreszeitlichen Verlauf zeigt sich eine ähnliche Entwicklung wie bei der Temperatur. Generell hohe Sauerstoff-Konzentrationen von mehr als 5 mg/l wurden im Epilimnion gemessen. Noch deutlich höhere Sauerstoff-Konzentrationen bis über 20 mg/l sind von Mai bis etwa Mitte August zwischen ca. 4 und 8 m Tiefe zu erkennen (Abb. 31). Sie liegen damit weit über der Sättigungskonzentration der Atmosphäre (z. T. > 200 % Sättigung). Ursache für diese Entwicklung ist die biologische Aktivität, die sich auf diesen Tiefenbereich konzentriert. Das Hypolimnion ist demgegenüber in der Regel zumindest während der Stagnationsphase sauerstoffarm. Streng anaerobe Verhältnisse herrschen häufig unmittelbar über dem Seeboden, da hier durch den Abbau von Biomasse eine intensive Sauerstoffzehrung stattfindet. Nur wenn während der Zirkulationsphase die Umwälzung des Seewassers die Sohle erreicht, werden auch die tiefsten Seezonen zeitweise belüftet.

6.3.5 Stickstoff, Schwefel

Nitrat findet sich in fast allen untersuchten Seen in sehr geringen Konzentrationen von wenigen mg/l. Lediglich im Apostelsee wurden hohe mittlere Konzentrationen von 23,4 mg/l gemessen, die nur unwesentlich kleiner sind als die Konzentrationen im oberstromigen Grundwasser. Hier herrschen auch im Hypolimnion durch den sauerstoffreichen Grundwasserzustrom fast ganzjährig aerobe Verhältnisse, und es kommt dadurch nur zur einem geringen Nitratabbau. Bemerkenswert ist, dass in den übr-

gen, an aerobe Grundwasserleiter angeschlossenen Seen (Binninger Baggersee, Bechinger See) das in größerem Umfang eingetragene Nitrat nahezu vollständig abgebaut wird. Oberstromig des Waldsees/ Emmendingen wird dies bereits durch die vorgelagerte Altlast bewirkt.

Ammonium tritt in allen Baggerseen auf, im Mittel bis max. 0,58 mg/l (Tab. 6), wobei die Konzentrationen zum Seegrund ansteigen (LGRB 2000). Im Vergleich zum anströmenden Grundwasser wirkt der See ausgleichend, d. h., besonders hohe Konzentrationen werden verringert, geringe angehoben. Eine Ammonium-Anreicherung im Binninger Baggersee und Bechinger See als Folge des intensiven Nitrat-abbaus ist nicht erkennbar.

Die mittleren Sulfat-Konzentrationen überdecken in den Seen einen Bereich von 20–106 mg/l. Mit Ausnahme des Waldsees/Emmendingen und des Apostelsees ist in den übrigen Seen im Vergleich zum oberstromigen Grundwasser eine geringfügige Abnahme der Sulfat-Konzentrationen von im Mittel 8 mg/l zu erkennen. Im Gegensatz zu Nitrat wird Sulfat bei den herrschenden Redox-Bedingungen offensichtlich nur zu einem geringen Anteil abgebaut bzw. in der Biomasse fixiert.

Beim Waldsee/Emmendingen sind die abweichenden Verhältnisse durch den Einfluss der oberstromigen Altlast, beim Apostelsee vermutlich durch einen sulfatreichen Randzustrom aus der Vorbergzone zu erklären (Kap. 5.5, 5.6).

6.3.6 Eisen, Mangan

Eisen und Mangan wurden in den Seewasserproben in der Regel nur in geringen Konzentrationen nachgewiesen. Nur im Leissee, in dem ein besonders reduzierendes Milieu herrscht und hohe Eisen- sowie Manganfrachten durch den Zustrom eingetragen werden, traten im Mittel 5,1 mg/l Fe und 1,6 mg/l Mn auf (Tab. 6). Im Vergleich zu den hohen Eisen-Konzentrationen im oberstromigen Grundwasser von über 10 mg/l bedeutet dies jedoch immer noch eine deutliche Abnahme. Die Ursachen für die hohe Mangan-Konzentration im Alten Vogelbaggersee sind nicht bekannt. Für alle Baggerseen, in die sauerstoffarmes und damit eisen- und manganreiches Grundwasser einströmt (Leissee, Eppelsee, Waldsee/Hesselhurst, Waldsee/Emmendingen); beträgt der Rückgang im Mittel für Eisen rund 80 % und für Mangan rund 60 %.

Die Belüftung der Baggerseen und die dadurch hervorgerufene Änderung der Redox-Verhältnisse füh-

ren zu einer Oxidation von gelöstem Fe(II) und Mn(II) und damit zu einer Umwandlung in geringlösliche Fe(III)- und Mn(IV)-Verbindungen, die im See sedimentiert werden. Diese Prozesse sind vor allem beim Zufluss von reduzierenden Grundwässern mit hohen Fe- und Mn-Konzentrationen wirksam.

6.3.7 Natrium, Kalium, Chlorid

Natrium, Kalium und Chlorid kommen in den Baggerseen in mittleren Konzentrationen zwischen 8,3 und 53,6 mg/l, 1,4 und 7,7 mg/l sowie 14,9 und 82,3 mg/l und damit in einer ähnlichen Größenordnung wie im oberstromigen Grundwasser vor (Tab. 6). Bei Natrium und Chlorid zeigt sich keine einheitliche Tendenz zu höheren oder geringeren Konzentrationen. Demgegenüber ist beim Kalium in den meisten Baggerseen ein geringfügiger Konzentrationsrückgang festzustellen, bei einigen Seen (Waldsee/Hesselhurst, Alter Vogelbaggersee) jedoch auch ein leichter Anstieg.

Die geringen Unterschiede in den Konzentrationen zwischen See- und Grundwasser sind möglicherweise auf räumliche und zeitliche Variationen in der Beschaffenheit des Grundwasserzustroms zurückzuführen, der Rückgang der K-Konzentration auf eine Inkorporation von K in die Biomasse.

Im Waldsee/Emmendingen sind die Na-, K- und Cl-Konzentrationen das Ergebnis einer Mischung zwischen Grundwasser, das durch die Altlast kontaminiert ist, und nicht kontaminiertem Grundwasser. Mittels Mischungsrechnung lässt sich hieraus der Anteil der kontaminierten Grundwasserkomponente im See auf etwa 20–25 % abschätzen.

6.3.8 Silizium

Die mittleren H_2SiO_3 -Konzentrationen in den Baggerseen zwischen „nicht nachweisbar“ und 18 mg/l lassen im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwasser einen starken Rückgang um etwa 60 % und mehr erkennen. Ursache ist die Aktivität der Kieselalgen, die dem Seewasser Silizium für den Aufbau ihrer kieseligen Skelette entziehen.

6.3.9 Spurenelemente

Die Konzentrationen der in den Seewässern untersuchten Spurenstoffe Phosphor, Blei, Aluminium, Quecksilber, Chrom und Arsen (Tab. 11) liegen in der gleichen Größenordnung wie im oberstromigen Grundwasser (Tab. 8). Ein genereller Trend zu größeren oder niedrigeren Konzentrationen ist nicht erkennbar. Berücksichtigt man bei der Interpretation der Messwerte die Ungenauigkeit der Analytik in diesen geringen Konzentrationsbereichen, so lassen sich keine signifikanten Veränderungen feststellen.

Phosphor ist nur in Seen nachweisbar, die von reduziertem Grundwasser angeströmt werden (Leissee, Epplesee, Waldsee/Hesselhurst, Alter Vogelbaggersee), selbst wenn in den oberstromigen Messstellen Phosphor nicht nachgewiesen werden konnte. Die Phosphor-Konzentration im See kann dabei sowohl größer (z. B. Epplesee) als auch kleiner (z. B. Leissee) sein als im zuströmenden Grundwasser. Die erhöhten, altlastbedingten Phosphor-Konzentrationen oberstromig des Waldsees/Emmendingen sind im See nicht mehr nachweisbar.

Tab. 11: Übersicht über die Konzentrationen von Spurenstoffen in den Baggerseen
Angaben in µg/l

Baggersee	P	Pb	Al	Hg	Cr	As
Leissee	11 – 352	ng	ng	ng	ng	ng
Epplesee	4 – 63	ng	ng	ng	ng	ng
Waldsee/Hesselhurst	nn – 218	nn – 7	nn – 33	nn – 11,5	nn – 4,5	1,9 – 27,2
Binninger Baggersee	nn	nn – 6,6	14 – 67	nn – 1,0	nn – 2,8	nn
Apostelsee	nn	nn – 5,1	nn – 26	nn – 7,6	nn – 6,3	nn
Waldsee/Emmendingen	nn	nn – 5,2	7 – 25	nn – 1,1	nn	nn
Bechinger See	nn	nn – 3,5	12 – 45	nn	nn – 3,9	nn
Alter Vogelbaggersee	20 – 410	nn – 5	nn – 26	nn – 0,4	nn	nn

nn – nicht nachweisbar; ng – nicht gemessen

Beim Arsen fallen einerseits der Konzentrationsanstieg im Waldsee/Hesselhurst und andererseits der Konzentrationsrückgang im Waldsee/Emmendingen auf, ohne dass anhand der vorliegenden Messdaten die Ursachen dafür zu klären wären.

6.4 Unterstromiges Grundwasser

6.4.1 Seewasseranteile, Grundwasserfließgeschwindigkeiten

Das unterhalb der Baggerseen im Grundwasserleiter abströmende Seewasser vermischt sich mit Grund- und Sickerwasser. Für die isotopehydrologisch untersuchten Grundwassermessstellen wurden die Seewasseranteile mittels Mischungsrechnung abge-

schätzt (Kap. 3.3.2). In Tab. 6 sind die für die einzelnen Messstellengruppen charakteristischen Anteile angegeben. Je nach Lage der Messstellen und Grundwassersituation wurden mit zunehmender Entfernung vom See z. T. gleichbleibend hohe Seewasseranteile (z. B. Epplesee, Bechinger See), z. T. systematisch abnehmende Seewasseranteile erfasst (z. B. Binnerer Baggersee, Abb. 34). Im jahreszeitlichen Verlauf können die Seewasseranteile in den einzelnen Messstellen großen Schwankungen unterliegen (Abb. 35).

Als weitere wichtige Einflussgröße wurde mit Hilfe der Isotopendaten die Fließzeit des Seewassers vom unterstromigen Seeufer bis zu den unterschiedlichen Beobachtungsstellen und daraus die Grundwasserfließgeschwindigkeit ermittelt (Kap. 3.3.3). Sie liegt sowohl für die Grundwasserleiter im Oberrheingraben

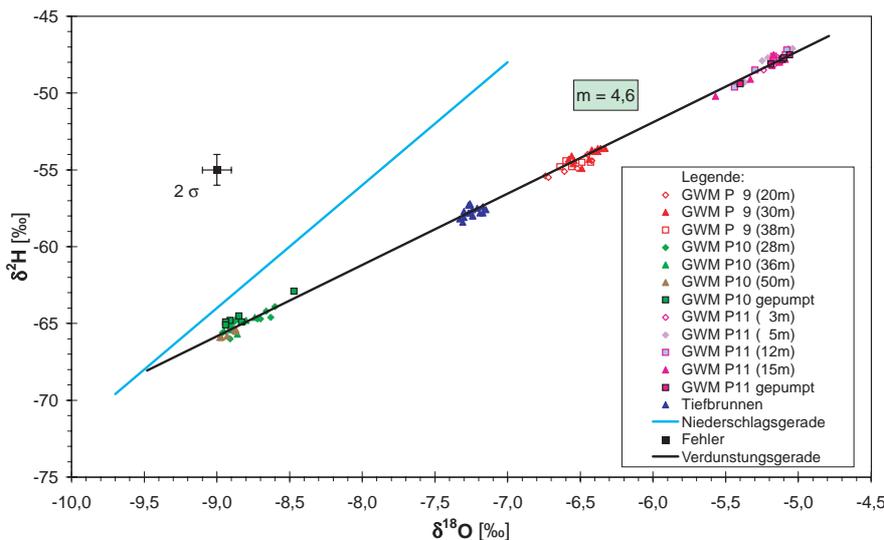


Abb. 34: Unterschiedliche $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte im Grundwasser unterstromig des Binnerer Baggersees als Folge von Mischungsprozessen

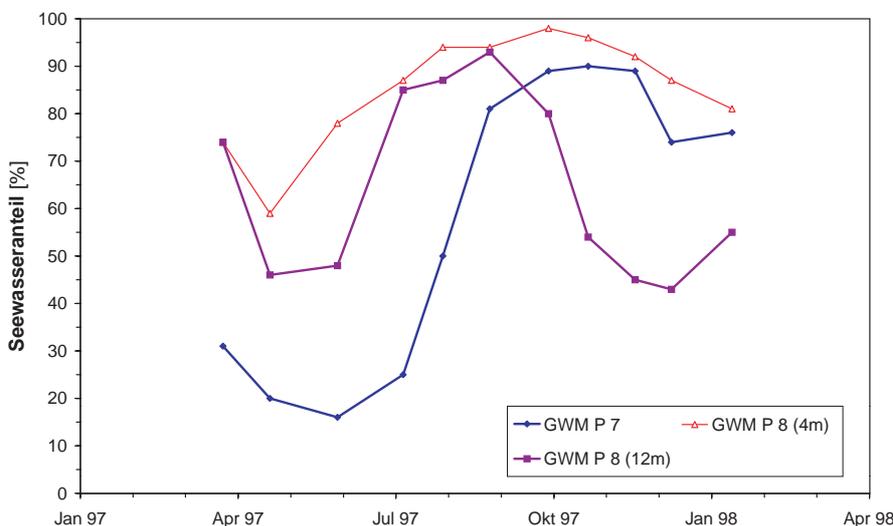


Abb. 35: Jahreszeitliche Variation der prozentualen Seewasseranteile in den Grundwassermessstellen GWM P 7 und GWM P 8 im Umfeld des Binnerer Baggersees

wie auch im Alpenvorland in einem relativ engen Bereich zwischen 0,5 und 2 m/d (Tab. 12). Die Übereinstimmung mit den Fließgeschwindigkeiten, ermittelt aus den hydraulischen Kennwerten, ist in den meisten Fällen sehr gut. Größere Abweichungen ergeben sich nur für den Alten Vogelbaggersee, was darauf zurückzuführen ist, dass hier die Isotopenbilanzierung durch den hohen Rheinuferfiltratanteil verfälscht wird.

Tab. 12: Grundwasserfließgeschwindigkeiten, ermittelt aus hydraulischen Daten (effektive Geschwindigkeit u) und aus Isotopendaten (Abstandsgeschwindigkeit v_a)

Angaben in m/d

Baggersee	effektive Geschwindigkeit u	Abstandsgeschwindigkeit v_a
Leissee	0,9	1,1
Epplesee	0,8	keine Bestimmung möglich
Waldsee/Hesselhurst	2	0,5 – 0,6
Binninger Baggersee	1,8	<1
Apostelsee	2	1
Waldsee/Emmendingen	1,5 – 2	1,6
Bechinger See	1,1	1,1
Alter Vogelbaggersee	2	(5 – 11)

() Bestimmung durch Rheinuferfiltrat verfälscht

6.4.2 Grundwassertemperatur

Die mittleren Grundwassertemperaturen überdecken im unterstromigen Grundwasser einen Wertebereich von 10,6 – 17,6 °C. Mittlere Temperaturen über 13 °C wurden allerdings nur unterhalb des

Binninger Baggersees und des Apostelsees gemessen. Im Mittel liegen die Grundwassertemperaturen unmittelbar unterstromig der Baggerseen um 0,6 °C höher als im zuströmenden Grundwasser.

Die Temperatur-Tiefenprofile der Grundwassermessstellen, die in geringer Entfernung zum See liegen, sind häufig charakterisiert durch größere jahreszeitliche Temperaturschwankungen, die nicht auf die oberflächennahen Bereiche beschränkt sind. Ein Beispiel dafür ist die Grundwassermessstelle GWM P 19 unterhalb des Bechinger Sees (Abb. 36). Die Temperatur-Tiefenprofile dieser Messstelle spiegeln die Temperaturschwankungen im Seewasser wider, etwa um zwei bis drei Monate zeitverzögert und in gedämpfter Form. Ähnliche Zusammenhänge zeigen auch die Temperatur-Tiefenprofile der GWM KB 5/97 unmittelbar unterstromig des Epplesees (Abb. 37).

Die Beeinflussung der Grundwassertemperaturen durch die Baggerseen nimmt jedoch mit zunehmender Entfernung von den Seen stetig ab. So macht sich der Einfluss des Epplesees in der etwa 100 m unterstromig gelegenen Messstelle GWM SB 2/97 nur noch in einer ca. 1,5 °C höheren Grundwassertemperatur bemerkbar. In den etwa 200 m unterstromig des Bechinger Sees gelegenen Messstellen GWM P 17 und GWM P 18 ist ein Seeinfluss hingegen nicht mehr erkennbar (Abb. 38).

6.4.3 Calcium, Magnesium, Hydrogenkarbonat, Gesamthärte, pH-Wert

Die mittleren Konzentrationen von Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonat variieren im unterstromigen

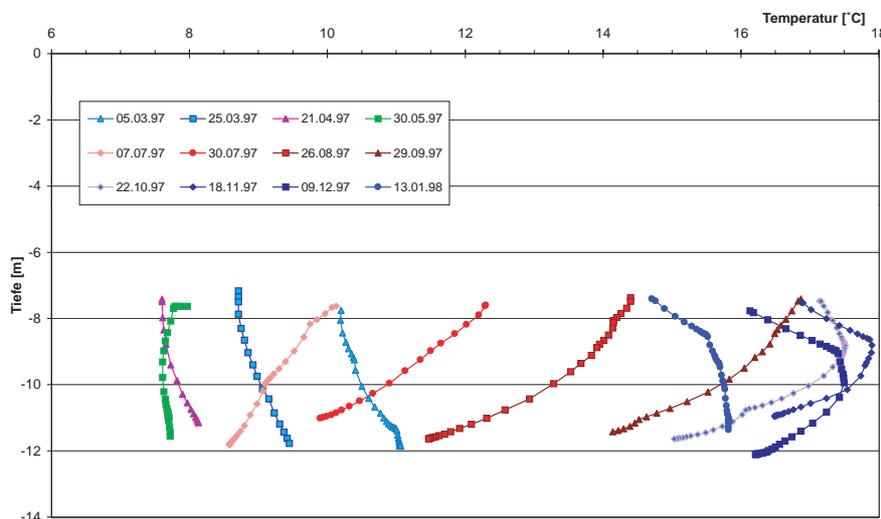


Abb. 36: Temperatur-Tiefenprofile in der Grundwassermessstelle GWM P 19 unterstromig des Bechinger Sees

Grundwasser zwischen 33 und 103 mg/l, 4,9 und 23,7 mg/l bzw. 129 und 274 mg/l, die Gesamthärte zwischen 7,3 und 18,6 °dH (Tab. 6). Die Werte dieser Parameter liegen damit höher als die Werte in den jeweiligen Baggerseen, jedoch meist niedriger als im oberstromigen Grundwasser.

Generell ist im Abstrom der Baggerseen wieder eine Aufhärtung, d. h. ein allmählicher Anstieg der Calcium- und Hydrogenkarbonat-Konzentrationen zu beobachten, selbst bei den Seen, bei denen der Seewasseranteil auch in den weiter entfernt gelegenen Messstellen noch nahezu 100 % beträgt (z. B. Eppelsee, Bechinger See). Die Magnesium-Konzentrationen zeigen hingegen keine entsprechenden systematischen Veränderungen. Die Aufhärtung erfolgt somit überwiegend durch Kalklösung. Allerdings werden auch in 200 m Entfernung vom See erst 50 bis

70 % der oberstromigen Ca- und HCO₃-Konzentrationen erreicht (Tab. 13). Der pH-Wert geht bei dieser Entwicklung geringfügig zurück.

Das exfiltrierende Seewasser kann bei der Passage durch das Seesediment CO₂ aufnehmen, das aus dem Abbau von Biomasse herrührt, und im Grundwasserleiter an der Grundwasseroberfläche CO₂ aus der Bodenluft lösen. Daraus resultiert ein geringfügiger Rückgang der pH-Werte und ein Karbonatlösungs-Potenzial, das zu einer Auflösung von Kalkstein und damit wieder zu einem allmählichen Anstieg der Calcium- und Hydrogenkarbonat-Konzentrationen führt. Die oberstromigen Verhältnisse stellen sich allerdings erst wieder ein, wenn sich das abströmende Seewasser in größerem Umfang mit vom See unbeeinflussten Grundwasser oder Sickerwasser vermischt (Leissee, Tab. 6).

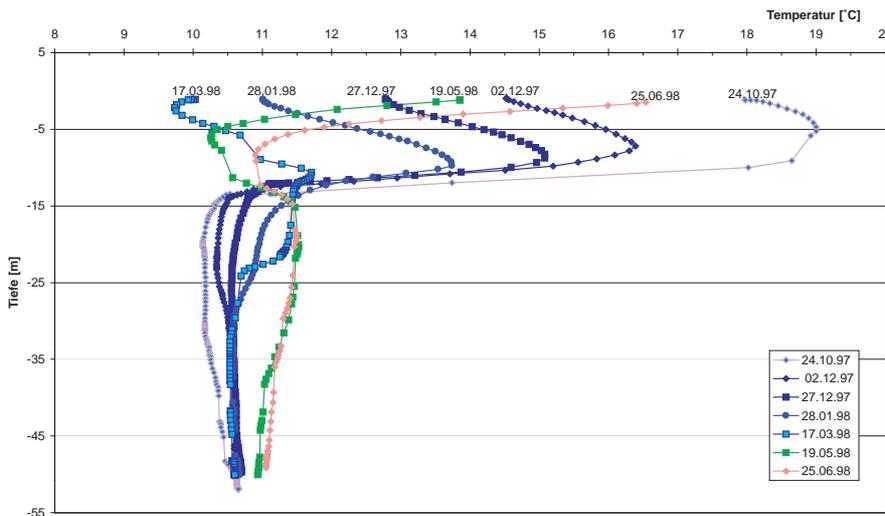


Abb. 37: Temperatur-Tiefenprofile in der Grundwassermessstelle GWM KB 5/97 unterstromig des Eppelsees

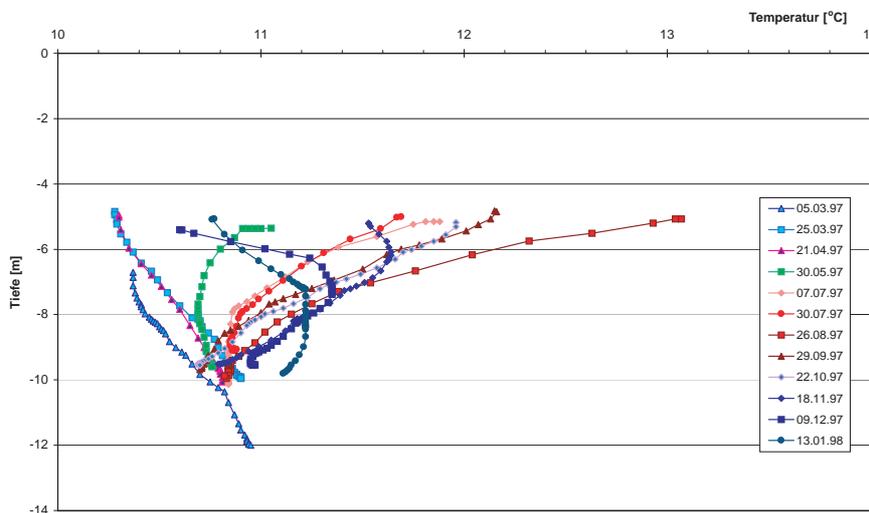


Abb. 38: Temperatur-Tiefenprofile in der Grundwassermessstelle GWM P 17 unterstromig des Bechinger Sees

Tab. 13: Veränderungen der mittleren Calcium-, Magnesium- und Hydrogenkarbonat-Konzentrationen sowie der Gesamthärte und elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers bei der Passage durch den Epplesee und den Bechinger See
Konzentrationen in %, bezogen auf 100 % im oberstromigen Grundwasser

Bezeichnung des Sees	Parameter	GWo	See	GWu20	GWu50	GWu100	GWu200
Epplesee	Ca	100	56	62		63	
	Mg	100	76	72		125	
	HCO ₃	100	47	50		50	
	GH	100	59	63		66	
	LF	100	62	65		65	
Bechinger See	Ca	100	31		50		65
	Mg	100	82		72		70
	HCO ₃	100	36		52		64
	GH	100	44		55		66
	LF	100	46		58		68

Situation: GWo – Grundwasser oberstromig; See – Baggersee; GWu50 – Grundwasser unterstromig in etwa 50 m Entfernung

Der Waldsee/Emmendingen und der Alte Vogelbaggersee zeigen von diesem generellen Schema abweichende Entwicklungen. Im Umfeld des Waldsees/Emmendingen sind die Calcium-, Magnesium- und Hydrogenkarbonat-Konzentrationen und die Gesamthärte aufgrund der Karbonatarmut des Gesteins primär gering. Unterstromig des Sees findet eine Aufhärtung denn auch nur in sehr geringem Umfang statt.

Am Alten Vogelbaggersee treten während der Passage des Grundwassers durch den See bei allen Parametern des Kalk-Kohlensäure-Systems nur sehr geringe Veränderungen auf. Das zuströmende Grundwasser besteht zu größeren Anteilen aus Rheinuferfiltrat und trägt noch weitgehend die hydrochemische Charakteristik des oberirdischen Gewässers (u. a. geringere Gesamthärte). Bezüglich des Kalk-Kohlensäure-Systems sind die Unterschiede zwischen den Verhältnissen im Grundwasser und im See deshalb nicht so groß wie bei den übrigen Seen. Veränderungen finden entsprechend im Alten Vogelbaggersee nur in geringerem Umfang statt.

6.4.4 Sauerstoff

Obwohl die mittleren Sauerstoff-Konzentrationen im Seewasser infolge der physikalischen und biologischen Belüftung immer deutlich größer sind als im zuströmenden Grundwasser (Tab. 6), treten im unterstromigen Grundwasser bereits unmittelbar nach Übertritt des Seewassers in den Grundwasserleiter

mittlere Werte zwischen 0,3 und 3,5 mg/l auf, die sogar geringfügig niedriger als im Zustrombereich sind, vor allem, wenn dort aerobe Grundwasserhältnisse herrschen. Mit zunehmender Entfernung vom See können die O₂-Konzentrationen sowohl stetig zunehmen (Epplesee, Binnerer Baggersee) als auch abnehmen (Bechinger See) oder sich unsystematisch verändern (Leissee), vgl. Tab. 6.

Die Sauerstoff-Tiefenprofile, die für eine größere Anzahl von Messstellen aufgenommen wurden, lassen sowohl große jahreszeitliche wie teufenabhängige Schwankungen erkennen. Größere Sauerstoff-Konzentrationen findet man zumindest zeitweise nahe der Grundwasseroberfläche, mit zunehmender Tiefe dann meist eine stetige Abnahme. Ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten hoher Sauerstoff-Konzentrationen im See und im unterstromigen Grundwasser lässt sich nur in wenigen Fällen herstellen.

Beim Übertritt des Seewassers in den Grundwasserleiter erfolgt in der Exfiltrationszone eine starke O₂-Zehrung, als Folge des Abbaus von Biomasse in diesem Bereich. Selbst im Epplesee, der noch aktuell ausgekiest wird und bei dem deshalb zumindest bereichsweise keine oder nur eine sehr geringe kohlenstoffreiche Kolmationsschicht ausgebildet sein dürfte, ist der Rückgang der O₂-Konzentrationen bei der Exfiltration im gleichen Umfang wie bei den übrigen Seen zu beobachten.

Die Entwicklung der O₂-Konzentrationen im weiteren Grundwasserabstrom hängt stark von der lokalen Ver-

breitung von organischem Material im Grundwasserleiter (O_2 -Zehrung) und dem Umfang der Grundwasserneubildung (O_2 -Eintrag) ab. Insgesamt sind die O_2 -Konzentrationen nach einer Fließstrecke von 100 bis 200 m wieder in der gleichen Größenordnung wie im oberstromigen Grundwasser.

6.4.5 Stickstoff, Schwefel

Im unterstromigen Grundwasser wurden im Mittel Nitrat-Konzentrationen zwischen 0,2 und 19,8 mg/l sowie Sulfat-Konzentrationen von 26–107 mg/l gemessen (Tab. 6). Die höchsten Nitrat- und Sulfat-Konzentrationen kommen unterstromig des Apostelsees vor. Die hydrogeologische Situation ist hier geprägt durch oxidierende Milieubedingungen im Grundwasserleiter und geogen erhöhte Sulfat-Konzentrationen.

Die Nitrat-Konzentrationen sind im unterstromigen Grundwasser in unmittelbarer Nähe zu den Baggerseen ähnlich groß wie in den Seen. Beim Vergleich mit den Verhältnissen im Grundwasserzustrom ist die starke Konzentrationsabnahme erkennbar, vor allem in den Grundwasserleitern mit oxidierenden Milieubedingungen, in denen oberstromig primär höhere Nitrat-Konzentrationen auftraten. Mit zunehmender Fließstrecke nehmen die Nitrat-Konzentrationen dann wieder allmählich zu, verursacht durch einen erneuten Nitratreintrag über die Grundwasserneubildung und eine Zumischung von unbeeinflusstem nitratreichem Grundwasser. In den Grundwasserleitern mit reduzierenden Verhältnissen werden die primär niedrigen Konzentrationen innerhalb des durch die Untersuchung erfassten Gebiets in der Regel wieder erreicht. Bei oxidierenden Bedingungen sind auch noch nach Fließstrecken von 200–500 m wesentlich niedrigere NO_3^- -Konzentrationen als im oberstromigen Grundwasser nachweisbar. Sie betragen beim Bechinger See etwa 10 %, beim Binninger Baggersee 35 % und beim Waldsee/Emmendingen 70 % der oberstromigen Konzentrationen.

Die mittleren Ammonium-Konzentrationen im unterstromigen Grundwasser liegen zwischen „nicht nachweisbar“ und 0,54 mg/l (Waldsee/Hesselhurst: hier als Folge der reduzierenden Milieubedingungen im Grundwasserleiter) und damit in der gleichen Größenordnung wie im oberstromigen Grundwasser (Tab. 6). Im Vergleich zum Seewasser ist häufig eine geringfügige Abnahme erkennbar. Eine starke Anreicherung von Ammonium unterstromig der Seen, in denen ein massiver Nitratabbau stattfindet (Bechinger See, Binninger Baggersee), ist nicht festzustellen und auch nicht zu erwarten, da es sich hierbei

immer um Grundwasserleiter mit oxidierendem Milieu handelt. Deren Ammonium-Konzentrationen werden offensichtlich weniger durch die Ammonium-Konzentrationen im See als vielmehr durch die Redox-Verhältnisse im Grundwasserleiter bestimmt.

Der geringfügige Rückgang der Sulfat-Konzentrationen in den Baggerseen ist nach der Exfiltration bereits nach kurzer Fließstrecke wieder kompensiert, d. h., im unterstromigen Grundwasser stellen sich alsbald ziemlich genau die Konzentrationen wie im oberstromigen Grundwasser ein.

6.4.6 Eisen, Mangan

Die mittleren Eisen- und Mangan-Konzentrationen sind in den meisten Fällen im unterstromigen Grundwasser größer als im Seewasser, jedoch geringer als oder gleich groß wie im oberstromigen Grundwasser. Ein besonders starker Rückgang ist in Grundwasserleitern mit reduzierendem Milieu mit primär hohen Fe- und Mn-Konzentrationen festzustellen. Er beträgt im Mittel beim Leissee und Waldsee/Hesselhurst etwa 70 %. In einer vergleichbaren Größenordnung liegt auch der Rückgang der hohen, durch die oberstromige Altlast hervorgerufenen Fe- und Mn-Konzentrationen im Waldsee/Emmendingen.

In den Grundwasserleitern mit oxidierendem Milieu und primär bereits sehr geringen Fe- und Mn-Konzentrationen finden sich meist auch unterstromig der Baggerseen nur geringe Konzentrationen. Lediglich beim Alten Vogelbaggersee steigen die Konzentrationen von 0,02 auf 0,15 mg/l (Fe) bzw. von 0,02 mg/l auf 0,33 mg/l (Mn) an. Im weiteren Grundwasserabstrom nehmen die Konzentrationen dann jedoch bald wieder ab (Tab. 6).

Insgesamt hängen die Fe- und Mn-Konzentrationen in weiterer Entfernung vom See eng mit den Redox-Verhältnissen im Grundwasserleiter zusammen und variieren ähnlich unsystematisch.

6.4.7 Natrium, Kalium, Chlorid

Die mittleren Konzentrationen von Natrium, Kalium und Chlorid schwanken in den unterstromigen Grundwässern in folgenden Bereichen: Na von 6,0 (Bechinger See) bis 48,3 mg/l (Alter Vogelbaggersee), K von 1,7 (Bechinger See, Eppelsee) bis 6,5 mg/l (Apostelsee) und Cl von 16,9 (Waldsee/Emmendingen) bis 77,2 mg/l (Alter Vogelbaggersee). Sie lie-

gen damit in der gleichen Größenordnung wie im oberstromigen Grundwasser und in den Baggerseen. Systematische Veränderungen sind nicht erkennbar.

stromigen Verhältnisse werden allerdings in 200 bis 500 m Entfernung von den Seen noch nicht erreicht. Die H_2SiO_3 -Konzentrationen betragen hier erst etwa 70 % der oberstromigen Werte.

6.4.8 Silizium

Der Wertebereich der H_2SiO_3 -Konzentrationen beträgt für das unterstromige Grundwasser 4–19 mg/l, wobei mit zunehmender Fließstrecke eine Zunahme der Konzentrationen erkennbar ist. Im Vergleich zu den Konzentrationen in den Baggerseen bedeutet dies einen deutlichen Anstieg. Diese Entwicklung geht zurück auf Reaktionen zwischen dem Grundwasser und den Gesteinen im Grundwasserleiter. Die ober-

6.4.9 Spurenelemente

Die Konzentrationsintervalle der untersuchten Spurenstoffe im unterstromigen Grundwasser (Tab. 14) sind vergleichbar denen im oberstromigen Grundwasser (Tab. 8). Die Konzentrationen liegen häufig unterhalb der Nachweisgrenze oder geringfügig darüber. Eine systematische Zunahme eines der Spurenelemente als Folge der Seepassage des Grundwassers ist nicht erkennbar.

Tab. 14: Übersicht über die Konzentrationen von Spurenstoffen im Grundwasser unterstromig der Baggerseen

Baggersee	P	Pb	Al	Hg	Cr	As	F
Leissee	nn – 650	nn – 5,5	nn – 65	nn	nn – 4,4	nn – 5,5	68 – 113
Epplesee	nn	nn – 3,8	3 – 50	nn	nn – 14,8	nn – 16,4	ng
Waldsee/Hesselhurst	nn – 375	nn	nn – 66	nn	nn – 50	nn – 23,6	ng
Binninger Baggersee	nn	nn – 3,6	nn – 28	nn	nn – 5,1	nn	ng
Apostelsee	nn	nn	nn – 18	nn	nn – 1,3	nn	ng
Waldsee/Emmendingen	nn	nn – 4,9	nn – 18	nn	nn – 2,3	nn	ng
Bechinger See	nn – 123	nn – 4	4 – 253	nn	nn – 3,4	nn	ng
Alter Vogelbaggersee	nn	nn	nn – 19	nn	nn – 6,4	nn – 3,1	ng

Angaben in $\mu\text{g/l}$; nn – nicht nachweisbar; ng – nicht gemessen