

# 7 Auswirkungen der Baggerseen auf die Grundwasserbeschaffenheit

## 7.1 Übersicht

Im Folgenden werden die einzelnen Prozesse beschrieben, die zu einer Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit bei der Passage des Grundwassers durch einen Baggersee beitragen können, und ihre Bedeutung anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse bewertet. Dazu gehören der Eintrag von Substanzen in den Baggersee, der Austausch mit der Atmosphäre, die Verlagerung von Substanzen in getrennte Grundwasserstockwerke durch Umwälzung, die Fixierung, der Abbau und die Neubildung von Substanzen im See, die Remobilisierung fixierter Substanzen sowie die Freisetzung von Substanzen im Grundwasserleiter unterstromig der Seen durch Milieüänderungen (BOOS & STROHM 1999). Eine Übersicht enthält Abb. 39. Bei der Bewertung ist auch die Reichweite zu berücksichtigen, bis zu der Veränderungen im Abstrom nachweisbar sind.

Erdoberfläche schützen, fehlen. Einträge können diffus über den Niederschlag und die trockene Deposition, über oberirdische Fließgewässer, die in den See einmünden, und Randzuflüsse sowie durch die Nutzung des Sees erfolgen.

Durch Staub und Niederschlag werden Substanzen in einen See eingetragen, die bei einem Eintrag über die ungesättigte Zone durch das Retentionsvermögen der Böden nicht in das Grundwasser gelangen würden. Allerdings unterliegen diese Stoffe auch im See vielfältigen Um- und Abbaumechanismen, die zu einer zumindest teilweisen Eliminierung aus dem Seewasser führen. Bei den untersuchten Baggerseen waren Auswirkungen von Staub- und Niederschlagsdepositionen auf die Grundwasserbeschaffenheit nicht festzustellen. Ein positiver Effekt im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Flächen ist der fehlende Nitrat- und Phosphateintrag.

## 7.2 Eintrag in den Baggersee

In einem Baggersee ist das Grundwasser freigelegt, und die Deckschichten, die ansonsten das Grundwasser vor einem direkten Eintrag von der

Nur einer der untersuchten Baggerseen (Alter Vogelbaggersee) wird von einem Bach durchflossen. Auswirkungen auf die Seewasserbeschaffenheit waren nicht erkennbar. Dafür dürfte der große Unterschied zwischen Seewasservolumen und Zuflussrate, aber auch der geringe Unterschied zwischen der Beschaffenheit von See- und Bachwasser verantwortlich sein.

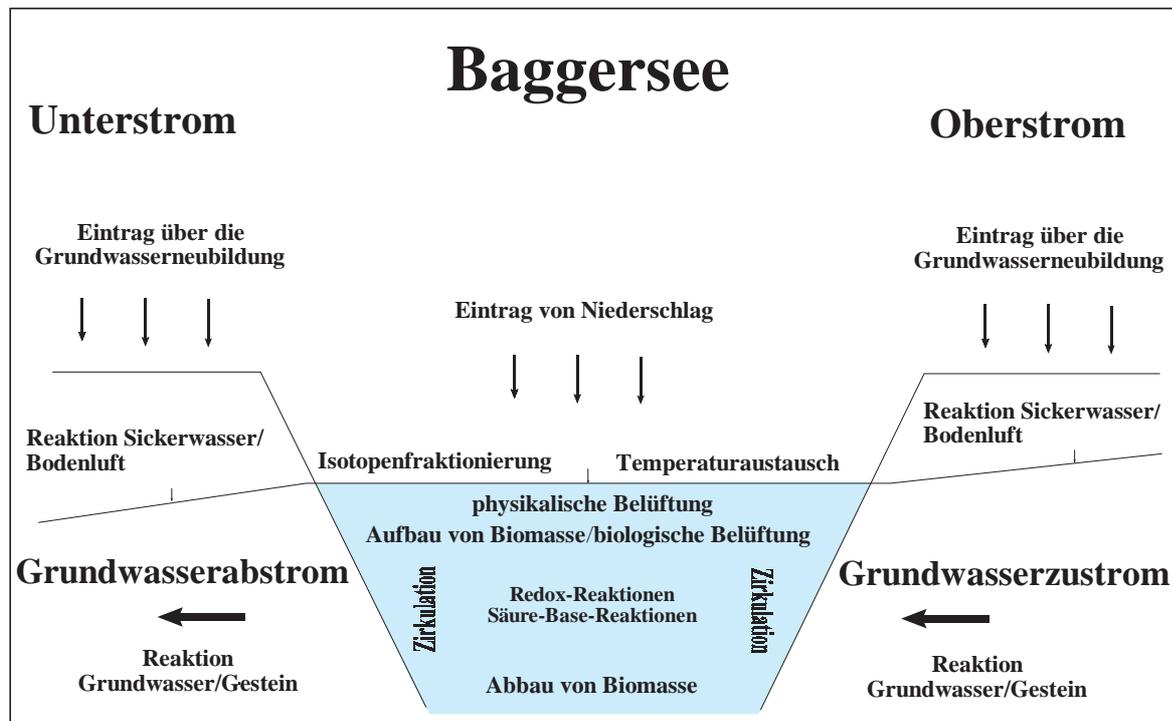


Abb. 39: Übersicht über Prozesse, die die Grund- und Seewasserbeschaffenheit beeinflussen

Entsprechende Aussagen gelten für die Randzuflüsse in den Binninger Baggersee (Kap. 5.4).

Die untersuchten Baggerseen werden hauptsächlich für Angelsport und Freizeit genutzt, einige auch für den Naturschutz, im Eppelsee wird außerdem noch Kies abgebaut. Negative Auswirkungen auf die Seewasserbeschaffenheit, die von diesen Aktivitäten ausgehen, waren bei den untersuchten Parametern nicht festzustellen.

### 7.3 Austausch mit der Atmosphäre

In den Baggerseen erfolgt über die Seeoberfläche ein Temperaturexaustausch mit der Atmosphäre. Dies führt dazu, dass das Seewasser im Verhältnis zum Grundwasser wesentlich größere Temperaturvariationen aufweist: Im Sommer erfährt es eine starke Erwärmung und im Winter eine Abkühlung. Temperatureffekte, hervorgerufen durch die Baggerseen, klingen im unterstromigen Grundwasser schnell ab und lassen sich ab einer Entfernung von etwa 200 m nicht mehr nachweisen.

Weiterhin können an der Seeoberfläche im Kontakt mit der Atmosphäre entsprechend den herrschenden Partialdrücken Gase gelöst oder freigesetzt werden. Nachweisbar ist in allen Seen eine Sauerstoffaufnahme, die so genannte physikalische Belüftung des Seewassers. Sie ist im Sommer auf das Epilimnion beschränkt, wirkt sich in der Zirkulationsphase jedoch auch auf die tiefen Seebereiche aus. Bei einem Zustrom von reduzierendem Grundwasser wird dadurch das Redox-Milieu zu oxidierenden Verhältnissen verändert. Im Gegensatz zu  $O_2$  wird  $CO_2$  an der Seeoberfläche freigesetzt. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, das im Grundwasserleiter in aller Regel besteht, wird dadurch verschoben. Die Auswirkungen dieser Prozesse sind in den Kap. 7.5–7.7 beschrieben.

### 7.4 Verlagerung durch Umwälzung

Im Herbst/Winter erfolgt eine Umwälzung des Seewassers bei nicht zu tiefen Baggerseen bis zum Seeboden (u. a. PFEIFFER 2000). Durch diese Umwälzung können unterstromig der Seen anthropogen beeinflusste oberflächennahe Wässer in tiefere Aquiferbereiche und geogen geprägte tiefe Wässer in oberflächennahe Bereiche gelangen.

Durch keinen der untersuchten Baggerseen werden unterschiedliche eigenständige Grundwasserstockwerke miteinander verbunden. Eine stockwerksübergreifende Verlagerung von Schadstoffen anthropogener oder geogener Herkunft als Folge der Durchmischung in den Seen lässt sich deshalb nicht untersuchen. Dass tiefenabhängige Unterschiede in der Grundwasserbeschaffenheit existieren, zeigen die Messungen im Umfeld des Eppelsees (Tab. 15). Das tiefe Grundwasser in den altquartären Sedimenten (GWM KA 2, GWM KA 3) ist charakterisiert durch niedrigere Werte der Parameter, die anthropogene Einflüsse anzeigen (elektrische Leitfähigkeit, Na, Cl,  $SO_4$  und  $NO_3$ ), und höhere Konzentrationen geogen bestimmter Parameter (Fe, As). Auch ist unterstromig des Eppelsees (GWM KB 5/97, GWM SB 2/97) eine sehr einheitliche Grundwasserbeschaffenheit in allen jungquartären Sedimenten festzustellen, möglicherweise zurückzuführen auf den Abstrom durchmischten Seewassers.

Bei einem ausgeprägten Stockwerksbau mit entsprechenden hydrochemischen Kontrasten zwischen oberflächennahem und tiefem Grundwasser sind Stoffverlagerungen durch stockwerksübergreifende Baggerseen jedoch zu beachten.

### 7.5 Fixierung von Substanzen

Tritt das Grundwasser in den Baggersee über, ändern sich die hydrochemischen Milieubedingungen, z. B. die Redox-Verhältnisse und die Parameter des Kalk-Kohlensäure-Systems. Als Folge davon werden Wasserinhaltsstoffe durch Ausfällung chemisch fixiert und können im See sedimentiert werden. Sie werden dadurch zumindest zeitweise aus dem Seewasser entfernt.

Bei Grundwasserleitern mit reduzierenden Milieubedingungen führen die aeroben Verhältnisse im See, die sich bei der physikalischen und biologischen Belüftung einstellen, zur Fällung von Eisen und Mangan. Die leichtlöslichen Fe(II)- und Mn(II)-Verbindungen werden in schwerlösliche Fe(III)- und Mn(IV)-Hydroxide und -Oxidhydrate überführt. Die Abnahme der Fe- und Mn-Konzentrationen war bei Grundwässern mit reduzierenden Bedingungen und entsprechend hohen primären Fe- und Mn-Konzentrationen festzustellen, die Auswirkungen unterstromig der Seen meist auch noch bis in größere Entfernung nachweisbar (z. B. Leissee, Tab. 6).

Der Verlust von  $CO_2$  an der Seeoberfläche und die biologische Aktivität rufen eine Karbonatübersättigung

Tab. 15: Mittlere Beschaffenheit des Grundwassers ober- und unterstromig des Eppelsees in unterschiedlichen Tiefen

Angaben, soweit nicht anders vermerkt, in mg/l

Filterstrecken der Messstellen: GWM KA 1: 18–21 m (Jungquartär); GWM KA 2: 60–63 m (Altquartär); GWM KA 3: 70–73 m (Altquartär); GWM KB 5/97: 13,6–33,6 und 43,6–53,6 m (Jungquartär); GWM SB 2/97: 11,7–16,7, 24,7–41,7 und 47,7–53,7 m (Jungquartär);

Messzeitpunkte: GWM KA 1, GWM KA 2 und GWM KA 3: 21.04.1997, 23.06.1997, 01.09.1997 und 13.01.1998, GWM KB 5/97 und GWM SB 2/97: 14.10.1997, 12.01.1998 und 02.06.1998, vgl. Tab. 6 u. 13

Situation	GWM	Probenahmetiefe [m]	LF [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	O <sub>2</sub>	Na	Fe	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	As
GWO	KA 1	18 – 21	687	1	20,6	0,3	21,3	57,3	4,5	2,0
	KA 2	60 – 63	374	0,1	11,5	2,3	6,0	11,5	0,2	11,7
	KA 3	70 – 73	364	0,1	4,8	3	6,4	11,9	0,8	13,3
GWu20	KB 5/97	12	445	0,7	10,8	0	18,7	60,4	1	nn
		21	451	0,3	9,9	0,4	18,9	63,5	0,8	0,9
		30	449	0,1	9,2	1,2	20,7	63,4	0,9	4,5
		50	449	0,2	9,3	1,1	18,8	65,1	0,7	4,3
GWu100	SB 2/97	15	440	1,9	9,2	0,8	18,4	62,4	7,7	4,4
		30	448	0,3	8,7	1,1	18,0	64,6	0,8	5,5
		38	449	0,2	8	1,2	18,2	64,9	0,6	6,3
		49	446	0,2	7,2	1,3	16,2	65,3	0,8	10,9

GWM – Grundwassermessstelle; LF – elektrische Leitfähigkeit (25 °C): nn – nicht nachweisbar

Situation: GWO – Grundwasser oberstromig; GWu20 – Grundwasser unterstromig in etwa 20 m Entfernung

im Seewasser hervor, die eine Karbonatfällung auslöst. Sie wirkt sich in einer Abnahme der Konzentrationen von Calcium und Hydrogenkarbonat, untergeordnet auch Magnesium, sowie der Summenparameter Gesamthärte und elektrische Leitfähigkeit aus. Durch CO<sub>2</sub>-Freisetzung in der Exfiltrationszone (Zersetzung von organischem Material) und im unterstromigen Grundwasserleiter sowie durch Lösung von Karbo-

naten aus dem Gestein wird diese Enthärtung im Abstrom teilweise wieder kompensiert, ohne dass die oberstromigen Verhältnisse innerhalb der hier untersuchten Fließstrecken (bis etwa 500 m) und Fließzeiten (bis etwa 2 Jahre) wieder erreicht wurden (Abb. 40).

Zahlreiche Schwermetalle und Spurenstoffe besitzen eine hohe Affinität zu den Fe- und Mn-Hydroxiden

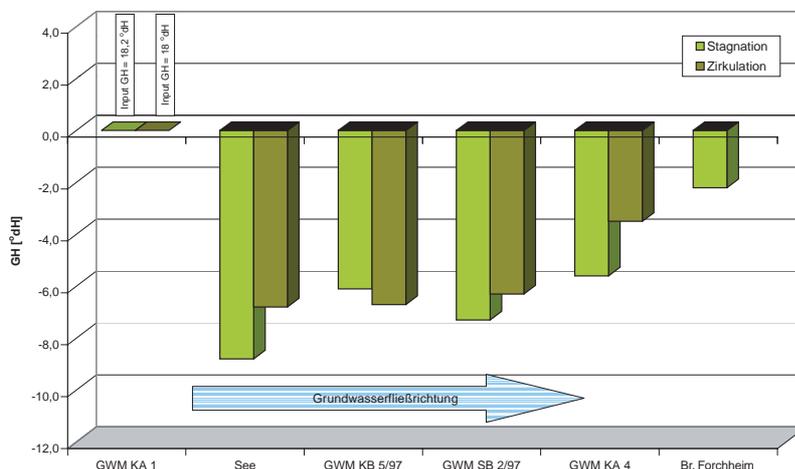


Abb. 40: Änderungen der Gesamthärte bei der Passage des Grundwassers durch den Eppelsee

und -Oxidhydraten sowie ebenso zu organischem Material. Sie können deshalb verstärkt über Mitfällung und Adsorption gebunden und dem Seewasser entzogen werden. Herrscht im Seesediment ein sulfidisches Milieu, können sich auch schwerlösliche Schwermetallsulfide bilden (Boos & Strohm 1999). Systematische Veränderungen der Schwermetall- und Spurenelementkonzentrationen, die sich in diese Richtung interpretieren lassen, waren bei den durchgeführten Untersuchungen nicht eindeutig nachweisbar. So sind zwar unterstromig des Waldsees/Emmendingen die erhöhten, altlastbedingten Arsen-Konzentrationen nicht mehr vorhanden. Andererseits ändern sich die Arsen-Konzentrationen bei der Passage des Grundwassers durch den Waldsee/Hesselhurst praktisch nicht.

Eine weitere Fixierung von Wasserinhaltsstoffen erfolgt durch die biologische Aktivität im See. Neben CO<sub>2</sub> werden die biologisch relevanten Elemente, in erster Linie Stickstoff und Phosphor, in die Biomasse inkorporiert und erfahren dadurch eine Konzentrationsabnahme im Seewasser. Bei den Diatomeen gehört auch Kieselsäure zu den aus dem Wasser aufgenommenen Substanzen. Nach dem Absterben der Diatomeen erfolgt eine Sedimentation des organischen Materials. Die Auswirkungen der biologischen Prozesse zeigten sich in der vorliegenden Studie in erster Linie in einer Abnahme der Konzentrationen der Kieselsäure (Abb. 41), eventuell auch von Kalium. Eine systematische Konzentrationsabnahme war beim Phosphor nicht festzustellen. Beim Nitrat lassen sich hier die Effekte der Elimination durch die Bioaktivität von den Auswirkungen der Nitrat-Reduktion nicht trennen.

Einen besonders wirksamen Sorptionskörper für unpolare organische Verbindungen bildet aufgrund

seines hohen Gehalts an organischem Detritus das Seesediment (BLOOS & STROHM 1999). Entsprechende Auswirkungen können hier wegen der auf anorganische Inhaltsstoffe beschränkten Analytik nicht beurteilt werden. Die Ergebnisse der PCB-Untersuchungen im Zusammenhang mit der Erkundung der Altlast beim Waldsee/Emmendingen lassen sich jedoch in diese Richtung interpretieren (Kap. 5.6).

### 7.6 Stoffabbau

Zu den Substanzen, die irreversibel in für die Trinkwassernutzung unbedenkliche oder in flüchtige Substanzen umgewandelt werden können, gehören z. B. Nitrat und Sulfat, aber auch organische Verbindungen. Nitrat wird durch Denitrifikation abgebaut, Sulfat durch Sulfat-Reduktion (Kap. 3.2.3). Diese Prozesse sind an die reduzierenden Milieubedingungen im Hypolimnion und besonders im Seesediment gebunden und waren in allen Baggerseen in unterschiedlicher Intensität nachweisbar. Durch erneuten Eintrag von Nitrat und Sulfat über die Grundwasserneubildung stellten sich unterstromig der Seen allmählich wieder die oberstromigen Verhältnisse ein. Besonders die starke Nitrat-Reduktion bei Grundwässern mit oxidierendem Milieu wirkte sich dabei auch bei Fließstrecken > 200 m noch positiv auf die Grundwasserqualität aus (Abb. 42).

Das Verhalten organischer Schadstoffe in den Baggerseen war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Aus der Literatur ist jedoch bekannt, dass der Abbau organischer Schadstoffe stark von den Redox-Bedingungen abhängig ist, wobei eine Elimination z. T. eher unter aeroben Bedingungen, z. T. unter anaeroben Bedingungen erfolgt. Somit sind die stark wechseln-

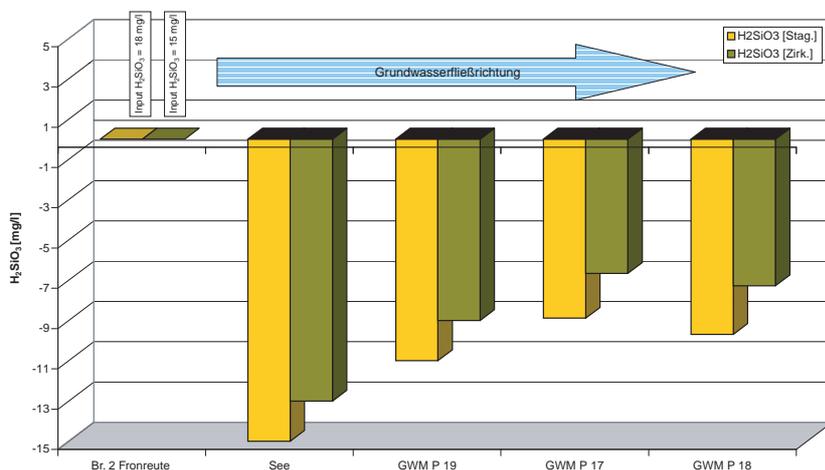


Abb. 41: Änderungen der Kieselsäure-Konzentration bei der Passage des Grundwassers durch den Bechinger See

den Redox-Bedingungen in den Baggerseen günstige Voraussetzungen für den Abbau von organischen Schadstoffen (BOOS & STROHM 1999).

## 7.7 Bildung von Stoffen

Stoffe können im Baggersee nicht nur abgebaut, sondern auch neu gebildet werden. Dies kann durch die Bildung neuer chemischer Verbindungen bei veränderten Milieubedingungen oder durch die biologische Aktivität geschehen.

So können sich unter reduzierenden Bedingungen z. B. Ammonium aus Nitrat und Schwefelwasserstoff aus Sulfat bilden. Ammonium unterliegt allerdings unter anaeroben Bedingungen vorzugsweise der Sorption, unter aeroben Bedingungen wieder der Oxidation. In den Baggerseen wurden denn auch nur vergleichsweise geringe Ammonium-Konzentrationen gemessen, auch in den Seen, in denen ein intensiver Nitratabbau stattfindet. Offensichtlich dominiert bei den herrschenden Milieubedingungen die Denitrifikation. Im unterstromigen Grundwasser stellten sich nach kurzen Fließstrecken meist wieder  $NH_4$ -Konzentrationen vergleichbar denen im oberstromigen Grundwasser ein.

Schwefelwasserstoff war, wie z. B. im Leissee, nur in Spuren nachweisbar.

Zu den Schadstoffen, die auf die biologische Aktivität zurückgehen, gehören algenbürtige Stoffe. Sie wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht. Bei Felduntersuchungen zeigte sich, dass diese Substanzen (u. a. die Algentoxine) bei der Untergrundpassage eine intensive Elimination erfahren und be-

reits nach kürzester Fließstrecke im Grundwasserleiter nicht mehr nachweisbar sind (CHORUS, zitiert in BOOS & STROHM 1999).

Hinweise auf Gefährdungen des Grundwassers durch eventuelle mikrobiologische Belastungen der Baggerseen (z. B. Protozoen) gibt es keine (BOOS & STROHM 1999, 2000). Nach den vorliegenden Erkenntnissen reicht offensichtlich das Schutzpotenzial des Seesediments und des Grundwasserleiters für eine Elimination mikrobiologischer Verunreinigungen innerhalb vergleichsweise kurzer Fließstrecken bzw. -zeiten aus.

## 7.8 Remobilisierung

Substanzen, die im See fixiert wurden, können vor Übertritt des Seewassers in den Grundwasserleiter wieder mobilisiert werden. Durch die zyklische Belüftung des Sees während der Zirkulation ist zeitweise eine Reoxidation der im postoxischen bzw. sulfidischen Milieu festgelegten Substanzen möglich, andererseits bei reduzierenden Bedingungen die Freisetzung von Substanzen (z. B. Eisen, Mangan), die unter aeroben Bedingungen gefällt wurden. Dabei können auch mitgefällte Schwermetalle wieder in Lösung gehen (WALLMANN, zitiert in BOOS & STROHM 1999).

Auswirkungen derartiger Prozesse waren in der durchgeführten Studie nur in geringem Umfang nachweisbar. Der Nitrat- und Sulfatanstieg im Abstrom einiger Seen erfolgte meist stetig mit zunehmender Fließstrecke, ein Hinweis auf einen zunehmenden Eintrag durch Zufluss von Sickerwasser oder eine allmähliche Anpassung an die Milieubedingungen im Aquifer und weniger als Folge einer Remobilisierung.

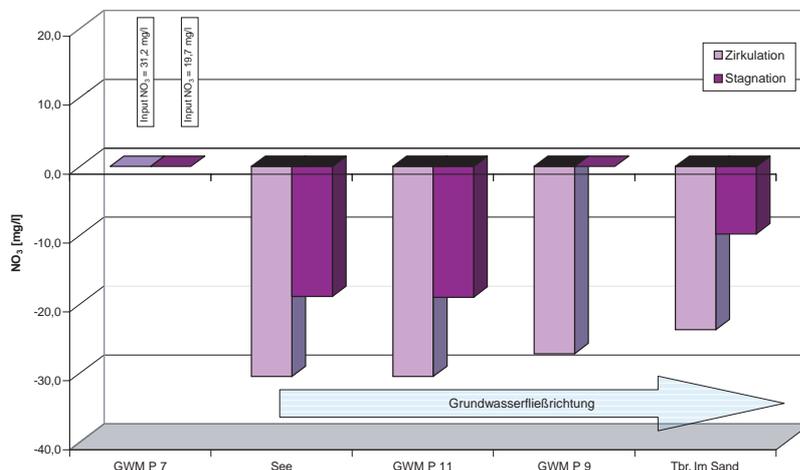


Abb. 42: Änderungen der Nitrat-Konzentration bei der Passage des Grundwassers durch den Binner Baggersee

In dieser Weise ist wohl auch die Zunahme der Eisen- und Mangan-Konzentrationen in reduzierenden Grundwasserleitern zu interpretieren. Die Veränderungen der primär geringen Schwermetallkonzentrationen waren nicht systematisch und wenig aussagekräftig. Eine stetige oder auch nur schubweise Belastung des unterstromigen Grundwassers durch remobilisierte Schwermetalle war im Untersuchungszeitraum nicht erkennbar.

Lediglich für eine im See einsetzende Rücklösung von Karbonaten ließen sich in den durchgeführten Untersuchungen Anhaltspunkte finden.

## 7.9 Milieuveränderungen

Neben dem direkten Eintrag von Schadstoffen aus dem See in das Grundwasser können Schadstoffe auch indirekt als Folge von Milieuveränderungen im unterstromigen Grundwasser aus dem Gestein mobilisiert werden. Die wichtigsten Milieuveränderungen, die durch abströmendes Seewasser hervorgerufen werden, sind veränderte Grundwassertemperaturen, veränderte Redox-Bedingungen und veränderte

Randbedingungen für das Kalk-Kohlensäure-System. Beispiele für die Mobilisierung von Substanzen sind die Lösung von Eisen und Mangan in einem ursprünglich oxidierenden Grundwassermilieu durch Verschiebung zu reduzierenden Bedingungen, umgekehrt auch die Oxidation von sulfidischen Mineralen im Gestein durch abströmendes, sauerstoffhaltiges Seewasser.

Ein abnehmendes Schutzpotential des Grundwasserleiters gegen Verunreinigungen, z. B. Nitrat, durch Verschiebung der Redox-Verhältnisse hin zu aeroben Bedingungen, wurde ebenfalls in der Literatur beschrieben (HÖLSCHER & WALTHER 1990).

Derartige Auswirkungen der Baggerseen auf das unterstromige Grundwasser können nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen im Nahbereich der Seen auftreten, sie lassen sich jedoch nicht eindeutig von Remobilisierungseffekten (Kap. 7.8) trennen. Da die Milieubedingungen unterstromig der Baggerseen jedoch spätestens nach 100–200 m Fließstrecke wieder weitgehend den oberstromigen Verhältnissen entsprechen (Kap. 6.4.2, 6.4.4), können weitreichende Auswirkungen ausgeschlossen werden.