

## Das Gas- und Wasserfach

Zeitschrift des DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches  
des Bundesverbandes der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW)  
der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V. – FIGAWA  
der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV)  
der deutschen Dokumentations-Zentrale Wasser (DZW)  
der Arbeitsgemeinschaft Wässerwerke Bodensee-Rhein (AWBR)  
der Arbeitsgemeinschaft Rhein-Wasserwerke e.V. (ARW)

VERLAG R. OLDENBOURG MÜNCHEN

121. JAHRGANG 1980 · HEFT 4

## Wechselbeziehungen zwischen Baggerseen und Grundwasser in gut durchlässigen Schottern

Jan-Peter WROBEL\*)

**Schlagwörter:** Grundwasser-Baggerseen, Abdichtung, Eutrophierung, Chemismus, Temperatur

Mehrjährige hydrogeologische und wasserchemische Untersuchungen des Bayerischen Geologischen Landesamtes an Baggerseen in Südbayern haben ergeben, daß in gut durchlässigen Grundwassерleitern erhebliche Wechselbeziehungen zwischen Baggerseen und Grundwasser bestehen. Es wird dargelegt, wie und in welchem Ausmaß Baggerseen das Grundwasserströmungsfeld beeinflussen und welche Auswirkungen Abdichtungserscheinungen haben. Es werden Angaben über den Durchfluß und die Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit gemacht. Die Ursachen der Eutrophierung und die Veränderung des Wasserchemismus' in den Baggerseen selbst sowie die daraus resultierende Beeinflussung des Grundwassers im Unterstrom und deren Reichweite werden beschrieben. Aufgrund der Ergebnisse werden Schlußfolgerungen für die Planung und Anlage von Baggerseen gezogen.

Several years lasting hydrogeological and hydrochemical investigations about dredging pools and ground water showed that there are considerable correlations between them. Way and dimension of the influence of dredging pools on the groundwater flow net are described as well as the effect of sealing the banks. Informations about the increase of groundwater velocity are given. The reasons of eutrophication and the variations of the water quality in the lakes are described. The resulting influence on the groundwater and its extension are discussed. Conclusions for planning and establishing of dredging pools are drawn from these findings.

tung hat in manchen Gebieten derartige Ausmaße angenommen, daß die Landschaft, wie z. B. im Donautal bei Ingolstadt, einer Seenplatte gleicht (*Bild 1*). Um so erstaunlicher ist der Mangel an genaueren Untersuchungen zu den qualitativen und quantitativen Fragen über den Komplex Grundwasser und Baggerseen. Erst von Lübbe [1] wurden diese Fragen etwas genauer behandelt.

Die vorliegenden Ausführungen stützen sich vor allem auf Untersuchungen am Feldmochinger-, am Fasanerie- und am Lerchenauer-See, drei im Norden von München gelegenen Baggerseen. Weitere Baggerseen im Umkreis

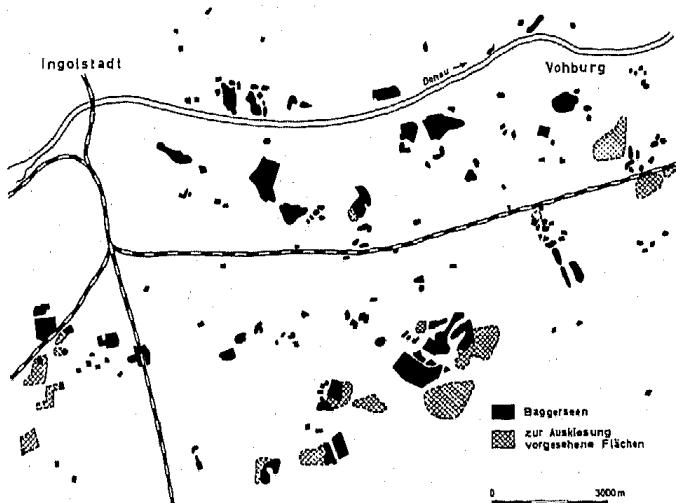


Bild 1. Baggerseen im Donautal bei Ingolstadt.

\*) Dipl.-Geol. Dr. Jan-Peter Wrobel, Bayerisches Geologisches Landesamt, Prinzregentenstraße 28, 8000 München 22.

von München und in Südbayern wurden in die Untersuchungen mit einbezogen.

Die Arbeiten, die vom Bayerischen Geologischen Landesamt zunächst als Untersuchungsprogramm für die Landeshauptstadt München, Baureferat – Tiefbau, Abt. Wasser- und Brückenbau, begonnen worden waren, konnten dank der Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen anschließend als Forschungsvorhaben weitergeführt werden. Beiden Stellen sei für ihre Unterstützung und für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Ergebnisse gedankt.

## 2. Hydrogeologischer Überblick

Die drei Baggerseen Feldmochinger-, Fasanerie- und Lerchenauer-See, die in den Jahren 1939 und 1942 von der Deutschen Reichsbahn angelegt worden waren, liegen im Norden der Münchener Schotterebene, die von den Schmelzwässern der Eiszeiten über dem schlecht durchlässigen tertiären Untergrund aufgeschüttet wurde. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  der quartären sandigen Kiese bewegt sich zwischen  $1 \cdot 10^{-3}$  und  $2 \cdot 10^{-2}$  m/s, mit einem Mittelwert von  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s, während der Nutzponrenraum mit etwa 20% angenommen werden kann. Das ungestörte Grundwassergefälle beträgt im Untersuchungsgebiet 2,5 bis 5% bei einer Grundwasserfließrichtung von Nordnordost (Bild 2). Die Mächtigkeit der quartären Schotter liegt zwischen 10 und > 17 m, die Grundwassermächtigkeit bei 7 bis > 12 m. Die Grundwasseroberfläche, die langjährig um 1,5 bis 2,5 m schwankt, liegt nur wenige Meter unter Flur.

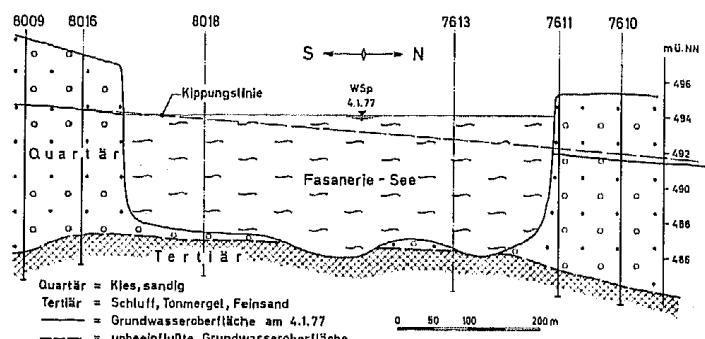


Bild 3. Hydrogeologisches Profil durch den Fasanerie-See.

Die drei genannten, intensiv untersuchten Baggerseen weisen Wasserflächen zwischen 7,5 und 16 ha auf und sind zwischen 6 und 8 m tief. Während Lerchenauer- und Fasanerie-See (Bild 3) fast bis zum schlecht durchlässigen Tertiär ausgehoben wurden, liegen unter der Sohle des Feldmochinger-Sees noch mehrere Meter wasserführender Kies. Außerdem hat dieser See einen oberirdischen Abfluß. Alle 3 Seen werden nur aus dem Grundwasser gespeist und waren nach ihrem Aushub jahrelang sich selbst überlassen, ehe sie in den vergangenen Jahren für Erholungszwecke ausgebaut wurden.

## 3. Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser

### 3.1 Beeinflussung des Grundwasserströmungsfeldes

Da ein Baggersee wie eine Zone besonders guter Durchlässigkeit im Grundwasserleiter wirkt, kann in dem von ihm erfaßten Querschnitt ein höherer Wasserdurchsatz

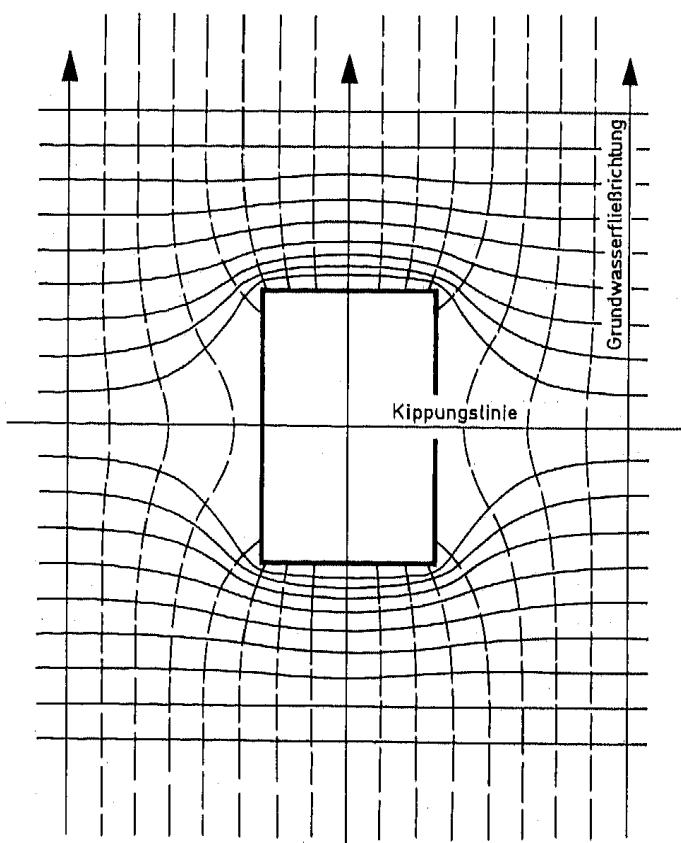
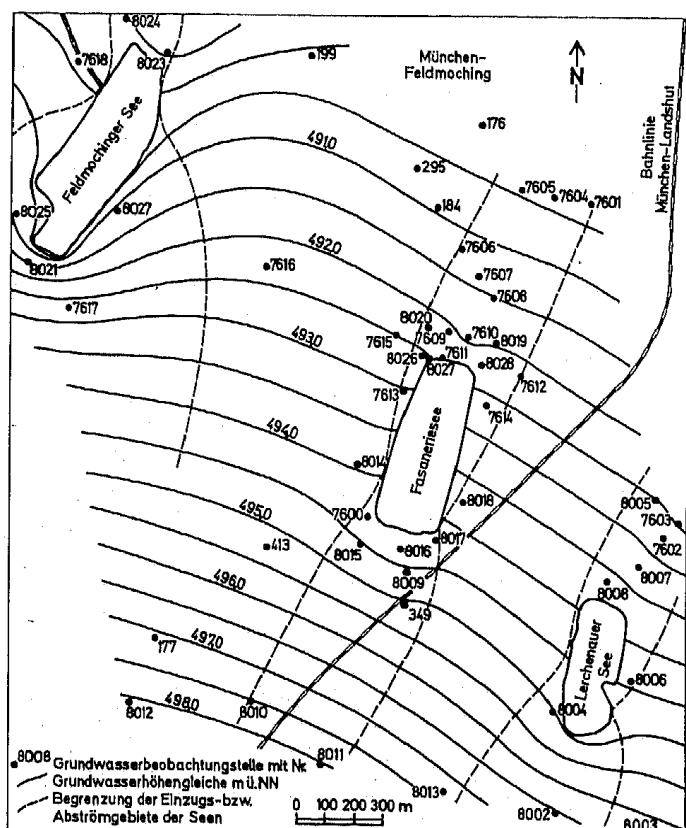


Bild 4. Theoretischer Verlauf des Potential- und Stromliniennetzes an einem Baggersee.



erfolgen als durch eine ebenso große Kies-Sand-Fläche. Die Grundwasserströmungslinien werden deshalb in den See hineingezogen (*Bild 2 und 4*). Der Wasserspiegel in einem Baggersee ist horizontal und müßte sich bei völlig offenem Ufern auf die Höhe des ursprünglichen Grundwasserstandes in der Mitte zwischen oberstromigem und unterstromigem Ufer einstellen (*Bild 4 und 5*). Die sogenannte Kippungslinie ist die Schnittlinie zwischen der ungestörten Grundwasseroberfläche und der Baggerseeoberfläche. Die Horizontalstellung der Seeoberfläche bewirkt im Oberstrom eine Absenkung, im Unterstrom eine Aufhöhung des Grundwassers.

Bereits während des Abbaubetriebes beginnt die Abdichtung des Baggersees durch Feinsedimente, die sich bevorzugt an der Sohle und an den unterstromigen Ufern ablagern. Sie setzt sich bei der Alterung der Seen in unterschiedlichem Ausmaß fort, dabei ist sie in Seen mit starker Algenentwicklung besonders intensiv. Am Fasanerie-See ist die Kippungslinie bereits so weit nach Oberstrom gewandert, daß sie bei Niedrigwasser (NW) fast mit dem Zuströmufer zusammenfällt (*Bild 5*). Wie weit fortgeschritten die Verlegung der ursprünglich gut durchlässigen Ufer ist, zeigt die Meßstelle 7611 am unterstro-

migen Ufer des Fasanerie-Sees. Nur zwei Meter vom See entfernt weist sie einen Grundwasserstand auf, der bei NW mehr als zwei Meter unter dem Seespiegel liegt.

Bei einem Baggersee, der fortschreitend seine Ufer abdichtet, und dessen Wasserspiegel damit ansteigt, vermindern sich parallel dazu die Entnahmebreite und der Durchfluß. Bei einem Baggersee mit oberirdischem Abfluß, der in seiner Spiegellage nahezu fixiert ist, führt die Abdichtung der Ufer zu einer Vermehrung des oberirdischen Abflusses. Dabei bleibt der Gesamtdurchfluß gleich, ebenso wie das Einzugsgebiet. Schwankungen der Breite des Einzugsgebietes sind unter Umständen für die Qualität des Seewassers von Bedeutung, je nachdem, ob sich Belastungsherde innerhalb oder außerhalb befinden.

### 3.2 Beeinflussung der Grundwasserfließgeschwindigkeit

Zur Ermittlung der Grundwasserfließgeschwindigkeit im Bereich der drei Baggerseen wurden Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstoffen durchgeführt. Im unbeeinflußten Grundwasser südlich des Fasanerie-Sees (*Bild 6*) wurden mittlere Fließgeschwindigkeiten von etwa 7,5 m/d festgestellt, die westlich des Sees auf Werte um 5 m/d abnahmen, bis sie schließlich nördlich des

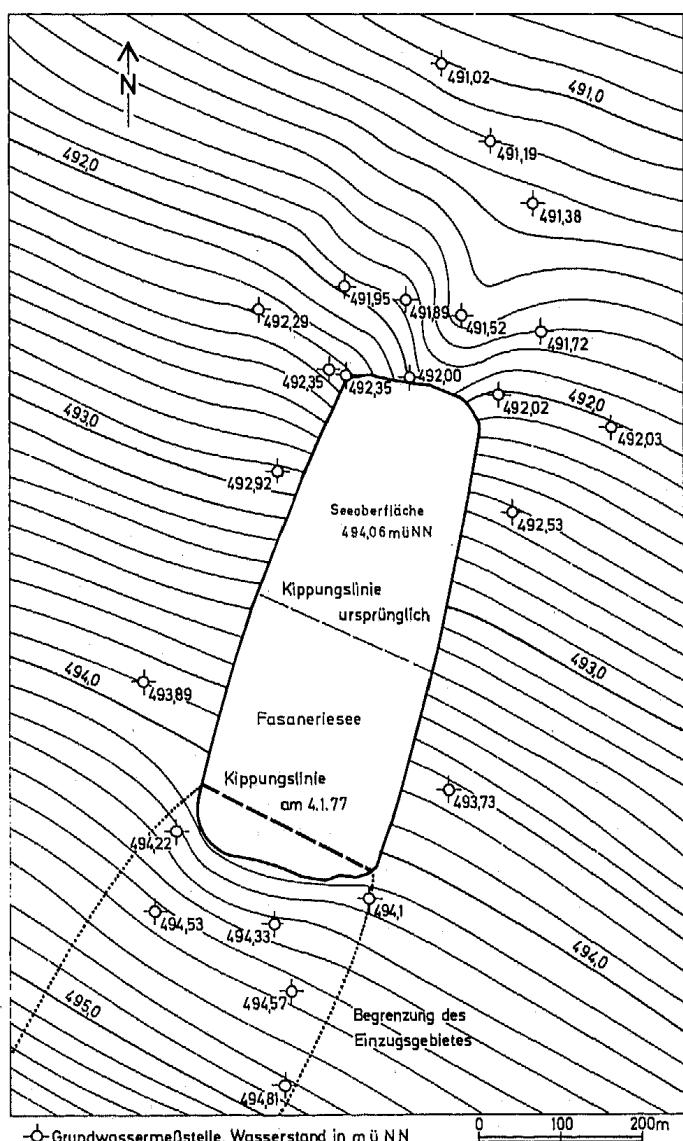


Bild 5. Grundwasserhöhengleichen am Fasanerie-See bei NW am 4.1.1977.

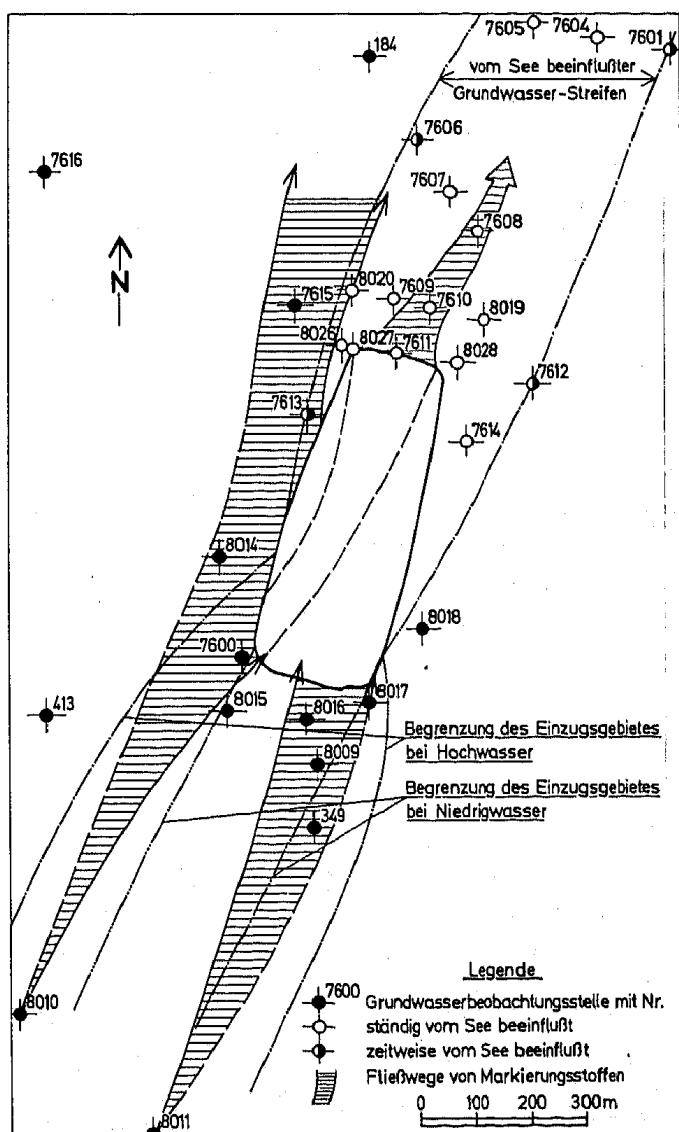


Bild 6. Fasanerie-See: Einzugsgebiet bei HW und NW, Abströmbereich und Fließwege von Markierungstoffen.

Sees nur noch 3 bis 4 m/d betragen. Die beobachteten Maximalgeschwindigkeiten reichten bis 30 m/d. Die Abnahme der mittleren Grundwasserfließgeschwindigkeit von Süd nach Nord dürfte auf die Abnahme des Grundwassergefälles in dieser Richtung zurückzuführen sein. Innerhalb der Absenktrichter wurden wesentlich höhere Maximalgeschwindigkeiten festgestellt. Sie gingen bis über 220 m/d und erreichten in der Nähe der Ufer, wo der Absenktrichter am steilsten ist, ihre höchsten Werte. Im Abströmbereich wurden Maximalgeschwindigkeiten bis 57 m/d ermittelt.

### 3.3 Durchfluß durch Baggerseen

Baggerseen werden durchströmt, solange ein Gefälle zwischen oberstromigem Grundwasser und Seespiegel besteht. Eine genaue Ermittlung der Durchflußmengen bereitet meistens Schwierigkeiten. Nicht immer ist sie so einfach wie beim Fasanerie-See, der bei niedrigsten Wasserständen praktisch keine absenkende Wirkung mehr hat, aber auch noch nicht umströmt wird. In diesem Falle kann man den Durchfluß nach dem Gesetz von *Darcy* zu 26,5 l/s bei Niedrigwasser berechnen. Bei Hochwasser (HW) erhöht sich der Durchfluß auf ca. 74 l/s, während man mit einem mittleren Durchfluß von etwa 40 l/s durch den Fasanerie-See rechnen kann. Bei einem mittleren Wasservolumen von ca. 750 000 m<sup>3</sup> bedeutet das einen einmaligen Wasseraustausch in 217 Tagen. Für den Lerchenauer See errechnet sich ein mittlerer Durchfluß von etwa 50 l/s und ein einmaliger Wasseraustausch in 97 Tagen.

Die Frage, wie groß der Durchfluß durch die beiden Baggerseen kurz nach Beendigung der Ausbeutung war, kann nur überschlägig beantwortet werden. Die Kippungslinie beider Seen liegt heute auch bei HW erheblich weiter oberstrom als die theoretische Kippungslinie bei völlig offenen Ufern. Das heißt, daß die Entnahmehöhe selbst bei Mittelwasser ursprünglich wesentlich größer war als heute bei HW. Die Berechnung der ursprünglichen Durchflußraten [11] ergibt, daß der Durchfluß durch den Fasanerie-See ursprünglich etwa dreimal so groß war wie heute. Am Lerchenauer See dürfte er ursprünglich etwa 100 l/s betragen haben.

Bei Baggerseen mit starkem oberirdischem Abfluß, wie dem Feldmochinger See oder der Olympia-Regattastrecke, ist der Anteil des oberirdischen Abflusses in der Regel wesentlich größer als der noch unterirdisch abfließende Anteil. Am Feldmochinger See dürfte dieser Anteil in der Größenordnung von 20 l/s liegen. Mit dem mittleren Abfluß von 310 l/s während des Untersuchungszeitraumes errechnet sich ein Gesamtdurchfluß von 330 l/s. Bei einem mittleren Wasservolumen von etwa 640 000 m<sup>3</sup> ergibt sich daraus ein einmaliger Wasseraumsatz in 22 Tagen. Die Wasserspiegelhöhe der Olympia-Regattastrecke in München ist durch ein Wehr so fixiert, daß sie ständig dem mittleren langjährigen Grundwasserstand an ihrem unterstromigen Ufer entspricht, daher kann man die Regattastrecke gewissermaßen als die oberstromige Hälfte eines Baggersees mit völlig offenen Ufern betrachten. Der mittlere oberirdische Abfluß

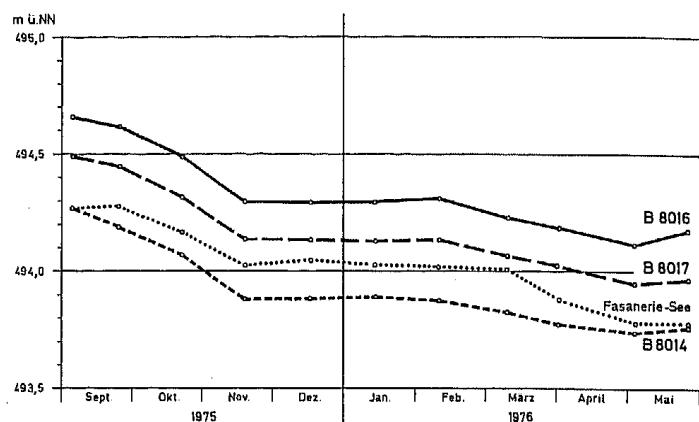


Bild 7. Ganglinien von Grundwasserstand und Seespiegel am Fasanerie-See.

beträgt etwa 750 l/s, schätzt man den zusätzlichen unterirdischen Abfluß auf 50 l/s, so erhält man einen mittleren Durchfluß von 0,8 m<sup>3</sup>/s. Bei einem Wasservolumen von ca. 930 000 m<sup>3</sup> bedeutet dies einen einmaligen Wasseraustausch in 13,5 Tagen.

Diese in der Praxis gewonnenen Ergebnisse über den Durchfluß in Baggerseen stehen im Gegensatz zu den bei [1] zitierten Modellversuchen von [2], wonach selbst bei vollständiger Abdichtung der Sohle und  $\frac{1}{10}$  der Böschungslänge 90% der Wassermengen abfließen, die bei völlig offenen Böschungen gemessen wurden. Andererseits trifft auch die Vorstellung *Klotters* [3] nicht zu, wonach ein Wasseraustausch Baggersee-Grundwasser nur bei völlig gleichen Wassertemperaturen stattfinden kann. Am Fasanerie-See wurde in Trockenperioden nach hohen Grundwasserständen beobachtet, daß der Seespiegel langsamer absinkt als das umgebende Grundwasser (Bild 7). Es sind also extreme Fälle denkbar, in denen der Seespiegel an allen Ufern über der Grundwasseroberfläche zu liegen kommt. Bei einem derartigen Zustand muß jede Durchströmung aufhören, da der hydrostatische Druck im See dann höher als im umgebenden Grundwasser ist.

Abgesehen von der Beeinflussung durch die verschiedenen anderen Faktoren wird der Durchfluß auch von der Flächenausformung des Sees beeinflußt. Den geringsten Durchfluß pro durchströmte Flächeneinheit hat der Baggersee, der die Grundwasserströmungsverhältnisse am wenigsten beeinflußt. Das ist ein in Grundwasserfließrichtung sehr kurzer See, wobei eine lange Erstreckung senkrecht dazu von relativ geringer Auswirkung ist.

### 3.4 Reichweite der Absenkung

Die Reichweite *R* der Absenkung eines Baggersees hängt von vielen Faktoren ab. Sie wird um so größer, je länger ein See in Grundwasserfließrichtung ist. Sie wird bei größerem *k<sub>r</sub>*-Wert zunehmen, ebenso bei größerem Gefälle oder bei künstlicher Absenkung. Mit fortschreitender Abdichtung der Seeufer wird sie jedoch abnehmen. Von [1] wurde für die Reichweite der Absenkung von Baggerseen in Anlehnung an die Reichweitenbestimmung bei Vertikalbrunnen nach *Sichardt* eine Gl. als Arbeitshypothese angenommen, die

$$R_o = 10000 \cdot s \cdot \sqrt{k_r} \quad (1)$$

Tabelle 1. Reichweite der Absenkung verschiedener Baggerseen.

| Name des Sees          | Breite zur Grundwasserfließrichtung<br>m | Absenkung s am<br>oberstromigen Ufer<br>m | Reichweite der Absenkung<br>m |          | Bemerkungen             |
|------------------------|--|---|-------------------------------|----------|-------------------------|
|                        |  |   | berechnet                     | gemessen |                         |
| Olympia-Regattastrecke | 140                                      | 4,0                                       | 910                           | 680–920  | am 27. 2. 1971, ca. MNW |
| Olympia-Regattastrecke | 140                                      | 4,5                                       | 1024                          | 880–1120 | am 8. 9. 1975, HW       |
| Karlsfelder-See        | 190                                      | 2,7                                       | 652                           | 550–730  | am 28. 7. 1975, HW      |
| Feldmochinger-See      | 250                                      | 2,0                                       | 508                           | 430–600  | am 4. 9. 1975, HW       |
| Feldmochinger-See      | 250                                      | 1,3                                       | 330                           | 290–380  | am 3. 5. 1976, NW       |
| Lerchenauer-See        | 200                                      | 0,8                                       | 195                           | 140–240  | am 4. 9. 1975, HW       |
| Fasanerie-See          | 220                                      | 0,2                                       | 50                            | ca. 60   | am 4. 9. 1975, HW       |

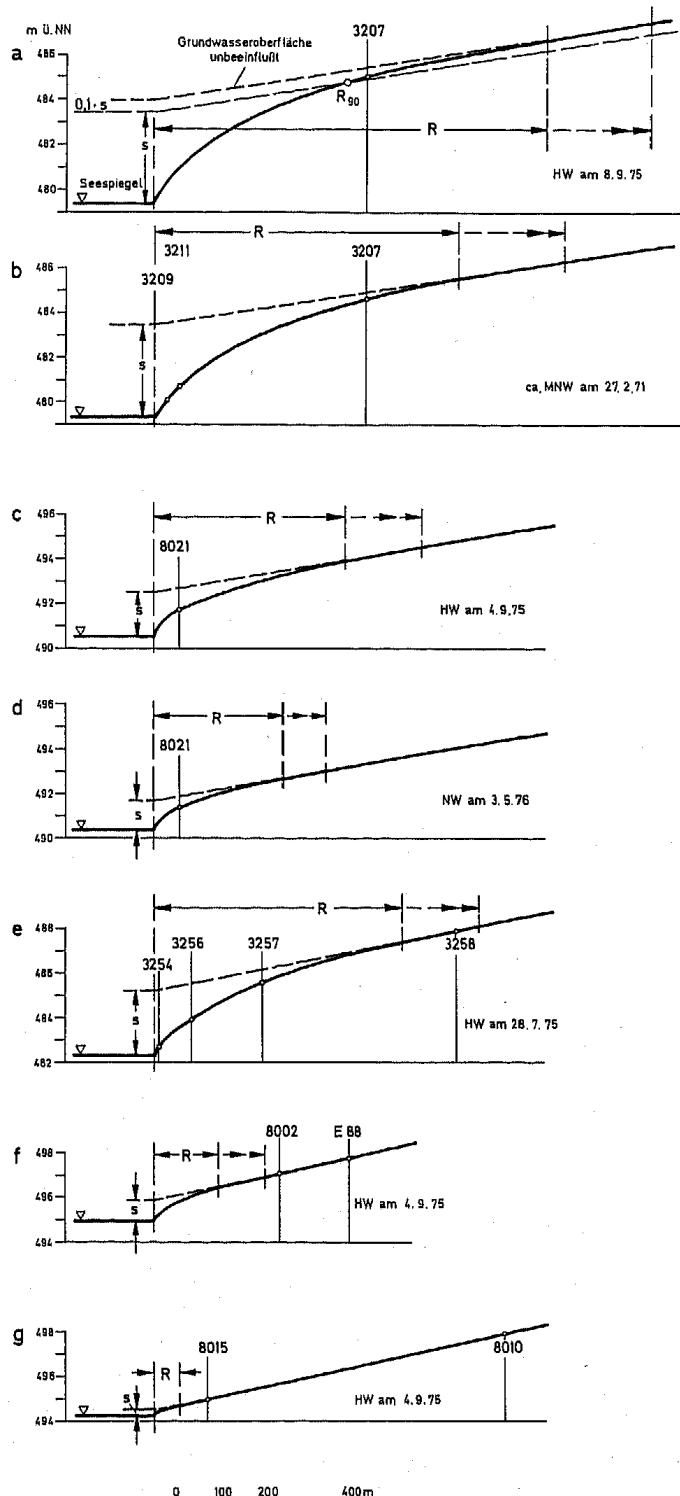


Bild 8. Ausbildung der Absenktrichter verschiedener Baggerseen.

a, b Olympia-Regattastrecke

c, d Feldmochinger-See

e Karlsfelder-See

f Lerchenauer-See

g Fasanerie-See

R Reichweite der Absenkung

R<sub>90</sub> Reichweite der Absenkung von 0,9 s

lautet, und die er durch Daten von verschiedenen Baggerseen zu belegen versuchte ( $R_0$  = Reichweite der Absenkung, m;  $s$  = Absenkung am oberstromigen Ufer, m). In dieser Gl. ist nicht berücksichtigt, daß die Reichweite der Absenkung auch von der Breite  $B$  eines Baggersees am oberstromigen Ufer beeinflußt wird. Die Länge des Sees und das Grundwassergefälle sind bereits in der Absenkung  $s$  enthalten. Die Breite des Sees wirkt sich bis zu einer Grenzbreite, die  $k_r$ -Wert abhängig sein dürfte, auf die Reichweite aus. Sie müßte vermutlich in Form einer  $k_r$ -Wert abhängigen  $e$ -Funktion in die Gl. eingehen. Im Bereich der Münchener Schotterebene konnten mit einer modifizierten Formel nach Sichardt gute Übereinstimmungen mit den tatsächlichen Verhältnissen erzielt werden (Tabelle 1, Bild 8):

$$R = 1500 s \cdot \sqrt{k_r} \cdot \log B \quad (2)$$

Verwendet man die in [1] vorgeschlagene Formel, so erhält man durchwegs zu große Reichweiten.

Die Absenktrichter sind trotz des relativ hohen  $k_r$ -Wertes in der Münchener Schotterebene in der Nähe der Seeufer ziemlich steil, während sie sich mit zunehmender Entfernung vom Seeufer mehr und mehr der unbeeinflußten Grundwasseroberfläche annähern (Bild 8). Daher ist es nicht möglich, die Reichweite der Absenkung auf einige Meter genau anzugeben, der mögliche Spielraum ist ziemlich groß (Tabelle 1). Man sollte daher besser die Reichweite angeben, bei der bereits 90% der Absenkung abgeklungen sind. Dieser Wert, hier mit  $R_{90}$  bezeichnet, läßt sich zumindest in den Absenkcurven ziemlich genau abgreifen. Außerdem ist der Restbetrag der Absenkung von 0,1 s in der Regel so klein, daß er wesentlich kleiner als die natürlichen Grundwasserstandsschwankungen und damit für praktische Fragen von geringer Bedeutung ist. Um  $R_{90}$  zu erhalten, muß die Gl. (2) abgeändert werden. Mit

$$R_{90} = 650 \cdot s \cdot \sqrt{k_r} \cdot \log B \quad (3)$$

wurden gute Übereinstimmungen mit den untersuchten Absenktrichtern erzielt.

### 3.5 Einfluß der Verdunstung

Die Verdunstung von der Oberfläche von Baggerseen wird von [1] und [4] ziemlich eingehend behandelt, weshalb auf dieses Problem hier nur kurz eingegangen wird. Mit den Klimadaten für den Münchener Norden [5; 11] beträgt der Verlust, der in der Grundwasserbilanz durch die erhöhte Verdunstung von der 14 ha großen Wasser-

oberfläche des Fasanerie-Sees entsteht, im Mittel 0,8 l/s, bei einem mittleren Durchfluß von 40 l/s. Für die Olympia-Regattastrecke mit 31,2 ha Fläche berechnet sich ein Verlust von 1,78 l/s bei einem Durchfluß von 800 l/s. Die mittleren verdunstungsbedingten Verluste in der Grundwasserbilanz sind also auf den Gesamtdurchfluß bezogen minimal.

An heißen Sommertagen kann die Verdunstung von freien Wasserflächen etwa 6 mm betragen. Nach [6], S. 269, wurden stellenweise sogar bis 11 mm/d beobachtet. Rechnet man mit 6 mm/d den Verdunstungsverlust des Fasanerie-Sees aus, so erhält man immerhin schon 9,7 l/s, für die Regattastrecke sogar 21,7 l/s. Die Verdunstungsverluste in den Seen werden durch vermehrten Grundwasserzufluß ausgeglichen.

### 3.6 Grundwasser und Eutrophierung

Die unterschiedlich starke Eutrophierung der Seen ist, wie die chemischen Grundwasseruntersuchungen ergeben, im wesentlichen auf die unterschiedliche Belastung des zufließenden Grundwassers zurückzuführen, wobei das entscheidende Kriterium der Gehalt an Phosphor ist. Nach [7] und [8] kann als kritischer Wert für den Beginn übermäßiger Algenproduktion eine Phosphor-Konzentration (ges. Phosphat) von 20 mg/m<sup>3</sup> gelten. Im Oberstrom des Fasanerie- und des Lerchenauer-Sees wurden stets die höchsten Phosphatgehalte mit Konzentrationen bis weit über 1000 mg/m<sup>3</sup> beobachtet. Dagegen lagen sie im Einzugsgebiet des Feldmochinger-Sees, unter 20 mg/m<sup>3</sup>, also unter dem sogenannten kritischen Wert. Unterstrom von Fasanerie- und Lerchenauer See sind die hohen Phosphatgehalte weitgehend abgebaut.

Die Seen mit hohen Phosphatgehalten im zuströmenden Grundwasser sind meso- bis eutroph, die Seen in phosphatarmen Grundwasserbereichen dagegen oligotroph. Andere Wasserinhaltsstoffe scheinen dagegen ohne wesentlichen Einfluß auf den Trophiegrad zu sein. So treten im Zuflußbereich des Feldmochinger-Sees und der Regattastrecke relativ hohe Nitratgehalte (bis 40 mg/l) und organische Belastung (landwirtschaftliche Düngung und Moorböden) auf, dennoch macht sich dies nicht in einer verstärkten Eutrophierung bemerkbar. Zwar ist der Stickstoff des Nitrats für die Algen ein wichtiger Nährstoff, doch ist das Auftreten des Phytoplanktons primär von einer ausreichenden Menge an Phosphat abhängig [7].

Der Gehalt des Grundwassers an Phosphat bewegt sich in anthropogen unbeeinflußten Gebieten zwischen <10 und 50 µg/l. Oberstromig von Fasanerie- und Lerchenauer-See werden aber erheblich höhere Konzentrationen erreicht. Eine Auswaschung aus dem Boden scheidet daher als alleinige Quelle aus. Die hohen Gehalte können aber auch nicht auf landwirtschaftliche Düngung zurückgeführt werden, da gerade in den Gebieten mit intensivem Anbau die niedrigsten Phosphatkonzentrationen festgestellt wurden, wogegen dort die Nitratgehalte düngungsabhängig signifikant höher waren. Das liegt daran, daß Phosphat im Boden durch Wasser nur schwer beweglich ist [9], während Nitrat zumindest teilweise leicht ausgewaschen werden kann. Somit verbleiben als Haupt-

quellen der hohen Phosphatkonzentration häusliche Abwässer nicht kanalisierter Siedlungsgebiete, wie sie tatsächlich oberstromig des Fasanerie- und des Lerchenauer-Sees bisher vorhanden waren. Bezeichnenderweise waren, wie Untersuchungen von Bodensedimenten [7] zeigen, beide Seen früher klar und nährstoffarm. Die intensive Verwendung phosphathaltiger Waschmittel mit Beginn der sechziger Jahre dürfte wesentlich zur Eutrophierung mit all ihren Folgen beigetragen haben.

### 3.7 Beeinflussung der Grundwassereigenschaften im Unterstrom von Baggerseen

Baggerseen verhalten sich im jahreszeitlichen Wechsel wie andere Seen. Das im Frühjahr noch gleichmäßig temperierte Wasser wird mit zunehmender Intensität der Sonneneinstrahlung von der Oberfläche her erwärmt. In tieferen Baggerseen bildet sich schließlich eine vertikale Temperaturschichtung, die den ganzen Sommer über stabil bleiben kann. Man unterscheidet dann eine obere, mehrere Meter mächtige Nährschicht, das Epilimnion, die Sprungschicht, das Metalimnion und darunter schließlich die Zehrschicht, das Hypolimnion. Im Herbst kommt es unter Windeinwirkung wieder zur Durchmischung des Seewassers, der sogenannten Vollzirkulation. Bedingt durch das mit dem Grundwasser zugeführte Nährstoffangebot entwickelt sich Phytoplankton in den höheren, noch gut durchlichteten Wasserschichten. Die Photosynthese bewirkt dann im Epilimnion nicht nur eine Sauerstoffübersättigung, die bis über 200% Sättigung reichen kann, sondern auch eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes. Verbunden damit ist eine Entkalkung des Wassers, bei gleichzeitigem Anstieg des pH-Wertes. Außerdem werden beim Wachstum der Algen Nitrat, Phosphat, Eisen und Silikat verbraucht. Diese Vorgänge führen zu einer Verminderung der Härte und der elektrolytischen Leitfähigkeit. Die abgestorbenen Algen sinken in die tieferen Wasserschichten des Sees ab. Dort, im Hypolimnion, kommt es zu Abbauprozessen unter Sauerstoffzehrung und zu einer Anreicherung von CO<sub>2</sub>. In dieser sauerstoffarmen oder sauerstofffreien Tiefenzone wird Nitrat zu Nitrit reduziert, durch Reduktion des Sulfats

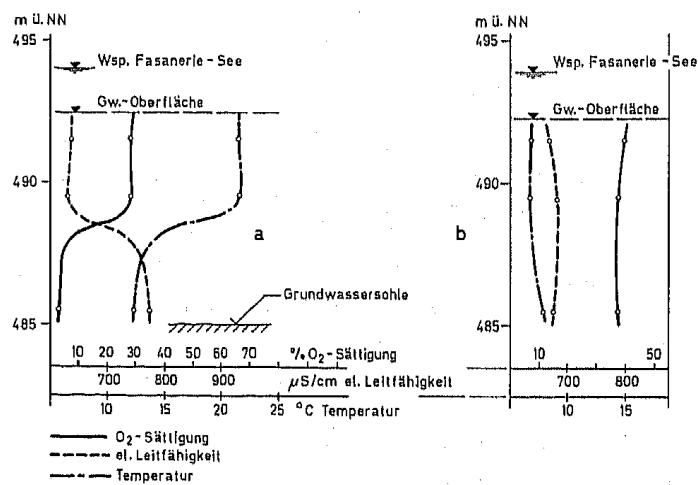


Bild 9. Grundwassereigenschaften in der Meßstelle 7611 in Abhängigkeit von der Tiefe

- a) am 17. 8. 77 bei einer Sprungschicht im See
- b) am 22. 11. 77 bei herbstlicher Vollzirkulation im See

kann es zur Bildung von Schwefelwasserstoff kommen. Nitrit kann aber auch im Epilimnion durch die assimulatorische Nitratreduktion freigesetzt werden [10]. Bei den chemischen Umsetzungen im Tiefenwasser können einzelne Ionen wie Phosphat oder Eisen wieder reaktiviert werden.

Die Veränderungen des Wassers bei der Passage durch die Baggerseen lassen sich im Abströmbereich der Seen noch eine längere Strecke im Grundwasser verfolgen. Das Wasser, das die Seen verlässt, hat jahreszeitlich schwankende Eigenschaften, außerdem treten Variationen in Abhängigkeit von der Ausströmhöhe (Epilimnion/Hypolimnion) auf (s. Bild 9).

Am nördlichen Ufer des Fasanerie-Sees gibt es einen Abschnitt, in dem über längere Zeiten hinweg sauerstoffarmes Tiefenwasser austritt, das in einer Fahne mindestens bis zu den Meßstellen 7604 und 7605 in etwa 700 m Entfernung vom See reicht (Bild 10). In dieser Tiefenwasser-

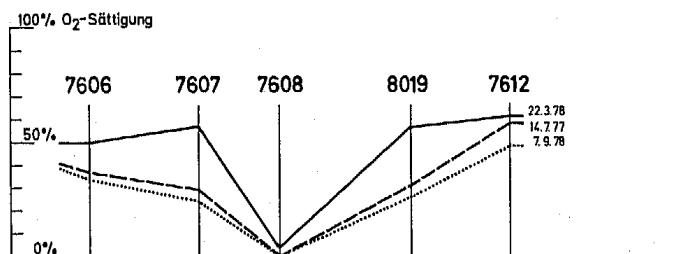
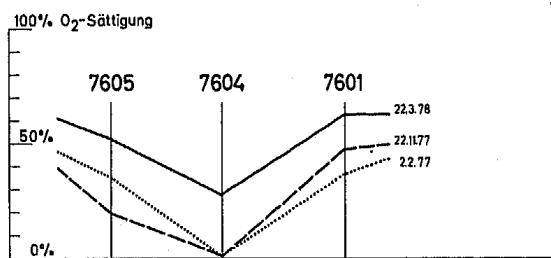


Bild 10. Sauerstoffsättigung im Grundwasser unterstrom des Fasanerie-Sees.

fahne wurden zeitweise erhöhte Gehalte an ges. Eisen bis 1,6 mg/l beobachtet, die aus reaktivierten Eisenkonzentrationen der Bodensedimente stammen dürften. Auch Nitrit wurde in dieser Zone zeitweise bis hin zur Meßstelle 7604 beobachtet. Die Beeinflussung des Grundwassers unterstrom der Baggerseen lässt sich an Querprofilen deutlich erkennen (Bild 11). Zur Verdeutlichung der zeitweise erheblichen Veränderungen der Grundwassereigenschaften werden in Tabelle 2 den Mittelwerten von Grundwasserdaten im Oberstrom des Fasanerie-Sees die am stärksten beeinflußten Werte im Unterstrom gegenübergestellt. Dabei stammen die Wertepaare eines Parameters jeweils vom gleichen Untersuchungstag. Solche Beeinflussungen des Grundwassers zeigen sich in ähnlichem Ausmaß am mesotrophen Lerchenauer See, aber auch am, vom Phytoplankton her betrachtet oligotrophen Feldmochinger-See [11]. Dort liegt die freie gelöste Kohlensäure im Oberstrom bei 70 mg/l, im Unterstrom bei 27 mg/l, die O<sub>2</sub>-Sättigung schwankt im Unterstrom zwischen mehr als 80% und 0%, wie überhaupt die

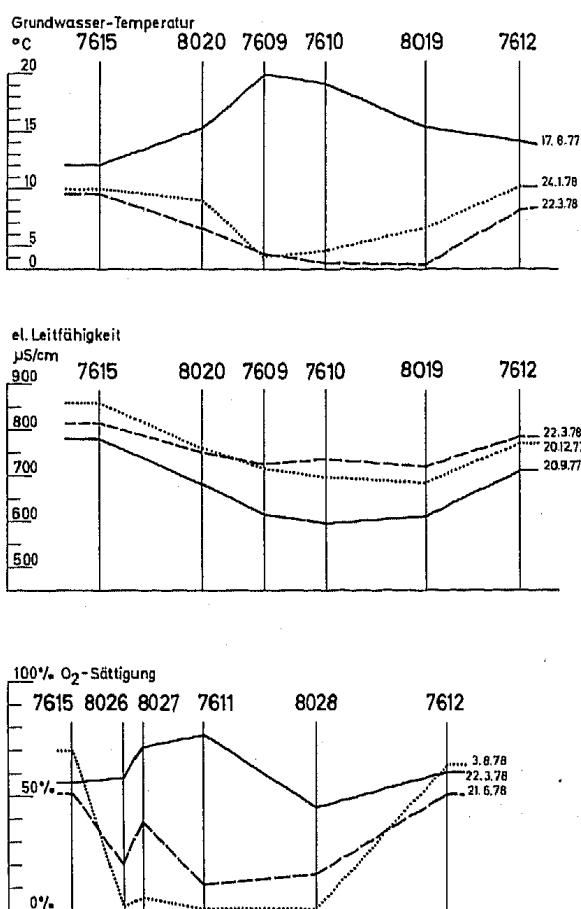


Bild 11. Beeinflussung der Grundwassereigenschaften im Unterstrom des Fasanerie-Sees.

Tabelle 2. Maximale Unterschiede zwischen der Grundwasserqualität im Ober- und Unterstrom des Fasanerie-Sees.

| Parameter                     |       | Mittelwert<br>oberstromig | Extremwert<br>unterstromig | Differenz |
|-------------------------------|-------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| Ca <sup>2+</sup>              | mg/l  | 112,2                     | 80,9                       | 31,3      |
| Fe ges.                       | mg/l  | 0,05                      | 1,59                       | + 1,54    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg/l  | 361,7                     | 230,6                      | 130,1     |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 52,8                      | 45,5                       | 7,3       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | mg/l  | 37,3                      | 10,8                       | 26,5      |
| PO <sub>4</sub> ges.          | mg/l  | 0,72                      | 0,02                       | 0,7       |
| CO <sub>2</sub> fr.           | mg/l  | 60,0                      | 19,0                       | 41,0      |
| SiO <sub>2</sub>              | mg/l  | 5,0                       | 0,7                        | 4,3       |
| Abd. Rückst.                  | mg/l  | 516                       | 401                        | 115       |
| Karb. H.                      | °d    | 16,6                      | 10,6                       | 6,0       |
| O <sub>2</sub> -Sättigung     | %     | 68,5                      | 0                          | 68,5      |
| pH                            |       | 7,31                      | 7,66                       | + 0,35    |
| el. Leitf.                    | μS/cm | 783                       | 560                        | 223       |

Grundwässer im Abströmschatten von Baggerseen durch stark schwankende Qualität auffallen.

Bemerkenswert ist das Verhalten der Grundwassereigenschaften in der Meßstelle 8020. Im oberen Abschnitt wird regelmäßig Wasser nachgewiesen, das den See durchströmt hat, im tieferen Abschnitt dagegen Wasser, das an ihm vorbeigeflossen ist (Bild 12). Das bedeutet, daß sich das aus dem See seitlich ausströmende Wasser über das unbeeinflußte Grundwasser schichtet, auch bei umgekehrter Temperaturverteilung.

Stellt man mit den ermittelten Werten für den Durchfluß und die chemischen Veränderungen des Wassers im Fasanerie-See Bilanzrechnungen an, so ergeben sich erstaunliche Beträge. Die maximale Differenz im Ab-

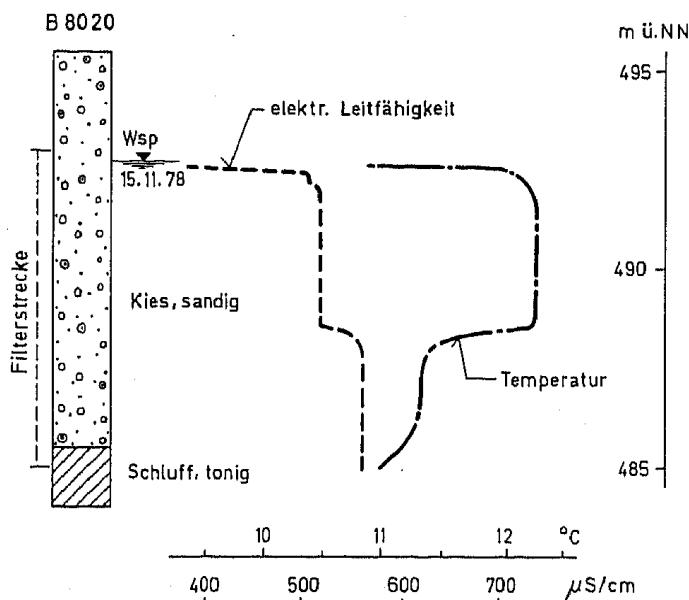


Bild 12. Elektrolytische Leitfähigkeit und Temperatur in der Meßstelle 8020 in Abhängigkeit von der Tiefe.

dampf-Rückstand zwischen Oberstrom und Unterstrom beträgt 115 mg/l. Bei einem mittleren Durchfluß von 40 l/s sind das 397 kg pro Tag. Nimmt man für die gesamte Zeit des Bestandes des Sees von ca. 37 Jahren nur eine mittlere Verminderung des Abdampf-Rückstandes um 50 mg/l und einen mittleren Durchfluß von 75 l/s (der Durchfluß war früher wegen geringerer Abdichtung größer) an, so erhält man für diesen Zeitraum eine im See zurückgehaltene Menge von 4370 t. Der mittlere Gesamtphosphat-Gehalt betrug am 2.2.1977 0,72 mg/l im Oberstrom, das ergibt bei einem Durchfluß von 40 l/s eine

tägliche Phosphatfracht von 2,5 kg oder im Jahr nahezu 1 t Phosphatimport, der weitgehend im See zurückgehalten wird.

Im Fasanerie-See schwanken die Wassertemperaturen zwischen 0°C und 24°C. Das unterstromige Grundwasser weist daher einen erheblichen Temperaturgang auf (Bild 13 und 14). Im unbeeinflußten Grundwasser bewegen sich die Temperaturen zwischen knapp 8°C und knapp 12°C, wenig unterhalb des Sees in der Meßstelle 7611 wurden Werte zwischen 2,5°C und 21,5°C gemessen. Erst nach 1000 m bis 1200 m Fließweg hat sich die Temperatur wieder dem natürlichen Schwankungsbereich angeglichen. Ein derartiges Temperaturverhalten ist auch unterstromig der anderen Baggerseen zu beobachten. Aus Bild 14 geht hervor, daß die Maxima und Minima der Temperatur im Unterstrom des Fasanerie-Sees die Meßstellen 7609, 7607 und 7605 in Abhängigkeit ihrer Entfernung vom See in zeitlicher Reihenfolge durchlaufen. Aus der zeitlichen Verschiebung der Extremwerte läßt sich die Grundwasserfließgeschwindigkeit mit 3 bis 4 m/d berechnen.

#### 4. Schlußfolgerungen

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, daß zumindest in Grundwasserleitern mit hoher Durchlässigkeit wechselseitige Beeinflussungen zwischen Baggerseen und Grundwasser von erheblichem Ausmaß erfolgen können. Man sollte versuchen, diese gegenseitigen Beeinflussungen möglichst gering zu halten.

Neben den Eigenschaften des Grundwasserleiters sind die Größe und der Umriß von Baggerseen für die Beeinflussung der Grundwasseroberfläche von entscheidender Bedeutung. Zumindest in Gebieten mit starkem Grundwassergefälle sollten Baggerseen in Grundwasserfließrichtung nicht zu sehr ausgedehnt werden, damit die Absenkung und die Aufhöhung der Grundwasseroberfläche nicht so groß werden und nicht so weit reichen. In Gebieten mit geringem Flurabstand der Grundwasseroberfläche wird dadurch auch vermieden, daß es zum Überlaufen des Sees kommt, wenn der Seespiegel in Folge von Abdichtungsercheinungen über die Höhe des unterstromigen Ufers ansteigt. Die Schaffung eines künstlichen Abflusses sollte möglichst vermieden werden, da er zu einem Verlust an Grundwasser führt und die Absenkung verstärkt. Bei der Planung eines Baggersees sollte aus die-

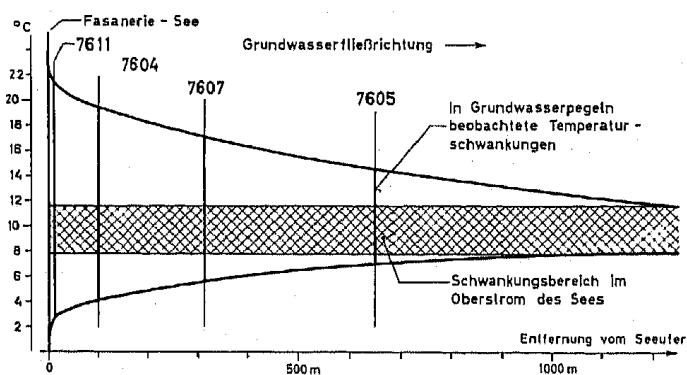


Bild 13. Abnahme der Temperaturbeeinflussung des Grundwassers im Unterstrom des Fasanerie-Sees.

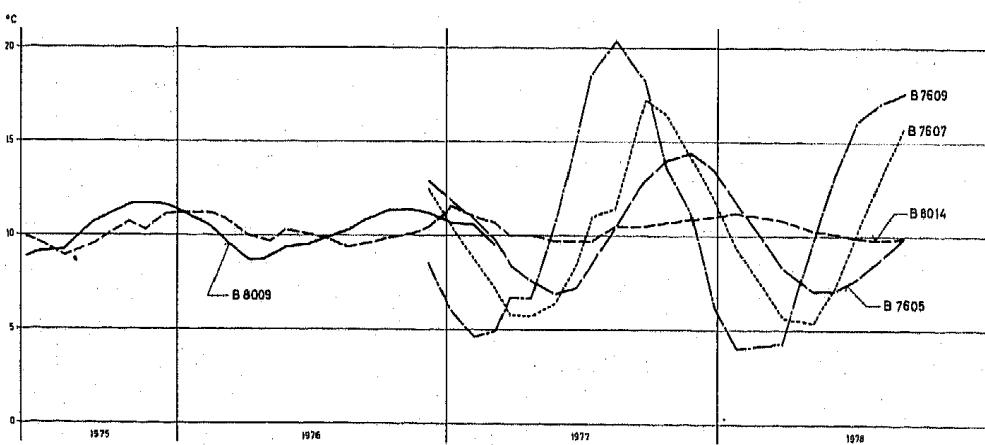


Bild 14. Ganglinien der Grundwassertemperatur im Bereich des Fasanerie-Sees; Meßstellen 8009 und 8014 oberstromig, 7605, 7607 und 7609 unterstromig.

sen Gründen bereits der maximal mögliche Seewasserspiegel beachtet werden.

Nach Abwägung der hydrologischen und hydrogeologischen Gesichtspunkte sollten Baggerseen nach Möglichkeit groß und tief sein, ausgerundete Uferlinien aufweisen und mit ihrer größten Erstreckung senkrecht zur Grundwasserfließrichtung liegen. Allerdings haben Baggerseen, die in bezug auf die Fließrichtung breit sind, im Unterstrom eine entsprechend breite Zone mit beeinflußtem Grundwasser zur Folge. Die allmähliche Abdichtung eines Baggersees bewirkt, daß die Beeinflussung der Grundwasseroberfläche reduziert wird. Dieser an sich positive Effekt tritt schneller und verstärkt in eutrophierten Seen auf. Meistens ist die Eutrophierung jedoch unerwünscht und sie führt zu einer verstärkten Beeinflussung der Grundwasserqualität. Bei der Planung von Baggerseen, an denen keine Eutrophierungserscheinungen erwünscht sind und in Gebieten, in denen keine stärkeren Veränderungen der Grundwassereigenschaften eintreten sollen, wie zum Beispiel im Oberstrom von Wassergewinnungsanlagen, empfiehlt sich daher eine chemische Voruntersuchung des Grundwassers im Oberstrom des geplanten Baggersees. Hierbei sollte vor allem auf Bestandteile geachtet werden, die für das Algenwachstum wichtig sind, nämlich Phosphat, Nitrat, Eisen und vielleicht auch Silikat. Ob die Schaffung eines oberirdischen Abflusses an eutrophierten Seen eine Verbesserung der Wasserqualität erbringt, weil mehr Nährstoffe exportiert werden, ist eine limnologisch zu klärende Frage. Fest steht jedoch, daß ein oberirdischer Abfluß zu einer Vermehrung des Grundwasserzuflusses und damit zu einem verstärkten Nährstoffeintrag führt.

Bei der Ermittlung der Reichweite der Absenkung von Baggerseen sollte beachtet werden, daß der Absenktrichter in der Nähe der Ufer steil ist, während in der äußeren Hälfte des Absenktrichters nur noch wenige Prozent der Gesamtabsenkung wirksam werden.

In Gebieten mit starker Häufung von Baggerseen ist der erhöhten Verdunstung von freien Wasseroberflächen Beachtung zu schenken, da sie in längeren, trockenen Wärmeperioden Ausmaße annimmt, die wasserwirtschaftliche und, bei grundwassernahen Böden, landwirtschaftliche Bedeutung erreichen kann. Andererseits ist zu berücksichtigen, daß Baggerseen künstliche Wasserrückhaltebecken darstellen, die, je nach Porenraum des Grund-

wasserleiters, die 5- bis 10fache Wassermenge beinhalten wie ein ebenso großes Volumen des Grundwasserleiters.

## 5. Schlußbemerkung

Baggerseen können eine Landschaft beleben, sie können Bade- und Erholungsfunktion erfüllen, dem Wasser- und dem Wintersport sowie der Fischerei dienen. Sie können aber auch das Landschaftsbild beeinträchtigen, wegen schlechter Wasserqualität von der Bevölkerung gemieden werden, die Grundwasserqualität nachteilig verändern und zu unerwünschten Beeinflussungen der Grundwasseroberfläche führen. Um derartige negative Auswirkungen zu vermeiden oder gering zu halten, sollten bei der Planung, Anlage und späteren Nutzung von Baggerseen, neben anderen Gesichtspunkten mehr als bisher auch die hydrogeologischen und hydrologischen Gegebenheiten und deren Veränderung durch Baggerseen beachtet werden.

## Literatur

- [1] Lübbe, E.: Baggerseen-Bestandsaufnahme, Hydrologie und planerische Konsequenzen. – Schriftenreihe des KWK, H. 29, Hamburg 1978.
- [2] Erb, Ch.: Die Sickerströmungen in Erdstaumämmen geringer Höhe. – Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft und landw. Wasserbau der T.H. Hannover, H. 7, 1965.
- [3] Klotter, H.-E., und Eck, G.: Über das Baden in Kies- und Sandgruben. – Städtehygiene 7 (1963), S. 124/128.
- [4] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser und Abfallwirtschaft: Wasserwirtschaftliche Untersuchung Baggerseen. – 1. Bericht, Karlsruhe 1975.
- [5] Kern, H.: Mittlere jährliche Verdunstungshöhen 1931–1960. – Schriftenr. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 2, München 1975.
- [6] Busch, K.-F.: Ingenieurtaschenbuch Bauwesen, Bd. III Boden-Wasser-Verkehr. – Edition Leipzig 1965.
- [7] Hamm, A.: Chemisch-biologische Gewässeruntersuchungen an kleinen Seen und Baggerseen im Großraum von München im Hinblick auf die Bade- und Erholungsfunktion. – Münchner Beitr. z. Abwasser-, Fischerei- und Flußbiol. 26, 1975.
- [8] KWK-DVWW: Richtlinien für die Gestaltung und Nutzung von Baggerseen. – KWK-DVWW, Regeln z. Wasserwirtschaft, H. 108, 1978.
- [9] Schmid, G., und Weigelt, H.: Grundsatzfragen zur Eutrophierung der Seen in Oberbayern, Mitteilung I: Waginger- und Tachinger-See. – Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung H. 12, S. 86/104, 1971.
- [10] Siebeck, O., et al.: Vergleichende limnologische Untersuchungen an 4 Baggerseen (Lerchenauer-See, Fasaner-See, Feldmochinger-See und Olympia-Ruderregatta) im Naherholungsgebiet der Bayerischen Landeshauptstadt München. – Unveröff. Arbeitsbericht f. d. Landeshauptstadt München, München 1978.
- [11] Wrobel, J.-P.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser. – Unveröff. Bericht f. d. Bayer. Staatsmin. f. Landesentw. u. Umweltfragen, München 1979.

**Sanierungskonzept zur Reinhaltung des Chiemsees.** Von K. Bucksteeg. Wasser und Boden 31 (1979) H. 5, S. 120/123. Die nicht ausreichende abwassertechnische Sanierung der Gemeinden im Niederschlagsgebiet des Chiemsees ist Hauptursache für die schnell fortschreitende Eutrophierung des Sees. Die wasserorientierten Erholungsnutzungen, insbesondere das Baden, sind gefährdet. Die Phosphor-Belastungsquellen werden beschrieben, die Sanierungsziele abgesteckt und die möglichen Sanierungsmaßnahmen mit Kostenangaben erläutert.

Hg.  
(Forts. auf S. 195)

## Zeitschriften-Rundschau

**Der Einsatz von Windkesseln für den Druck- und Verbrauchsausgleich in Wasserversorgungsnetzen.** Von G. Nagel. ndz 6/79, S. 223/224. – Die Anwendung von Luftpolstern in Leitungssystem als Alternative zu Hochbehältern, Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit von Hydrophoranlagen, steuertechnische Gesichtspunkte zur Pumpenschaltung. Hg.