

DAS LIMNISCHE SYSTEM DER BAGGERSEEN

W. Schmitz

Summary:

In the Upper Rhine Valley hundreds of lakes have been created by gravel digging activities and exposure of ground water mainly during the last 30 years.

The majority has developed a summer stratification pattern as soon as gravel digging had been stopped.

About 50 lakes of this type have been investigated briefly, 5 lakes more thoroughly. One lake has been created especially for continuous observations over a period of 6 years including the surrounding groundwater.

The lakes can be characterized as eutrophic due to the generally high nitrogen level of nitrate in the groundwater. Orthophosphate concentrations in the lake water remained low, but a considerable store of phosphorus, obviously adsorbed on suspended matter (clay minerals) is present in the lake water and provides nutrient supply for high phytoplankton productivity.

The mineral pattern of the lakes differs from the groundwater already soon after the exposure of the groundwater, especially as a consequence of photosynthetic activities of the plankton and precipitation of calcium carbonate.

The chemical differences between lake water and groundwater permit to observe the flow of groundwater into the lake and vice versa. This water exchange is considerable in most cases observed. It is still uncertain, whether the exchange of water is reduced by aging of the sediment contact zone of lake water and groundwater.

I. Einführung

Traditionell ist die Limnologie eine typologische Wissenschaft und es ist angebracht, auch auf einem Symposium über Baggerseen den Versuch zu machen, etwas über die Einordnung der Baggerseen in das limnologische Typensystem zu machen. Freilich ist dies ein Wagnis, denn kompakte Übersichten über limnologisches Verhalten der Baggerseen existieren nicht. In HUTCHINSONS "Treatis on Limnology", das den Anspruch erhebt, über limnologische Erscheinungen so ausführlich wie möglich zu berichten, gibt es vielseitige Ausführungen über die Entstehung der Seen; am Schluß dieses Kapitels wird jedoch nur kurz erwähnt, daß einige Seen dadurch entstehen, daß der Mensch Boden und Gestein bis in den Grundwasserbereich aufgräbt, was beim Übertage-Bergbau hauptsächlich der Fall ist. Unter den angeführten Beispielen wird der Kiestagebau nicht erwähnt.

Meines Wissens nach hat MACAN als erster in seinem Buch "Life in Lakes and Rivers" "Gravel-pits" als besonderen Typ stehender Gewässer erwähnt und dies durch zwei Abbildungen verdeutlicht. Aber auch dieses Buch enthält keine Angaben über für Baggerseen typische limnologische Vorgänge.

Dabei spielen Baggerseen der Zahl nach in manchen Gebieten der Erde eine weit größere Rolle als in natürlicher Weise entstandene Seen. So gibt es in Baden-Württemberg 11 natürliche Seen und 4 Talsperren, die regelmäßig limnologisch untersucht werden. Die Zahl der sonst noch vorhandenen Seen dieser Art ist etwa noch einmal so groß. Wie die in Abb. 1 *) abgedruckte Karte aus dem Raum der Oberrheinebene zwischen Baden-Baden und Heidelberg zeigt, liegen allein in diesem Abschnitt 43 Baggerseen, die wenigstens kursorisch limnologisch untersucht worden sind. Diese Untersuchungen sowie zusätzliche intensive Studien einzelner Objekte seit 1968 ermutigen mich, den Versuch zu wagen, etwas über typologisch-limnologisches Verhalten von Baggerseen auszusagen. Diese Aussagen stützen sich allerdings nur auf das limnologische Verhalten von Baggerseen der nordbadischen Oberrheinebene und nicht auf Beobachtungsmaterial in anderen Regionen.

Die meisten Baggerseen der Oberrheinebene sind erst nach dem letzten Krieg entstanden oder haben in dieser Zeit wenigstens erst ihre größere Ausdehnung erzielt. Das rapide Ausmaß von Erdaufschlüssen durch Kiesbaggern, die vielfach in den Grundwasserbereich hineinreichen, hat die Wasserwirtschaftsverwaltung veranlaßt, die Anregung für hydrologische und limnologische Untersuchungen zur Abklärung der Auswirkung des Kiesbaggerns auf das Grundwasser durch die Landesstelle für Gewässerkunde Baden-Württemberg zu geben. Über die Ergebnisse solcher Untersuchungen liegen bisher zwei Berichte der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg vor (LFU 1975, 1977). Ein Abschlußbericht ist in Vorbereitung.

2. Allgemeine Ergebnisse vergleichend limnologischer Untersuchungen von Baggerseen in der nördlichen Oberrheinebene

In dem erwähnten Bericht (LFU 1975) handelt es sich um Untersuchungen von 43 Seen, die in der Regel einmal in jedem Sommer 1968, 1969 und 1970 sowie zusätzlich ein weiteres Mal im März oder April 1970 erfolgten. Hierbei wurden vertikale Temperatur-Profile etwa in der Mitte des Sees gemessen und entsprechend diesem Ergebnis drei chemische Probenuntersuchungen, nämlich aus dem Epilimnion, dem Metalimnion und dem Hypolimnion, soweit ein solches vorlag, durchgeführt. Der Grund für dieses kursorische Untersuchungsverfahren lag in unseren begrenzten personellen und untersuchungstechnischen Möglichkeiten.

Hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens sind die Baggerseen größtenteils echte Seen vom Typ, wie er sich in Regionen gemäßigten Klimas mit regelmäßigem jahreszeitlichen Wechsel einstellt. Die beobachteten Schichtungserscheinungen (Abb. 2 *) zeigen entweder den klassischen Verlauf mit sommerlicher Differenzierung der Wassermassen in Epilimnion, Metalimnion und Hypolimnion. Jedoch gibt es auch Abweichungen davon. Besonders wenn die Seen nur geringe Tiefen (etwa 10 m oder weniger) aufweisen, fehlt oft ein kalthomothermes Hypolimnion oder es ist nur in geringer Schichtdecke ausgeprägt. Die thermische Sprungschicht endet dann am Seeboden. Mitunter ist auch das Epilimnion nur flach ausgeprägt. Das Temperaturprofil besteht dann im Extremfall nur aus einer Sprungschicht mit oder ohne Hypolimnion.

*) Die eingereichten Abbildungen Nr. 1, 6, 11 und 14 waren leider nicht einwandfrei reproduzierbar

Derartige Abweichungen von klassischen Schichtungsverhalten stehen offensichtlich im Zusammenhang mit der verhältnismäßig geringen Größe und Tiefe dieser Seen. Die flächenmäßige Ausdehnung der Seen in Nordbaden liegt zwischen wenigen ha und einer Größenordnung von etwa 50 ha. Nur bei 60 % der untersuchten Seen war die Wassertiefe größer als 10 m, bei 35 % größer als 15 m und nur bei 6 Objekten, also in 14 % aller Fälle, größer als 20 m. In einigen Fällen lagen extrem geringe Tiefen (2 m, 3 m) vor. Unter diesen Umständen werden Schichtungen leicht durch Windwirkung gestört. Hiermit hängt es auch zusammen, daß die Wassertemperaturen im Hypolimnion während des Sommers relativ hoch sind. Sie übersteigen in der Regel 10°. In einer erheblichen Anzahl von Baggerseen tritt während des Sommers keine Temperaturschichtung ein; mitunter existiert ein stetiger thermischer Gradient von der Oberfläche zum Seeboden. In allen diesen Fällen handelt es sich jedoch um Baggerseen, in denen zur Zeit der Untersuchung noch fortlaufend Kies gebaggert wurde. Durch diesen Eingriff entstehen kräftige Zirkulationsbewegungen und Turbulenzen, die eine thermische Schichtung zumindest teilweise unterbinden.

Das unterschiedliche thermische Verhalten von Baggerseen geht auch deutlich aus den Isolethen von 5 ausgewählten Seen hervor (Abb. 3), die zur Ergänzung der kursorischen Vergleichsuntersuchungen über längere Zeitdauer in regelmäßigen Abständen untersucht worden sind. In den Seen Wiesental, Weingarten und Forst bestand Baggerbetrieb, nicht jedoch in Walldorf und St. Leon. Es besteht kein Zweifel, daß nach Aufhören des Baggerbetriebes thermische Schichtungen während des Sommers eintreten.

Bekanntlich hängt die Typuszuordnung von Seen in erster Linie mit deren Nährstoffgehalt zusammen, wobei Phosphor- oder Stickstoff-Verbindungen in der Regel produktionsbegrenzend sind. Da die Baggerseen aus Aufschlüssen des Grundwassers entstehen, ist zu erwarten, daß ihr Nährstoffchemismus in erster Linie durch den chemischen Charakter des Grundwassers bestimmt wird. Das Grundwasser in der Oberrheinebene kann überwiegend als nährstoffreich angesehen werden. Besonders hoch sind häufig die Nitratkonzentrationen, die vielfach Größenordnungen von 20 - 40 mg/l erreichen. Die Verhältnisse können lokal jedoch recht verschieden sein. Beim Orthophosphat wurden vielfach Konzentrationen von 10 - 20 mg PO₄-P/l angetroffen. Es ist daher zu erwarten, daß die durch Ausbaggerung entstehenden Seen überwiegend eutroph werden. Die vergleichende Untersuchung der Baggerseen hat bestätigt, daß die Nitratkonzentrationen vielfach über 100 oder gar 1000 mg NO₃-N/m³ liegen. Es wurden mitunter sogar noch wesentlich größere NO₃-N-Beträge gemessen, z.B. im Testsee Langenbrücken.

Demgegenüber bleibt der Orthophosphat-Gehalt im Seewasser verhältnismäßig gering, vielfach unter 5 mg P/m³. Man sollte daher annehmen, daß Orthophosphat während des Sommers in Mangelkonzentrationen gerät und das Produktionsniveau begrenzt. Bei der Bestimmung der Total-Phosphor-Gehalte ergab sich, daß deren Konzentrationen unabhängig von der Planktondichte in der Größenordnung von ca. 30 mg P/m³ lagen. Nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen ist anzunehmen, daß ein großer Teil des Total-Phosphors aus Orthophosphat besteht, das an suspendierten Tonmineralien adsorbiert ist. Derartige Schwebestoffe werden beim Ausbaggern der Seen aus dem entnommenen Kies in das Wasser eingespült und bleiben dort über Jahre hinaus in der Schwebelage. Verluste an freiem Orthophosphat durch Nährstoffaufnahme des Phytoplanktons können deshalb durch Freisetzung des adsorbierten Orthophosphats ausge-

glichen werden. Bei Abnahme der Orthophosphat-Konzentration im Seewasser erfolgt zwangsläufig eine solche Freisetzung im Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung des Austauschgleichgewichtes. Ein ständiger Nachschub von Orthophosphat in einer höheren Konzentration, als sie im Seewasser vorliegt, erfolgt beim Einströmen des Grundwassers in den See. Auch muß mit der Zufuhr von Orthophosphat in den See durch Regenwasser gerechnet werden.

Vergleichende Produktionsdaten aus den Baggerseen liegen nicht vor. Aufsammlungen von Phytoplankton konnten bisher noch nicht bearbeitet werden. Bei Untersuchungen am Testsee bei Langenbrücken, über die später noch zu berichten ist, ergab sich, daß Produktionsgrößen von 50 mg C/m²/Tag und Chlorophyllgehalt-Beträge von 2 - 6 mg Chlorophyll/l während der Sommermonate erreicht werden, die mithin eindeutig im eutrophen Bereich liegen.

Die Baggerseen mit Sprungschicht zeigen im Tiefenwasser im Sommer in der Regel einen deutlichen, zum Teil sogar totalen Sauerstoffschwund, unabhängig davon, ob ein Hypolimnion ausgebildet wird oder die Sprungschicht am Seeboden endet. Sauerstoffreich im Tiefenwasser sind Baggerseen im Sommer nur dann, wenn sie keine thermische Schichtung aufweisen. Auch vom Standpunkt der Sauerstoffverteilung im Stagnationszustand kann man die Baggerseen der Oberrheinebene daher dem eutrophen Typus zuordnen.

Verbunden mit der Desoxygenierung des Tiefenwassers sind Reduktionsvorgänge von stickstoffhaltigen organischen Verbindungen, Nitraten oder Nitrit, die in vielen Fällen zu einer deutlichen Zunahme der Ammoniumwerte im Tiefenwasser während der sommerlichen Stagnationszeit führen. Oft werden dabei Konzentrationen von einigen mg NH₄-N/l erreicht.

Da viele der Baggerseen im Sommer zum Baden benutzt werden, interessiert auch der hygienische Zustand der Seen. Bei den vergleichenden Untersuchungen wurden daher die Dichte der heterotrophen sowie der gesamten coliformen Bakterien ermittelt. Wasser mit über 100 000 heterotrophen Bakterienkeimen/100 ml und mit über 10 000 gesamtcoliformen Bakterien/100 ml ist der hygienischen Qualität nach zu beanstanden. Bakteriendichten von mehr als 50 % dieser Grenzwerte sind zeichnend für einen hygienisch kritischen Zustand des Wassers, darunterliegende Werte kann man als hygienisch einwandfrei betrachten. Bei der Untersuchung der 43 Baggerseen erwiesen sich (gemessen an heterotrophen Bakterien) 65 % der Seen als einwandfrei, 16 % als kritisch und 19 % waren zu beanstanden. Gemessen an gesamtcoliformen Bakterien waren die entsprechenden Prozentsätze: 75 %, 7 % und 18 %. Spätere hygienisch-bakteriologische Untersuchungen an 176 Baggerseen mit mehrfachen Probenahmen während der Sommerzeit haben diese Verhältniszahlen etwa bestätigt (vgl. Referat RITTER).

3. Vertiefende Untersuchungen an den Baggerseen St. Leon, Walldorf, Forst, Weingarten und Wiesental

Diese Seen wurden aus der Reihe der 43 vergleichend untersuchten Baggerseen ausgewählt, um den Ablauf der limnologischen Erscheinungen häufiger, im allgemeinen in monatlichen Abständen, zu untersuchen. Bei den Seen Walldorf und St. Leon besteht im Sommer eine thermische Schichtung im Epilimnion, Metalimnion und Hypolimnion. In den anderen Seen bleibt die Schichtung bedingt durch den dort herrschenden Baggerbetrieb sehr unvollständig. Dementsprechend bestehen Unterschiede

im chemischen Verhalten (Abb. 4). Im Hypolimnion der Seen St. Leon und Walldorf entwickelt sich im Sommer ein erheblicher Sauerstoffschwund, im Falle des Walldorfer-Sees sogar bis zur restlosen Aufzehrung des Sauerstoffs. In den Seen Forst und Wiesental sinken die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser nur auf 60 % des Sättigungswertes (bezogen auf 1 Atm. Luftdruck), im See Weingarten sogar nur auf 90 %.

Die pH-Werte in diesen Seen liegen in den oberen Wasserschichten während des Sommers meist zwischen 7,5 und 8,5 und weisen damit auf einen hohen Produktivitätsstand hin. Im Tiefenwasser sind die pH-Werte infolge Anreicherung von Kohlendioxid niedriger als im Oberflächenwasser, was bei den thermisch geschichteten Seen Walldorf und St. Leon besonders deutlich ist. In ihrem Nitratgehalt unterscheiden sich die 5 Seen beträchtlich. Die Konzentrationen im Epilimnion der Seen St. Leon und Walldorf liegen bei 3 000 - 4 000 mg $\text{NO}_3\text{-N/m}^3$. In den Seen Weingarten und Wiesental werden Werte von lediglich 500 mg $\text{NO}_3\text{-N/m}^3$ erreicht, die zeitweise allerdings beträchtlich aufgezehrt werden können. Außerordentlich gering ist der Nitrat-Gehalt des Sees Forst mit beobachteten Maximalwerten von 5 mg $\text{NO}_3\text{-N/m}^3$. Die Nitratwerte im Tiefenwasser liegen in den thermisch nicht geschichteten Seen in derselben Größenordnung wie im oberflächennahen Wasser. Im thermisch geschichteten See St. Leon liegen die Nitrat-Werte auch im Hypolimnion in der Größenordnung von 2 000 - 3 000 $\text{NO}_3\text{-N/m}^3$ und sind nur wenig geringer als im Epilimnion. Im ebenfalls geschichteten See Walldorf nimmt der Nitratgehalt im Hypolimnion während der Stagnationsperiode bis zum zeitweise völligen Verschwinden ab; dies steht im Zusammenhang mit der zeitweiligen völligen Abwesenheit von Sauerstoff im Hypolimnion und ist, wie die gleichzeitig auftretenden hohen Ammonium-Werte von etwa 2-3 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ zeigen, auf Nitrat-Ammonifikation zurückzuführen.

Eine Anreicherung von Ammonium im Tiefenwasser tritt auch in den anderen untersuchten Seen - auch den thermisch ungeschichteten - ein, wenngleich die Konzentrationswerte dabei im allgemeinen unter 1 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ blieben. Nitrit wurde im Epilimnion von ungeschichteten Seen in Konzentrationen von nur einigen mg $\text{NO}_2\text{-N/m}^3$ beobachtet, in den Seen mit thermischer Schichtung jedoch in höheren Konzentrationen.

Diese Ergebnisse zeigen, daß die Konzentrationen und der Oxidationszustand einzelner Stickstoffverbindungen in den Baggerseen wie in anderen Seen von den Sauerstoffverhältnissen und damit von den thermischen Schichtungserscheinungen abhängig sind. Es ist anzunehmen, daß bakteriologisch bedingte Umsetzungen dabei eine Rolle spielen. Versucht man die Mengen der Stickstoffverbindungen im See zu bilanzieren, so beobachtet man Stickstoffverluste. In den Seen Walldorf und St. Leon ist die Bildung von Ammoniumstickstoff um ca. 15 % geringer als es dem Schwund an Nitratstickstoff entspricht. Dies deutet auf bakteriologische Denitrifizierungsvorgänge. Unbekannt bei dieser Bilanzrechnung sind allerdings die Zu- und Ausfuhr von Stickstoffverbindungen durch Grundwasserzustrom und -abstrom.

Die Orthophosphat-Gehalte im oberflächennahen Wasser der 5 Seen sind relativ niedrig und liegen meist unter 10 mg $\text{PO}_4\text{-P/m}^3$. Die Konzentrationswerte schwanken und vermindern sich dabei zeitweise, offenbar infolge Inkorporation durch Phytoplankton. Im Tiefenwasser kommt es zeitweilig zu Anreicherungen auf Größenordnungen zwischen 20 und 50 mg $\text{PO}_4\text{-P/m}^3$ und zwar im geschichteten, hypolimnisch zeitweise sauerstoff-freien See Walldorf wie auch in den thermisch nicht geschichteten Seen Forst und Wiesental, während im geschichteten See St. Leon und im ungeschichteten See Weingarten keine solche Anreicherung zu beobachten war.

Bei der Untersuchung dieser 5 Seen zeigte es sich ebenso wie aus den Vergleichsuntersuchungen an den 43 Baggerseen, daß die Gehalte an Total-Phosphor im Wasser erheblich höher waren als die von Orthophosphat. Im Mittel liegen diese Werte bei den Seen St. Leon und Weingarten um 50 mg P/m^3 , bei den Seen Forst, Wiesental und Walldorf meist zwischen 50 und 100 mg P/m^3 . Konzentrationsunterschiede zwischen oberflächennahen Wasserschichten und Tiefenwasser entsprechen dem Verhalten des Orthophosphats. So liegen im Baggersee Forst die Total-Phosphor-Werte im Tiefenwasser fast immer doppelt so hoch wie im oberflächennahen Wasser. Auch im See Wiesental sind sie zeitweise, wenn auch nur wenig, höher. Besonders extrem steigt der Total-Phosphor-Gehalt im Tiefenwasser des Sees in Walldorf während der sauerstofffreien Periode an; er erreicht hier Spitzenwerte von etwa 300 mg P/m^3 . Dieses Verhalten läßt auch Freisetzung von im Sediment deponierten Phosphorverbindungen unter den anaeroben Bedingungen schließen. Die Frage, ob dabei im einzelnen neben Orthophosphat organisch gebundener Phosphor in größerer Menge freigesetzt wird, ob freigesetztes Orthophosphat in größerem Umfang von Bakterien genutzt wird oder eine kumulative Adsorption des freigesetzten Orthophosphats an Schwebstoff-Partikel eintritt, ist ungeklärt.

Wie aus Untersuchungen des Kaliumpermanganat-Verbrauches, der in den Seen meist in einer Größenordnung von 10 mg/l liegt, hervorgeht, ist der Gehalt des Seewassers an reduzierbaren, wohl überwiegend organischen Substanzen relativ hoch. Aus den Untersuchungsergebnissen läßt sich z.Zt. noch nicht sagen, inwieweit diese Werte auf die Biomasse des Phytoplanktons zurückzuführen sind, da eine entsprechende Untersuchung noch nicht erfolgen konnte. Aus den Ergebnissen der hygienisch-bakteriologischen Untersuchungen an den Seen muß allerdings geschlossen werden, daß auch die Zufuhr organischer Stoffe in die Seen aus der Umgebung nicht unbeträchtlich ist. Im übrigen ist ein erheblicher Anstieg der KMnO_4 -Verbrauchswerte im See Walldorf im Tiefenwasser während der sauerstofffreien Zeit zu beobachten. Es ist anzunehmen, daß unter diesen Verhältnissen organische und zum Teil vielleicht auch anorganische Substanzen im Wasser in einen stärker reduzierten Zustand überführt werden, der zu einem erhöhten KMnO_4 -Verbrauch führt.

Die untersuchten 5 Baggerseen weisen erhebliche Mengen von Keimen heterotropher und gesamtcoliformer Bakterien auf. Nach den oben dargelegten hygienischen Maßstäben war lediglich das Wasser des Sees von St. Leon als einwandfrei zu bezeichnen, das Wasser des Sees Walldorf ist zu beanstanden, während der hygienische Zustand der anderen Seen zwischen einwandfrei und kritisch einzustufen ist. Da alle diese Seen keine direkten Zuflüsse besitzen, kommt als Quelle dieser Verschmutzung nur Bodeneinschwemmung durch Regenfälle sowie Einbringung von Keimen durch den Badebetrieb in Betracht. Dieser ist zum Teil beträchtlich. In den Seen Walldorf und St. Leon muß in heißen Jahren mit $150\,000$ Badegästen je Saison gerechnet werden. Die Keimdichte müßte vom Wasservolumen des Sees abhängig sein. Tatsächlich enthält z.B. der hygienisch zu beanstandende See Walldorf $200\,000 \text{ m}^3$, der hygienisch einwandfreie See St. Leon jedoch $2,9 \text{ Mio. m}^3$.

4. Untersuchungen am Testsee Langenbrücken

Die Untersuchungen am Testsee bei Langenbrücken erfolgten in erster Linie, um Wechselwirkungen zwischen dem Wasser von Baggerseen mit dem umgebenden Grundwasser näher zu erforschen, daneben auch um

zu klären, in welchem Maße das Anlegen von Baggerseen den Wasserhaushalt eines Gebietes beeinflusst. Untersuchungen mit dieser Zielsetzung erfolgten bereits an den 5 ausgewählten Seen durch Anlage von Grundwasserbrunnen ober- und unterstromig sowie seitlich des Sees. Sie führten zu keinen klaren Ergebnissen, weil die Zahl der Beobachtungsbrunnen zu gering war und Meßeinrichtungen beschädigt oder gestört wurden, da sie die Neugier vieler Badegäste hervorriefen.

Aus diesem Grunde wurde für ein ausgedehntes Beobachtungsprogramm eigens ein Baggersee auf Gelände im Staatsbesitz ausgebaggert und durch eine Umzäunung abgesperrt. Hier wurden Meßeinrichtungen auf dem See in Form einer Beobachtungsplattform und zahlreiche Grundwasserbeobachtungsbrunnen um den See eingerichtet. Aus den vertraglichen Abmachungen mit den Kiesbaggerunternehmen ergab sich allerdings eine Befristung der Untersuchungen bis zum Jahre 1980. Durch diese Maßnahmen ergab sich die Möglichkeit, kontinuierlich zu beobachten, wie sich ein freigesetzter Grundwasserkörper allmählich verändert.

Über Details dieser Untersuchungen haben Frau Dr. HERTKORN, Dr. BANOUB und Dr. RITTER auf diesem Symposium bereits referiert. Ich kann mich daher darauf beschränken, diese Darlegungen zu ergänzen und zusammenfassend zu bewerten. Erste Untersuchungsergebnisse wurden bereits in den Berichten LFU (1975) und LFU (1977) veröffentlicht. Nähere Angaben zur Anlage des Testsees und den Meßeinrichtungen enthalten Abb. 5 und 6. Die Ausbaggerung erfolgte vom Sommer 1972 bis Frühjahr 1973; seine Abmessungen sind 220 x 170 m (3,7 ha), seine durchschnittliche Tiefe beträgt 15 m, die Böschungsneigung unter Wasser 45° und über Wasser 33°. Die in näherer Umgebung des Sees fortgesetzten Baggerungen müssen bis 1980 einen Mindestabstand von 250 m einhalten. Zur Beobachtung der Grundwasserverhältnisse wurde gemäß der Abb. 5 eine Serie von Beobachtungsbrunnen in der vermuteten Grundwasserstromrichtung von Süd nach Nord eingerichtet sowie eine Brunnenserie in westlicher Richtung senkrecht dazu und in östlicher Richtung schräg dazu. Die angelegten Beobachtungsbrunnen hatten entsprechend der Abb. 6 unterschiedliche Tiefen, wobei teilweise die Entnahme des Grundwassers als Mischwasser aus verschiedenen Tiefen, teilweise jedoch als Wasser aus einer Tiefe mit bestimmtem Flurabstand erfolgte. Die Grundwasserbeobachtungsbrunnen lagen z.T. außerhalb der Umzäunung. Das umliegende Gelände wurde laufend landwirtschaftlich genutzt.

5. Entwicklung des limnologischen Zustandes des Testsees

Die Entwicklung des Seezustandes in den auf seine Entstehung folgenden Jahren soll zunächst an den Temperatur- und Sauerstoffverhältnissen erläutert werden (Abb. 7 und 8, S. 98 u. 99). Bereits im ersten Jahr nach Beendigung der Baggerarbeiten stellte sich während der Sommerzeit sogleich eine Temperaturschichtung ein. Die Wassertemperaturen waren dabei bei Beginn der Stagnationsperiode mit etwa 10° C bereits recht hoch und die Aufwärmung ergriff auch das Tiefenwasser, wo sich bis zum Juli Temperaturen von über 12° C einstellten. Im August bestand schließlich eine vertikale Temperaturschichtung zwischen 24° und 13°, mit einem sprunghaftähnlichen Gradienten von etwa 1° C/m im Bereich von 7 bis 10 m Tiefe. In der Folgezeit wies der See alljährlich ein monomiktisches Zirkulationsverhalten auf mit winterlicher Vollzirkulation, bei dem die Abkühlung jedoch oft nicht bis zum Dichtemaximum des Wassers von 4° C reichte. Im Winter 1975/76 lagen die

Wassertemperaturen darunter, jedoch ohne daß eine inverse Temperaturschichtung vorlag. Alljährlich erwärmte sich das Tiefenwasser auch während der Stagnationszeit, jedoch niemals mehr in dem Maße wie im ersten Jahr nach der Entstehung des Sees. Hieraus können wir schließen, daß der Grundwasserdurchstrom durch den See zu gering ist, um eine sommerliche thermische Schichtung des Seewassers zu unterdrücken.

Das Sauerstoffzustandsbild läßt bereits im ersten Jahr nach der Beendigung der Baggerarbeiten die Grundtendenzen des limnologischen Stoffumsatzes im neuen See erkennen (Abb. 8). Sie zeichnen sich durch hohe metalimnische Sauerstoffkonzentrationen während der Stagnationszeit (bis über 18 mg O₂/l) sowie durch ein Absinken der Sauerstoffgehalte über Grund (bis auf Werte unter 4 mg O₂/l) am Ende der Stagnationszeit aus. Eine Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser trat alljährlich während der Stagnationsperiode ein. Ihre Folgen verstärken sich allmählich: 1974, 1976 und 1977 wurden Werte unter 4 mg, unter 6 mg und 1978 2 mg O₂/l beobachtet. Wir können aus diesem Verhalten schließen, daß der See sofort nach Entstehung in ein relativ hochproduktives Stadium eingetreten ist. Der neu entstandene See muß daher von Anfang an als eutroph bezeichnet werden.

Dem entspricht sein gesamtes übriges hydrochemisches Verhalten, wie an Ergebnissen der Untersuchungen eines ausgewählten Jahres (1976) demonstriert werden soll. Im Nährstoffsystem ergibt sich die verhältnismäßig geringe Konzentration von Orthophosphat (Abb. 9a), bei gleichzeitig deutlich höherem Gehalt an Totalphosphat (Abb. 9b) (10 bis 20 mg P/m³). Nitrat-Stickstoff ist bei Konzentrationen von ca. 15 bis 25 mg N/l im Überfluß vorhanden (Abb. 9c). Die Abnahme des Nitrat-Stickstoffs im Bereich des sommerlichen metalimnischen Produktionsmaximums beträgt etwa 25 % gegenüber der Ausgangssituation im Frühjahr. Ferner wird eine beträchtliche jahreszyklische Abnahme des Siliziums (Abb. 9d) in den obersten 10 m von Größenordnungen von 3 mg SiO₄/l im Frühjahr auf weniger als 0,5 am Ende des Sommers beobachtet. Sie steht offensichtlich im Zusammenhang mit der Entwicklung von Diatomeenpopulationen.

Die Produktionsverhältnisse sind am Verteilungsbild der Alkalität, die den Verbrauch von anorganischem Kohlenstoff für die Photosynthese widerspiegelt, abzulesen. Die sommerliche Anreicherung der Alkalität (Abb. 9e) im Tiefenwasser zeigt photosynthetisch bedingte Kalziumkarbonatfällung an, was auch durch das Verteilungsbild des Kalziums (Abb. 9f) im See bestätigt wird. Der Gehalt an freier Kohlensäure (Abb. 9g) und die pH-Werte (Abb. 9h) entwickeln sich dementsprechend in der bekannten Weise. Da Kalzium- und Hydrogenkarbonat-Ionen unter den Mineralstoffen im Seewasser eine dominierende Rolle spielen, sieht das Verteilungsbild der Leitfähigkeitswerte (Abb. 9i) dementsprechend aus.

Das hohe Produktionsniveau im See ergibt sich aus den Zahlenwerten der Primärproduktion, des Chlorophylls, des partikulären organischen Kohlenstoffs und des partikulären organischen Stickstoffs (Abb. 10). Die Produktions-Maxima sind in größere Tiefen verlagert, unter Stagnationsbedingungen liegen sie im Metalimnion (Abb. 11). Chlorophyllgehalt sowie Primärproduktionsrate sind im Epilimnion sowie im Hypolimnion von etwa gleicher Größe, im Jahreszeitverlauf im Hypolimnion allerdings zeitlich verzögert gegenüber den Verhältnissen im Epilimnion (Abb. 12).

Im deutlichen Zusammenhang mit dem hypolimnischen Sauerstoffschwund in der Stagnationsperiode steht die Abnahme der Nitrate im Tiefenwasser (Abb. 9c); ihr steht keine äquivalente Ammoniumakkumulation (Abb. 9j) gegenüber, jedoch ist das Auftreten von Nitrit hier ebenfalls verstärkt (Abb. 9k).

Abbildung 7: Testsee Bad Langenbrücken

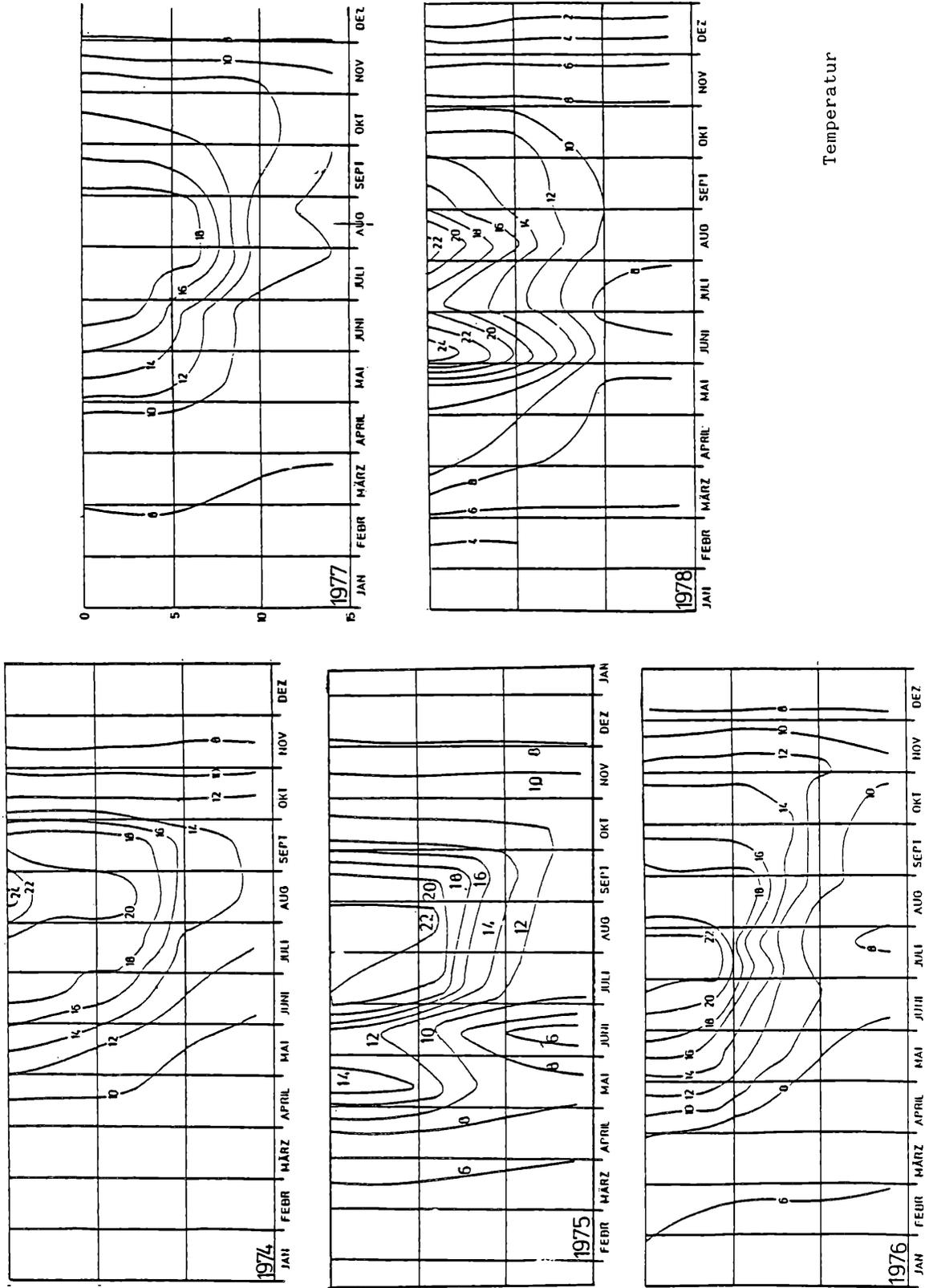


Abbildung 8: Testsee Bad Langenbrücken

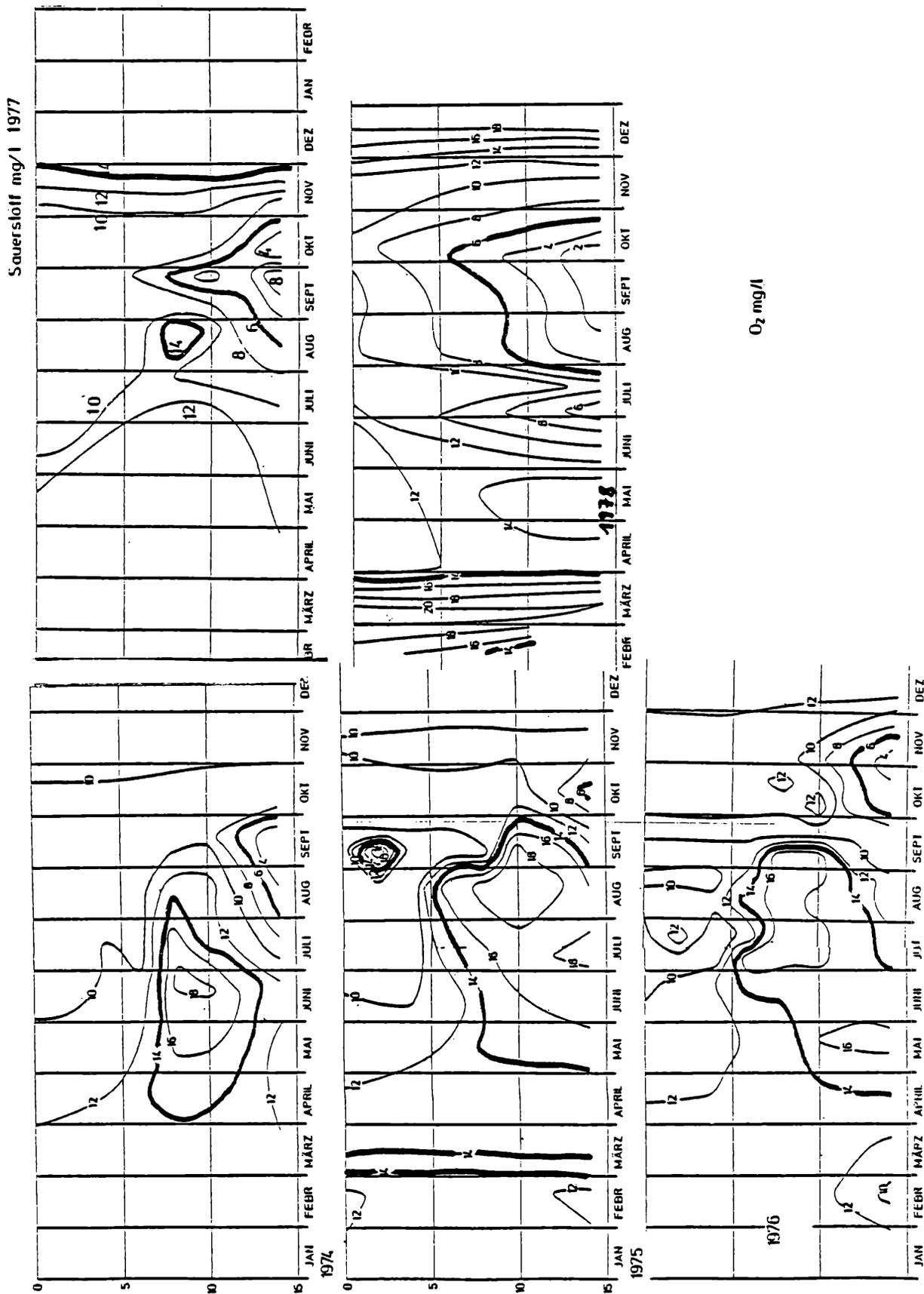


Abb. 9a - 9c: Testsee Bad Langenbrücken

1976

PO₄ - P mg/l

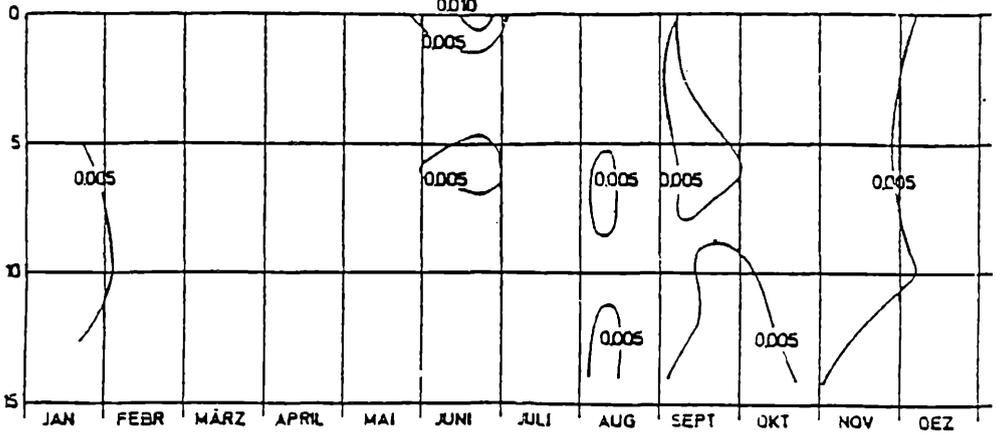


Abb. 9 a

Pt mg P/m³

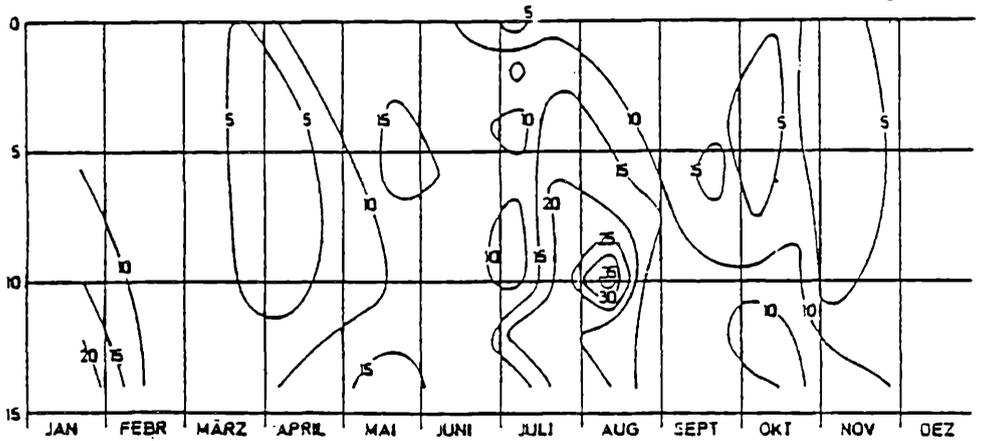


Abb. 9 b

NO₃ - N mg/l

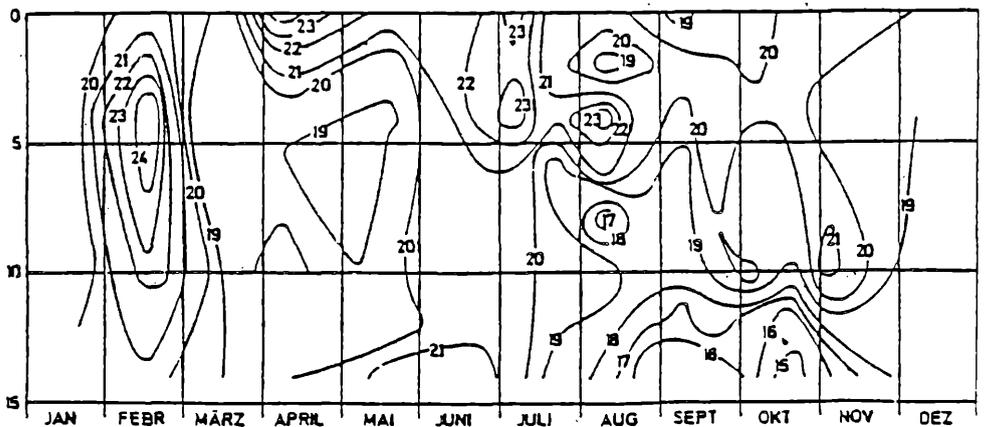
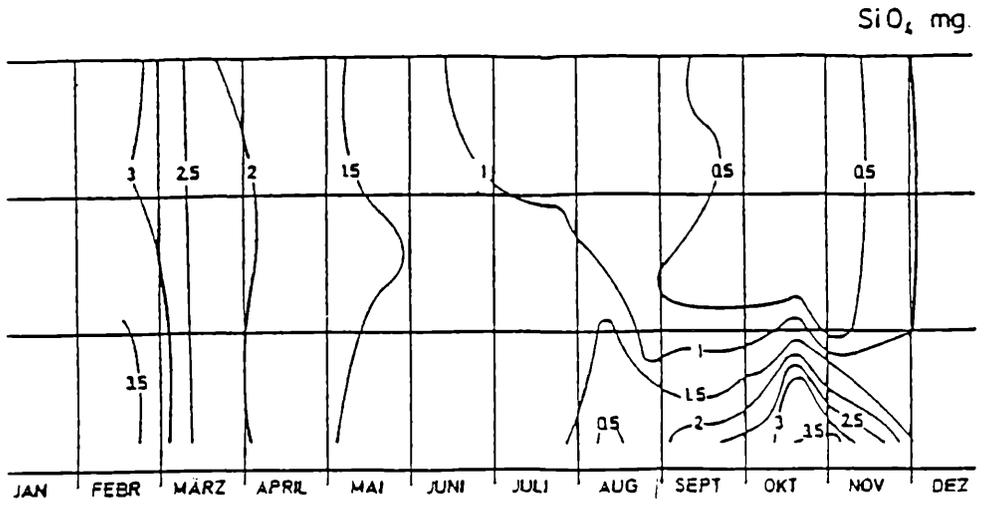


Abb. 9 c

Abb. 9d - 9f: Testsee Bad Langenbrücken

Abb. 9 d



1976

Abb. 9 e

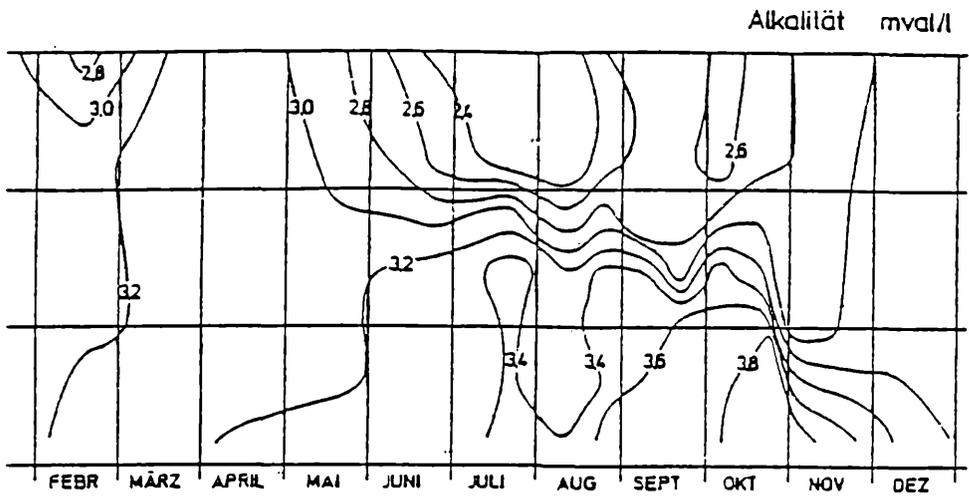


Abb. 9 f

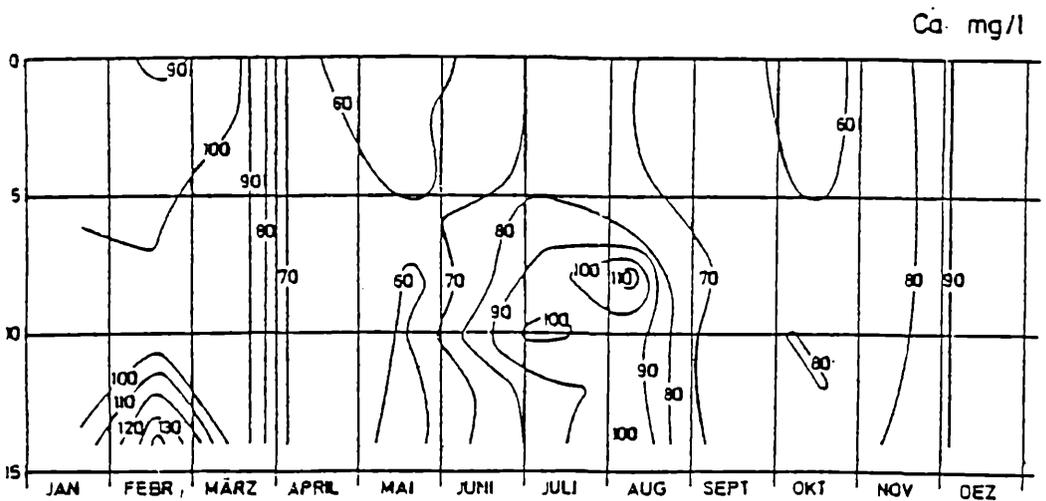


Abb. 9g - 9i: Testsee Bad Langenbrücken

Abb. 9 g

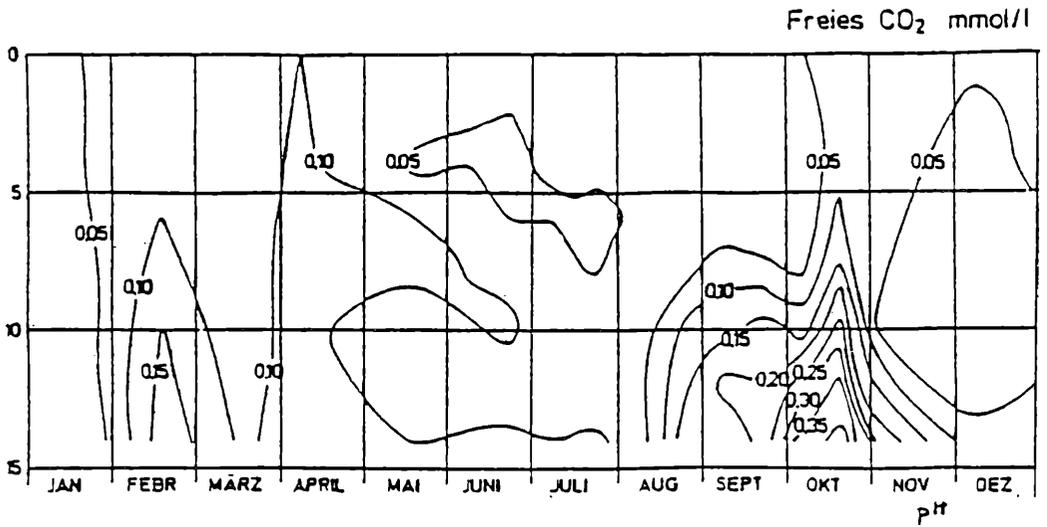


Abb. 9 h

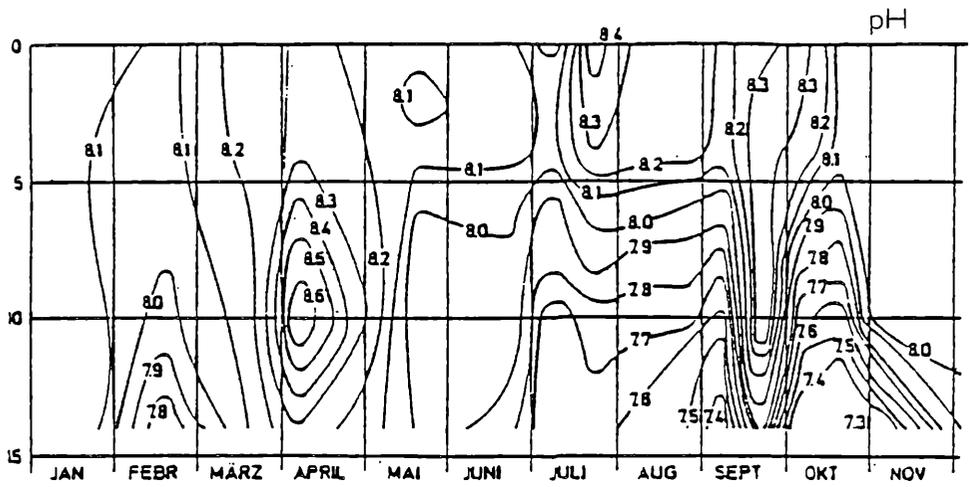


Abb. 9 i

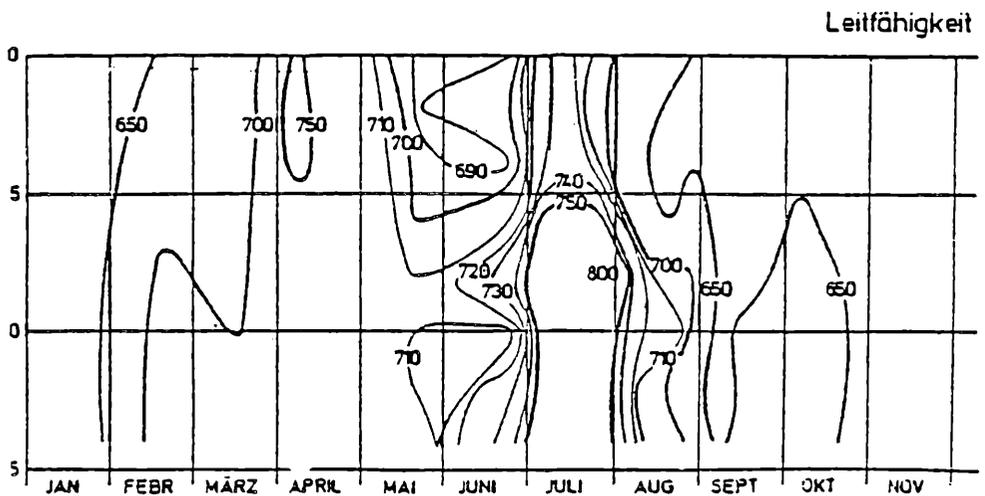


Abb. 9j 9l: Testsee Bad Langenbrücken

Abb. 9 j

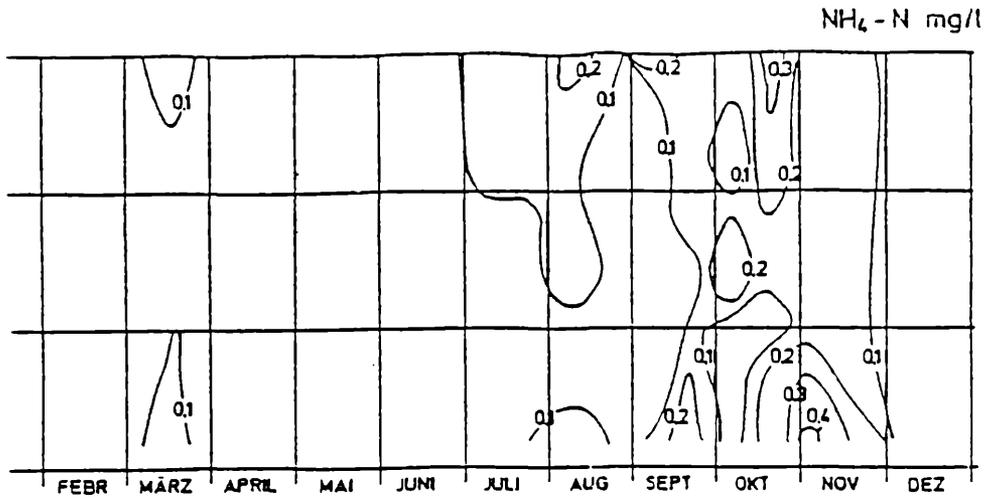


Abb. 9 k

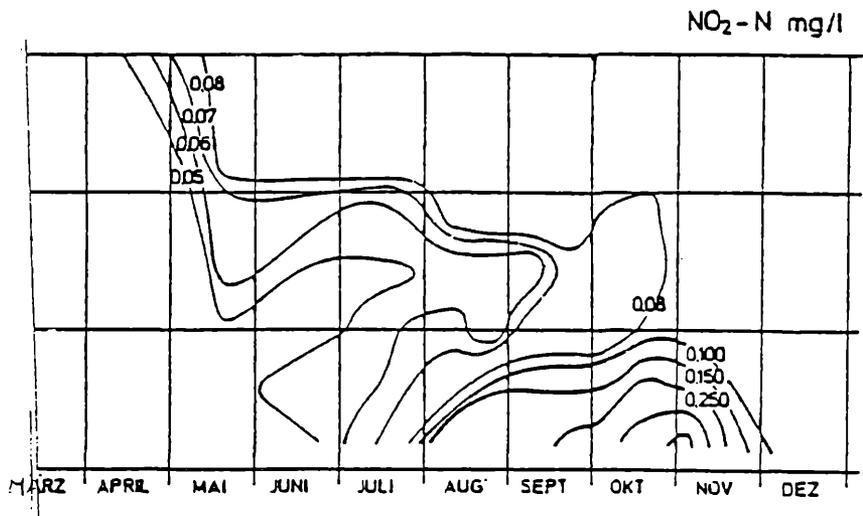


Abb. 9 l

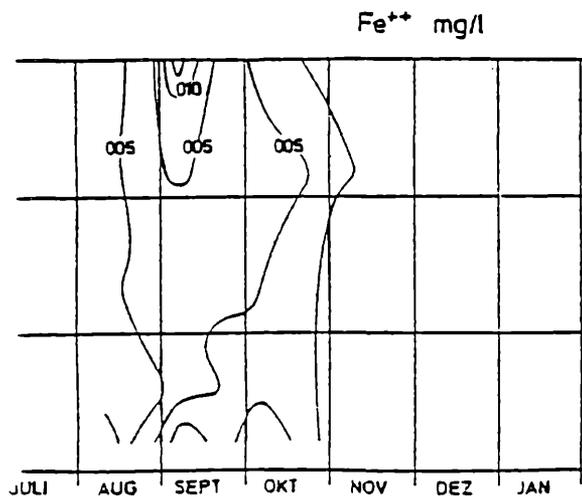


Abb. 9 m, 10, 12 und 13: Testsee Bad Langenbrücken

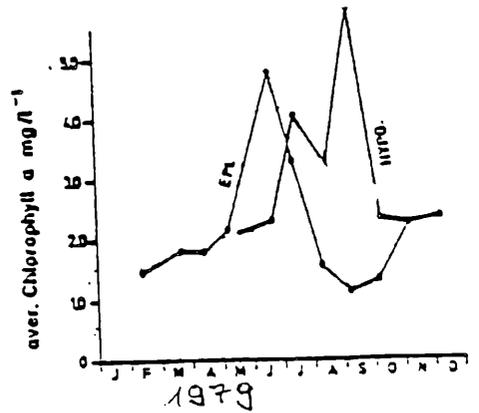
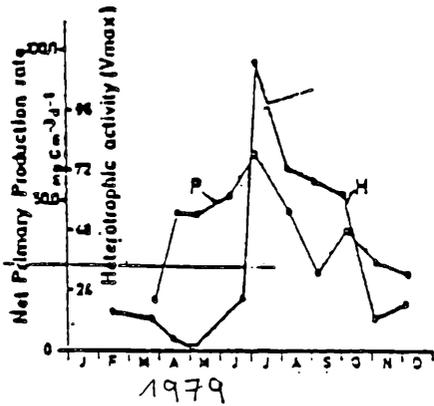
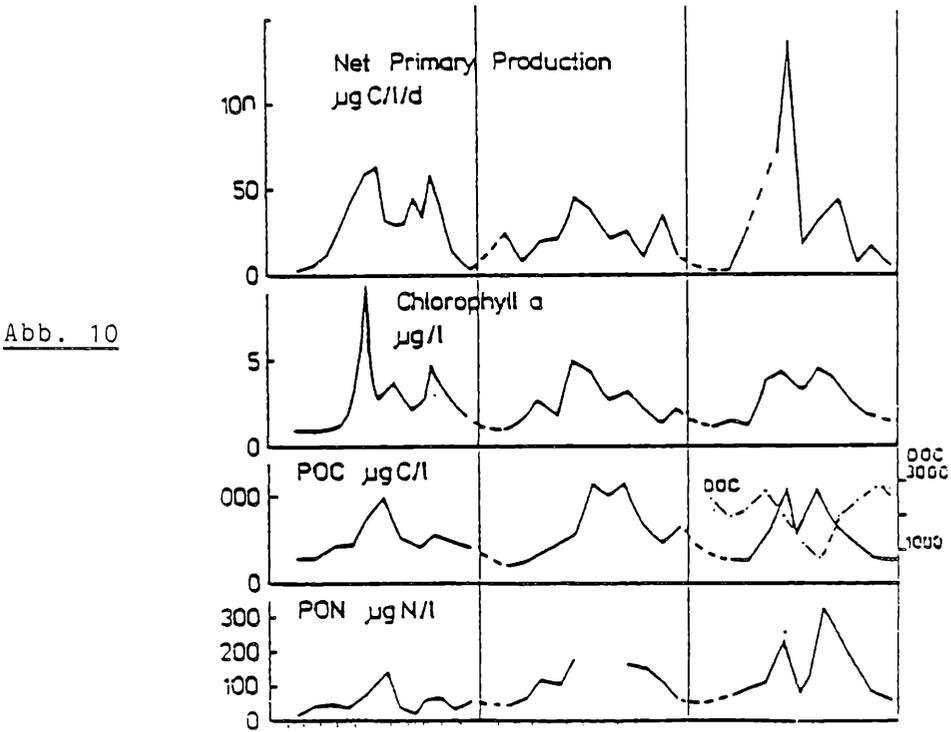
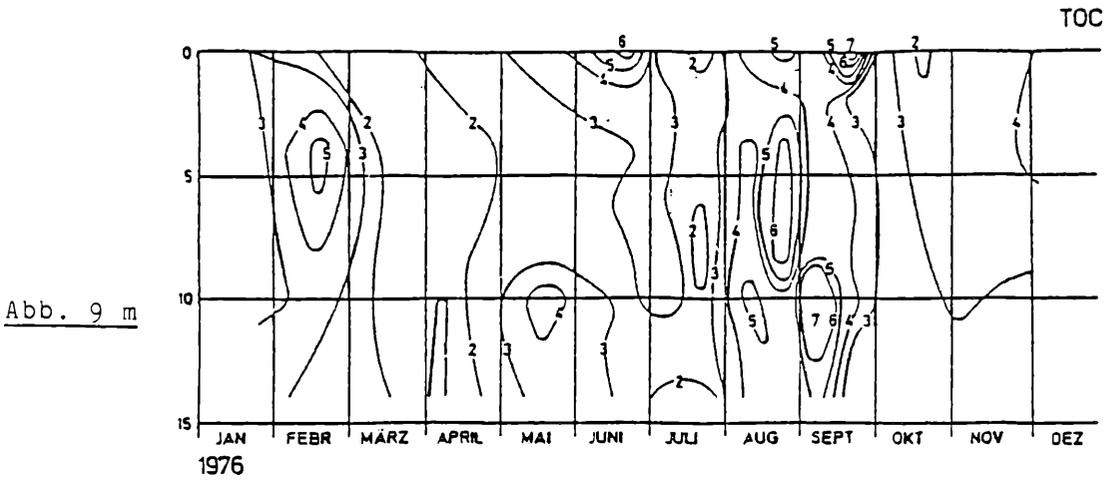
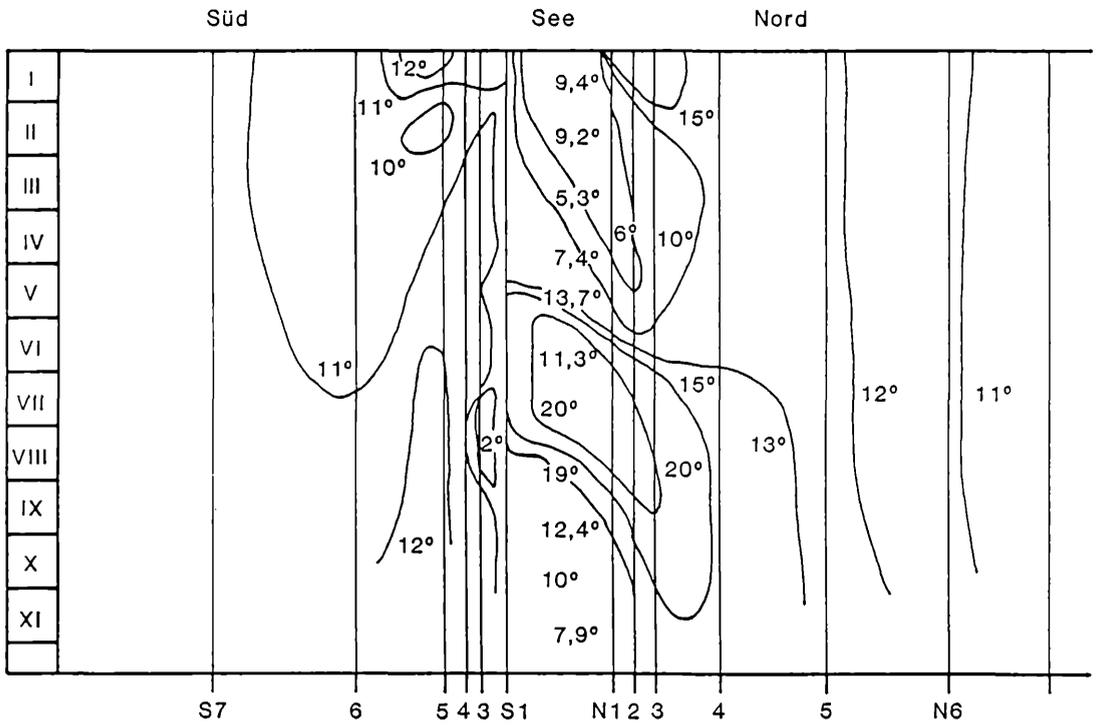


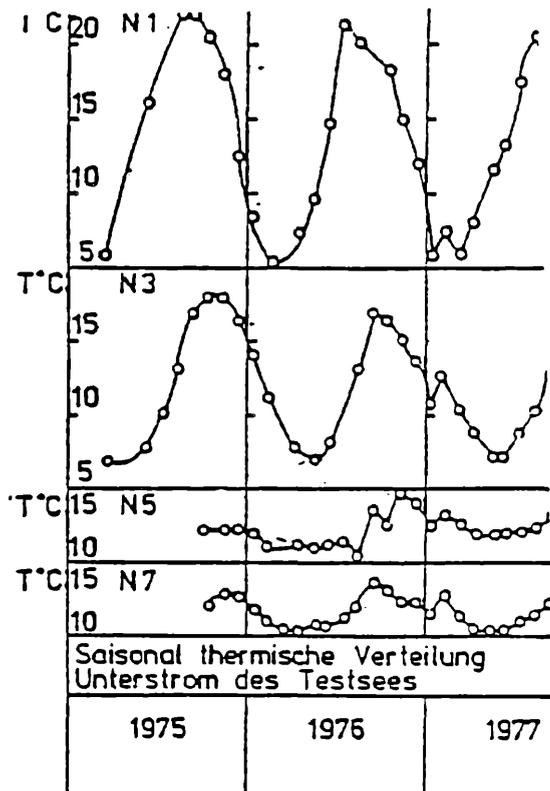
Abb. 15 und 16: Testsee Bad Langenbrücken

Abb. 15



Grundwasserisothermen am Testsee in Nord-Süd-Richtung (1976)

Abb. 16



Saisonal thermische Verteilung Unterstrom des Testsees

1975

1976

1977

Hieraus ist zu schließen, daß die Reduktion des Nitrats nicht in erster Linie zu einer Ammonifikation führt, sondern weitgehend zur Bildung von Stickstoff. Akkumulationserscheinungen in Seebodennähe sind auch beim Silikat zu beobachten (Abb. 9d) und stehen in Zusammenhang mit dem Sedimentieren und Absterben von Kieselalgen und möglicherweise mit dem Absinken der pH-Werte.

Die jahreszyklischen Verläufe des Chemismus stehen neben ihren Beziehungen zur Phytoplankton-Primärproduktion auch in engem Zusammenhang mit bakteriologischen Erscheinungen, darauf ist Dr. RITTER in seinem Referat bereits ausführlich eingegangen.

4. Beziehungen zwischen Grundwasser und Seewasser

Wie Dr. BANOUB bereits in seinem Vortrag ausführlich gezeigt hat, ändert das neuentstandene Seewasser seinen hydrochemischen Charakter gegenüber dem Grundwasser alsbald. Am auffälligsten ist die Abnahme des Kalziums und Hydrogencarbonats und damit der elektrolytischen Leitfähigkeit im Seewasser gegenüber dem Grundwasser, die Abnahme des Nitratgehaltes und die Sauerstoffanreicherung im Seewasser sowie die Veränderung des Temperaturverhaltens im See gegenüber dem Grundwasser. Aus diesen Veränderungen folgt, daß das Seewasser in deutlich erkennbarem Ausmaß in das unterstromige Grundwasser eintritt und daß dementsprechend eine gewisse Menge oberstromigen Grundwassers fortgesetzt in den See eintreten muß. Dieser Vorgang bestimmt das limnologische Verhalten des Sees erheblich, da auf diese Weise eine ständige Zufuhr von Nährstoffen und anderen Substanzen in den See erfolgt. Zur Beurteilung des limnologischen Systems der Baggerseen benötigt man daher unbedingt Daten über den Grundwasserdurchsatz des Sees. Wir hatten erhofft, daß die Wasserhaushalts-Bilanzuntersuchungen am Testsee und spezielle Traceruntersuchungen der Hydrologen über die Ausbreitung von Wasserströmen im Grundwasserkörper genaue Daten über den Zu- und Abstrom des Grundwassers in den Testsee liefern würden. Diese Erwartungen wurden enttäuscht, da sich herausstellte, daß das Fließverhalten des Grundwassers zu komplex war. Auch die Auswertungen der Grundwasserpegelschwankungen lieferten kein eindeutiges Bild. Daher wurde von uns am Testsee ein Tracerversuch durch Aufsalzen des Seewassers unternommen, der ein weiträumiges Verfolgen des Tracers im unterstromigen Grundwasser ermöglichte. Über diese Untersuchungen sowie die dabei verwendeten neuen Gerätschaften zur störungsfreien Gewinnung von Interstitialwasser aus dem Seegrund und der Umgebung des Sees hat Frau Dr. HERTKORN bereits ausführlich berichtet. Die Auswertung dieser Untersuchungen ist noch nicht abgeschlossen. Sie ist Voraussetzung, um zu entscheiden, inwieweit hydrochemische Veränderungen im unterstromigen Grundwasser gegenüber dem Seewasser auf Vermischung von Seewasser mit Grundwasser, Sorptionen, Ausfällungen, Freisetzungen oder andere Stoffumsetzungen im Untergrundbereich zurückzuführen sind. In dem Zusammenhang mit dem Problem des Wasserzu- und -abstroms des Sees steht die Frage der Durchlässigkeit des Seegrundes oder der Seeufer. Sie stellt sich ganz generell bei allen Infiltrationsvorgängen von Oberflächenwasser in Grundwasser oder umgekehrt. Sie hat größte wasserwirtschaftliche Bedeutung und berührt aufs engste das Problem der potentiellen Verschmutzung des Grundwassers durch Oberflächenwasser, das Problem der Wassergewinnung durch Uferfiltration und durch künstliche Grundwasseranreicherung. Baggerseen stellen als für Grundwasserströme durchlässige Gebilde eine potentielle Gefahr für Grundwasserverschmutzungen dar, wenn ihr Was-

ser selbst verunreinigt wird. Andererseits bieten sie die Möglichkeit zur Anreicherung von Grundwasser, wenn ihnen Oberflächenwasser zugeführt wird. Beide Vorgänge setzen voraus, daß Seeboden oder Seeufer durchlässig bleiben. Die Untersuchungen am Testsee haben bewiesen, daß eine erhebliche Durchlässigkeit vorliegt; es fragt sich nur, wie lange sie anhält. Die weitgehende hydrochemische Übereinstimmung der bei der Vergleichsuntersuchung in der Oberrheinebene erfaßten Seen deutet allerdings darauf hin, daß eine Durchlässigkeit über lange Zeiten gewährleistet ist. Allerdings haben verschiedene hydrologische Untersuchungsergebnisse zu der Vermutung geführt, daß es u.U. doch zu stärkeren Abdichtungen kommen kann. Dies wird aus längerfristigen Beobachtungen von Grundwasserpegelständen oberstromig und unterstromig im Vergleich zu Seepiegelständen an Baggerseen gefolgert. Wie schon im Baggersee-Bericht LFU (1975) näher beschrieben wurde, kann dabei auf eine zunehmende Verdichtung vom Seeboden und -ufer zum Grundwasser geschlossen werden, wenn die Seewasserpegelstände sich allmählich immer mehr den Grundwasserständen im Oberstrom annähern. Insgesamt erscheinen mir allerdings die Möglichkeiten, durch vergleichende Untersuchungen des Wasserdurchgangsverhaltens natürlicher Objekte Kenntnisse über Durchlässigkeits- und Verdichtungserscheinungen zu gewinnen, durch den damit verbundenen Aufwand zu begrenzt zu sein, als daß eine baldige Aufklärung der Probleme auf diese Weise zu erzielen wäre. Meine Vorstellungen gehen dahin, in stärkerem Maße als bisher Versuche in speziellen Versuchsanlagen im Feldmaßstab anzustellen, bei denen die unter Naturbedingungen außerordentlich zahlreichen Variablen möglichst weitgehend konstant gehalten werden. Unsere nächsten Vorhaben beziehen sich zunächst auf die Entwicklung von Untersuchungsmethoden für ein solches Vorhaben.

Es stellt sich abschließend die Frage, ob die Betrachtung der Beziehung von Seewasser zum Grundwasser bei limnologischen Studien von Seen generell bislang nicht vernachlässigt worden ist. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß in natürlichen Seen mit Sedimentablagerungen über mehrere tausend Jahre hinweg die Durchlässigkeit für Grundwasser sehr stark beschränkt sein kann und dieses Problem daher nicht so große Bedeutung hat wie speziell bei Baggerseen.

Natürlich erschöpfen sich die limnologischen Probleme der Baggerseen nicht mit den Aspekten, die ich in meinem Vortrag berührt habe. Fragen des Litorals, der höheren Wasservegetation und überhaupt vieles von der biologischen Komponente des limnischen Systems blieb unbehandelt. Ich hoffe trotzdem, dem Thema "Limnologie der Baggerseen" weitgehend entsprochen zu haben.

Aus limnologischer Sicht erweist es sich nach den Ergebnissen dieser Baggerseen-Untersuchungen als notwendig, zwei bisher weitgehend separat operierende Gebiete der Limnologie, nämlich die Untersuchung der Seen und die Untersuchung des Grundwassers miteinander zu koppeln. Ohne diese Synthese wird limnologisches Wissen um derartige Seen Stückwerk bleiben.

Anschrift des Verfassers:

Dr. W. Schmitz
Leitender Chemiedirektor
Landesanstalt für Umweltschutz
Hebelstr. 2
7500 Karlsruhe

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [6_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Schmitz W.

Artikel/Article: [Das limnische System der Baggerseen 90-107](#)