

Bor- und Phosphordynamik Berliner Gewässer und deren ökologische Bedeutung

Hans-Peter Blume, Theo Kempf, Sugiarto Muljadi, Radu Lăcătușu und Karl-Friedrich Andres

In four waters of Berlin with different human influence (Tegeler See, Oberhavel, Heiligensee, Pechsee) the B- and P-conditions were measured for some years. The boron- and phosphorus status of the Tegeler See was tried to balance for the year 1975. In laboratory experiments the influence of pH, redoxpotential and salt concentration upon adsorption and mobilization of boron and phosphorus was studied. The results were discussed with regard to biocoenoses of lakes and of ground water quality.

1. Einleitung

Den Berliner Gewässern werden seit langem (teilweise geklärte) Abwässer zugeleitet, die deren Zustand ständig verschlechtern haben. Unsere chemisch-ökologischen Untersuchungen der Jahre 1975/76, über die im folgenden erste Ergebnisse mitgeteilt werden sollen, erstrecken sich auf verschiedene Punkte des hypertrophierten Tegeler Sees und seine Hauptzuflüsse (Abb. 1); außerdem wurden zum Vergleich der Heiligensee und die Oberhavel - beide weniger belastet - sowie der kaum eutrophierte, im Grunewald gelegene Pechsee einbezogen. Es wurde vorrangig Bor und Phosphor untersucht, die beide vor allem über den Waschmittelverbrauch in die Gewässer gelangen. Dem Verhalten des Bors wurde bisher wenig Augenmerk geschenkt.

2. Bor- und Phosphorgehalte des Wassers

Die B- und P-Gehalte sowie vergesellschafteter Elemente wurden in 2-monatigem Abstand in mehreren Wassertiefen gemessen (zur Methodik automatisierter Bestimmung siehe KEMPF u. ANDRES (1977)). Die von Rieselfeldern und der Straßenkanalisation gespeisten Vorfluter Tegeler Fließ und Nordgraben erwiesen sich mit 3.6 bzw. 2.5 mg/l P und 0.6 - 0.7 mg/l B im Mittel der Sommerhalbjahre als stark belastet (Abb. 2). Im Epilimnion des Tegeler Sees nahmen die P-Gehalte ähnlich den N-Gehalten vom Hafen im Norden bis zum Havelausgang im Südwesten über eine Strecke von 5 km deutlich, die B-Gehalte etwas schwächer ab, was auf biologische Bindung sowie Akkumulation am Gewässergrund (vgl. Abb. 4) zurückzuführen ist. Außerdem werden N-Verluste durch Denitrifizierung eingetreten sein und in geringem Maße B-Verluste durch Verdunstung. Zeitweiliger Rückstau weniger belasteten Havelwassers hat allerdings verdünnend gewirkt, während eine Verdünnung durch Niederschläge kaum ins Gewicht fällt. Oberhavel und Heiligensee sind wenig belastet; ähnliches gilt für den Pechsee, bei dem eine einmalige Messung im Sommer 1975 0.03 mg/l P und 0.06 mg/l B ergab. Während der Winterhalbjahre lagen die N-Gehalte der Vorfluter etwas, die der Seen deutlich höher (geringere biologische N-Bindung und Denitrifizierung); P- und B-Werte unterscheiden sich demgegenüber kaum vom Sommerhalbjahr.

Tab. 1: Eigenschaften des Tegeler Sees (G) in unterschiedlicher Wassertiefe (O₂ in % der Sättigung, Eh in mV, übrige in mg/l; x) Porenwasser im oberen Sapropel).

m	°C	O ₂	Eh	P	B	NO ₃	NH ₄	Cl
23.6.76 (Stagnation)								
0.1	19.6	113	340	1.6	0.22	7.9	3.2	65
7.0	16.1	12	340	1.8	0.22	6.9	4.7	60
14.0	9.0	< 5	0	4.4	0.23	< 0.1	14	66
15.0 ^x)	8.8		-190	7.4	0.34	< 0.1	66	71
9.12.75 (Vollzirkulation)								
0.1	3.5	75	330	1.5	0.23	4.2	3.3	66
7.0	3.5	81	330	1.4	0.23	4.2	3.3	67
14.0	3.5	81	330	1.5	0.23	4.3	3.3	66
15.0 ^x)	3.6		-170	3.1	0.30	< 0.1	51	71

Bei den (dimyktischen) Seen kam es während der Stagnationsphasen besonders im Sommer zu dem bekannten deutlichen Phosphatanstieg mit zunehmender Wassertiefe, womit eine Abnahme der Sauerstoff- und Nitratgehalte sowie der Redoxpotentiale einherging (Tab. 1). Die Borkonzentrationen blieben demgegenüber im Epilimnion und Hypolimnion nahezu gleich, ja waren in letzterem bisweilen während der Zirkulationsphase geringfügig höher: Bor wurde demzufolge im Epilimnion im Gegensatz zu P biologisch kaum gebunden, während ein leichter Anstieg bei Vollzirkulation, möglicherweise durch Mobilisation aus dem subhydrischen Boden, erfolgte.

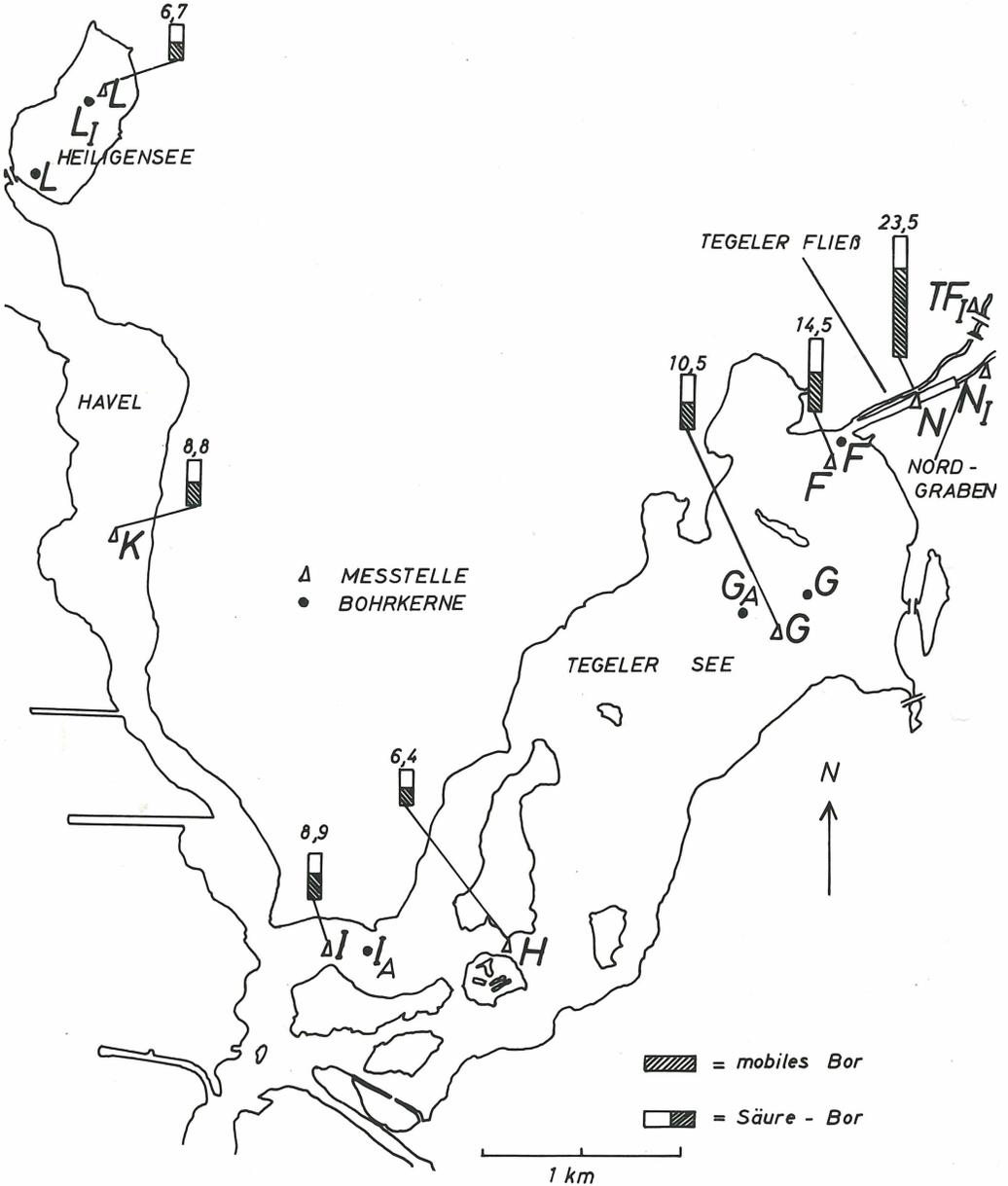


Abb. 1: Gewässer im Nordwesten Berlins mit Lage der Meßstellen und der gezogenen Bohrkerne sowie Borgehalte (in $\mu\text{g/g T.S.}$) junger Sedimente (Greiferproben der oberen 10 cm).

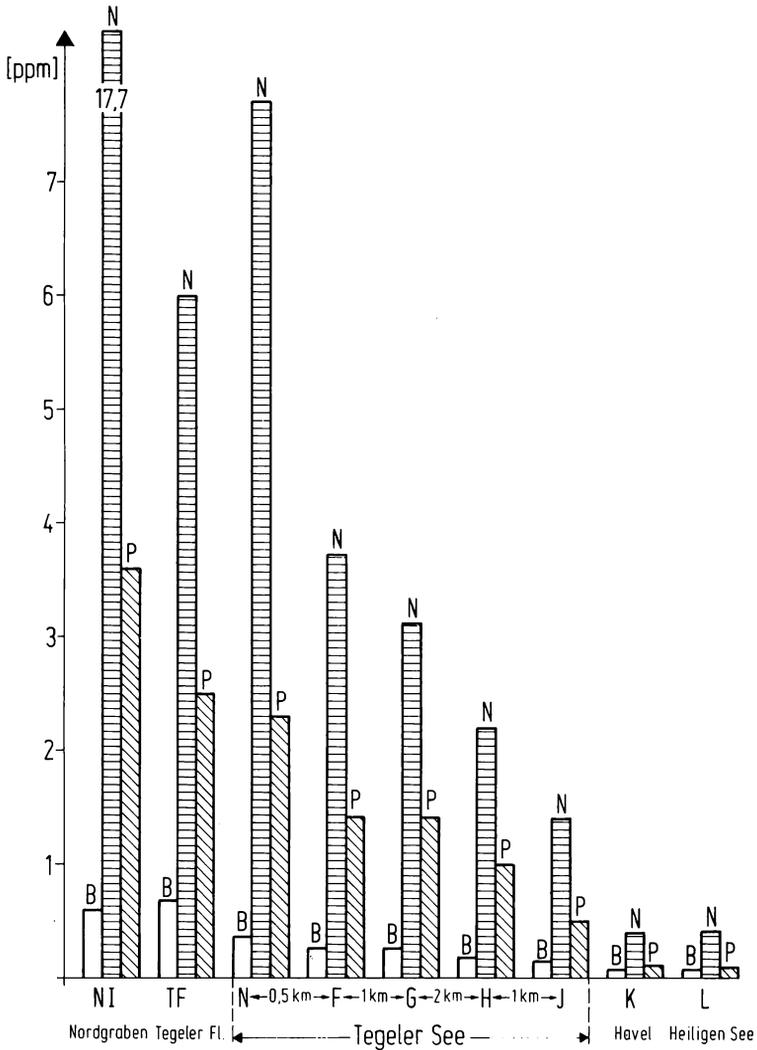


Abb. 2: Mittlere Konzentrationen von Bor (B), Stickstoff (N) und Phosphor (P) im Epilimnion Berliner Gewässer (Mai - Oktober 1975 u. 1976). Lage der Entnahmestellen s. Abb. 1.

3. Versuch einer Bor- und Phosphorbilanz

Die Bor- und Phosphorverhältnisse des Tegeler Sees wurden für das Jahr 1975 zu bilanzieren versucht (Abb. 3). Dabei stellen Wasserzufuhr durch Fließ und Nordgraben sowie die Versickerungsrate Schätzungen der Berliner Wasserwerke dar, während Wasser- und Stoffzufuhr durch kleine Einleitungen sowie zeitweiliger Havelrückstau unberücksichtigt bleiben mußten. Unsere Schätzungen ergaben eine Zufuhr von etwa 260 Tonnen P, von denen 70% am Gewässergrund akkumuliert wurden, 20-25% in die Havel und etwa 6% ins Grundwasser gelangten. Die im Wasser gelöste P-Menge erhöhte sich während des Jahres um etwa 2 Tonnen, was auch aus einer vom Berliner Senat für das Epilimnion ermittelten Verdoppelung der P-Konzentration während der letzten 10 Jahre abgeleitet werden kann. An Bor wurden dem See fast 50 Tonnen zugeführt, die zu etwa 20% in die Havel, zu rund 40% über Uferinfiltration und Versickerung am Seegrund ins Grundwasser gelangten, während ca. 40% in den subhydrischen Böden akkumuliert wurden und etwa 1% die Borkonzentration des Seewassers erhöhten. Letzteres bedeutet eine von uns angenommene Erhöhung der Borkonzentration um jährlich 5% aufgrund eines entsprechenden Anstiegs im Waschmittelverbrauch.

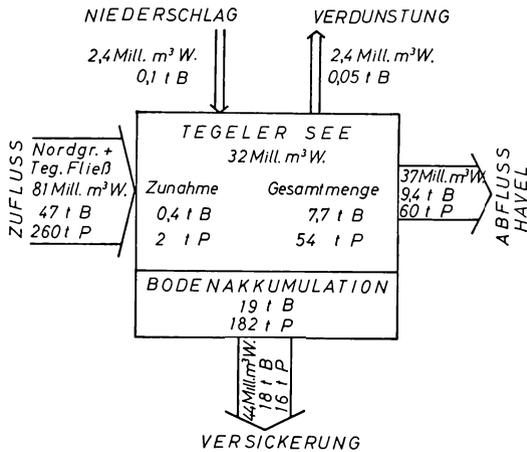


Abb. 3: Versuch einer Wasser-, Bor- und Phosphorbilanz des Tegeler Sees für das Jahr 1975.

4. Borbindung und Mobilisierbarkeit am Gewässergrund

Bohrkerne, die am Grunde des Heiligensees gezogen worden waren, zeigten einen relativ einheitlichen Borgehalt des Porenwassers von etwa 0.2 ppm und der Sedimente von etwa 10 ppm an säurelöslichem B (Extraktion mit 0.5 M H₂SO₄ nach Veraschung bei 500°C). Ein im Nordteil des Tegeler Sees gezogener Bohrkern wies demgegenüber deutlich höhere Borgehalte auf (Abb. 4). Auch die jüngsten Sedimente (Greiferproben der oberen 10 cm) von Heiligensee, Havel und Tegeler See enthielten nur 6-10 ppm an säurelöslichem Bor, von dem die Hälfte mit kochendem Wasser (nach BERGER u. TRUOG 1944) extrahierbar, mithin sehr mobil war (Abb. 1). Unterschiede zwischen den Entnahmestellen sind auf unterschiedliche Sedimenteigenschaften (Carbonat-, Humus- und Tongehalte) zurückzuführen. Im Nordteil des Tegeler Sees und vor allem im Hafenbecken lag mit Gehalten zwischen 14 und 24 ppm wiederum eine deutliche Anreicherung vor, und zwar vor allem mit mobilem Bor. Waschmittelborate wurden hier demnach in leicht mobilisierbarer Form akkumuliert.

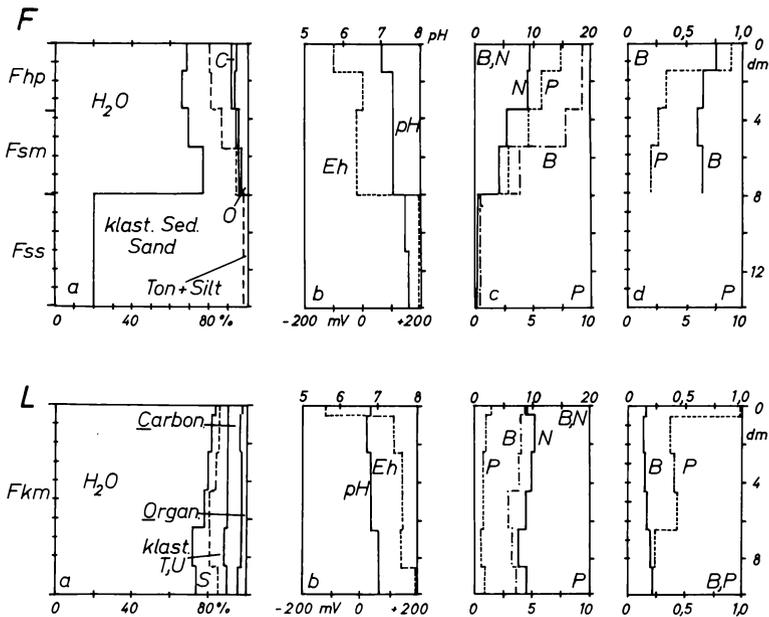


Abb. 4: Eigenschaften der Sedimente des Tegeler Sees und des Heiligensees.

- Fhp: Sapropel, Fsm: Sandmudde, Fss: Feinsand, Fkm: Kalgyttja;
- a: Poren- und Substanzvolumen mit Anteil an Carbonaten, Silicaten u. org. Substanz;
- b: pH und Eh des Porenwassers;
- c: P, N (in mg/g) u. B (in µg/g) der trockenen Sedimente;
- d: B u. P des Porenwassers in mg/l.

Zwecks Studium des Borbindungsvermögens der Sedimente wurden Schüttelversuche mit frischen Schlämmen bei variiertem Borangebot und pH durchgeführt. Dabei ergab sich einmal eine deutliche Abhängigkeit des Borbindungsvermögens vom pH-Wert: Bei niedrigem pH-Wert ging sogar Bor in Lösung (Abb. 5). Bor wird nämlich nur als Boration in nennenswertem Maße sorbiert: Im sauren Bereich liegt es aber überwiegend als undissoziierte Borsäure vor (INGRI 1963). Oberhalb pH 9.5 nimmt die Borbindung dann wieder ab (MULJADI u. BLUME 1977). Der Schlamm des Heiligensees vermochte bei gleichem pH-Wert und B-Angebot mehr Bor zu binden als der des Tegeler Hafens (Abb. 5), obwohl letzterer mehr organische Substanz und Ton enthält (Tab. 2), mithin eine höhere Sorptionskapazität aufweisen müßte. Offenbar ist das auf die sehr viel stärkere Konkurrenz anderer Anionen zurückzuführen, vor allem die des Phosphates. Das Bor-Bindungsvermögen am Gewässergrund scheint also mit zunehmender Hypertrophierung des Gewässers abzunehmen.

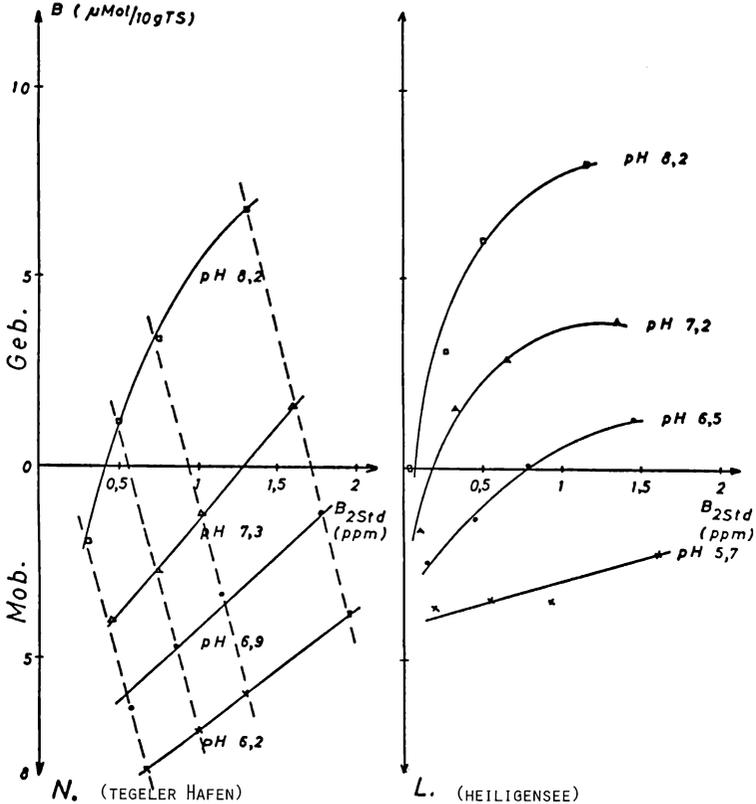


Abb. 5: Beziehung zwischen B-Gehalt einer Gleichgewichtslösung (10 g frischer Schlamm mit 25 ml H_2O nach 2stündigem Schütteln) und zusätzlich sorbiertem bzw. mobilisiertem Bor eines Sedimentes (obere 10 cm) des Tegeler Hafens (N) und des Heiligensees (L) bei variiertem pH-Wert (Einstellung durch HCl- bzw. NaOH-Zusatz) und Borangebot (0 bis 1.5 ppm der Gleichgewichtslösung).

5. Phosphatbindung und Mobilisierbarkeit am Gewässergrund

Die P-Gehalte (HF/HClO_4 -Aufschluß) der Sedimente des Heiligensees und des Pechsees liegen bei 2‰ (Tab. 2, Abb. 4). In den jüngsten Sedimenten des Tegeler Sees ist Phosphat hingegen stark angereichert. Zur Klärung der Bindungsformen wurde von LACATUŞU eine Fraktionierung nach CHANG u. JACKSON (1957) vorgenommen, bei der auf Grund unterschiedlicher Löslichkeiten gegenüber Salzlösungen, Reduktionsmitteln, Säuren und Laugen zwischen Austausch-, Eisen-, Aluminium- und Calcium-Bindung unterschieden werden kann. Das nicht Extrahierbare wurde als silicatisch gebunden angenommen. Organisch gebundenes Phosphat wurde nach MEHTA et al. (1954) bestimmt und von der Al-Fe-Fraktion (NH_4F - u. NaOH-Extraktion) subtrahiert. Wegen unzureichender Trennschärfe der Extraktionsmittel vermitteln die Daten allerdings nur eine grobe Vorstellung der Bindungsformen (Tab. 2).

Tab. 2: P-Status junger Sedimente Berliner Gewässer (obere 10 cm)
Methoden der allgemeinen Charakterisierung s. SCHLICHTING u. BLUME
(1966), der P-Fraktionierung s. CHANG u. JACKSON (1957).

a) Eigenschaften der Sedimente

Probe	frischer Schlamm			% Trockensubstanz				% T.S.	
	pH	mV Eh	% Tr.Sub.	org.S.	CaCO ₃	Silicate Σ Ton		Oxal.löslich Fe	Al
Hafen Tegel (N)	6.8	-220	19	28	8	64	10	37	3
Tegeler See (G)	7.7	- 60	15	22	29	49	16	27	2
Heiligensee (L)	6.8	- 30	14	19	42	39	12	6	1
Pechsee (P)	6.2	-140	4.3	75	0	25	2	3	

b) Phosphat-Bindungsformen

Probe	P in mg/g T.S.							mg/l		P in % der Fraktionssumme				
	aust.	org.	Al+Fe	Ca	Sil.	Σ	Ges.	Porenw.	Was.	aust.	org.	Al+Fe	Ca	Sil.
Hafen Tegel (N)	0.12	0.43	13.75	4.39	0.09	18.7	19.0	50	2.7	0.6	2.3	74	23	0.5
Tegeler See (G)	0.04	0.50	2.55	3.20	0.07	6.4	6.7	10	1.4	0.6	7.8	40	50	1.1
Heiligensee (L)	0.05	0.26	0	1.31	0.05	1.7	1.8	6	0.16	3.0	16	0	78	3.0
Pechsee (P)	0.01	0.68	1.17	0.04	0.15	2.1	2.5	0.05	0.03	0.5	33	57	2.0	7.3

Dennoch ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Sedimenten. Beim Heiligensee dominiert Ca-Phosphat, was mit dem hohen Kalkgehalt dieser Kalkgyttja recht gut im Einklang steht. Auch das kalkreiche Sapropel des Tegeler Sees zeigt einen hohen Anteil an Ca-Phosphaten. In dem schwach sauren Dy des Pechsees ist Phosphat hingegen überwiegend an Eisen bzw. Aluminium gebunden. Eine nennenswerte organische Bindung liegt nur beim (von Moor umgebenen) Pechsee vor. Die beiden hypertrophen Gewässer Tegeler Hafen und See scheinen P stark als Fe(II)-Phosphat bzw. Vivianit zu binden. Hier erfolgte offenbar eine stärkere abiotische Bindung, was mit der von ATRI et al. (1978) beobachteten, mäßigen Phytoplanktonentwicklung im Einklang steht.

Zwecks Erhellung der Vorgänge im Grenzbereich Wasserkörper/Sediment wurden Schüttelversuche mit frischem Schlamm, variiertem P-Angebot sowie variiertem pH-Wert und Redoxpotential durchgeführt. Die P-Konzentration der Gleichgewichtslösung ohne P-Zusatz ergab die erwartete, starke Abhängigkeit vom Eh-Wert. Die Gleichgewichtslösung des Sapropels aus dem Tegeler Hafen enthielt nämlich im belüfteten Zustand nur 0.6 mg/l P, im stark reduzierten Zustand (-320 mV) hingegen 500 mg (Abb. 6). Für ein Redoxpotential von -200 mV, das am Standort dominiert, können 50 mg/l P dem Kurvenverlauf entnommen

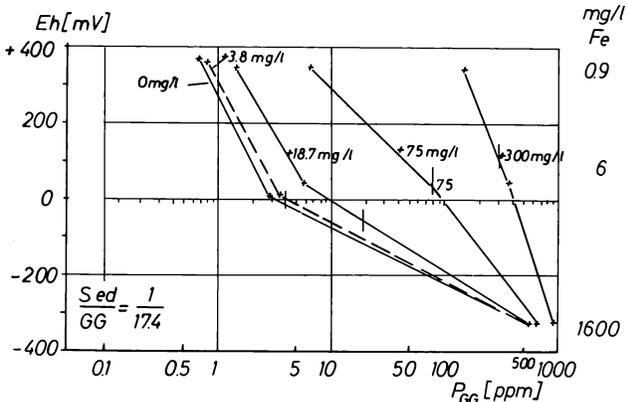


Abb. 6: P-Gehalte und Fe-Gehalte der Gleichgewichtslösung eines frischen Schlammes (10 g + 25 ml H₂O) des Tegeler Hafens nach 2stündigem Schütteln mit 0-300 mg/l P-Zusatz als KH₂PO₄ bei pH 6.2 und variiertem Eh (-330 mV durch Na₂S₂O₄ + N₂, 20 mV durch N₂-Atm., + 380 mV durch O₂-Atm.).

werden: Eine solche Konzentration wurde wiederholt im Porenwasser dieses Schlammes ermittelt (Tab. 2). Die ermittelten Unterschiede korrespondieren mit entsprechenden Differenzen im Fe-Gehalt der Gleichgewichtslösung, was die Vermutung starker Fe-Bindung stützt. Eine P-Zugabe von 3.8 mg/l (entsprechend der gegenwärtigen P-Konzentration des Nordgrabens) wurde vom belüfteten Schlamm vollständig gebunden, bei $Eh \pm 0$ noch zu 60%, bei -320 mV hingegen überhaupt nicht; selbst extrem hohe Zugaben von 300 mg/l blieben bei -320 mV vollständig in Lösung, während sie bei -40 mV, einem im Übergangsbereich Hypolimnion/Sediment dieses Gewässers wohl vorherrschenden Eh-Wert, zu über 90% gebunden wurden. Das Selbstreinigungsvermögen dieses belasteten Gewässers hängt also sehr stark von den Sauerstoffverhältnissen ab.

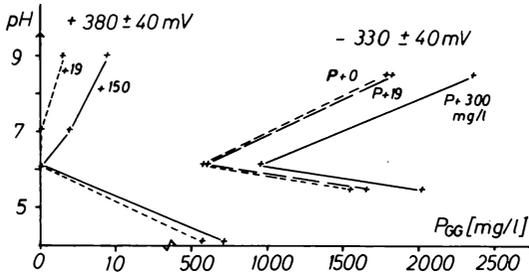


Abb. 7: P-Gehalte der Gleichgewichtslösung eines frischen Schlammes des Tegeler Hafens (Eigenschaften s. Tab. 2) bei variiertem P-Angebot, Redoxpotential (Versuchsansatz Abb. 6) und pH (Erhöhung durch NaOH-, Senkung durch HCl-Zusatz; Messung der P-Gehalte, pH- und Eh-Werte n. 2stündigem Schütteln).

Die Experimente mit variierten pH-Verhältnissen ergaben sowohl nach pH-Erniedrigung durch HCl-Zusatz als auch nach pH-Erhöhung durch Na_2CO_3 -Zusatz eine verstärkte P-Freisetzung beim Sapropel Tegels (Abb. 7) und beim Dy des Pechsees (Abb. 8), was sicherlich nicht allein mit einer Verdrängung durch die zugesetzten Anionen erklärt werden kann. Auch PEINEMANN (1975) stellte im Gegensatz zu verbreiteter Ansicht (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1976) für Schwebstoffe südwestdeutscher Fließgewässer mit hohem Anteil an Al/Fe-Oxiden ein Mobilitätsminimum bei pH 6 fest. Da eine pH-Erhöhung von 6 auf 8 die Fe-Gehalte der Gleichgewichtslösung stark verminderte (z.B. bei N unter reduzierten Bedingungen von 1700 mg/l Fe auf 8), weil sich Fe II-hydroxide bzw. Siderit bildete, nehmen wir an, daß die pH-Erhöhung eine Umformung von Vivianit bewirkte, wobei P freigesetzt wurde. Eine pH-Erniedrigung von 6 auf 5 löste hingegen offensichtlich Ca-Phosphat, dem Vivianitbildung kaum entgegen wirkte, weil es bei einem pH-Wert um 5 bereits stärker löslich ist.

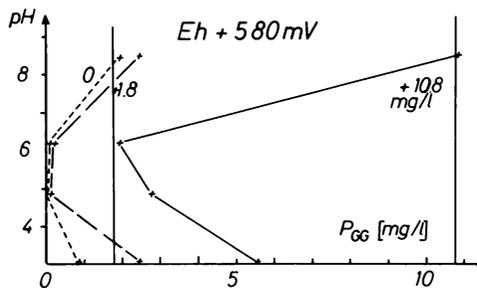


Abb. 8: P-Gehalte der Gleichgewichtslösung eines frischen Schlammes des Pechsees (Eigenschaften s. Tab. 2) unter belüfteten Verhältnissen bei variiertem pH-Wert und P-Angebot (Versuchsansatz analog Abb. 7).

6. Schlußfolgerungen

Das Selbstreinigungsvermögen durch Bindung im Sediment sowohl der wenig belasteten als auch der hypertrophen Berliner Gewässer ist für Phosphate bei den gegebenen pH-Werten von 6-8 recht hoch, dabei aber in besonderem Maße vom Redoxpotential abhängig. Daraus ergibt sich besonders in tiefen Tegeler See (max. 16 m) die Möglichkeit starker P-Mobilisierung in Stagnationsphasen. Trotz einer vom Land Berlin eingeleiteten Sanierung

durch Einschalten einer P-Eliminierungsanlage werden daher hohe P-Konzentrationen noch für längere Zeit im Wasserkörper vorherrschen. Eine zusätzliche Belüftung des Hypolimnions würde die P-Mobilität senken; in Gewässerbereichen mit geringen oder fehlenden Kalkgehalten der Sedimente bzw. geringem Puffervermögen würde das aber den pH-Wert senken und u.a. Bor mobilisieren. Bor wird nämlich schwächer gebunden als Phosphor und geht bereits bei geringer pH-Erniedrigung wieder in Lösung. Inwieweit höhere Borkonzentrationen ein Gewässerökosystem negativ beeinflussen, läßt sich derzeit nicht genau sagen. Bisher nur vereinzelt durchgeführte Versuche haben eine große Toleranz submerser Wasserpflanzen (LABUS et al. 1977), von Sumpfpflanzen (ATRI et al. 1978) und Fischen (MANN 1973) ergeben, während Wasserflächen nach amerikanischen Untersuchungen bereits bei Konzentrationen zwischen 0.5 - 1 mg/l geschädigt werden können, die in den hypertrophen Gewässern Berlins herrschen.

Wir danken Herrn Dr. Grosch vom Fischereiamt Berlin für wertvolle Unterstützung bei Probennahme und physikalischen Messungen im Gewässer sowie dem Bundesinnenminister für die Finanzierung der Untersuchungen.

Literatur

- ATRI F., BORNKAMM R., OVERDIECK D., 1978: Einfluß der Gewässereutrophierung auf *Phragmites australis*. Verh. Ges. f. Ökologie (Kiel 1977).
- BERGER K.C., TRUOG E., 1944: Boron tests and determination for soils and plants. Soil Sci. 57: 25-36.
- CHANG S.C., JACKSON M.L., 1957: Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84: 133-144.
- INGRI N., 1963: Equilibrium studies of polyanions containing BIII, SiIV, GeIV and VV. Svensk Kemisk Tidskr. 75: 199-230.
- KEMPF Th., ANDRES K.-F., 1977: Die Automatisierung von Analysenverfahren für die Bestimmung von Boraten, Sulfaten und Nitraten in Wasserproben. Chemie f. Lab. u. Betrieb :229-232.
- LABUS B., NOBEL W., SMETANA R., KOHLER A., 1977: Der Einfluß der Abwassersubstanzen Marlon A und Bor auf die Photosyntheserate einiger submerser Makrophyten. Verh. Ges. f. Ökologie (Göttingen 1976): 325-333.
- MANN H., 1973: Untersuchungen über die Wirkung von Borverbindungen auf Fische und einige andere Wasserorganismen. Arch. Fisch. Wiss. 24: 171-175.
- MEHTA N.C., LEGG J.O., GORING C.A., BLACK C.A., 1954: Determination of organic phosphorus in soils. Soil Sci. Soc. America Proc. 18: 443-449.
- MULJADI S., BLUME H.-P., 1977: Borstatus subhydrischer Böden Berlins. Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 25: 221-232.
- PEINEMANN N., 1975: Phosphat-Verteilung in Landschaften Südwestdeutschlands. Diss. Hohenheim.
- SCHIEFFER F., SCHACHTSCHABEL P., 1976: Lehrbuch der Bodenkunde, 9. Aufl. Stuttgart (F. Enke).
- SCHLICHTING E., BLUME H.-P., 1966: Bodenkundliches Praktikum. Berlin (Parey).

Adressen

Prof. Dr. Hans-Peter Blume
Dipl.-Chem. Sugiarto Muljadi
Inst. f. Ökologie d. Techn. Universität
Engler-Allee 19-21
D-1000 Berlin 33

Dr. Th. Kempf
Chem.-Ing. K.-F. Andres
Inst. f. Wasser-, Boden- u. Lufthygiene
d. Bundesgesundheitsamtes Berlin
Corrensplatz 1
D-1000 Berlin 33

Dr. Radu Lăcătuşu
Akademie d. Land- u.
Forstwirtschafts-
wissenschaften
B-dul Marasti Nr. 61
Bukarest
Rumänien

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1978

Band/Volume: [7_1978](#)

Autor(en)/Author(s): Blume Hans-Peter, Kempf Theo, Muljadi Sugiarto, Lacatusu Radu, Andres Karl-Friedrich

Artikel/Article: [Bor- und Phosphordynamik Berliner Gewässer und deren ökologische Bedeutung 323-330](#)