

Uwe SELIG

Sedimentologische Untersuchungen am Tiefen See bei Güstrow: Nährstoffgehalte, Nährstoffbindungen und Porenwasseranalysen

Abstract

The chemical stratigraphy of sediment cores (10m) was used to document past anthropogenic impacts on the water quality of the lake Tiefer See in Mecklenburg-Pommern, North Germany. Dry weight, loss on ignition, carbon, nitrogen, phosphorus, iron, aluminium and P-binding were analysed. In the surface sediment (to 40 cm) dissolved nutrients were determined in the pore water.

Vertical stratification were only found in the upper 40 cm sediment. Oxidic P-binding play an unimportant role in the sediment overlying. Organic bound phosphorus is the dominant binding in the upper 40 cm. The highest phosphorus concentration was analysed in the depth 340cm not in the surface sediment. BD-SRP, NaOH-SRP and NaOH-NRP were the dominate phosphorus fraction in the deeper sediment cores. Anthropogenic impacts on the water quality were not found.

1 Einleitung

Sedimente als Gedächtnis der Gewässer liefern Aussagen über deren geschichtliche Entwicklung. Neben der Analyse verschiedener Organismengruppen wie Diatomeen und Ostracoden geben Nährstoff- und Metallgehalte Auskunft über die trophische Entwicklung der Gewässer (DIXIT et al. 1992, ENGSTROM et al. 1985, ROWELL 1996). Bei der Leitbildfindung, welche heute Grundlage vieler Bewertungsansätze für Gewässer ist, kann so ein Beitrag zur Definition des historischen und ökologischen Leitbildes geliefert werden. Gerade zur Fragestellung des ökologischen Leitbildes ist die Entwicklung der letzten 100-200 bzw. 2000 Jahre (Subatlantikum) von Bedeutung, da sich hier die wesentlichen anthropogenen Veränderungen vollzogen haben. Dabei kann die Gegenüberstellung von oligo-mesotrophen See und eu-polytrophen See aus einer geographischen Region Ansatzpunkte für Leitbildfindung und Sanierungs/ Restaurierungskonzepten liefern.

Sedimente sind aber nicht nur eine Stoffsenke, sondern auch ein interner Nährstoffpool, durch den eine Nährstoffversorgung möglich ist. Deshalb spielt die benthische Phosphorfreisetzung in den Nährstoffkreisläufen dimiktischen und polymiktischen Seen eine große Rolle (BOSTROEM et al. 1985, SØNDERGAARD et al. 1993). Aus diesem Grund hat die Reduzierung der externen Nährstoffeinträge für

viele Gewässer nicht die gewünschte Verbesserung der trophischen Situation erbracht. Restaurierungsmaßnahmen von Seen konzentrieren sich meist auf die Nährstoffentnahme bzw. Nährstoffstabilisierung im Sediment (MARSDEN 1989, JÄGER & KOSCHEL 1995). Entscheidend für den Umfang der P-Freisetzung sind die P-Bindung im Sediment (PENN et al. 1996, PETTERSON et al. 1988, SØNDERGAARD et al. 1996), die Sauerstoffverhältnisse in den oberen Sedimentschichten, die mikrobiellen Umsetzungsprozesse in der oberen Sedimentschicht (GÄCHTER et al. 1988) und die Transportprozesse vom Sediment in den Wasserkörper.

2 Beschreibung des Untersuchungsobjektes

Der Tiefe See bei Dehmen liegt östlich der Stadt Güstrow in Mecklenburg-Vorpommern (Abb.1). Der See hat eine Seefläche von 15,9 ha und besitzt eine maximale Tiefe von 30,6 m (Abb.2).

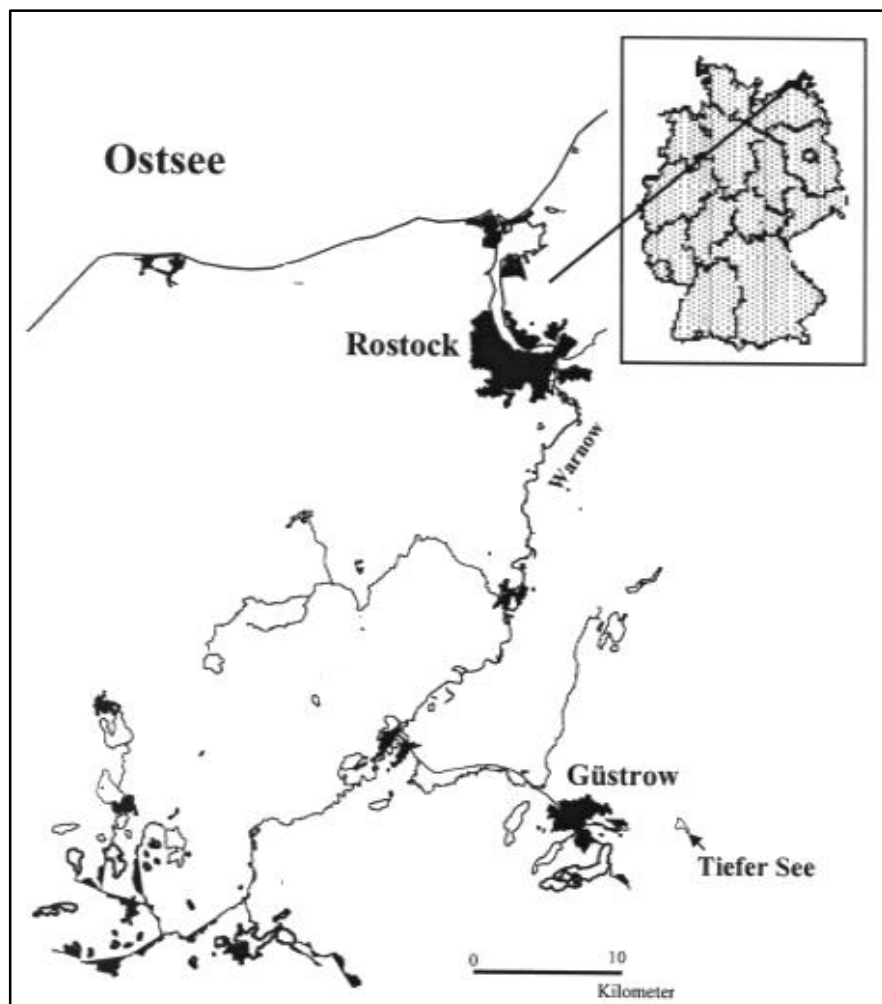


Abb. 1 Geographische Lage des Tiefen Sees in Mecklenburg-Vorpommern

Als mittlere Tiefe werden 10,66 m angegeben bei einem Seevolumen von 1692,3 m³ (MATHES 1998). Der See liegt mitten in einem kleinen Waldgebiet und besitzt keine Zu- bzw. Abflüsse. Durch das im Süden befindliche Armeegelände und die schlechte Erreichbarkeit (nur über Privatgelände möglich) war und wird dieser See kaum anthropogenen Belastungen bzw. Veränderungen ausgesetzt.

Der See besitzt über den Sommer eine stabile thermische Schichtung. Ab dem Juli treten im Hypolimnion anaerobe Verhältnisse auf und es kommt zum Anstieg der Ammonium- und Phosphatkonzentration über dem Gewässergrund. Auf Grundlage der Richtlinie der LAWA (Entwurf 1996) zur Gewässerbewertung stehender Gewässer wurde dieses Gewässer 1996 als mesotroph eingeschätzt. So wurden geringe Chlorophyllwerte, geringe Phosphorkonzentrationen und Phytoplanktonbiovolumina im Epilimnion gemessen. Die Untersuchungen im Hypolimnion (welche in die Bewertung nicht direkt einfließen) sowie das auftreten bestimmten Algenarten lassen eine Tendenz bzw. Entwicklung zu einem höheren trophischen Zustand (eutroph) vermuten.

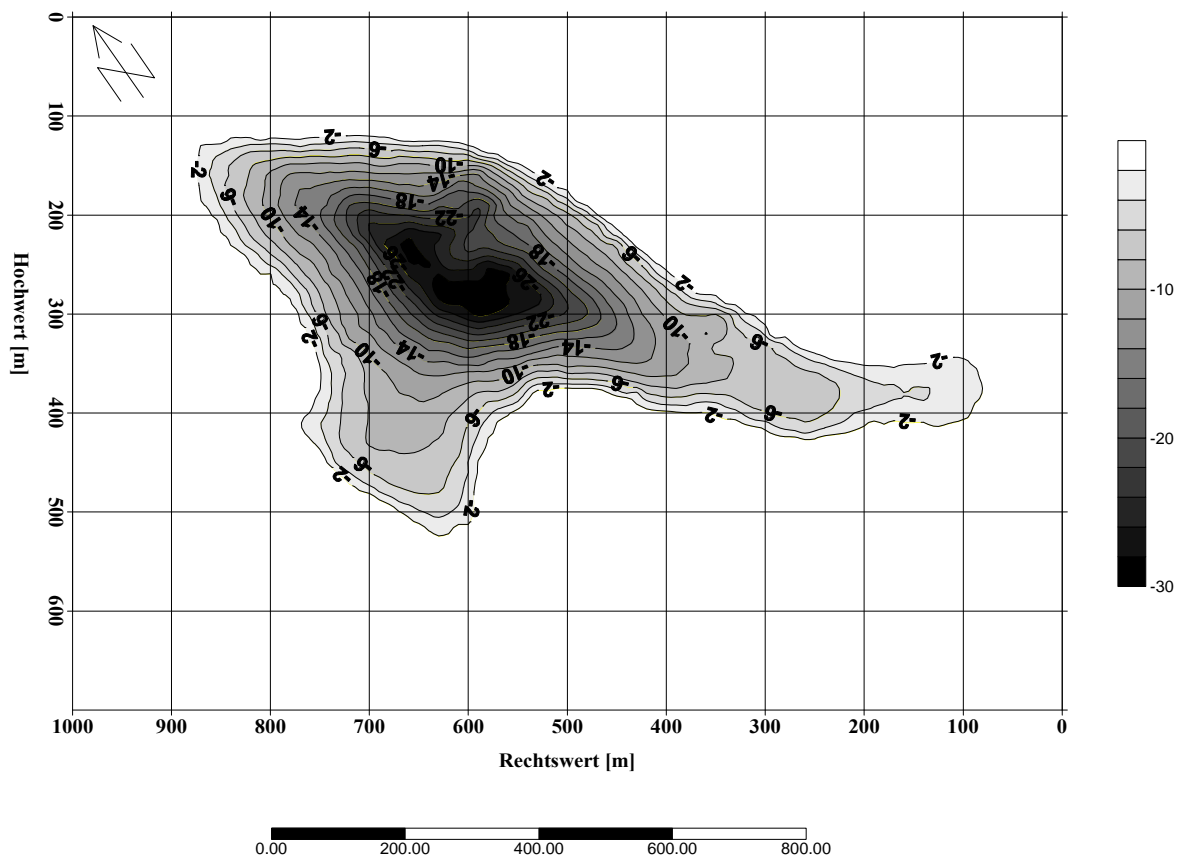


Abb. 2 Tiefenkarte des Tiefen Sees (erstellt durch H.Hantke und O.W. Krüger Mai 1998)

3 Material und Methoden

Im April 1998 erfolgte die Untersuchung des Oberflächensedimentes bis zu einer Tiefe von 40 cm. Neben der in Tab.1 aufgeführten Parametern wurde im Porenwasser PO_4 , DOP (SELIG & SCHLUNGBAUM 2000a), NH_4 (RODHE & NEHRING 1979) und DOC (SUGIURA & SUZUKI 1988) analysiert .

Tabelle 1 Angaben der untersuchten Parameter und angewendeten Methoden

Parameter	Einheit	Methode	Literatur
Trockenmasse (TM)	% FM	Trocknung 105°C	Schlungbaum(1979)
Organische Substanz (oTM)	% TM	Glühverlust 550°C	Schlungbaum(1979)
Kalkgehalt	% TM	Veraschung 900°C	Czensny (1961)
Organ. Kohlenstoff (Corg.)	mg/g TM	CN-Elementaranalyse	Verardo et al. (1990)
Stickstoff (N)	mg/g TM	CN-Elementaranalyse	Verardo et al. (1990)
Phosphor (P)	mg/g TM	HCl-löslicher Anteil aus Glührückstand 550°C	Andersen (1976)
Aluminium (Al)	mg/g TM	Komplexb. mit Chromazurrol-S im Acetatpuffer, Messung bei 546 nm	Dunemann & Schwedt (1984)
Eisen (Fe)	mg/g TM	Reduktion zu Eisen-(II), Messung als Ferro-Farbkomplexes bei 560 nm	Stookey (1970)
P-Bindungsfraktionen	µg/g TM	Chemische Extraktion mit verschiedenen Extraktionsmitteln	Psenner et al. (1984)

Im Mai wurden dann aus einer Tiefe von 30 m Sedimentkerne als 2m Kernsegmente bis zu 10 m für palaeolimnische Untersuchungen entnommen.

Zur Analyse der Parameter C, N, P, Fe, Al und Kalkgehalt wurden jeweils 1cm Kernsegmente alle 5 cm analysiert. An 28 Proben erfolgten Untersuchungen zur P-Bindungsstruktur nach PSENNER et al. (1984). An weiteren 22 Proben erfolgten Pediastrumanalysen und mit Hilfe der ^{14}C -Messung eine grobskalige Zeitdatierung.

4 Ergebnisse

4.1 Untersuchung des Oberflächensedimentes

Die Untersuchungen des Oberflächensedimentes zeigten eine starke Anreicherung von organischer Substanz innerhalb der oberen zwei Zentimeter (Tab.2). Damit verbunden war auch eine starke Anreicherung der Makronährstoffe Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor (Tab.2/ Abb.3), mit denen auch eine gute Korrelation bestand (Tab.3). Nach den oberen zwei Zentimeter nahmen die Nährstoffgehalte sprunghaft ab (um ca. 20%). Im weiteren Verlauf bis zu einer Sedimenttiefe von 40 cm war kein weiterer tendenzieller Verlauf zu verzeichnen. Dabei lagen die Werte aber stets unter denen der oberen Sedimentschicht. Der anorganische Kohlenstoff (carbonatgebundener C) blieb bis 30 cm Tiefe konstant und war auch im Oberflächensediment nicht höher. Gleichzeitig konnte keine Veränderung des atomaren C/N-Verhältnis mit der Tiefe aufgezeigt werden.

Tabelle 2 Sedimentchemische Charakterisierung des Oberflächensedimentes

Horizonte in cm	TM in %	oTM in %	C in %	Corg in %	Canorg. in %	N in %	Corg./N atomar
0-0,5	9,3	47,0	26,5	24,2	2,3	1,8	16,0
0,5-1	10,2	44,4	25,5	23,0	2,5	1,8	14,8
1-2	11,0	44,2	25,1	22,7	2,4	2,1	12,8
2-3	9,4	38,7	22,2	19,8	2,4	1,6	14,1
3-4	8,8	38,8					
4-5	9,5	35,7	20,9	18,5	2,4	1,6	13,3
5-6	8,2	34,3					
6-7	9,0	35,2					
7-8	8,3	32,3					
8-9	8,9	34,4					
9-10	11,5	34,7	20,8	18,3	2,5	1,1	19,8
14-15	9,8	29,4					
19-20	9,6	25,9	16,3	13,8	2,5	1,1	15,2
29-30	9,0	32,0	20,0	17,6	2,4	1,3	16,0
39-40	12,0	39,0	21,8	21,1	0,7	1,4	18,0

Obwohl sich der Gesamtphosphorgehalt mit der Tiefe ändert, konnten keine Veränderung in der P-Bindungsstruktur mit der Tiefe festgestellt werden. Die prozentuale Verteilung blieb weitestgehend konstant (Abb.3). Der Anteil des refraktären Phosphors (NaOHh) betrug zwischen 30-35% und ist für die interne Phosphorrücklö-

sung nicht relevant. Diese Fraktion stellte zusammen mit dem organischen Phosphor (NaOH-NRP) den größten P-Pool im Sediment da. Der Anteil des carbonatischen Phosphors (HCl-SRP) lag zwischen 10-15%. Der labile Phosphor (H₂O) und der reaktiv lösliche Phosphor (BD-SRP) waren prozentual sehr gering und nahmen zusammen einen Anteil von ca. 5% des TP ein.

Die Konzentrationen der gelösten Nährstoffe im Porenwasser zeigten den umgekehrten Verlauf gegenüber dem Gesamtnährstoffkonzentrationen (Abb.4). In den oberen Sedimentschichten wurden die geringsten Konzentrationen ermittelt. Während beim Ammonium eine permanente Zunahme mit der Tiefe erfolgte, kam es beim Phosphor und organischen Kohlenstoff nach einem Anstieg zu einer gleichbleibenden Konzentration über mehrere Sedimentschichten und bei 40 cm zu einem deutlichen Rückgang. Während zwischen dem Orthophosphat und dem Ammonium sowie DOC eine gute Korrelation nachgewiesen werden konnte, bestand diese nicht zwischen dem DOC mit den Parametern DOP und NH₄ (Tab.3).

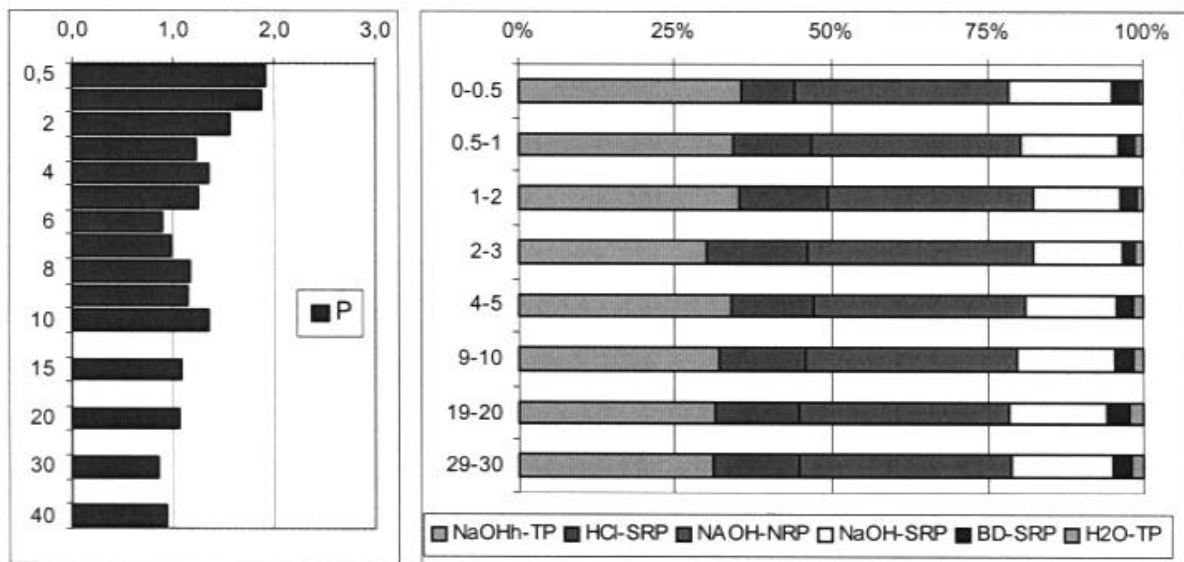


Abb. 3 TP-Gehalte und prozentuale Verteilung der P-Fractionen in den Sediment-schichten des Oberflächenskernes

Tabelle 3 Korrelationsanalysen der Nährstoffgehalte im Oberflächensediment (bis 40 cm) und Konzentrationen im Porenwasser

Sediment	r	Porenwasser	r
OTM/org.C	0,99	PO ₄ /NH ₄	0,79
OTM/N	0,84	PO ₄ /DOC	0,81
Org.C/N	0,80	DOC/NH ₄	0,36
OTM/P	0,77	DOC/DOP	0,14
Org. C/P	0,72		

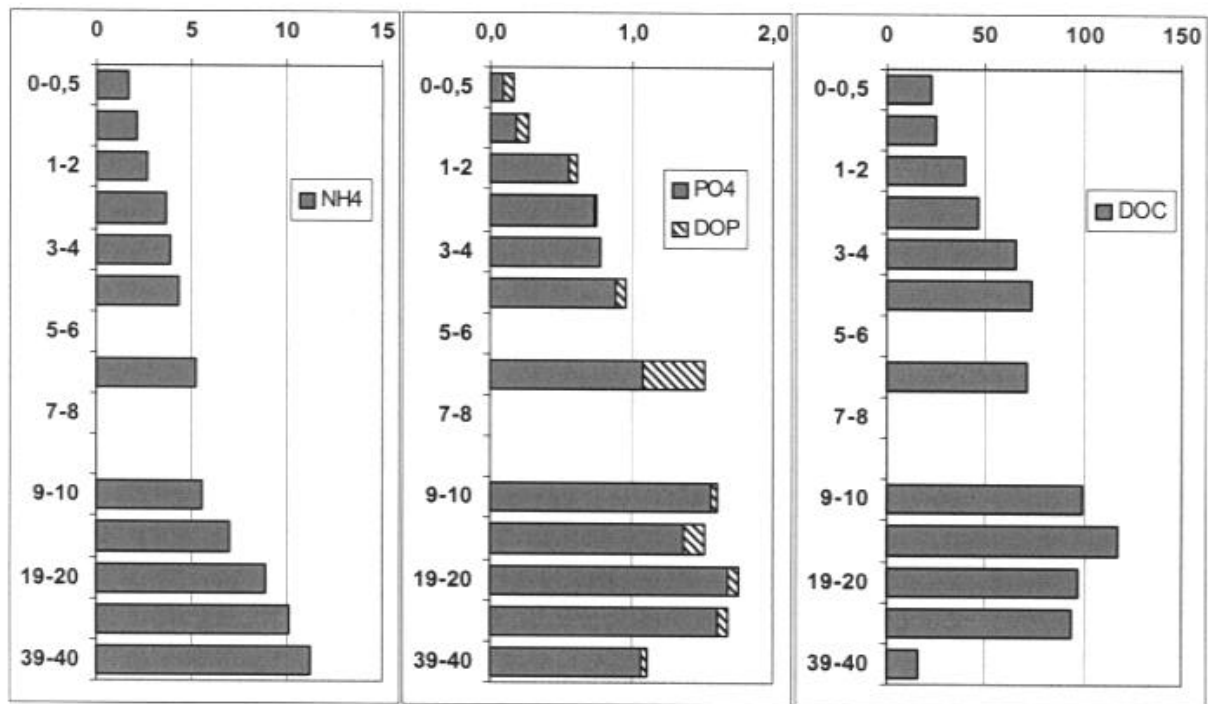


Abb. 4 Konzentrationen (mg/l) im Porenwasser der oberen Sedimentschichten

4.2 Untersuchung der Sedimentkerne bis 10m

Der Trockenmassegehalt, organische Trockenmassegehalt, Corg/N-Verhältnis veränderten sich bis zu einer Tiefe von 750 cm nur gering und wiesen keinerlei Tendenzen auf (Abb.5). Hier war sehr schlickiges Sediment (Algenmudde) mit hohen organischen Anteilen vorzufinden. Ab 800 cm lag dann mineralisches Sediment vor, welches als grauer Feinsand bzw. Mittelsand ansprechbar war (organischen Gehalte unter 3% TM). Ab 930 cm war wieder organisches Material vorzufinden, welches als Torf zu bezeichnen war.

In den Bereichen 120-160 cm sowie 220 bis 250 cm wurden höhere Kalkgehalte vorgefunden. Hier waren deutliche, feine Kalkschichten in den Sedimentkernen (Kalkmudde) sichtbar. Insgesamt war dieser Bereich durch eine gut sichtbare Schichtung geprägt.

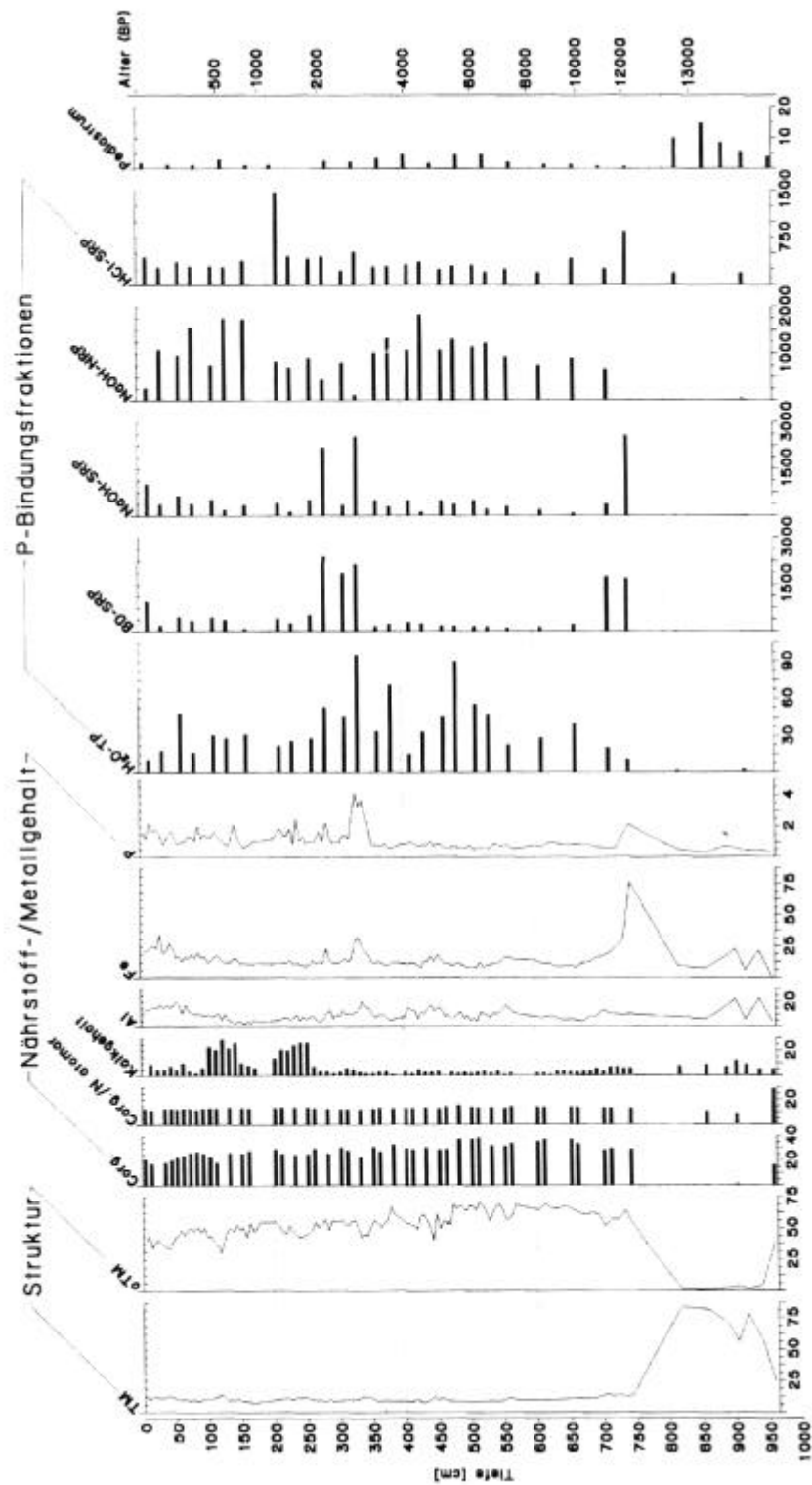


Abb. 5 Darstellung der untersuchten Parameter: TM in % FM, oTM, C_{org} und Kalkgehalt in % TM, C_{org}/N-Verhältnis als atomares Verhältnis, Al, Fe und P als mg/g TM, P-Bindungsfraktionen als µg/g TM

Bei den Phosphor-, Eisen- und Aluminiumgehalte war ein sehr wechselvoller, aber grafisch sehr ähnlicher Verlauf gegeben (Abb.5). Es konnten aber keine korrelativen Zusammenhänge zwischen diesen Parametern festgestellt werden. Ebenfalls konnte im Gegensatz zu dem untersuchten Sediment bis 40 cm Tiefe kein Zusammenhang zwischen $\sigma_{TM}/org.C$ mit dem Phosphor hergestellt werden. Bis zu einer Tiefe von 150 cm lag bei allen drei Parametern eine große Inhomogenität und starker Wechsel der Konzentrationen vor, danach folgte bis ca. 300 cm ein relativ homogener Verlauf bis zu einem starken Anstieg bei ca. 340 cm. Hier war der TP doppelt so groß wie im Oberflächensediment. Bis zu einer Tiefe von 720 cm waren dann wieder kaum Änderungen in den Konzentrationen festzustellen, vor allem der Phosphor blieb sehr stabil. Bei 740-750 cm kam es wieder zu einem starken Anstieg der Phosphor- und Eisenwerte, wobei gerade der Eisenpeak sehr stark ausgeprägt war (TP-Werte erreichten die Konzentrationen des Oberflächensedimentes).

Im feinsandigen Bereich (800-930cm) waren wieder geringere Gehalte vorzufinden, während in den darunterliegenden torfigen Sedimente die Werte wieder etwas anstiegen.

Die Summe der einzelnen Phosphorbindungsfraktionen wies einen analogen Verlauf wie der HCl-lösliche Gesamtphosphorgehalt auf. Der Verlauf der einzelnen Fraktionen unterschied sich aber. Die höchsten Konzentrationen des labilen, leicht extrahierbaren Phosphors (H_2O -TP) lagen im Bereich bei 350 cm bzw. 500 cm. Darunter waren dann deutlich geringere Konzentrationen vorhanden. Der reduktiv lösliche (eisengebundene) Phosphor (BD-SRP) sowie der sorptiv gebundene Phosphor (NaOH-SRP – hier wird auch der aluminiumgebundene Phosphor mit erfaßt) waren neben dem Oberflächenhorizont auch in den beiden Tiefenschichten vorzufinden, wo sehr hohe Gesamtphosphorkonzentrationen vorlagen. In diesen Tiefenschichten waren diese beiden Fraktionen auch die dominanten P-Pools.

Der organische Phosphor (NaOH-NRP) wies einen kurvenförmigen Verlauf auf, wobei die Maxima nicht mit denen des Gesamtphosphorgehaltes übereinstimmten. Im Gegensatz zu den untersuchten oberen 40cm war der organische Phosphor nicht in allen Tiefe die größte verfügbare P-Fraktion. Der carbonatgebundene Phosphor (HCl-SRP- auch als Apatitphosphor bezeichnet) wies bis auf zwei Maxima bei 220 cm (Kalkschichtungen) und 750 cm (P-Maxima) einen sehr homogenen Verlauf auf.

5 Diskussion

Es konnte kein vertikaler Gradient für die untersuchten Parameter in der Entwicklung der letzten 500 Jahre für diesen See aufgezeigt werden. Dieses würde der Theorie entsprechen, daß bei Tiefen See kaum anthropogene Belastungen vorlagen und es somit zu keine Beeinträchtigungen der natürlichen trophischen Entwicklung kam.

Deutlich höhere Nährstoffgehalte konnten in den oberen zwei Zentimeter des Sedimentes gegenüber den unmittelbar darunterliegenden Sedimentschichten ermittelt werden. Dieses Oberflächensediment unterschied sich aber nicht im C/N-Verhältnis und in der P-Bindungsstruktur von dem darunterliegenden Sediment. Frisch sedimentiertes Material (Präsediment) hat ein bedeutend niedrigeres C/N-

Verhältnis als das Sediment. Damit kann nicht davon ausgegangen werden, dass gerade der sehr hohe σ_{TM} in der 0-0,5 Sedimentschicht durch frisch sedimentierte Frühjahrsalgenblütenbiomasse geprägt wurde.

Während der Probenentnahme waren aeroben Bedingungen unmittelbar über dem Gewässergrund vorhanden, was auf eine aerobe Oberflächensedimentschicht schließen lässt. Allerdings ist bei einem σ_{TM} von 47% ein tieferes Eindringen des Sauerstoffes in das Sediment nicht anzunehmen, so dass die oxische Sperrschicht nur wenige Millimeter beträgt. Dieses kann auch als Grund dafür angenommen werden, dass die redoxsensitive P-Bindungsform (BD-SRP) keine Bedeutung hatte. Diese Bindungsform, welche während der Sommerstagnationsphase unter anaeroben Bedingungen freisetztbar ist, spielt in anderen dimiktischen Gewässern in der oberen 1cm Sedimentschicht durchaus eine bedeutende Rolle und kann ca. 20% des TP einnehmen (SELIG & SCHLUNGBAUM 2000b). In aeroben Oberflächensediment ist ebenfalls der sorptiv gebundene Phosphorgehalt höher, da die Sorptionskapazität unter oxischen Bedingungen größer ist (SCHLUNGBAUM 1982). Diese Fakten können auch als Ursache dafür angesehen werden, dass die P-Freisetzung im Hypolimnion im Tiefen See während der Sommerstagnation gering waren (1999 ca. 0,06 mg P/l am Ende der Stagnationsphase im Wasserkörper über dem Sediment). Im Oberflächensediment dominierte mit der NaOH-NRP Fraktion der organische Phosphor, was ein typisches Erscheinungsbild für Oberflächensedimente dimiktischer Seen darstellt (SØNDERGAARD 1996). Andere prozentuale Verteilungen lagen dagegen in den zwei Tiefenbereichen vor, wo bedeutend höhere bzw. ähnlich große Phosphorkonzentrationen wie in der Oberflächensedimentschicht gemessen wurden. Hier dominierten die BD-SRP und NaOH-SRP-Fraktion.

GIESECKE (1999) fand bei seinen Untersuchungen im Schlaubetal die maximale Phosphorkonzentrationen bei 445 cm bzw. 1761 cm Tiefe. Bei seinen Untersuchungen der Phosphorfractionierung lag die redoxsensitive BD-SRP Fraktion meist über 20% in allen untersuchten Tiefen. Der Autor vermutet die Mitlösung von Calcium gebundenen Phosphor in der BD-Fraktion und bezieht sich dabei auf Untersuchungen von PETERSON et al. (1988). Bei den Untersuchungen am Tiefen See konnten keine Anhaltspunkte für diese Hypothese gefunden werden. Die zum Teil starke Dominanz der NaOH-SRP Fraktion führte GIESECKE (1999) auf das Vorhandensein von Vivianit zurück. Im Gegensatz zum Tiefen See konnte im Schlaubetal kein NRP-gebundener Phosphor in der NaOH-Fraktion nachgewiesen werden. Die untersuchten Metallgehalte in den einzelnen Fraktionen erbrachten bei GIESECKE (1999) einige widersprüchliche Ergebnisse zu den Aussagen der Methodenentwickler (PSENNER et al. 1984). So muß generell die Anwendbarkeit und Aussagekraft dieser Fraktionierungsergebnisse für tiefere Sedimentschichten in Frage gestellt werden, was aber nicht deren Aussagekraft für Oberflächensedimente negiert. Bedeutungsvoll bei den Untersuchungen paläolimnischer Sedimentkerne ist die Frage, in wieweit die Transport- und Lagerungsbedingungen ausreichend sind, die ursprüngliche Bindungsstrukturen zu erhalten. Eine sofortige Aufarbeitung ist bei diesen Probenumfängen nicht möglich.

Wie lassen sich nun diese hohen Phosphorgehalte sowie die ebenfalls beobachteten hohen Eisen bzw. Aluminiumgehalte in den zwei auffälligen Sedimentbereichen des Tiefen Sees erklären? Der See ist glazialen Ursprunges. Die sandigen Strukturen bei 800 bis 900 cm Tiefe dürften hier als geologischen "Marker" der gla-

zialen Prägung angenommen werden. Der sehr starke Anstieg der Gehalte unmittelbar danach (bei 750 cm) kann durch Erosions- bzw. Rutschungen durch die aufgetretenen Eisschmelze verursacht worden sein. Analoges gilt auch für die hohen Gehalte bei 340 cm, wobei hier erstmal keine Kenntnisse über die möglichen Ursachen dieser erosiven Ereignisse vorliegen. Folgende Fakten belegen die Theorie, das hier Erosionserscheinungen vorlagen:

- Es liegen höheren zeitlichen Differenzen (breitere Banden zwischen den Jahresangaben) während dieser Zeit vor, welche nicht durch Sedimentationsprozesse hervorgerufen sein können.
- der Hauptanteil des Phosphors liegt als sorptiv-, aluminium- und eisengebundenen Phosphor vor (BD-SRP und NaOH-SRP), was für allochthone partikuläre Einträge spricht. Ansonsten dominiert der organische Phosphor im Sediment des TiefenSees.
- hohe Aluminiumgehalte gelten allgemein als ein Indiz für Erosionserscheinungen.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Nährstoffe- und Metallgehalte sowie Nährstoffbindungsformen konnten keine Veränderungen in den letzten 500 Jahren aufzeigen, welche anthropogenen Ursprunges sind. Somit könnte dieser See ein geeignetes Vergleichsobjekt gegenüber stark belasteten Gewässern darstellen. Weitere Analysen der Schwermetallgehalte sowie Untersuchungen auf Organismenebene (Diatomeen bzw. Ostracoden – hier sind die Arbeiten noch nicht abgeschlossen) ergänzen dann die vorliegenden Daten.

In der oberen zwei Zentimetersedimentschicht wurden bedeutend höhere Gesamtnährstoffkonzentrationen ermittelt als in den unmittelbar darunterliegenden Schichten ermittelt. Es konnten aber keine Unterschiede im C/N-Verhältnis und in den P-Bindungsformen festgestellt werden. Oxische P-Bindungen spielen auch während der Vollzirkulation keine Rolle im Oberflächensediment, was als Ursache für die geringen P-Freisetzungen während der Stagnationsphase angenommen werden kann.

Die höchsten Phosphorkonzentrationen wurden nicht im Oberflächensediment, sondern in tieferen Sedimentschichten bei ca. 340 cm gefunden. Als Ursache dafür werden Erosionseinträge angenommen. Die P-Bindungsanalysen belegen, daß es sich dabei durchaus um unter gewässerrelevanten Bedingungen wieder freisetzbaren Phosphor handelt. Dieser Fakt ist für mögliche Restaurierungsmaßnahmen sehr bedeutungsvoll.

Danksagung

Für die Entnahme der Sedimentkerne und Bereitstellung der entsprechenden Technik danke ich Herr Dr. B. Scharf vom UFZ Magdeburg. Die ¹⁴C-Analysen wurden von Prof. Dr. P. M. Grootes vom Leibnitz Labor für Altersbestimmung der Universität Kiel bereitgestellt. Herrn Dr. W. Dörfler vom Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Kiel danke ich für die Bereitstellung der Pediastrumanalysen.

Frau Dipl.-Biol. A. Schwarz bin ich für die Unterstützung bei der grafischen Aufarbeitung der Daten sehr dankbar.

Dem Umweltministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern danken wir für die Gewährung eines Kostenzuschusses für die Durchführung der Probeentnahme im Tiefen See.

Literatur

- ANDERSEN, J. M. (1976). An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. - *Wat. Res.* 10: 329-331.
- BOSTROEM, B.; JANNSON, M. & FORSBERG, C. (1985). Internal nutrient loading in a eutrophic lake, reflected in seasonal variations of some sediment parameters. *Verh. I. Internat. Verein. Limnol.*, 22: 3335-3339.
- CZENSNY, R. (1961). *Wasser-, Abwasser und Fischereichemie*. VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- DIXIT, S.S.; SMOL, J.P.; KINGSTON, J.C. & CHARLES, D.F. (1992). Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environ. Sci. Tech.* 26: 23-32.
- DUNEMANN, L. & SCHWEDT, G. (1985). Zur Analytik von Elementbindungsformen in Bodenlösungen mit Gelchromatographie und chemischen Reaktionsdetektoren. *Fres. Z. Anal. Chem.* 317: 394-399.
- ENGSTROM, D.R.; SWAIN, E.B. & KINGSTON, J.C. (1985). A palaeolimnological record of human disturbance from Harvey's Lake, Vermont: geochemistry, pigments and diatoms. *Freshw. Biol.* 15: 261-288.
- GÄCHTER, R.; MEYER, J.S. & MARES, A. (1988). Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments. *Limno. Oceanogr.*, 33/6: 1542-1558.
- GIESECKE, T. (1999). *Pollenanalytische und sedimentchemische Untersuchungen zur natürlichen und anthropogenen Entwicklung im Schaubetal*. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Fachbereich Geographie: 97 Seiten.
- JAEGER, D. & KOSCHEL, R. (1995). *Verfahren zur Sanierung und Restaurierung stehender Gewässer*. *Limnologie Aktuell* Band 8, Gustav Fischer Verlag: 330 Seiten.
- MARSDEN, M.W. (1989). Lake restoration by reducing external phosphorus loading: the influence of sediment phosphorus release. *Freshwater Biology* 21: 139-162.
- MATHES, J. & MITARBEITER (1998). *Seenprojekt Mecklenburg-Vorpommern: Datenzusammensetzung und Datenspeicherung von Seen MV*, unpubl..
- PENN, M.R.; AUER, M.T.; van ORMAN, E.L. & KORIENEK, J.J. (1995). Phosphorus diagenesis in lake sediments: investigations using fractionation techniques. *Mar. Freshwater Res.*, 46: 89-99.
- PETTERSON, K.; BOSTRÖM, B. & JACOBSEN, O. (1988). Phosphorus in sediments – speciation and analysis. *Hydrobiologia* 170: 111-115.
- PSENNER, R.; PUCSKO, R. & SAGER, M. (1984). Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorbindungen von Sedimenten – Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30: 25-41.
- ROHDE, K.H. & NEHRING, D. (1979). Ausgewählte Methoden zur Bestimmung von Inhaltsstoffen im Meer- und Brackwasser. *Geodätische und Geophysikalische Veröffentlichungen, Reihe 4*, 24: 35-37.
- ROWELL, H.C. (1996). Palaeolimnology of Onondaga Lake: the history of anthropogenic impacts on water quality. *Lake and Reserv. Manage.* 12(1): 35-45.

- SCHLUNGBAUM, G. (1979). Untersuchungen über die Sedimentqualität in den Gewässern der Darß-Zingster Boddenkette unter besonderer Berücksichtigung der Stoffaustauschprozesse zwischen Wasser und Sediment. Habilitationsschrift, Universität Rostock, Fachbereich Biologie.
- SCHLUNGBAUM, G. (1982). P-Sorptionsgleichgewichte zwischen Sediment und Wasser in flachen eutrophen Küstengewässern. Acta hydrochim. Hydrobiol. 10/2: 135-152.
- SELIG, U. & SCHLUNGBAUM, G. (2000a). Vergleichende Untersuchungen zwischen einem dimiktischen und einem polymiktischen See in MV: gelöste und partikuläre Nährstoffe im Pelagial. Rostock. Meeresbiolog. Beitr. 9.
- SELIG, U. & SCHLUNGBAUM, G. (2000b). Benthic phosphorus release in a mesotrophic dimictic lake during summer stratification. Hydrobiologia. In Vorb.
- SØNDERGAARD, M.; KRISTENSEN, P. & JEPPESEN, E. (1993). Eight years of internal phosphorus loading and changes in the sediment phosphorus profile of Lake Sobygaard, Denmark. Hydrobiologia 253: 345-356.
- SØNDERGAARD, M.; WINDOLF, J. & JEPPESEN, E. (1996). Phosphorus fractions and profiles in the sediment of shallow danish lakes as related to phosphorus load, sediment composition and lake chemistry. Wat. Res. 30(4): 992-1002.
- STOOKEY, L.L. (1970). Ferrozine - a new spectrophotometric reagent for iron. Anal. Chem. 42/7: 779-781.
- SUGIMURA, Y. & SUZUKI, Y. (1988). A high temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. Mar. Chem. 24: 105-131.
- VERARDO, D.J.; FROELICH, P.N. & MCINTYRE, A. (1990). Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using Carlo Erba NA-1500 Analyser. Deep Sea Research 37: 157-165.

Verfasser

Dr. Uwe Selig
Universität Rostock
Institut für Ökologie, Angewandte Ökologie
Freiligrathstr. 7/8
D-18051 Rostock

e-mail: uwe.selig@biologie.uni-rostock.de

