

Forschungen
aus den Naturwissenschaften

documenta

naturae

ISSN 0723 - 8428

Nummer **31**

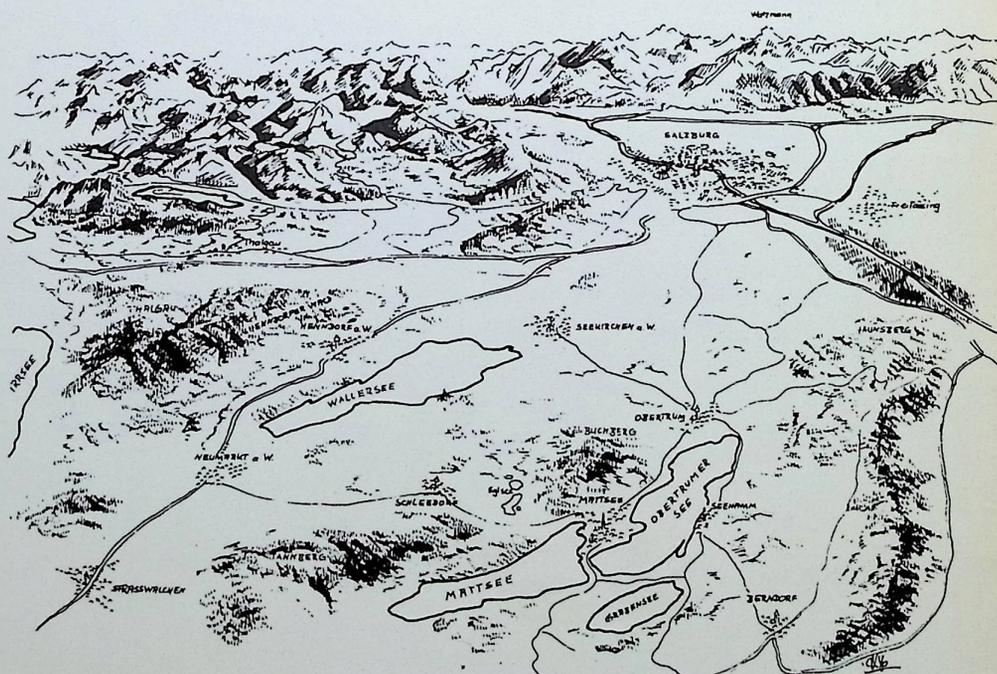
München 1986

RÖMRS, J. :

Salzburger Vorlandseen

Sedimentations - und Eutrophierungsgeschichte

Sedimentchemische Untersuchungen für ein Sanierungskonzept



(Forschungen aus den Naturwissenschaften)

I S S N
0723 - 8428

Herausgeber: Dr. Hans-Joachim Gregor
Hans-Sachs-Str. 4
D-8038 Gröbenzell

Dr. Heinz J. Unger
Nußbaumstr. 13
D-8058 Altenerding

Druck: W. Eckert
Richard-Wagner-Str. 27
D-8000 München 2

Vertrieb: Buchhandlung KANZLER-HASEITL
Gabelsbergerstr. 55
D-8000 München 2

Bestellung: Bei der Buchhandlung und den Herausgebern

Anfragen: direkt bei den Herausgebern.

Die Schriftenreihe erscheint in zwangloser Folge mit Themen aus den Gebieten Geologie, Paläontologie, Botanik, Anthropologie, Vor- und Frühgeschichte, Domestikationsforschung, Stratigraphie usw.

Da die DOCUMENTA naturae auf eigene Kosten gedruckt werden, bitten wir um Überweisung der Schutzgebühr auf das Konto-Nr. 6410317280 bei der Bayer.Hypotheken-und Wechselbank München (BLZ 700 200 01), Konto-Inhaber: H.-J. Gregor.

Schutzgebühr für diesen Band:

Umschlagentwurf und -bild: J.RÖHRS

Panoramakarte der Salzburger Vorlandseen (Wallersee, Mattsee, Grabensee, Oberturmer See und Irrsee), welche im Text besprochen werden.

**Sedimentations- und Eutrophierungsgeschichte der Salzburger Vorlandseen -
sedimentchemische Untersuchungen für ein Sanierungskonzept und
das Problem der Phosphor-Rücklösung**

**Jürgen Röhrs, (Labor f. Geologie und Umweltanalytik,
Technologiezentrum, 3200 Hildesheim)**

Inhalt:

Seite

RÖHRS, J.: Sedimentations- und Eutrophierungsgeschichte
der Salzburger Vorlandseen - sedimentchemische
Untersuchungen für ein Sanierungskonzept und
das Problem der Phosphor-Rücklösung 1 - 105

Zusammenfassung

Die Sedimentationsgeschichte der Salzburger Vorlandseen beginnt mit dem Rückzug der Würmvereisung vor mehr als 15000 Jahren. Zuerst wurden fein laminierte Warventone abgelagert. Vor ca. 13000 Jahren begann die Sedimentation von Kalkmudden (Profundal) und Seekreide (Litoral). Die morphologische Differenzierung der Sedimentationsräume wurde durch den glazialen Untergrund (Moränenrücken) sowie verschiedene Seespiegelabsenkungen bestimmt.

Während des Klimaoptimums im Atlantikum wurden in den Trumer Seen erstmalig vorübergehend C_{org} - und P_t -reiche Kalkgyttjen abgelagert. Ein bereits zuvor infolge von Seespiegelabsenkungen abgeschnürter See im Bereich des heutigen Zellhofer Moores verlandete, die Trumer Seen und der Wallersee erhielten ihre heutige Form und Ausdehnung.

Vor 1200 Jahren führte im Bereich der Trumer Seen eine starke Nährstoffzufuhr infolge von Rodungsmaßnahmen und Moordrainagen im Zuge der bajuwarischen Besiedlung zu einer ersten akuten Eutrophierungsphase, die jedoch von kurzer Dauer war und noch vom Sediment gepuffert werden konnte. Vor ca. 350 Jahren bewirkte eine zunehmende Besiedlung des Gebietes um die Trumer Seen sowie damit einhergehende infrastrukturelle Veränderungen (weitere Moordrainagen, intensivierter Landbau, Brauereigründungen, Kleingewerbe) einen zweiten akuten Eutrophierungsschub, der nicht mehr vollständig vom Sediment gepuffert wurde. Die Trumer Seen gelangten in den meso- bis eutrophen Zustand, während der Wallersee von dieser Entwicklung noch verschont blieb.

Die stark expandierende Bevölkerung, ein exponentiell ansteigender Verbrauch von Phosphaten in den Haushalten (Waschmittel) und in der Landwirtschaft (Mineraldünger, Gülle-Wirtschaft) und eine rasch zunehmende Gewässerbelastung durch Kleingewerbe (Brauereien, Käsereien, Gaststätten, Metzgereien) im Einzugsgebiet der Vorlandseen führten nach dem II. Weltkrieg zu einem rasanten Voranschreiten der Eutrophierung. Erstmals wurden in den Seen schwarze Kalkgyttjen abgelagert, im Hypolimnion war während der Stagnation H_2S nachweisbar.

Die Sedimente in den Vorlandseen bestehen überwiegend aus autochthonen Komponenten (Kalzit aus biogener benthischer und epilimnischer Entkalkung, organischer Detritus, biogen gebildetes SiO_2 (Kieselalgen). Lateral und vertikal können makroskopisch und geochemisch 6 Sediment-Fazies-Zonen unterschieden werden. Die Sedimentationsraten sind im Laufe der Seengegeschichte zunächst langsam angestiegen. Seit dem Atlantikum und besonders seit dem Beginn der Eutrophierung ist eine starke Zunahme zu beobachten. In der jüngsten Zeit nehmen die Sedimentationsraten infolge von Karbonatrücklösung scheinbar ab.

Mit fortschreitender Eutrophierung wurden im Sediment immer größere Mengen an C_{org} und P_t akkumuliert. Anhand der P_t -Verteilung im Oberflächensediment erkennt man deutlich die Orte der größten P-Einträge. Allein im Oberflächensediment (5 cm) der Seen sind große Nährstoffmengen gespeichert (Niedertrumer See: 12 t, Obertrumer See: 20 t, Grabensee: 5 t, Wallersee: 28 t).

Anhand von P-Flux-Experimenten konnte gezeigt werden, daß die "seeinterne Düngung" durch R-Rücklösung aus dem Sediment maximal 5 - 10 % des P-Inputs während der Stagnation ausmacht, sehr wahrscheinlich jedoch noch wesentlich geringer ist. Über das Jahr gemittelt wirkt das Sediment in allen Seen als P-Puffer. Für das Fehlen einer bedeutenden P-Rücklösung aus dem Sediment sind folgende Ursachen verantwortlich.

- An der Sedimentoberfläche befinden sich stabile Bakterienmatten, die in der Tiefe rückgelösten Phosphor aufnehmen und selbst verwerten bzw. speichern.
- Durch eine ausreichende Nitratversorgung des Hypolimnions bleibt an der Sedimentoberfläche eine Mikrozone erhalten, in der $Fe(OH)_3$ nicht von fakultativ anaeroben Bakterien reduziert wird. Phosphor wird in dieser Mikrozone adsorptiv an Eisen-III-Hydroxid gebunden.

- Die Ca-Phasen im Sediment binden nachweislich ebensoviel Phosphor wie Fe-Phasen. Der an Kalzium gebundene Phosphor ist bei abnehmenden Redoxpotentialen jedoch weitaus weniger mobil als der an Eisen gebundene Phosphor.

O₂-Zehrungsversuche zeigten, daß bei einer Belüftung des Bodenwassers fakultativ anaerobe Bakterien auf einen anaeroben Stoffwechsel umschalten, sich stark vermehren und den gesamten zugeführten Sauerstoff zehren. Eine Belüftung des Tiefenwassers führt demnach nicht zu einer durchgreifenden Oxidation des Sediments und ist ohnehin nicht notwendig, da keine nennenswerte P-Rücklösung stattfindet.

Die derzeitige Eutrophierungsdynamik in den Seen wird besonders durch einen "kurzgeschlossenen Nährstoffkreislauf" zwischen Plankton und Wasser aufrecht erhalten. Dieser Kreislauf kann nur durch eine weitere Reduzierung der punktuellen Nährstoffeinträge, die 1982 noch 80 % der externen P-Einträge ausmachten, erreicht werden. Des weiteren muß der diffuse P-Eintrag aus landwirtschaftlich genutzten Flächen und Mooregebieten im Einzugsgebiet der Seen drastisch reduziert werden.

Eine konsequente Durchführung dieser externen Sanierungsmaßnahmen wird automatisch zu einer Verbesserung der limnologischen Situation in den Seen führen, seeinterne Restaurierungsmaßnahmen am Sediment sind nicht notwendig, weil an der Grenzfläche Sediment/Wasser eine gut funktionierende P-Pufferung ausgebildet ist. Die limnologische Entwicklung in den letzten zwei Jahren liefert eine erste Bestätigung dieser Auffassung. Die Sanierungsmaßnahmen (Ringkanalisationen, Kläranlagen) seit Beginn der 70er Jahre haben bereits zu einer Reduzierung der punktuellen Einträge von 50 % geführt und zeigen erste positive Wirkungen; sie müssen konsequent fortgeführt werden.

Infolge der Sanierungsmaßnahmen kann es an der Kontaktzone Sediment/Wasser zu Veränderungen des bestehenden P-Gleichgewichts kommen, wenn sich die Sauerstoffversorgung des Hypolimnions nicht in dem Maße verbessert, wie die Nitratfracht abnimmt. Daher sind auch in Zukunft regelmäßige Messungen der Sauerstoff- und Nitratgehalte im Hypolimnion sowie des Redoxpotentials an der Grenzfläche Sediment/Wasser erforderlich.

1	Einführung	1
2	Beschreibung des Areitsgebietes	3
2.1	Erforschungsgeschichte der Vorlandseen.....	3
2.2	Geographie und Geologie.....	3
2.3	Hydrographie der Vorlandseen.....	5
2.4	Limnologische Situation der Vorlandseen.....	6
3	Methodik	11
3.1	Probenahme.....	11
3.1.1	Entnahme von Greiferproben.....	11
3.1.2	Entnahme von Sedimentkernen.....	11
3.2	Aufbereitung der Sedimentproben.....	11
3.2.1	Greiferproben.....	11
3.2.2	Sedimentkerne.....	11
3.3	Sedimentuntersuchungen.....	15
3.3.1	Korngrößenanalysen.....	15
3.3.2	Röntgendiffraktometrie.....	17
3.3.3	Bestimmung des spezifischen Gewichts.....	17
3.3.4	Bestimmung des Wassergehaltes.....	17
3.3.5	Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffs.....	18
3.3.6	Bestimmung des Karbonatkohlenstoffs.....	19
3.3.7	Bestimmung des Gesamthosphors.....	19
3.3.8	Schwermetallanalysen.....	19
3.3.8.1	Blei.....	20
3.3.8.2	Cadmium.....	20
3.3.8.3	Kupfer.....	21
3.3.8.4	Zink.....	21
3.3.9	pH/E _h -Messungen.....	21
3.3.10	Aufbereitung für Unters. mit dem Raster-Elektronen Mikroskop.....	22
3.3.11	Paläopigmentanalysen.....	22
3.3.12	Sedimentdatierungen und Bestimmung der Sedimentationsraten.....	23
3.3.13	Experimentelle Untersuchungen.....	23
4	Ergebnisse der Sedimentuntersuchungen	24
4.1	Makroskopische Beschreibung der Sedimente.....	24
4.2	Korngrößenverteilung.....	26
4.2.1	Oberflächensedimente.....	26
4.2.2	Kornverteilung in den Sedimentkernen.....	26
4.3	Untersuchungen zum Minderalbestand.....	28
4.4	Spezifisches Gewicht der Sedimente.....	29
4.5	Wassergehalt der Sedimente.....	29
4.6	Karbonatgehalt.....	30
4.6.1	Oberflächensedimente.....	30
4.6.2	Sedimentkerne.....	30
4.7	Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff.....	30
4.7.1	Oberflächensedimente.....	30
4.7.2	Sedimentkerne.....	33
4.8	Gesamthosphor.....	33
4.8.1	Oberflächensedimente.....	33
4.8.2	Sedimentkerne.....	33
4.9	Schwermetallgehalte.....	39
5	Diskussion der Ergebnisse	40
5.1	Sedimentologie und Sedimentationsgeschichte.....	40
5.1.1	Der Sedimentationsraum.....	40
5.1.2	Sedimentliefernde Prozesse.....	41
5.1.2.1	Allochthone Sedimente.....	41
5.1.2.2	Autochthone Sedimente.....	41
5.1.2.3	Sedimenttypen.....	43

5.1.3	Die rezenten Faziesbereiche.....	43
5.1.3.1	Torf-Fazies.....	46
5.1.3.2	Seekreide-Fazies.....	46
5.1.3.3	Helle und dunkle Kalkmudden-Fazies.....	48
5.1.3.4	Helle und dunkle Kalkgyttja-Fazies.....	49
5.1.3.5	Schwarze Kalkgyttja-Fazies.....	49
5.1.4	Sedimentstratigraphie.....	49
5.1.4.1	Sedimentationsraten.....	53
5.1.4.2	Die Entwicklung des Sedimentationsraumes seit der Würm- Vereisung.....	54
5.2	Die Eutrophierung der Vorlandseen.....	55
5.2.1	Eutrophierungsanzeiger im Sediment.....	55
5.2.2	Eutrophe Sedimente in Kernprofilen - Eutrophierungsgeschichte.....	58
5.2.2.1	Die natürliche Eutrophierungsphase im Atlantikum.....	58
5.2.2.2	Die erste akute Eutrophierungsphase.....	58
5.2.2.3	Die zweite akute Eutrophierungsphase.....	63
5.2.2.4	Die dritte akute Eutrophierungsphase.....	63
5.2.3	Wirkungen der Eutrophierung im Stoffkreislauf Sediment/Wasser.....	65
5.2.3.1	Akkumulation und Abbau von organischer Substanz.....	65
5.2.3.2	pH- und Redoxverhältnisse.....	66
5.2.3.3	Diagenetische Bildung von Sulfiden.....	72
5.2.3.4	Anreicherung von Schwermetallen im eutrophen Sediment.....	72
5.2.3.5	Diagenetische Karbonatlösung.....	73
5.2.4	Der Phosphorkreislauf.....	76
5.2.4.1	Die hydrochemische Phosphorbilanz.....	78
5.2.4.2	Die Phosphorfrachten im Oberflächensediment.....	78
5.2.5	Untersuchungen zur Mobilität des Sedimentphosphors.....	83
5.2.5.1	Phosphor-Flux-Experimente.....	83
5.2.5.1.1	Erstes P-Flux-Experiment, Sommer 1983 (OT 38-P, GR 15-P).....	83
5.2.5.1.2	Zweites P-Flux-Experiment, Sommer 1984 (OT 38 A-D).....	87
5.2.5.2	REM-Untersuchungen zur Frage der P-Pufferung im Sediment.....	91
5.2.5.3	Fazit.....	92
5.2.6	Experimente zur Ermittlung der O ₂ -Zehrung des Sediments.....	93
5.2.6.1	P-Ausfällung durch Belüftung.....	93
5.2.6.2	Sauerstoff-Zehrung.....	93
6	Konsequenzen für Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen.....	95
7	Literaturverzeichnis.....	

Tafeln 1 - 4

Danksagung

1. Einführung

Die vorliegende Dissertation befaßt sich mit Untersuchungen und Experimenten in einem wissenschaftlichen Grenzgebiet zwischen Sedimentgeologie, Limnologie und Geochemie; dieses Forschungsgebiet kann am ehesten unter dem Begriff "Limnogeologie" zusammengefaßt werden. Die Arbeit wurde im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes "Vorlandseen" der Salzburger Landesregierung angefertigt.

Die Salzburger Vorlandseen (Wallersee, Niedertrumer See, Obertrumer See und Grabensee) sind in den letzten Jahrzehnten zunehmend durch anthropogene Einflüsse in ihrem natürlichen Gleichgewicht gestört worden. Die intensive landwirtschaftliche Nutzung des Einzugsgebietes und zunehmender Fremdenverkehr haben seit Beginn der 60er Jahre zu einer schnell voranschreitenden akuten Eutrophierung der Seen geführt. Um die Seen zu sanieren, wurden großräumige Kanalisationsvorhaben geplant und größtenteils inzwischen auch realisiert. Begleitend dazu ist es das Ziel des Forschungsprogramms "Vorlandseen", die vielfältigen Zusammenhänge zwischen den Seen und ihren Einzugsgebieten zu analysieren. Die Ergebnisse aller am Projekt beteiligten Wissenschaftler wurden zu einer ganzheitlichen Ökosystemanalyse zusammengefügt (Hrsg.: JÄGER 1986) und bilden die Grundlage für ein Konzept zur weiteren Sanierung und Restaurierung der eutrophen Vorlandseen. Die Abbildung 1 zeigt schematisch die Organisation und die Ansatzpunkte aller am Projekt beteiligten Disziplinen.

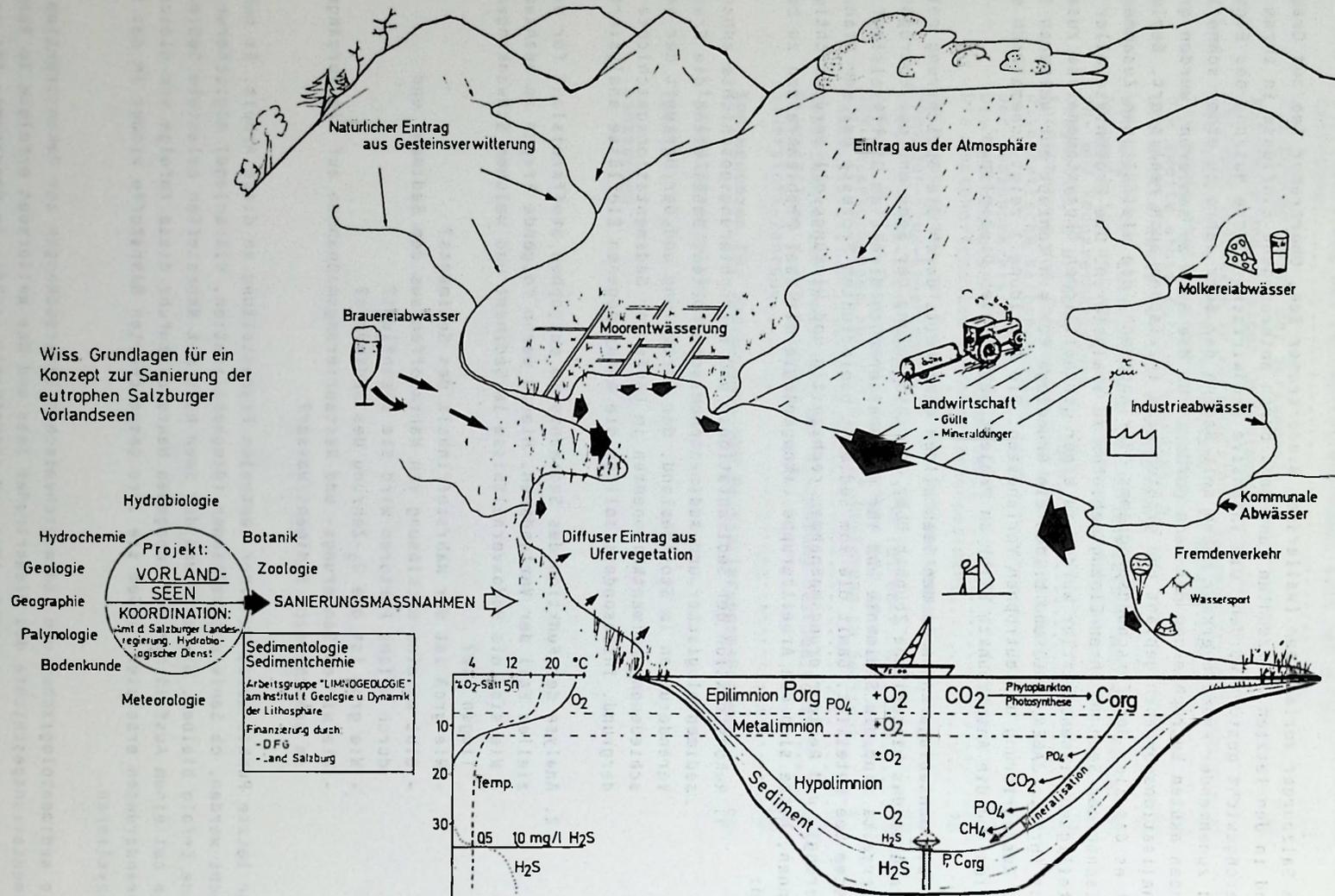
Die Sedimentablagerungen in den Seen bilden einerseits durch die Speicherung relevanter Parameter das historische Zeugnis über die Entwicklung der Seen und der Eutrophierung, andererseits sind die Sedimente und ihr Porenwasser auch direkt am Stoffkreislauf im Ökosystem See beteiligt. Damit die vom Sediment beeinflussten Prozesse bei der Planung von Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen rechtzeitig und wirkungsvoll berücksichtigt werden können, hatte sich die Arbeitsgruppe Limnogeologie mit zwei Problemkreisen zu beschäftigen:

1. Rekonstruktion der Sedimentations- und Eutrophierungsgeschichte anhand sedimentologischer und sedimentchemischer Daten. Dabei stand die Frage nach Veränderungen im Stoffbestand, der Verteilung und der Herkunft der verschiedenen Sedimentkomponenten im Laufe der Sedimentationsgeschichte im Vordergrund. Insbesondere sollten die anthropogenen Einflüsse analysiert werden.
2. Analyse der Funktion des Sediments im eutrophen Stoffkreislauf für den speziellen Fall der Vorlandseen. Hierzu waren folgende Fragen zu beantworten:
 - Wie sind die Redoxverhältnisse im Sediment und welchen Schwankungen unterliegen sie?
 - Wie groß ist der Nährstoffinhalt des Sediments?
 - Gibt es eine Rücklösung von Nährstoffen aus dem Sediment und durch welche Faktoren wird sie beeinflusst?
 - Wie groß ist die O₂-Zehrung des Sediments?
 - Wie wirken Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen auf die Vorgänge im Grenzbereich Sediment/Wasser?

Der letzte Punkt wurde zu einer zentralen Fragestellung an diese Arbeit. Es mußte untersucht werden, ob Sanierungsmaßnahmen (Ringkanalisation, Kläranlage) möglicherweise solange ohne Erfolg bleiben, wie am Grund der Seen hoch mit Nährstoffen belastete Sedimente liegen, die bei einem Ausfall der anthropogenen Nährstoffzufuhr diese infolge von Gleichgewichtsveränderungen ersetzen, indem sie ihre gespeicherten Nährstoffe wieder in das System See rezyklieren.

Die sedimentologischen und sedimentchemischen Untersuchungen zur Rekonstruktion der Sedimentationsgeschichte des Niedertrumer Sees und des Wallersees erfolgte im Rahmen von zwei Diplomarbeiten (LINDNER, 1984 und GERMATSIDIS, 1985). Im Obertrumer See und am Grabensee wurden darüber hinaus auch exemplarisch die oben unter 2 genannten Fragen z.T. experimentell untersucht. Wo es notwendig erscheint, werden die Daten der genannten Diplomarbeiten in dieser Arbeit ergänzend diskutiert.

Abb 1 Organisation und Ansatzpunkte aller am Projekt Vorlandseen beteiligten Disziplinen



2. Beschreibung des Arbeitsgebietes

2.1 Erforschungsgeschichte

Die Erforschung der Vorlandseen begann bereits vor über 100 Jahren. Ab 1869 führte Josef Sigl IV, Brauereibesitzer zu Obertrum, zusammen mit seinem Bruder Matthäus Sigl Tiefenlotungen in den Trumer Seen und im Wallersee durch. Sigl's Tiefenkarten wurden 1890 von FUGGER in den Mitteilungen der Gesellschaft für Salzburger Landeskunde veröffentlicht. 1949 publizierte SCHWARZACHER eine Neuvermessung des Wallersees, die unter Berücksichtigung einer zwischenzeitlichen Seespiegelabsenkung jedoch nur unwesentlich von der Erstvermessung abwich. 1980 fand eine Neuvermessung aller Seen durch die Tauernkraftwerke statt.

Ausführlichere Abhandlungen über die Entstehungsgeschichte und die Geologie der Vorlandseen sind von FUGGER (1890), SPENGLER (1924), ARBERER & BRAUMÜLLER (1949, 1958), SCHADLER (1959), SEEFELDNER (1961) und TICHY (1980) veröffentlicht worden.

Die Besiedlungs- und Kulturgeschichte im Bereich der Vorlandseen ist umfassend bei DOPSCH (1981) dargestellt. Viele interessante Hinweise zur jüngeren Besiedlungs- und Sozialgeschichte können einer Festschrift zum 200-jährigen Bestehen der Brauerei Obertrum entommen werden (ZAISBERGER, 1975).

Erste limnologisch-zoologische Untersuchungen wurden von IMHOF (1885) und BREHM (1906) publiziert. Im Laufe des 20. Jahrhunderts kamen zahlreiche Veröffentlichungen über die Fauna der Vorland- und anderer Salzkammergutseen hinzu: KASTNER (1905), MICOLETZKI (1912), PESTAL (1925), GASCHOTT (1927), KLEMM (1950), MAHLER (1952), STÜBER (1963), SCHULTZ (1971), JÄGER (1974), DANECKER (1980).

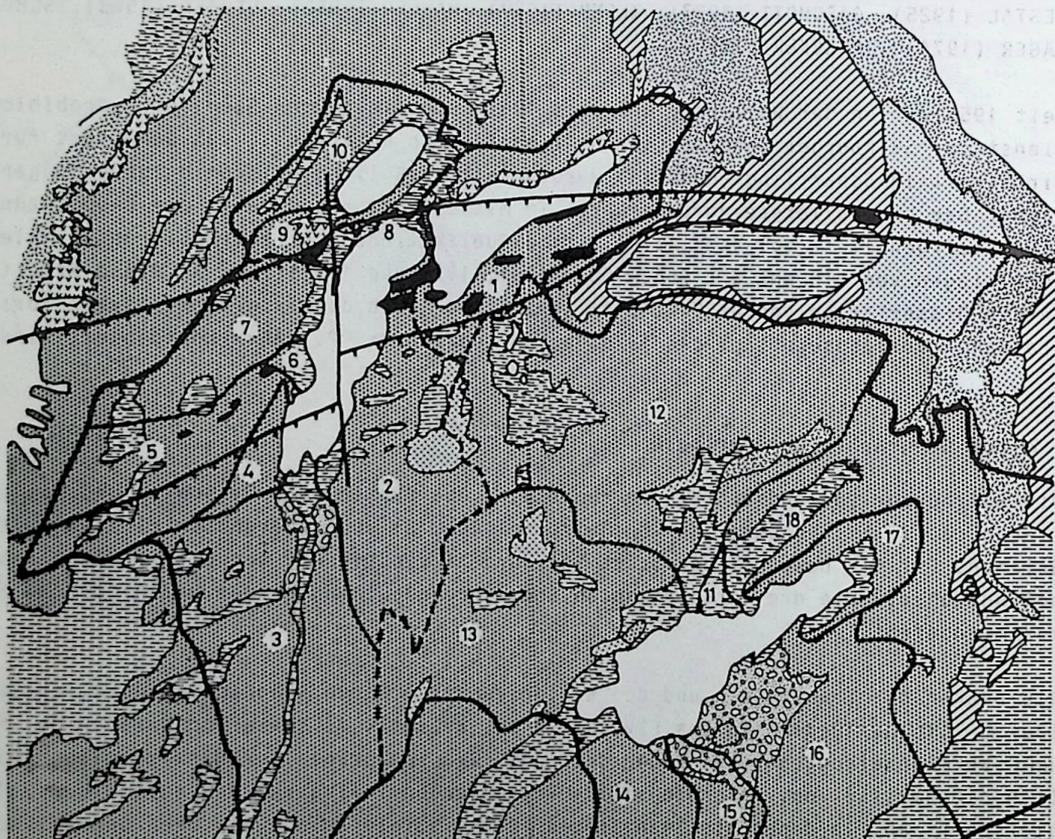
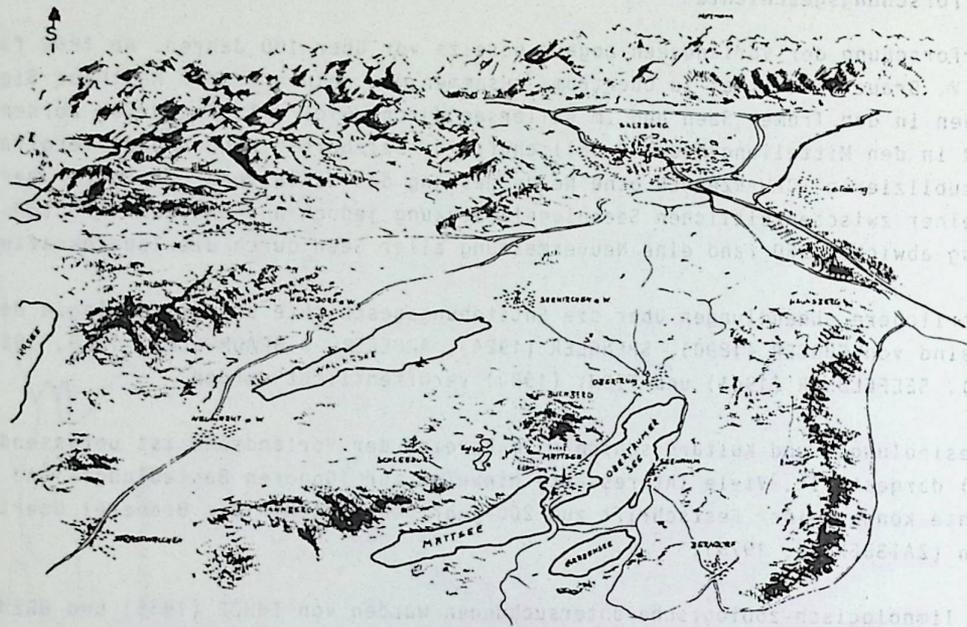
Seit 1958 werden der Wallersee und seit 1961 auch die Trumer Seen vom hydrobiologischen Dienst der Salzburger Landesregierung limnologisch untersucht. Vom Bundesamt für Fischereiwirtschaft in Scharfling (Mondsee) wurden seit 1939 limnologische Untersuchungen am Obertrumer See und Wallersee durchgeführt; im Mittelpunkt stand dabei die Beobachtung des Sauerstoffgehaltes (vgl. Kap. 2.4). Erste Publikationen zur Eutrophierungsproblematik der Seen liegen von FINDENEGG (1966, 1967, 1971, 1972 und 1973) vor. An diese Arbeiten und an die Dissertation von JÄGER (1974) schloß sich auch das interdisziplinäre Forschungsprogramm "Vorlandseen" an, das 1979 begann und von Dr. P. Jäger koordiniert wird.

2.2 Zur Geographie und Geologie

Die Salzburger Vorlandseen Niedertrumer See, Obertrumer See, Grabensee und Wallersee liegen ca. 25 km nordöstlich von Salzburg (Abb. 2) und gehören zum Einzugsgebiet der Salzach. Für die Bewohner der Stadt Salzburg bilden sie ein schnell erreichbares Naherholungsgebiet. Die drei erstgenannten Seen werden auch unter dem Namen "Trumer Seen" zusammengefaßt.

Die Becken der Trumer Seen und des Wallersees sind durch Anhöhen der nördlichsten Ausläufer alpiner Sedimente des Flysch und des Helvetikums sowie von Moränen der Mindel-Riß- und Würm-Vereisungen voneinander getrennt. Die Endmoränen der Würm-Vereisung bilden deutlich die Umrisse von zwei nordöstlich verlaufenden Teilbecken des ehemaligen Salzachgletschers ab, in denen die Seen liegen. Die glaziale Anlage der Seen und die verschiedenen Glazialstrukturen in ihrem Einzugsbereich sind ausführlich bei WEINBERGER (1955), SEEFELDNER (1961) und TICHY (1980) beschrieben. Demnach waren große Totetiskörper für die Anlage der Seen von entscheidender Bedeutung, indem sie eine vorzeitige Sedimentauffüllung der Becken während der Abschmelzphase des Gletschers verhinderten.

Abb. 2 Geogr. Lage der Salzburger Vorlandseen
(n. einer Panoramakarte des Fremdenverkehrsvereins Mattsee)



Hydrographie (n. PRODINGER, 1980)

- Grenze des ges. EZG der Vorlandseen
- Hydrogr. Grenze zwischen den Flüssen
- - - Hydrogr. Grenze zwischen den Seen
- 12 Nr. des EZG

Geologie (n. Baumgartner & Tichy, 1981)

- Moar, Sumpf
- Postglaziale Terrassen
- Wurm-Grund u. Endmoränen
- Wurm-Terrassen
- Überschiebung
- Verwerfung
- Riß-Moränen
- Mindel-Moränen
- Molasse
- Helvetikum
- Flysch

Abb. 3

Zumindest für die Trumer Seen muß eine Anlage nach orthotektonisch vorgegebenen Strukturen angenommen werden (WEINBERGER 1955; BAUMGARTNER & TICHY 1981, TICHY 1980). Während der alpinen Gebirgsfaltung wurde die nördlich der Seen liegende Molassezone von der Helvetischen Zone und diese wiederum von der Flyschzone überschoben. Die Trumer Seen liegen genau im Bereich dieser Überschiebungslinien. Eine NNW-SSE verlaufende Querstörung verläuft direkt durch den Obetrumer See; an ihr sind die alpinen Sedimente um ca. 850 m versetzt (TICHY 1980).

Die Abb. 3 zeigt die geologischen Verhältnisse im Bereich der Vorlandseen und deren Wassereinzugsgebiete. Die Zusammensetzung der im Einzugsgebiet anstehenden Gesteine und Lockersedimente, deren wichtigste lithologische Merkmale in der Legende zur geologischen Karte dargestellt sind, bestimmt die Zusammensetzung der allochthonen Mineralanteile im Sediment der Seen.

Morphologisch bilden die Flyschsedimente des Haunsberges (833 m), des Buchberges (796 m) und des Tannberges (784 m) eine SW-NE verlaufende Achse zwischen den Trumer Seen und dem Wallersee. Zwischen Hauns- und Buchberg liegt das Tal des Mattich-Baches, der von Süden in den Obertrumer See entwässert. Zwischen Buch- und Tannberg liegen die Egelseen, die als Relikte ehemaliger Toteiskörper angesehen werden. Während der letzten Vereisung haben Hauns- und Buchberg den Salzachgletscher als Nunatakare überragt, während sie zur Zeit der Mindel-Vereisung vom Gletscher überfahren waren, wie erratische Blöcke auf dem Gipfel der Berge belegen (WEINBERGER 1955).

Im Westen und Norden wird das Einzugsgebiet der Vorlandseen von würmeiszeitlichen Drumlins und Endmoränen begrenzt. Im Osten bildet der Thalgauberg die Wasserscheide zwischen dem Wallersee und dem Irrsee, der bereits im westlichsten Zweigbecken des ehemaligen Traun-Gletschers angelegt wurde. Im Süden entwässert die Fischach den Wallersee zur Salzach und bildet mit ihrem Einzugsgebiet die hydrologische Grenze zum Trumer Becken.

2.3 Hydrographie der Vorlandseen

Das oberirdische Einzugsgebiet der Seenkette der drei Trumer Seen hat einschließlich der Seeoberflächen (bez. auf die MHW) eine Größe von 64,1 km². Der Niedertrumer See ist durch einen künstlichen Damm vom Obertrumer See getrennt und entwässert in diesen durch einen Stichkanal. Zwischen dem Obertrumer See und dem Grabensee liegt ein quartärer Schotter- und Moränenrücken, durch den der verzweigte "Seegraben" die Verbindung zwischen den beiden Seen herstellt. Aus dem Grabensee entwässert die Mattig das gesamte Einzugsgebiet der Trumer Seen in Richtung Norden zum Inn.

Die Größe der Seeneinzugsgebiete ist sehr unterschiedlich (vgl. Abb. 3 und Tab. 1), was zur Folge hat, daß der Obertrumer See bei starken Niederschlägen wegen seines erheblich größeren Einzugsgebietes sowohl in den Grabensee als auch in den Niedertrumer See entwässert (Strömungsumkehr). Der Mattsee hat wegen seines kleinen Einzugsgebietes keine größeren Zuflüsse und bezieht sein Wasser aus diversen Gräben und Drainagen sowie aus dem Untergrund im Bereich der ihn durchquerenden Überschiebungsbahn, wie Differenzen in der Wasserbilanz vermuten lassen. Das Wassereinzugsgebiet des Obertrumer Sees hat eine Fläche von 41,6 km² (ohne Seefläche), die von einigen größeren Bächen und zahlreichen Gräben und Drainagen entwässert wird. Die größten Zuflüsse neben dem Mattsee-Zulauf sind: Mattich-Bach, Teufels- und Pfarrgraben sowie die Bäche bei Feichten, Mitterhof und Ausserhof. Auch für den Obertrumer See wird aufgrund der Wasserbilanz die Zufuhr von Grundwasser im Bereich der Störungszone angenommen. Außer aus dem Ablauf des Obertrumer Sees wird der Grabensee nur vom Flurnsbach und einigen kleineren Gräben und Drainagen gespeist.

Im Gegensatz zu den Trumer Seen hat der Wallersee mehrere größere Zuflüsse (Wallerbach, Mühlbach, Schlachterbach, Altbach), die insgesamt ein Einzugsgebiet von 103,1 km² haben. Die Fischach entspringt dem Wallersee und entwässert diesen in Richtung Südwest zur Salzach. Insgesamt entwässert über die Vorlandseen ein Gebiet von 174,3 km².

Hydrographische Beobachtungen aus dem Einzugsbereich der Seen liegen seit der Jahrhundertwende vor. damals wurden erste Pegel und vereinzelt auch Ombrometer eingerichtet: Mattsee (Pegel, Ombrometer), Seeham (Pegel), Grabensee/Zellhof (Pegel), Straßwalchen (Ombrometer), Wallersee/Zell (Pegel). In den letzten Jahren sind im Rahmen des Projektes "Vorlandseen" zahlreiche Pegel - auch an den Fließgewässern des Einzugsgebietes - hinzugekommen.

In Tab. 1 sind die wichtigsten hydrographischen Daten sowie die über 50 Jahre gemittelten Wasserstandsdaten der Seen zusammengefaßt.

	Niedertrumer See	Obertrumer See	Grabensee	Wallersee
Einzugsgebiet (km ²) 1)	7,6	41,6	5,2	103,1
Seefläche (km ²) 1)	3,6	4,8	1,3	6,1
Σ EZG (km ²)	11,2	46,4	6,5	109,2
Max. Länge (km) 1)	4,2	4,9	2,0	5,6
Max. Breite (km) 1)	1,8	1,3	0,8	2,0
Max. Tiefe (m) 1)	42,0	36,3	14,0	23,0
Mittl. Tiefe (m) 1)	17,1	17,4	9,3	12,5
Volumen (Mio. m ³) 1)	61,8	84,6	12,6	76,6
Mittl. Wasseraufent- haltungsdauer (Tage) 1)	1726	619	83	289
Mittl.				
Wasserst. (m ü. NN) 1)	502,90	502,80	502,80	506,00
Pegelnul (m ü. NN) 1)	501,57	501,80	501,72	504,23
Mittl. Zufluß (m ³ /s) 1)	0,298	1,550	1,780	2,300
Mittl. Abfluß (m ³ /s) 1)	0,415	1,858	1,760	3,070
Wasserstände im 50 Jahr.				
Mittel bez. auf Pegelnul: 2)				
MNW	+0,78	+0,53	-	+0,12
MNW	+1,10	+0,86	+0,75	+0,44
MW	+1,31	+0,99	+1,06	+0,87
MHW	+1,51	+1,44	+1,47	+1,76
HHW	+2,35	+2,44	+2,12	+3,14

Tab. 1 Hydrographische Daten der Vorlandseen n. JÄGER 1985¹ und PRODINGER 1980²

2.4 Limnologische Situation der Vorlandseen

Die Vorlandseen gehören zum Typus der dimiktisch, holomiktischen Seen. Sowohl im Sommer als auch im Winterhalbjahr kommt es zur Ausbildung einer stabilen Thermo-Chemokline. Im Sommer entwickeln sich in den Seen rasch hohe Oberflächentemperaturen, die 20° C-Isotherme liegt bei 5 - 6 m Wassertiefe (MOOG & JAGSCH, 1980). Wegen der geringen Wassertiefe erwärmt sich im Grabensee und im Wallersee auch das Hypolimnion auf 6 - 8° C; in den beiden anderen Seen liegen die sommerlichen Hypolimniontemperaturen zwischen 5 und 7° C. Im Winter frieren die Vorlandseen regelmäßig zu, die wechselnd dicke Eisbedeckung hält meist 2 Monate an, wobei es zur inversen Temperaturschichtung kommt.

Zunehmende Beschwerden der Berufsfischer über Funde von toten Reinanken und Maränen veranlaßten das Fischereiiinstitut Scharfling zu Beginn der sechziger Jahre, die Trumer Seen genauer limnologisch zu untersuchen. 1962 wurde im Obertrumer See erstmals die Cyanophycee *Oscillatoria rubescens* (Burgunderblutalge) gefunden (CZERNIN-CHUDENITZ 1980). Im Herbst 1964 kam es im Bereich der Bucht von Staffl zu einer tintengrünen Färbung des Wassers infolge einer Wasserblüte der Cyanophycee *Anabaena spiroida*. Ab 1965 trat *Oscillatoria rubescens* verstärkt auf und verursachte ab 1968 im Obertrumer See und im Grabensee spektakuläre Wasserblüten, während derer sich die Seen rot ver-

färbten. Der Niedertrumer See blieb von dieser Entwicklung noch verschont, nur gelegentlich wurden nach starken Niederschlägen Algen aus dem Obertrumer See infolge Strömungsumkehr (s. Kap. 2.3) eingeschwemmt. Um das zu unterbinden, wurde in den Verbindungskanal ein Wehr eingebaut, das bei Bedarf geschlossen wird. Abb. 4 zeigt die Entwicklung der Phytoplankton-Biomasse im Obertrumer See, Abb. 5 die Entwicklung der Sichttiefe in den Jahren 1965 - 1984. Die Lichtdurchlässigkeit nahm von Beginn der sechziger Jahre bis 1970 um 19 % ab (JAGSCH & HAIDER 1982).

Mit der zunehmenden Produktion von Plankton Biomasse ging der O_2 -Gehalt des Hypolimnions in den Trumer Seenzurück. Erste O_2 -Messungen wurden schon 1939 von EINSELE durchgeführt. Abb. 6 zeigt die Entwicklung der O_2 -Gehalte des Obertrumer Sees seit 1940. Heute liegt zum Ende der Sommerstagnation die Sauerstoffchemokline in gleicher Tiefe (5 - 9 m) wie die Thermokline. In Abb. 7 sind die Sauerstoff- und Temperaturdaten des Jahres 1982 zusammengestellt.

Im Niedertrumer See schritt die Eutrophierung in den siebziger Jahren nicht so rasch voran wie im Obertrumer See und im Grabensee. Die Sichttiefe betrug noch bis zu 4 m, auch die O_2 -Daten sind noch etwas günstiger (Abb. 7), der See kann als meso/eutroph bezeichnet werden. Die zunehmende Eutrophierung der Trumer Seen in den letzten Jahrzehnten ist auch über den Anstieg der Phosphor-Gehalte dokumentiert (Tab. 2 und 3).

	<u>28.9.'66</u>	<u>28.10.'75</u>	<u>7.9.'78</u>	<u>26.8.80</u>	<u>1.9.'82*</u>
2 m Tiefe	24	64	83	43	29
über Grund	101	679	755	634	428

Tab. 2 Obertrumer See: Gesamt-Phosphor (P_t) in mg/m^3 (Daten aus JAGSCH & HAIDER 1982 und unveröff. Daten d. Salzburger Landesregierung (*))

	<u>7.10.'75</u>	<u>7.9.'78</u>	<u>28.9.79</u>	<u>8.9.82*</u>
2 m Tiefe	19	54	29	12
über Grund	30	140	48	37

Tab. 3 Niedertrumer See: Gesamt-Phosphor (P_t) in mg/m^3 (Daten aus JAGSCH & HAIDER 1982 und unveröff. Daten d. Salzburger Landesregierung (*))

Seit 1983 weisen einige limnologische Parameter auf eine leichte Besserung der Situation in den Trumer Seen hin, was auf die deutlich verbesserten Maßnahmen zur Abwasserbehandlung zurückgeführt wird. Nach quantitativen Erhebungen von SCHINDLBAUER (1986) hat der punktuelle P-Eintrag in die Seen seit 1970 um etwa 50 % abgenommen.

Aufgrund von Planktonuntersuchungen in den Jahren 1974 - 1966 wurde der Wallersee von FINDENEKG (1971) noch als oligo-mesotroph eingestuft. Im Herbst 1968 stieg jedoch die Algenbiomasse des Wallersees auf das 12-fache der frühen sechziger Jahre an. Dabei dominierte die Alge *Ceratinum hirundinella*, die in den Folgejahren grünlich-braune Wasserblüten verursachte. *Oscillatoria rubescens* taucht im Wallersee seit 1969 auf.

Die Entwicklung der O_2 -Gehalte ist mit der des Obertrumer Sees vergleichbar. Von 1959 bis 1969 stieg die 1 mg/l Grenze des Sauerstoffs von 12 m auf 8 m an (Bezugsmonat: Juli) (MOOG & JAGSCH 1980). Die Entwicklung der Nährstoffgehalte ist in Tab. 4 dargestellt.

Abb. 4 Obertrumer See, Phytoplankton-Biomasse-Durchschnittswerte im trophogenen Wasserkörper aus: JAGSCH & HAIDER (1982)

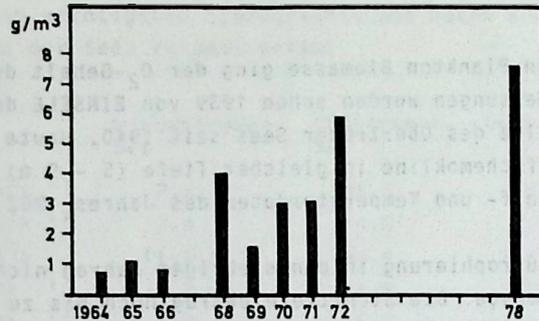


Abb. 5 Die Entwicklung der Sicht-Tiefe (Secchi disc) im Obertrumer See seit 1965

Daten aus: JAGSCH & HAIDER, (1982), CZERNIN (1985).

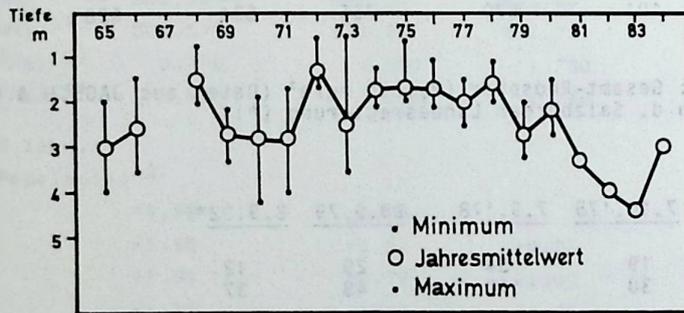


Abb. 6 Obertrumer See, Sauerstoffgehalt in den Jahren 1940, 1963, 1973 und 1980 (Ende der Sommerstagnation); aus: JAGSCH & HAIDER 1982.

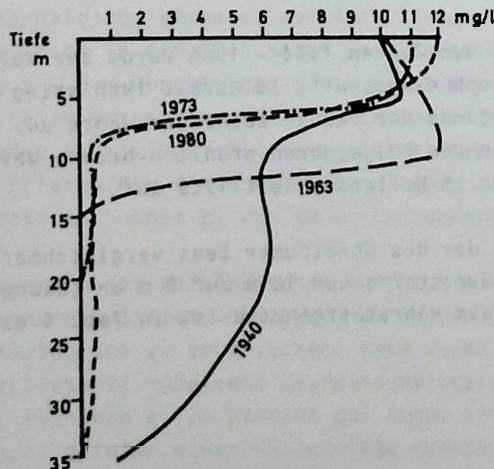
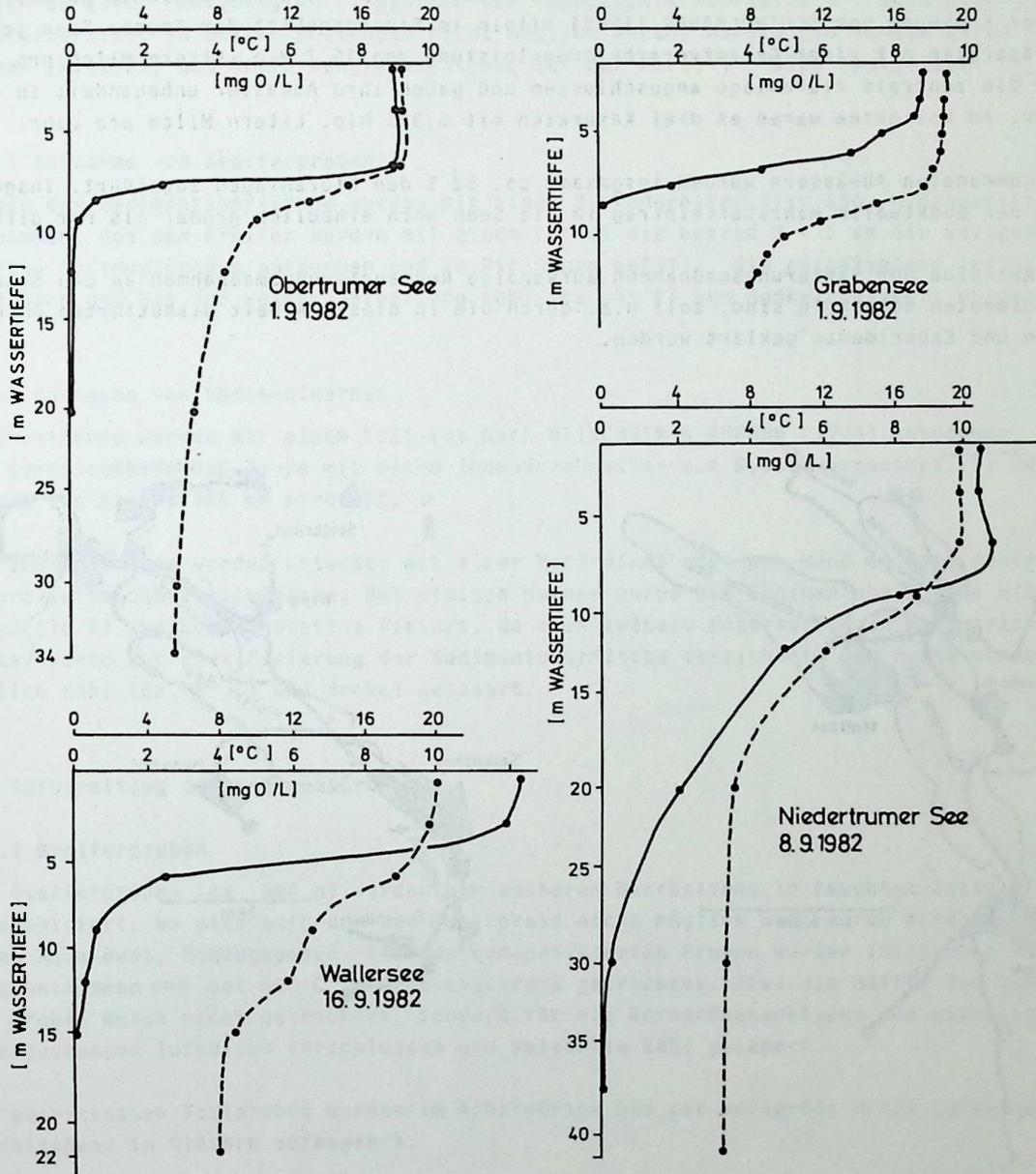


Abb. 7 Sauerstoff u. Temperaturdaten der Vorlandseen im September 1982
(n. unveröffentl. Daten der Salzburger Landesregierung,
Hydrobiologischer Dienst)



3. Methodik

3.1 Probenahme

Nach ersten Voruntersuchungen im März 1982 wurde im Juni 1982 mit den Sedimentuntersuchungen an den Vorlandseen begonnen. Bis September 1984 wurden in acht Kampagnen insgesamt 112 Sedimentkerne und 238 Greiferproben von einem Kleinboot bzw. Schlauchboot aus entnommen. Aus den Abb. 9 bis 11 kann die Bezeichnung der Proben und ihre Position in den verschiedenen Seen entnommen werden. Die Bestimmung der Position der Greiferproben wurde unmittelbar nach der Entnahme mittels Tiefenlotungen (Bleilot, Züllig-Winde) und Sextantpeilungen an zuvor festgelegten Fixpunkten der topographischen Karte 1 : 5000 durchgeführt. Im Uferbereich, wo Sextantpeilungen nicht möglich waren, wurden die Punkte durch Tiefenmessungen (Bleilot) und Entfernungsabschätzung auf der Karte 1 : 5000 festgelegt.

3.1.1 Entnahme von Greiferproben

Proben der Sedimentoberfläche wurden mit einem Backengreifer (Typ 350, Hydrowerkstätten Kiel) entnommen. Aus dem Greifer wurden mit einem Löffel die oberen 3 - 5 cm der weitgehend ungestörten Sedimentproben entnommen und in PVC-Rohre gefüllt, die anschließend luftdicht verschlossen und bis zur Weiterbearbeitung kühl (ca. 5° C) und dunkel gelagert wurden.

3.1.2 Entnahme von Sedimentkernen

Sedimentkerne wurden mit einem Fall-Lot nach MEISCHNER & RUMOHR (1974) entnommen. Dabei wurden durchsichtige PVC-Rohre mit einem Innendurchmesser von 5,9 cm verwendet. Es wurden Kernlängen von bis zu 146 cm erreicht.

Die Sedimentkerne wurden entweder mit einer Motorwinde oder per Hand an Bord gehievt und sofort luftdicht verschlossen. Bei einigen Kernen wurde die Sedimentoberfläche mit Formaldehyd (10 %) und Speisegelatine fixiert. Wo dies spätere Untersuchungen beeinträchtigt hätte, wurde auf eine Fixierung der Sedimentoberfläche verzichtet. Die Kerne wurden schnellstmöglich kühl (ca. 5° C) und dunkel gelagert.

3.2 Aufbereitung der Sedimentproben

3.2.1 Greiferproben

Die Greiferproben (ca. 500 g) wurden zur weiteren Bearbeitung in feuchtem Zustand durch Rühren homogenisiert. Wo dies aufgrund der Festigkeit nicht möglich war, wurde schwach ammoniakalisches Aqua-dest. hinzugegeben. Aus den homogenisierten Proben wurden Teilproben von ca. 50 g entnommen und bei 60° C im Trockenschrank getrocknet. Etwa die Hälfte der homogenisierten Proben wurde nicht getrocknet, sondern für die Korngrößenanalysen und mikroskopische Untersuchungen luftdicht verschlossen und weiterhin kühl gelagert.

Die getrockneten Teilproben wurden im Achatmörser bis zur Korngröße < 125 µm aufgemahlen und anschließend in Gläsern aufbewahrt.

3.2.2 Sedimentkerne

Die Sedimentkerne wurden im Seenforschungslabor der EAWAG/ETH in Luzern Kastanienbaum aufbereitet. Die PVC-Rohre wurden an gegenüberliegenden Seiten mit einer Tischkreissäge aufgeschlitzt, die so eingestellt wurde, daß das Sägeblatt möglichst nicht bis in das Sediment gelangte. Anschließend wurde der Sedimentkern mit einem Elektrolysemesser nach STURM & MATTER (1972) halbiert, wobei die Kernhälften jeweils in einer Halbschale der zuvor zersägten PVC-Rohre verblieben.

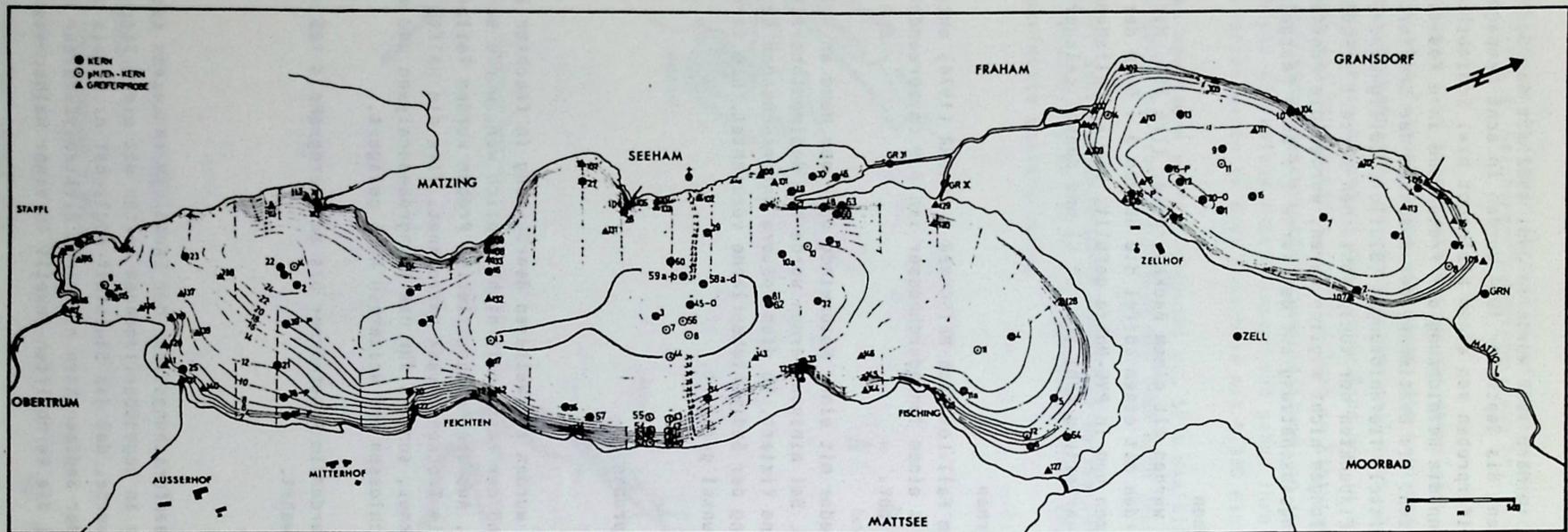


Abb.9 Bathymetrische Karte des Obertrumer Sees und des Grabensees mit den Stationen der Kern und Greiferproben.

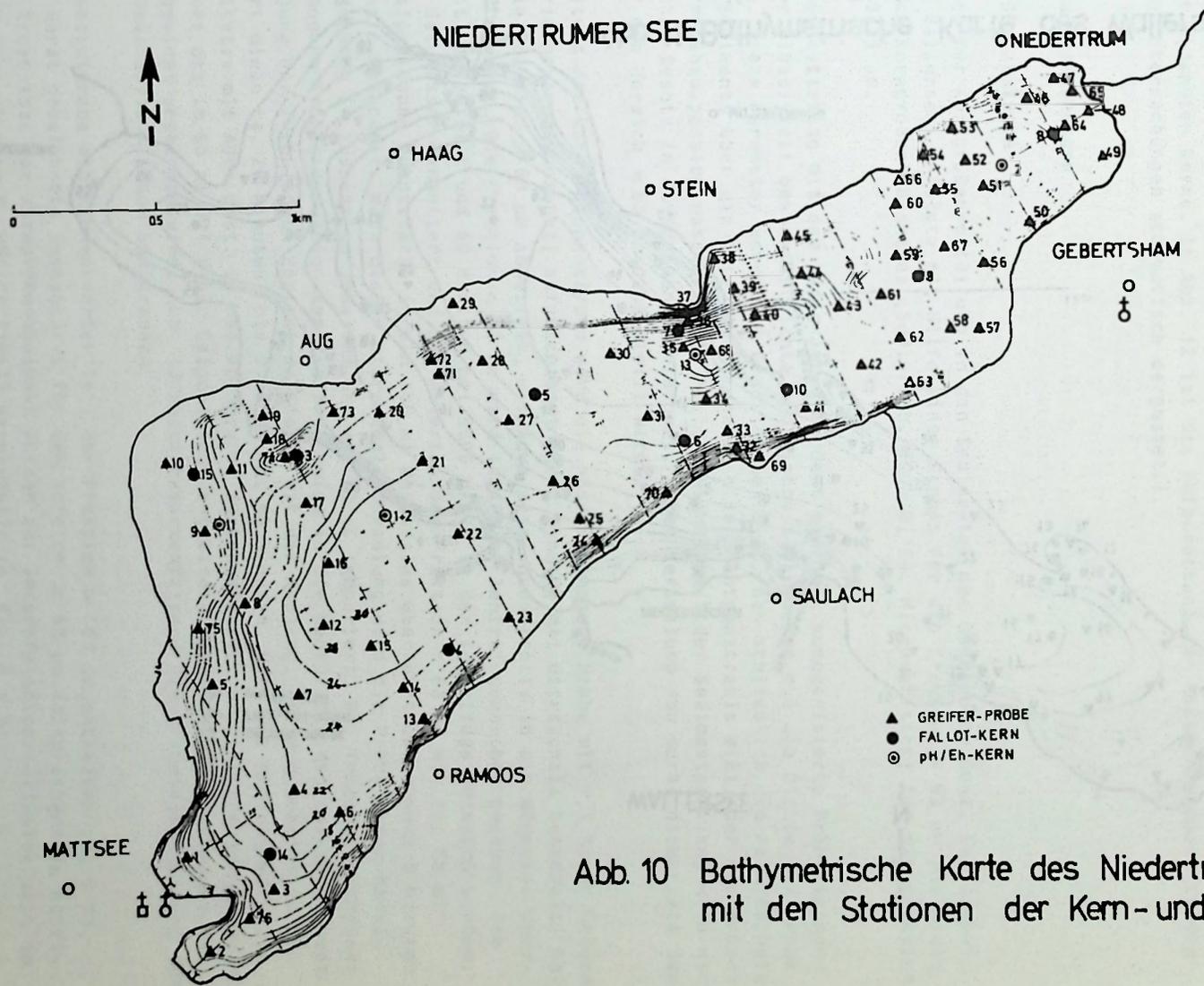


Abb. 10 Bathymetrische Karte des Niedertrumer Sees mit den Stationen der Kern- und Greiferproben

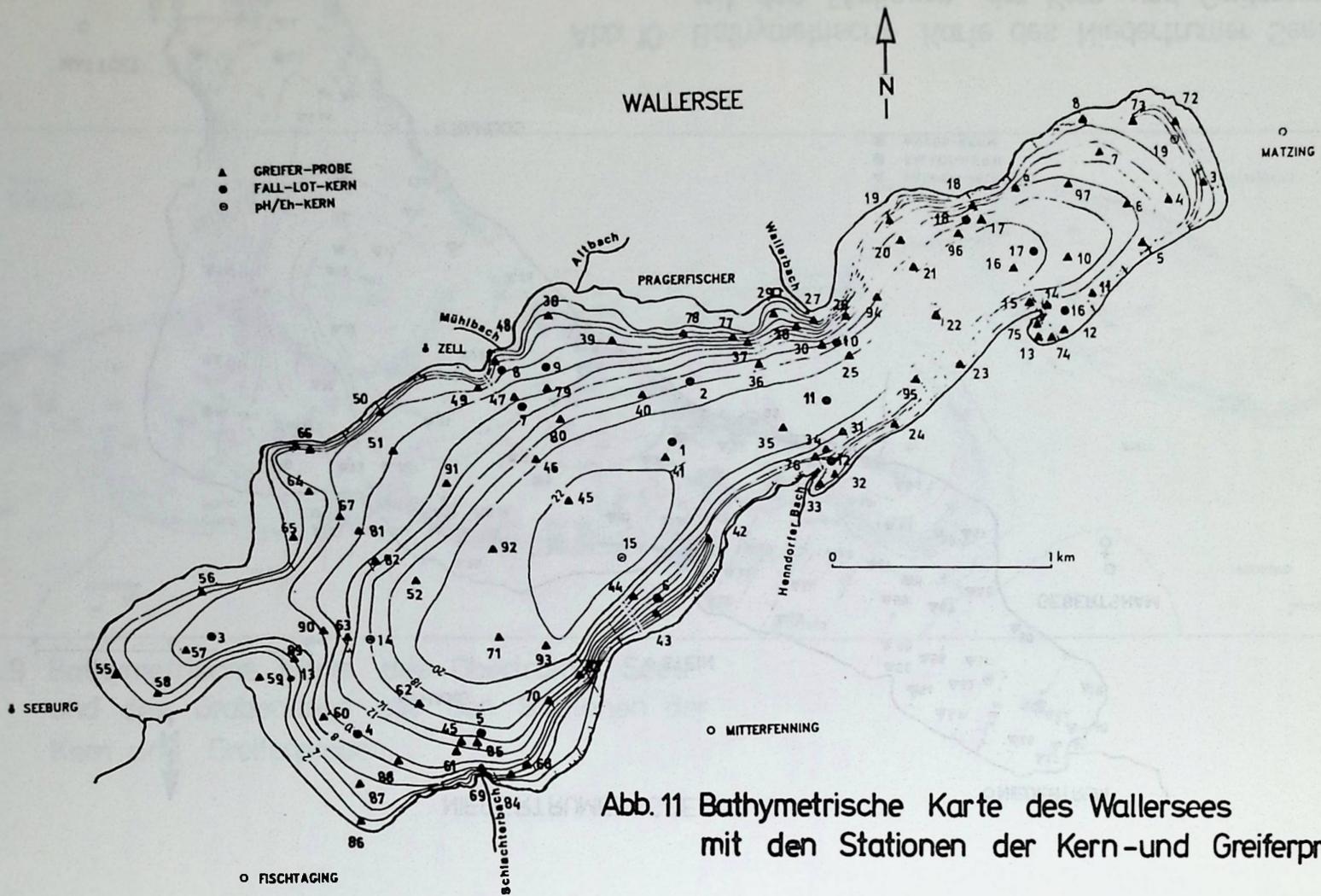


Abb.11 Bathymetrische Karte des Wallersees mit den Stationen der Kern- und Greiferproben

Nach der Kernhalbierung erfolgte die fotografische Dokumentation und makroskopische Beschreibung der Kernhälften noch bevor durch Oxidationsvorgänge eine Veränderung der Sedimentfarben eintrat. Anschließend wurden Teilproben für Korngrößenanalysen und sedimentchemische Untersuchungen entnommen. Die letzteren wurden, wie unter 3.2.1 beschrieben, getrocknet. Die Teilproben für die Korngrößenanalyse wurden sofort weiterverarbeitet (s. 3.3.1). Einige repräsentative Kerne aus dem Profundal- und Litoralbereich der Seen wurden systematisch alle 2,5 cm beprobt, wobei jeweils Sedimentschichten von 1 cm Dicke entnommen wurden. Die meisten Kerne wurden entsprechend der makroskopisch erkennbaren Unterschiede in der Sedimentbeschaffenheit selektiv beprobt. Ein geringer Teil der Sedimentkerne wurde nicht aufgesägt, sondern mit einem Stößel aus den PVC-Rohren in Halbschalen ausgestoßen. Nennenswerte Sedimentstauchungen wurden dabei nicht beobachtet. Die Kerne wurden nach dem Ausstoßen ebenfalls mit dem Elektrolysemesser halbiert und anschließend ebenso behandelt wie die zuvor genannten Kerne. In Abb. 12 ist die Aufbereitung der Sedimentproben für die verschiedenen Untersuchungen schematisch dargestellt.

3.3 Sedimentuntersuchungen

3.3.1 Korngrößenanalysen

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung in den Sedimenten des Obertrumer Sees, des Grabensees und des Wallersees erfolgte mit Hilfe eines Siebes für die Fraktion $> 63 \mu\text{m}$ und eines elektronischen Korngrößenmeßgerätes (Sedigraph, 5000 D, Fa. Micromeritics) für die Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ bis $0,25 \mu\text{m}$.

Die Korngrößenbestimmung mit dem Sedigraph erfordert eine gut homogenisierte Probensuspension in einer Flüssigkeit bekannter Dichte und Viskosität. Ebenso muß die Dichte der Probe bekannt sein. Diese Parameter werden am Gerät eingestellt, das schließlich die Fallgeschwindigkeit des Sediments über die Intensitätszunahme eines Röntgenstrahls mißt, der die Meßzelle mit der Probensuspension passiert. Die Fallgeschwindigkeit der Sedimentpartikel wird nach dem Stoke'schen Gesetz in Korngrößen umgerechnet, deren Verteilung vom Gerät direkt als Summenkurve für den Bereich $< 63 \mu\text{m}$ dargestellt wird.

Zur Vorbereitung der Korngrößenanalysen wird die naß eingewogene Probe mit 0,1 %iger Calgonlösung (Natriumhexametaphosphat) aufgeschwemmt und 6 Minuten mit Ultraschall behandelt. Danach wird die Fraktion $> 63 \mu\text{m}$ abgesiebt, mit Aqua dest. quantitativ in ein Wäageglas überführt und getrocknet. Die Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ wird in 400 ml Zentrifugenbecher gegeben, die mit Aqua dest. aufgefüllt und 60 Minuten bei 3600 U/min in der Zentrifuge belassen werden. Danach wird das Wasser dekantiert und das Material der Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ mit ca. 60 ml 0,1 %iger Calgonlösung quantitativ in ein 100 ml Becherglas überführt und erneut 6 Minuten mit Ultraschall behandelt. Nach dieser Ultraschallbehandlung wird die Probe unter kontinuierlichem Rühren in Suspension gehalten und auf 30°C temperiert. Bei Temperaturkonstanz wird die homogene Probensuspension aus dem Becherglas in die Meßküvette des Geräts gepumpt. Nach Beendigung der Turbulenzen beginnt das Gerät mit der Messung. Für den Bereich $63 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}$ dauert diese ca. 20 Minuten, bis $0,25 \mu\text{m}$ ca. 60 Minuten. Nach der Messung wird die Probe quantitativ mit Aqua dest. in das Becherglas zurückgeführt, zur Trockene eingedampft und gewogen, wobei das in 60 ml 0,1 %iger Calgonlösung enthaltene Natriummetahexametaphosphat vom Trockengewicht abgezogen wird. Abb. 13 zeigt zusammenfassend die Probenaufbereitung für die Korngrößenanalyse mit dem Sedigraphen.

Ist in der Gesamtprobe ein nennenswerter Teil der Fraktion $> 63 \mu\text{m}$ enthalten (ab 3 %), ist die vom Gerät gezeichnete Summenkurve für den Bereich $< 63 \mu\text{m}$ entsprechend zu korrigieren. Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen wurden zur Interpretation teilweise auch im Sand-Silt-Ton-Dreieck nach G. MÜLLER (1961) dargestellt (s. Kap. 5.1.2).

Fehlerbetrachtung:

Die organische Substanz wurde bei der Probenaufbereitung nicht entfernt, um Veränderungen

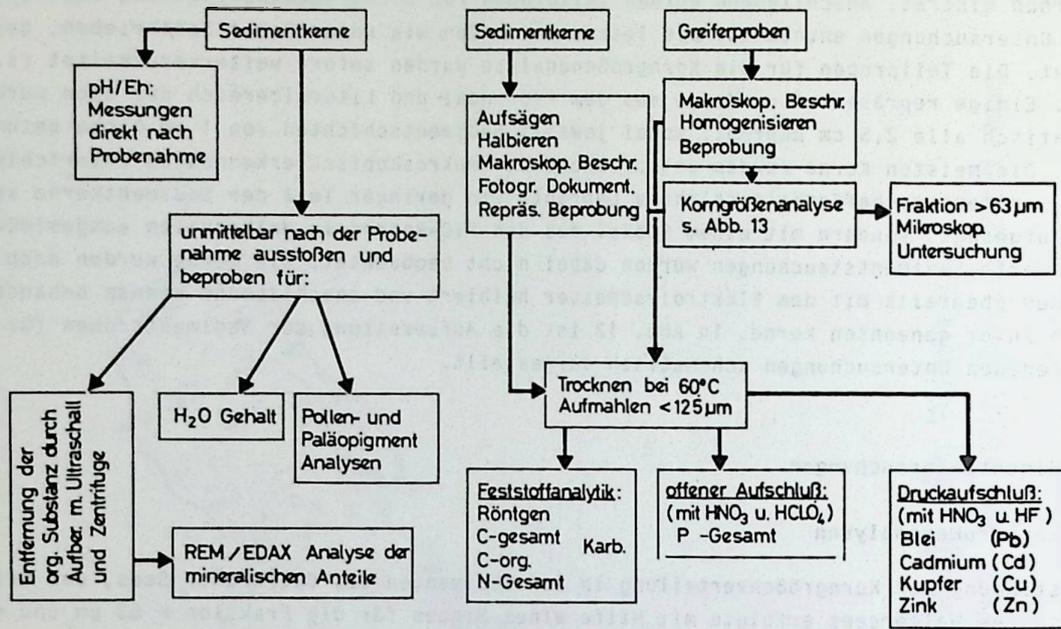


Abb. 12 Schematische Darstellung der Sedimentaufbereitung und Analytik

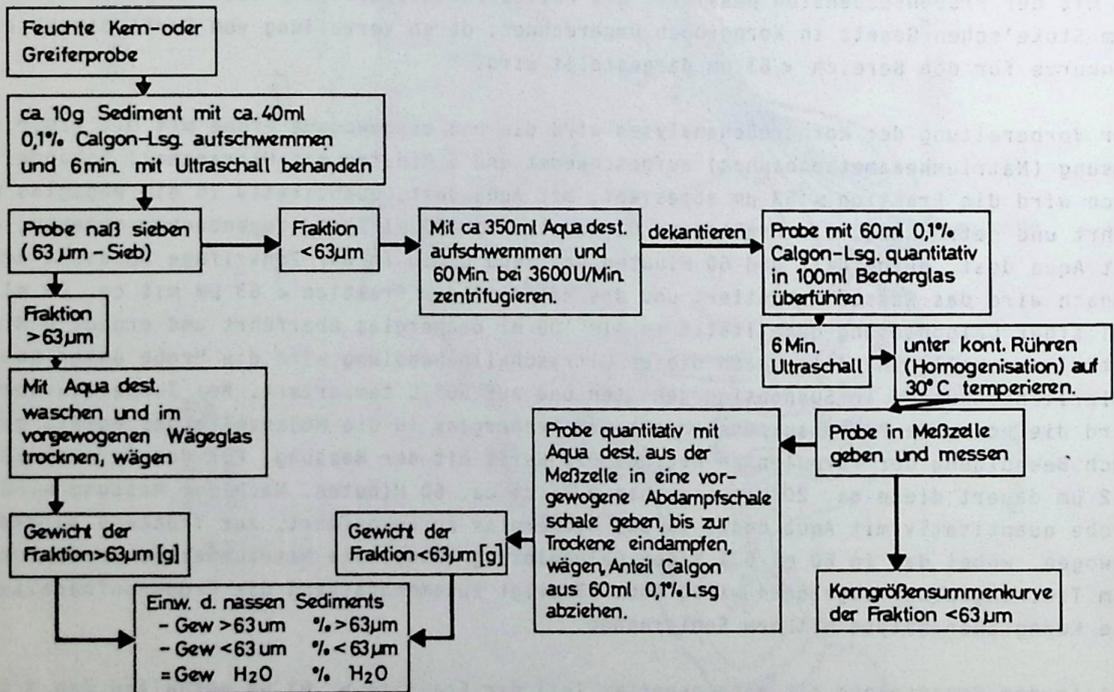


Abb. 13 Schema zur Probenaufbereitung für die Korngrößenanalyse mit dem Sedigraphen.

des Kornspektrums durch die Behandlung mit H_2O_2 zu vermeiden. Im Vergleich mit identischen Proben, die mit H_2O_2 aufbereitet wurden, zeigten sich minimale Abweichungen von $\pm 2\%$ (LINDNER, 1984). Da die organischen Partikel für die Röntgenstrahlung durchlässig sind, kann ihr Einfluß auf die Messung vernachlässigt werden. Neben Fehlern bei der Probenaufbereitung beinhaltet die Messung selbst folgende Fehlermöglichkeiten:

- Einflüsse der Gefäßwandung in der Meßzelle
- Partikelbeschleunigung (Zeit vom Beginn der Messung bis zum Erreichen der konstanten Fallgeschwindigkeit)
- Thermische Einflüsse durch das Meßsystem
- Teilchen-Wechselwirkung
- Inhomogenitäten der Suspensionsflüssigkeit
- Braun'sche Molekülbewegung und Diffusion
- Elektronische Störungen
- Mechanische Faktoren (verunreinigte Meßzelle, Dejustage des Röntgenstrahls usw.).

Der Gerätehersteller gibt für die Summe der Fehlerquellen einen Wert von $\pm 1\%$ an. Bedeutender sind die Fehler bei der Probenaufbereitung, die nach den Erfahrungen des EAWAG-Labors bei $\pm 10\%$ liegen.

Ohnehin sollte man sich bei der Korngrößenanalyse bewußt sein, daß die Auswertung über das Stoke'sche Gesetz mit zahlreichen Vereinfachungen (ideale Kugelform der Partikel etc.) behaftet ist. Korngrößenanalysen sind daher eher ein relativer Vergleich von Proben als eine absolute Messung.

Die Korngrößenanalysen der Sedimente des Niedertrumer Sees wurden von LINDNER (1984) mit dem Pipett-Verfahren n. G. MÜLLER (1964) durchgeführt. Vergleichende Untersuchungen mit identischen Proben zeigten dabei, daß die Pipett-Analysen etwa zu dem gleichen Ergebnis führen wie die Sedigraph-Analysen. Der Vorteil der letzteren besteht in dem wesentlich geringeren Zeitaufwand.

3.3.2 Röntgendiffraktometrie

Zur Bestimmung des Mineralbestands in den Sedimenten wurden repräsentativ ausgewählte Proben röntgendiffraktometrisch untersucht. Dabei wurden Übersichtsaufnahmen von $3^\circ - 64^\circ (2\theta)$ mit einer Geschwindigkeit von $1^\circ/\text{Minute}$ angefertigt. Gemessen wurde mit $Cu K_\alpha$ -Strahlung bei 40 KV und 30 mA. Es wurden damit alle nicht amorphen Mineralkomponenten mit einem Anteil von mehr als 5 Gew.% sicher erfaßt.

An Sedimenten des Niedertrumer Sees und des Wallersees wurde Dolomit röntgendiffraktometrisch nach der Methode von TENNANT & BERGER (1957) bestimmt (LINDNER 1984; GERMATSIDIS 1985).

3.3.3 Bestimmung des spezifischen Gewichts

An repräsentativ ausgewählten Sedimentproben des Obertrumer Sees und des Grabensees wurde das Raumgewicht der festen Bestandteile in der Probe als mittleres spezifisches Gewicht der vorhandenen Mineralkomponenten und der organischen Substanz bestimmt.

Zur Messung werden ca. 5 - 10 g Sediment bei $105^\circ C$ im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz nachgetrocknet und anschließend in ein Pyknometer (100 ml) eingewogen; G_t = Gew. der trockenen Sedimentprobe. Das Gewicht des vollständig mit Wasser gefüllten Pyknometers wird zuvor als G_w bestimmt. Das offene Pyknometer mit der Probe wird in einen Vakuumexsikkator gegeben, um die Luft aus dem Probenpulver zu entfernen. Anschließend wird das Pyknometer mit ausgekochtem, destilliertem Wasser (CO_2 -Entzug) gefüllt (Überlaufkapillare) und gewogen (G_p). Das spez. Gewicht des Wassers ($s H_2O$) wird entsprechend der Temperatur (messen) aus einer Tabelle entnommen. Das Volumen des von der Sedimentprobe verdrängten Wassers ergibt sich dann nach der Formel

$$V = \frac{G_w + G_t - G_p}{s \text{ H}_2\text{O}}$$

Das spez. Gew. der Probe ergibt sich dann aus:

$$s_p = \frac{G_t}{V}$$

3.3.4 Die Bestimmung des Wassergehaltes

Zur Wassergehaltsbestimmung wurden Sedimentkerne unmittelbar nach der Entnahme cm-weise aus-
gestoßen und beprobt.

Das aus den senkrecht stehenden Kernrohren austretende Sediment wird mit einem Spatel in vorgewogene Wägegläser (G_0 = Gew. des leeren Wägeglases mit Deckel) gefüllt, die sofort luftdicht verschlossen und innerhalb der nächsten Stunden mit Inhalt gewogen werden (G_f). Anschließend werden die Gläser geöffnet und zur Trocknung der Proben bei 60°C in den Trockenschrank gestellt. Nach Erreichen von Gewichtskonstanz werden die Probengläser wieder verschlossen und erneut gewogen (G_t). Die Berechnung des Wassergehaltes ergibt sich aus:

$$\text{Gew. H}_2\text{O} = G_f - G_t.$$

3.3.5 Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffs (C_{org})

Der Anteil des C_{org} im Sediment wurde coulometrisch nach HERRMANN & KNAKE (1973) bestimmt. Dazu wurde eine Titriereinrichtung (Coulomat) der Fa. Ströhlen in Verbindung mit einem Titrator (Modell E 526) und einem Coulostät (Modell E 524) der Fa. Metrohm benutzt.

Für die C_{org} -Bestimmung wird das getrocknete und $< 125 \mu\text{m}$ aufgemahlene Sediment in ausgeglühte Porzellanschiffchen eingewogen (50 - 100 mg) und zur Entfernung des Karbonatkohlenstoffs vorsichtig mit konz. HCl behandelt. Um dabei das Verspritzen von Probenmaterial zu vermeiden, wird die Probe zuvor mit Methanol benetzt. Wenn keine CO_2 -Entwicklung mehr zu erkennen ist, wird überschüssige Säure und Methanol bei 110°C abgeraucht.

Die nun karbonatfreie Probe wird im Porzellanschiffchen bei 1250°C im Sauerstoffstrom verbrannt. Das aus der Verbrennung des organischen Materials entstehende CO_2 wird coulometrisch titriert. Der verbrauchte Strom ist proportional zum C_{org} -Gehalt der Probe.

Fehlerbetrachtung:

Es wurden grundsätzlich Doppelbestimmungen durchgeführt, wobei die mittlere Varianz der Proben bei 1,5 % lag. Als höchste Varianz wurden 5 % toleriert. Als größte Fehlerquelle erwiesen sich Reste von HCl, die mitunter ins Kathodengefäß gelangten, obwohl der Gasstrom zur Bindung von H_2O und HCl über Perhydrittabletten und heißer (400°C) Silberwolle geleitet wurde. Ein CO_2 -Eintrag aus dem verwendeten technischen Sauerstoff konnte durch Bindung an CaCl_2 vollständig unterbunden werden. Das Eindringen von Luft- CO_2 konnte durch Erzeugung eines O_2 -Vorhanges vor dem Verbrennungsrohr ebenfalls verhindert werden. Demzufolge traten Blindwerte über den verwendeten Meßzeitraum (5 Minuten) hinweg nicht auf.

Die Überprüfung der Richtigkeit erfolgte durch Messung von reinstem CaCO_3 nach jeweils 6 Doppelbestimmungen. Dabei wurde eine Abweichung von 0,5 % des Sollwertes toleriert:
 $12,00 \% \pm 0,06 \% \text{ C}$.

3.3.6 Bestimmung des Karbonatkohlenstoffs (C_{Karb})

Der an Karbonat gebundene Kohlenstoff wurde ebenfalls colometrisch nach HERRMANN & KNAKE (1973) bestimmt. Dabei wird der Gesamtkohlenstoff in der Probe gemessen. Der Karbonatkohlenstoff ergibt sich aus der Differenz von Gesamtkohlenstoff und organisch gebundenem Kohlenstoff. Der Karbonatkohlenstoff wird stöchiometrisch zu Kalzit umgerechnet. Soweit die Proben höhere Anteile an Dolomit enthalten ($> 2\%$) muß zuvor das Kalzit/Dolomit Verhältnis bestimmt werden. Bei den Proben aus dem Obertrumer See und dem Grabensee war das nicht notwendig, da Dolomit - wenn überhaupt - nur in Spuren vorkommt.

Fehlerbetrachtung:

Da bei der Gesamtkohlenstoffbestimmung die HCl-Behandlung wegfällt, konnte für diese Analysen eine mittlere Varianz von 0,8 % erreicht werden. Toleriert wurde eine maximale Varianz von 1,5 %. Die Richtigkeit wurde ebenfalls mit reinem CaCO_3 überprüft, wobei auch hier eine Abweichung von 0,5 % vom Sollwert toleriert wurde: $12,00\% \pm 0,06\% \text{ C}$.

3.3.7 Bestimmung des Gesamt-Phosphorgehaltes (P_t)

Der P_t -Gehalt in den Sedimenten wurde nach Aufschluß mit HNO_3 und HClO_4 mit der Molybdat-Vanadat-Methode bestimmt (WENZEL 1956; SHAPIRO & BRANNOCK 1962).

Etwa 500 mg der Sedimentprobe werden in einen 250 ml Kjeldahlkolben eingewogen und mit 9 ml HNO_3 (65 %) versetzt. Nach Ablauf der CO_2 -Entwicklung (Kalzit) werden 3 ml HClO_4 (60 %) hinzugefügt und das Material bei 240°C aufgeschlossen, bis der Rückstand weiß-gelb gefärbt ist (nach ca. 30 Min.). Nach dem Abkühlen wird die Aufschlußlösung über ein Faltenfilter quantitativ in einen 100 ml Meßkolben überführt. Von dieser Lösung werden 10 ml in einen 25 ml Meßkolben pipettiert und mit 5 ml Molybdat-Vanadat Lösung (0,25 % NH_4VO_3 und 5 % $(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_4$ im Verhältnis 1 : 1) versetzt. Die Kolben werden anschließend mit 0,5 n HNO_3 bis zur Eichmarke aufgefüllt. Nach 60 Minuten wird der gelbe Phosphorkomplex bei 440 nm in 4 cm-Küvetten gegen eine Blindlösung und zwei Eichlösungen gemessen.

Fehlerbetrachtung:

Durch die Perchlorsäure wird Kieselsäure dehydratisiert, so daß sie die Messung nicht durch Bildung eines ebenfalls gelben Si-Mo-Komplexes stört. Bei den durchgeführten Analysen wurde eine mittlere Varianz von 2 % erreicht, maximal 5 % wurden toleriert. Fehlerquellen liegen hauptsächlich beim Aufschluß und bei den zahlreichen nachchemischen Arbeitsgängen.

3.3.8 Schwermetallanalysen

An einem Profundalkern des Obetrumer Sees (OT 32) wurde exemplarisch ein Tiefenprofil der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer und Zink mittels Atom-Absorptions-Spektroskopie gemessen. Zur Verfügung stand ein Perkin Elmer AAS vom Typ 3030-A mit Graphitrohrsystem HGA 400 und Probenautomat AS 40.

Blei, Cadmium und Kupfer wurden mit der Graphitrohrtechnik und Deuterium-Untergrundkompensation bestimmt. Die thermische Behandlung der Proben erfolgte jeweils in 6 Stufen (s. Tab. 5 a - c), die spezifischen Elementsignale wurden in der 4. Stufe gemessen. Die Konzentration wurde entsprechend der jeweiligen Eichung über das Integral des Signals bestimmt und vom Gerät direkt angezeigt. Über einen Drucker (Perkin Elmer PR 100) wurden Konzentration, Standardabweichung und Variationskoeffizient ausgegeben. Nach jeweils 10 Messungen wurde nachkali-briert.

Die Bestimmung des Zinks erfolgte in einer oxidierenden Luft-Acetylen-Flamme direkt aus der Aufschlußlösung.

Für den Aufschluß wurden ca. 1 g des aufgemahlene ($< 125 \mu\text{m}$) und bei 110°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Sediments in einen 100 ml Teflon Becher eingewogen und mit 2 ml HF (40 %, suprapur) sowie mit 8 ml HNO_3 (65 %, p.a.) versetzt. Nach Beendigung der Karbonatreaktion wurde der Becher verschlossen und im Autoklaven (Autoklav 3, Fa. Perkin Elmer) für 24 Std. auf 150°C erhitzt. Nach dem Abkühlen des Autoklaven wurde der Becher geöffnet und der Inhalt quantitativ durch ein Schwarzbandfilter in einen 100 ml Meßkolben überführt. Nach dem Auffüllen bis zur Eichmarke wurde der Inhalt sofort in eine PE-Flasche umgefüllt, die luftdicht verschlossen und im Kühlschrank bis zur Analyse der Metalle aufbewahrt wurde.

Von jeder Sedimentprobe wurden nach obiger Methode zwei Aufschlußlösungen hergestellt. Als Referenzprobe wurde der internationale Kalksteinstandard ZGI-KH aufgeschlossen und zur Beurteilung der Richtigkeit der Analysen benutzt.

3.3.8.1 Bestimmung von Blei

Die Bleibestimmung erfolgte mittels Graphitrohrtechnik. Es wurde die Absorption bei einer Wellenlänge von 283,3 nm und einer Schlitzbreite von 0,7 nm bestimmt. Als Lichtquelle diente eine Pb-Hohlkathodenlampe (12 mA). Die Eichung (20 μl Probenvolumen mit Probenautomat) erfolgte gegen eine Blindlösung und Lösungen mit 2 und 4 $\mu\text{g Pb/l}$. Blind- und Eichlösungen enthielten als Matrix 2 ml HNO_3 und 0,5 ml HF/100 ml. Von jeder Aufschlußlösung wurden zwei Messungen durchgeführt. Es wurden jeweils 5 μl (Probenautomat) in die Graphitrohrküvette pipettiert. Bei den Doppelbestimmungen wurde eine mittlere Varianz von 2,3 % erreicht. In dem Standard ZGI-KH wurden 4,2 mg Pb/kg gefunden, was noch im Bereich des in der Literatur angegebenen Sollwertes liegt (7 ppm \pm 45 %, SCHINDLER, 1972).

Stufe	Temp. $^\circ\text{C}$	Ramp-time sec	Hold-time sec	Ar-Strom ml/min	Vorgang
1	90	5	5	300	Trocknen
2	130	10	10	300	Trocknen
3	500	10	15	300	Therm. Vorbeh.
4	1300	0	5	0	Atomisieren/Messen
5	2700	1	3	300	Ausglühen
6	30	1	5	300	Abkühlen

Tab. 5 a: Temperaturprogramm zur Bestimmung des Bleis mit dem Graphitrohrföfen HGA 400

3.3.8.2 Bestimmung von Cadmium

Cadmium wurde ebenfalls mit dem Graphitrohrsystem bestimmt. Gemessen wurde bei 228,8 nm und einer Schlitzweite von 0,7 nm. Als Lichtquelle diente eine Cd-Hohlkathodenlampe (5 mA). Das Temperaturprogramm ist in Tab. 5 b aufgezeichnet. Die Eichung erfolgte gegen eine Blindlösung und Lösungen mit 2 und 4 $\mu\text{g Cd/l}$ (20 μl Pipettiervolumen) in einer Matrix von 2 ml HNO_3 und 0,5 ml HF/100 ml. Das Pipettiervolumen der Probenlösungen betrug 5 μl .

Bei den Doppelbestimmungen wurde eine mittlere Varianz von 2,7 % erreicht. Im Standard ZGI-KH wurden 0,1 ppm Cd gefunden. In der Literatur sind keine Cd-Daten für diese Probe veröffentlicht.

Stufe	Temperatur °C	Ramp-time sec	Hold-time sec	Ar-Strom ml/min	Vorgang
1	90	5	5	300	Trocknen
2	130	10	10	300	Trocknen
3	250	10	10	300	Therm. Vorbeh.
4	1000	0	3	0	Atomisieren / Messen
5	2000	1	3	300	Ausglühen
6	30	1	5	300	Abkühlen

Tab. 5 b: Temperaturprogramm zur Bestimmung des Cadmiums mit dem Graphitrohrföfen HGA 400

3.3.8.3 Bestimmung von Kupfer

Kupfer wurde bei einer Wellenlänge von 324,8 nm und bei 0,7 nm Schlitzweite im Graphitrohrföfen bestimmt. Als Lichtquelle diente eine Fe-Cu-Mn-Zn-Hohlkathodenlampe (25 mA). Das Temperaturprogramm ist in Tab. 5 c aufgezeichnet. Geeicht wurde gegen eine Blindlösung und Lösungen mit 0,025, 0,050 und 0,100 mg Cu/l in einer Matrix von 2 ml HNO₃ und 0,5 ml HF/l (Pipettier-
volumen: 20 µl). Zur Messung der Probenlösungen wurden 5 µl in das Graphitrohr pipettiert.

Die Doppelbestimmung der Proben ergab eine mittlere Varianz von 2,2 %. Im Standard ZGI-KH wurden 6,7 ppm Cu gemessen, was an der unteren Grenze des Richtwertes liegt (10,0 ppm ± 35 %, SCHINDLER, 1972).

Stufe	Temperatur °C	Ramp-time sec	Hold-time sec	Ar-Strom ml/min	Vorgang
1	90	5	5	300	Trocknen
2	130	10	10	300	Trocknen
3	900	10	10	300	Therm. Vorbeh.
4	2000	0	7	0	Atomisieren / Messen
5	2700	1	3	300	Ausglühen
6	30	1	5	300	Abkühlen

Tab. 5 c: Temperaturprogramm zur Bestimmung des Kupfers mit dem Graphitrohrföfen HGA 400

3.3.8.4 Bestimmung von Zink

Die Messung des Zinks erfolgte in der oxidierenden Zone einer Luft-Acetylen-Flamme bei einer Wellenlänge von 213,9 nm und einer Spaltbreite von 0,7 nm. Als Lichtquelle diente eine Fe-Cu-Mn-Zn-Hohlkathodenlampe (25 mA). Das Integral des Zn-Signals wurde über 3 sec. direkt aus der Aufschlußlösung gemessen, die im Brennersystem über einen Mischflügel zerstäubt wurde. Geeicht wurde gegen eine Blindlösung und Lösungen mit 0,25, 0,50 und 1,00 mg Zn/l in einer Matrix aus 8 ml HNO₃ und 2 ml HF/l.

Bei den Doppelbestimmungen wurde eine mittlere Varianz von 1,1 % erreicht. Im Kalksteinstandard ZGI-KH wurden 10,9 ppm Zn gemessen. Der in der Literatur angegebene Richtwert beträgt 11,0 ppm Zn (FLANAGAN, 1973).

3.3.9 pH/Eh-Messungen

Um pH-Eh-Messungen an frischen Sedimentkernen durchzuführen, wurden die PVC-Kernrohre auf jeweils gegenüberliegenden Seiten mit Bohrungen im Durchmesser entsprechend dem der verwendeten Glaselektroden versehen. Die Bohrungen erfolgten im Abstand von 5 cm. Durch einen Bohrungsversatz von 2,5 cm auf den gegenüberliegenden Seiten konnte erreicht werden, daß an den Sedimentkernen pH/Eh-Messungen im Abstand von 2,5 cm möglich waren. Vor der Probenahme wurden die Löcher doppelt verklebt und erst unmittelbar vor der Messung wieder nach-

einander durch Abziehen des Klebebandes geöffnet. Die pH/Eh-Kerne wurden sofort nach der Entnahme einer am Ufer aufgebauten, mobilen Meßstation zugeführt. In den Abb. 9 - 11 sind die pH/Eh-Kerne gesondert gekennzeichnet.

Die Messung der pH/E_h-Werte erfolgte mit Glas-Mikro-Einstabmeßketten der Fa. Ingold (E_h: Pt 4800/M5; pH: 405-M5 und 405-M8) und pH/mV-Meter (Fa. Knick Portamess 902). Die Eichung der Elektroden wurde mit gebrauchsfertigen Lösungen der Fa. Ingold durchgeführt (E_h: Redox-Pufferlösung rH 28,4; pH: Pufferlösungen mit pH 7,0 und 9,21 für 25 °C). In Anlehnung an STUMM & MORGAN (1981) wurden die gemessenen E_h-Werte zur einfacheren Interpretation in pε-Werte nach der Beziehung

$$p\epsilon = \frac{E_h F}{2,3 R T}$$

umgerechnet (R = Gaskonstante, F = Faradaykonstante, T = Temperatur in °K). Die pε-Werte entsprechen - analog zum pH - dem negativ dekadischen Logarithmus der Elektronenaktivität (Elektronenaktivität = Maß für die Reduktionskraft eines chem. Milieus), die sich ergibt, wenn sich alle Redoxpaare eines Systems (z. B. einer Lösung) im physikochemischen Gleichgewicht befinden. Hohe pε-Werte entsprechen einer niedrigen Elektronenkonzentration und zeigen somit ein bevorzugt oxidierendes Milieu an und umgekehrt. Bei der Darstellung von Stabilitätsfeldern (z. B. der verschiedenen Fe- und Mn-Phasen) im pH/p -Diagramm liegt der Vorteil gegenüber dem pH/E_h-Diagramm darin, daß das erst genannte für alle Temperaturen gilt, was besonders wichtig ist, wenn innerhalb eines Meßprofils (z. B. Sedimentkern) Punkte mit verschiedenen Temperaturen auftreten (z. B. durch Temperaturerhöhung während der Messung).

3.3.10 Probenaufbereitung für Untersuchungen mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop

Für die geplanten REM-Untersuchungen an repräsentativ ausgewählten Sedimentproben des Obertrumer Sees und des Piburger Sees (Vergleich von Mineralphasen in zwei hydrochemisch unterschiedlichen See-Typen) war es notwendig, das organische Material so von den Mineralphasen abzutrennen, daß keine mineralischen Anteile aus der organischen Substanz (z. B. Ca, P, Fe) in der Probe verbleiben. Daher war die i.a. übliche H₂O₂-Aufbereitung der Proben nicht möglich. Es wurde in einer Versuchsreihe ein Verfahren entwickelt, bei dem die homogenisierte, noch feuchte Probe unter Zugabe von etwas ammoniakalischem Aqua dest. 2 Minuten mit Ultraschall behandelt und schließlich für 40 Minuten bei 1000 U/Min. zentrifugiert wurde. Danach wurde das überstehende Wasser mit den noch in der Schwebelag befindlichen organischen Partikeln entfernt. Diese Prozedur wurde mit jeder Probe 12 mal durchgeführt. Nach der letzten Behandlung wurde eine Suspension des mineralischen Rückstands (ohne Haftmittel) auf REM-Träger aufgebracht und nach Lufttrocknung mit Kohlenstoff bedampft. Die REM-Untersuchung erfolgte teils mit einem Stereoscan der Fa. Cambridge (Mark 2A, Typ 96113) in Göttingen, teils im Labor für Elektronenmikroskopie der Universität Oldenburg (Prof. Krumbein) mit einem Gerät des gleichen Herstellers (Stereoscan 180), das jedoch zusätzlich mit einem energiedispersiven System (ORTEC 6230) ausgestattet ist, um qualitative und halbquantitative Elementaranalysen an den Präparaten durchzuführen.

3.3.11 Paläopigmentanalysen

Von Dr. E. Schultze, Limnologisches Institut der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Mondsee, wurden an einigen Sedimentkernprofilen Paläopigmentanalysen chromatographisch nach einem Verfahren von ZÜLLIG (1982) durchgeführt.

3.3.12 Sedimentdatierungen und Bestimmung der Sedimentationsraten

Die Datierung der Sedimente wurde von Univ.-Doz. Dr. R. Schmidt, Limnologisches Institut der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Mondsee, mittels Pollenanalysen vorgenommen.

Die jüngeren Sedimente wurden anhand von anthropogenen Schadstoffanreicherungen (Schwermetalle Blei, Zink und Cadmium) datiert. Über die ermittelten Sedimentalter wurden die Sedimentationsraten unter Berücksichtigung des Sedimentporenwassers und der Mineralisation der organischen Substanz bestimmt. Die Mineralisation kann über Dichtebestimmungen (s. Kap. 3.3.3) des trockenen Sediments lediglich abgeschätzt werden (mit fortschreitender Mineralisierung der o.g. Substanz nimmt das spez. Gewicht des Sediments zu). Daher konnte der diagenetische Volumenverlust der älteren Sedimente auch nur halbquantitativ bei der Berechnung der Sedimentationsraten berücksichtigt werden.

3.3.13 Experimentelle Untersuchungen

Zur Bestimmung einer theoretisch möglichen Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment und zur Quantifizierung der O_2 -Zehrung durch das Sediment wurden spezielle Experimente durchgeführt. Das methodische Vorgehen bei der Durchführung dieser Experimente und die erzielten Ergebnisse werden zusammen mit der Auswertung und Interpretation in den Kap. 5.2.5 und 5.2.6 beschrieben.

Die zahlreichen technischen Variationen beim Ablauf der Experimente und die daraus vielfältig variierenden Teilergebnisse können im Zusammenhang mit der Interpretation besser verstanden und nachvollzogen werden.

4. Ergebnisse der Sedimentuntersuchungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Sedimenten des Obertrumer Sees und des Grabensees dargestellt. Die vorhandenen Daten von den Sedimenten des Niedertrumer Sees und des Wallerseees sind bei LINDNER (1984) und GERMATSIDIS (1985) zusammengestellt.

4.1 Makroskopische Beschreibung der Sedimente

Tafel 1 zeigt eine repräsentative Auswahl von Sedimentkernen aus dem Obertrumer See und dem Grabensee. In diesen Kernen sind alle vorgefundenen Sedimenttypen in charakteristischer Ausbildung vorhanden. Im folgenden werden die Sedimentkerne der Tafel 1 makroskopisch beschrieben:

Kern OT 22 (Profundal Südbecken Obertrumer See; 24,5 m Wassertiefe, Kernlänge: 105 cm).

- | | |
|--------------|---|
| 0 - 14 cm : | Tiefschwarzes, fließfähiges, makroporöses Sediment ohne Schalendetritus und ohne erkennbare Bioturbation, H ₂ S-Geruch, die Farbe wird nach oben hin etwas heller, undeutliche Laminae aus hellen Zwischenlagen im mm-Bereich. |
| 14 - 31 cm: | Hellbraun-olivgrünes, makroporöses Sediment von homogener Struktur, zur Tiefe hin fester werdend. |
| 31 - 40 cm: | Etwas dunkler gefärbtes Sediment mit undeutlich grau-schwarzen Zwischenlagen. |
| 40 - 73 cm: | Hellbraun-olivgrünes Sediment, homogen, zur Tiefe hin fester und heller werdend. Abnehmende Makroporen. |
| 73 - 88 cm: | Deutlich laminiertes Sediment mit Wechsel von braunen und graubraunen Lagen im mm-Bereich, zur Tiefe hin dominieren die hellen Lagen. |
| 88 - 104 cm: | Hellbraun-olivgrünes Sediment, homogene Struktur, keine Makroporen mehr. |

Kern OT 29 (Sublitoral, Obertrumer See; 16 m Wassertiefe, Kernlänge: 125 cm)

- | | |
|--------------|--|
| 0 - 8 cm: | Dunkelbraun-olivgrünes, fließfähiges, makroporöses Sediment, deutlicher H ₂ S-Geruch, kein Schalendetritus, keine Bioturbation. |
| 8 - 23 cm: | Grauolivgrünes Sediment mit dunkleren Schlieren (mm-Bereich) aus zersetztem organischen Material. |
| 23 - 31 cm: | Braun-olivgrünes Sediment ohne Schlieren |
| 31 - 38 cm: | Dunkelbraun-olivgrünes Sediment ohne Lamination |
| 38 - 52 cm: | Braun-olivgrünes Sediment, zur Tiefe hin deutlich fester werdend und zunehmendem Sandgehalt. |
| 52 - 55 cm: | Dunkel-olivgrünes Sediment mit hohem Sandgehalt. |
| 55 cm: | Diskordanz |
| 55 - 125 cm: | Wechsel von grauen mit gelb-grauen Tonlagen. Lamination im mm-Bereich, Material durchweg sehr zäh und plastisch. |

Kern OT 30 (Litoral Obertrumer See; 4,5 m Wassertiefe, Kernlänge: 137 cm)

- | | |
|---------------|--|
| 0 - 9 cm: | Braun-olivgrünes, fließfähiges Sediment, keine erkennbare Lamination und Bioturbation, zur Tiefe hin dunkler werdend, wenig Schalendetritus. |
| 9 - 24 cm: | Graues, makroporöses Sediment von homogener Struktur, zur Tiefe hin beginnende Verfärbung nach grau-gelb. |
| 24 - 34 cm: | Gelb-graues Sediment mit einigen dunkelbraunen Zwischenlagen im cm-Bereich. Schalendetritus zunehmend. |
| 34 - 43 cm: | Deutlich laminiertes Sediment mit Wechsel von hell-gelbgrauen und dunkelbraunen Laminae im mm-Bereich. |
| 43 - 59 cm: | Gelbgraues Sediment ohne Lamination. |
| 59 - 63 cm: | Lamination wie bei 34 - 43 cm. |
| 63 - 100 cm: | Gelbgraues, vorwiegend homogenes Sediment, schwach laminierte Zwischenlagen. |
| 100 - 111 cm: | Grau-gelbes Sediment mit Schlieren von etwas dunklerem Material. |
| 111 - 137 cm: | Wieder deutlich laminiertes Sediment mit Wechsel von hell-gelbgrauen und dunkelbraunen Laminae im mm-Bereich, z. T. reichlich Schalendetritus. |

Kern OT 32 (Profundal, Nordbecken Obertrumer See; 30 m Wassertiefe, Kernlänge: 128 cm)

- 0 - 7 cm: Tiefschwarzes, fließfähiges, makroporöses Sediment ohne Schalendetritus und ohne erkennbare Bioturbation, H₂S-Geruch, die Farbe wird nach oben hin etwas heller, undeutliche Laminae aus hellen Zwischenlagen im mm-Bereich.
- 7 - 8 cm: Dunkel-olivgrünes Sediment, Makroporen.
- 8 - 51 cm: Hellbraun-olivgrünes Sediment, zur Tiefe hin fester werdend.
- 51 - 74 cm: Etwas dunkleres Sediment mit deutlichem Wechsel von grau-braunen und dunkelolivgrünen Laminae im mm-Bereich, deutliche Makroporen.
- 71 - 89 cm: Homogenes, hellbraun-olivgrünes Sediment mit Makroporen.
- 89 - 107 cm: Wechsellagen (cm-Bereich) von braun- und dunkel-olivgrünem Sediment.
- 107 - 128 cm: Hellgraues, zähes, makroporöses Sediment von homogener Struktur.

Kern OT 35 (Schelfhang, Ostufer Obertrumer See; 25 m Wassertiefe, Kernlänge: 137 cm).

- 0 - 7 cm: Schwarzes, fließfähiges, hochporöses Sediment, keine Bioturbation, kein Schalendetritus, undeutliche Laminae aus braun-olivgrünem Sediment.
- 7 - 38 cm: Homogenes, braun-olivgrünes Sediment, kein Schalendetritus.
- 38 - 39 cm: Lage aus organischem Detritus (Pflanzenreste, Blätter).
- 39 - 62 cm: Braun-olivgrünes Sediment mit flaseriger Einschaltung von Pflanzendetritus.
- 62 - 100 cm: Wechselfolgen aus braun-olivgrünem Sediment und Lagen mit organischem Detritus im mm- bis cm-Bereich.
- 100 - 120 cm: Homogenes, braun-olivgrünes Sediment deutlich fester werdend.
- 120 - 130 cm: Wechselfolgen (cm-Bereich) von grau- und dunkel-olivgrünen Sedimenten.
- 130 - 137 cm: Hellgraues, zähes Sediment.

Kern GR 2 (Profundal Grabensee: 10 m Wassertiefe, Kernlänge 98 cm)

- 0 - 3 cm: Braunes, homogenes Sediment ohne Makroporen und Bioturbation, kein Schalendetritus.
- 3 - 28 cm: Braun-olivgrünes, sehr weiches Sediment mit Makroporen, zur Tiefe hin dunkler werdend, keine Schalenreste.
- 28 - 31 cm: Dunkel-olivgrünes Sediment.
- 31 - 39 cm: Braun-olivgrünes Sediment, fester werdend, Schalendetritus
- 39 - 44 cm: Dunkel-olivgrüne Lage mit Schalendetritus.
- 44 - 73 cm: Graues, homogenes Sediment mit einigen helleren Zwischenlagen (cm-Bereich).
- 73 - 81 cm: Deutlich im mm-Bereich laminiertes Sediment mit Wechsel von hellgelbgrauen und dunkelbraunen Laminae, Schalendetritus.
- 81 - 95 cm: Gelbgraues Sediment mit undeutlicher Lamination (mm-Bereich), Schalendetritus.
- 95 - 98 cm: Hellgraues, nicht laminiertes Sediment mit wenig Schalendetritus.

Kern GR 3 (Profundal Grabensee; 12,5 m Wassertiefe, Kernlänge: 132 cm)

- 0 - 8 cm: Schwarzes, dünnflüssiges Sediment (Fäkalgeruch!).
- 8 - 13 cm: Dunkel-olivgrünes, makroporöses, Sediment ohne Bioturbation und Schalendetritus.
- 13 - 28 cm: Material wie 8 - 13 cm; jedoch etwas heller.
- 28 - 39 cm: Scharfer Wechsel zu schwarz-olivgrünem Sediment mit erfühlbarem Sandgehalt. Stark porös, kein Schalendetritus.
- 39 - 58 cm: Dunkelolivgrünes, makroporöses Sediment, zur Tiefe hin fester werdend.
- 58 - 62 cm: Schwarz-olivgrüne Lage, erfühlbarer Sandgehalt, kein Schalendetritus.
- 62 - 75 cm: olivgrünes Sediment mit Makroporen, zur Tiefe hin heller werdend und abnehmende Porosität, etwas Schalendetritus.
- 75 - 120 cm: Grau-olivgrünes Sediment mit Schalendetritus, zur Tiefe hin abnehmende Makroporosität und zunehmende Festigkeit. Flaserige Einschaltungen (mm-Bereich) von geringfügig dunkleren Lagen.
- 120 - 127 cm: Wechsellagen im cm-Bereich von grauen und grau-olivgrünen Sedimenten mit Schalendetritus.
- 127 - 128 cm: Dunkel-olivgrünes Band, größer als hangende und liegende Lagen.
- 128 - 129 cm: Grau-gelbes, extrem feinkörniges und homogenes Kalksediment.
- 129 - 132 cm: Homogen graues, feinkörniges Sediment.
- ab 132 cm: Hellgraues Sediment.

Kern GR 31 (Durchfluß OT-GR; 0,5 m Wassertiefe, Kernlänge: 45 cm, ohne Foto auf Taf. 1)

0 - 7 cm:	Grau-olivgrünes Sediment mit ca. 40 Vol. % Schalen- und Pflanzendetritus, grobkörnig (deutlicher Fäkalgeruch).
7 - 15 cm:	Dunkel-olivgrünes Sediment mit abnehmendem Schalendetritus und zunehmendem Gehalt an grobfaserigen Pflanzenresten.
15 - 30 cm:	Torf
30 - 37 cm:	Heller werdender Torf, zur Tiefe zunehmender Gehalt an Schalendetritus.
ab 37 cm:	Gelb-graues, grobkörniges Kalksediment mit reichlich Schalendetritus.

Kern GR 32 (Zellhofer Moor, Kernlänge: 9,55 m, ohne Foto auf Taf. 1)

0,00 - 3,00 m:	Kernverlust (Torf)
3,00 - 4,60 m:	Brauner Hochmoortorf
4,60 - 5,10 m:	Braun-olivgrüner Niedermoortorf
5,10 - 5,28 m:	Schwarzer, fauliger Schlamm
5,28 - 5,54 m:	Dunkel-olivgrünes Sediment aus Überwiegend organischem Material, Zwischenlagen (mm-Bereich) aus etwas hellerem, karbonatischem Sediment.
5,54 - 9,55 m:	Hellgrauer, z. T. feinlaminiertes Ton, (mm-Bereich), Wechsel von grauen und gelb-grauen Lagen.

4.2 Korngrößenverteilung

4.2.1 Die Oberflächensedimente

Aus dem Obertrumer See wurden 35 Proben von Oberflächensedimenten mit dem Sedigraphen auf ihre Korngrößenverteilung untersucht.

Die Anteile der Fraktionen Sand-Silt-Ton variieren in den Litoralsedimenten von 2 - 67 % Sand, 24 - 76 % Silt und 2 - 24 % Ton. In den Profundalsedimenten wurde 0 - 4 % Sand, 4 - 82 % Silt und 14 - 44 % Ton gemessen. Für den Profundalbereich ergaben sich durchschnittliche Gehalte von 2 % Sand, 73 % Silt und 25 % Ton.

Aus dem Grabensee wurden 19 Oberflächenproben hinsichtlich ihrer Korngrößen untersucht. Für die Litoralsedimente ergaben sich Sandgehalte von 4 - 54 %, Siltgehalte von 36 - 80 % und Tongehalte von 10 - 18 %. Die Profundalsedimente enthalten 1 - 2 % Sand, 67 - 86 % Silt und 12 - 32 % Ton; gemittelt sind es für den Profundalbereich 1 % Sand, 74 % Silt und 25 % Ton.

In Tab. 10 und 11 sind die gemessenen Korngrößenverteilungen der Oberflächensedimente zusammengestellt. Auf eine differenziertere Einteilung der Kornfraktionen wird an dieser Stelle verzichtet, weil für alle Proben die vom Sedigraphen dargestellten Summenkurven vorliegen. Diese Kurven wurden neben dem Sand-Silt-Ton-Dreieck zur Interpretation der Korngrößenverteilung herangezogen und sind an entsprechender Stelle im Kap. 5.1 abgebildet.

4.2.2 Kornverteilung in den Sedimentkernen

Aus dem Obertrumer See wurde an 20, aus dem Grabensee an 12 Kernen die Kornverteilung im Kernprofil gemessen. Innerhalb der einzelnen Kerne treten beträchtliche Schwankungen in der Kornverteilung auf. In den Tabellen 14 und 15 sind die gemessenen Kornverteilungen in den Kernprofilen des Obertrumer Sees und des Grabensees zusammengefaßt.

Probe Nr.	% Sand	% Silt	% Ton	Probe / cm Sed.-Tiefe	Sand %	Silt %	Ton %	Probe / cm Sed.-Tiefe	Sand %	Silt %	Ton %
OT 105	40	31	9	OT 11 / 1	0	68	32	GR 2 / 1	2	86	12
OT 111	42	46	12	OT 11 / 37	1	39	60	GR 2 / 16	3	71	26
OT 113	9	70	21	OT 11 / 54	0	46	54	GR 2 / 69	15	63	22
OT 114	42	48	10					GR 2 / 97	3	51	46
OT 117	67	31	2	OT 12 / 1	4	82	14	GR 3 / 1	1	74	25
OT 118	15	67	18	OT 12 / 39	26	36	38	GR 3 / 34	1	-	-
OT 122	16	64	20	OT 12 / 60	0	54	46	GR 3 / 95	0	66	44
OT 123	59	30	11					GR 3 / 130	2	37	62
OT 124	36	48	16	OT 15 / 1	4	78	18	GR 4 / 1	17	65	18
OT 127	35	53	12	OT 15 / 27	5	43	52	GR 4 / 95	11	69	30
OT 129	17	67	16					GR 5 / 1	2	79	19
OT 144	56	32	12	OT 16 / 1	0	75	25	GR 5 / 42	2	64	44
OT 145	26	64	10	OT 16 / 110	1	56	43	GR 5 / 100	1	65	34
OT 24	16	60	24					GR 5 / 137	2	63	35
OT 25	61	24	15	OT 17a / 1	0	75	25				
OT 27	23	62	15	OT 17a / 90	2	53	45				
OT 28	45	47	8	OT 17a / 110	2	50	48				
OT 30	2	76	22								

Tab. 10

Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees. Litoralbereich (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Probe Nr.	% Sand	% Silt	% Ton
OT 11	0	68	32
OT 12	4	82	14
OT 15	4	78	18
OT 16	0	75	25
OT 17a	0	76	24
OT 18	1	54	44
OT 19	1	75	24
OT 20	4	73	23
OT 21	2	67	31
OT 22	2	71	27
OT 23	1	78	21
OT 29	4	69	27
OT 31	0	78	22
OT 32	0	78	22
OT 33	0	81	19
OT 34	1	67	32
OT 146	1	77	22

Tab. 11

Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees. Profundalbereich (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Probe Nr.	% Sand	% Silt	% Ton
GR 4	17	65	18
GR 10	8	77	15
GR 14	4	78	18
GR 100	38	48	14
GR 101	7	76	17
GR 102	9	77	14
GR 104	10	80	10
GR 105	54	36	10
GR 106	29	55	16
GR 108	18	70	12
GR 114	21	66	13

Tab. 12

Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten des Grabensees. Litoralbereich (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Probe Nr.	% Sand	% Silt	% Ton
GR 2	2	86	12
GR 3	1	74	25
GR 5	2	79	19
GR 6a	13	-	-
GR 7	1	72	27
GR 9	1	72	27
GR 12	1	72	27
GR 113	1	67	32
GR 116	2	70	28
GR 13	1	72	27

Tab. 13

Korngrößenverteilung in den Oberflächensedimenten des Grabensees. Profundalbereich (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Probe / cm Sed.-Tiefe	Sand %	Silt %	Ton %	Probe / cm Sed.-Tiefe	Sand %	Silt %	Ton %
OT 11 / 1	0	68	32	GR 2 / 1	2	86	12
OT 11 / 37	1	39	60	GR 2 / 16	3	71	26
OT 11 / 54	0	46	54	GR 2 / 69	15	63	22
OT 12 / 1	4	82	14	GR 2 / 97	3	51	46
OT 12 / 39	26	36	38	GR 3 / 1	1	74	25
OT 12 / 60	0	54	46	GR 3 / 34	1	-	-
OT 15 / 1	4	78	18	GR 3 / 95	0	66	44
OT 15 / 27	5	43	52	GR 3 / 130	2	37	62
OT 16 / 1	0	75	25	GR 4 / 1	17	65	18
OT 16 / 110	1	56	43	GR 4 / 95	11	69	30
OT 17a / 1	0	75	25	GR 5 / 1	2	79	19
OT 17a / 90	2	53	45	GR 5 / 42	2	64	44
OT 17a / 110	2	50	48	GR 5 / 100	1	65	34
				GR 5 / 137	2	63	35
OT 18 / 1	1	55	44	GR 6a / 1	13	-	-
OT 18 / 90	8	58	34	GR 6a / 34	3	-	-
OT 18 / 103	74	20	6	GR 6a / 52	7	71	22
OT 19 / 1	1	75	24	GR 6a / 98	22	61	17
OT 19 / 94	1	47	51	GR 7 / 1	1	72	27
OT 19 / 110	1	49	50	GR 7 / 43	1	-	-
OT 20 / 1	4	73	23	GR 7 / 106	1	46	53
OT 20 / 103	49	33	18	GR 7 / 112	1	49	50
OT 21 / 1	2	67	31	GR 7 / 120	1	47	52
OT 21 / 90	1	59	40	GR 9 / 1	1	72	27
OT 22 / 1	2	71	27	GR 9 / 37	1	-	-
OT 22 / 34	1	55	44	GR 9 / 108	0	50	50
OT 22 / 100	1	50	49	GR 10 / 1	8	77	15
OT 23 / 1	1	78	21	GR 10 / 43	3	43	54
OT 23 / 87	1	58	41	GR 10 / 49	1	61	38
OT 24 / 1	16	60	24	GR 12 / 1	1	72	27
OT 24 / 100	1	63	36	GR 12 / 100	2	41	57
OT 25 / 1	61	24	15	GR 13 / 1	1	72	27
OT 25 / 72	46	42	12	GR 13 / 43	2	-	-
				GR 13 / 109	1	45	54
OT 27 / 1	23	62	15	GR 14 / 1	4	78	18
OT 27 / 40	18	65	17	GR 14 / 30	5	71	24
OT 27 / 79	7	59	34	GR 14 / 34	8	-	-
OT 28 / 1	45	47	8	GR 14 / 60	12	60	28
OT 28 / 10	73	19	16	GR 31 / 40	10	80	10
OT 28 / 53	25	56	19				
OT 29 / 1	4	69	27	Tab. 15	Korngrößenverteilung in den Kernprofilen des Grabensees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)		
OT 29 / 52	28	54	18				
OT 29 / 110	1	25	74				
OT 30 / 1	2	76	22				
OT 30 / 40	1	82	17				
OT 30 / 135	3	60	37				
OT 31 / 1	0	78	22				
OT 31 / 55	0	43	57				
OT 31 / 104	0	46	54				
OT 32 / 1	0	78	22				
OT 32 / 97	1	36	63				
OT 32 / 116	0	48	52				
OT 33 / 1	1	80	19	Tab. 14	Korngrößenverteilung in den Kernprofilen des Obertrumer Sees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)		
OT 33 / 35	0	51	49				
OT 33 / 89	0	36	64				
OT 33 / 119	0	42	58				
OT 34 / 1	1	67	32				
OT 34 / 65	0	41	59				
OT 34 / 117	5	65	30				

4.3 Untersuchungen zum Mineralbestand

Vom Obertrumer See und vom Grabensee wurden 24 repräsentativ ausgewählte Oberflächen- und Kernproben röntgendiffraktometrisch auf ihren Mineralbestand untersucht.

In den Oberflächensedimenten aus dem Profundal des Obertrumer Sees dominiert Kalzit, was auch durch die Karbonatanalysen quantitativ bestätigt wird. Als zweithäufigste Mineralkomponente folgt der Quarz. Untergeordnet treten in den Röntgendiagrammen noch Feldspäte (Plagioklas, Mikroklin, Albit), Dolomit und Tonminerale auf; letztere wurden nicht weiter identifiziert.

In den Proben aus dem Litoralbereich ist der Kalzitgehalt nach den Röntgenpeaks noch geringfügig höher als in den Profundalsedimenten. In Oberflächensedimenten von Proben, die im Einmündungsbereich von Bächen entnommen wurden, dominiert stets Quarz über Kalzit (OT 23, 24, 25, 111, 114, 118, 124).

In den einzelnen Kernprofilen zeigt der Mineralbestand keine wesentlichen Unterschiede zu den Oberflächenproben. In den hellen basalen Lagen der Kerne sind die Kalzitpeaks etwas größer als in den dunklen, oberflächennahen Schichten. In den grau-laminierten, basalen Sedimenten der Kerne OT 15 und OT 29 dominiert Quarz, gefolgt von Kalzit und Feldspäten.

Deutlich ist eine Sedimentlage mit einem Quarzmaximum in den Kernen OT 18 (101 cm), OT 20 (103 cm), OT 24 (100 cm) und OT 25 (72 cm) zu verfolgen.

Die Sedimente des Grabensees unterscheiden sich hinsichtlich ihres Mineralbestandes nicht von denen des Obertrumer Sees. Kalzit dominiert in fast allen Proben. In den charakteristischen dunklen Lagen, die in allen Profundalkernen des Grabensees zu finden sind, ist Quarz die mineralogische Hauptkomponente, gefolgt von Kalzit und Tonmineralen (GR 3/33). In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen an Sedimentproben aus dem Obertrumer See und dem Grabensee dargestellt.

Probe Nr. cm Sed. Tiefe	Mineralbestand					
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
OT 11 / 1	Cc.	Qz.				
OT 11 / 34	Cc.	Qz.				
OT 15 / 32	Qz.	Cc.	Hlg.			
OT 16 / 1	Cc.	Qz.	Dol.	(Ank.)		
OT 12 / 101	Qz.	Cc.	Ab.	Hlg.		
OT 20 / 103	Qz.	Cc.	Fsp.	Dol.	Hlg.	
OT 23 / 1	Cc.	Qz.	Ab.	Mik.	Dol.	
OT 23 / 23	Qz.	Cc.	(Dol.)			
OT 23 / 44	Qz.	Cc.	(Ab.)	(Dol.)		
OT 24 / 100	Qz.	Cc.	(Plg.)	(Hlg.)	(Dol.)	
OT 25 / 72	Qz.	Plg.	Cc.	Mik.	Dol.	(Hlg.)
OT 29 / 1	Qz.	Cc.	(Dol.)	(Plg.)	(Mik.)	(Hlg.)
OT 29 / 72	Qz.	Cc.	(Plg.)	(Dol.)	(Mik.)	
OT 29 / 97.5	Cc.	Qz.	(Dol.)	(Hlg.)		
OT 30 / 40	Qz.	Cc.	Mik.	Plg.	(Dol.)	(Hlg.)
OT 32 / 97.5	Cc.	Qz.	(Hlg.)			
OT 111 / 1	Qz.	Cc.	(Plg.)			
OT 114 / 1	Qz.	Cc.	Hlg.	Mik.	(Dol.)	
OT 118 / 1	Qz.	Cc.	Ab.	Dol.	Hlg.	
OT 124 / 1	Qz.	Cc.	Ab.	Dol.	Hlg.	
OT 138 / 1	Cc.	Qz.				
OT 129 / 1	Cc.	Qz.				
GR 3 / 1	Cc.	Qz.	(Hlg.)			
GR 3 / 33	Qz.	Cc.	(Hlg.)			
GR 3 / 95	Cc.	Qz.	(Hlg.)			
GR 3 / 128	Cc.	Qz.	(Hlg.)	(Plg.)		
GR 3 / 129	Cc.	(Qz.)				

Tab. 16 Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen an Sedimentproben des Obertrumer Sees und des Grabensees. Die Minerale sind nach der Höhe ihres Hauptpeaks geordnet. Komponenten die gerade noch sicher nachweisbar waren, sind in Klammern gesetzt. Die Abkürzungen bedeuten: Cc. = Kalzit; Qz. = Quarz; Plg. = Plagioklas; Ab. = Albit; Mik. = Mikroklin; Dol. = Dolomit; Hlg. = Hellglimmer; Ank. = Ankerit (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

4.4 Spezifisches Gewicht der Sedimente

Von 25 Oberflächenproben des Obertrumer Sees und des Grabensees wurde das spezifische Gewicht des trockenen Sediments einschließlich der organischen Anteile bestimmt. Für Proben (n = 9), die aus Bereichen oberhalb der Thermokline stammen, wurde ein mittleres spez. Gewicht von 2,561 g/cm³ bestimmt. Proben (n = 16) aus Bereichen unterhalb der Thermokline haben im Mittel ein spezifisches Gewicht von 2,527 g/cm³. In Tabelle 17 sind die gemessenen Werte zusammengestellt.

An 7 Sedimentproben des Kerns OT 32 wurde das spezifische Gewicht der Trockensubstanz einschließlich der organischen Anteile bestimmt. Deutlich zeigt sich eine Zunahme des spezifischen Gewichts von der Oberflächenprobe mit 2,541 g/cm³ zur Probe aus 128 cm Kerntiefe mit 2,609 g/cm³; das entspricht einer Zunahme um 2,7 %. Die vollständigen Daten sind in Tab. 18 dargestellt.

4.5 Wassergehalt der Sedimente

In Tabelle 19 sind die Wassergehalte je eines Sedimentkerns aus dem Profundal (OT 62) und dem Litoral (OT 63) aufgeführt. Weitere Wasserbestimmungen mit vergleichbaren Ergebnissen wurden von HELBIG (in Vorber.) durchgeführt. In den Profundalsedimenten sind die Wassergehalte an der Sedimentoberfläche (bis 10 cm) um über 20 % höher als in den Litoralsedimenten.

Unter Einbeziehung der Daten von HELBIG kann für die Oberflächensedimente im Profundal ein mittlerer Wassergehalt von 90 % und im Litoral von 67 % angenommen werden.

Probe	Tiefe m	Spez. Gew. g/cm ³	Sed. Bereich	Sediment-Tiefe cm	Spez. Gew. g/cm ³
OT 127	0.0	2.634	Litoral	10	2.541
OT 144	2.0	2.631	"	35	2.547
OT 101	7.0	2.519	"	50	2.541
OT 136	7.0	2.478	"	74	2.540
				85	2.577
				110	2.593
				128	2.609
OT 126	8.0	2.470	Profundal		
OT 137	12.0	2.573	"		
OT 145	12.0	2.599	"		
OT 29/10	16.0	2.595	"		
OT 29	16.0	2.569	"		
OT 11	17.0	2.573	"		
OT 146	19.0	2.524	"		
OT 138	20.0	2.566	"		
OT 19	23.0	2.560	"		
OT 2	25.0	2.604	"		
OT 33	26.0	2.591	"		
OT 10a	27.0	2.555	"		
OT 132	29.0	2.534	"		

Tab. 18 Spezifisches Gewicht im Profil des Sedimentkerns OT 32 (s. Abb.9).

Probe	Sed. Tiefe (cm)	Wassergehalt				
		H ₂ O %	TS %			
GR 100	0.0	2.243	Litoral	OT 62 / 2.5	90.18	9.82
GR 101	0.0	2.421	"	OT 62 / 5	84.63	15.37
GR 108	0.0	2.536	"	OT 62 / 7.5	82.53	17.47
GR 106	1.0	2.542	"	OT 62 / 10	82.69	17.31
GR 107	6.0	2.638	"	OT 62 / 15	72.33	27.67
				OT 62 / 20	70.88	29.12
				OT 62 / 25	71.62	28.38
				OT 62 / 30	70.22	29.78
				OT 62 / 35	68.17	31.83
				OT 62 / 40	69.15	30.85

Tab. 17 Spezifisches Gewicht von Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees und des Grabensees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Sed. Tiefe (cm)	H ₂ O %	TS %
OT 63 / 2.5		67.07	32.93
OT 63 / 5		61.56	38.44
OT 63 / 7.5		59.10	40.90
OT 63 / 10		41.30	58.70
OT 63 / 12.5		40.43	59.57
OT 63 / 15		41.42	58.58
OT 63 / 17.5		59.97	40.03
OT 63 / 20		56.79	43.21
OT 63 / 22.5		56.50	43.50
OT 63 / 25		54.46	45.54

Tab. 19 Wassergehalt in 2 repräsentativen Sedimentkernen des Obertrumer Sees. OT 62 stammt aus dem Profundal-, OT 63 aus dem Litoralbereich (Abb. 9).

4.6 Karbonatgehalt

Wie in Kap. 3 beschrieben, wurden coulometrische Kohlenstoffanalysen zur Bestimmung des organisch gebundenen und des Karbonat-Kohlenstoffs vorgenommen. In den Tab. 20 bis 25 sind die Ergebnisse dieser Analysen dargestellt.

4.6.1 Oberflächensedimente

Die Karbonatgehalte in den Oberflächensedimenten unterliegen besonders im Litoralbereich zahlreichen Einflüssen (s. Kap. 5.1.2) und zeigen somit starke Schwankungen.

In den Tab. 20 bis 23 sind die Ergebnisse von 75 coulometrischen C-Analysen an Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees und des Grabensees zusammengestellt. In Proben aus dem Litoral- und Sublitoralbereich (im Obertrumer See bis 11 m Wassertiefe, im Grabensee bis 7 m Wassertiefe) wurden maximale Karbonatgehalte von 97,3 % gemessen, das Minimum lag bei 9,0 %.

In Abb. 14 ist die Verteilung des Gesamtkarbonats in den Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees und des Grabensees dargestellt.

Im Profundal sind die Schwankungen wesentlich geringer, die Karbonatgehalte liegen zwischen 48,5 und 78,7 % bei einem Mittelwert von 60,4 %. (Proben, die im Einmündungsbereich von Bächen liegen, wurden bei diesen Angaben ausgesondert.) Im Grabensee sind die Schwankungen im Karbonatgehalt der Oberflächensedimente aus dem Profundal deutlich geringer als im Obertrumer See.

4.6.2 Sedimentkerne

Innerhalb der einzelnen Sedimentkerne treten z. T. erhebliche Schwankungen im Karbonatgehalt auf (s. Tab. 24 u. 25). In den Kap. 5.1.4 und 6.2.3.5 wird dies ausführlich diskutiert. Graphische Darstellungen der Karbonatverteilung in einigen Sedimentkernen befinden sich in den Abb. 28 - 31.

4.7 Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff C_{org}

In den Tab. 20 bis 25 sind auch die Ergebnisse der coulometrischen Bestimmung des organisch gebundenen Kohlenstoffs (C_{org}) dargestellt.

4.7.1 Oberflächensedimente

In den Oberflächenproben des Obertrumer Sees schwanken die C_{org} -Gehalte zwischen 1,29 und 6,66 % (vgl. Tab. 20 u. 22). Ohne Berücksichtigung der im Einmündungsbereich von Bächen liegenden Proben zeigt sich mit zunehmender Wassertiefe ein Anstieg der C_{org} -Gehalte; im Litoral- und Sublitoralbereich (bis 10,5 m Wassertiefe) liegt das gewichtete Mittel bei 3,10 % C_{org} , im Profundalbereich bei 3,83 % C_{org} .

Die Oberflächensedimente des Grabensees weisen generell höhere C_{org} -Gehalte als die des Obertrumer Sees auf; die Werte liegen zwischen 2,56 % und 10,25 % C_{org} (Tab. 21 u. 23). In den Litoral- und Sublitoralproben (bis 6,0 m Wassertiefe) liegt das gewichtete Mittel bei 4,11 % C_{org} , in den Profundalsedimenten bei 6,34 %. In der Abb. 15 ist die Verteilung des C_{org} in den Oberflächensedimenten beider Seen dargestellt.

Probe	Wassert. (m)	C-Ges. n (%)	Var (%)	C-org. n (%)	Var (%)	C-Karb. (%)	CaCO ₃ (%)			
OT 117	0,5	2,83	2	2,0	1,75	2	4,8	1,08	9,0	*
OT 116	1,0	-	-	-	5,29	2	0,4	-	-	*
OT 118	2,5	6,68	2	1,7	3,85	2	0,6	2,83	23,6	*
OT 144	2,5	11,97	2	0,4	2,51	2	3,1	9,46	78,8	*
OT 120	3,0	-	-	-	4,39	2	0,0	-	-	
OT 123	4,0	5,87	2	3,0	2,01	3	22,4	3,86	32,2	*
OT 107	4,5	9,93	2	1,0	3,11	2	0,2	6,82	56,8	*
OT 30	4,5	14,57	2	0,0	5,27	2	1,2	9,30	77,5	*
OT 112	5,0	5,45	2	4,0	2,68	2	0,3	2,77	23,1	*
OT 141	5,0	-	-	-	4,58	2	0,2	-	-	
OT 119	5,5	-	-	-	3,88	2	0,9	-	-	
OT 128	5,5	-	-	-	2,05	2	0,3	-	-	
OT 100	6,0	12,99	2	1,3	4,01	2	2,3	8,98	74,8	*
OT 25	6,5	4,47	2	0,9	2,22	2	1,9	2,25	18,7	*
OT 124	7,0	-	-	-	6,66	2	1,0	-	-	*
OT 114	7,5	5,58	2	1,3	2,81	2	3,5	2,77	23,1	*
OT 136	7,5	7,80	2	0,1	5,07	2	2,1	2,73	22,7	*
OT 103	8,0	5,85	2	0,1	1,93	2	0,4	3,92	32,7	*
OT 126	8,0	9,27	2	1,5	3,67	2	1,4	5,60	46,7	*
OT 122	8,0	5,81	2	1,1	3,33	2	0,2	2,45	20,4	*
OT 105	9,5	13,82	2	0,1	2,51	2	0,0	3,31	27,6	*
OT 12	10,0	13,43	2	0,5	3,44	2	1,0	9,99	83,2	*
OT 15	10,0	13,07	2	0,4	3,88	2	0,3	9,19	76,6	*
OT 24	10,5	6,30	2	0,7	3,73	2	0,8	2,57	21,4	*
OT 27	10,5	9,08	2	1,4	2,99	2	3,6	6,09	50,7	*

Tab. 20 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Oberflächenproben aus dem Litoral- und Sublitoralbereich des Obertrumer Sees. Die mit einem * gekennzeichneten Proben liegen im Einschüttungs- bzw. Abflußbereich von Bächen (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	C-Ges. n (%)	Var (%)	C-org. n (%)	Var (%)	C-Karb. (%)	CaCO ₃ (%)			
GR 31	0,5	15,31	2	0,7	5,30	2	0,9	10,01	83,4	*
GR 100	0,5	15,40	3	7,3	9,29	2	0,4	6,11	50,9	*
GR 101	0,5	16,91	2	5,9	10,25	2	1,0	6,66	55,5	*
GR 108	0,5	13,72	2	0,4	3,57	2	2,2	10,15	84,6	*
GR 103	1,0	-	-	-	4,09	2	0,2	-	-	
GR 104	1,0	17,09	2	2,4	7,06	2	3,0	10,03	83,6	*
GR 106	1,0	14,24	2	1,0	2,56	2	0,6	11,68	97,3	*
GR 109	2,0	-	-	-	2,56	2	2,8	-	-	
GR 105	4,0	6,75	2	1,7	4,94	2	0,0	1,81	15,1	*
GR 107	6,0	13,14	2	1,7	3,25	2	1,5	9,89	82,4	*

Tab. 21 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Oberflächenproben aus dem Litoral- und Sublitoralbereich des Grabensees. Die mit einem * gekennzeichneten Proben liegen im Einschüttungs- bzw. Abflußbereich von Bächen (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	C-Ges. n (%)	Var (%)	C-org. n (%)	Var (%)	C-Karb. (%)	CaCO ₃ (%)			
OT 109	11,0	9,46	2	1,3	2,56	2	2,8	6,90	57,5	*
OT 139	11,0	-	-	-	4,32	2	1,6	-	-	
OT 130	11,5	12,12	2	1,1	3,40	2	5,0	8,72	72,7	*
OT 113	12,5	-	-	-	3,38	2	0,6	-	-	
OT 137	12,5	8,21	2	2,0	3,95	2	1,3	4,26	35,5	*
OT 145	12,5	10,86	2	0,1	3,47	2	2,3	8,39	69,9	*
OT 21	12,5	8,09	2	0,2	3,88	2	2,9	4,21	35,1	*
OT 125	13,0	10,93	2	0,6	3,48	2	1,0	7,45	62,1	*
OT 134	14,0	-	-	-	3,04	2	0,2	-	-	
OT 108	16,0	9,00	2	0,5	2,23	2	0,3	6,77	56,4	*
OT 29	16,0	11,31	2	0,1	3,23	2	1,8	8,08	67,3	*
OT 11	17,0	11,86	2	0,2	3,60	2	3,0	8,26	68,8	*
OT 20	17,5	8,65	2	0,1	1,29	2	1,6	7,36	61,3	*
OT 28	17,5	5,83	2	0,7	2,32	2	0,6	3,51	29,2	*
OT 23	19,0	8,99	2	1,1	3,84	2	1,1	5,15	42,9	*
OT 146	20,0	12,17	2	0,7	3,72	2	0,4	8,45	70,4	*
OT 18	23,0	9,11	2	0,2	3,60	2	0,6	5,51	45,9	*
OT 19	23,5	10,23	2	1,4	4,04	2	0,2	6,19	51,6	*
OT 131	24,0	-	-	-	2,73	2	0,0	-	-	*
OT 31	24,0	12,99	2	0,4	4,16	2	3,1	8,83	73,6	*
OT 22	24,5	10,41	2	0,3	4,59	2	1,2	5,82	48,5	*
OT 35	25,0	10,99	2	0,3	3,87	2	1,5	7,12	59,3	*
OT 33	26,0	12,45	2	0,4	4,26	2	1,0	8,19	68,2	*
OT 143	29,5	-	-	-	4,20	2	0,5	-	-	
OT 32	30,0	12,48	2	0,7	4,89	2	3,1	7,59	63,2	*
OT 13	34,5	10,78	2	0,2	4,33	2	1,5	6,45	53,7	*
OT 8	35,0	9,92	2	0,1	3,85	2	0,2	6,07	50,6	*

Tab. 22 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Oberflächenproben aus dem Profundal des Obertrumer Sees. Die mit einem * gekennzeichneten Proben liegen im Einschüttungsbereich von Bächen (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	C-Ges. n (%)	Var (%)	C-org. n (%)	Var (%)	C-Karb. (%)	CaCO ₃ (%)			
GR 10	8,0	15,11	2	0,4	6,27	2	0,7	8,84	73,7	*
GR 14	8,0	16,25	2	0,3	7,59	2	0,6	8,66	72,2	*
GR 4	8,5	10,75	2	0,4	5,88	2	0,2	4,87	40,6	*
GR 5	8,5	16,10	2	0,0	7,11	2	1,8	8,99	74,9	*
GR 6	9,0	14,30	2	0,6	4,85	2	0,9	9,45	78,7	*
GR 2	10,0	14,08	2	0,1	5,40	2	0,5	8,68	72,3	*
GR 110	10,0	14,85	2	1,0	7,27	2	2,0	7,58	63,2	*
GR 9	11,0	14,24	2	0,1	6,16	2	0,3	8,08	67,3	*
GR 113	11,0	-	-	-	6,26	2	0,0	-	-	
GR 111	11,5	-	-	-	6,45	2	0,2	-	-	
GR 3	12,0	15,18	2	0,1	6,63	2	0,4	8,55	71,2	*
GR 7	13,5	16,69	2	5,2	8,94	2	4,0	7,75	64,6	*
GR 12	14,0	14,47	2	0,5	6,95	2	1,8	7,52	62,7	*

Tab. 23 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Oberflächenproben aus dem Profundal des Grabensees. Die mit einem * gekennzeichnete Probe liegt im Einschüttungsbereich eines Baches (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Abb. 14 KARBONATVERTEILUNG IN DEN OBERFLÄCHENSEDIMENTEN
DES OBERTRUMER SEES UND DES GRABENSEES
(in % der Trockensubstanz)

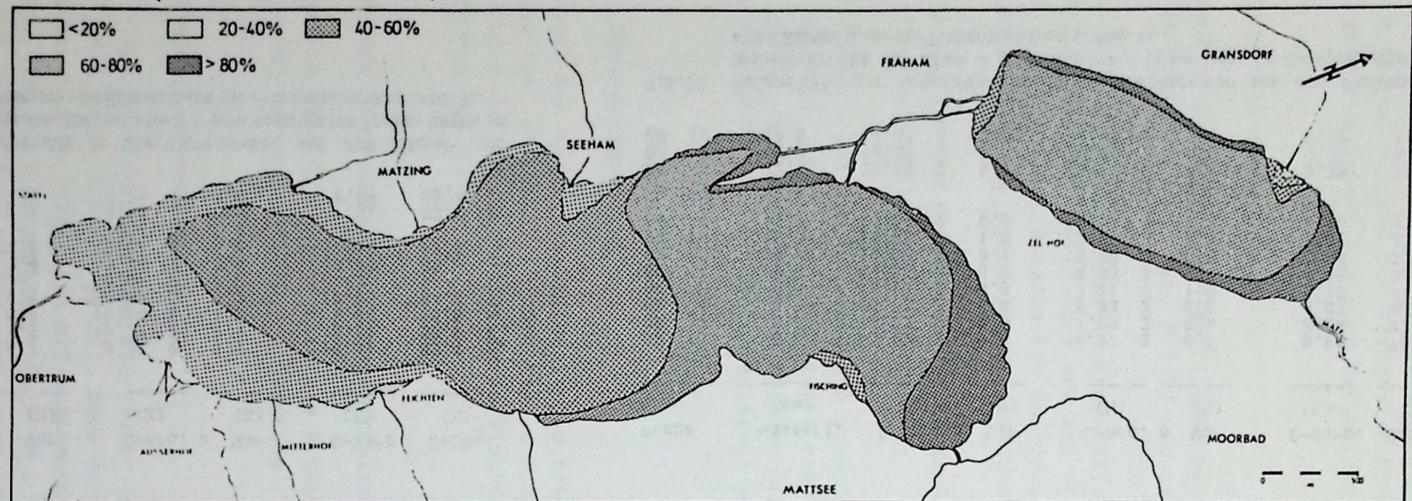
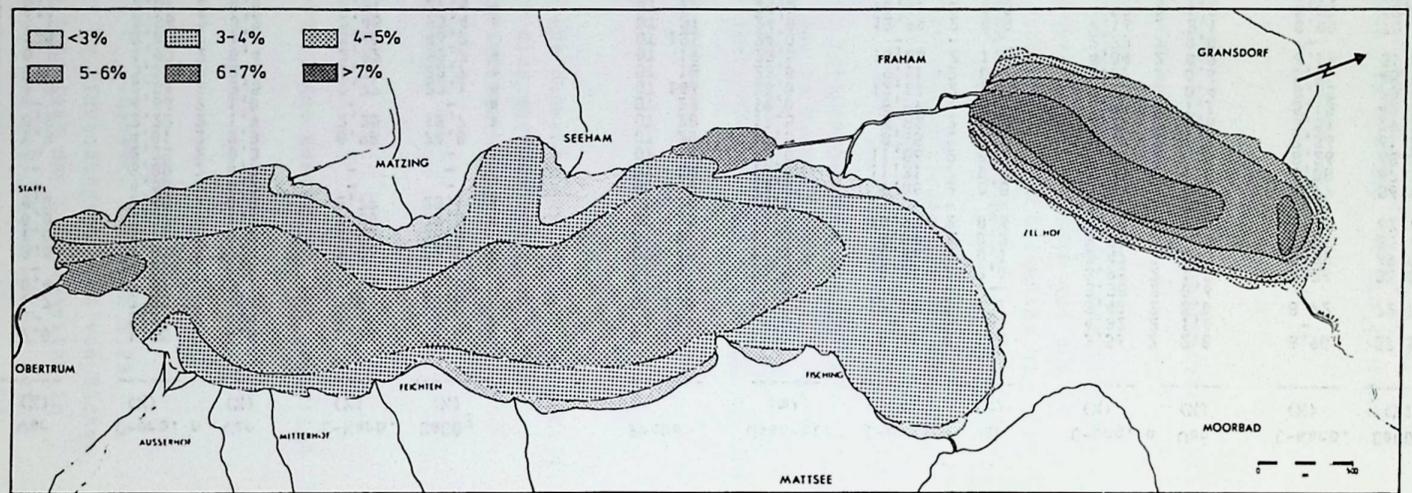


Abb. 15 VERTEILUNG DES ORGANISCH GEBUNDENEN
KOHLENSTOFFS (ORG.) IN DEN OBERFLÄCHENSEDIMENTEN
DES OBERTRUMER SEES UND DES GRABENSEES
(in % der Trockensubstanz)



4.7.2 Sedimentkerne

Innerhalb der Sedimentkerne treten starke Schwankungen des C_{org} -Gehaltes sowohl in den Litoral- als auch in den Profundalkernen auf. In keinem der Kerne gibt es einen einheitlich kontinuierlichen C_{org} -Anstieg von älteren zu jüngeren Sedimenten. Meist werden die höchsten C_{org} -Gehalte in den Oberflächensedimenten erreicht, jedoch gibt es innerhalb der Kerne Lagen, die ähnlich hohe oder z. T. sogar höhere C_{org} -Gehalte aufweisen. Im Grabensee finden sich die höchsten C_{org} -Gehalte in den unter 4.1 beschriebenen dunkel-olivgrünen Lagen (z. B. GR 2, GR 3), die in allen Kernen des Grabensees auftreten. Hier wurden Gehalte von 28,74 % C_{org} gefunden.

Die geringsten C_{org} -Gehalte weisen die fein laminierten grauen Tone an der Basis der Kerne OT 15, OT 29 und Zellhofer Moor auf. Hier liegen die C_{org} -Gehalte zwischen 0,40 und 0,88 %. Wegen der vielfältigen Ursachen für die Schwankungen der C_{org} -Gehalte in den verschiedenen Kernen ist die Angabe von mittleren Gehalten nicht sinnvoll. Generell sind die C_{org} -Gehalte in Kernen des Obertrumer Sees geringer als in Kernen des Grabensees.

Die Ergebnisse der C_{org} -Analysen an Sedimentkernen sind in den Tab. 24 und 25 dargestellt. In Kap. 5.2.2 finden sich graphische Darstellungen zur Interpretation der Daten.

4.8 Gesamt-Phosphor (P_t)

Zur Rekonstruktion der Eutrophierungsgeschichte und zur Dokumentation der derzeitigen punktuellen P-Einträge wurden P_t -Analysen an 106 Oberflächenproben und an 187 Proben aus Kernprofilen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Analysen sind in den Tab. 26 bis 31 zusammengestellt. Die Verteilung des gesamten Phosphors in den Oberflächensedimenten der Seen zeigt die Abb. 16.

4.8.1 Oberflächensedimente

In den oberhalb der O_2 -Chemokline (bei ca. -8 m Wassertiefe) liegenden Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees liegt der durchschnittliche P_t -Gehalt bei 636 ppm ($n = 23$, 260-1141 ppm). Im Grabensee liegt der durchschnittliche P_t -Gehalt der entsprechenden Sedimente bei 405 ppm ($n = 13$, 160-681 ppm).

Bereiche mit extrem hohen P_t -Gehalten in den Oberflächensedimenten liegen beim OT im Bereich vor dem Trumer Moos (bei Obertrum) und oberhalb der Anzinger Bucht am Warstein. An beiden Stellen wurden P_t -Gehalte über 900 ppm gemessen. Die niedrigsten P_t -Gehalte in Sedimenten oberhalb der O_2 -Chemokline wurden mit Gehalten unter 300 ppm am nördlichen Ufer des Obertrumer Sees und in schmalen Streifen am östlichen und westlichen Ufer des Grabensees gemessen. In den Oberflächensedimenten unterhalb der O_2 -Chemokline liegen die P_t -Gehalte im Obertrumer See zwischen 421 und 1457 ppm bei einem Mittel von 793 ppm ($n = 53$). Im Grabensee schwanken die P_t -Gehalte dieser Sedimente zwischen 600 und 1400 ppm bei einem mittleren Gehalt von 872 ppm ($n = 17$).

4.8.2 Sedimentkerne

Ähnlich wie schon bei den Karbonat- und C_{org} -Gehalten treten innerhalb der einzelnen Sedimentkerne vielfältige Schwankungen der P_t -Gehalte auf.

Generell nehmen die P_t -Gehalte von der Basis der Kerne zur Oberfläche hin zu. Der Anstieg erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, sondern mit deutlich ausgeprägten Maxima innerhalb der Kerne. Diese Maxima befinden sich jeweils in den unter 4.1 beschriebenen dunklen Zwischenlagen. In den Kernen OT 3, OT 11, OT 12, GR 3 und GR 12 sind die P_t -Gehalte in den Zwischenlagen sogar höher als in den rezenten Sedimenten (vgl. Tab. 30 u. 31). Die niedrigsten P_t -Gehalte wurden mit nur 26 ppm in dem weißen Kalksediment des Kerns GR 31 gefunden. Die fein laminierten Tone in den Kernen OT 15 und 29 sowie aus dem Zellhofer Moor enthalten im Mittel 410 ppm P_t .

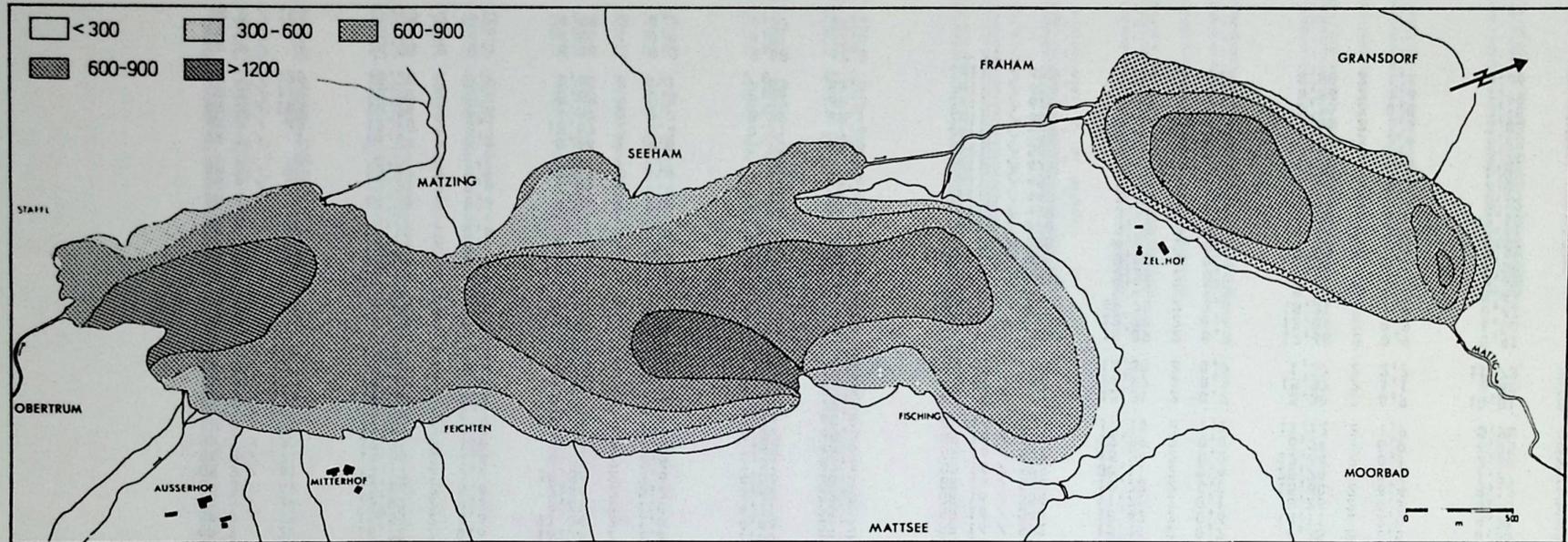
Probe/Sed.Tiefe / (cm)	C-Ges (%)	n	Var (%)	C-org (%)	n	Var (%)	C-Karb (%)	CaCO ₃ (%)	Probe/Sed.Tiefe / (cm)	C-Ges (%)	n	Var (%)	C-org (%)	n	Var (%)	C-Karb (%)	CaCO ₃ (%)
OT 11 / 1	11,86	2	0,2	3,60	2	3,0	8,26	68,8	OT 30 / 1	14,57	2	0,0	5,27	2	1,2	9,30	77,5
OT 11 / 13	12,00	2	0,1	3,22	2	2,0	8,78	73,2	OT 30 / 40	12,00	2	0,7	1,84	2	0,8	10,16	84,7
OT 11 / 18	12,01	2	0,8	3,83	2	1,8	8,18	68,2	OT 30 / 135	11,41	2	0,1	3,40	2	4,0	8,01	66,7
OT 11 / 37	9,90	2	0,2	8,09	2	1,8	1,81	15,1									
OT 11 / 54	11,32	2	0,4	3,14	2	0,0	8,18	68,2	OT 31 / 1	12,99	2	0,4	4,16	2	3,1	8,83	73,6
OT 11 / 75	12,34	2	0,7	2,21	2	0,3	10,13	84,4	OT 31 / 55	8,40	2	0,8	4,43	2	1,9	3,97	33,1
									OT 31 / 104	11,91	2	0,3	2,90	2	0,5	9,01	75,1
OT 12 / 1	13,43	2	0,5	3,44	2	0,0	9,99	83,2									
OT 12 / 37	10,06	2	0,8	8,46	2	0,5	1,60	13,3	OT 32 / 1	12,48	2	0,7	4,89	2	3,1	7,59	63,2
OT 12 / 39	10,54	2	0,6	1,64	2	0,0	8,90	74,2	OT 32 / 7,5	9,08	2	0,9	4,77	2	3,6	4,31	35,9
OT 12 / 60	13,25	2	0,8	3,02	2	0,2	10,23	85,2	OT 32 / 10	9,09	2	0,2	3,24	2	0,2	5,85	48,7
									OT 32 / 20	9,30	2	0,3	3,15	2	1,1	6,15	51,2
OT 15 / 1	13,07	2	0,4	3,88	2	1,3	9,19	76,6	OT 32 / 22,5	8,52	2	0,2	3,81	2	1,1	4,71	39,2
OT 15 / 27	9,13	2	0,2	3,64	2	1,6	5,49	45,7	OT 32 / 27,5	8,76	2	1,6	3,53	2	2,0	5,23	49,6
OT 15 / 32	2,33	2	3,6	0,36	1	0,6	1,97	16,4	OT 32 / 32	9,36	2	0,5	4,36	2	2,0	5,00	41,7
									OT 32 / 37,5	8,76	2	0,8	4,06	2	0,7	4,70	39,2
OT 18 / 1	9,11	2	0,2	3,60	2	0,6	5,51	45,9	OT 32 / 42,5	7,99	2	0,0	3,59	2	2,0	4,40	36,7
OT 18 / 90	6,07	2	0,6	3,52	2	0,6	2,55	21,2	OT 32 / 47,5	7,81	2	0,0	4,62	2	4,6	3,19	26,6
OT 18 / 101	5,54	2	1,0	3,69	2	9,1	1,85	15,4	OT 32 / 50	8,00	2	0,3	3,87	2	1,8	4,13	34,4
									OT 32 / 57,5	7,17	2	0,0	4,34	2	3,9	2,83	23,6
OT 19 / 1	10,23	2	1,4	4,04	2	0,2	6,19	51,6	OT 32 / 65	6,88	2	0,1	3,81	2	7,4	3,07	25,6
OT 19 / 94	8,14	2	0,9	5,66	2	1,0	2,48	20,7	OT 32 / 72,5	6,99	2	3,8	4,13	2	4,1	3,86	23,8
OT 19 / 110	9,30	2	0,8	3,03	2	1,2	6,27	52,2	OT 32 / 85	9,28	2	0,2	3,86	2	2,9	5,42	45,2
									OT 32 / 87,5	9,25	2	0,3	4,33	2	0,0	4,92	41,0
OT 20 / 1	8,65	2	0,1	1,29	2	1,6	7,36	61,3	OT 32 / 92	9,19	2	0,0	4,18	2	0,7	5,01	41,7
OT 20 / 103	3,71	2	0,4	1,29	2	2,8	2,42	20,2	OT 32 / 97,5	8,85	2	0,3	7,67	2	0,9	1,18	9,8
									OT 32 / 102,5	9,99	2	0,0	5,93	2	0,4	4,06	33,8
OT 21 / 1	8,09	2	0,2	3,88	2	2,9	4,21	35,1	OT 32 / 110	10,63	2	0,0	2,39	2	0,9	8,24	68,7
OT 21 / 90	10,74	2	0,7	4,15	2	0,8	6,59	54,9	OT 32 / 116	10,76	2	0,1	3,52	2	4,4	7,24	60,3
									OT 32 / 122,5	10,78	2	0,1	3,55	2	2,0	7,23	60,2
OT 22 / 1	10,41	2	0,3	4,59	2	1,2	5,82	48,5	OT 32 / 128	9,92	2	1,0	2,93	2	1,0	6,99	58,2
OT 22 / 34	7,47	2	1,5	2,75	2	3,1	4,72	39,3									
OT 22 / 100	7,67	2	0,1	3,57	2	2,8	4,10	34,2									
OT 23 / 1	8,99	2	1,1	3,84	2	1,1	5,15	42,9									
OT 23 / 87	5,56	2	0,5	2,86	2	3,2	2,70	22,5									
OT 24 / 1	6,30	2	0,7	3,73	2	0,8	2,57	21,4									
OT 24 / 100	5,12	2	1,2	3,04	2	1,2	2,08	17,3									
OT 25 / 1	4,47	2	0,9	2,22	2	1,9	2,25	18,7									
OT 25 / 72	4,53	2	0,3	2,53	2	1,7	2,00	16,7									
OT 28 / 1	5,83	2	0,7	2,32	2	0,6	3,51	29,2									
OT 28 / 10	3,64	2	0,4	1,14	2	3,1	2,50	20,8									
OT 28 / 53	5,27	2	0,4	1,87	2	1,1	3,40	28,3									
OT 29 / 1	11,31	2	0,1	3,23	2	1,8	8,08	67,3									
OT 29 / 10	8,63	2	2,3	2,80	2	1,0	5,83	48,6									
OT 29 / 20	6,61	2	1,1	2,90	2	0,0	3,71	30,9									
OT 29 / 25	5,24	2	1,6	2,21	2	1,3	3,03	25,2									
OT 29 / 30	7,84	2	0,7	2,71	2	1,0	5,13	42,7									
OT 29 / 35	7,45	2	1,9	3,27	2	1,7	4,18	34,8									
OT 29 / 40	7,12	2	0,0	3,96	2	3,2	3,16	26,3									
OT 29 / 45	7,65	2	0,9	3,55	2	0,4	4,10	34,2									
OT 29 / 52	3,17	2	0,7	0,64	2	3,3	2,53	21,1									
OT 29 / 62	2,60	2	1,6	0,47	2	3,0	2,13	17,7									
OT 29 / 85	2,60	2	1,6	0,40	2	3,5	2,20	18,3									
OT 29 / 110	2,40	2	1,8	0,44	2	4,9	1,96	16,3									

Tab. 24 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Sedimentkernen des Obertrumer Sees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe/Sed.Tiefe / (cm)	C-Ges (%)	n	Var (%)	C-org (%)	n	Var (%)	C-Karb (%)	CaCO ₃ (%)	Probe/Sed.Tiefe / (cm)	C-Ges (%)	n	Var (%)	C-org (%)	n	Var (%)	C-Karb (%)	CaCO ₃ (%)
GR 2 / 1	14,08	2	0,1	5,40	2	0,5	8,48	72,3	GR 13 / 43	17,94	2	0,6	16,84	2	1,3	1,10	9,2
GR 2 / 16	13,66	2	0,7	4,42	2	1,1	9,24	77,0	GR 13 / 109	14,33	2	0,8	6,11	2	1,6	8,22	68,5
GR 2 / 25	14,67	2	1,0	5,92	2	0,0	8,75	72,2	GR 14 / 1	16,25	2	0,3	7,59	2	0,6	8,66	72,2
GR 2 / 42	15,04	2	1,7	9,38	2	2,0	5,66	47,2	GR 14 / 60	11,74	2	0,2	5,41	2	0,5	6,33	52,7
GR 2 / 50	13,93	2	0,3	3,77	2	1,1	10,16	84,7	GR 16 / 41	18,58	2	0,2	16,56	2	2,0	2,02	16,8
GR 2 / 69	13,04	2	1,1	2,48	2	0,9	10,56	88,0	GR 16 / 82	12,05	2	1,5	8,19	2	4,8	3,86	32,2
GR 2 / 99	15,13	2	0,4	4,98	2	0,4	10,15	84,6	GR 16 / 126	15,95	2	1,7	13,67	2	1,1	2,28	19,0
GR 3 / 1	15,18	2	0,1	6,63	2	0,4	8,55	71,2	GR 16 / 183	13,69	2	0,1	6,11	2	0,5	7,58	63,2
GR 3 / 15	13,90	2	0,3	6,16	2	0,5	7,74	64,5	GR 16 / 368	13,15	2	1,1	5,15	2	2,8	8,00	66,7
GR 3 / 25	14,22	2	0,6	10,91	2	0,3	5,31	44,2	GR 16 / 417	13,71	2	0,9	5,17	2	0,0	8,54	71,2
GR 3 / 29	16,72	2	0,6	16,06	2	2,6	2,66	22,2	GR 16 / 512	15,40	2	0,7	6,75	2	2,5	8,65	72,1
GR 3 / 35	15,50	2	0,6	11,04	2	1,0	4,46	37,2	GR 16 / 540	18,42	2	0,6	14,11	2	2,0	4,31	35,9
GR 3 / 39	13,82	2	0,3	9,61	2	1,0	4,21	35,1	GR 16 / 554	15,40	2	0,7	8,26	2	4,3	3,45	28,7
GR 3 / 48	13,86	2	0,6	7,44	2	5,7	6,42	53,0	GR 16 / 565	19,73	2	0,0	15,60	2	6,4	4,13	34,4
GR 3 / 61	15,12	2	2,0	10,56	2	3,6	4,56	38,5	GR 16 / 573	30,11	2	0,4	28,74	2	0,6	1,37	11,4
GR 3 / 71	14,50	2	1,6	6,99	2	2,4	7,51	62,6	GR 16 / 579	15,24	2	0,2	12,64	2	0,1	2,60	21,7
GR 3 / 90	12,61	2	1,8	4,98	2	2,8	7,63	63,6	GR 16 / 581	12,39	2	0,0	6,34	2	0,9	6,05	50,4
GR 3 / 95	13,59	2	0,2	5,37	2	1,6	8,22	68,5	GR 16 / 586	17,10	2	1,1	11,12	2	1,9	5,98	49,8
GR 3 / 105	13,50	2	0,2	5,34	2	2,1	8,16	68,0	GR 31 / 1	15,31	2	0,7	5,30	2	0,9	10,01	83,4
GR 3 / 120	14,58	2	0,6	5,03	2	0,6	9,55	79,6	GR 31 / 10	21,97	2	0,3	15,37	2	1,1	6,60	55,0
GR 3 / 128	14,32	2	0,3	1,81	2	1,0	4,51	37,4	GR 31 / 40	13,30	2	0,9	1,57	2	2,7	11,73	97,7
GR 3 / 129	12,54	2	0,2	3,73	2	0,0	8,81	73,4	Zell / 227	18,09	2	0,3	17,68	2	0,9	0,41	3,4
GR 3 / 130	13,64	2	0,6	4,61	2	2,1	9,03	75,2	Zell / 232	17,92	2	0,6	18,86	2	0,3	1,06	8,8
GR 4 / 1	10,75	2	0,4	5,88	2	0,2	4,87	40,6	Zell / 242	18,73	2	2,0	18,31	2	1,9	0,42	3,5
GR 4 / 95	8,84	2	0,4	4,29	2	1,2	4,55	37,9	Zell / 252	5,54	2	1,3	4,88	2	1,7	0,66	5,5
GR 5 / 1	16,10	2	0,0	7,11	2	1,8	8,99	74,9	Zell / 558	3,21	2	0,4	2,56	2	1,7	0,65	5,4
GR 5 / 42	16,89	2	0,7	12,63	2	0,5	4,26	35,5	Zell / 278	3,86	2	0,4	2,07	2	2,7	1,79	14,9
GR 5 / 100	13,66	2	0,4	3,60	2	0,2	10,06	83,8	Zell / 328	4,67	2	0,9	1,32	2	3,2	3,35	27,9
GR 5 / 137	14,10	2	0,6	3,92	2	1,6	10,18	84,8	Zell / 378	3,73	2	0,4	0,94	2	3,0	2,79	23,2
GR 6 / 1	14,30	2	0,6	4,85	2	0,9	9,45	78,7	Zell / 428	3,46	2	1,2	1,28	2	0,0	2,18	18,2
GR 6 / 52	12,31	2	0,6	2,86	2	0,5	9,45	78,7	Zell / 448	3,87	2	0,7	1,75	2	1,6	2,12	17,7
GR 6 / 98	13,17	2	0,1	2,62	2	1,4	10,55	87,9	Zell / 458	3,72	2	0,0	1,66	2	1,7	2,06	17,2
GR 7 / 1	16,69	2	5,2	8,94	2	4,0	7,75	64,6	Zell / 479	2,83	2	1,5	1,75	2	2,4	1,08	9,0
GR 7 / 43	18,98	2	0,1	18,07	2	1,4	0,91	7,6	Zell / 508	4,76	2	0,0	1,05	2	6,7	3,71	30,9
GR 7 / 106	13,26	2	0,4	4,97	2	2,7	8,29	69,1	Zell / 558	3,22	2	0,9	1,19	2	2,4	2,03	16,9
GR 7 / 112	13,97	2	0,6	5,65	2	0,5	8,32	69,3	Zell / 608	4,34	2	0,7	1,31	2	1,0	2,03	25,2
GR 7 / 120	13,28	2	0,9	5,65	2	1,1	7,63	63,6	Zell / 618	3,60	2	0,4	0,70	2	0,0	2,90	24,2
GR 9 / 1	14,24	2	0,1	6,16	2	0,3	8,08	67,3	Zell / 654	2,85	2	0,5	0,86	2	1,6	1,99	16,6
GR 9 / 37	17,11	2	0,6	16,80	2	0,0	0,31	2,6	Zell / 655	4,24	2	0,0	0,88	2	1,6	3,36	28,0
GR 9 / 108	11,85	2	0,5	4,98	2	0,3	6,87	57,2									
GR 10 / 1	15,11	2	0,4	6,27	2	0,7	8,84	73,7									
GR 10 / 43	14,20	2	0,4	9,47	2	0,1	4,73	39,4									
GR 10 / 49	13,37	2	0,1	3,93	2	1,3	9,44	78,7									
GR 12 / 1	14,47	2	0,5	6,95	2	1,8	7,52	62,7									
GR 12 / 10	13,00	2	0,4	5,87	2	2,7	7,13	59,4									
GR 12 / 20	12,15	2	1,8	6,23	2	2,5	5,92	49,3									
GR 12 / 30	13,02	2	1,0	7,25	2	2,0	5,77	48,1									
GR 12 / 40	13,98	2	0,9	9,38	2	0,2	4,60	38,3									
GR 12 / 60	12,47	2	0,5	9,81	2	0,9	2,66	22,2									
GR 12 / 80	12,51	2	0,6	9,10	2	1,2	3,41	28,4									
GR 12 / 90	13,88	2	0,4	10,12	2	0,1	3,76	31,3									

Tab. 25 Kohlenstoff- und Karbonatgehalte in Sedimentkernen des Grabensees Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Abb. 16 VERTEILUNG DES GESAMT PHOSPHORS (P_t) IN DEN OBERFLÄCHEN-
 SEDIMENTEN DES OBERTRUMER SEES UND DES GRABENSEES
 (in ppm der Trockensubstanz)



Probe	Wassert. (m)	P-t (ppm)	n	Var (%)
OT 117	0,5	618	2	5,8
OT 127	0,5	263	2	0,3
OT 116	1,0	765	2	0,5
OT 111	2,0	618	2	3,6
OT 6	2,5	506	2	1,5
OT 118	2,5	873	2	0,2
OT 144	2,5	260	2	1,9
OT 120	3,0	1141	2	3,0
OT 129	3,0	374	2	1,9
OT 37	4,0	528	2	0,0
OT 123	4,0	345	2	2,3
OT 30	4,5	759	2	0,2
OT 107	4,5	677	1	1,6
OT 112	5,0	812	2	0,5
OT 140	5,0	676	2	4,0
OT 141	5,0	819	2	1,2
OT 104	5,5	504	2	3,6
OT 119	5,5	840	2	1,5
OT 128	5,5	480	2	2,1
OT 100	6,0	695	2	1,7
OT 25	6,5	511	2	0,8
OT 101	7,0	773	1	0,0
OT 124	7,0	778	2	1,5

Tab. 26 Gesamt-Phosphor (P_t) in Oberflächensedimenten aus dem Obertrumer Sees; oberhalb der O_2 -Chemokline (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	P-t (ppm)	n	Var (%)
OT 114	7,5	552	2	1,7
OT 135	7,5	889	2	0,5
OT 126	8,0	467	2	1,5
OT 102	8,5	557	2	1,0
OT 110	8,5	859	2	4,9
OT 122	8,5	532	2	2,3
OT 38	9,0	819	2	2,2
OT 105	9,5	533	2	1,3
OT 12	10,0	543	2	1,0
OT 15	10,0	628	2	0,5
OT 115	10,0	1016	2	1,0
OT 24	10,5	923	2	1,5
OT 27	10,5	564	2	2,1
OT 109	11,0	582	2	3,0
OT 130	11,0	923	2	0,5
OT 139	11,0	1080	2	8,2
OT 5	12,0	868	2	0,6
OT 21	12,5	709	2	0,6
OT 113	12,5	801	2	1,2
OT 136	12,5	1172	2	1,3
OT 145	12,5	500	2	0,3
OT 137	12,5	982	2	3,0
OT 125	13,0	1310	2	0,9
OT 142	13,0	476	2	2,5
OT 134	14,0	625	2	0,8
OT 4	16,0	825	2	0,4
OT 29	16,0	746	2	1,3
OT 106	16,0	563	2	2,7
OT 108	16,0	595	2	0,4
OT 11	17,0	675	2	0,5
OT 20	17,5	715	1	0,0
OT 28	17,5	594	2	1,9
OT 23	19,0	1017	2	0,1
OT 39	19,0	747	2	3,0
OT 138	20,0	1140	2	0,2
OT 146	20,0	825	2	0,7
OT 34	22,0	915	2	0,3
OT 133	22,5	787	2	1,8
OT 18	22,5	770	2	0,5
OT 16	23,5	1155	2	0,2
OT 19	23,5	753	2	0,6
OT 31	24,0	742	2	1,1
OT 131	24,0	729	2	7,0
OT 22	24,5	943	2	0,8
OT 2	25,0	882	2	0,8
OT 35	25,0	848	2	0,1
OT 10a	27,0	1059	2	2,1
OT 17a	28,0	892	2	1,4
OT 143	29,5	421	2	2,5
OT 32	30,0	983	2	0,7
OT 132	30,0	1095	2	1,4
OT 13	34,5	1127	2	0,4
OT 3	36,0	1457	2	3,5

Tab. 27 Gesamt-Phosphor (P_t) in Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees; unterhalb der O_2 -Chemokline (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	P-t (ppm)	n	Var (%)
GR 31	0,5	544	2	2,5
GR 100	0,5	506	2	0,6
GR 101	0,5	371	2	3,8
GR 108	0,5	231	2	7,9
GR 103	1,0	363	2	0,8
GR 104	1,0	165	2	0,3
GR 106	1,0	160	2	4,7
GR 102	2,0	420	2	3,7
GR 109	2,0	573	2	2,4
GR 115	3,5	313	2	6,6
GR 105	4,0	579	2	2,1
GR 114	5,0	364	2	0,8
GR 107	6,0	681	2	7,4

Tab. 28 Gesamt-Phosphor (P_t) in Oberflächensedimenten des Grabensees; oberhalb der O_2 -Chemokline (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe	Wassert. (m)	P-t (ppm)	n	Var (%)
GR 8	7,5	1401	2	2,3
GR 10	8,0	600	2	0,9
GR 14	8,0	774	2	0,5
GR 4	8,5	824	1	0,0
GR 5	8,5	1053	2	4,0
GR 6a	9,0	607	2	4,1
GR 112	9,0	839	2	3,0
GR 116	9,5	788	1	0,0
GR 2	10,0	761	2	3,8
GR 110	10,0	989	2	2,6
GR 9	11,0	941	2	5,3
GR 113	11,0	867	2	0,6
GR 111	11,5	907	2	1,6
GR 3	12,0	745	2	0,3
GR 7	13,5	786	2	1,0
GR 1	14,0	942	2	0,5
GR 12	14,0	1000	2	1,2

Tab. 29 Gesamt-Phosphor (P_t) in Oberflächensedimenten des Grabensees; unterhalb der O_2 -Chemokline (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe/Sed.Tiefe (cm)	P-t (ppm)	n	Var (%)	Probe/Sed.Tiefe (cm)	P-t (ppm)	n	Var (%)
OT 3 / 1	1457	2	3,5	OT 28 / 1	534	2	1,9
OT 3 / 12	1095	2	2,2	OT 28 / 10	353	2	1,4
OT 3 / 40	690	1	0,0	OT 28 / 53	378	2	2,6
OT 3 / 75	1700	2	3,9				
OT 4 / 1	825	2	0,4	OT 29 / 1	746	2	1,3
OT 4 / 45	444	2	0,0	OT 29 / 10	554	2	0,1
OT 4 / 52	809	2	0,6	OT 29 / 20	534	2	0,4
OT 4 / 70	374	2	0,6	OT 29 / 25	488	2	1,3
				OT 29 / 30	442	2	0,5
OT 5 / 1	868	2	0,6	OT 29 / 35	502	2	0,2
OT 5 / 30	458	2	1,7	OT 29 / 40	407	2	3,2
				OT 29 / 45	484	2	1,0
OT 6 / 1	504	2	1,5	OT 29 / 52	282	2	1,0
OT 6 / 50	212	4	5,4	OT 29 / 62	495	2	0,8
OT 6 / 100	219	2	3,6	OT 29 / 85	472	2	2,6
				OT 29 / 110	418	2	2,0
OT 11 / 1	475	2	0,5	OT 30 / 1	759	2	0,2
OT 11 / 13	492	2	0,7	OT 30 / 40	156	2	1,2
OT 11 / 18	457	2	2,5	OT 30 / 115	367	2	0,8
OT 11 / 37	884	2	2,3				
OT 11 / 54	398	1	0,0	OT 31 / 1	742	2	1,1
OT 11 / 75	271	2	6,8	OT 31 / 55	427	2	1,2
				OT 31 / 104	430	2	0,5
OT 12 / 1	543	2	1,0	OT 32 / 1	983	2	0,7
OT 12 / 37	874	2	4,7	OT 32 / 7,5	821	2	2,8
OT 12 / 39	208	2	1,7	OT 32 / 10	841	2	0,2
OT 12 / 60	363	2	1,8	OT 32 / 20	739	2	4,5
				OT 32 / 22,5	790	2	1,8
OT 15 / 1	628	2	0,5	OT 32 / 27,5	718	2	0,4
OT 15 / 27	500	2	1,7	OT 32 / 32,5	710	2	0,8
OT 15 / 32	491	2	3,5	OT 32 / 37,5	697	2	1,8
OT 15 / 65	385	2	5,5	OT 32 / 42,5	692	2	0,8
				OT 32 / 47,5	716	2	0,6
OT 16 / 1	1155	2	0,2	OT 32 / 50	953	2	3,9
OT 16 / 30	769	2	0,6	OT 32 / 57,5	875	2	2,6
OT 16 / 110	1153	2	2,6	OT 32 / 65	711	2	1,8
				OT 32 / 72,5	850	2	1,5
OT 17a / 1	892	2	1,4	OT 32 / 85	590	2	1,2
OT 17a / 90	701	2	0,1	OT 32 / 92,5	669	2	4,0
OT 17a / 110	460	2	0,2	OT 32 / 97,5	862	2	2,3
				OT 32 / 102,5	874	2	0,5
OT 18 / 1	770	2	0,5	OT 32 / 107,5	690	1	0,0
OT 18 / 90	585	2	0,1	OT 32 / 110	493	2	5,2
OT 18 / 101	298	2	5,5	OT 32 / 116	582	2	0,5
				OT 32 / 122,5	553	2	1,5
OT 20 / 1	715	1	0,0	OT 32 / 128	470	2	0,9
OT 20 / 103	320	2	0,4				
OT 21 / 1	709	2	0,7	OT 34 / 1	915	2	0,3
OT 21 / 90	463	2	4,3	OT 34 / 65	766	2	1,6
OT 22 / 1	943	2	0,8	OT 35 / 1	848	2	0,1
OT 22 / 34	728	2	0,5	OT 35 / 125	636	2	0,3
OT 22 / 100	946	2	1,0				
OT 23 / 1	1017	2	0,1				
OT 23 / 87	779	2	2,5				
OT 24 / 1	923	2	1,5				
OT 24 / 100	707	2	0,7				
OT 25 / 1	511	2	0,8				
OT 25 / 72	431	2	4,3				

Tab. 30 Gesamt-Phosphor (P_t) in den Sedimentkernen des Obertrumer Sees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

Probe/Sed.Tiefe (cm)	P-t (ppm)	n	Var (%)	Probe/Sed.Tiefe (cm)	P-t (ppm)	n	Var (%)
GR 2 / 1	741	2	3,8	GR 16 / 41	1099	2	1,4
GR 2 / 16	415	2	0,7	GR 16 / 82	599	2	0,5
GR 2 / 20	336	2	0,0	GR 16 / 126	928	2	0,6
GR 2 / 25	413	2	1,2	GR 16 / 183	511	2	1,5
GR 2 / 42	603	2	3,6	GR 16 / 368	567	2	0,7
GR 2 / 50	292	3	0,7	GR 16 / 417	631	2	0,7
GR 2 / 69	245	2	0,3	GR 16 / 512	627	2	0,5
GR 2 / 99	231	2	0,9	GR 16 / 540	837	2	0,4
				GR 16 / 554	657	2	1,0
GR 3 / 1	745	2	0,3	GR 16 / 565	758	2	1,2
GR 3 / 15	617	2	1,3	GR 16 / 573	856	2	2,0
GR 3 / 25	703	2	1,6	GR 16 / 579	748	2	1,7
GR 3 / 29	1009	2	0,3	GR 16 / 581	472	2	1,3
GR 3 / 33	942	2	0,7	GR 16 / 586	820	2	0,3
GR 3 / 35	869	2	5,2				
GR 3 / 39	669	2	1,2	GR 31 / 1	544	2	2,5
GR 3 / 48	642	2	2,8	GR 31 / 10	221	2	5,4
GR 3 / 59	809	2	0,8	GR 31 / 40	26	2	6,7
GR 3 / 61	733	2	0,6				
GR 3 / 71	467	2	0,2	Zell / 160	470	2	3,0
GR 3 / 90	370	2	1,3	Zell / 180	253	2	4,5
GR 3 / 95	355	2	3,0	Zell / 210	346	2	0,9
GR 3 / 105	397	2	0,7	Zell / 227	412	2	0,9
GR 3 / 120	444	2	0,7	Zell / 232	358	2	3,0
GR 3 / 128	709	2	5,3	Zell / 242	347	2	2,6
GR 3 / 129	222	2	3,8	Zell / 252	439	2	1,3
GR 3 / 130	269	2	2,6	Zell / 258	474	2	3,6
				Zell / 278	447	2	3,8
GR 4 / 1	824	1	0,0	Zell / 328	354	2	4,0
GR 4 / 95	350	2	2,2	Zell / 378	418	2	3,0
				Zell / 428	397	2	1,1
GR 5 / 1	1053	2	4,0	Zell / 448	373	2	2,7
GR 5 / 100	283	2	2,0	Zell / 458	384	2	0,4
GR 5 / 137	296	2	0,2	Zell / 474	416	2	1,0
				Zell / 508	345	2	0,8
GR 6a / 1	607	2	2,1	Zell / 558	408	2	2,1
GR 6a / 52	230	1	0,0	Zell / 608	362	2	0,8
				Zell / 618	454	2	2,2
GR 9 / 1	941	2	5,3	Zell / 654 (dk).L	416	2	5,1
GR 9 / 108	460	1	0,0	Zell / 654 (he).L	3962	2	2,5
GR 10 / 1	600	2	0,9				
GR 10 / 43	530	2	6,8				
GR 10 / 49	300	2	1,2				
GR 10 / 90	225	2	3,1				
GR 12 / 1	1000	2	1,2				
GR 12 / 10	888	2	1,3				
GR 12 / 20	669	2	0,6				
GR 12 / 30	622	2	0,0				
GR 12 / 40	657	2	1,9				
GR 12 / 51	1011	2	0,4				
GR 12 / 60	913	2	0,6				
GR 12 / 70	994	2	3,3				
GR 12 / 80	636	2	3,3				
GR 12 / 90	639	2	0,0				
GR 12 / 98	867	2	1,0				
GR 12 / 103	849	2	2,0				
GR 12 / 110	587	2	1,4				

Tab. 31 Gesamt-Phosphor (P_t) in den Sedimentkernen des Grabensees (Lage der Probenstationen s. Abb. 9).

4.9 Schwermetall- Gehalte

An 36 Proben des Profundalkerns OT 32 wurden die Schwermetalle Cadmium, Kupfer, Blei und Zink bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 32 und in Abb. 28 dargestellt.

Die Cd-Gehalte nehmen von 0,1 ppm in den hellen Sedimenten an der Basis des Kerns bis auf 0,9 ppm in den Oberflächensedimenten zu. Innerhalb des Kernprofils sind im Bereich der dunkleren Lagen kleine Maxima von 0,33 (100 cm) und 0,41 ppm (60 cm) ausgebildet. Ab 45 cm Sedimenttiefe steigen die Gehalte von 0,33 ppm kontinuierlich bis auf 0,8 ppm in 20 cm Sedimenttiefe an. Von da an bis zur Sedimentoberfläche liegen die Gehalte zwischen 0,8 und 0,9 ppm. Unmittelbar an der Sedimentoberfläche wurde mit 0,66 ppm wieder ein deutlich geringerer Cd-Gehalt gemessen.

Die Verteilung des Kupfers ist weniger signifikant. Die Gehalte schwanken zwischen 15 und 42 ppm. Die höchsten Gehalte wurden mit 40 und 42 ppm in der dunklen Sedimentlage zwischen 55 und 75 cm Sedimenttiefe gemessen. Der niedrigste Gehalt wurde mit 15 ppm direkt an der Sedimentoberfläche gefunden. Die hellen Sedimente an der Basis des Kerns enthalten 21 - 25 ppm Cu.

Der Blei-Gehalt steigt nahezu kontinuierlich von 7 - 9 ppm in den hellen Sedimenten an der Kernbasis bis auf 33 ppm in 25 cm Sedimenttiefe an. In den oberen 25 cm des Sediments liegen die Gehalte gleichbleibend zwischen 32 und 34 ppm. In 5 cm und 70 cm Sedimenttiefe fallen lediglich zwei Extremwerte mit 43 und 42 ppm heraus.

Die Zink-Gehalte steigen von 47 - 53 ppm an der Kernbasis bis auf 315 ppm an der Sedimentoberfläche an. In den dunklen Lagen innerhalb des Kerns werden erste Maximalwerte zwischen 86 und 96 ppm erreicht. Danach nehmen die Zn-Gehalte wieder bis auf 73 ppm in 30 cm Sedimenttiefe ab. Dann erfolgt ein sprunghafter Anstieg bis auf 315 ppm an der Sedimentoberfläche.

Sediment-Tiefe cm	Cadmium (Cd) mg/Kg TS	Kupfer (Cu) mg/Kg TS	Blei (Pb) mg/Kg TS	Zink (Zn) mg/Kg TS
0,0	0,66	15	32	313
2,5	-	22	33	-
5,0	0,85	34	43	115
7,5	-	-	34	-
10,0	0,90	22	34	106
12,5	0,84	21	32	97
15,0	0,81	21	32	96
17,5	-	-	-	-
20,0	0,85	18	33	97
22,5	0,76	22	34	99
25,0	0,81	21	33	97
27,5	0,69	-	29	87
30,0	0,57	23	26	73
32,5	0,54	22	25	77
35,0	0,47	19	26	-
37,5	0,41	20	24	74
40,0	0,36	22	23	76
42,5	0,36	21	22	76
45,0	0,33	22	22	86
47,5	-	-	-	-
50,0	0,38	40	28	90
52,5	-	-	27	-
55,0	0,41	28	29	96
57,5	-	-	42	-
60,0	0,40	42	25	-
62,5	-	-	19	-
65,0	0,30	32	20	87
67,5	0,32	34	21	89
70,0	0,33	32	11	86
72,5	-	-	13	-
75,0	-	-	11	-
77,5	-	-	7	47
80,0	0,16	21	7	-
82,5	-	-	9	52
85,0	0,11	-	7	53
87,5	0,17	25	9	-
90,0	-	-	-	-
92,5	-	-	-	-
95,0	0,33	32	-	-
97,5	-	-	-	-
100,0	-	-	-	-
102,5	-	-	-	-
105,0	-	-	-	-
107,5	-	-	-	-
110,0	0,16	21	7	47
112,5	-	-	9	52
115,0	0,11	-	7	53
117,5	0,17	25	9	-
120,0	-	-	-	-
122,5	-	-	-	-
125,0	-	-	-	-
ZGI - KH ¹⁾	0,11	6,6	6,7	10,9

Tab. 32 Schwermetallgehalte im Profundalkern OT 32 (Lage s. Abb. 9). Angaben in mg/kg Trockensubstanz (ppm); 1) Kalkstein ZGI-KH als Referenzprobe.

5. Diskussion der Ergebnisse

In Anlehnung an die in Kap. 1 dargestellte Aufgabenstellung werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der verschiedenen Sedimentuntersuchungen diskutiert und interpretiert.

5.1 Sedimentologie und Sedimentationsgeschichte

Ausgangspunkt für sämtliche in der vorliegenden Dissertation behandelten Aufgaben und Fragestellungen waren die Sedimente aus dem Obertrumer See und dem Grabensee sowie ergänzend aus dem Niedertrumer See (LINDNER, 1984) und dem Wallersee (GERMATSIDIS, 1985).

5.1.1 Der Sedimentationsraum

Die drei Trumer Seen haben sich erst im Laufe der Geschichte aus einem einzigen spätglazialen See differenziert (vgl. Kap. 5.1.4.2). Heute bilden sie drei voneinander getrennte Sedimentationsräume, die jedoch noch in vielfältiger Beziehung zueinander stehen. Der Niedertrumer See ist morphologisch am weitesten differenziert (LINDNER, 1984). Über einen flachen Stichkanal entwässert er nördlich des Ortes Mattsee in den Obertrumer See, der mit 72 % der Fläche das größte Einzugsgebiet der Trumer Seenkette hat. Morphologisch gliedert sich der in Richtung NNE gestreckte See in ein zentrales Hauptbecken (max. Wassertiefe 36,3 m) und ein kleineres Südbecken (max. Tiefe 25,5 m). Diese Becken sind durch eine Schwelle (max. Tiefe 21,0 m) voneinander getrennt, die durch Sedimente des Matzinger Deltas (Teufelsgraben) im Westen und durch das Feichtener Delta im Osten aufgeschüttet wurde.

Nördlich des Matzinger Deltas bildet beim Ort Seeham der Pfarrer Graben ein weiteres großes Delta, zwischen beiden liegt die Matzinger Bucht mit einem kontinuierlich bis zur Tiefe hin abfallenden Hang, der ebenso kontinuierlich zur am östlichen Ufer gelegenen Anzinger Bucht wieder aufsteigt. Die Anzinger Bucht wird im Süden vom Feichtener Delta und im Norden vom bis in den See reichenden Felsrücken (Helvetikum) des Warsteins begrenzt. Um diesen herum fällt das Ufer steil in den See ab. Nördlich des Warsteins liegt eine weitere Bucht, die morphologisch im Norden von einem zweiten Felsrücken aus Helvetikum begrenzt wird, der von Fishing parallel zum Warstein nach Mattsee verläuft.

Das gesamte Nordufer des Obertrumer Sees bildet morphologisch einen einheitlichen, erst sehr flachen, dann etwas steiler zum Becken hin abfallenden Hang. Im Westen endet diese flache Schelfzone an einer schmalen, mit Schilf bewachsenen Landzunge, die ca. 40 m von Norden aus in den See hineinragt. Zwischen dieser Landzunge und dem Seehamer Delta liegt die Bucht von Seeham. Aus dieser Bucht heraus erfolgt teilweise der Abfluß des Obertrumer Sees durch den "Seegraben" in den Grabensee. Dadurch erfüllt die Bucht quasi die Funktion eines Trichters, der zweite Abfluß des Obertrumer Sees liegt nördlich der genannten Landzunge und vereinigt sich mit dem Abfluß aus der Seehamer Bucht. Im Süden des Sees bildet der Mattich-Bach mit seiner trichterförmigen Mündung den größten Zufluß des Obertrumer Sees. Östlich davon ist aus dem Trumer Moos eine Verlandungszone in den See vorgewachsen, der sich eine weit gestreckte Bucht bis zum Feichtener Delta anschließt. Innerhalb dieser Bucht befinden sich vor den Einmündungen von kleinen Bächen mehrere kleine Deltas.

Der Grabensee hat eine sehr einfache Morphologie. Er bildet die Form einer flachen, leicht asymmetrischen Schüssel, dessen Ufer nahezu überall gleichmäßig zum Becken hin abfallen; lediglich das nördliche Ufer hat einen etwas breiten Schelf.

In der Abb. 17 ist die Morphologie des Obertrumer Sees und des Grabensees in einer Computerzeichnung perspektivisch aus Richtung NW dargestellt.

5.1.2 Sedimentliefernde Prozesse

Das Material der Sedimente in den Trumer Seen stammt aus mehreren sedimentbildenden Prozessen:

1. Allochthone klastische Einschüttungen und organischer Detritus
2. Seeinterne Sedimentproduktion (autochthone Sedimente)
 - a) Biogene epilimnische Karbonatproduktion
 - b) Biogene benthische Karbonatproduktion
 - c) Schalendetritus
 - d) Organischer Detritus aus der seeinternen Bioproduktion
 - e) Biogene SiO_2 -Produktion

5.1.2.1 Allochthone Sedimente

Als allochthones Material gelangen Klastika und organischer Detritus (Blätter, Torf- und Holzreste) über die Zuflüsse in die Seen. Im Bereich von Steiluferzonen trägt die Erosion durch Wellenschlag zur allochthonen Sedimentbildung bei (OT 114, 144). In Abb. 3 ist das See-Einzugsgebiet mit seiner Geologie dargestellt. Entsprechend der mineralogischen Zusammensetzung der von der Erosion erfaßten Gesteine im Einzugsgebiet wird durch die in die Seen transportierten Klastika der Mineralbestand der allochthonen Sedimente beeinflußt. Quarz ist meist die mineralische Hauptkomponente, auch Feldspäte sind im Gegensatz zu den autochthonen Sedimenten stets nachweisbar (s. Tab. 16). Auch in uferfernen Ablagerungsbereichen können allochthon geprägte Sedimente (in Tab. 22 und 23 mit einem * gekennzeichnete Proben) aufgrund ihrer deutlich geringeren Kalzitgehalte klar von den überwiegend autochthon gebildeten Sedimenten unterschieden werden. Des weiteren sind allochthone Sedimente häufig schon anhand ihrer Kornverteilung zu erkennen. Sie sind schlecht sortiert und haben Sandgehalte bis über 30 %. Mit zunehmender Entfernung vom Entrags- bzw. Erosionsort gleicht sich das Kornvergrößerungsspektrum jedoch dem der autochthone Sedimente an. In Abb. 18 ist der röntgendiffrakometrisch und granulometrisch deutlich erkennbare Ablagerungsbereich der allochthonen Sedimente in den Trumer Seen dargestellt.

5.1.2.2 Autochthone Sedimente

Kalzit aus biogener Karbonatproduktion, Planktondetritus und biogen durch Kieselalgen produziertes SiO_2 bilden die autochthonen Bestandteile der Sedimente in den Trumer Seen.

- a) Durch die Photosynthesetätigkeit des im Epilimnion lebenden Phytoplanktons wird dem Wasser im Sommer reichlich CO_2 entzogen. Der pH steigt und es kommt zur biogenen epilimnischen Kalzitfällung durch eine Übersättigung an CaCO_3 (epilimnische Entkalkung n. MINDER 1922; s. auch SCHNEIDER & SCHRÖDER 1980; SCHRÖDER 1982).
- b) Im Bereich des Litorals und des Sublitorals kommt es durch die Photosynthese der Makro- und der sie besiedelnden Mikrophyten zur Abscheidung von Kalkkrusten an den subaquatischen Organen der Pflanzen. Diese Kalkkrusten werden nach dem Absterben der Makro- und Mikrophyten durch Strömungen und Wellenschlag mechanisch aufbereitet und bilden deutlich unter dem Binokular erkennbare Sedimentbestandteile. Dieser Vorgang der Karbonatproduktion wird biogen benthische Entkalkung genannt.

An den Steiluferzonen des Warsteins sowie auf der Schwelle im östlichen Teil des Niedertrumer Sees (LINDNER 1984) werden im Wasser liegende Gerölle und andere Hartsubstrate von Cyanophyceen und Algen besiedelt, die durch ihre Photosynthese ebenfalls eine autochthone Kalkabscheidung auf den teilweise allochthonen Geröllen bewirken ("Krustensteine", s. SCHRÖDER 1982; SCHNEIDER et al. 1983).

- c) Organisch gebildetes Karbonat von Muschel- Schnecken- und Ostracodenschalen trägt ebenfalls zur autochthonen Karbonatbildung bei.

Abb.17 Morphologie des Obertrumer Sees und des Grabensees
(2-fach überhöht)

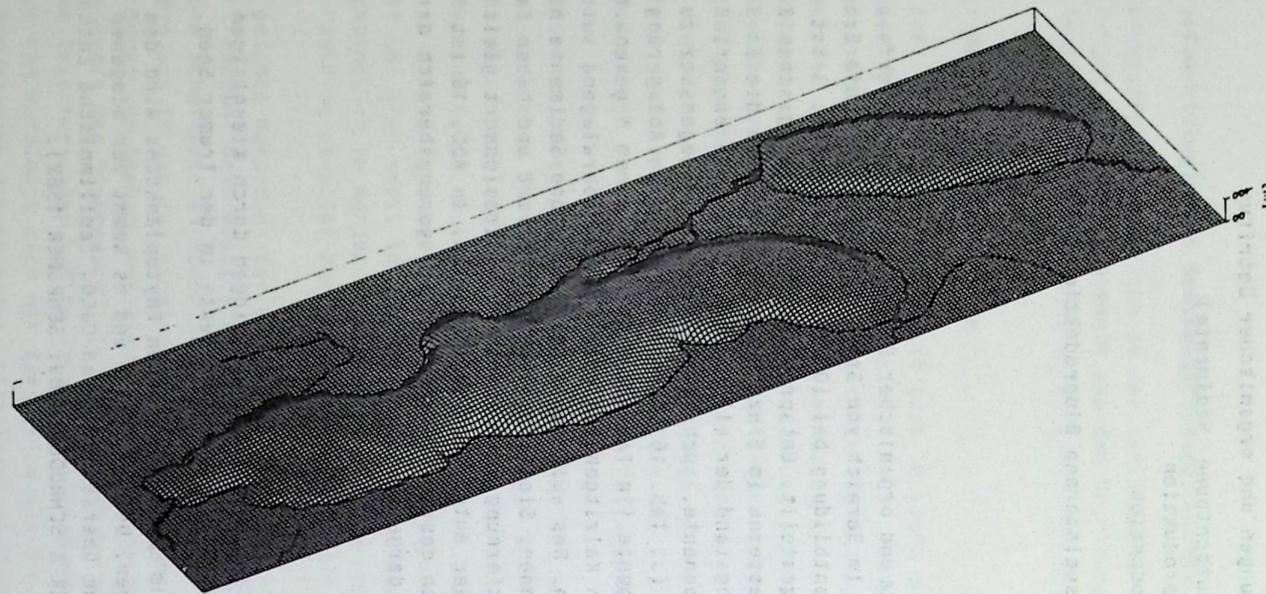
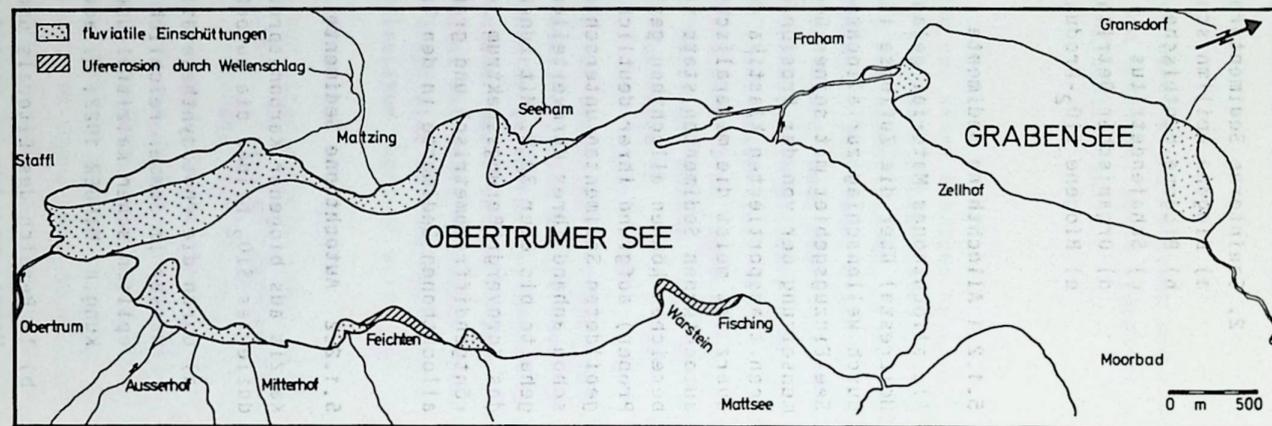


Abb.18 Ablagerungsbereich der überwiegend allochthon geprägten
Sedimente im Obertrumer See und im Grabensee



- d) In den eutrophen Vorlandseen stellt organischer Detritus von im See produzierter Planktonbiomasse einen wesentlichen Bestandteil der Sedimente dar, weil es infolge eines O_2 -Defizits nicht zur vollständigen Mineralisation von organischem Material kommt.
- e) SiO_2 -Detritus von Kieselalgen bildet besonders in den jüngeren Ablagerungen einen nennenswerten Bestandteil des Sediments, wie Untersuchungen mit dem REM gezeigt haben.

Krustensteine und Schalendetritus spielen bezüglich der Sedimentbildung quantitativ in den Trumer Seen keine Rolle.

5.1.2.3 Sedimenttypen

Anhand ihres Korngrößenspektrums und ihrer Karbonatgehalte können bei den autochthonen Sedimenten zwei Typen unterschieden werden.

Die Oberflächensedimente des Typs I sind gut sortierte, feinkörnige Ablagerungen an der Basislinie Silt-Ton mit maximal 5 % Sandgehalt. Kalzit ist durchweg mineralische Hauptkomponente, erst untergeordnet treten Quarz, Feldspäte und Hellglimmer auf. Mit zunehmender Wassertiefe steigen die C_{org} -Gehalte infolge des bereits bei OHLE (1962) beschriebenen "Trichtereffekts" an, weil sich im Becken der relativ langsam sedimentierende organische Detritus akkumuliert. Der Typ I charakterisiert den Bereich der Sedimentoberfläche, der nahezu unbeeinflusst von allochthonen Sedimentlieferungen und hydromechanisch bedingten Sedimentumlagerungen ist. Bezogen auf die Seefläche ist dieser Bereich der Stillwasserfazies im Grabensee größer als im Obertrumer See, was in der komplizierten Morphologie und Hydromechanik des Obertrumer Sees begründet ist. Außer dem Zulauf aus dem Obertrumer See wird der Grabensee lediglich noch aus dem Flurnsbach gespeist und hat so die Funktion eines "nachgeschalteten Absetzbeckens" für den Obertrumer See.

Die Sedimente des Typs II sind weniger gut sortiert und haben Sandgehalte bis zu 30 %. Der Vergleich zweier repräsentativer Korngrößensummenkurven in Abb. 19 zeigt für den Typ II (OT 128) deutlich höhere Grobsiltanteile als im Sedimenttyp I (OT 31). Sedimente des Typs II finden sich im Bereich von Flachwasserzonen, die nicht durch Seezuflüsse tangiert werden. Hier hat neben der biogenen epilimnischen Entkalkung auch die biogene benthische Entkalkung maßgeblichen Anteil an der Sedimentproduktion. Dies wird sowohl durch den deutlich höheren Karbonatgehalt (vgl. Tab. 33) als auch durch die Kornverteilung selbst belegt. Während für die Karbonate aus der biogenen epilimnischen Entkalkung hauptsächlich Korngrößen bis zu $15 \mu m$ zu erwarten sind (BRUNSKILL 1969; KELTS & HSÜ 1978) sind die Partikel aus der benthischen Karbonatproduktion deutlich größer.

Abb. 20 zeigt die Lage der verschiedenen autochthonen und allochthonen Sedimente des Obertrumer Sees und des Grabensees im Sand-Silt-Ton-Dreieck nach G. MÜLLER (1961). Deutlich zeigen sich für die verschiedenen autochthonen Sedimente klar umgrenzte Bereiche, während die allochthonen Sedimente anhand ihrer Kornverteilung nicht immer sicher erkannt werden können. Hier ermöglicht die Röntgendiffraktometrie (s. Tab. 16, S. 28) bei geringen Sandanteilen meist eine eindeutige Zuordnung.

5.1.3 Die rezenten Faziesbereiche

Die derzeitige limnologische Situation der Seen (stabile Stagnationsphasen, starke Eutrophierung) bewirkt auch eine charakteristische Ausbildung von sedimentären Faziesräumen. Sedimente, die oberhalb der Thermokline (7,5 - 8 m) abgelagert werden, sind deutlich heller gefärbt als jene, die sich unterhalb der Thermokline befinden. Diese gehen zur Beckenmitte hin in einen nahezu schwarzen Schlamm über. Anhand der Sedimentfärbung, der Korngrößenverteilung und sedimentchemischer Parameter (C_{org} , P_t) lassen sich vom Ufer bis zur Beckenmitte hin mehrere Faziesräume voneinander abgrenzen.

Typ I			Typ II		
Kalzit aus überwiegend biogener epilimnischer Entkalkung			Kalzit aus biogener epilimnischer und biogener benthischer Entkalkung		
Probe	Wassert. (m)	CaCO ₃ (%)	Probe	Wassert. (m)	CaCO ₃ (%)
OT 11	17,0	68,8	OT 12	10,0	83,2
OT 19	23,5	51,6	OT 15	10,0	76,6
OT 20	17,5	61,3			
OT 22	24,5	48,5	GR 104	1,0	83,6
OT 29	16,0	67,3	GR 106	1,0	97,3
OT 31	24,0	73,6	GR 107	6,0	82,4
OT 33	26,0	68,2	GR 108	0,5	84,6
GR 2	10,0	72,3			
GR 9	11,0	67,3			
GR 12	14,0	62,7			

Tab. 33 Karbonatgehalte der autochthonen Sedimenttypen I und II (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

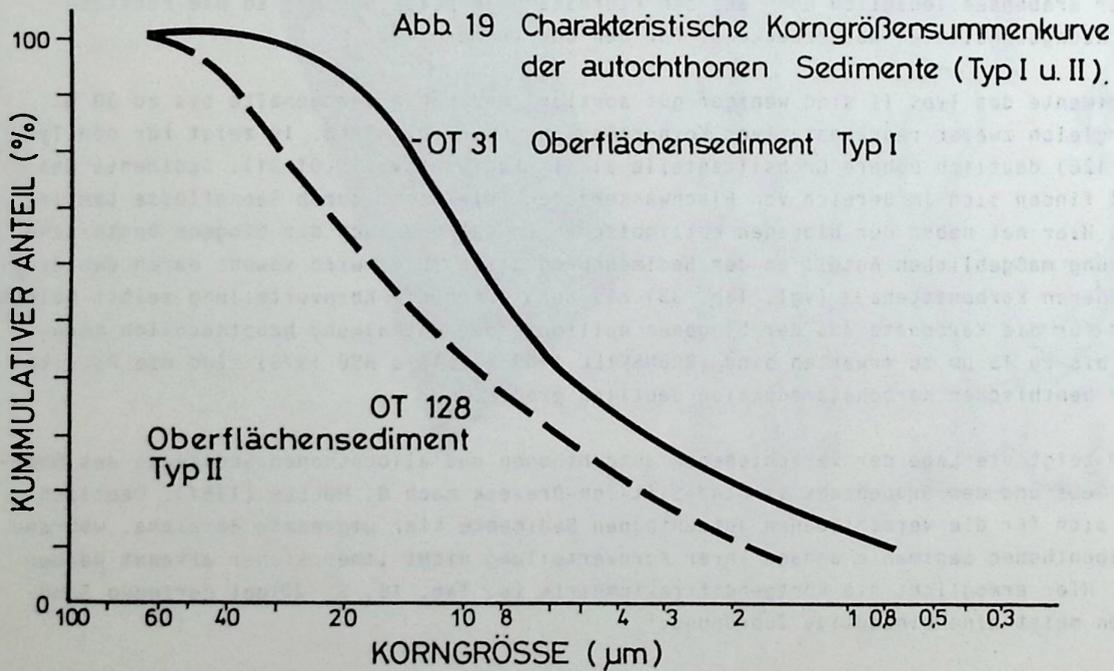
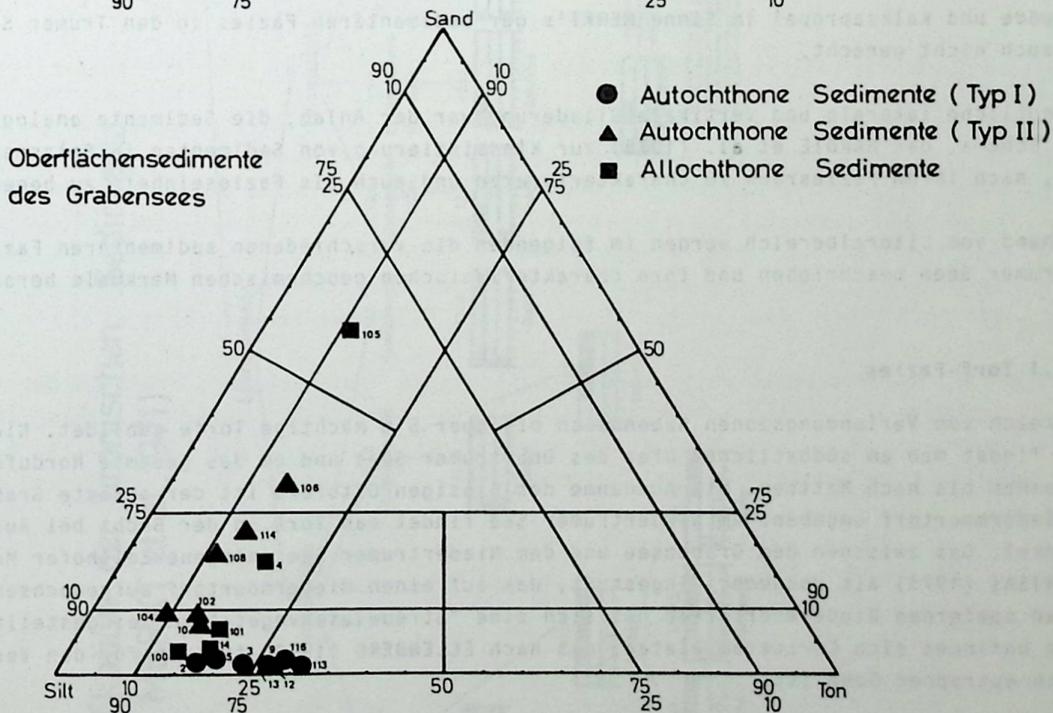
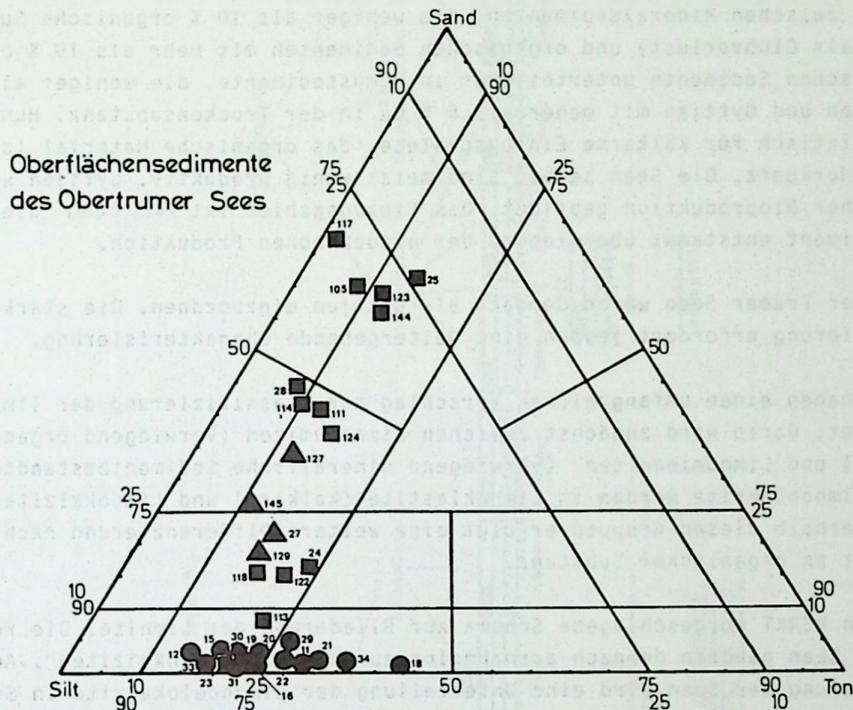


Abb. 20 Lage der Sedimenttypen
im Sand-Silt-Ton-Dreieck



Für limnische Sedimente hat sich leider bis heute noch kein allgemein anwendbares Nomenklaturschema durchsetzen können. Dies liegt sicher daran, daß Seen und damit auch ihre Sedimente eine sehr große Vielfalt aufweisen.

UNGEMACH (1960) untersuchte den Sedimentchemismus von 40 verschiedenen europäischen Seen. Er unterschied dabei zwischen Mineralsedimenten, die weniger als 10 % organische Substanz enthalten (bestimmt als Glühverlust) und organischen Sedimenten mit mehr als 10 % org. Substanz. Die organischen Sedimente unterteilt er in Humussedimente, die weniger als 5 % Ca in der TS enthalten und Gytjen mit mehr als 5 % Ca in der Trockensubstanz. Humussedimente sind charakteristisch für kalkarme Einzugsgebiete, das organische Material ist überwiegend allochthoner Herkunft. Die Seen selbst sind meist wenig produktiv. Gytjen werden hingegen in Seen mit hoher Bioproduktion gebildet. Das Einzugsgebiet ist kalkreich, die organische Substanz im Sediment entstammt überwiegend der autochthonen Produktion.

Die Bodensedimente der Trumer Seen wären demnach als Gytjen einzuordnen. Die starke laterale und vertikale Zonierung erfordert jedoch eine weitergehende Charakterisierung.

MERKT et al. (1971) haben einen umfangreichen Vorschlag zur Klassifizierung der limnischen Sedimente unterbreitet. Darin wird zunächst zwischen Limnohumiten (vorwiegend organische Sedimentbestandteile) und Limnomineriten (vorwiegend mineralische Sedimentbestandteile) unterschieden. Die Limnominerite werden in Limnoklastite (kalkarm) und Limnokalzite (kalkreich) getrennt. Innerhalb dieser Gruppen erfolgt eine weitere Differenzierung nach Korngrößen und dem Gehalt an organischer Substanz.

Abb. 21 zeigt das von MERKT vorgeschlagene Schema zur Gliederung der Limnite. Die rezenten Sedimente der Trumer Seen gehören demnach ausnahmslos zu den "Limnopelokalziten". Aufgrund der starken Eutrophierung der Seen wird eine Unterteilung der Limnopelokalzite in Seekreide, Kalkmudde und Kalksapropel im Sinne MERKT's der sedimentären Fazies in den Trumer Seen jedoch auch nicht gerecht.

Die deutliche laterale und vertikale Gliederung war der Anlaß, die Sedimente analog zu einem Schema, das HARDIE et al. (1978) zur Klassifizierung von Sedimenten in Salzseen anwendeten, nach ihrem Faziesraum zu charakterisieren und auch als Fazieseinheit zu benennen.

Ausgehend vom Litoralbereich werden im folgenden die verschiedenen sedimentären Faziesräume der Trumer Seen beschrieben und ihre charakteristischen geochemischen Merkmale herausgestellt.

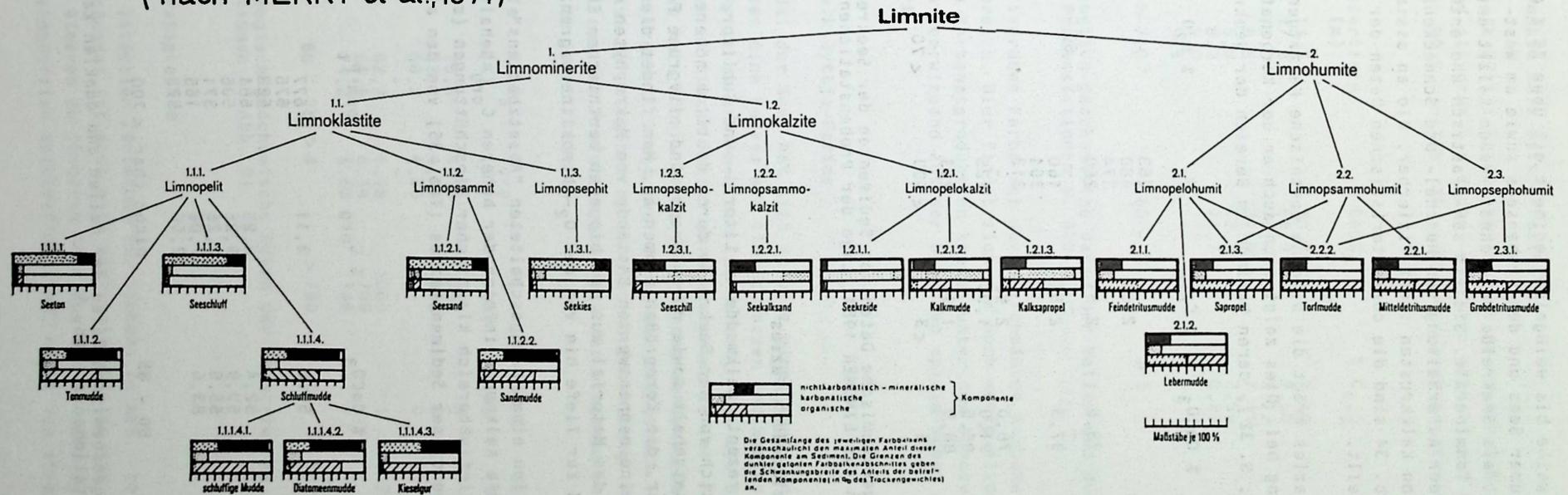
5.1.3.1 Torf-Fazies

Im Bereich von Verlandungszonen haben sich bis über 5 m mächtige Torfe gebildet. Niedermoor-torfe findet man am südöstlichen Ufer des Obertrumer Sees und um das gesamte Nordufer herum von Seeham bis nach Mattsee. Mit Ausnahme des kiesigen Ostufers ist der gesamte Grabensee von Niedermoor-torf umgeben. Am Niedertrumer See findet man Torf in der Bucht bei Aug und bei Seewinkel. Das zwischen dem Grabensee und dem Niedertrumer See gelegene Zellhofer Moor wird von KRISAI (1975) als Hochmoor eingestuft, das auf einen Niedermoor-torf aufgewachsen ist. Auf den seefernen Niedermoor-torfen hat sich eine "Streuwiesenvegetation" eingestellt. Direkt am See befindet sich Caricetum elatae, das nach ELLENBERG (1978) typisch für den Verlandungs-bereich eutropher Seen ist.

5.1.3.2 Seekreide-Fazies

Unter dem Begriff "Seekreide" sind in der Literatur unterschiedliche Vorstellungen von der Sedimentgenese und -beschaffenheit publiziert worden. SCHRÖDER (1981) gibt eine gute Zusammenfassung der wichtigsten Arbeiten, die sich mit "Seekreide" befassen.

Abb. 21 Klassifikation der limnischen Sedimente
(nach MERKT et al., 1971)



In dieser Arbeit wird das weiße bis weißgelbe Sediment mit über 75 % CaCO₃, daß sich rezent nur am Nordufer des Obertrumer Sees und des Grabensees sowie am West- und Nordufer des Niedertrumer Sees befindet, als Seekreide bezeichnet. Neben Kalzit enthält die Seekreide geringe Mengen an C_{org} und Tonminerale. Sie ist zäh-plastisch und enthält makroskopisch erkennbare Bestandteile aus der Aufarbeitung von Muschel- und Schneckenschalen. Unter dem Binokular sind Fragmente von Kalkkrusten identifizierbar, die an assimilierenden Makrophyten abgeschieden wurden. In Tab. 34 sind die charakteristischen Daten der Sedimente aus der Seekreide-Fazies zusammengestellt.

Im Bereich der Seekreide-Fazies trägt die biogene benthische Kalzitgenese bedeutend zur autochthonen Sedimentbildung bei. Dies zeigt sich auch an der Karbonatverteilung in den Oberflächensedimenten (Abb. 14, S. 32), deren Maximum im Bereich der Seekreide-Fazies liegt.

Probe	% Sand	% CaCO ₃	% C _{org}	P _t	% H ₂ O
OT 127	35			263	
OT 128	-		2,05	480	
OT 129	17			374	
OT 144	56	78,8	2,51	260	
OT 63	-	-	-	-	67
GR 106	29	97,3	2,56	160	
GR 114	21			364	
GR 115	-			313	
MTT 10	52	78,0	2,90	-	
MTT 9	38	91,0	1,90	125	
MTT 75	40	85,5	-	-	
MTT 29	46	88,0	1,90	233	
Char.Daten:	> 15	> 75	< 3	< 500	< 70

Tab. 34 Sedimentologisch-geochemische Daten von Sedimenten der Seekreide-Fazies (Proben MTT: Daten aus LINDNER 1984; Lage der Probenstationen s. Abb. 9 u. 10)

5.1.3.3 Helle und dunkle Kalkmudden-Fazies

Wie die Seekreide wird die rezente Kalkmudde im Litoral- und Sublitoralbereich der Seen gebildet. Sie unterscheidet sich von der Seekreide durch deutlich höhere C_{org}- und P_t-Gehalte, durch einen geringen Karbonatgehalt sowie durch braune und olivgrüne Farbtöne. Die Konsistenz dieser Sedimente ist weicher, die Korngrößen nehmen ab. Man findet dieses Sediment heute in den Litoralbereichen, wo keine nennenswerten Bestände von Makrophyten mehr vorkommen. Dem Sediment fehlt weitestgehend das Material aus der biogenen benthischen Entkalkung. Der Fazies-Bereich der Kalkmudden wird zur Tiefe hin von der O₂-Chemokline begrenzt.

Im Grabensee, der die Funktion eines nachgeschalteten "Absetzbeckens" für den Obertrumer und Niedertrumer See hat, ist die Kalkmudde infolge der höheren C_{org}-Gehalte dunkler gefärbt als im Obertrumer See. Im Einflusbereich klastischer Einschüttungen (s. Abb. 18, S.42) werden die charakteristischen Daten dieser Sedimentfazies (Tab. 35) von den allochthonen Komponenten überprägt.

Probe	Wassertiefe (m)	% CaCO ₃	% C _{org}	ppm P _t
OT 107	4,5	56,8	3,11	677
OT 140	5,0			676
OT 37/1	4,0			528
GR 107	6,0	82,4	3,25	681
GR 100	0,5	50,9	9,25	506
GR 101	0,5	55,5	10,25	371
GR 104	1,0	83,6	7,06	165
GR 109	2,0		2,56	573
Char. Daten:	< 7,0	50 - 85	nicht char.	< 700

Tab. 35: Sedimentologisch-geochemische Daten der hellen und dunklen Kalkmudden-Fazies (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

5.1.3.4 Helle und dunkle Kalk-Gyttja-Fazies

Die Sedimente der Kalk-Gyttja-Fazies befinden sich an den Schelfhängen unterhalb der O₂-Chemokline. Sie sind olivgrün bis dunkel-olivgrün gefärbt und bereits fließfähig, der Wassergehalt liegt über 80 %. In Tab. 36 sind die charakteristischen Daten dieser Fazieszone dargestellt.

Probe	Wassertiefe (m)	% CaCO ₃	% C _{org}	ppm P _t
OT 130	11,5	72,7	3,40	923
OT 11	17,0	68,8	3,60	675
OT 146	20,0	70,4	3,72	825
GR 5	8,5	74,9	7,11	1053
GR 14	8,0	72,2	7,59	774
GR 10	8,0	73,7	6,27	600
GR 112	9,0			839
GR 116	9,5			788
Char. Daten:	> 7,0	65 - 75	> 3	> 600

Tab. 36 Sedimentologisch-geochemische Daten der hellen und dunklen Kalkgyttja-Fazies (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Neben der dunkel-olivgrünen Farbe ist der gleichmäßige Karbonatgehalt von 65 - 75 % typisch für diesen Faziesbereich. Hier findet sich nur noch wenig allochthones Material. Auch Anteile aus der benthischen Karbonatproduktion können unter dem Binokular nicht mehr gefunden werden. Die Kalzite stammen überwiegend aus der biogenen epilimnischen Entkalkung, was auch den konst. CaCO₃-Gehalt erklärt.

5.1.3.5 Schwarze Kalk-Gyttja-Fazies

Im tiefsten Profundal der Seen hat sich infolge eines stets vollständigen O₂-Mangels während der Stagnationsphasen eine Fazies mit tiefschwarzen Sedimenten entwickelt, in denen unter dem REM reichlich Pyrit zu erkennen ist (s. Taf. 4, Fig. a). Die C_{org}-Gehalte wie auch die P_t-Gehalte erreichen in dieser Fazies ihre Maximalwerte (mit Ausnahme von Stellen punktueller Einleitungen, wo noch höhere Werte vorgefunden werden). Das schwarze Sediment ist äußerst fließfähig, der Wassergehalt liegt über 90 %. Der Kalkgehalt liegt zwischen 60 und 75 % und stammt vorwiegend aus der biogenen epilimnischen Entkalkung. Allochthone Einträge sowie umgelagertes Material aus dem Produktionsbereich der biogenen benthischen Entkalkung sind unter dem REM nicht mehr zu identifizieren.

Probe	Wassertiefe (m)	CaCO ₃ (%)	C _{org} (%)	P _t (ppm)	Sand (%)	Silt (%)	Ton (%)	H ₂ O (%)
OT 31	24,0	73,6	4,16	742	0	78	22	-
OT 32	30,0	63,2	4,89	983	0	78	22	-
OT 33	26,0	68,2	4,26	-	0	81	19	-
OT 62	34,0	-	-	-	-	-	-	91
GR 12	14,0	62,7	6,95	1000	1	72	27	-
GR 7	13,5	64,6	8,94	786	-	-	-	-
GR 3	12,0	71,2	6,63	745	-	-	-	-
Char. Daten:		60 - 75	> 4	> 700	0 - 1	> 70		

Tab. 37 Sedimentologisch-geochemische Daten der schwarzen Kalkgyttja-Fazies (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

5.1.4 Sedimentstratigraphie

Entsprechend ihrer lateralen Zonierung (s. Schema in Abb. 22 und Legende in Abb. 23) vom Litoral zum Profundal ist auch eine vertikale Abfolge der einzelnen Sedimentfaziesbereiche von älteren zu jüngeren Abfolgen hin ausgebildet. Welche Faziesbereiche in den einzelnen Kernprofilen anzutreffen sind, hängt von ihrer Lage inner-

halb der Seebecken ab. Während Litoralkerne recht eintönig aufgebaut sind, ist in Profundalkernen ein vielfältiger Fazieswechsel zu beobachten. Drei generalisierte Profile (Abb. 24) zeigen die vertikale Faziesabfolge in den Trumer Seen für den Litoral- und Profundalbereich. Die Sedimentdatierungen beruhen auf Pollenanalysen, die im Institut für Limnologie der österreichischen Akademie der Wissenschaften in Mondsee durchgeführt wurden (Univ. Doz. Dr. R. Schmidt, Dr. E. Schultze). Der Wassergehalt und die damit verbundenen Eigenschaften des Sediments (Plastizität) sind im Vertikalprofil nicht mehr mit den Daten der entsprechenden Oberflächenproben identisch.

Die Basis der Sedimente wird von würmeiszeitlichen Moränen gebildet. Es folgen Sedimente der spätglazialen Warventon-Fazies. Hierbei handelt es sich um graue, feinlaminierte (mm-Bereich) Tone (Warventone), die einen ausgeprägten Wechsel zwischen hellen und etwas dunkleren Tönen zeigen (s. Taf. 1, OT 29). Das Material ist äußerst zäh und feinkörnig. Abb. 25 zeigt die Korngrößensummenkurve eines Warventons aus dem Obertrumer See. 40 % des Materials sind kleiner als 0,5 mm. In Tab. 38 sind die charakteristischen Daten dieser Fazieszone zusammengefaßt.

Die spätglazialen Warventone wurden bis etwa 13.000 B.P. im gesamten Becken der Trumer Seen abgelagert. Mit der Entwicklung eines wärmeren und feuchteren Klimas begann die biogen induzierte Karbonatproduktion und ein zunehmender Eintrag von Nährstoffen und allochthonem Material in die Seen.

Probe	CaCO ₃ (%)	C _{org} (%)	P _t (ppm)	Sand (%)	Silt (%)	Ton (%)
OT 15/32	16,4	0,36	491	-	-	-
OT 15/65	-	-	385	-	-	-
OT 29/62	17,7	0,47	495	-	-	-
OT 29/110	16,3	0,44	418	1	25	74
Char. Daten:	< 20	< 0,5	< 500	-	-	> 70

Tab. 38 Sedimentologisch-geochemische Daten der Warventon-Fazies (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

Im Litoralbereich begann die Ablagerung von Seekreide. Im Profundalbereich wurde helle Kalkmudde sedimentiert. Während des Klimaoptimums im Atlantikum nahm die Bioproduktion in den Seen rasch zu, was zu einem Anstieg der C_{org}-Gehalte im Sediment führte. Im Profundal wurde Kalk-Gyttja abgelagert, im Litoralbereich weiterhin Seekreide oder in einzelnen Bereichen auch helle Kalkmudde. Nach dem Atlantikum nahm die Bioproduktion wieder ab, war jedoch deutlich höher als in der Zeit vor dem Atlantikum. Im Profundal wurden nun dunkle Kalkmudden abgelagert, im Litoral Seekreide oder helle Kalkmudden. Im Obertrumer See und im Grabensee wurden ab 1200 B.P. dunkel-olivgrüne bis schwarze Gyttjen abgelagert. Besonders im Grabensee sind diese durch relativ hohe Sandgehalte (~3 %) und durch stark reduzierte Karboaatgehalte (< 40 %) charakterisiert. Aufgrund ihrer dunklen Farbe und der hohen C_{org}- und P_t-Gehalte werden sie dennoch der dunklen Kalk-Gyttja-Fazies zugeordnet. Die Ablagerungen dieser ersten dunklen Gyttja in den Seen war jedoch auf einen relativ kurzen Zeitraum begrenzt. Je nach der seemorphologischen Position der Kerne werden Mächtigkeiten von wenigen cm bis zu 20 cm erreicht.

Im Profundalbereich folgt diesen Sedimenten die Ablagerung einer olivfarbenen Kalkgyttja, im Litoralbereich sind je nach morphologischer und hydromechanischer Position Seekreide sowie helle und dunkle Kalkmudden anzutreffen.

Um etwa 350 B.P. tritt - besonders ausgeprägt am Grabensee - wieder ein bis zu 25 cm mächtiges, dunkel-olivgrünes bis schwarzes Sedimentband in den Profundalkernen auf. Diese Sedimente sind vom Habitus und Stoffbestand denen, die vor 1200 Jahren kurzfristig abgelagert wurden, sehr ähnlich und werden wie diese zur dunklen Kalkgytta-Fazies gerechnet. In Litoralkernen werden mit diesen dunklen Sedimenten korrelierbare dunkle Kalkmudden angetroffen.

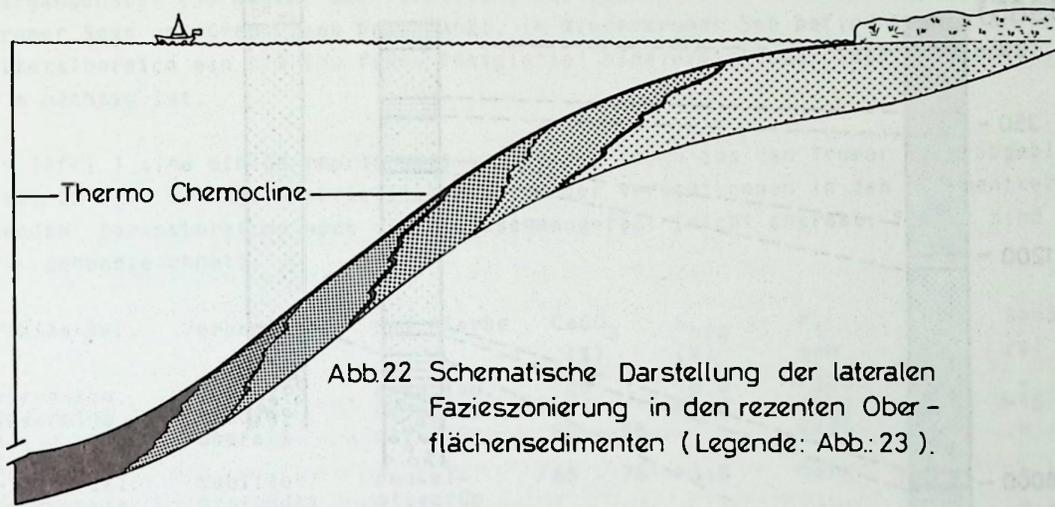


Abb.22 Schematische Darstellung der lateralen Fazieszonierung in den rezenten Oberflächensedimenten (Legende: Abb.: 23).

Abb. 23 Sedimentäre Fazieszonen, Vorlandseen
(Legende zu den Abb.: 22,24, 27,28,29,30,31)

FAZIES - ZONE		SEDIMENTOLOGISCH / GEOCHEMISCH CHARAKTERISTISCHE DATEN							
	Farbe	Verbreitung	%Ca CO ₃	%Corg	ppm P _T	%H ₂ O	%Sand	%Silt	%Ton
	Torf	Supralitoral							
	schwarze Kalkgyttja	Profundal	60 - 75	>4	>700	>90	0 - 1	>70	-
	dunkle Kalkgyttja	Profundal Sublitoral	65 - 75	>3	>600	-	-	-	-
	helle Kalkgyttja								
	dunkle Kalkmudde	Sublitoral Litoral	50 - 85	-	<700	-	-	-	-
	helle Kalkmudde								
	Seekreide	Litoral	>75	<3	<500	<70	>15	-	-
	Warventon	(nur im Profil)	<20	<0,5	<500	-	-	-	>70
	Moräne Basis der limn. Sedimente	(nur im Profil)	-	-	-	-	-	-	-

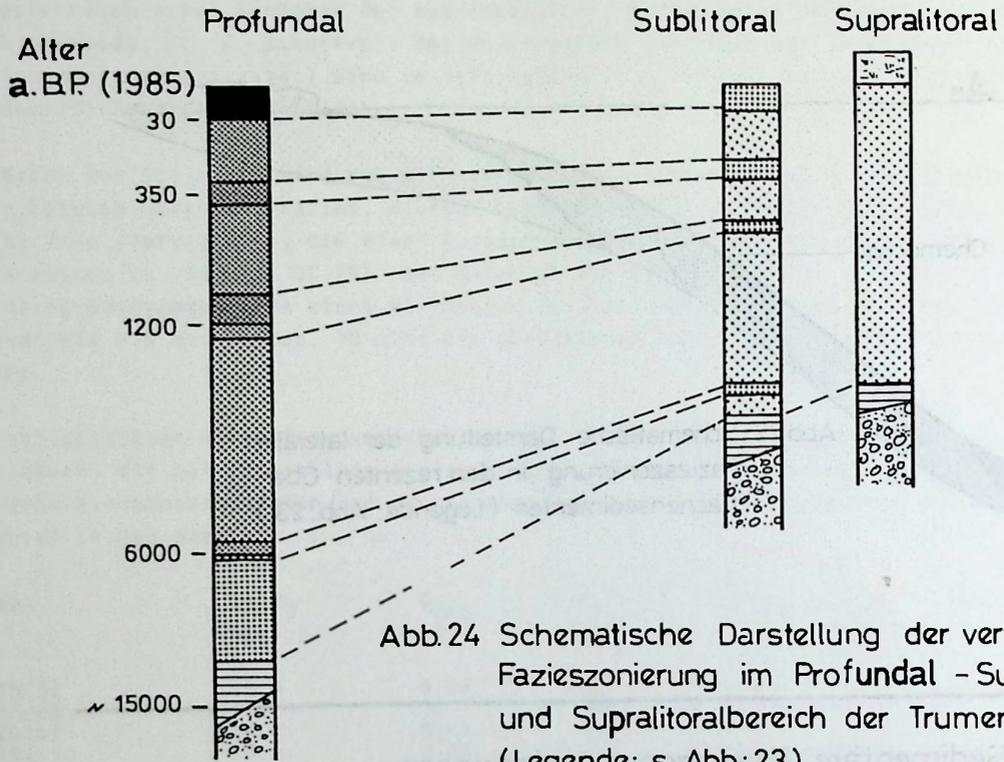


Abb.24 Schematische Darstellung der vertikalen Fazieszonierung im Profundal - Sublitoral- und Supralitoralbereich der Trumer Seen (Legende: s. Abb:23.)

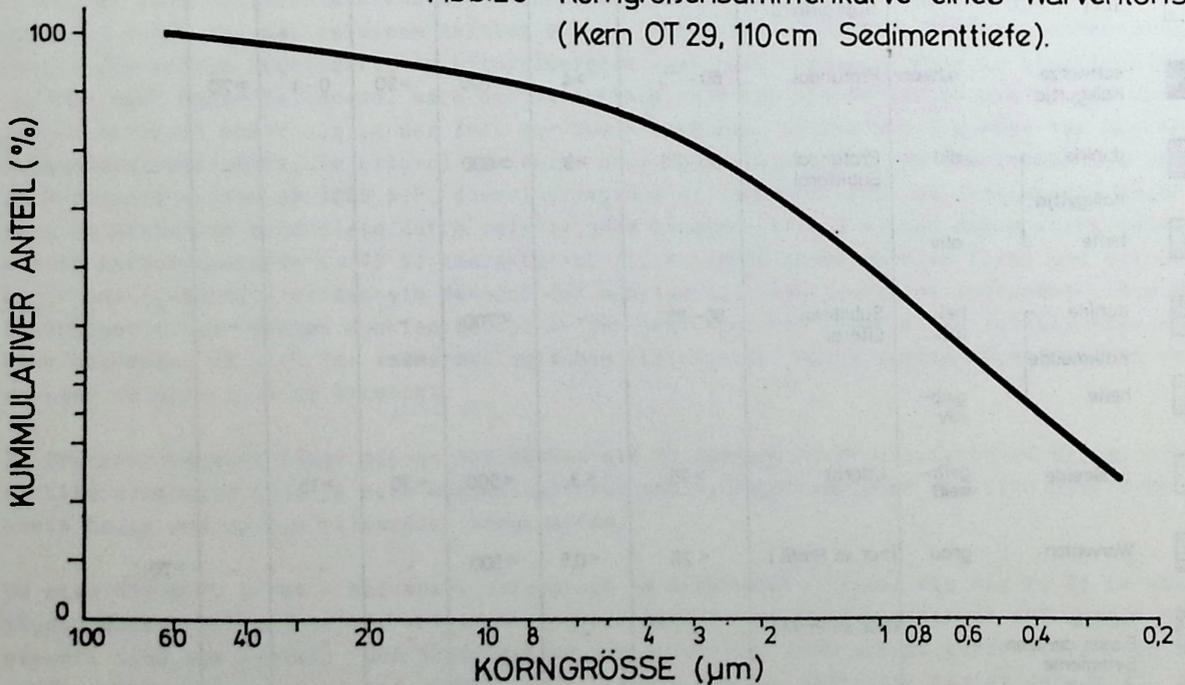


Abb.25 Korngrößensummenkurve eines Warventons (Kern OT 29, 110cm Sedimenttiefe).

Es folgen noch einmal überall im Profundalbereich olivfarbene Kalkgyttjen, während im Litoralbereich die Verteilung der Seekreide immer mehr abnimmt und durch helle und dunkle Kalkmudden ersetzt wird. Die obersten 5 - 25 cm der Kerne aus den tieferen Profundalbereichen (im Obertrumer See ab ca. 20 m Wassertiefe, im Grabensee ab ca. 11 m) werden von tiefschwarzer, dünnflüssiger Kalkgyttja gebildet. Im Litoralbereich wird in der jüngeren Vergangenheit (30 Jahre) die Verteilung der Seekreide auf den nördlichen Bereich des Obertrumer Sees und Grabensees beschränkt, im Niedertrumer See befindet sich am nordwestlichen Litoralbereich ein bis ins frühe Postglazial hineinreichender Seekreidesockel, der über 9 m mächtig ist.

In Tafel 1 sind einige repräsentative Sedimentkerne aus den Trumer Seen abgebildet. In Tab. 39 sind die charakteristischen Daten der verschiedenen in den Sedimentkernen vorkommenden Faziesbereiche noch einmal zusammengefaßt (nicht charakt. Felder sind mit einem "-" gekennzeichnet).

Fazies-Ber.	Verbreitung	Sed.-Farbe	CaCO ₃ (%)	C _{org} (%)	P _t ppm	H ₂ O (%)	Sand (%)	Silt (%)	Ton (%)
Warventon	überall	grau lam.	<20	<0,5	<500	-	-	-	<70
Seekreide	Litoral	weißgelb	>75	<3,0	<500	<70	>15	-	-
hl. u. dkl. Kalkmudde	überall	olivgrün	50 - 85	-	<700	-	-	-	-
hl. u. dkl. Kalkgyttja	Sublitor/ Profundal	dunkel- olivgrün	65 - 75	>3,0	<600	-	-	-	-
schwarze Kalkgyttja	Profundal	schwarz	60 - 75	>4,0	>700	>90	0-1	>70	-

Tab. 39 Zusammenstellung aller charakteristischen Daten der Sedimentfazieszonen, die in den Trumer Seen ausgebildet sind

In den Sedimenten ist die Mächtigkeit der einzelnen Fazieskörper sehr unterschiedlich ausgebildet. Zur Beckenmitte hin nehmen die Mächtigkeiten generell stark zu. Dies ist besonders im Grabensee der Fall, wo z. B. die während des Atlantikums gebildete Kalkgyttja im Kern GR 3 bei 128 cm Sedimenttiefe liegt, während sie im ca. 70 m beckenwärts gelegenen Kern GR 16 bei 550 cm Sedimenttiefe liegt. Heute befinden sich beide Kerne in gleicher Tiefe (12,5 m). Hier ist also in den letzten 6000 Jahren ein Reliefunterschied von 420 cm aufgefüllt worden.

Es ist davon auszugehen, daß durch Reliefunterschiede im eiszeitlichen Untergrund (Moränenwälle etc.) die einzelnen Fazieskörper räumlich sehr differenziert ausgebildet und untereinander verzahnt sind. Der Niedertrumer See wird durch einen Moränenrücken in zwei Becken geteilt. Auf der Schwelle steht in nur 1 m Wassertiefe Moränenmaterial an. Im nordwestlichen Bereich des Obertrumer Sees sind anhand von Kernprofilen und Korngrößenanalysen (OT 15, OT 29, OT 47, OT 48, OT 49, OT 46) Sedimentrutschungen nachweisbar. Hier liegen Hiaten von mehreren Metern Mächtigkeit vor. Verschiedene Fazieskörper liegen daher diskordant übereinander.

5.1.4.1 Sedimentationsraten

Aufgrund der starken Gliederung des basalen Reliefs (Moränenwälle) sind die vorhandenen Sedimentmächtigkeiten in den einzelnen Kernen sehr unterschiedlich entwickelt. Andererseits erlaubt die gute Korrelierbarkeit von verschiedenen Sedimentkernen eine sichere Datierung der einzelnen Sedimentschichten mit nur relativ wenigen Pollenanalysen. Die Grenze Atlantikum/Subboreal sowie die beiden dunklen Sedimentlagen (dunkle Kalk-Gyttja-Fazies) bilden in zahlreichen Kernen sicher erkennbare Zeitmarken von 4700, 1200 und 350 a.B.P. Benutzt man den historischen Wiederanstieg der Baumpollen vor 200 Jahren (Wiederaufforstung) und die Basis der rezenten schwarzen Kalk-Gyttja (akute Seeneutrophierung durch rasanten Anstieg der Phosphatfrachten aus kommunalen Abwässern und aus der Landwirtschaft), so erhält man zwei weitere Altersdaten von 200 und 30 Jahren B. P. (1985). Der Anstieg der Schwermetalle Blei, Zink und Cadmium kann nach MÜLLER (1981) ebenfalls zur Datierung benutzt werden (deutlich ansteigende Deposition seit dem Beginn der Industrialisierung infolge Verbrennung von Steinkohle). Dadurch ergibt sich im Kern OT 32 (Abb. 28) eine weitere Zeitmarke von ca. 150 a.B.P..

Ohne Berücksichtigung der zunehmenden Sedimentkompaktion in größeren Sedimenttiefen ergeben sich für die einzelnen Zeitintervalle in den Kernen OT 32 und GR 3 die in Tab. 40 dargestellten Sedimentationsraten; in Spalte 6 ist der mittlere Wassergehalt der verschiedenen Sedimentlagen in Vol. % angegeben. Die Spalten 9 und 10 geben die korrigierten Sedimentationsraten an. Dabei wurde für alle Sedimentschichten der Wassergehalt rechnerisch eliminiert und die in Spalte 5 angegebenen spez. Gewichte der verschiedenen Sedimente (Trockensubstanz) mit in die Berechnung einbezogen, um zumindest die Verringerung der Porosität und die Dichtezunahme der Trockensubstanz während der Sedimentdiagenese bei der Berechnung der Sedimentationsraten zu berücksichtigen.

Durch die Korrektur ergibt sich die jährliche Sedimentationsrate in mm Trockensubstanz. Dabei zeigt sich zunächst ein deutlicher Anstieg der Sedimentationsraten. In jüngster Zeit nimmt die Sedimentationsrate jedoch offenbar wieder ab. BLOESCH (1974) fand bei der Untersuchung von Sedimentationsraten im Vierwaldstättersee und im Rotsee ebenfalls einen Rückgang der Sedimentationsraten in den jüngsten Sedimenten. Er führte dies auf fröhdiagenetische Rücklösung von Kalzit im anaeroben Milieu zurück, die mit dem Voranschreiten der Eutrophierung zunehmende Bedeutung erlangt.

Wie in Kap. 5.2.3 näher erläutert, wird auch für die Sedimente der Trumer Seen die Rücklösung von Kalzit und Fe-Phasen angenommen. Ohne die beschriebenen Korrekturen fände man eine kontinuierliche Zunahme der Sedimentationsraten seit dem Atlantikum. Die Sedimentationsraten würden generell zu hoch ermittelt und die fröhdiagenetische Abnahme durch Rücklösungsvorgänge überhaupt nicht erkannt.

Zeit a.BP	Mächtigkeit cm		H ₂ O Gew.%		Spez.Gew. g/cm ³	H ₂ O Vol.%		Sedim.-Rate mm/a		Korr.Sedim.-Rate mm TS/a	
	OT 32	GR 3	OT 32	GR 3		OT 32	GR 3	OT 32	GR 3	OT 32	GR 3
0	8	5	85	2,54		93,5		2,7	1,7	0,18	0,11
30	35	20	75	2,54		88,4		2,1	1,1	0,24	0,13
200	25	10	70	2,55		85,6		1,6	0,7	0,23	0,10
350	30	24	60	2,57		79,4		0,4	0,3	0,08	0,06
1200		64	50	2,59		72,1			0,2		0,06
4700											

Tab. 40 Sedimentationsraten in den Kernen OT 32 und GR 3 (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

5.1.4.2 Die Entwicklung des Sedimentationsraumes seit der Würm-Vereisung

Anhand der selbst untersuchten Sedimentkerne aus den Trumer Seen und aus dem Zellhofer Moor (s. Abb. 9, S. 12) sowie anhand von Sedimentprofilen, die KRISAI (1975) aus dem Verlandungsbereich der Seen beschreibt, wurde dessen Rekonstruktion der geschichtlichen Entwicklung der Trumer Seen ergänzt und modifiziert:

Die gegenwärtige Form der drei Trumer Seen entwickelte sich aus einem nacheiszeitlichen Seebecken, das nach dem Rückzug des östlichen Zweiges des Salzachgletschers zurückblieb. Auf einem Sockel von Glazialsedimenten (Würm-Moränen) wurden zunächst überall die fein laminierten Warventone abgelagert. Mittels Peilstangensondierungen wurde die räumliche Verbreitung dieser Warventone von KRISAI (1975) kartiert. Den dazu gehörigen einheitlichen See nannte er "Ältester Trumer See". Mit dem fortschreitenden Abtauen des Salzach-Gletschers kam es zu einer Veränderung der Seentwässerung, als vor ca. 13000 Jahren die Mattig die nördlichen Randmoränenwälle zur Würmvereisung durchschnitt und von da an die Seen nach

Norden hin entwässerten. Begleitet wurde dieser Vorgang (KRISAI, 1975) durch eine Absenkung des Seespiegels um ca. 3 m. Dadurch wurden große Gebiete der Seeflächen trocken gelegt, im Bereich des Zellhofer Moores wurde ein kleiner See abgeschnürt. Den verbleibenden See nennt KRISAI (1975) "Älterer Trumer See". KRISAI's Annahme einer spätglazialen Seespiegelabsenkung konnte durch sedimentologische Untersuchungen an einem Sedimentkern aus dem Zellhofer Moor (ZELL in Abb. 9) bestätigt werden.

Im Bereich des Zellhofer Moores werden die laminierten Warventone von olivfarbener Kalkgyttja überlagert. Nach den Pollenanalysen wurde diese Gyttja bereits während des Bölling/Alleröd-Komplexes abgelagert. Das Fehlen einer Seekreidefazies deutet darauf hin, daß schon im Spätglazial im Bereich des heutigen Zellhofer Moores ein kleiner, flacher See vom "Ältesten Trumer See" isoliert wurde. In diesem flachen Gewässer kam es zu einer erhöhten Bioproduktion und einer für flache Seen zwangsläufigen, natürlichen Eutrophierung. Mit einer weiter ansteigenden Bioproduktion an der Wende Boreal/Atlantikum kam es zur Verlandung und Vermoorung des Zellhofer Sees. Die Kalkgyttja wird entsprechend von Niedermoortorf überlagert, der an seiner Basis ein ^{14}C -Alter von 7340 ± 150 a.B.P. aufweist (SCHMIDT, 1985).

Mit dem Beginn der autochthonen Karbonatproduktion vor ca. 13000 Jahren B.P. begann auch die weitergehende morphologische Differenzierung des nach der Seespiegelabsenkung verbliebenen "Älteren Trumer Sees". Im Litoralbereich bildeten sich lokal mehrere mächtige Seekreide-sockel. Die morphologischen Unebenheiten der Profundalbasis wurden durch die Ablagerung von Kalkmudden und Kalkgyttja ausgeglichen.

Mit dem Rückgang der Temperatur und zunehmenden Niederschlägen entwickelte sich nach dem Atlantikum ein Klima, das die Ausbreitung von Mooren (Zellhofer Moor, Trumer Moos) begünstigt. Durch Verlandungsprozesse differenzierten sich aus dem "Älteren Trumer See" der Grabensee, der Niedertrumer See und der Obertrumer See. In einem Bohrkern vom Nordufer des Grabensees (GRN, Abb. 9) liegt Torf über Seekreide. Für die Basis dieses Torfes gibt KRISAI (1975) ein ^{14}C -Alter von 4240 ± 100 a.B.P. an. Im Trumer Moos liegt über Seekreide ebenfalls Torf, dessen Basis nach KRISAI (1975) ein ^{14}C -Alter von 2730 ± 80 a.B.P. hat.

Mit dem Beginn umfangreicherer menschlicher Aktivitäten im Einzugsbereich der Seen vor ca. 1200 Jahren begann ein zweiter Abschnitt in der Sedimentationsgeschichte der Seen - die Seeneutrophierung. Die Eutrophierungsgeschichte wird im folgenden Kapitel ausführlicher behandelt.

In Abb. 26 ist die Paläogeographie der Trumer Seen dargestellt. Abb. 27 zeigt ein maßstabgetreues Faziesprofil aus dem Profundal des Grabensees zum Nordufer und von dort zum Zellhofer Moor.

5.2 Die Eutrophierung der Vorlandseen

Eine der Aufgaben der vorliegenden Arbeit bestand darin, die historische Entwicklung der Eutrophierung der Vorlandseen anhand von Sedimentuntersuchungen zu rekonstruieren. Dabei sollten auch die Auswirkungen der Eutrophierung auf den Stoffkreislauf Sediment/Wasser - insbesondere bezüglich des Phosphors als "Eutrophierungsmotor" - untersucht werden.

5.2.1 Eutrophierungsanzeiger im Sediment

Die Eutrophierung eines Gewässers zeigt sich zuerst an einem starken Anstieg der Produktion von Planktonbiomasse im Epilimnion und am O_2 -Defizit im Hypolimnion. Infolge des O_2 -Mangels wird die organische Substanz im Wasser und im Sediment nicht mehr vollständig mineralisiert und es kommt zu einer zunehmenden Akkumulation von Planktondetritus bzw. organisch gebundenem Kohlenstoff im Sediment. Dort werden ferner Stoffe angereichert, die an die organische Substanz gebunden sind. Dies gilt besonders für die Ablagennährstoffe Phosphor und Stickstoff sowie für Planktonpigmente, deren Analyse Auskunft über das Artenspektrum des Planktons gibt.

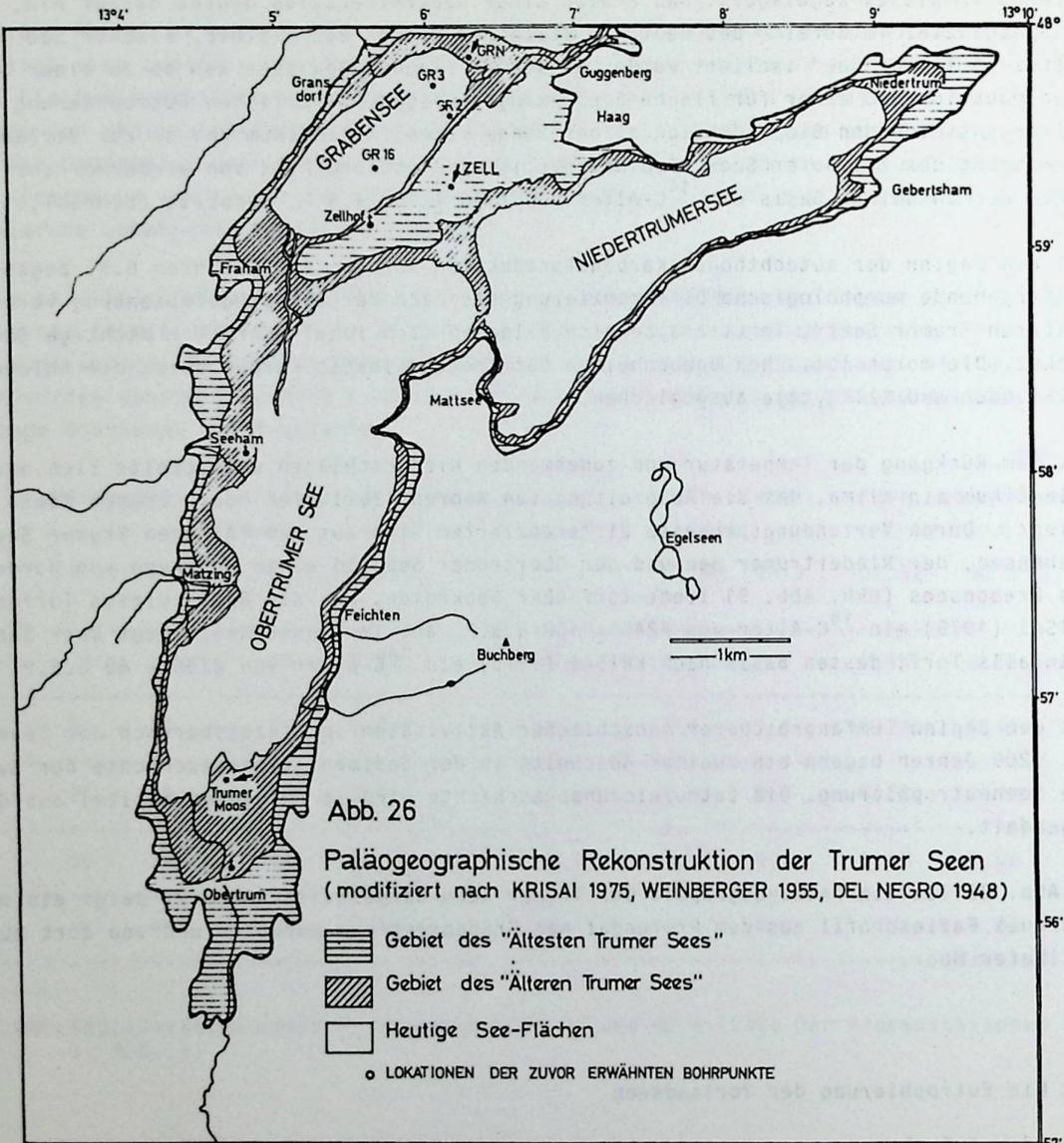


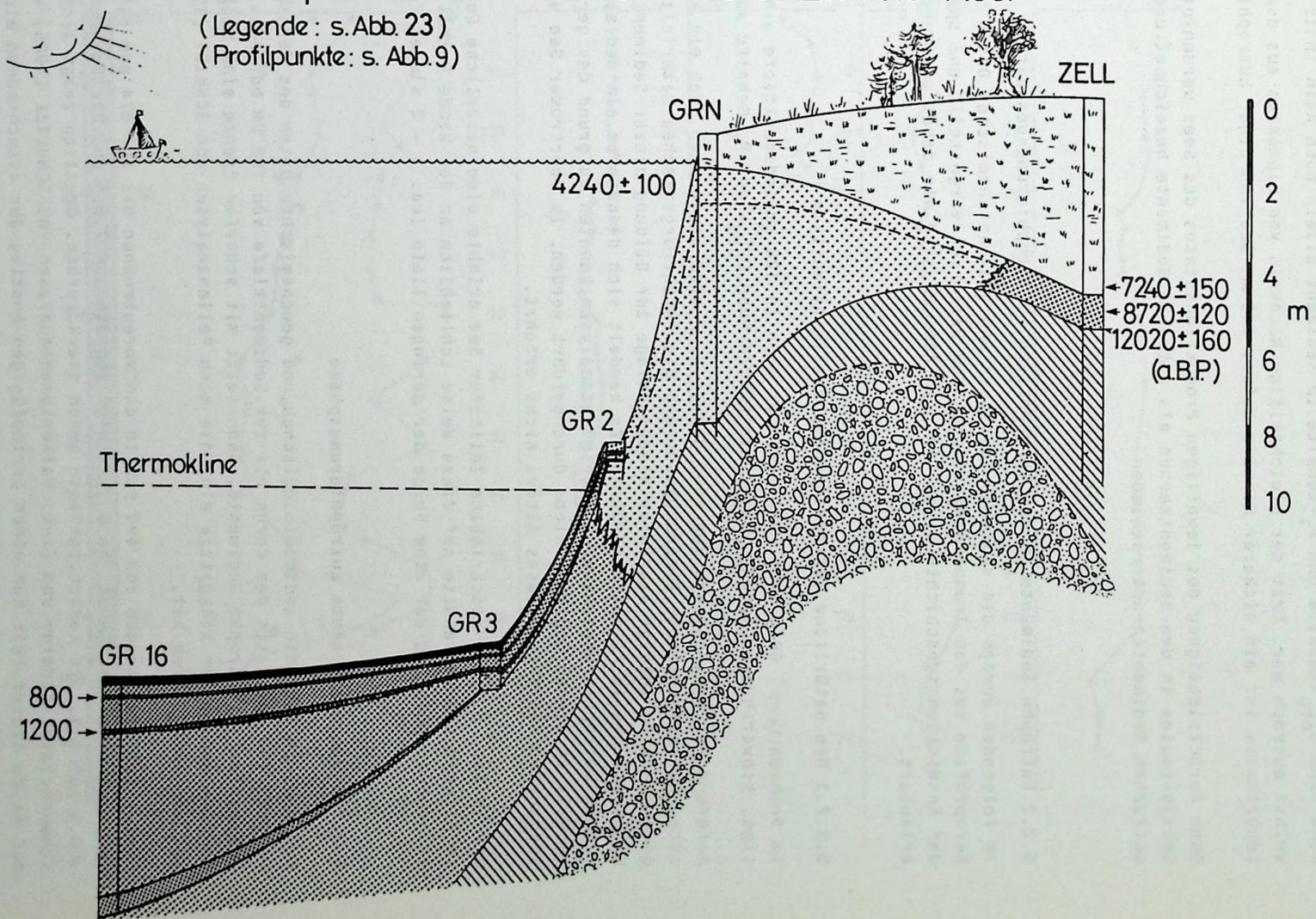
Abb. 26
Paläogeographische Rekonstruktion der Trumer Seen
(modifiziert nach KRISAI 1975, WEINBERGER 1955, DEL NEGRO 1948)

-  Gebiet des "Ältesten Trumer Sees"
-  Gebiet des "Älteren Trumer Sees"
-  Heutige See-Flächen
-  o LOKATIONEN DER ZUVOR ERWÄHNTEN BOHRPUNKTE

Abb. 27 Faziesprofil im Bereich Grabensee - Zellhofer Moor

(Legende: s. Abb. 23)

(Profilpunkte: s. Abb. 9)



Durch die Analyse der genannten Komponenten in datierten Sedimentkernen ist es möglich, die Eutrophierungsgeschichte eines Sees zu rekonstruieren. Die Bestimmung der Planktonpigmente ermöglicht es dabei auch, autochthon produzierte Biomasse von allochthon in den See gelangter zu unterscheiden, die ebenfalls die C_{org} - und P_t -Gehalte erhöht. Daher sind hohe C_{org} -Gehalte und P_t -Gehalte im Sediment allein noch kein Indiz dafür, daß der See selbst eutroph war. Erst der gleichzeitige Nachweis von Pigmenten aus der seeinternen Planktonbiomasse ist ein sicherer Hinweis dafür, daß der See von einer Eutrophierung betroffen war.

Ohne Berücksichtigung des jeweiligen Produktionsstatus des Sees werden die Ablagerungen der Gytjtja-Fazies in den Sedimentkernen als eutrophe Sedimente bezeichnet und von den voreutrophen Sedimenten unterschieden.

5.2.2 Eutrophe Sedimente in den Kernprofilen - Eutrophierungsgeschichte

Im folgenden werden die sedimentologischen und sedimentchemischen Daten verschiedener Kernprofile aus den Trumer Seen und aus dem Wallersee vorgestellt und speziell hinsichtlich der Entwicklungsgeschichte diskutiert. In Abb. 23 sind die dabei verwendeten Signaturen erläutert.

5.2.2.1 Die natürliche Eutrophierungsphase im Atlantikum

Im Profundalkern GR 3 (Abb. 29) befindet sich in 128 cm Sedimenttiefe eine ca. 1 cm mächtige, schwarzbraune Sedimentlage, die extrem hohe C_{org} - und P_t -Gehalte aufweist.

Aufgrund des Pollenalters von 6000 Jahren B. P wird angenommen, daß ein kurzfristiger Anstieg der autochthonen Bioproduktion und die Zufuhr organischen Materials aus den umliegenden Mooren infolge stärkerer Niederschläge zur Bildung dieser Sedimentfolge während des Klimaoptimums im Atlantikum führte. Es handelt sich demnach um ein Sediment einer natürlichen Eutrophierungsphase. Paläopigmentanalysen konnten aufgrund des geringen Probenmaterials an diesem Sediment nicht durchgeführt werden. Im Obertrumer See und Niedertrumer See wurden Sedimente dieses Alters nicht erbohrt.

Der im Kap. 5.1.4.2 beschriebene Zellhofer See erlebte eine natürliche Eutrophierung bereits im Alleröd und verlandete auf diese Weise schließlich an der Wende Boreal/Atlantikum. Diese frühe Eutrophierung war eine Folge der geringen Tiefe (ca. 1 - 2 m) des Zellhofer Sees.

5.2.2.2 Die erste akute Eutrophierungsphase

Aus Abb. 28 sind die sedimentologischen und geochemischen Daten des Kerns OT 32 zu entnehmen. Von der Basis des Kerns bis zur Sedimenttiefe von 108 cm befinden sich gemäß o.g. Definition voreutrophe Sedimente. Dann setzt mit scharfer Grenze eine Wechsellagerung von dunkler und heller Kalkgyttja ein, die nach Pollenanalysen von SCHMIDT (1985) ein Alter von ca. 1200 Jahren hat.

Die P_t -Gehalte steigen von 490 ppm in den voreutrophen bis auf 874 ppm in den eutrophen Sedimenten an; der Gehalt an C_{org} steigt von 3,5 auf 7,6 % an. Der Sandgehalt steigt von <0,1 auf 1 %. Die Karbonatgehalte gehen stark zurück. Deutlich zeigt sich ein Anstieg der Schwermetalle Cadmium und Zink. Paläopigmentanalysen von SCHULTZE (1985) weisen darauf hin, daß es zu dieser Zeit nur einen geringfügigen Anstieg der autochthonen Bioproduktion gab.

In allen Profundalkernen des Obertrumer Sees ist diese charakteristische Wechselfolge von dunkler und heller Kalkgyttja wiederzufinden. Auch in den Profundalkernen des Niedertrumer Sees fand LINDNER (1984) ebenfalls eine ca. 1200 Jahre alte, dunkle Doppellage, die er als "ältere eutrophe Phase" bezeichnete. Diese Lage ist sicher mit der dunklen Wechselfolge im Obertrumer See zu korrelieren. Abb. 30 zeigt die sedimentologisch geochemischen Daten des Profundalkerns MTT 5.

Abb. 28 Sedimentologisch / geochemische Daten des Kerns OT32
(Obertrumer See, Profundal)

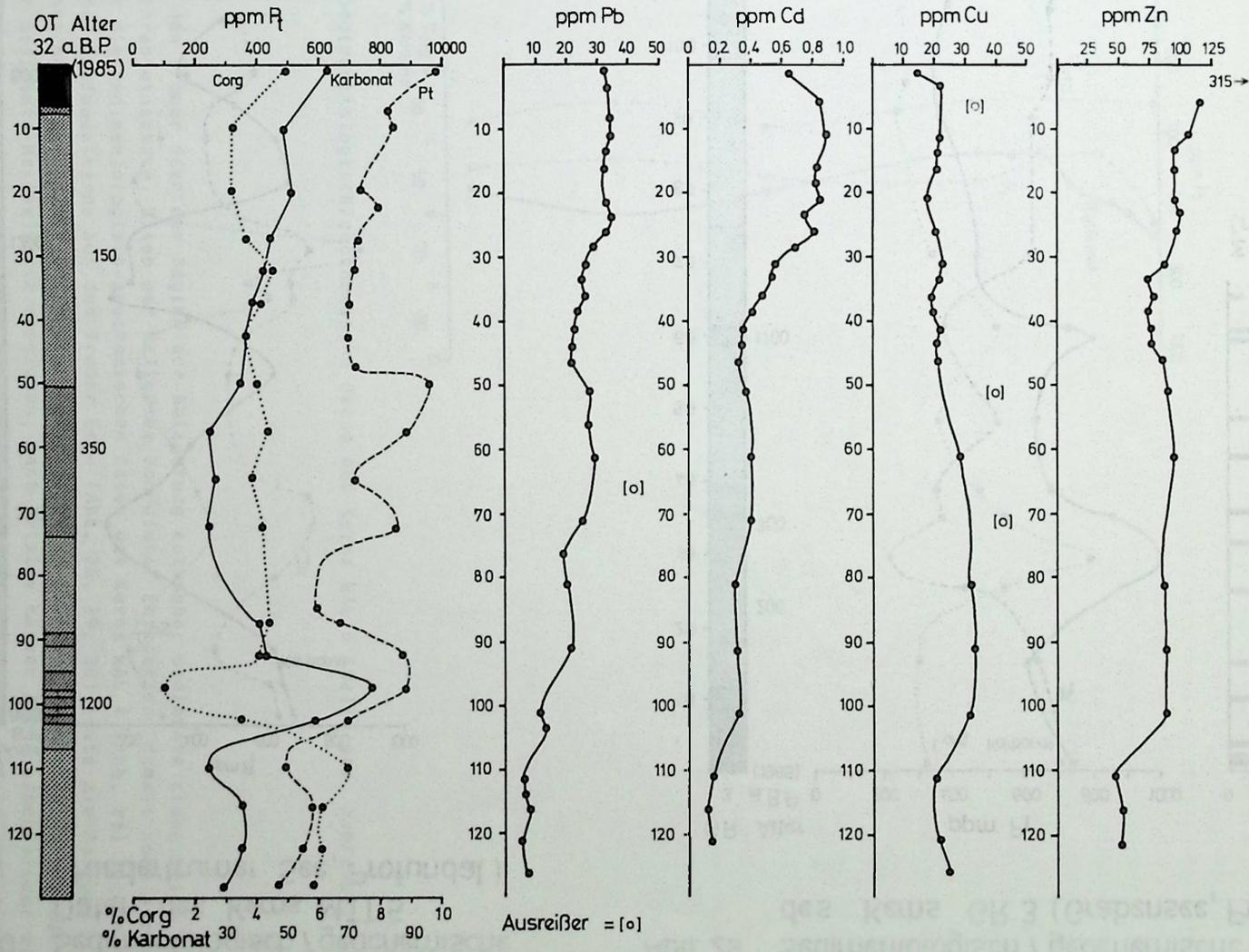


Abb. 30 Sedimentologisch / geochemische Daten des Kerns MTT 5 (Niedertrumer See, Profundal)

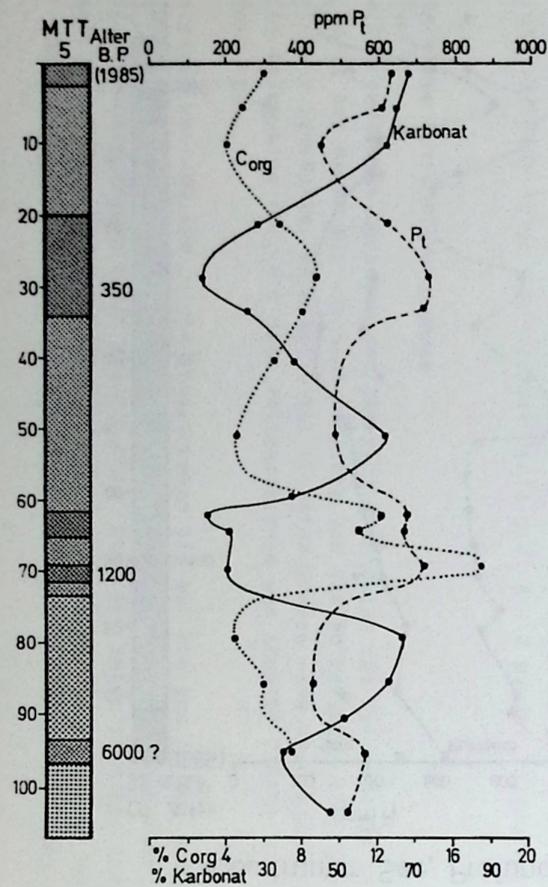
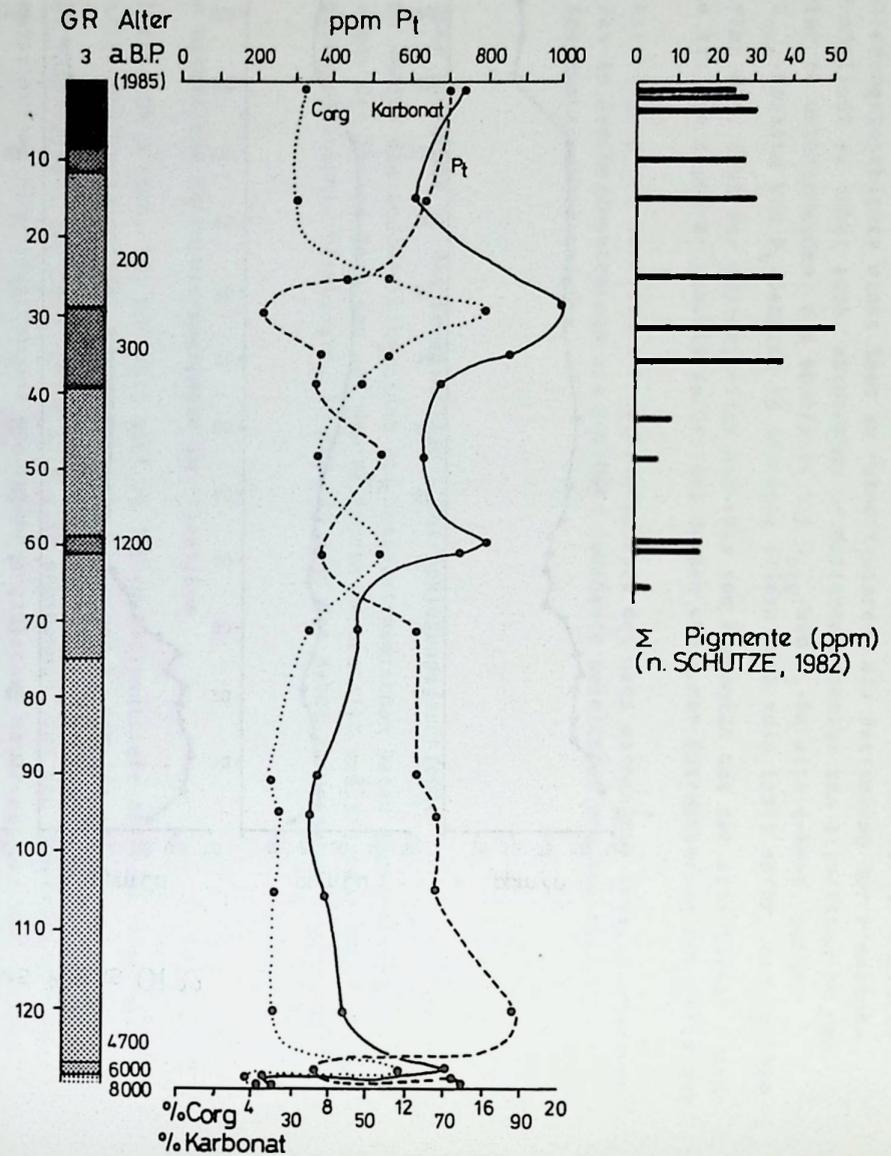


Abb. 29 Sedimentologisch / geochemische Daten des Kerns GR 3 (Grabensee, Profundal)



Besonders ausgeprägt ist das plötzliche Vorkommen eutropher Sedimente in den Profundal- und Sublitoralkernen des Grabensees. Hier liegt jedoch keine Wechsellage vor, sondern ein bis zu 10 cm mächtiges, dünnflüssiges, dunkel-olivgrünes Sediment, das trotz seines auffallend geringen Karbonatgehaltes und seines relativ hohen Sandgehaltes (bis zu 3 %) zur dunklen Kalk-Gyttja-Fazies gerechnet wird. In Abb. 29 sind die sedimentologisch-geochemischen Daten des Profundalkerns GR 3 dargestellt. Die beschriebene eutrophe Lage befindet sich in 60 cm Sedimenttiefe. Mittels Pollenanalysen wurde das Sediment ebenfalls auf 1200 Jahre B.P. datiert (SCHMIDT, 1985).

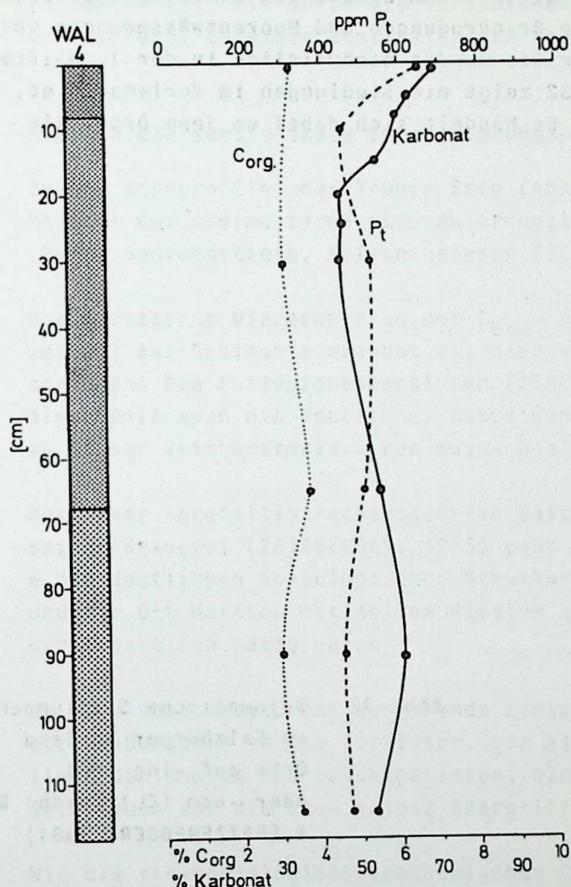


Abb. 31 Sedimentologisch/geochemische Daten des Kerns WAL 5 (Wallersee, Profundal)

Während in den Trumer Seen der Beginn der Ablagerung eutropher Sedimente einheitlich vor ca. 1200 Jahren einsetzte, blieb der Wallersee von dieser Entwicklung damals noch ausgenommen, wie die sedimentologisch-geochemischen Daten des Kerns WAL 4 (Abb. 31) zeigen. Die Daten der Profundalkerne aus den Trumer Seen (Abb. 28, 29, 30) sowie die Färbung des Sediments belegen, daß die Eutrophierungsanzeiger im Sediment zu Beginn der Ablagerung dieser Sedimente Maximalwerte erreichen, nach relativ kurzer Zeit jedoch wieder deutlich abnehmen. Es bleibt aber bei der Sedimentation von Kalk-Gyttjen; die sedimentologisch-geochemischen Gegebenheiten der "voretrophischen Phase" werden in den Trumer Seen nie wieder erreicht. Um das plötzliche Auftreten der eutrophen Sedimente mit ihren geochemischen Extremwerten zu charakterisieren, erscheint es gerechtfertigt, von einem "ersten akuten Eutrophierungsschub" zu sprechen. Dabei muß jedoch betont werden, daß die Pläopigmentanalysen von SCHULTZE (1982) zeigen, daß in Seen die Bioproduktion nur kurzfristig etwas zunahm (s. Abb. 29). Es muß davon ausgegangen werden, daß gelöstes und partikuläres organisches Material von außen relativ rasch in die Seen eingetragen wurde und zur Bildung der ersten eutrophen Sedimente führte. Klimatische Ursachen, wie sie für die eutrophe Sedi-

mentlage während des Atlantikums (nur in den Kernen GR 3, GR 16 und ZELL aufgeschlossen) angenommen werden, kommen für die erste akute Eutrophierung nicht in Betracht, da der nur wenige km entfernt gelegene Wallersee von dieser Eutrophierung ausgenommen ist. Der Beginn der Seeneutrophierung vor 1200 Jahren muß also auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden.

DOPSCH (1981) beschreibt ausführlich die historische Entwicklung im Salzburger Vorland, die ab dem 8. Jahrhundert wesentlich durch die Klostergründungen in Mondsee (748 n. Chr.) und Mattsee (780 n. Chr.) geprägt wurde. Das Gebiet der Trumer Seen ist im Zuge der bajuwarischen Landnahme in den Jahren zwischen 550 und 850 n. Chr. zum Zwecke des Landbaus besiedelt worden. Dazu wurden in lokal unterschiedlichem Maße Brandrodungen und Moorentwässerungen vorgenommen. Die Gräberfelder von Seeham am Obertrumer See wurden nachweislich in der 1. Hälfte des 8. Jahrhunderts angelegt (DOPSCH, 1981). Abb. 32 zeigt die Siedlungen im Vorlandgebiet, die seinerzeit von den Bajuwaren gegründet wurden. Es handelt sich dabei um jene Orte, die auf -ing oder -ham enden.

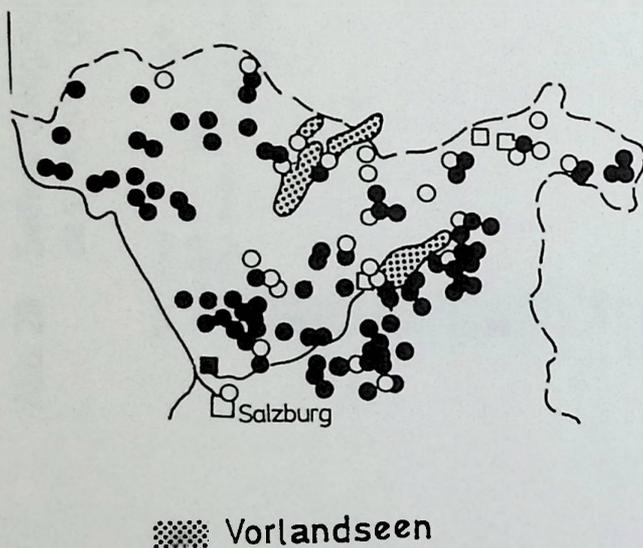


Abb. 32 Bajuwarische Siedlungen im Salzburger Vorland
Orte auf -ing (●)
oder -ham (○) (nach: DOPSCH & SPATZENEGGER, 1981)

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten wird angenommen, daß am westlichen Ufer des Obertrumer Sees und des Grabensees sowie am südlichen Ufer des Niedertrumer Sees Brandrodungen vorgenommen wurden. Die Moore bei Obertrum und zwischen Mattsee und Zellhof sind möglicherweise bereits damals drainiert worden. Durch beide Maßnahmen gelangten große Menge organischen Materials und von Nährstoffen infolge verstärkter Erosion und Oberflächendrainage in die Seen. Der plötzlich stark abnehmende Kalkgehalt und die zunehmenden Sandgehalte in den Sedimenten der ersten akuten Eutrophierungsphase sind ein sicherer Beleg für diese Annahme.

Die Wechsellagerung der eutrophen Sedimente im Obertrumer und Niedertrumer See dokumentiert vermutlich mehrere Besiedlungsphasen im Verlauf einiger Jahrzehnte. Im Sediment des Grabensees, als letztem Glied der Seenkette, sind die Phasen nicht mehr voneinander zu trennen.

Im Einzugsbereich des Wallersees fanden zu jener Zeit offenbar keine oder kaum größere Brandrodungen und Entwässerungen statt. In seinen Sedimenten ist nur ein geringfügiger Anstieg der C_{org} -Gehalte zu erkennen (s. Abb. 31). Der plötzliche allochthone Nährstoff- und Mineraleintrag in die Trumer Seen vor 1200 Jahren kann als Auslöser der bis heute andauernden See-Eutrophierung angesehen werden. Damals wurde der größte Teil der in die Seen gelangten Nährstoffe offenbar noch vom Sediment gepuffert; ein geringer Anteil verblieb jedoch im "kleinen Nährstoffkreislauf" (OHLE, 1956, 1962) zwischen Plankton und Wasserkörper.

Paläopigmentanalysen können zur Rekonstruktion der historischen Planktonentwicklung herangezogen werden und erlauben damit Rückschlüsse auf den Trophiegrad des betreffenden Gewässers (ZÜLLIG 1981, 1982). In Abb. 29 sind diese Analysen für den Kern GR 3 dargestellt. Die autochthone Bioproduktion erreichte demnach um 1200 B.P. ein kurzfristiges Maximum, ging jedoch bald wieder deutlich zurück, um dann langsam immer weiter anzusteigen.

Das dokumentiert den allmählichen Übergang des Sees vom oligo- zum mesotrophen Zustand in der Zeit zwischen 1200 und 350 B.P.. Dieser Zustand ist an den Kalk-Gyttjen zu erkennen, die den ersten akuten Eutrophierungsphasen folgen. Die zunehmenden menschlichen Aktivitäten in dem Gebiet, die durch die verschiedenen Klostergründungen belegt sind, haben demnach in der Folge zu einer kontinuierlich ansteigenden Belastung der Gewässer geführt.

5.2.2.3 Die zweite akute Eutrophierungsphase

In den Kernprofilen der Trumer Seen (Abb. 28, 29, 30) erkennt man deutlich ein zweites Maximum der sedimentären Eutrophierungsanzeiger (C_{org} , P_t) in 75 cm (OT 32) bzw. 30 cm (GR 3) Sedimenttiefe. Pollenanalysen (SCHMIDT, 1985) ergaben ein Alter von ca. 350 a.B.P.

Der plötzliche Wiederanstieg der C_{org} - und P_t -Gehalte sowie der deutlich erkennbare Farbwechsel der Sedimente erlaubt es, hier von einer zweiten akuten Eutrophierungsphase zu sprechen. Die Paläopigmentanalysen (SCHULTZE, 1985) des Kerns GR 3 (Abb. 29) belegen für diese Zeit auch ein deutliches Ansteigen der Planktonbiomasse. Die Seen erreichen demnach zu dieser Zeit erstmals einen meso- bis eutrophen Zustand.

Aus einer sorgfältig recherchierten Beschreibung der Entwicklung des Ortes Obertrum und seiner Brauerei (ZEISBERGER, 1975) geht hervor, daß um 1650 das Gebiet der Trumer Seen einen deutlichen soziologischen Strukturwandel erlebte. Die ständig wachsende Brauerei und der Ort Mattsee mit seinem Kloster zogen immer mehr Menschen an, die vor allem landwirtschaftlich tätig waren.

Es wird angenommen, daß zunehmende Einleitungen von kommunalen und gewerblichen (Brauerei etc.) Abwässern in die Vorfluter, vor allem aber erneute Entwässerungsmaßnahmen in den umliegenden Mooren und Feuchtgebieten, eine zweite akute Eutrophierungsphase auslösten, die jetzt auch auf die Seen selbst übergriff und nicht mehr vom Sediment gepuffert wurde.

Wie die sedimentologisch-geochemischen Daten des Kerns WAL 4 belegen (Abb. 31), wurde der Wallersee mit seinem Einzugsgebiet auch von der zweiten akuten Eutrophierungsphase vor ca. 350 Jahren verschont.

Die Daten aus den Profundalkernen der Trumer Seen zeigen, daß sich die Verhältnisse in den Trumer Seen nach der 2. Eutrophierungsphase wieder stabilisierten. Der Stoffumsatz in den Seen hatte jedoch deutlich zugenommen und erreichte nie wieder sein früheres Niveau, wie die Paläopigmentanalysen belegen (Abb. 29). Der "interne Stoffkreislauf" war im Sinne OHLE's (1956, 1958) energiereicher geworden; durch zunehmende Photosynthese erhielt das System mehr potentielle Energie in Form von organischem Material.

5.2.2.4 Die dritte akute Eutrophierungsphase

Das Auftreten schwarzer Kalk-Gyttjen in den oberen cm der Profundalsedimente dokumentiert die rasante Entwicklung der Eutrophierung in den letzten 40 Jahren, wie sie bereits im Kap. 2 beschrieben wurde. Lange Zeiten totaler Abwesenheit von O_2 im Hypolimnion während der Stagnationsphase bewirkten die verstärkte Bildung von Sulfiden im Sediment und damit dessen tiefschwarze Farbe. Die Eutrophierungsanzeiger im Sediment zeigen in allen Seen - jetzt auch im Wallersee - steigende Tendenz. Daß dabei die Extremwerte vergangener Eutrophierungsschübe nicht erreicht wurden, liegt daran, daß das Sediment an der Oberfläche noch nicht von der Kompaktion betroffen ist und eine hohe Porosität aufweist.

Der Beginn dieser dritten akuten Eutrophierungsphase konnte nicht genau datiert werden. Aus dem Vergleich mit der Entwicklung anderer Seen in Mitteleuropa (VOLLENWEIDER, 1968) und den vorhandenen limnologischen Daten der letzten Jahrzehnte (vgl. Kap. 2) kann jedoch mit einiger Sicherheit gefolgert werden, daß schwarze Kalkgyttjen seit ungefähr 30 Jahren im Profundal des Obertrumer Sees und des Grabensees abgelagert werden. Im Niedertrumer See und im Wallersee ist dies vermutlich erst seit Mitte der 60er Jahre der Fall.

Der verstärkte Eintrag von Pflanzennährstoffen, vor allem Phosphor, in die Gewässer seit dem 2. Weltkrieg hat fast überall in Mitteleuropa zu einer rasch voranschreitenden Gewässer-eutrophierung geführt.

Hauptquellen der Phosphoreinträge sind im allgemeinen: kommunale Abwässer, die in den letzten Jahren zunehmend mit Waschmittelposphaten beladen wurden, die stark angestiegenen Einleitungen gewerblicher Abwässer und überwiegend diffuse Einträge aus der Landwirtschaft.

Alle drei Faktoren sind auch für die bedrohliche Entwicklung der jüngsten Eutrophierungsphase der Vorlandseen verantwortlich. Der stark angestiegene Fremdenverkehr und die rasche Entwicklung der Bevölkerungszahl hat das kommunale Abwasseraufkommen im Einzugsgebiet der Vorlandseen vervielfacht, wobei bis 1982 nur 52 % der kommunalen Abwässer aus dem Einzugsgebiet gebracht und gereinigt wurden (SCHINDLBAUER, 1986). Die Entwicklung des Fremdenverkehrs zeigt sich deutlich an der Anzahl der Übernachtungen, die von 60000 im Jahre 1956 auf 170000 im Jahre 1979 zugenommen hat (JAGSCH & HAIDER, 1982).

Wie bereits im Kap. 2.4 erwähnt, haben 1982 im Einzugsgebiet der Trumer Seen und des Waller-sees noch 8 Käsereien mit einer Gesamtverarbeitungsleistung von über 23 Mio. Litern Milch ihre Abwässer ungeklärt in die Vorfluter geleitet. Die Abwässer der Molkerei Obertrum gelangten bis 1975 ungeklärt in den Obertrumer See (JAGSCH & HAIDER, 1982). Brauereiabwässer enthalten etwa 20 mal soviel Phosphor wie Molkereiabwässer (VOLLENWEIDER, 1968). Allein aus dem Einzugsgebiet des Mattig-Baches (EZG 3 in Abb. 3, S. 4) gelangen nach den Bilanzierungen von SCHINDLBAUER (1986) noch 1,3 t P/a in den Obertrumer See. Dies zeigt sich auch deutlich in der Gesamtphosphorverteilung in den Oberflächensedimenten des Obertrumer Sees (Abb. 16, S. 36). Im südlichen Teil ist das Sediment außerordentlich hoch (über 100 mg/kg TS) mit Phosphor belastet. Vergleichbare Oberflächensedimente am Ostufer des Sees enthalten nur 300 - 600 mg P/kg TS.

Nach den Ergebnissen der Untersuchungen von SCHINDLBAUER (1985) stammten zu Beginn der 80er Jahre 86,7 % (8,5 t) des punktuellen P-Eintrags in die Vorlandseen aus häuslichen Abwässern. Industrielle Abwässer machten lediglich 10,2 % aus. Der diffuse P-Eintrag wurde bei diesen Bilanzierungen nicht berücksichtigt.

Der Verbrauch an Mineraldünger in der österreichischen Landwirtschaft nahm von 1950 bis 1965 um 440 % zu (VOLLENWEIDER, 1968). 1965 betrug der Verbrauch 191,5 kg/ha. Im Bereich des Salzburger Flachgaus stieg der Verbrauch von N-P-K-Dünger von 1950 bis 1980 um 334 % an (SCHINDLBAUER, 1986). Die steigende Anzahl von Betrieben, die fast ausschließlich Tierproduktion betreiben, hat dazu geführt, daß lokal mehr Gülle anfällt, als zur Düngung der landwirtschaftlichen Nutzfläche benötigt wird. Die Aufbringung von Gülle dient nicht mehr der Düngung, sondern wird immer mehr eine Maßnahme der Abfallbeseitigung. So werden die Vorfluter und das Grundwasser zunehmend mit Nährstoffen belastet.

Die Verdichtung der Böden durch schwere Maschinen hat zu einem beschleunigten Abfluß der Oberflächenwässer und verstärkter Bodenerosion geführt. Damit werden aufgebraachte Nährstoffe ausgewaschen und gelangen in immer größeren Mengen in die Vorfluter.

5.2.3 Wirkungen der Eutrophierung im Stoffkreislauf Sediment/Wasser

Die Eutrophierung stehender Gewässer beeinflusst in vielfältiger Weise die organischen und anorganischen Stoffaustausch- und Umwandlungsvorgänge im See selbst sowie auch in seinen Oberflächensedimenten (bis ca. 30 cm Sedimenttiefe). Im folgenden werden einige Auswirkungen der Eutrophierung auf den sedimentären Kreislauf näher betrachtet.

5.2.3.1 Akkumulation und Abbau von organischer Substanz

Aufgrund der anaeroben Verhältnisse, die während der Stagnationsphasen im tieferen Hypolimnion bestehen, wird der zu Boden sinkende und der bereits am Boden befindliche organische Detritus (hauptsächlich Zoo- und Phytoplanktonbiomasse) über anaerobe Stoffwechselfvorgänge mineralisiert.

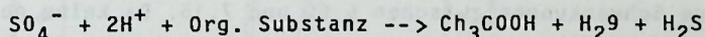
Die Mineralisation des Planktons beginnt bereits unmittelbar nach dem Absterben der Organismen im Epilimnion (OHLE 1962) und ist stark temperaturabhängig. Nach GOLTERMAN (1975) werden 5 - 10 % der Biomasse pro Tag mineralisiert, wobei die höheren Werte für tropische Gewässer gelten. Bei Mineralisationsuntersuchungen mit Sedimentfallen fand OHLE (1962) eine Mineralisationsrate von über 60 % in 24 Stunden.

Diese Werte sind jedoch mit Sicherheit zu hoch und nur durch die unnatürlichen Bedingungen in den Sedimentfallen erzielt worden (GOLTERMAN, 1975).

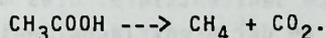
Je nach Tiefe des Sees erreicht der Planktondetritus die Sedimentoberfläche also in unterschiedlichen Stadien der Mineralisation. Deshalb ist der C_{org} -Gehalt der Sedimente in ähnlich produktiven Seen direkt abhängig von der Seetiefe. Dies zeigt sich auch sehr deutlich an den Trumer Seen (Abb. 15, S. 32). Im nur 14 m tiefen Grabensee sind die C_{org} -Gehalte etwa doppelt so hoch wie im 34 m tiefen Obertrumer See. Die Zunahme der C_{org} -Gehalte zur Beckenmitte hin liegt an der Trichterwirkung bei der Sedimentation (OHLE, 1962).

Unter anaeroben Bedingungen erfolgt im tieferen Hypolimnion und im Sediment die Mineralisation des organischen Materials durch heterotroph-anaerobe Bakterien. Dabei werden bedeutende Mengen Methan (CH_4) und CO_2 produziert.

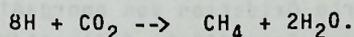
Die Methanbildung erfolgt größtenteils über den Abbau von Essigsäure, die durch säurebildende Bakterien bei der Fermentation von organischem Material entsteht (WETZEL, 1975). Mit der Fermentation geht z. T. die Reduktion von Sulfat einher:



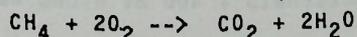
In einem zweiten Schritt wird die Essigsäure durch Methanbakterien abgebaut:



Durch bakterielle Fermentation organischer Substanz entsteht im Sediment Wasserstoff. Dieser wird u.a. von den ausschließlich anaeroben Methanbakterien (Methanobacillus, Methanococcus) zur Reduktion von CO_2 benutzt (HANSELMANN 1984, NEDWELL 1982, STANIER et al. 1976, KEENEY 1973), wobei Methan entsteht:



Die Methanbildung im Sediment und im Hypolimnion erreicht beachtliche Größen. DEUSER et al. (1973) ermittelten im Hypolimnion des Lake Kivu (ostafrik. Riftsystem) einen bakteriell produzierten Methangehalt von 50 km³. In Lake Mendota konnten ALLGEIER et al. (1932) eine Methanproduktion von 2,8 l/m² Sedimentoberfläche in 100 Tagen messen. Das Methan erreicht im Sedimentporenwasser rasch die Übersättigung (GOLTERMAN, 1975) und bildet Gasblasen, die durch das Sediment hindurch ins Hypolimnion und Epilimnion gelangen. Sobald Sauerstoff zur Verfügung steht, wird CH_4 von Methan-oxydierenden Bakterien zu CO_2 und Wasser abgebaut:



Die rapide Abnahme des freien Sauerstoffs im Hypolimnion nach Beginn der Stagnation ist z. B. im Pluß-See (Schleswig Holstein) zu 70 % auf die bakterielle Methanproduktion zurückzuführen (ANAGNOSTIDIS & OVERBECK, 1966).

In den Sedimentkernen der Tafel 1 erkennt man deutlich die zahlreichen Gasporen, die sich in den eutrophen Sedimentlagen des Obertrumer Sees und Grabensees gebildet haben (die Entstehung der großen Gasporen in den Sedimentkernen wird durch die Druckentlastung und Temperaturerhöhung bei der Probenahme verursacht). Infolge des häufigen Aufstiegs von Gasblasen durch das Sediment ins Hypolimnion wird die Ausbildung von laminierten Sedimenten, wie man sie in vielen eutrophen Seen Mitteleuropas findet (z. B. Zürichsee, Baldeggeresee, Mondsee) unterbunden. OHLE (1958) beschreibt sogar das Phänomen der Methankonvektion in einigen hoch-eutrophen Seen infolge CH_4 -Entgasung des Sediments. Durch die Methankonvektion wurden partikuläre und gelöste Stoffe bis ins Epilimnion befördert.

Nach OHLE (1978) wird die Methanbildung durch H_2S und HS^- gehemmt, wenn diese Stoffe nicht unmittelbar nach ihrer Entstehung an Eisen gebunden werden. Die Existenz einer intensiven Methanbildung im Sediment der Trumer Seen (bewiesen durch Gasporen und fehlende Lamination) mag daher ein Hinweis dafür sein, daß H_2S unmittelbar nach seiner Entstehung an Eisen gebunden wird. Das reichliche Vorkommen von Pyrit im Sediment (vgl. Kap. 5.2.3.3) bestätigt diese Annahme.

In den voreutrophen Sedimenten weisen die niedrigen C_{org} -Gehalte darauf hin, daß organisches Material zu dieser Zeit überwiegend aerob abgebaut wurde. Die Mineralisation war aufgrund eines ausreichenden O_2 -Angebots im Hypolimnion bereits weitestgehend abgeschlossen, wenn der Detritus die Sedimentoberfläche erreichte. Zurück bleiben lediglich schwer abbaubare Bestandteile der organischen Substanz.

5.2.3.2 pH- und Redoxverhältnisse

Da zahlreiche chemische und biologische Vorgänge im Sediment bzw. an der Grenzfläche Sediment/Wasser pH- und Eh-abhängig sind, wurden beide Parameter an 5 Kernprofilen aus verschiedenen Wassertiefen in jedem der Vorlandseen gemessen. Die in dieser Arbeit diskutierten Messungen wurden alle am Ende der Sommerstagnation durchgeführt. Die Abb. 33 bis 35 zeigen repräsentative Ergebnisse aus den Seen. Es sind jeweils die Daten für einen Profundal- und einen Kern oberhalb der O_2 -Chemokline dargestellt. Neben den E_h -Profilen sind die gleichen Daten druck- und temperaturunabhängig (s. Methodik, Kap. 3.3.9) in den pH/pE-Stabilitätsfeldern des Eisen- und Mangansystems abgebildet.

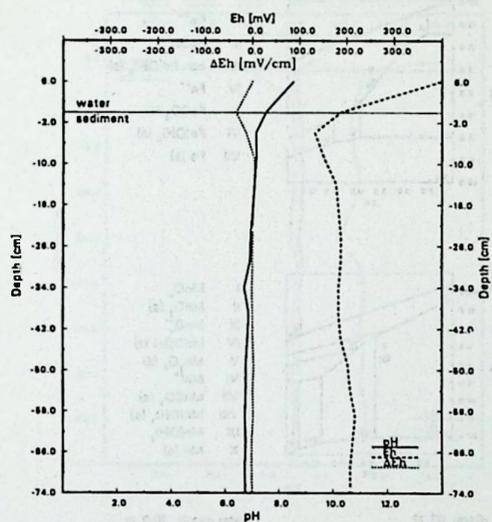
Die pH-Werte zeigen nur geringfügige Schwankungen zwischen 6,60 und 7,15. Da keine genauen Kenntnisse über die Zusammensetzung der Sedimentporenwässer vorliegen, erlauben diese geringen pH-Schwankungen keine Interpretation. Es zeigt sich lediglich, daß die pH-Werte an der Sedimentoberfläche geringfügig höher sind als in einigen cm Sedimenttiefe. Dies mag auf die Wirkung von Bakterienmatten (s. Kap. 5.2.5 und 5.2.6) an der Grenzfläche Sediment/Wasser zurückzuführen sein.

Mehr Informationen über die chemischen Bedingungen im Sediment geben die Messungen des Redoxpotentials (E_h -Werte).

Wenn durch aerobe Abbauvorgänge und meist bakteriell induzierte Oxidation von anorganischen Verbindungen (Fe^{2+} , HS^- , CH_4 etc.) der freie Sauerstoff an der Grenzfläche Sediment/Wasser und im Hypolimnion verbraucht ist, treten Bakterienbiozönosen auf, die andere Elektronenakzeptoren als Sauerstoff für ihre Stoffwechsellätigkeiten benutzen. Im Sediment sind fakultativ anaerobe, heterotrophe Bakterien für die zahlreichen biochemischen Prozesse von entscheidender Bedeutung (JONES, 1982; GOLTERMAN, 1975, 1977; FENCHEL & BLACKBORN, 1979).

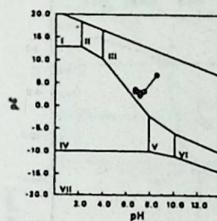
In Abb. 36 sind die E_h -Bereiche der verschiedenen im limnischen System relevanten Elektronenakzeptoren dargestellt (nach JONES, 1982). Demnach ist freier Sauerstoff spätestens ab + 300 mV nicht mehr zu erwarten. Vierwertiges Mangan ist unterhalb + 400 mV nicht mehr

Abb. 33 Niedertrumer See: pH/Eh-Daten und Stabilitätsfelder (pH-pE für Fe und Mn) der Kerne MTT 11 (6,0m) und MTT 13 (42,0m).

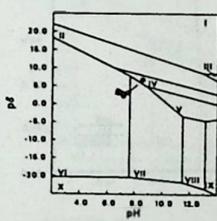


-Core: MTT 11
-Date: 14.9.1982

-Water depth: 6.0 m



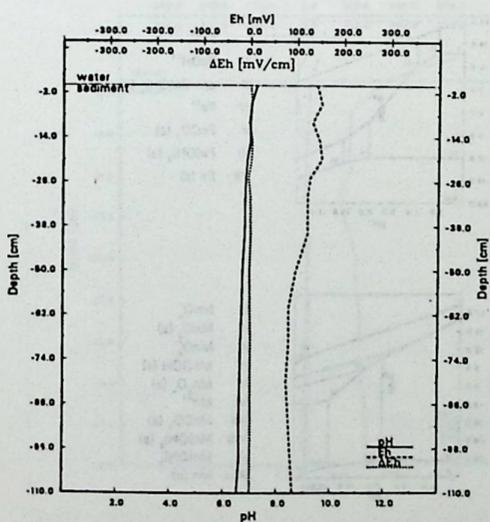
- I Fe^{2+}
- II $FeOH^{2+}$
- III am. $Fe(OH)_3 (s)$
- IV Fe^{3+}
- V $FeCO_3 (s)$
- VI $Fe(OH)_2 (s)$
- VII $Fe (s)$



- I MnO_2
- II $MnO_2 (s)$
- III MnO_2^+
- IV $MnOOH (s)$
- V $Mn_2O_3 (s)$
- VI Mn^{2+}
- VII $MnCO_3 (s)$
- VIII $Mn(OH)_2 (s)$
- IX $Mn(OH)_2^+$
- X $Mn (s)$

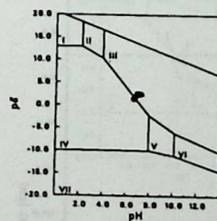
-Core: MTT 11
-Date: 14.9.1982

-Water depth: 6.0 m

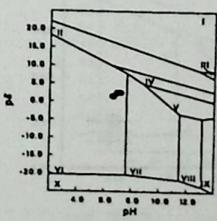


-Core: MTT 13
-Date: 14.9.1982

-Water depth: 42.0 m



- I Fe^{2+}
- II $FeOH^{2+}$
- III am. $Fe(OH)_3 (s)$
- IV Fe^{3+}
- V $FeCO_3 (s)$
- VI $Fe(OH)_2 (s)$
- VII $Fe (s)$

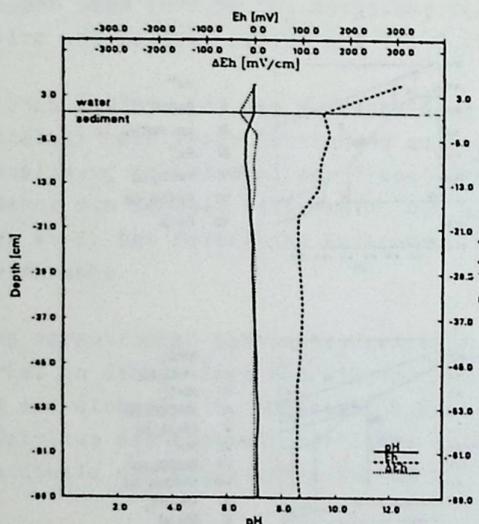


- I MnO_2
- II $MnO_2 (s)$
- III MnO_2^+
- IV $MnOOH (s)$
- V $Mn_2O_3 (s)$
- VI Mn^{2+}
- VII $MnCO_3 (s)$
- VIII $Mn(OH)_2 (s)$
- IX $Mn(OH)_2^+$
- X $Mn (s)$

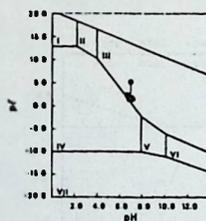
-Core: MTT 13
-Date: 14.9.1982

-Water depth: 42.0 m

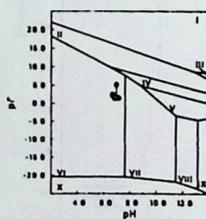
Abb. 34 Obertrumer See: pH / Eh-Daten und Stabilitätsfelder (pH-pE für Fe und Mn) der Kerne OT 12 und OT13 OT12 (10,0m) und OT13 (34,0m)



-Core: OT 12 -Water depth: 10.0 m
-Date: 9.9.1982

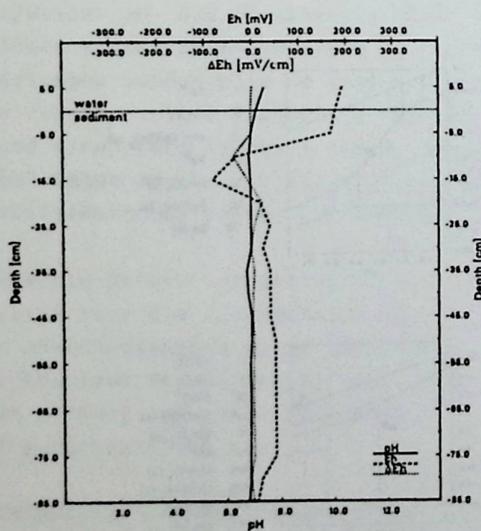


- I Fe³⁺
- II FeOH²⁺
- III em. Fe(OH)₃ (s)
- IV Fe²⁺
- V FeCO₃ (s)
- VI Fe(OH)₂ (s)
- VII Fe (s)

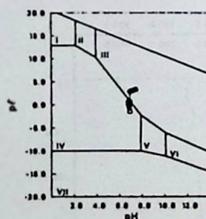


- I MnO₂
- II MnO₂ (s)
- III MnO₄⁻
- IV MnOOH (s)
- V Mn₂O₃ (s)
- VI Mn²⁺
- VII MnCO₃ (s)
- VIII Mn(OH)₂ (s)
- IX Mn(OH)₂
- X Mn (s)

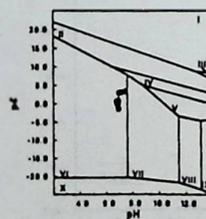
-Core: OT 12 -Water depth: 10.0 m
-Date: 9.9.1982



-Core: OT 13 -Water depth: 34.0 m
-Date: 9.9.82



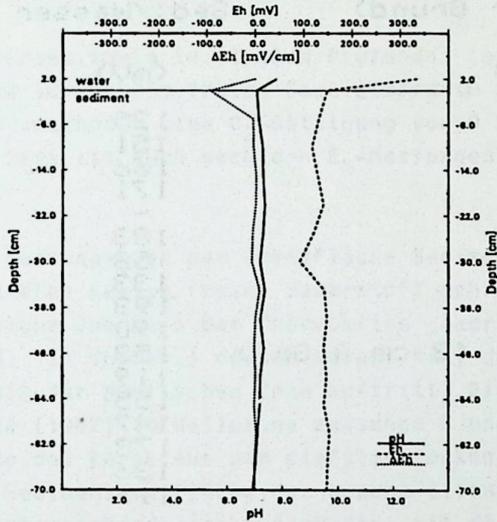
- I Fe³⁺
- II FeOH²⁺
- III em. Fe(OH)₃ (s)
- IV Fe²⁺
- V FeCO₃ (s)
- VI Fe(OH)₂ (s)
- VII Fe (s)



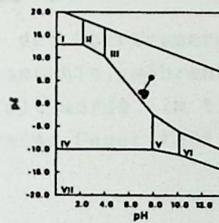
- I MnO₂
- II MnO₂ (s)
- III MnO₄⁻
- IV MnOOH (s)
- V Mn₂O₃ (s)
- VI Mn²⁺
- VII MnCO₃ (s)
- VIII Mn(OH)₂ (s)
- IX Mn(OH)₂
- X Mn (s)

-Core: OT 13 -Water depth: 34.0 m
-Date: 9.9.82

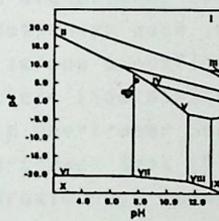
Abb. 35 Wallersee: pH/Eh-Daten und Stabilitätsfelder (pH/pE für Fe und Mn) der Kerne WAL 19 (5,8m) und WAL 14 (16,2m).



-Core: WAL 19
-Date: 18.9.1982
-Water depth: 5.8 m

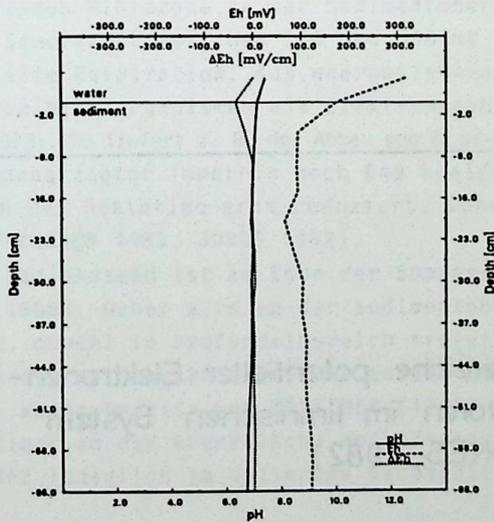


- I Fe²⁺
- II FeOH²⁺
- III am. Fe(OH)₃ (s)
- IV Fe³⁺
- V FeCO₃ (s)
- VI Fe(OH)₂ (s)
- VII Fe (s)

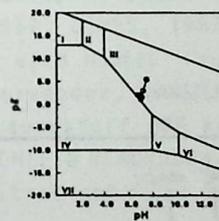


- I MnO₂
- II MnO₂ (s)
- III MnO₄²⁻
- IV MnOOH (s)
- V Mn₂O₃ (s)
- VI Mn²⁺
- VII MnCO₃ (s)
- VIII Mn(OH)₂ (s)
- IX Mn(OH)₃ (s)
- X Mn (s)

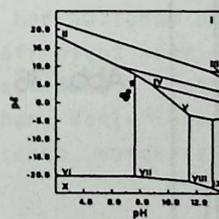
-Core: WAL 19
-Date: 18.9.1982
-Water depth: 5.8 m



-Core: WAL 14
-Date: 18.9.1982
-Water depth: 16.2 m



- I Fe²⁺
- II FeOH²⁺
- III am. Fe(OH)₃ (s)
- IV Fe³⁺
- V FeCO₃ (s)
- VI Fe(OH)₂ (s)
- VII Fe (s)



- I MnO₂
- II MnO₂ (s)
- III MnO₄²⁻
- IV MnOOH (s)
- V Mn₂O₃ (s)
- VI Mn²⁺
- VII MnCO₃ (s)
- VIII Mn(OH)₂ (s)
- IX Mn(OH)₃ (s)
- X Mn (s)

-Core: WAL 14
-Date: 18.9.1982
-Water depth: 16.2 m

stabil, während das braune Eisen-III-Hydroxid noch bis knapp 50 mV existiert. Unterhalb von -100 mV treten Sulfide (MnS , FeS , HS^-) und Methan auf.

In der Tab. 41 sind aus den vier Vorlandseen die E_h -Werte, die im Bodenwasser und an der Grenzfläche Sediment/Wasser am Ende der Sommerstagnation 1982 gemessen wurden, geordnet nach der Wassertiefe dargestellt.

Kern	Wassertiefe (m)	E_h im Bodenwasser (5 cm über Grund) (mV)	E_h an der Grenzfl. Sed./Wasser (mV)
OT 9a	10	305	125
OT 12	10	316	151
OT 15a	10	403	166
OT 11	17	363	171
OT 10	25	338	-
OT 13	34	198	183
OT 7	36	93	58
GR 8	9	-	133
GR 11	13	-	193
MTT 11	6	400	190
MTT 12	16	258 (2 cm ü.Gr.)	153
MTT 1	34	353	119
MTT 13	42	-	155
WAL 19	6	333	147
WAL 14	16	316	173
WAL 13	20	403	136
WAL 15	23	-	113

Tab. 41 E_h -Werte im Bodenwasser und an der Grenzfläche Sediment/ Wasser (Lage der Probenstationen s. Abb. 9, 10, 11)

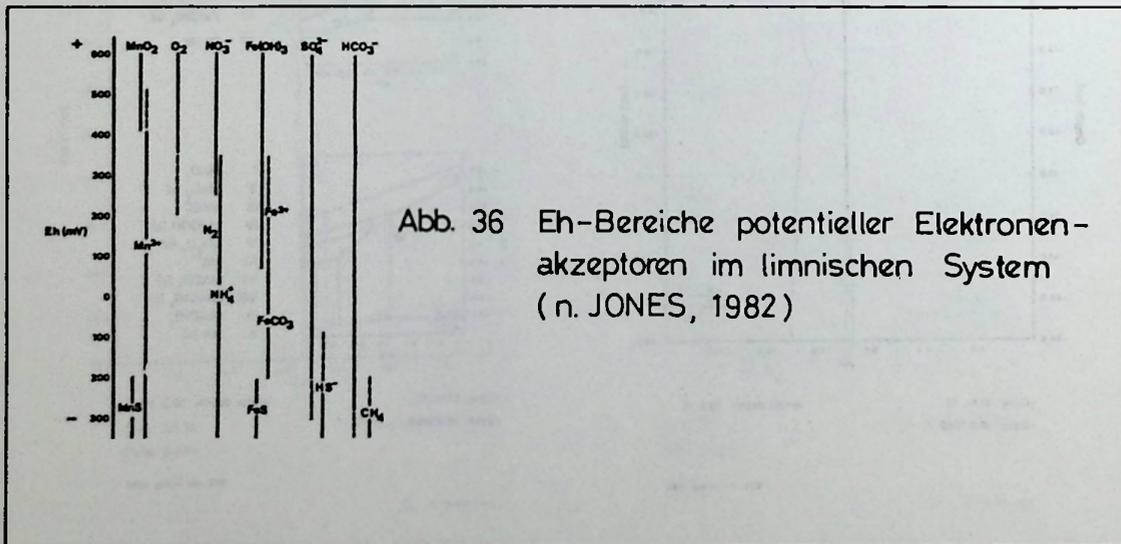


Abb. 36 Eh-Bereiche potentieller Elektronen-akzeptoren im limnischen System (n. JONES, 1982)

In allen Bodenwässern (ca. 5 m über Grund) des Wallerseees und des Niedertrumer Sees, wo die Rodoxmessung technisch möglich war, zeigen sich gerade noch geringe Mengen freien Sauerstoffs. Die E_h -Werte liegen zwischen 300 und 400 mV, was darauf zurückzuführen ist, daß hier nur 2 cm über Grund gemessen werden konnte. Dieser Wert zeigt jedoch, daß zumindest unmittelbar über der Sedimentoberfläche auch in geringen Wassertiefen während der Stagnation kein freier Sauerstoff mehr vorhanden ist.

Die durch die E_h -Messungen angezeigte Gegenwart von freiem Sauerstoff im tiefsten Becken des Niedertrumer Sees korreliert mit direkten O_2 -Messungen (Winkler-Titration und O_2 -Elektrode), die eine O_2 -Sättigung des Bodenwassers von 1 % ergaben (JÄGER, 198).

Im Wallersee sowie im flachen Profundal (bis 25 m) des Obertrumer Sees weisen die E_h -Messungen noch auf Spuren freien Sauerstoffs im Bodenwasser hin, während hier bei direkten Bestimmungsmethoden eine O_2 -Sättigung von 0 % ermittelt wurde. Im tiefsten Profundal des Obertrumer Sees ist auch nach den E_h -Messungen kein freier Sauerstoff mehr im Bodenwasser vorhanden.

Die E_h -Messungen an der Grenzfläche Sediment/Wasser zeigen für alle Seen und für alle Wassertiefen keinen freien Sauerstoff mehr an. Die Grenzfläche Sediment/Wasser ist bis in Bereiche oberhalb der Thermokline anaerob. E_h -Messungen auch im Bereich des Litorals (HELBIG, in Vorber.) deuten darauf hin, daß eine aerobe Grenzfläche Sediment/Wasser erst innerhalb der photischen Zone auftritt. Die Sichttiefe (Secchi-Scheibe) liegt nach JAGSCH & HAIDER (1982) im Wallersee zwischen 3 und 4 m, im Obertrumer See zwischen 2 und 3 m. Mit Ausnahme des Kerns aus dem tiefsten Becken des Obertrumer Sees (OT 7) ist in allen Kernen an der Sedimentoberfläche das braune Eisen-III-Hydroxid noch stabil. Dies erscheint zunächst überraschend, deckt sich aber mit der Beobachtung, daß die Sedimentoberfläche der betreffenden Kerne bei der Probennahme braun gefärbt war.

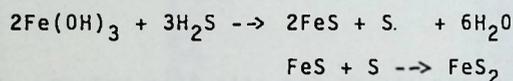
Bereits MORTIMER (1942), GORHAM (1958) und KUSNEZOW (1959) beschreiben die Existenz einer oxidierenden Mikrozone an der Sedimentoberfläche eutropher Seen. Mit dem Verschwinden von freiem Sauerstoff zwischen 350 und 300 mV (MEEK, 1969; JONES, 1982) beginnt die anaerobe bakterielle Respiration. Aus energetischen Gründen wird Nitrat zuerst von den fakultativ anaeroben Mikroorganismen als Elektronenakzeptor verwendet. (HANSELMANN 1984, HAKANSON 1983, KEENEY 1973). So liefert z. B. der Abbau von Glucose mit Sauerstoff 686 kcal/mol, mit Nitrat als Elektronenakzeptor immerhin noch 649 kcal/mol (FENCHEL & BLACKBURN, 1979). Eisen-III-Hydroxid wird von den Bakterien erst reduziert, wenn kein Nitrat mehr zur Verfügung steht (HANSELMANN 1984, HAKANSON 1983, JONES 1982).

In den Vorlandseen ist am Ende der Sommerstagnation noch Nitrat im Hypolimnion nachweisbar (JÄGER 1985). Daher wird an der Sedimentoberfläche befindliches braunes $Fe(OH)_3$ nicht reduziert, obwohl im Profundalbereich freier Sauerstoff nicht mehr vorhanden ist. Die Existenz solch einer oxidierten Mikrozone an der Sedimentoberfläche - trotz Abwesenheit von Sauerstoff - wurde bereits von MORTIMER (1942) beschrieben. Bakterienmatten von Beggiatoa, die unmittelbar an der Grenzfläche aerob/anaerob existieren, wurden am Ende der Sommerstagnation 1982 lediglich im Wallersee beobachtet.

In den Kernen MTT 11, OT 12 und WAL 19 ist durchweg $Fe(OH)_3$ die stabile Phase (s. Stabilitätsfelder, Abb. 33, 34, 35). Im Profundalkern WAL 14 (16,2 m) und MTT 13 (42 m) liegen die darstellenden Punkte des tieferen Sediments im pE-pH Stabilitätsfeld gerade an der Grenze zwischen den Stabilitätsfeldern des $Fe(OH)_3$ und des Fe^{2+} Ions. Lediglich in den tieferen Sedimentschichten aus dem Profundal des Obertrumer Sees (OT 13, Abb. 34) ist Fe^{2+} die einzig stabile Phase im Fe-System. Das Mangan liegt stets reduziert in 2-wertiger Form als Mn^{2+} oder z. T. auch als $MnCO_3$ vor. Nur im Litoralkern MTT 11 (Abb. 33) wurde für das Bodenwasser der Stabilitätsbereich von $MnOOH$ gefunden.

5.2.3.3 Diagenetische Bildung von Sulfiden

Entsprechend der Abb. 36 sollten Sulfide bei den gemessenen E_h -Bedingungen nicht stabil sein und in den Sedimenten nicht vorkommen. Tatsächlich findet man bei der Betrachtung des Sediments unter dem REM jedoch reichlich kugelige Framboide, die aus zahlreichen Einzelkristallen von nur wenigen μm Größe aufgebaut sind (s. Taf. 3, Fig. a u. e; Taf. 4, Fig. a u. c). Die qualitative Analyse mit dem energiedispersiven System zeigt, daß die Framboide überwiegend aus Eisen und Schwefel bestehen (s. Taf. 4, Fig. c, d, e). Aufgrund der typisch kugeligen Ausbildung der Framboide wie sie auch aus dem marinen Milieu bekannt sind und in Anlehnung an Untersuchungen von PSENNER (1983) an Sedimenten des Piburger Sees, wird angenommen, daß es sich bei den Framboiden um Pyrit (FeS_2) handelt. Dieser wird nach Untersuchungen von PYZIK (1976) nicht primär, sondern über Mackinawit (FeS) durch Reaktion mit elementarem Schwefel gebildet, der z. B. von Sulfid oxidierenden Bakterien (z. B. *Beggiatoa*) gebildet wird (NEDWELL 1982, PFENNIG, 1975) oder bei der Eisenreduktion durch H_2S entsteht:



Die Anwesenheit von diagenetisch gebildeten Pyritframboiden ist ein klarer Beweis dafür, daß E_h -Werte von - 200 mV und weniger im Sediment vorhanden sein müssen. Diese Bedingungen werden jedoch vermutlich nur im Mikromilieu von dissimilierenden Mikroorganismen durch die Bildung von H_2S erreicht und sind daher mit den verwendeten Elektroden (s. Kap. 3.3.9) nicht meßbar. Das Vorkommen von Pyritframboiden in Litoralsedimenten deutet auf die Existenz stark reduzierender Mikromilieus selbst in aeroben Faziesräumen hin. JØRGENSEN (1977) beschreibt bakterielle Sulfatreduktion und die damit verbundene Ausbildung stark reduzierender Mikromilieus innerhalb aerober mariner Sedimente. PSENNER (1983) führt die Pyritbildung in Litoralsedimenten des Piburger Sees ebenfalls auf reduzierende Mikromilieus zurück. In den Profundalsedimenten konnte er hingegen E_h -Werte im Stabilitätsfeld von Eisensulfiden messen.

Es zeigt sich also, daß die durchgeführten E_h -Messungen an den verschiedenen Sedimentkernen gute Interpretationsmöglichkeiten bezüglich der Verfügbarkeit freien Sauerstoffs und der Anwesenheit von schwer löslichem Eisen-III-Hydroxid bieten. Im anoxischen Milieu ist die Anwesenheit von Eisen-III-Hydroxid ein sicherer Hinweis auf eine ausreichende Versorgung mit Nitrat, die die Reduktion von Eisen verhindert. Die Sulfidbildung findet in Mikromilieus statt und wird mit der verwendeten Meßmethodik nicht erfaßt. Dies dürfte vielleicht bei Verwendung von pH/ E_h -Mikroelektroden gelingen.

5.2.3.4 Anreicherung von Schwermetallen im eutrophen Sediment

Am Sedimentkern OT 32 wurde ein Tiefenprofil der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer und Zink gemessen (s. Abb. 28, S. 59 und Tab. 32, S. 39). Beim Kupfer zeigen sich nur schlecht interpretierbare Veränderungen innerhalb des Kernprofils, während die Konzentration der anderen Metalle gut mit den C_{org} - und P_t -Werten korrelierbar sind.

Es kann davon ausgegangen werden, daß erhöhte anthropogene Schwermetalleinträge erst mit dem Beginn der industriellen Entwicklung vor ca. 150 Jahren erfolgten (MÜLLER 1981). Bis dahin sind Schwermetallanreicherungen im Sediment ausschließlich eine Folge von Veränderungen im Sedimentchemismus (z. B. verstärkte Fixierung unter anaeroben Bedingungen).

SIGG et al. (1982) heben die Bedeutung organischer Partikel für die Bindung von Schwermetallen im limnischen System hervor. Die biogene Elimination von Schwermetallen aus dem Wasser ist in Seen 10 - 100 mal effektiver als im Ozean, wodurch es zur bevorzugten Akkumulation von Schwermetallen in limnischen Sedimenten, besonders in eutrophen Seen, kommt. Nach Untersuchungen der genannten Autoren an Sedimenten des Bodensees war dort der Schwermetallgehalt im Sediment ebenfalls klar mit den C_{org} - und vor allem mit den P_t -Gehalten korrelier-

bar. Wenn dem See zunehmend Phosphor zugeführt wird, kommt es zur intensiven Produktion von Plankton und damit zu einer verstärkten Elimination von Schwermetallen. Genau dieser Effekt zeigt sich in der Entwicklung der Schwermetallgehalte im Kernprofil des Obertrumer Sees von den voreutrophen Sedimenten bis zur Zeit nach der zweiten akuten Eutrophierungsphase.

Erst ab einer Sedimenttiefe von 25 cm ist ein auffallend kontinuierlicher Anstieg der Schwermetallgehalte zur Sedimentoberfläche hin zu beobachten. Dies wird in erster Linie auf die Zunahme der anthropogenen Einträge aus der Atmosphäre durch die Verbrennung von Steinkohle seit dem Beginn der Industrialisierung in Europa vor ca. 150 Jahren zurückgeführt (MÜLLER 1981).

Bei Cadmium und Kupfer zeigt sich auch der von MÜLLER (1981) beschriebene Effekt, daß die Schwermetallgehalte in den jüngsten Sedimenten wieder abnehmen, weil der Verbrauch von Steinkohle wieder rückläufig ist. Bei Zink und Blei zeichnet sich dieser Trend noch nicht ab. Sie gelangen allerdings auch noch in erhöhtem Maße durch kommunale Abwässer in die Seen. Zahlreiche Kosmetika bestehen aus einer Grundmasse von Zinkoxid (ZnO). Vor einigen Jahrzehnten wurden noch häufig Wasserrohre aus Blei verlegt.

In Tab. 42 sind die Anreicherungsdaten der untersuchten Schwermetalle dargestellt. Dabei wurden die voreutrophen Sedimente (älter als 1200 Jahre) als "background" mit den eutrophen Sedimenten verglichen und daraus der Anreicherungsfaktor berechnet. Zum Vergleich sind die Anreicherungsfaktoren der entsprechenden Metalle im Sediment des oligotrophen Attersees dargestellt (n. MÜLLER et al. 1983). Blei und Zink sind im Sediment des eutrophen Obertrumer Sees gegenüber dem "natürlichen background" deutlich höher angereichert als im Sediment des oligotrophen Attersees. Cadmium ist im Sediment des Obertrumer Sees weniger angereichert als im Attersee. Es wird angenommen, daß Rücklösungsvorgänge in den eutrophen Sedimenten dafür verantwortlich sind.

	Pb	Cd	Zn	Cu
SM-Konz. in rez. Sedimenten	33	0,76	214	24
SM-Konz. in voreutroph. Sed.	8	0,15	51	23
Anreicherungsfaktor	4,13	5,03	4,20	1,03
Anreicherung im olig. Attersee	1,95	5,59	3,08	1,34

Tab. 42 Anreicherung von Schwermetallen in den eutrophen Sedimenten des Obertrumer Sees

6.2.3.5 Diagenetische Karbonatlösung

Bei der Untersuchung der Korngrößenverteilung in den verschiedenen Sedimentkernen fiel auf, daß der Siltgehalt in den voreutrophen Kalkmudden bei 55 - 65 % liegt, während er in den eutrophen Sedimenten von 65 - 70 % an der Basis bis auf über 75 % in den rezenten Ablagerungen zunimmt (s. Tab. 14 und 15). Tab. 43 zeigt die Entwicklung der Siltfraktionen 63 - 20 µm und 20 - 10 µm im Laufe der Seeneutrophierung.

Im Rahmen ausführlicher experimenteller Untersuchungen fand KUNZ (1983), KUNZ & STUMM (1984), daß die Korngröße der Kalzitkristalle aus der biogenen epilimnischen Entkalkung mit der CaCO₃-Übersättigung steigt. Ferner konnte er zeigen, daß die Bildung von Kalzit erheblich durch die Anwesenheit von Phosphationen in der Lösung behindert wird. Mit zunehmender Gewässereutrophierung wird demnach die Kalzitbildung verstärkt verzögert. Erst wenn am Höhepunkt der Planktonentwicklung die PO₄³⁻-Gehalte drastisch reduziert werden, kommt es zu einer Ausfällung von Kalziten. Aufgrund der hohen CaCO₃-Übersättigung des Epilimnions zu diesem Zeitpunkt erreichen die Kristalle dann eine Größe bis zu 40 µm (STURM, 1985) und unterscheiden sich damit deutlich von den ca. 10 - 20 µm großen Kristallen, die gebildet wurden, als das Epilimnion aufgrund geringer Phosphatgehalte keine so hohe CaCO₃-Übersättigung erreichte.

Probe	Sediment	Silt 63 - 20 µm	Silt 20 - 10 µm
OT 32/116	voreutroph. Sed.	0 %	5 %
OT 32/ 97	erstes eutr. Sed.	1 %	7 %
OT 31/ 55	zweit. eutr. Sed.	3 %	5 %
OT 33/ 35	zweit. eutr. Sed.	4 %	9 %
OT 32/ 1	rezentes Sediment	10 %	27 %

Tab. 43 Entwicklung der Kornvergrößerung in der Siltfraktion (Lage der Probenstationen s. Abb. 9)

An den eutrophen Sedimenten des Baldegger Sees (Schweizer Mittelland) konnten NIESSEN & STURM (1984) ebenfalls eine Zunahme der Korngrößen in jungen Ablagerungen nachweisen. Der Beginn der Korngrößenzunahme von Kalziten im Baldegger See stimmt mit dem Beginn des Nährstoffanstiegs sowie der Zunahme von Planktonpigmenten im Sediment überein.

Auch am Sediment der Trumer Seen erkennt man deutlich eine Kornvergrößerung in der Siltfraktion seit dem Beginn der Eutrophierung vor 1200 Jahren. Die Abb. 37 zeigt die Veränderungen in den Korngrößensummenkurven eines Sedimentprofils.

Die Zunahme der Korngrößen in den eutrophen Sedimenten der Vorlandseen wird offenbar jedoch durch zwei sich überlagernde Phänomene bewirkt:

1. Die beschriebene Wachstumskinetik der Kalzitkristalle im eutrophen Milieu bewirkt eine zunehmende Kornvergrößerung zur Sedimentoberfläche hin.
2. Durch den bakteriellen Abbau der organischen Substanz kommt es im Sediment zur Bildung organischer Säuren (z. B. CH_3COOH) und von CO_2 . Dadurch wird zumindest im Mikromilieu eine pH-Absenkung erreicht, die die Rücklösung von Kalzit erwarten läßt. Mit zunehmendem Alter der eutrophen Sedimente macht sich die Rücklösung immer mehr bemerkbar, weil sich die Kristalle dann schon relativ lange im sauren Mikromilieu befinden. So entsteht eine fortschreitende Kornverkleinerung mit zunehmender Sedimenttiefe.

STAUB (1981) konnte im Sedimentporenwasser (bis 40 cm Sedimenttiefe) des Vierwaldstättersees eine annähernd lineare Zunahme der Ca^{2+} -Konzentration messen. Für die älteren Ablagerungen errechnete er, daß ca. 15 % der jeweiligen Jahresproduktion an Kalzit rückgelöst waren. Bei den jüngeren Sedimenten waren es 5 %.

BLOESCH (1974) führt die Abnahme von Sedimentationsraten in den jüngeren Sedimenten des Vierwaldstättersees und des Rotsees auf die Rücklösung von Kalzit im Sediment und während der Sedimentation durch den Wasserkörper des Hypolimnions zurück.

DAVAUD (1976) untersuchte die Kalzitkristalle in einem Sedimentprofil des Morat-Sees (West-Schweiz). An der Sedimentoberfläche betrug die durchschnittliche Größe der Kristalle 16 µm, während sie in 150 cm Sedimenttiefe nur noch 2 µm betrug. Er führte dieses Phänomen auf eine kontinuierliche Korrosion von Kalzit seit der Sedimentation zurück.

KELTS & HSÜ (1978) beschreiben die Rücklösung von Kalzit im eutrophen Sediment des Zürichsees. WEBER (1981) ermittelte in den Sedimenten des Greifensees nur eine sehr geringe Rücklösung von Karbonat.

NIESSEN & STURM (1984) schließen hingegen eine nennenswerte Rücklösung von Kalzit im Sediment des Baldegger Sees aus.

Um die Frage der Kalzitrücklösung in den Sedimenten der Trumer Seen näher zu untersuchen, wurden Sedimentproben aus verschiedenen Tiefen des Profundalkerns OT 62 nach Entfernung der organischen Substanz mittels Ultraschall und Zentrifuge (s. Kap. 3.3.10) unter dem REM betrachtet.

Die Kalzitkristalle zeigen das für limnische Sedimente typische heterogene, polynukleare Wachstumsbild (KUNZ & STUMM, 1984; STUMM, 1981). Nach KUNZ & STUMM (1984) erfolgt die

Abb. 37 Entwicklung der Korngrößensummenkurven (Siltfraktion) von voreutrophen zu eutrophen Sedimenten. Die Zahlen an den Kurven entsprechen der Sedimenttiefe in benachbarten Profundalkernen. (OT 32/116; OT 32/97; OT 31/55; OT 33/35; OT 32/1).

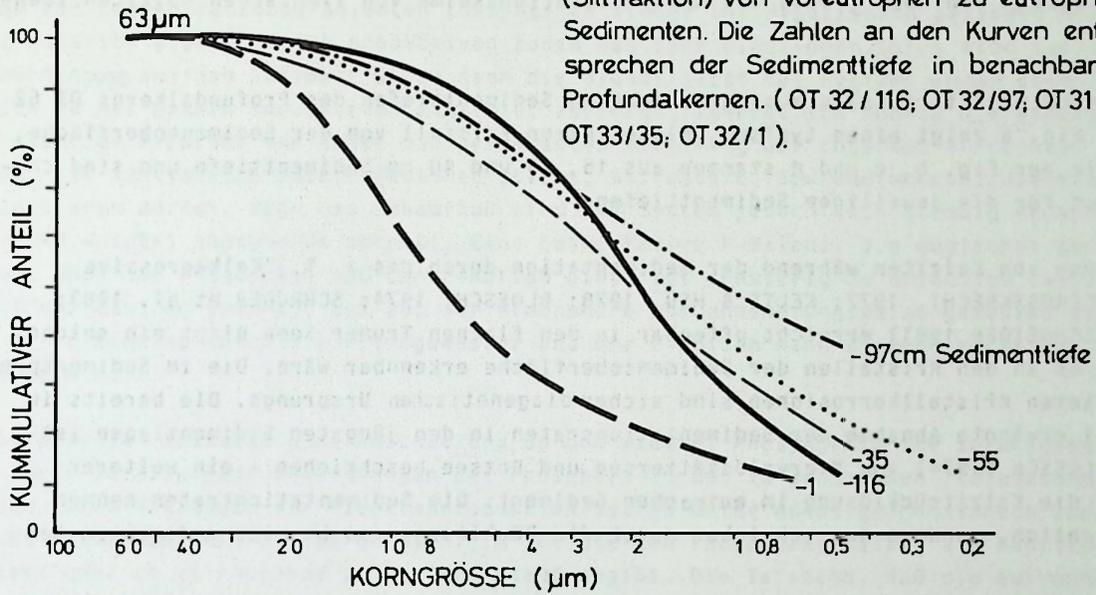
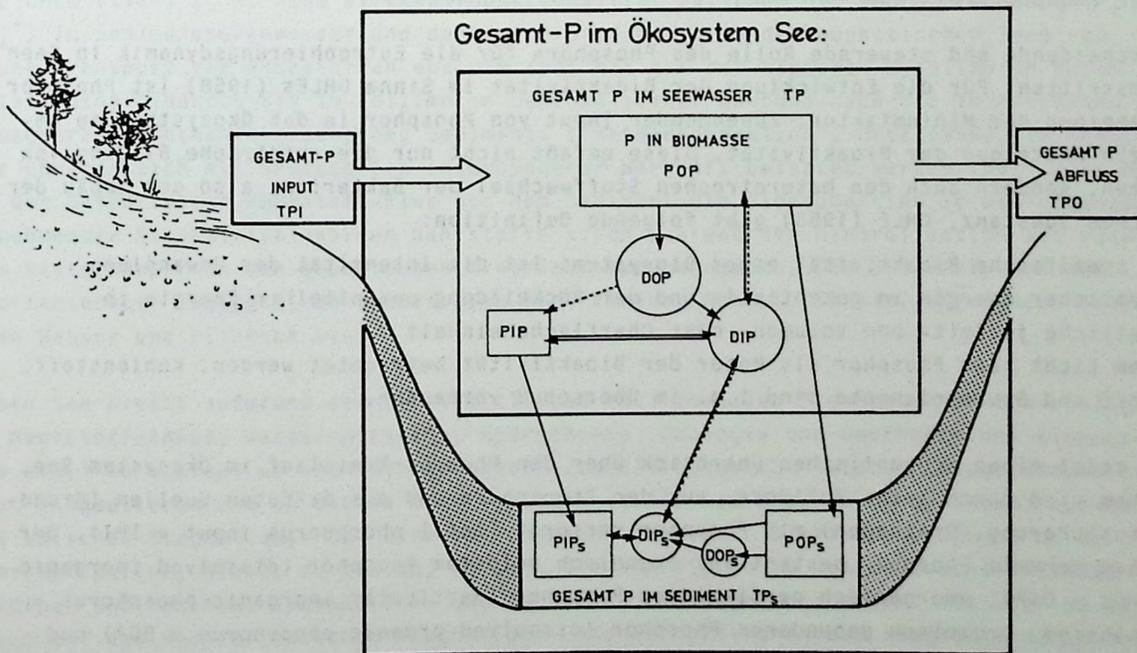


Abb. 38 P-Kreislauf (schematisch) im ÖKOSYSTEM SEE



Kalzitbildung in natürlichen Gewässern fast ausschließlich heterogen, d.h. die Kristallkeime scheiden sich nicht aus einer homogenen Lösung ab, sondern beginnen an einer Fremdoberfläche zu wachsen. Als Kristallisationskeime kommen in erster Linie ältere Kalzitkristalle in Betracht, aber auch andere Minerale, diverse Schwebstoffe und Plankton. Besonders Kieselalgen wurden von KUNZ (1983) als Kristallisationskeime von limnischen Kalziten identifiziert.

Auf Taf. 2 sind Kalzitkristalle aus verschiedenen Sedimenttiefen des Profundalkerns OT 62 abgebildet. Fig. a zeigt einen typisch polynuklearen Kristall von der Sedimentoberfläche, die Kristalle der Fig. b, c und d stammen aus 15, 25 und 40 cm Sedimenttiefe und sind charakteristisch für die jeweiligen Sedimenttiefen.

Die Rücklösung von Kalziten während der Sedimentation durch das z. T. "Kalkaggressive Hypolimnion" (ROSSKNECHT, 1977; KELTS & HSÜ, 1978; BLOESCH, 1974; SCHRÖDER et al. 1983; SCHRÖDER & SCHNEIDER 1981) erreicht offenbar in den flachen Trumer Seen nicht ein solches Ausmaß, daß es an den Kristallen der Sedimentoberfläche erkennbar wäre. Die im Sedimentprofil beobachteten Kristallkorrosionen sind sicher diagenetischen Ursprungs. Die bereits in Kap. 5.1.4.1 erwähnte Abnahme der Sedimentationsraten in den jüngsten Sedimentlagen ist - wie von BLOESCH (1974) vom Vierwaldstättersee und Rotsee beschrieben - ein weiterer Hinweis auf die Kalzitrücklösung im eutrophen Sediment. Die Sedimentationsraten nehmen nicht tatsächlich, sondern nur scheinbar durch die Rücklösung von bereits sedimentiertem Material ab.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen war es jedoch nicht möglich, das Ausmaß der Kalzitlösung weiter zu quantifizieren. Es wird angenommen, daß die Kornvergrößerung mit abnehmendem Alter der eutrophen Sedimente in erster Linie auf die bei KUNZ (1983) beschriebene Bildungskinetik im eutrophen Milieu zurückzuführen ist. Rücklösungsvorgänge tragen aber offenbar auch in nennenswerter Weise zu der beobachteten Kornverteilung bei.

5.2.4 Der Phosphorkreislauf

Die entscheidende und steuernde Rolle des Phosphors für die Eutrophierungsdynamik in Seen ist unumstritten. Für die Entwicklung der Bioaktivität im Sinne OHLES (1958) ist Phosphor im allgemeinen der Miniumfaktor. Zunehmender Input von Phosphor in das Ökosystem See bewirkt ein Ansteigen der Bioaktivität. Diese umfaßt nicht nur die autotrophe Bildung von Organismen, sondern auch den heterotrophen Stoffwechsel der Bakterien, also den Abbau der organischen Substanz. OHLE (1958) gibt folgende Definition:

"Die spezifische Bioaktivität eines Biosystems ist die Intensität der Umwandlung kinetischer Energie in potentielle und der Rückbildung potentieller Energie in kinetische je Zeit- und Volumen- oder Oberflächeneinheit."

Neben dem Licht kann Phosphor als Motor der Bioaktivität betrachtet werden. Kohlenstoff, Stickstoff und Spurenelemente sind i.a. im Überschuß vorhanden.

Abb. 38 zeigt einen schematischen Überblick über den Phosphorkreislauf im Ökosystem See. Das System wird durch seine Zuflüsse, aus der Atmosphäre und aus diffusen Quellen (Grundwassereinsickerung, Drainagen) mit Phosphor versorgt (total phosphorus input = TPI). Der in den See gelangte Phosphor besteht aus organisch gelöstem Phosphor (dissolved inorganic phosphorus = DIP), anorganisch partikulärem Phosphor (particular inorganic phosphorus = PIP), gelöstem, organisch gebundenen Phosphor (dissolved organic phosphorus = DOP) und partikulärem, organischen Phosphor (particular organic phosphorus = POP). Die Summe dieser in das System gelangenden Phosphorfraktionen bildet den Gesamtphosphor im See (total phosphorus = TP). Die vier Fraktionen stehen in dem System untereinander in ständigem Austausch, wie er in Abb. 38 vereinfacht dargestellt ist.

Von den partikulären Phosphatfraktionen, die sich im See befinden, gelangt ein Teil ins Sediment; dort finden dann wieder komplexe Umwandlungen statt (s. Abb. 38). Vom Gesamtphosphor-Inhalt des Sediments (TPs = total phosphorus in sediment) geht ein Teil in Lösung und liegt als DIPs (dissolved inorganic phosphorus in sediment) bzw. als DOPs (dissolved organic phosphorus in sediment) vor. Diese löslichen Phosphorfraktionen des Sediments können infolge von Konzentrationsgradienten theoretisch wieder ins Hypolimnion gelangen und während der Zirkulation wieder in die produktiven Zonen des Sees eindringen. Solch eine seeinterne Phosphordüngung aus dem Sediment würde dann die Bioaktivität des Systems wieder stimulieren und sich zu der extern induzierten Aktivität addieren. Theoretisch könnte die Bioproduktion durch ständige P-Zufuhr von außen und permanentes Recycling der internen P-Frachten soweit wachsen, bis schließlich andere Faktoren (Licht, Stickstoff, Spurenelemente) die Bioaktivität limitieren würden. Über den Seeabfluß wird dem System jedoch auch ständig Phosphor entzogen (TPO = total phosphorus output). Eine quantitative P-Bilanz, die möglichst genaue Auskunft über die P-Einträge und den P-Abfluß gibt, ist schwierig zu erstellen, weil z. B. der diffuse Eintrag vom Land und aus der Atmosphäre nur annäherungsweise gemessen werden kann. Der P-Eintrag durch die Fließgewässer und der P-Abfluß kann dagegen recht gut bestimmt werden.

Phosphorbilanzen erlauben eine Abschätzung, ob und wieviel Phosphor im See zurückgehalten wird. Durch fortlaufende Bestimmungen des Phosphors in den verschiedenen Tiefenzonen des Sees und durch Messungen der Planktonproduktion ist es unter günstigen Umständen zudem möglich, festzustellen, ob das Sediment im seeinternen Phosphorkreislauf als Nährstoffpuffer wirkt oder ob es Phosphor in den Kreislauf abgibt. Die Tatsache, daß die eutrophen Sedimente gegenüber den voreutrophen stark mit Phosphor angereichert sind, belegt, daß es generell als Nährstoffpuffer fungiert. Für jeden See als Individuum bleibt jedoch immer zu klären, ob nicht z. B. während der Stagnationsphase durch die damit verbundenen chemischen Veränderungen im Hypolimnion und an der Grenzfläche Sediment/Wasser Phosphor vom Sediment abgegeben wird und damit als seeinterne Nährstoffquelle die Bioproduktion zusätzlich stimuliert.

So fand OHLE (1964) z. B. eine direkte Proportionalität zwischen dem Nährstoffgehalt (P_t und NH_4^+) im Sedimentporenwasser und der Primärproduktion in der euphotischen Zone von Seen. Den Transport von Nährstoffen aus dem Sediment und dem tieferen Hypolimnion durch das Metalimnion hindurch bis in Epilimnion bewirkt seiner Deutung nach die in eutrophen Seen ausgeprägte Methanentgasung des Sediments ("Methankonvektion", OHLE 1959). In Seen, die nur unwesentlich mit Nährstoffen anthropogener Herkunft belastet werden, hält nach OHLE (1964) der beschriebene Nährstoff-Flux aus dem Sediment die Bioproduktion im Gleichgewicht. Mit zunehmender Bioaktivität werden Nährstoffe schon während der Mineralisation des Planktons im Wasserkörper an den aquatischen Kreislauf zurückgegeben. Das Sediment wird als Nährstoffreservoir umgangen, es stellt sich ein "kleiner Nährstoffkreislauf" (OHLE, 1962) zwischen Wasser und Plankton ein.

Für jeden See bleibt aufgrund seiner vielfältigen individuellen Eigenschaften (Morphologie, Tiefe, Nährstoff-Input, Wasseraustausch, Hydrochemie, Geologie und Geochemie des Einzugsgebiets etc.) zu klären, wo sich die Nährstoffe im Gleichgewicht zwischen Wasserkörper und Sediment akkumulieren und ob dieses Gleichgewicht stabil ist oder ob es dynamisch auf den Wechsel zwischen Stagnations- und Zirkulationsphase reagiert. Wirkt das Sediment z. B. als Nährstoffpuffer, bleibt zu klären, wo sich die Nährstoffe im Gleichgewicht zwischen Wasserkörper und Sediment akkumulieren und ob dieses Gleichgewicht stabil ist oder ob es dynamisch auf den Wechsel zwischen Stagnations- und Zirkulationsphase reagiert. Wirkt das Sediment z. B. als Nährstoffpuffer, bleibt zu klären, ob sich das ändert, wenn die externe Zufuhr von Nährstoffen in den See deutlich reduziert wird.

Die Untersuchung dieses Gleichgewichts sollte im Falle der Vorlandseen maßgeblich über die Art der vorzunehmenden Sanierungs- und/oder Restaurierungsmaßnahmen entscheiden. Anhand von P-Flux-Experimenten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit versucht, einen Einblick in das Phosphorgleichgewicht zwischen Sediment und Wasser zu bekommen. Diese Untersuchungen wurden exemplarisch am Obertrumer See durchgeführt, weil sich die Seen hinsichtlich dieser Fragestellung nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

5.2.4.1 Die hydrochemische Phosphorbilanz

Im Rahmen des Projektes "Vorlandseen" der Salzburger Landesregierung wurde für den Zeitraum von 1981 bis 1983 eine hydrochemische Bilanzierung der Stoff-Frachten, die in den Vorlandseen umgesetzt wurden, durchgeführt. (JÄGER 1986, CZERNIN-CHUDENITZ 1986). Auf der Grundlage der Wasserbilanzen ermittelte JÄGER (1986) die Nährstoffein- und austräge der Seen. Dabei zeigte sich, daß in allen vier Seen Phosphor im Mittel der Jahre 81/82 zurückgehalten wurde. Im Wallersee betrug die P-Retention 63 %. Der Eintrag betrug $70 \text{ kg/km}^2 \text{a}$, der Abfluß $26 \text{ kg/km}^2 \text{a}$.

In der Trumer-Seen-Kette erwies sich die Wasser- und Frachtbilanzierung als äußerst schwierig. Da nahezu alle Zubringer in den Obertrumer Seen münden, kommt es bei starkem Regenwetter oder Schneeschmelze zu einer Strömungsumkehr, wobei Wasser aus dem Obertrumer See in den Niedertrumer See fließt. Zudem werden der Niedertrumer und der Obertrumer See offenbar aus unterirdischen Quellen gespeist (TICHY, 1980).

Für den Niedertrumer See ermittelte JÄGER (1986) eine P-Retention von 71 %, für den Obertrumer See von 15 % und für den Grabensee 9 %. Der geringe Rückhalt von Phosphor im Grabensee liegt an der niedrigen mittleren Verweildauer des Wassers (s. Tab. 1, S. 6), die in diesem See nur 89 Tage beträgt, während sie z. B. im Niedertrumer See 4,7 Jahre beträgt (JÄGER, 1986). Zudem gelangen die höchsten P-Frachten während des Winterhalbjahrs aus dem Obertrumer See in den Grabensee. Dort werden sie dann nur in geringem Umfang in Planktonbiomasse akkumuliert.

Da nahezu alle Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet (EZG) der Trumer Seen in den Obertrumer See gelangen, erhält dieser seinen größten P-Input während des Sommerhalbjahres. Dann werden die Nährstoffe jedoch sofort in Planktonbiomasse umgesetzt und verbleiben im See, den sie hauptsächlich im Winterhalbjahr aufgrund der dann stark reduzierten Bioproduktion wieder teilweise verlassen. Insgesamt wurden im Mittel 81/82 in den Trumer Seen 28 % (1,3 t) des P-Inputs der Zubringer zurückgehalten.

Da die diffusen P-Einträge (Uferinfiltration, Tiefenwasser, Atmosphäre) bei den Bilanzen nicht berücksichtigt werden konnten, weil die betreffenden Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, ist tatsächlich mit einer noch höheren P-Retention in allen 4 Seen zu rechnen.

Bei der langjährigen hydrochemischen Beobachtung der Seen zeigt sich, daß während der Herbstrirkulation erhebliche Mengen Phosphor vermutlich über Ca- und Fe-Phasen an das Sediment abgegeben werden (im Wallersee z. B. 0,6 t, JÄGER 1986).

5.2.4.2 Die Phosphorfrachten im Oberflächensediment der Vorlandseen

Anhand der Analyse von Sedimentoberflächenproben (bis 5 cm Sedimenttiefe) wurde die Verteilung des P_t im Kartenbild dargestellt (s. Abb. 16, S. 36). Entsprechende Karten für den Niedertrumer See (Abb. 39, S. 79) und den Wallersee (Abb. 40, S. 80) wurden von LINDNER (1984) und GERMATSIDIS (1985) erstellt.

Abb. 39 P_t -Verteilung in den Oberflächensedimenten
des Niedertrumer Sees (aus: LINDNER, 1984)

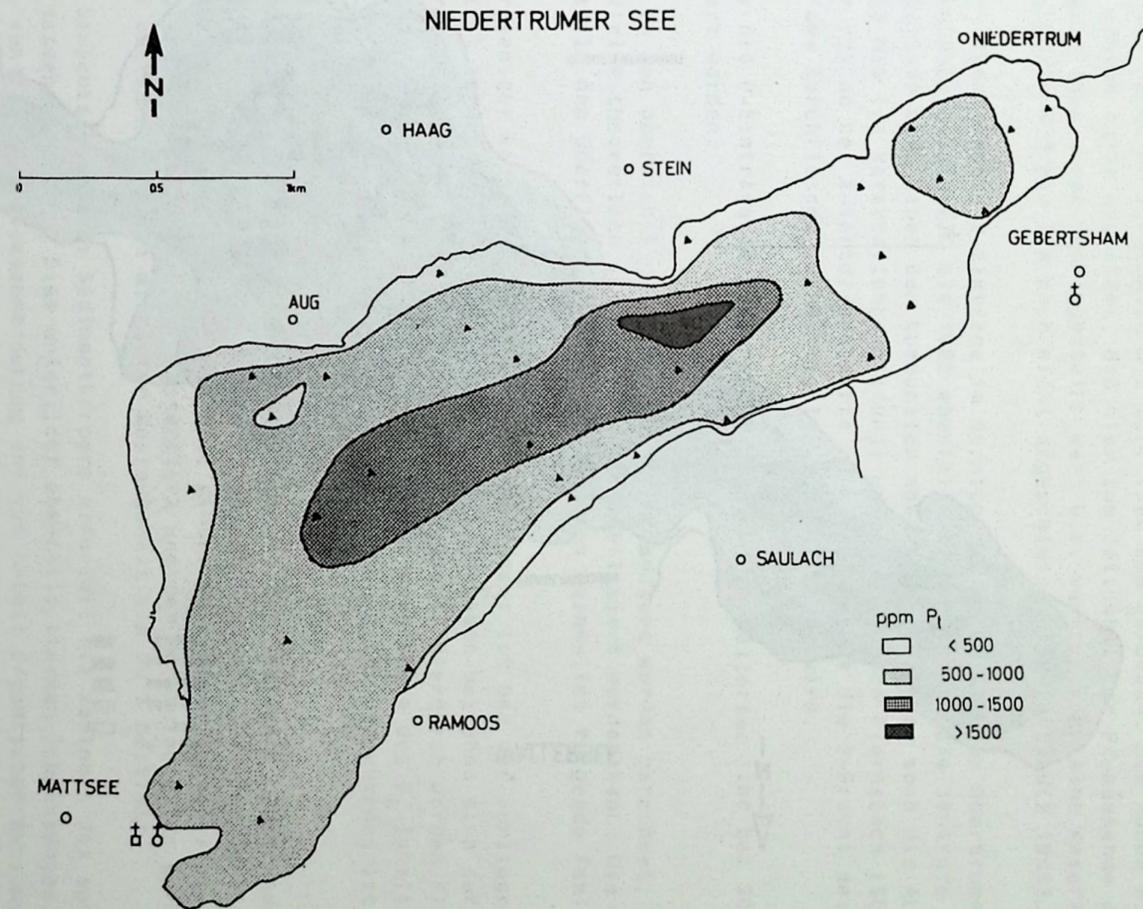
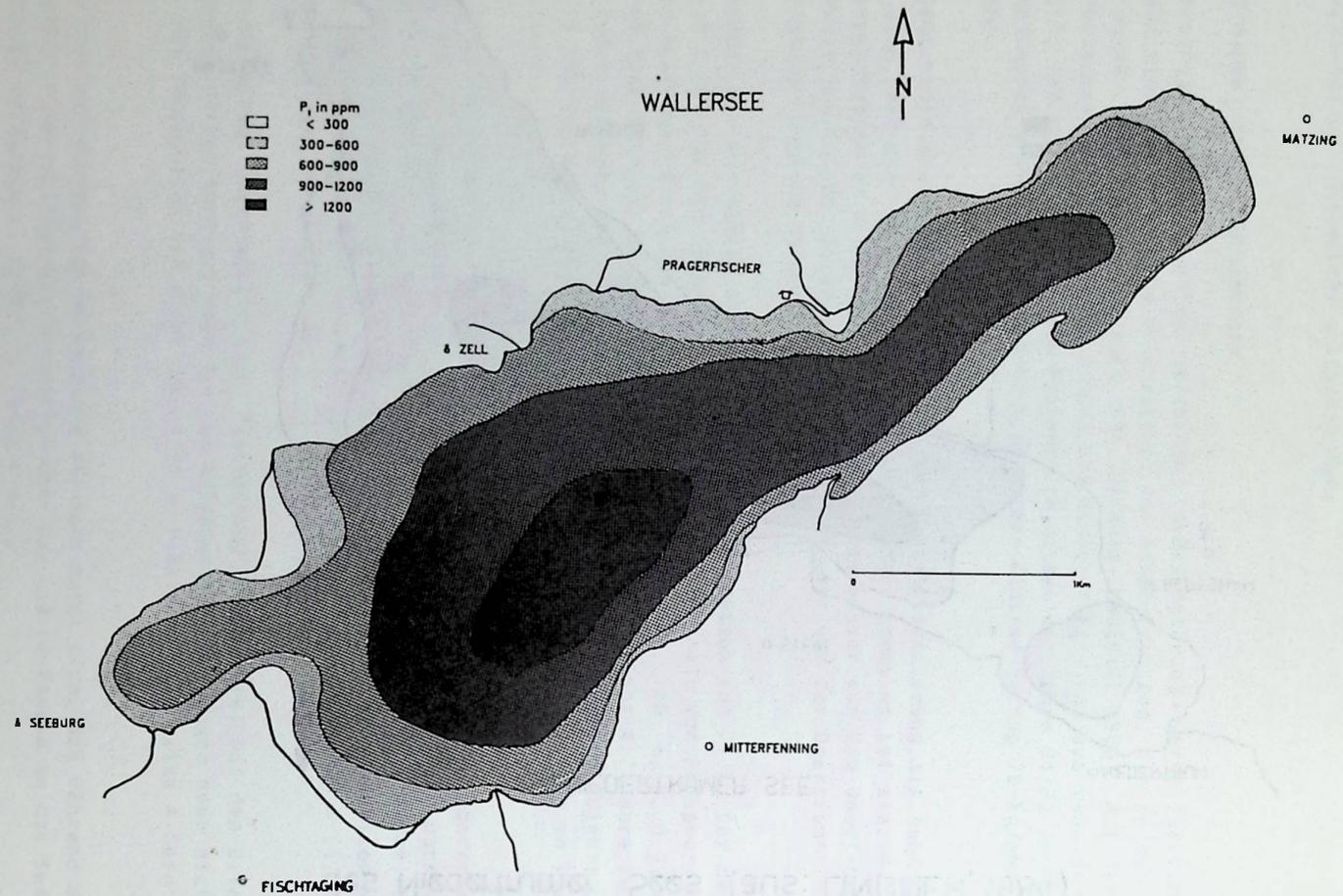


Abb. 40 P_t -Verteilung in den Oberflächensedimenten
des Wallersees (aus: GERMATSIDIS, 1985)



Vor dem südlichen Becken des Obertrumer Sees erkennt man eine starke P-Zufuhr in den See (Abb. 16), die jedoch nicht nur über den Mattich-Bach erfolgt, sondern sehr deutlich auch aus den östlich davor gelegenen Wiesen und Sumpfflächen.

Auch vom Matzinger Delta und aus der Bucht zwischen Matzinger und Seehammer Delta her erfolgt ein erhöhter, offenbar teilweise diffuser P-Eintrag in den See. Am auffallendsten ist ein starker P-Eintrag aus dem Bereich der Anzinger Bucht. (EZG 2 in Abb. 3). Hier werden selbst in Litoralsedimenten P_t -Gehalte bis über 1300 ppm gefunden. Die hohen P_t -Einträge sind in diesem Gebiet darin begründet, daß hier zum Zeitpunkt der Probenahme die zentrale Abwasserentsorgung noch nicht fertiggestellt war; u.a. war bis 1982 eine Käserei mit einer Milchverarbeitung von 4,8 Mio l/a noch nicht angeschlossen (SCHINDLBAUER 1985).

Im Grabensee erfolgen erhöhte P-Einträge im Bereich des Zuflusses vom Obertrumer See und durch den Flurnsbach, dessen EZG bis 1982 ebenfalls noch nicht an die zentrale Abwasserentsorgung angeschlossen war. Neben den kommunalen Abwässern gelangten auch die Abwässer einer Käserei (5 Mio l/a Verarbeitungsleistung) ungeklärt in den Flurnsbach (SCHINDLBAUER, 1986). Deutlich ist an der P-Verteilungskarte zu erkennen, wie die P-Fracht des Flurnsbaches während des Durchflusses zur Mattig im See abgelagert wird.

Die Quellen für die P-Einträge im Niedertrumer See und im Wallersee sind bei RÖHRS et al. (1986) diskutiert worden.

Die P-Frachten in den obersten 5 cm Sediment der Vorlandseen wurden berechnet, um abschätzen zu können, wieviel P theoretisch aus dem Sediment mobilisiert werden kann. Die Angabe des Nährstoffinhalts in den Oberflächensedimenten der Seen beinhaltet folgende Fehlermöglichkeiten:

- Die mehr oder weniger komplexe Morphologie des Seebodens ist bei der vorliegenden Berechnung nicht berücksichtigt worden. Alle Flächenangaben beziehen sich auf die an die Wasseroberfläche projizierte Fläche des Seebodens. Hierdurch werden Flächen mit steilen Hängen unterbewertet, was jedoch bei der Berechnung des P_t -Inhaltes unerheblich ist, da der Phosphor überwiegend an organischen Detritus gebunden ist, der nur zum geringsten Teil an steilen Hängen abgelagert wird.
- Die P_t -Angaben beziehen sich auf die Trockensubstanz des Sediments. Berechnungen über P_t -Gehalte eines Sedimentkörpers von 5 cm Mächtigkeit setzen daher eine genaue Kenntnis über den Wassergehalt dieses Sediments voraus; dieser unterliegt jedoch starken Schwankungen in Abhängigkeit vom Material, der Wassertiefe und der Morphologie. Es wurde für die Sedimente der obersten 5 cm ein mittlerer Wassergehalt von 90 % bestimmt.
- Eine genaue Gewichtsangabe des Sedimentkörpers erfordert die Kenntnis des spezifischen Gewichts des nassen Sediments. Dies unterliegt ebenfalls starken Schwankungen, die vom Wassergehalt, von der Mineralzusammensetzung und vom Anteil organischer Substanz abhängen. Für die vorliegende Bilanz wurde mit einem spezifischen Gewicht des nassen Sediments von 1,06 g/cm³ gerechnet; ausgehend von einer durchschnittlichen Sedimentzusammensetzung von 90 % Wasser und 10 % Trockensubstanz mit einem mittleren spezifischen Gewicht von 2,527 g/cm³.

Die Projektion der Oberflächensedimente mit ihren Bezirken verschieden hoher P_t -Gehalte ergibt die Verteilungskarten nach Abb. 16, 39, 40. Die Flächen der einzelnen Bezirke, ihr Volumen bezogen auf 5 cm Sedimenttiefe, ihr Gewicht und der Gesamt-Phosphor-Gehalt sind in den Tabellen 44 - 47 dargestellt. Insgesamt sind im Oberflächensediment des Obertrumer Sees ca. 20 t Phosphor gespeichert; im gesamten Oberflächensediment des Grabensees sind es ca. 5 t, im Niedertrumer See ca. 12 t und im Wallersee ca. 28 t. Eine P-Rücklösung wurde - wenn überhaupt - nur aus den Sedimenten unterhalb der Thermokline erwartet. Im Obertrumer See, im Grabensee und im Wallersee betrafte das ziemlich genau die Sedimente mit mehr als 600 ppm P_t , im Niedertrumer See die mit mehr als 500 ppm P_t . Damit wären theoretisch folgende Rücklösungsreservoirs gegeben: Obertrumer See 18 t, Grabensee 4 t, Wallersee 26 t, Niedertrumer See 11 t.

P _t -Gehalt des trockenen Sedim.		Sediment- oberfläche	Volumen d. Sedim.	Trockengew. d. Sedim.	P _t -Geh.d. Sediments
(ppm)		(km ²)	(m ³)	(t)	(t)
Bereich	Mittel				
<300	200	0,20	10000	1060	0,2
300- 600	450	0,83	41500	4399	2,0
600- 900	750	2,04	102000	10812	8,1
900-1200	1050	1,54	77000	8162	8,6
>1200	1300	0,19	9500	1007	1,3
Total:		4,80	240000	25440	20,2

Tab. 44 Nährstoffinhalt (P_t) der oberen Sedimentschicht (5 cm) des Obertrumer Sees.

P _t -Gehalt des trockenen Sedim.		Sediment- oberfläche	Volumen d. Sedim.	Trockengew. d. Sedim.	P _t -Geh.d. Sediments
(ppm)		(km ²)	(m ³)	(t)	(t)
Bereich	Mittel				
<300	200	0,05	2500	265	0,1
300- 600	450	0,25	12500	1325	0,6
600- 900	750	0,56	28000	2968	2,2
900-1200	1050	0,30	19500	2067	2,2
>1200	1300	0,01	500	53	0,1
Total:		1,26	63000	6678	5,2

Tab. 45 Nährstoffinhalt (P_t) der oberen Sedimentschicht (5cm) des Grabensees.

P _t -Gehalt des trockenen Sedim.		Sediment- oberfläche	Volumen d. Sedim.	Trockengew. d. Sedim.	P _t -Geh.d. Sediments
(ppm)		(km ²)	(m ³)	(t)	(t)
Bereich	Mittel				
<500	300	0,85	42500	4505	1,4
500-1000	750	1,87	93500	9911	7,4
1000-1500	1250	0,50	25000	2650	3,3
>1500	1750	0,03	1500	159	0,3
Total:		3,25	162500	17225	12,4

Tab. 46: Nährstoffinhalt (P_t) der oberen Sedimentschicht (5cm) des Niedertrumer Sees.

P _t -Gehalt des trockenen Sedim.		Sediment- oberfläche	Volumen d. Sedim.	Trockengew. d. Sedim.	P _t -Geh.d. Sediments
(ppm)		(km ²)	(m ³)	(t)	(t)
Bereich	Mittel				
< 300	200	0,18	9000	950	0,2
300- 600	450	1,09	54500	5780	2,6
600- 900	750	2,29	114500	12140	9,1
900-1200	1050	2,30	115000	12190	12,8
1200	1300	0,54	27000	2860	3,7
Total:		6,40	320000	33920	28,4

Tab. 47 Nährstoffinhalt (P_t) der oberen Sedimentschicht (5 cm) des Wallerseees.

5.2.5 Untersuchungen zur Mobilität des Sedimentphosphors

Zur Frage der Phosphorrücklösung aus dem Sediment eutropher Seen liegen zahlreiche Publikationen vor (u.a. KAMP-NIELSEN 1974, BENGTON 1975, JØRGENSEN et al. 1975, PECHLANER & PSENNER 1983, PSENNER 1984). Von den unterschiedlichen Autoren wurde das Problem in vielfältiger Art und Weise sowohl vom experimentellen als auch vom theoretischen Ansatz her behandelt. Es gibt keine einheitlichen Meßverfahren und schon gar keine generell anwendbaren Antworten zur Frage der Phosphorrücklösung.

Die Art, der Umfang und die Wirkung von Sanierungs- bzw. Restaurierungsmaßnahmen an eutrophen Seen ist demnach entscheidend davon abhängig, ob aus dem Sediment der betreffenden Seen bedeutende Mengen Phosphor an das Hypolimnion abgegeben werden und somit zu einer internen "Seedüngung" führen. Daher war es notwendig, am Sediment der Trumer Seen selbst Phosphor-Flux-Experimente durchzuführen. Zusätzlich wurden spezielle mineralogische Untersuchungen vorgenommen, um herauszufinden, an welche Mineralphasen der Phosphor im Sediment gebunden ist.

5.2.5.1 Phosphor-Flux-Experimente

Während der Vollzirkulation wurden im April 1983 je ein Kern aus dem Profundal des Obertrumer Sees (38-P) und des Grabensees (GR 15-P) entnommen, um daran im Labor experimentell die P-Rücklösung aus dem Sediment zu bestimmen, die in den Trumer Seen zur Zeit der Stagnation vermutet wurde. Im Frühjahr 1984 wurde das Experiment an 4 weiteren Kernen aus dem Obertrumer See (OT 58 A-D) wiederholt.

5.2.5.1.1 Erstes P-Flux-Experiment, Sommer 1983 (OT 38-P, GR 15-P)

Direkt nach der Entnahme der Sedimentkerne mit dem Fall-Lot (am 7./8.4.1983) wurde eine ca. 30 cm hohe Wassersäule über dem Sediment der Kerne sofort mit N_2 belüftet, um dadurch eine Abnahme des pO_2 im Wasser und eine Senkung des Redox-Potentials (gemessen als E_h) bis in den theoretischen Stabilitätsbereich des Fe^{2+} -Ions zu erreichen. Erwartet wurde dann die Rücklösung von Eisenhydroxiden aus dem Sediment und damit auch eine Rücklösung des an Eisen gebundenen Phosphors (BENGTON 1975, EINSELE 1936, FREVERT 1979, JØRGENSEN et al. 1975). Letztlich sollte die P-Rücklösung aus der Sedimentsäule durch die Sedimentoberfläche bekannter Größe in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden. Von entscheidender Bedeutung war dabei die Frage, wie lange es vom Beginn der N_2 -Belüftung an dauern würde, bis die P-Rücklösung aus dem Sediment einsetzte.

Verlauf des Experiments

Aus dem Bodenwasser der Kerne wurden ab Beginn des Experiments regelmäßig Proben mit Injektionsspritzen entnommen. Partikuläre Substanz wurde in einem vorgeschalteten Membranfilter (0,45 μm) zurückgehalten. In den entnommenen Bodenwasserproben wurden folgende Parameter bestimmt: gel. Phosphor, pH, E_h , (die P-Analysen wurden im Labor des Hydrobiologischen Dienstes der Salzburger Landesregierung durchgeführt, um eine Kontinuität der Methodik im Hinblick auf die bereits seit Jahren dort durchgeführten P-Bestimmungen im Wasser der Vorlandseen zu gewährleisten). In den Tab. 48 und 49 sind die Daten der P-Flux-Experimente an den Kernen OT 38-P und Gr 15-P dargestellt.

Kern	Probe	Datum	Temp °C	pH	Eh mV	PO ₄ ³⁻ µg/l	Bemerkungen
OT 38-P	0	7 Apr 83	18.00			100	15 Min. n. Proben.
OT 38-P	1	7 Apr 83	18.20			96	
OT 38-P	2	7 Apr 83	21.20			100	
OT 38-P	3	8 Apr 83	00.20			58	
OT 38-P	4	8 Apr 83	09.20			140	
OT 38-P	5	8 Apr 83	16.20			82	
OT 38-P	6	9 Apr 83				92	
OT 38-P	7	10 Apr 83				92	
OT 38-P	8	11 Apr 83		8,40	326	108	
OT 38-P	9	14 Apr 83				170	
OT 38-P	10	20 Apr 83				280	
OT 38-P	11	22 Apr 83		9,28	346	289	
OT 38-P	12	24 Apr 83		9,26	260	289	
OT 38-P	13	26 Apr 83		9,28	300	488	
OT 38-P	14	29 Apr 83		9,50	271	567	
OT 38-P	15	2 Mai 83		9,78	309	690	
OT 38-P	16	4 Mai 83		9,71	312	575	
OT 38-P	17	6 Mai 83		9,57	317	806	
OT 38-P	18	9 Mai 83		9,21	245	900	
OT 38-P	19	13 Mai 83		9,86	268	699	
OT 38-P	20	16 Mai 83		9,91	255	690	
OT 38-P	21	20 Mai 83		9,91	268	723	
OT 38-P	22	24 Mai 83		9,91	255	718	
OT 38-P	23	27 Mai 83		9,86	268	666	
OT 38-P	24	30 Mai 83		9,75	273	800	
OT 38-P	25	3 Jun 83		9,71	315	833	
OT 38-P	26	7 Jun 83		9,74	279		
OT 38-P	27	11 Jun 83		9,86	264	658	
OT 38-P	28	14 Jun 83		9,91	272	762	
OT 38-P	29	18 Jun 83		9,88	267	811	
OT 38-P	30	22 Jun 83		9,82	273	847	
OT 38-P	31	30 Jun 83		9,77	310	947	
OT 38-P	32	4 Jul 83		9,86	289	918	
OT 38-P	33	11 Jul 83		9,05	305	748	
OT 38-P	34	11 Jul 83		9,88	318	679	
OT 38-P	35	3 Aug 83		8,73	261	1283	
OT 38-P	36	22 Aug 83		7,74	239	2337	
OT 38-P	36	29 Aug 83		8,35	237	2111	

Tab. 48 I. P.-Flux-Experiment, Daten zum Kern OT 38-P (10 m Wassertiefe)

Kern	Probe	Datum	Temp °C	pH	Eh mV	PO ₄ ³⁻ µg/l	Bemerkungen
GR 15-P	0	8 Apr 83	13.20			184	15 Min. n. Proben.
GR 15-P	1	8 Apr 83	15.00			72	
GR 15-P	2	8 Apr 83	16.30			48	
GR 15-P	3	9 Apr 83	09.00			94	
GR 15-P	4	10 Apr 83				378	
GR 15-P	5	11 Apr 83		8,20	304	184	
GR 15-P	6	14 Apr 83				408	
GR 15-P	7	20 Apr 83				450	
GR 15-P	8	22 Apr 83		9,05	321	518	
GR 15-P	9	24 Apr 83		9,14	290	518	
GR 15-P	10	26 Apr 83		9,20	292	506	
GR 15-P	11	29 Apr 83		9,21	287	583	
GR 15-P	12	2 Mai 83		9,46	300	615	
GR 15-P	13	4 Mai 83		9,66	335	567	
GR 15-P	14	6 Mai 83		9,57	346	616	
GR 15-P	15	9 Mai 83		9,36	349	608	
GR 15-P	16	13 Mai 83		9,66	257	713	
GR 15-P	17	16 Mai 83		9,73	288	855	
GR 15-P	18	20 Mai 83		9,73	253	988	
GR 15-P	19	24 Mai 83		9,74	258	882	
GR 15-P	20	27 Mai 83		9,70	243	799	
GR 15-P	21	30 Mai 83		9,51	275	1004	
GR 15-P	22	2 Jun 83		9,56	300	1202	
GR 15-P	23	7 Jun 83		9,65	292	987	
GR 15-P	24	11 Jun 83		9,76	291	987	
GR 15-P	25	14 Jun 83		9,71	280	1083	
GR 15-P	26	18 Jun 83		9,70	272	1057	
GR 15-P	27	20 Jun 83		9,67	299	1049	
GR 15-P	28	30 Jun 83		9,46	362	1235	
GR 15-P	29	4 Jul 83		9,16	350	1231	
GR 15-P	30	11 Jul 83		8,86	361	1226	
GR 15-P	31	11 Jul 83		8,73	387	1129	
GR 15-P	32	3 Aug 83		7,56	211	2273	
GR 15-P	33	22 Aug 83		7,50	206	2668	
GR 15-P	33	29 Aug 83		7,58	150	1974	

Tab. 49 I. P.-Flux-Experiment, Daten zum Kern GR 15-P (12 m Wassertiefe)

Während des Experiment fielen die E_h -Werte von anfänglich 400 mV langsam auf 200 mV ab. Wider Erwarten stieg der pH im Wasser beider Kerne jedoch auf Werte um 9,8 an. Nähere Untersuchungen zeigten, daß dies auf die N_2 -Begasung zurückzuführen war. Es wird angenommen, daß der elementare Stickstoff von chemotrophen Bakterien fixiert und schließlich wieder in Form von NH_3 abgegeben wurde. Bakterielle N_2 -Fixierung in limnischen Sedimenten wird u.a. von BREKZONIK & HARPER (1969), HOWARD et al. (1970), BREKZONIK (1972), KEENEY (1973) und HAKANSON (1983) beschrieben. ZELITCH (1951) fand eine extrem rasche Abgabe von NH_4 -N durch das Bakterium *Clostridium pasteurianum*, wenn das Medium mit N_2 behandelt wurde. Die extreme pH-Erhöhung beeinflusste die Fe- und P-Rücklösung infolge einer starken Verschiebung der Stabilitätsfelder (Abb. 41) und einer Veränderung der mikrobiologischen Vorgänge so sehr, daß der Verlauf des Experiments nicht mehr mit den tatsächlich im See ablaufenden Prozessen verglichen werden kann.

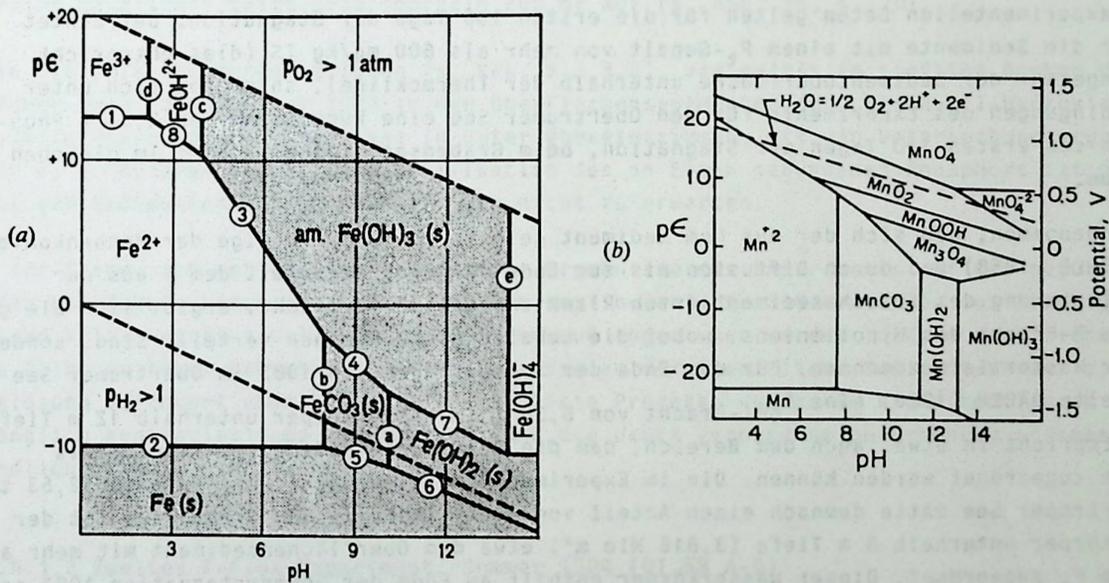


Abb. 41 pH/Eh-Abhängigkeit der Stabilitätsfelder von Fe und Mn in den Systemen $FeO-CO_2-H_2O$ und $MnO-CO_2-H_2O$ (aus: STUMM & MORGAN, 1981)

Wegen der unnatürlichen pH-Erhöhung wurde die N_2 -Begasung des Kerns GR 15-P nach 68 Tagen (am 14.6.1983) beendet. Darauf kam es zu einem Anstieg des E_h -Wertes von 272 mV auf 351 mV bis zum 30.6., der pH fiel in dieser Zeit von 9,70 auf 9,16. Der P-Gehalt des filtrierten Wassers stieg von 1047 $\mu g/l$ auf 1221 $\mu g/l$ an. Seit dem 30.6. wurde der Kern nach jeder Probenahme wieder 10 Minuten lang mit N_2 begast. Dadurch wurde wieder ein Abfallen der E_h -Werte erreicht; auch nahm der pH noch weiter ab. Der Kern OT 38-P wurde seit dem 30.6. ebenso behandelt. In Tabelle 50 sind die wichtigsten Daten des Experiments zusammengefaßt.

Daten der Kern- entnahme (7./8.4.1983)			Daten n. 130 Tagen N ₂ -Begasung			P-Flux
E _h (mV)	pH	P _{gel}	E _h (mV)	pH	P _{gel}	(µg)
OT 38-P 445	7,20	50 µg/834 ml	239	7,74	1900 µg/834 ml	1850
GR 15-P 409	7,18	40 µg/752 ml	206	7,50	1970 µg/752 ml	1970

Tab. 50 Ausgangs- und Enddaten des 1. P-Flux-Experiments (130 Tage) an den Kernen OT 38-P und GR 15-P; Messungen des filtrierten (0,45 µm) Bodenwassers

In beiden Kernen fand demnach während des 130-tägigen Experiments eine starke P-Rücklösung aus dem Sediment statt. Bezogen auf die Wasservolumina über dem Sediment zu Beginn des Versuchs (OT 38-P: 834 ml, GR 15-P: 752 ml) wurden durch die 27,34 cm² große Sedimentoberfläche des Kerns OT 38-P 1850 µg Phosphor mobilisiert; durch die gleiche Fläche des Kerns GR 15-P 1930 µg. Umgerechnet auf einen m² Sedimentoberfläche ergibt dieses Experiment für den Obertrumer See eine potentielle P-Rücklösung von ca. 5160 µg/Tag. Diese experimentellen Daten gelten für die ersten 130 Tage der Stagnation. Betrachtet man nur die Sedimente mit einem P_t-Gehalt von mehr als 600 mg/kg TS (dies entspricht auch ungefähr der Sedimentoberfläche unterhalb der Thermokline), so ergibt sich unter den Bedingungen des Experiments für den Obertrumer See eine Rücklösung von 2,53 t Phosphor in den ersten 130 Tagen der Stagnation, beim Grabensee sind es 0,61 t im gleichen Zeitraum.

Wird angenommen, daß sich der aus dem Sediment gelöste Phosphor infolge der Methankonvektion (OHLE, 1958) und durch Diffusion bis zum Ende der Stagnation mit dem P aus der Mineralisierung des frisch sedimentierten Planktondetritus vermischt, ergibt sich die gesamte gelöste P-Fracht des Hypolimnions, wobei die Gehalte nicht homogen verteilt sind, sondern mit der Wassertiefe zunehmen. Für das Ende der Sommerstagnation 1983 im Obertrumer See ermittelte JÄGER (1986) eine P_{gel}-Fracht von 5,30 t im Wasserkörper unterhalb 12 m Tiefe. Das entspricht in etwa auch dem Bereich, dem die Oberflächensedimente mit mehr als 600 ppm zugeordnet werden können. Die im Experiment erzielte Rücklösungsrate von 2,53 t im Obertrumer See hätte demnach einen Anteil von 48 %. Im Falle des Grabensees ist der Wasserkörper unterhalb 8 m Tiefe (3,816 Mio m³) etwa dem Oberflächensediment mit mehr als 600 ppm P_t zugeordnet. Dieser Wasserkörper enthält am Ende der Sommerstagnation 1983 ca. 1,28 t P (JÄGER, 1986). Der experimentell ermittelte Anteil des rückgelösten Phosphors (0,626 t) betrüge demnach ebenfalls 48 %.

Aufgrund der gravierenden Artefakte bei der Durchführung des Experiments (extreme pH-Erhöhung, Zusammenbruch des CO₂-Systems infolge der kontinuierlichen N₂-Begasung) wurde jedoch angenommen, daß die erzielten Rücklösungsraten deutlich zu hoch sind und nicht auf das natürliche System See übertragen werden dürfen. Der Anstieg von gelöstem P im Hypolimnion kann nach OHLE (1958, 1962 und 1964) allein die Folge eines "kurzgeschlossenen Nährstoffkreislaufs" ("kleiner P-Kreislauf") im hocheutrophen See sein. Der Phosphor stammt dabei größtenteils aus der synsedimentären Mineralisierung von Planktondetritus. Wenn dies in den Trumer Seen zutrifft, muß von einer erheblich geringeren P-Rücklösung ausgegangen werden als im Experiment erzielt wurde. Weitere Beobachtungen und Messungen führten zu einer Erhärtung dieser Annahme:

- In beiden Kernen des P-Flux-Experiments konnte die Reduktion des Sediments während der H₂-Begasung deutlich an der Verfärbung von braun nach schwarz beobachtet werden. Die Reduktion erfolgte nicht von der Sedimentoberfläche her, sondern von der im Sediment gelegenen RDL (redox-discontinuity-layer). Geht man davon aus, daß die P-Rücklösung wesentlich an die Fe-Rücklösung gekoppelt ist (EINSELE 1936, BENGSTON 1975), dann folgt daraus, daß eine Migration von gelöstem Phosphor in das Bodenwasser erst einsetzen kann, nachdem das Sediment bis an die Oberfläche reduziert ist. Dies war in den beiden Kernen des Experiments erst nach 110 Tagen der Fall. Wenn im Experiment dennoch erhebliche

Mengen Phosphor an das Wasser abgegeben wurden, so lag das vermutlich an der erhöhten Turbulenz durch die N_2 -Begasung und am Zusammenbruch des CO_2 -Systems mit all seinen geochemischen und mikrobiologischen Folgen (z. B. auf die Bakterienflora an der Grenzfläche Sediment/Wasser).

- Die Beobachtung der Reduktion des Sediments von "unten her" findet ihre Bestätigung auch darin, daß die Sedimentoberfläche der meisten Kerne, die während der Stagnation im September 1982 entnommen wurden, noch leicht braun gefärbt war (s. Kap. 5.2.3.2). An der Sedimentoberfläche leben fakultativ anaerobe Bakterien, die nach Verbrauch des Sauerstoffs aus energetischen Gründen zuerst Nitrat reduzieren, bevor sie Eisen-III-Hydroxid als Elektronenakzeptor verwenden (HANSELMANN 1984, HAKANSON 1983, JONES 1982). Solange ausreichend Nitrat vorhanden ist, bleibt das braun gefärbte Eisen-III-Hydroxid also an der Sedimentoberfläche erhalten. HERBERT (1974) beschreibt ausführlich die anaerobe Nitrat-Dissimilation in Sedimenten. Die Dissimilation von NO_3^- beginnt bei Eh-Werten unterhalb 300 mV (MEEK et al., 1969). Die Existenz einer anaeroben Sedimentmikrozone mit Fe-III-Hydroxid an der Grenzfläche Sediment-Wasser wird auch von HAYES (1952), GORHAM (1958) und MORTIMER (1942) beschrieben. Nach HAYES (1952) liegen die Eh-Werte in dieser Mikrozone zwischen 100 und 400 mV. $Fe(OH)_3$ ist nach JONES (1982) oberhalb ca. 50 mV stabil, freier Sauerstoff tritt erst oberhalb 300 mV auf (s. Abb. 36, S. 70).
- Wie die pH/E_h -Messungen zeigten (s. Kap. 5.2.3.2), war selbst im tiefsten Becken des Obertrumer Sees im September 1982 in den Oberflächensedimenten noch Eisen-III-Hydroxid die stabile Phase im Fe-System, was in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen der o. g. Autoren steht. Eine Mobilisation des an Eisen gebundenen Phosphors ist demnach aus den Sedimenten des Obertrumer Sees nicht zu erwarten.

Bei der Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse des Experiments auf das natürliche System muß ferner beachtet werden, daß die kontinuierliche Sedimentation von Planktondetritus und Kalzit nicht simuliert wurde. Zudem muß angenommen werden, daß im natürlichen System eine Reihe weiterer mikrobiologischer Prozesse an der Grenzfläche Sediment/Wasser die P-Rücklösung verzögert oder gar verhindert. Diese Prozesse wurden im Experiment durch die anfänglich kontinuierliche N_2 -Begasung und die damit verbundene pH-Erhöhung offenbar empfindlich gestört, wenn nicht ausgeschaltet.

5.2.5.1.2 Zweites P-Flux-Experiment, Sommer 1984 (OT 58 A-D)

Die kritische Betrachtung des beschriebenen P-Flux-Experimentes machte es notwendig, die Versuche zur P-Rücklösung zu wiederholen. Dabei mußte die Bedeutung der Mikroorganismen an der Grenzfläche Sediment/Wasser für die P-Rücklösung besondere Beachtung finden. Es sollten daher bei der Wiederholung des Experiments starke Schwankungen des pH-Wertes infolge der N_2 -Begasung vermieden werden, weil gerade Bakterien äußerst pH-sensibel reagieren.

Verlauf des zweiten P-Flux-Experiments

Im April 1984 (Vollzirkulation) wurden aus dem Profundal des Obertrumer Sees vier Sedimentkerne (OT 58 A-D) entnommen. Im temperaturkonstantem Labor ($5^\circ C$) wurden zwei Kerne kontinuierlich mit Luft belüftet (OT 58 A u. C), die zwei anderen Kerne (OT 58 B u. D) wurden jeweils nach der Entnahme von Wasserproben für 3 Minuten mit N_2 begast, was ausreichte, um das Wasser kontinuierlich anoxisch zu halten und außerdem nur zu einer geringfügigen Erhöhung des pH-Wertes führte.

Im Abstand von 5 Tagen wurden aus jedem Kern 10 ml Wasser entnommen und die Parameter pH, E_h und P_{gel} gemessen. Nach 80 Tagen war in den Kernen OT 58 A u. C (Simulation der Vollzirkulation) kein nennenswerter Anstieg des P_{gel} zu messen. In den Kernen OT 58 B u. D (Simulation der Stagnationsphase) war der P_{gel} -Gehalt von ca. 30 $\mu g/l$ auf ca. 1000 $\mu g/l$ angestiegen. Nach 90 Tagen war kein weiterer Anstieg des P_{gel} in den anoxisch gehaltenen Kernen mehr festzustellen.

Am 90. Tag des Experiments wurde das Wasser eines belüfteten Kerns (OT 58 C) und eines anoxischen Kerns (OT 58 D) mit Antibiotika (0,1 g Tetracyclin/l, 0,05 g Streptomycin/l und 0,005 g Nystatin/l) versetzt, um Mikroorganismen im Wasser und auf der Sedimentoberfläche abzutöten.

Nach zwei Tagen waren im Wasser und Oberflächensediment beider Kerne keine lebenden Bakterien mehr nachzuweisen (frdl. Hilfe von Dr. Andranician, Institut für Mikrobiologie d. Universität Göttingen). Im Bodenwasser des anoxisch gehaltenen Kerns OT 58 D kam es nun zu einem Anstieg des P_{gel} bis auf 3000 $\mu\text{g/l}$ innerhalb von 30 Tagen. Im belüfteten Kern OT 58 C veränderte sich der Gehalt an P_{gel} hingegen nur unwesentlich. In den nicht mit Antibiotika versetzten Kernen OT 58 A (belüftet) und OT 58 B (anoxisch) traten weiterhin keine bemerkenswerten Veränderungen gegenüber den Werten des 80. Tages mehr auf. In Abb. 42 ist der Versuchsaufbau und -verlauf zusammenfassend dargestellt. In den Tab. 51 - 54 sind die Meßdaten des 2. P-Flux-Experiments aufgeführt.

Abb. 42 zeigt deutlich, daß es in den aerob gehaltenen Sedimentkernen OT 58 A und C zu keiner nennenswerten Rücklösung von Phosphor kommt.

Im anaerob gehaltenen Kern OT 58 B waren zu Beginn des Versuchs 21 $\mu\text{g P/l}$ Bodenwasser enthalten. Bereits nach 90 Tagen stagnierte die Rücklösung weitestgehend. Nach 120 Tagen enthielt das Bodenwasser 1034 $\mu\text{g P/l}$: Ermittelt man aus den P-Gehalten die P-Frachten für das Anfangsvolumen von 967 ml Bodenwasser ergibt sich ein Anstieg der P-Fracht von 20,3 $\mu\text{g/967 ml}$ auf 1000 $\mu\text{g/967 ml}$.

Durch die 27,34 cm^2 große Oberfläche des Sediments gelangten in den 120 Tagen also 980 μg Phosphor in das Bodenwasser. Das entspricht einer Rücklösung von 0,36 g/m^2 in 120 Tagen.

Betrachten wir wieder den Bereich im See unterhalb 12 m Wassertiefe, dem etwa auch die Oberflächensedimente mit mehr als 600 ppm P_t zugeordnet werden können (3,77 Mio m^2 , s. Tab. 44, S. 82), ergibt sich im Experiment eine Gesamtrücklösung von 1357 kg Phosphor aus der Oberfläche von 3,77 Mio m^2 . Nach den Daten aus Tab. 44 entspricht das einem Anteil von 7,5 % des im Oberflächensediment gespeicherten Phosphors.

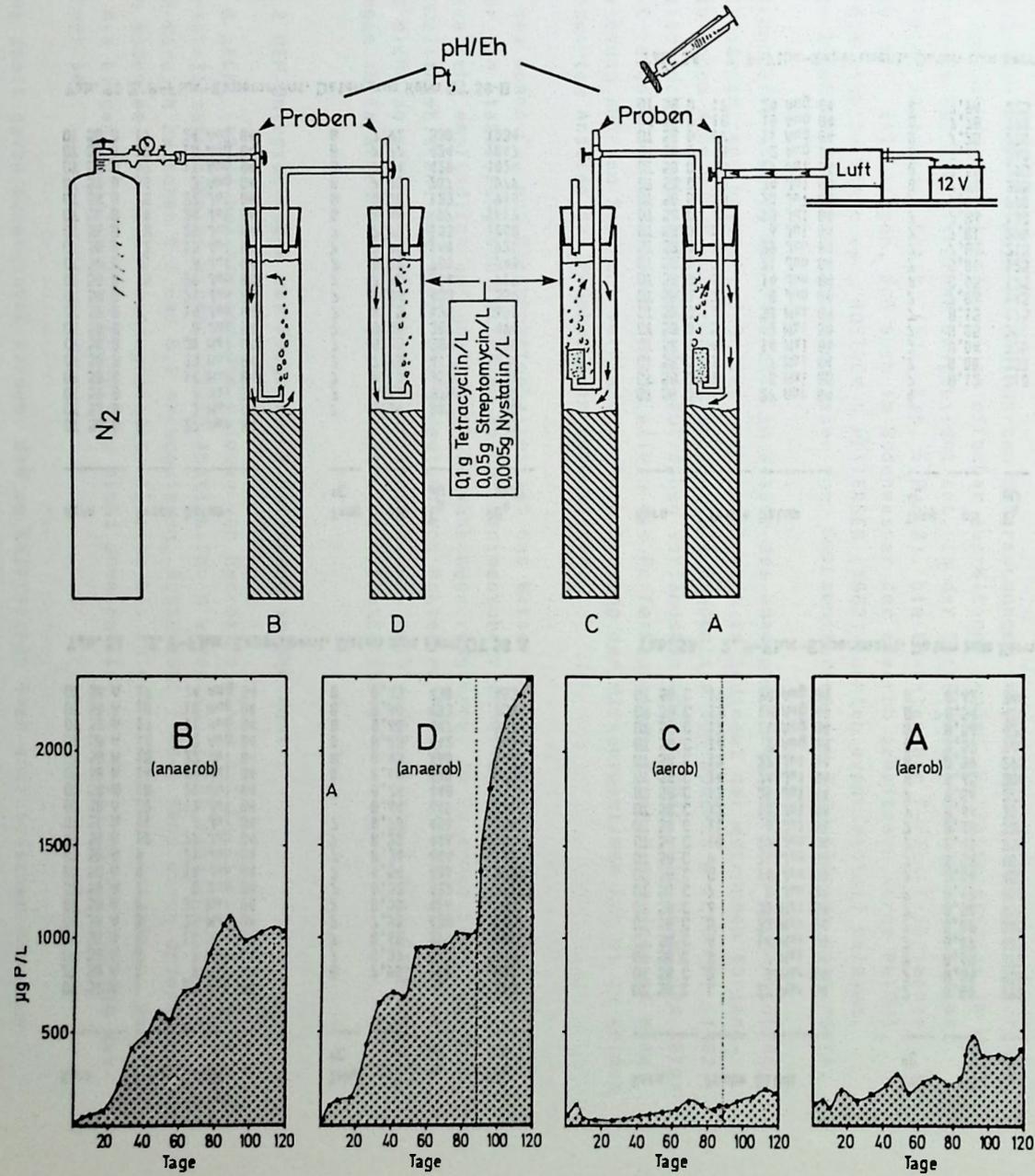
Für das Jahr 1984 liegen keine genauen Bestimmungen über den gesamten P_{gel} -Gehalt im Hypolimnion unterhalb 12 m Wassertiefe mehr vor. Es wird jedoch davon ausgegangen, daß der Wert nicht wesentlich von den im Jahre 1983 im See gemessenen 5,3 t abweicht. Der rückgelöste P-Anteil betrage demnach 26 % des Hypolimnion-Phosphors.

Aus dem ebenfalls anaerob gehaltenen Kern OT 58 D gelangten innerhalb von 90 Tagen, bezogen auf das Anfangsvolumen von 891 ml, insgesamt 886 μg Phosphor durch die 27,34 cm^2 Sedimentoberfläche. Das entspricht einer Rücklösung von 0,32 g/m^2 bzw. von 1206 kg/3,77 Mio m^2 . Nach den Daten aus Tab. 44 entspricht dies einer Rücklösung von 6,7 % des im Sediment gespeicherten Phosphors. Betrachtet man wieder das Wasservolumen des Hypolimnions unterhalb 12 m Tiefe mit seiner im See gemessenen P-Fracht von 5,3 t, folgt daraus, daß der aus dem Sediment rückgelöste Anteil bei knapp 23 % des Hypolimnion-Phosphors liegt.

Am 90. Tag des Experiments wurden die Bakterien im Bodenwasser und auf der Sedimentoberfläche abgetötet. Danach stieg der P_{gel} -Gehalt innerhalb von 30 Tagen auf 2456 $\mu\text{g/l}$ an. Bezogen auf das Anfangsvolumen von 891 ml entspricht das einer Gesamtrücklösung von 0,77 g/m^2 . Demnach wurden 58,4 % des nach 120 Tagen rückgelösten Phosphors erst nach dem Absterben der Bakterien an der Sedimentoberfläche mobilisiert, was ein guter Beweis für die effektive P-Pufferung durch Bakterien ist.

Da es im Experiment durch die zeitweise Begasung gelegentlich zu starken Wasserbewegungen kam und die natürlicherweise vorhandene Sedimentation von Planktondetritus und Karbonat fehlt, wird angenommen, daß die tatsächlich auftretende P-Rücklösung wesentlich geringer ist, als der experimentell ermittelte Anteil von 23 - 26 % an der gesamten Fracht des im Hypolimnion gelösten Phosphors. Ein Anteil von 5 bis maximal 10 % wird als realistisch angenommen.

Abb. 42 Versuchsaufbau und Verlauf des
2. P-Flux - Experiments



Kern	Probe Datum	Temp °C	pH	E _h mV	PO ₄ µg/l
OT 58 A 1	27 Apr 84				113
OT 58 A 2	3 Mai 84	8	7,90	298	132
OT 58 A 3	7 Mai 84	7	8,37	363	95
OT 58 A 4	14 Mai 84	7	8,69	398	181
OT 58 A 5	23 Mai 84	7	7,95	438	135
OT 58 A 6	30 Mai 84	7	8,50	426	188
OT 58 A 7	8 Jun 84	7	8,52	422	211
OT 58 A 8	14 Jun 84	7	8,54	436	273
OT 58 A 9	21 Jun 84	7	8,34	444	162
OT 58 A 10	29 Jun 84	7	8,23	446	234
OT 58 A 11	6 Jul 84	7	8,76	450	258
OT 58 A 12	13 Jul 84		8,64	449	211
OT 58 A 13	20 Jul 84	7	8,74	448	251
OT 58 A 14	24 Jul 84	8	8,68	428	378
OT 58 A 15	27 Jul 84	8	8,45	460	466
OT 58 A 16	2 Aug 84	8	8,65	442	363
OT 58 A 17	11 Aug 84	8	8,68	447	377
OT 58 A 18	18 Aug 84	8	8,60	433	358
OT 58 A 19	24 Aug 84	8	8,65	430	403

Tab. 51 2. P-Flux-Experiment, Daten zum Kern OT 58 A

Kern	Probe Datum	Temp °C	pH	E _h mV	PO ₄ µg/l
OT 58 B 1	27 Apr 84				21
OT 58 B 2	3 Mai 84	7	8,00	309	50
OT 58 B 3	7 Mai 84	7	8,13	378	57
OT 58 B 4	14 Mai 84	7	8,17	357	81
OT 58 B 5	23 Mai 84	7	7,98	417	220
OT 58 B 6	30 Mai 84	7	8,25	389	408
OT 58 B 7	8 Jun 84	7	8,05	387	494
OT 58 B 8	14 Jun 84	7	8,15	425	601
OT 58 B 9	21 Jun 84	7	8,06	433	559
OT 58 B 10	29 Jun 84	7	7,96	294	719
OT 58 B 11	6 Jul 84	7	8,00	280	745
OT 58 B 12	13 Jul 84	7	7,95	144	921
OT 58 B 13	20 Jul 84	7	7,93	153	1068
OT 58 B 14	24 Jul 84	8	8,06	97	1112
OT 58 B 15	27 Jul 84	8	8,00	123	916
OT 58 B 16	2 Aug 84	8	7,88	207	979
OT 58 B 17	11 Aug 84	8	7,84	429	1024
OT 58 B 18	18 Aug 84	8	7,77	424	1047
OT 58 B 19	24 Aug 84	8	7,92	330	1034

Tab. 52 2. P-Flux-Experiment, Daten zum Kern OT 58 B

Kern	Probe Datum	Temp °C	pH	E _h mV	PO ₄ µg/l	Antibiotika
OT 58 C 1	27 Apr 84	7	8,00	298	45	
OT 58 C 2	3 Mai 84	7	8,34	358	107	
OT 58 C 3	7 Mai 84	7	8,68	372	37	
OT 58 C 4	14 Mai 84	7	8,09	405	32	
OT 58 C 5	23 Mai 84	7	8,09	385	23	
OT 58 C 6	30 Mai 84	7	8,56	405	39	
OT 58 C 7	8 Jun 84	7	8,49	400	47	
OT 58 C 8	14 Jun 84	7	8,54	430	59	
OT 58 C 9	21 Jun 84	7	8,53	405	76	
OT 58 C 10	29 Jun 84	7	8,41	355	88	
OT 58 C 11	6 Jul 84	7	8,68	325	131	
OT 58 C 12	13 Jul 84	7	8,66	305	113	
OT 58 C 13	20 Jul 84	7	8,56	275	81	
OT 58 C 14	24 Jul 84	8	8,65	300	110	
OT 58 C 15	27 Jul 84	8	8,39	295	105	*
OT 58 C 16	2 Aug 84	8	8,52	360	134	*
OT 58 C 17	11 Aug 84	8	8,56	425	149	*
OT 58 C 18	18 Aug 84	8	8,54	420	192	*
OT 58 C 19	24 Aug 84	8	8,62	340	162	*

Tab. 53 2. P-Flux-Experiment, Daten zum Kern OT 58 C

Kern	Probe Datum	Temp °C	pH	E _h mV	PO ₄ µg/l	Antibiotika
OT 58 D 1	27 Apr 84	4			29	
OT 58 D 2	3 Mai 85	7	8,12	310	110	
OT 58 D 3	7 Mai 84	7	8,00	353	139	
OT 58 D 4	14 Mai 84	7	8,04	320	147	
OT 58 D 5	2 Mai 84	7	8,05	390	427	
OT 58 D 6	30 Mai 84	7	8,15	175	643	
OT 58 D 7	8 Jun 84	7	7,86	145	714	
OT 58 D 8	14 Jun 84	7	8,05	125	681	
OT 58 D 9	21 Jun 84	7	8,01	125	942	
OT 58 D 10	29 Jun 84	7	7,84	215	955	
OT 58 D 11	6 Jul 84	7	7,81	280	1021	
OT 58 D 12	13 Jul 84	7	7,86	160	1021	
OT 58 D 13	20 Jul 84	7	7,83	290	1009	
OT 58 D 14	24 Jul 84	8	7,96	305	1023	
OT 58 D 15	27 Jul 84	8	7,59	295	1379	*
OT 58 D 16	2 Aug 84	8	7,67	260	1799	*
OT 58 D 17	11 Aug 84	8	7,75	280	2186	*
OT 58 D 18	18 Aug 84	8	7,78	290	2303	*
OT 58 D 19	24 Aug 84	8	7,94	225	2392	*

Tab. 54 2. P-Flux-Experiment, Daten zum Kern OT 58 D

Mit dem 2. Experiment konnte belegt werden, daß Mikroorganismen an der Grenzfläche Sediment-Wasser in erheblicher Weise die P-Rücklösung aus dem Sediment behindern. Selbst wenn es in der tieferen Sedimentsäule zur P-Rücklösung und Mobilisation kommt, wird der Phosphor an der Sedimentoberfläche von den Mikroorganismen aufgenommen und zur Reproduktion verwertet bzw. gespeichert (HAYES & PHILLIPS 1958, HAYES, 1963, HODSON 1973, DOREMUS & CLESCERI 1982, HANSELMANN 1984).

DOREMUS (1978) und DOREMUS & CLESLERI (1982) haben ausführlich die P-Pufferkapazität der oxidierten Zone im oligotrophen Lake Gorge beschrieben. Das Sediment wirkt als P-Puffer, weil der größte Teil des Phosphors ständig in der lebenden Bakterienbiomasse des Sediments cycliert wird und zudem ein Teil des Phosphors durch Adsorption an $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gebunden wird. Für anaerobe Sedimente eutropher Seen schätzen die genannten Autoren die P-Pufferkapazität geringer ein, weil dort die mikrobiellen Prozesse weniger intensiv und mit geringerer Geschwindigkeit ablaufen und außerdem die Adsorption an $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ausfällt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, daß an der Grenzfläche Sediment/Wasser infolge eines offenbar ausreichend großen Nitratreservoirs im Hypolimnion eine Sedimentmikrozone ausgebildet ist, in der $\text{Fe}(\text{OH})_3$ auch dann stabil bleibt, wenn freier Sauerstoff fehlt. (Vgl. Kap. 5.2.3.2). Die Eh-Daten der P-Flux-Experimente (s. Tab. 51 - 54) belegen, daß auch im Bodenwasser der anaerob gehaltenen Kerne $\text{Fe}(\text{OH})_3$ stets die stabile Phase war. BOSTRÖM & PETERSEN (1982) konnten experimentell belegen, daß die Zufuhr von Nitrat ins Bodenwasser von Sedimentkernen die P-Rücklösung verhindert.

Der sprunghafte Anstieg der P-Gehalte im Wasser des anaeroben Kerns OT 58 D nach Abtötung der Mikroorganismen beweist, daß diese sehr wohl auch im Sediment der eutrophen Vorlandseen in hohem Maße zur P-Pufferung beitragen. Die Ergebnisse von DOREMUS & CLESCERI (1982) sind also auch auf die Sedimente der eutrophen Vorlandseen übertragbar. Die Daten des Kerns OT 58-C zeigen, daß im aeroben System allein die Pufferkapazität durch Mineralphasen eine P-Rücklösung aus dem Sediment verhindert. Nach Abtötung der Mikroorganismen kam es zu keinem nennenswerten Anstieg der P-Gehalte im Bodenwasser.

Wegen des hohen Ca- und Bikarbonatgehaltes ist das Wasser in den Vorlandseen gut gepuffert, was für die Etablierung von Bakterien an der Sedimentoberfläche von großer Bedeutung ist, da diese sehr empfindlich auf größere pH-Schwankungen reagieren. In Ca-armen Seen, wie z.B. in Kristallingebieten, mag daher die Bedeutung von Bakterien für die Fixierung von P im Sediment nicht so groß sein wie in den Vorlandseen, was auch durch höhere P-Flux-Raten bei Messungen am Ca-armen Piburger See belegt wird (PSENNER 1984).

5.2.5.2 REM-Untersuchungen zur Frage der P-Pufferung im Sediment

STUMM & LECKI (1971) beschreiben die Bildung von Hydroxiapatiten auf Kalzitkristallen, die als Kristallisationskeime wirken. Diese Apatitbildung wurde von ihnen experimentell für den pH-Bereich zwischen 6,8 und 8,3 nachgewiesen. ROSSKNECHT (1980) fand durch Untersuchungen im Bodensee, daß epilimnisch gebildete Kalzite bis zu 0,1 % Phosphor enthalten. Damit trägt die biogene epilimnische Entkalkung nicht unwesentlich zur P-Elimination aus dem Wasserkörper bei.

Es kann somit davon ausgegangen werden, daß in kalkreichen Seen anorganischer Phosphor nicht ausschließlich an Eisen gebunden ist, sondern auch bedeutende Mengen an Kalzit fixiert sind. Die Mobilität des an Kalzit gebundenen Phosphors ist jedoch nicht in dem Maße vom Redoxpotential abhängig wie die des an Eisen gebundenen, weil der Phosphor im Kalzit homogen verteilt und nicht nur adsorptiv an der Oberfläche gebunden ist.

REM-Untersuchungen sollten klären, ob im Sediment der Vorlandseen nennenswerte Mengen Phosphor an Ca-Phasen gebunden sind, was neben der bakteriellen Pufferung eine weitere Erklärung für den geringen P-Flux aus dem Sediment wäre.

Sedimentproben aus den Kernen OT 62 (Profundal) und OT 63 (Litoral) und aus dem Profundal des Piburger Sees (Ca-freies Einzugsgebiet im Kristallin des Ötztals, Tirol) wurden, wie unter 3.3.10 beschrieben, aufbereitet. Diese Untersuchungen wurden im Labor für Rasterelektronenmikroskopie der Univ. Oldenburg (Prof. Krumbein) an einem REM mit energiedispersivem System durchgeführt. Damit war es möglich, einzelne Elemente in Mineralen halbquantitativ zu analysieren. Ziel der Untersuchungen war es, Bildausschnitte, auf denen sowohl Fe-Phasen als auch Kalzitkristalle zu erkennen waren, auf die Verteilung des Phosphors hin zu analysieren, um zu erfahren, an welche Mineralphasen der Phosphor vorzugsweise gebunden ist. Als Fe-Phasen wurden die gut erkennbaren, oberflächlich oxidierten Pyritframbide (s. Kap. 5.2.3.3) untersucht. Die Identifikation erfolgte durch Analyse von Fe und S. Kalzite wurden morphologisch und mittels Ca- und Si-Analysen sicher von Quarzkörnern und anderen detritischen Mineralen unterschieden.

Taf. 3 zeigt in Fig. a einen Pyritframboid und Kalzitkristalle aus 2,5 cm Sedimenttiefe des Litoralkerns OT 63. In den Fig. b - d ist die Verteilung der Elemente Ca, Fe und P dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich, daß der Phosphor auf der Oberfläche der Ca-Phasen in mindestens ebenso hoher Konzentration vorhanden ist wie auf der oxidierten Oberfläche des Pyrits.

Taf. 3, Fig. e zeigt einen Pyritframboid aus 20 cm Sedimenttiefe des Litoralkerns OT 63. In den Fig. f - g ist die Verteilung von Fe und P dargestellt; man erkennt, daß hier die Oberfläche des Pyrits nahezu frei von Phosphor ist, während an den Kalzitkristallen noch Phosphor gebunden ist. Hier ist in der reduzierten Zone des Sediments der Phosphor vom Eisen abgegeben worden, während eine Rücklösung von der Ca-Phase offenbar nicht - zumindest nicht in dem Ausmaß - stattgefunden hat, weil sich der Phosphor in den Kalzitkristallen nicht nur an der Oberfläche befindet.

Taf. 4, Fig. a zeigt einen Pyritframboid vom Oberflächensediment des Profundalkerns OT 62. Fig. b belegt, daß auch an der Oberfläche von Profundalsedimenten Phosphor an Eisen-Phasen gebunden ist. In Taf. 4, Fig. c ist ein Mineralbestand aus 40 cm Sedimenttiefe desselben Kerns dargestellt. Der Elementscan von Eisen (Fig. d), Schwefel (Fig. e) und Phosphor (Fig. g) zeigt, daß in dieser Sedimenttiefe der Phosphor von der Oberfläche des Pyrits rückgelöst ist, während er an den Kalziten noch deutlich vorhanden ist.

Vergleichende Untersuchungen am Sediment des Piburger Sees zeigten, daß in allen Sedimenttiefen (auch an der Oberfläche) kein Phosphor an die Pyrite gebunden war. Aufgrund des geologischen Einzugsgebietes (Kristallin) befinden sich in diesem Sediment keine Ca-Mineralen. Die von PSENNER (1984) gefundene P-Rücklösung aus diesem Sediment wird durch die beschriebene Beobachtung bestätigt. Aufgrund der schlechten pH-Pufferung Ca-armer Seen ist es möglich, daß auch die bakterielle P-Pufferung im Piburger See nicht in dem Ausmaß wirkt, wie dies offenbar in den Trumer Seen der Fall ist.

5.2.5.3 Fazit

Eine Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment der Vorlandseen findet nur in begrenztem Umfang statt. Experimentell wurde ermittelt, daß im tieferen Hypolimnion max. 7 % des im Oberflächensediment gebundenen Phosphors während der Stagnation rückgelöst wird. Diese Menge rückgelösten Phosphors beträgt rechnerisch bis zu 25 % des im Hypolimnion gelösten Phosphors. Es war im Experiment jedoch nicht möglich, die natürlichen Bedingungen des Ökosystems See exakt zu simulieren, so daß aus folgenden Gründen von einer deutlich geringeren Rücklösungsrate ausgegangen werden muß:

1. Es fehlte die kontinuierliche Sedimentation von Planktondetritus und Kalzit.
2. Infolge der Begasung traten z. T. erheblichere Turbulenzen im Bodenwasser auf, als sie in der Natur zu erwarten sind.

3. Durch die bakterielle Nitratreduktion und fehlende Nitratzufuhr ins Bodenwasser kam es vermutlich zu einem Nitratdefizit des Bodenwassers, wodurch die Funktion der oxidierten Mikrozone an der Grenzfläche Sediment/Wasser nicht in dem Maße aufrechterhalten werden konnte, wie es im See der Fall ist, wo am Ende der Stagnation noch $45 \mu\text{g}$ Nitrat/l Bodenwasser zu messen waren (JÄGER, 1985).

Es wird daher angenommen, daß die experimentell ermittelte P-Rücklösung erheblich höher ist als im natürlichen System, wo sie vermutlich nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Verantwortlich für die gute P-Pufferung des Sediments in den Vorlandseen sind:

- Stabile Bakterienmatten an der Grenzfläche Sediment/Wasser, die in tieferen Sedimentschichten rückgelösten Phosphor speichern.
- Eine Mikrozone an der Grenzfläche Sediment/Wasser, an der $\text{Fe}(\text{OH})_3$ stabil ist und P adsorptiv bindet. Diese Mikrozone bleibt solange stabil, wie den fakultativ anaeroben Bakterien ausreichend Nitrat zur Verfügung steht.
- Kalzitkristalle im Sediment, die Phosphor nahezu in gleichem Ausmaß binden wie Eisen. Diese P-Bindung ist redoxunabhängig und damit wesentlich stabiler als die Fixierung an Eisen-Phasen. Zudem ist der Phosphor in den Kalzitkristallen homogen verteilt und nicht nur auf den Kristalloberflächen zu finden.

5.2.6 Experimente zur Ermittlung der Sauerstoff-Zehrung des Sediments

Während der Stagnation im Herbst 1983 und 1984 wurden Profundkerne aus dem Obertrumer See und dem Grabensee entnommen (OT 45-0, GR 20-0) und deren Bodenwasser anschließend mit Luft bis zur O_2 -Sättigung belüftet. Es sollte die P-Ausfällung aus dem Bodenwasser und die O_2 -Zehrung durch das anaerobe Sediment bestimmt werden.

5.2.6.1 P-Ausfällung durch Belüftung

Der primäre Gehalt an gelöstem Phosphor im Bodenwasser der Kerne OT 45-0 und GR 20-0 betrug 246 bzw. 298 $\mu\text{g}/\text{l}$. Bereits nach einmaliger Belüftung bis zur O_2 -Sättigung fielen die Gehalte auf 34 bzw. 36 $\mu\text{g}/\text{l}$ ab. Wiederholte Sättigung des Bodenwassers mit O_2 führte zu keiner weiteren Abnahme des gelösten Phosphors im Bodenwasser.

Dies stimmt mit den Messungen von JÄGER (1986) an den Vorlandseen überein. Dabei zeigte sich, daß schlagartig mit der Vollzirkulation im Spätherbst die Gesamtfracht des gelösten Phosphors im See abnimmt. Im Falle des Obertrumer Sees nimmt JÄGER (1986) an, daß ein Teil des Phosphors von Cyanophyceen gespeichert wird und im Wasserkörper verbleibt. Für den Waldersee errechnete JÄGER (1986) eine P-Fällung während der herbstlichen Vollzirkulation von 0,6 t.

5.2.6.2 Sauerstoff-Zehrung

Während des 2. P-Flux-Experiments wurde beobachtet, daß bei kontinuierlicher Belüftung des Bodenwassers die Sedimentoberfläche innerhalb von wenigen Tagen bis zu einer Tiefe von max. 3 - 4 mm oxidiert wird und sich braun verfärbt. Danach fand selbst bei kontinuierlicher Belüftung über mehrere Monate keine weitere Oxidation des Sediments mehr statt.

Während der O_2 -Zehrungsexperimente wurde das Bodenwasser mit Luft bis zur O_2 -Sättigung belüftet, was ca. 20 Minuten dauerte. Innerhalb von 24 Stunden ging der O_2 -Gehalt dann kontinuierlich auf Werte zwischen 1 und 2 mg/l zurück. Danach wurde erneut mit Luft bis zur O_2 -Sättigung belüftet.

Auch nach mehreren Tagen änderte sich an dem beschriebenen Verlauf nichts. Es fand stets eine O_2 -Zehrung von ca. 7 mg/l 24 h statt, obwohl keine weitere Oxidation des Sediments zu beobachten war.

Die Erfahrungen aus den P-Flux-Experimenten legten die Vermutung nahe, daß Mikroorganismen für die intensive O_2 -Zehrung verantwortlich waren. Zur Verifizierung wurde in einem Experiment nach 10 Tagen das Bodenwasser mit Antibiotika versetzt. Zwei Tage später betrug die O_2 -Zehrung nur noch ca. 1 mg/l 24 h (s. Abb. 43).

Selbst eine intensive Belüftung führt also nicht zu einer durchgreifenden Oxidation des Faulschlammes am Boden der Seen. Durch die Belüftung wird die Vermehrung fakultativ anaerober Mikroorganismen gefördert, die aus energetischen Gründen ihren Stoffwechsel umstellen und den Sauerstoff selbst verbrauchen, wodurch die Oxidation des Sediments verhindert wird.

Eine Zwangsbelüftung des Hypolimnions während der Stagnation ist also in den Vorlandseen nicht sinnvoll, weil bereits natürlicherweise an der Grenzfläche Sediment/Wasser eine oxidierte Sedimentmikrozone besteht, die die Rücklösung von Phosphor weitestgehend verhindert. Eine Zwangsbelüftung würde die Eindringtiefe dieser Zone in das anoxische Sediment nicht wesentlich vergrößern. Hypolimnionbelüftung wird erst dann sinnvoll, wenn infolge von Sauerstoff- und Nitratmangel im Hypolimnion die bakterielle Reduktion von Fe-III-Hydroxid einsetzt und dadurch die oxidierte Sedimentmikrozone instabil wird.

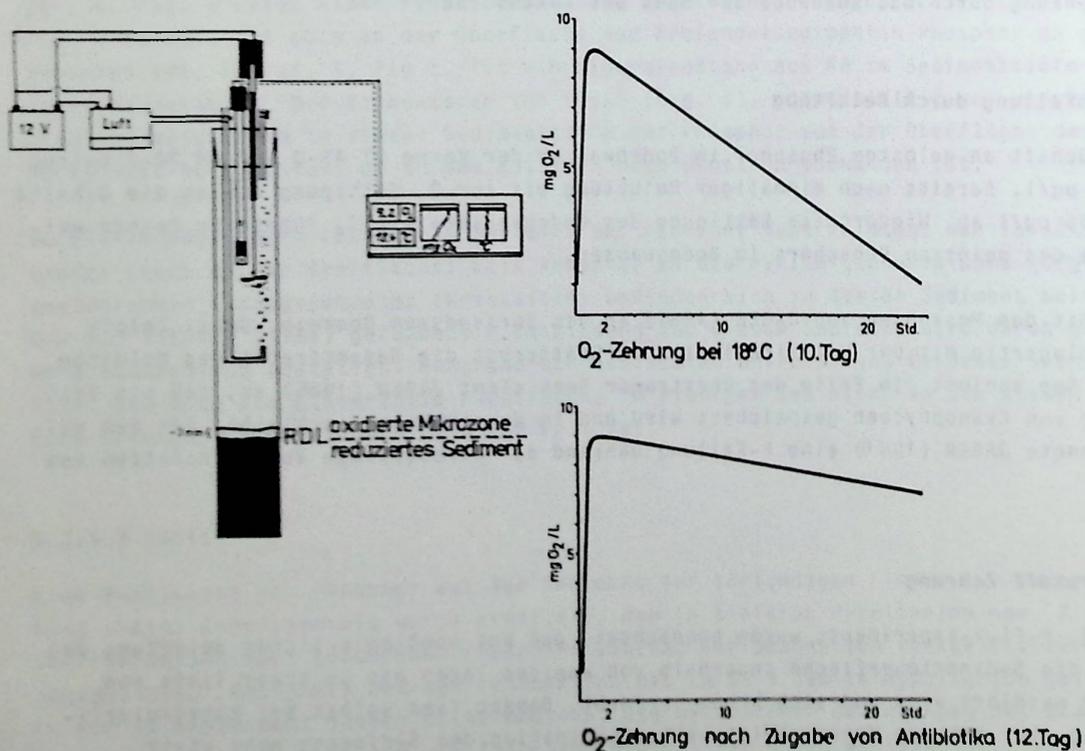


Abb. 43 Versuchsaufbau und Verlauf des O_2 -Zehrungsexperiments

6. Konsequenzen für die Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen

Wie bereits in Kap. 2.4 erwähnt, zeigt die limnologisch/hydrochemische Situation der Vorlandseen im Hinblick auf die Eutrophierung seit 1982 deutliche Tendenzen zur Besserung. Dies wird auch von JÄGER (1986) aufgrund neuester hydrochemischer Messungen so eingeschätzt und ist mit Sicherheit auf die Wirkung der Sanierungsmaßnahmen im Seeneinzugsgebiet zurückzuführen. Immer mehr kommunale und industrielle Abwässer wurden in den letzten Jahren zentral gesammelt, einer Kläranlage zugeführt und gereinigt in den Vorfluter Mattig abgegeben.

War 1982 noch der punktuelle P-Eintrag in die Seen größer als der diffuse (SCHINDLBAUER 1986), so wird sicher in absehbarer Zeit der diffuse Nährstoffeintrag aus dem Bereich der Landwirtschaft die größte Nährstoffquelle im Ökosystem darstellen.

Es wäre daher über die erfolgten Maßnahmen hinaus erforderlich, die Aufbringung von Gülle und Mineraldünger im unmittelbaren Einzugsbereich der Seen und ihrer Zuflüsse zu reduzieren. Im Bereich der Moore müssen weitere Entwässerungsmaßnahmen unterbleiben, um den diffusen Nährstoffeintrag aus diesen Gebieten nicht zu vergrößern.

Die interne "Seedüngung" durch Rücklösung von Nährstoffen aus dem Sediment spielt nach den Ergebnissen der o. g. experimentellen Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle.

Von großer Bedeutung ist offenbar der "kurzgeschlossene" Nährstoffkreislauf, der nach den Messungen von JÄGER (1986) vor allem im Obertrumer See die Speicherung von Nährstoffen im Sediment stark reduziert.

Durch eine weiterhin deutlich vorangetriebene Reduzierung der externen Nährstoffzufuhr in die Seen kann jedoch mittelfristig eine Verringerung der P-Frachten im kurzgeschlossenen Kreislauf erreicht werden. Zum einen werden stets geringe Mengen über den Seeablauf entfernt (s. Kap. 5.2.4.1), zum anderen wird während der Zirkulationsphasen ein Teil des Phosphors aus dem Wasser an das Sediment abgegeben. Dieser Effekt ist nach den Messungen von JÄGER (1986) besonders intensiv am Wallersee und am Grabensee ausgeprägt.

Mit abnehmenden Nährstoffgehalten im "kleinen Nährstoffkreislauf" wird künftig die O_2 -Zehrung und der Nitratschwund im Hypolimnion geringer werden, was die Stabilität der oxidierten Mikrozone an der Grenzfläche Sediment/Wasser verbessert. Die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment wird daher in Zukunft noch weiter an Bedeutung abnehmen, so daß Restaurierungsmaßnahmen (Hypolimnionbelüftung oder Nitrateinleitung) am Sediment zur Vermeidung einer P-Rücklösung nicht notwendig werden.

Je konsequenter die externen P-Einträge (punktuelle und diffuse) reduziert werden, desto schneller werden auch die Seen genesen.

Es sollten in Zukunft allerdings während jeder Sommerstagnation die O_2 - und NO_2 -Gehalte des Hypolimnions sowie die Redoxpotentiale an der Sedimentoberfläche gemessen werden, um zu sehen, ob sich die O_2 -Versorgung des Hypolimnions in dem Maße verbessert, wie sich die Nitratfrachten infolge der Sanierungsmaßnahmen verringern. Sollte es zu einem Nitratmangel kommen, wenn gleichzeitig der O_2 -Gehalt des Hypolimnions noch unter $0,2 \text{ mg/l}$ liegt, muß damit gerechnet werden, daß Fe-III-Hydroxid an der Sedimentoberfläche reduziert wird und der daran gebundene Phosphor ins Hypolimnion gelangt.

7 Literaturverzeichnis

→ = nicht zitiert

AHLGREN, I. (1977): Role of the Sediments in the Process of Recovery on an Eutrophic Lake.- in: GOLTERMAN (ed.), (1977): Interactions between Sediments and Fresh Water.- 372-378. The Hague.

ALLGEIER, R. J.; PETERSON, W. H.; JUDAY, C.; BIRGE, E. A. (1932): The Anaerobic Fermentation of Lake Deposits.- Int. Rev. ges. Hydrobiol., 26, 444-461.

ANAGNOSTIDIS, K.; OVERBECK, J. (1966): Methanoxidierer und hypolimnische Schwefelbakterien. Studien zur ökologischen Biocönötik der Gewässerorganismen.- Ber. dt. bot. Ges., 79, 163-175.

ARBERER, F.; BRAUMÜLLER, E. (1949): Die miozäne Molasse am Alpennordrand im Oichten- und Mattigtal nördlich Salzburg.- Jb. Geol. Bundesamt, 92, 129-145, Wien. ←

ARBERER, F.; BRAUMÜLLER, E. (1958): über Helvetikum und Flysch im Raume nördlich Salzburg.- Mitt. der Geol. Ges. in Wien, 49, 1-39. ←

BAUMGARTNER, P.; TICHY, G. (1981): Geologische Karte des südwestlichen Innviertels und des nörlichen Flachgaaues, 1 : 50.000.- Amt der O.-Ö. Landesregierung, Linz. ←

BAUMGARTNER, P.; TICHY, G. (1981): Erläuterungen zur geologischen Karte des südwestlichen Innviertels.- Amt der O.-Ö. Landesregierung, 29 S., Linz. ←

BENGTSON, L. (1975): Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment.- Verh. Internat. Verein. Limnol., 19, 1107-1116.

BLOESCH, J. (1974): Sedimentation und Phosphorhaushalt im Vierwaldstättersee (Horwer Bucht) und im Rotsee.- Schweiz. Z. Hydrol., 36, 71-186.

BOSTRÖM, B. & PETTERSSON, K. (1982): Different patterns of phosphorus release from lake sediments in laboratory experiments.- Hydrobiologia, 92, 415-429.

BREHM, V. (1906): Beiträge zur Planktonforschung alpiner Seen.- Verh. zool. bot. Ges. Wien, 4. Teil, 56 S. ←

BREZONIK, P. L.; HARPER, C. L. (1969): Nitrogen Fixation in Some Anoxic Lacustrine Environments.- Science, 164, 1277-1278.

BREZONIK, P. L. (1972): Nitrogen: Sources and Transformations in natural waters.- in: ALLEN, H. E. & KRAMER, J. R. (ed.): Nutrients in natural waters.- Interscience, New York.

BRUNSKILL, G. J. (1969): Fayetteville Green Lake, New York. II: Precipitation and sedimentation of calcite in a meromictic lake with laminated sediments.- Limnology and Oceanography, 14, 830-847.

CZERNIN-CHUDENITZ, C. (1980): Zur Limnologie der Vorlandseen - Ergänzende Beobachtungen des Hydrobiologischen Dienstes seit 1958.- Stud. Forsch. Salzburg, 1, 105-110. ←

CZERNIN-CHUDENITZ, C. (1986): Die Entwicklung des Phytoplanktons in den Salzburger Vorlandseen.- Stud. Forsch. Salzburg, 2/1986, 385-389.

DANECKER, E. (1980): Untersuchungen des Obertrumer Sees (Salzburg): in den Jahren 1961-1966.- Österreichs Fischerei, 33 (7), 121-127. ←

DAVOUD, E. (1976): Evolution diagenetique du carbonate de calcium dan les sediments holocenes du lac de Morat (Suisse).- *Eclogae Geol. Helv.*, 69, 190-196.

DEUSER, W. G.; DEGENS, E. T.; HARVEY, G. R.; RUBIN, M. (1973): Methan in lake Kivu: New data bearing on its origin.- *Science*, 181, 51-53.

DOPSCH, H. (1981): Geschichte Salzburqs, Bd. I, Teil 1: Vorgeschichte, Altertum, Mittelalter.- 663 S., Salzburg.

DOREMUS, C.; CLESCERI, L. S. (1982): Microbial metabolism in surface sediments and its role in the immobilization of phosphorus in oligotrophic lake sediments.- *Hydrobiologia*, 91, 261-268.

EINSELE, W. (1936): über die Beziehungen des Eisenkreislaufs zum Phosphatkreislauf im eutrophen See.- *Arch. Hydrobiol.*, 29, 664-668.

ELLENBERG, H. (1978): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht.- Ulmer Verlag, 2. Aufl., 981 S., Stuttgart.

FENCHEL, T. M.; BLACKBURN, T. H. (1979): Bacteria and Mineral Cycling.- Academic Press, 225 S. London.

FINDENEKG, I. (1966): Die österreichischen Alpenrandseen.- Förderung Europäischer Gewässerschutz, Informationsblatt Nr. 14, 11-17.

FINDENEKG, I. (1967): Die Verschmutzung österreichischer Alpenrandseen aus biologisch - chemischer Sicht.- *Ber. Raumforsch. u. Raumplan*, 11 (4), 12 S., Salzburg.

FINDENEKG, I. (1971): Unterschiedliche Formen der Eutrophierung von Ostalpenseen.- *Schweiz. Z. Hydrol.*, 33, 85-95.

FINDENEKG, I. (1972): Die Auswirkung der Eutrophierung einiger Ostalpenseen auf die Lichttransmission ihres Wassers.- *Wetter und Leben*, 24, 110-118.

FINDENEKG, I. (1973): Das Vorkommen und biologische Verhalten der Blaualge *Oscillatoria rubescens* in den österreichischen Alpenseen.- *Carinthia II* 163./83., 317-330.

FLANAGAN, F. J. (1973): 1972 Values for international geochemical reference samples.- *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1189-1200.

FREVERT, T. (1979): Phosphorus and Iron Concentrations in the Interstitial Water and Dry Substances of Sediments of Lake Constance (Obersee).- *Archiv für Hydrobiologie*, Suppl. 55, 298-323.

FUGGER, E. (1890): Salzburger Seen.- *Mitt. Ges. Salzburger Landesk.*, 30, 142-144., Salzburg.

GASCHOTT, O. (1927): Mollusken des Litorals der Alpen-Vorlandseen im Gebiet der Ostalpen.- *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 17, 304-335.

GERMATSIDIS, I. (1985): Die Sedimente des Wallerseees.- Diplomarbeit, Universität Göttingen, 74 S. (unveröff.).

GOLTERMAN, H. L. (1975): *Physiological Limnology*.- Elsevier, Amsterdam.

GOLTERMAN, H. L. (1976): Sediments as a source of phosphate for algal growth.- in: GOLTERMAN, H. L. (ed.): *Proceedings of an international symposium on "Interactions between sediment and fresh water"*, Dr. W. Junk Publishers, 268-293, Amsterdam.

- GORHAM, E. (1958): Observations on the formation and breakdown of the oxidized microzone at the mud surface in lakes.- *Limnology and Oceanography*, 3, 291-298.
- HAKANSON, L. & JANSSON, M. (1983): Principles of Lake Sedimentology.- Springer-Verlag, 316 S., Heidelberg.
- HANSELMANN, K. (1984): Bakterielle Bio-Geo-Chemiker in Seesedimenten.- *Neue Züricher Zeitung*, 8. August 1984, S. 45.
- HARDIE, L. A.; SMOOT, J. P.; EUGSTER, H. P. (1978): Saline Lakes and their Deposits: a Sedimentological Approach.- *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 2, 7-41.
- HAYES, F. R. (1963): The Role of Bacteria in the mineralization of Phosphorus in Lakes.- in: OPPENHEIMER, C. H. (ed.): *Symposium on Marine Microbiology*.- C. C. Thomas, 654-663, Springfield.
- HAYES, F. R.; McCARTER, J. R.; CAMERON, M. L.; LIVINGSTONE, D. A. (1952): On the Kinetics of phosphorus exchange in Lakes.- *J. Ecol.*, 40, 202-216.
- HAYES, F. R.; PHILLIPS, J. E. (1958): Lake Water and Sediment: - IV. Radiophosphorus and Equilibrium with Mud, Plants and Bacteria under Oxidized and Reduced Conditions.- *Limnology and Oceanography*, 3, 459-475.
- HELBIG, J. (in Vorber.): Vergleichende Sedimentuntersuchungen zwischen Mondsee und Trumer Seen, Österreich.- Diplomarbeit, Univ. Göttingen. ←
- HERBERT, R. A. (1982): Nitrate Dissimilation in Marine and Estuarine Sediments.- in: NEDWELL, D. A. & BROWN, C. M. (ed.): *Sediment Microbiology*.- Academic Press, 53-71, London.
- HERRMANN, A. G., KNAKE, D. (1973): Coulometrisches Verfahren zur Bestimmung von Gesamt-, Karbonat- und Nichtkarbonatkohlenstoff in magmatischen, metamorphen und sedimentären Gesteinen.- *Z. Anal. Chem.*, 266, 196-201.
- HODSON, P. H. (1973): The Role of Phosphorus in Bacteria and Viruses.- in: GRIFFITH, E. J.; BEETON, A.; SPENCER, J. M.; MITCHELL, D. T. (ed.): *Environmental Phosphorus Handbook*, John Wiley & Sons, 451-473, New York.
- HOWARD, D. L.; FREA, J. I.; PFISTER, R. M. & DUGAN, P. R. (1970): Biological Nitrogen Fixation in Lake Erie.- *Science*, 169, 61-62.
- IMHOF, O. (1885): Faunistische Studie in 18 kleinen und größeren Süßwasserbecken.- *Sitz. Ber. Akad. Wiss.*, 91, Wien, 87 S. ←
- JÄGER, P. (1974): Limnologische Untersuchungen im Wallersee mit besonderer Berücksichtigung der Ostracodenpopulation.- *Dissertation, Univ. Graz*, 95 S.
- JÄGER, P. (1986): Chemismus der Vorlandseen und ihrer Zubringer.- *Stud. Forsch. Salzburg*, 2/1986, 343-384.
- JAGSCH, A.; HAIDER, R. (1982): Die Trumer Seen.- in: BMLF (Hrsg.): *Seenreinhaltung in Österreich*.- 179-189, Wien. ←
- JONES, J. G. (1979): Microbial Activity in Lake Sediments with Particular Reference to Electrode Potential Gradients.- *Journal of General Microbiology*, 115, 19-26.

JONES, J. G. (1982): Activities of Aerobic and Anaerobic Bacteria in Lake Sediments and their Effect on the Water Column.- in: NEDWELL, D. B. & BROWN, C. M. (ed.): Sediment Microbiology.- Academic Press, 107-145, London.

JORGENSEN, B. B. (1977): Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments.- Marine Biology, 14, 7-17.

JORGENSEN, B. B.; KAMP-NIELSEN, L.; JACOBSEN, O. S. (1975): A Submodel for anaerobic Mud-Water Exchange of Phosphate.- Ecol. Model., 1, 133-146.

KAMP-NIELSEN, L. (1974): Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sedimentcores and factors affecting the exchange rates.- Archiv für Hydrobiologie, 73, 218-237.

→ KASTNER, K. (1905): Beiträge zur Molluskenfauna des Landes Salzburg.- Jahresber. der K. K. Saatsrealschule, 1904/05, 1-40, Salzburg.

KEENEY, D. R. (1973): The Nitrogen Cycle in Sediment-Water Systems.- J. Environ. Quality, 2, 15-29.

KELTS, K.; HSÜ, K. J. (1978): Freshwater Carbonate Sedimentation.- in: LERMAN, A. (Ed.): Lakes - Chemistry, Geology, Physics.- Springer, 295-339, New York, Heidelberg.

→ KLEMM, W. (1950): Beitrag zur Kenntnis der Molluskenfauna Salzburgs.- Mitt. der Nat. Wiss. Arbeitsgem. Haus der Natur Salzburg, 1, 45-54, Salzburg.

→ KRISAI, R. (1975): Die Ufervegetation der Trumer Seen.- Dissertationes Botanicae, 29, 197 S., Salzburg.

KUNZ, B. (1983): Heterogene Nukleierung und Kristallwachstum von CaCO₃ (Calcit): in natürlichen Gewässern.- Dissertation, ETH Nr. 7355, 159 S., Zürich.

KUNZ, B.; STUMM, W. (1984): Kinetik der Bildung und des Wachstums von Calciumcarbonat.- Vom Wasser, 62, 279-293.

KUSNEZOV, S. (1959): Die Rolle der Mikroorganismen im Stoffkreislauf der Seen.- VEB Deutscher Verlag Wissenschaften, 301 S., Berlin.

→ LINDNER, D. (1984): Die Sedimente des Mattsees.- Diplomarbeit, Univ. Göttingen, 114 S. (unveröff.).

→ MAHLER, F. (1952): Beitrag zur Verbreitung und Ökologie der Großmuscheln Salzburgs.- Mitt. der Nat. Wiss. Arbeitsgem. Haus der Natur Salzburg, Jahrg. 1952/53, Bd. 3 u. 4, 26-48, Salzburg.

→ MEEK, B. D.; GRASS, L. B.; MCKENZIE, A. J. (1969): Applied nitrogen losses in relation to oxygen status of soils.- Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, 575-578.

→ MEISCHNER, D.; RUMOHR, J. (1974): A light-wight, high-momentum gravity corer for subaqueous sediments.- Senckenbergiana maritima, 6, 105-107.

MERKT, J.; LÜTTIG, G.; SCHNEEKLOTH, H. (1971): Vorschlag zur Gliederung und Definition der limnischen Sedimente.- Geol. Jb., 89, 607-623.

MICOLETZKY, V. (1912): Beiträge zur Kenntnis der Ufer- und Grundfauna einiger Seen Salzburgs.- Zool. Jahrb., 33 (5), 442-444, Salzburg.

- MINDER, L. (1922): über biogene Entkalkung im Zürichsee.- Verh. Internat. Ver. theor. u. angew. Limnol., 1, 20-32.
- MOOG, O. & JAGSCH, A. (1980): Zur Erforschungsgeschichte, Fischerei und limnologischen Situation der Salzburger Flachgausen - Wallersee, Mättsee, Obertrumer See und Grabensee.- Stud. Forsch. Salzburg, 1, 73-104. ←
- MORTIMER, C. H. (1941): The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes; I., II.- J. Ecol., 29, 280-329.
- MORTIMER, C. H. (1942): The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes, III.- J. Ecol., 30, 147-201.
- MÜLLER, G. (1961): Das Sand-Silt-Ton-Verhältnis in rezenten marinen Sedimenten.- N. Jb. Miner., Mh., 7, 148-163.
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchungen. Teil I, Sedimentpetrologie.- Schweizerbart, Stuttgart, 303 S.
- MÜLLER, G. (1981): Heavy Metals and other Pollutants in the Environment: a Chronology based on the Analysis of Dated Sediments.- in: International Conference "Heavy Metals in the Environment", Amsterdam, Sept. 1981, 12-17.
- MÜLLER, G.; DOMINIK, J.; SCHRÖDER, H.-G.; SCHNEIDER, J. (1983): Zur Chronologie anthropogener Schwermetalle in den Sedimenten des Attersees (Österreich).- Tschermaks Min. Petr. Mitt., 31, 193-206. ←
- NEDWELL, D. B. (1982): The Cycling of Sulfur in Marine and Estuarine Sediments.- in: NEDWELL, D. B. & BROWN, C. M. (Ed.): Sediment Microbiology.- Special Publications of the Society for General Microbiology, 7, 73-106.
- NIESSEN, F.; STURM, M (1984): Effect of Progressive Anthropogenic Eutrophication on the Sediment Record of the Lake Baldegg (Switzerland).- 5 th European Regional Meeting of Sedimentologists, Marseille, 9.-11. 4. 1984, Volume of Abstracts, p. 325. ←
- OHLE, W. (1956): Bioactivity, Production and Energy Utilization of Lakes.- Limnology and Oceanography, 1, 139-149.
- OHLE, W. (1958): Die Stoffwechselfynamik der Seen in Abhängigkeit von der Gasausscheidung ihres Schlamms.- Vom Wasser, 25, 127-149.
- OHLE, W. (1962): Der Stoffhaushalt der Seen als Grundlage einer allgemeinen Stoffwechselfynamik der Gewässer.- Kieler Meeresforschungen, 18, 107-120.
- OHLE, W. (1964): Inerstitiallösungen der Sedimente, Nährstoffgehalt des Wassers und Primärproduktion des Phytoplanktons in Seen.- Helgoländer Wiss. Meeresunters., 10, 411-429.
- OHLE, W. (1978): Ebullition of gases from sediment, conditions, and relationship to primary production of lakes.- Verh. Internat. Verein. Limnol., 20, 957-962.
- PECHLANER, R.; PSENNER, R. (1983): Restaurierungsverlauf Piburger See II: Nährstofflieferung aus Sedimenten als Ursache der Oligotrophierungsverzögerung.- in: Ergebnisse des Österreichischen Eutrophieprogrammes 1978-1982; Bundesministerium f. Wiss. u. Forschung, 70-101, Wien. ←
- PFENNIG, N. (1975): The phototrophic bacteria and their role in the sulfur cycle.- Plant and Soil, 43, 1-16.

→ PRODINGER, F. (1980): Die Hydrographie der Salzburger Vorlandseen und ihres Einzugsgebietes - Derzeitiger Beobachtungsstand und notwendige Ergänzungen.- Stud. Forsch. Salzburg, 1/1980, 35-38.

PSENNER, R. (1983): Die Entstehung von Pyrit in rezenten Sedimenten des Piburger Sees.- Schweiz. Z. Hydrol., 45, 219-232.

PSENNER, R. (1984): Phosphorus release patterns from sediments of a meromictic mesotrophic lake (Piburger See, Austria).- Verh. Internat. Verein. Limnol., 22,

PYZIK, A. J. (1976): The Kinetics and mechanisms of sedimentary iron sulfide formation.- Ph.D. Thesis, Univ. Maryland, 144 S.

ROSSKNECHT, H. (1980): Phosphatelimination durch autochthone Calcitfällung im Bodensee-Obersee.- Archiv für Hydrobiologie, 88, 328-344.

ROSSKNECHT, M. (1977): Zur autochthonen Calcitfällung im Bodensee-Obersee.- Archiv für Hydrobiologie, 81, 35-64.

→ SCHADLER, J. (1959): Zur Geologie der Salzkammergutseen.- Schr. d. österr. Fischereiverb., 2, 36-54.

→ SCHINDLBAUER, G. (1986): Das hydrographische Einzugsgebiet der Salzburger Alpenvorlandseen - Geographische Grundlagenerhebungen und Quantifizierung der punktuellen Eutrophierungsquellen.- Stud. Forsch. Salzburg, 2/1986, 181-216.

SCHINDLER, R. (1972): Standardgesteinsproben des ZGI - 5. Mitteilung Stand der Spurenelementanalyse der Gesteine GM, TR, BM und KH.- Zeitschrift für angewandte Geologie, 18, 224-228.

→ SCHMIDT, R. (1985): Pollen, macrophytes and radiocarbon data from a core of the late-glacial and early post-glacial Lake Zellhof.- in: DANIELOPOL, D.; SCHMIDT, R.; SCHULTZE, E. (Ed.): Contributions to the Paleolimnology of the Trumer Lakes (Salzburg): and the Lakes Mondsee, Attersee and Traunsee.- Österr. Akad. Wiss, 31-38, Mondsee.

SCHNEIDER, J.; SCHRÖDER, H.-G.; LE CAMPION-ALSUMARD, T. (1983): Algal micro-reefs - coated grains from freshwater environments.- in: PERYT, T. M. (ed.): Coated Grains.- Springer Verlag Berlin, 284-298, Heidelberg.

SCHNEIDER, J.; SCHRÖDER, H.G. (1980): Calcification des cyanophycees et leur contribution a la genese des sediments calcaires.- in: HUMBERT, L. (ed): Cristallisation-Deformation-Dissolution des carbonates, 17./18. Nov. 1980, Bordeaux, 421-428.

SCHRÖDER, H. G. (1982): Biogene benthische Entkalkung als Beitrag zur Genese limnischer Sedimente. Beispiel: Attersee (Salzkammergut, Oberösterreich).- Diss., Univ. Göttingen, 178 S..

SCHRÖDER, H. G.; WINDOLPH, H.; SCHNEIDER, J. (1983): Bilanzierung der biogenen Karbonatproduktion eines oligotrophen Sees (Attersee, Salzkammergut - Österreich.- Arch. Hydrobiol., 97: 3-17; Stuttgart.

SCHRÖDER, H.G.; SCHNEIDER, J. (1980): Hydrochemische Untersuchungen zum Karbonatkreislauf und zur Sedimentationsgeschichte des Attersees.- Arb. Lab. Weyregg, 4, 235-257.

→ SCHULTZ, G. (1971): Ergebnisse von 3 Jahren Seeuntersuchungen (1968, 69, 70): an einigen Salzkammergut-Seen und Seen des Salzburger Flachgaus.- Österr. Fischerei, 24, 149-158.

- SCHULTZE, E. (1982): Stratigraphische Pigmentanalysen aus ausgewählten Bohrkernproben der Trumer Seen.- Bericht an die Salzburger Landesregierung, Hydrobiol. Dienst, 18 S., (unveröff.). ←
- SCHULTZE, E. (1985): Carotenoids from selected cores of the Trumer Lakes and the Mondsee (trophic development and human impact).- in: DANIELOPOL, D.; SCHMIDT, R.; SCHULTZE, E. (Ed.): Contributions to the Paleolimnology of the Trumer Lakes (Salzburg): and the Lakes Mondsee, Attersee and Traunsee.- Österr. Akad. Wiss, 52-64, Mondsee. ←
- SCHWARZACHER, W. jr. (1949): Zur Morphologie des Wallerseees.- Archiv für Hydrobiologie, 42, 374-376.
- SEEFELDNER, E. (1961): Salzburg und seine Landschaften - Eine geographische Landeskunde.- Zweiter Ergänzungsband zu den Mitteilungen der Gesellschaft für Salzburger Landeskunde, 573 S., Salzburg/Stuttgart. ←
- SHAPIRO, L.; BRANNOCK, W. W. (1962): Rapid Analysis of silicate, carbonate and phosphate rocks.- U.S. Geol. Surv. Bull., 1144-A; Washington.
- SIGG, L.; STURM, M.; STUMM, W.; MART, L.; NÜRNBERG, H.-W. (1982): Schwermetalle im Bodensee.- Naturwissenschaften, 69, 546-547. ←
- SPENGLER, E.; PIA, J. (1924): Geologischer Führer durch die Salzburger Alpen und das SalzKammergut.- Samml. geol. Führer, 26, Borntraeger, Berlin. ←
- STANIER, R. Y.; ADELBER, E. A.; INGRAHAM, J. L. (1976): General Microbiology.- Macmillan Press Ltd, 4th Edition, 871 S., London.
- STAUB, A. (1981): Diagenese im rezenten Sediment des Vierwaldstätterseees und ihre Veränderung durch die Eutrophierung; Tiefenprofile biologisch- chemischer Parameter im Sediment und Porenwasser.- Diss. ETH Nr. 6841, Zürich 1981.
- STÜBER, E. (1963): Hydrobiologische Forschung im Lande Salzburg (Zusammenstellung verschiedener Arbeiten).- Festband 1963 der Nat. Wiss. Arbeitsgem. Haus der Natur Salzburg, 80 S., Salzburg. ←
- STUMM, W.; LECKIE, J. O. (1971): Phosphate Exchange with Sediments; its Role in the Productivity of Surface Waters.- Proc. internat. water pollution res. conf., 5 (III-26): 1-16.
- STUMM, W.; MORGAN, J. (1981): Aquatic Chemistry, an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.- John Wiley & Sons, 780 S., New York.
- STURM, M. (1985): Schwebstoffe in Seen.- Mitt. EAWAG, 19: 9-15; Dübendorf (Suisse). ←
- STURM, M.; MATTER, A. (1972): The Electro-Osmotic Guillotine, a New Device for Core Cutting.- J. Sed. Petrol, 42, 987-989. ←
- TENNANT, C.; BERGR, R. W. (1957): X-ray determination of dolomite-clacite ratios of carbonate rocks.- Am. Mineralogist, 42, 23-29.
- TICHY, G. (1980): Geologie des Bereiches um die Salzburger Vorlandssen.- Stud. Forsch. Salzburg, 1/1980, 17-22. ←
- UNGEMACH, H. (1960): Sedimentchemismus und seine Beziehungen zum Stoffhaushalt in 40 europäischen Seen.- Diss., Christian-Albrechts-Universität Kiel, 420 S..

→ VOLLENWEIDER, R. A. (1968): Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication.- OECD-Report, DAS/CSI/68.27.

WEBER, H. (1981): Sedimentologische und geochemische Untersuchungen im Greifensee (Kanton Zürich, Schweiz).- Mitt. aus dem Geol. Institut der Eidg. Techn. Hochschule und der Universität Zürich, N. F. 237, 204 S.

→ WEINBERGER, L. (1955): Beiträge zur Pleistozänforschung in Österreich, Exkursionen durch das österreichische Salzachgletschergebiet und die Moränen des Irr- und Atterseezweiges des Traungletschers.- Verh. Geol. B. A., Sonderheft D, 7-40, Wien.

→ WENZEL, W. (1956): Aufschluß des Bodens mit Salpetersäure und überchlorsäure zur Bestimmung der Gesamtphosphorsäure im Boden unter Verwendung der Vanadat-Molybdat-Methode.- Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, 75, 216-222.

WETZEL, R. G. (1975): Limnology.- Saunders Press, 743 S., Philadelphia.

→ ZAISBERGER, F. (1975): Brauerei Obertrum - 200 Jahre Familie Joseph Sigl.- Eigenverlag Fam. J. Sigl, 144 S., Obertrum.

→ ZELITCH, I. (1951): Simultaneous use of molecular nitrogen and ammonia by Clostridium pasteurianum.- Proc. Nat. Acad. Sci, 37, 559-565, Washington.

ZÜLLIG, H. (1981): On the use of carotinoid stratigraphy in lake sediments for detecting past developments of phytoplankton.- Limnology and Oceanography, 26, 970-976.

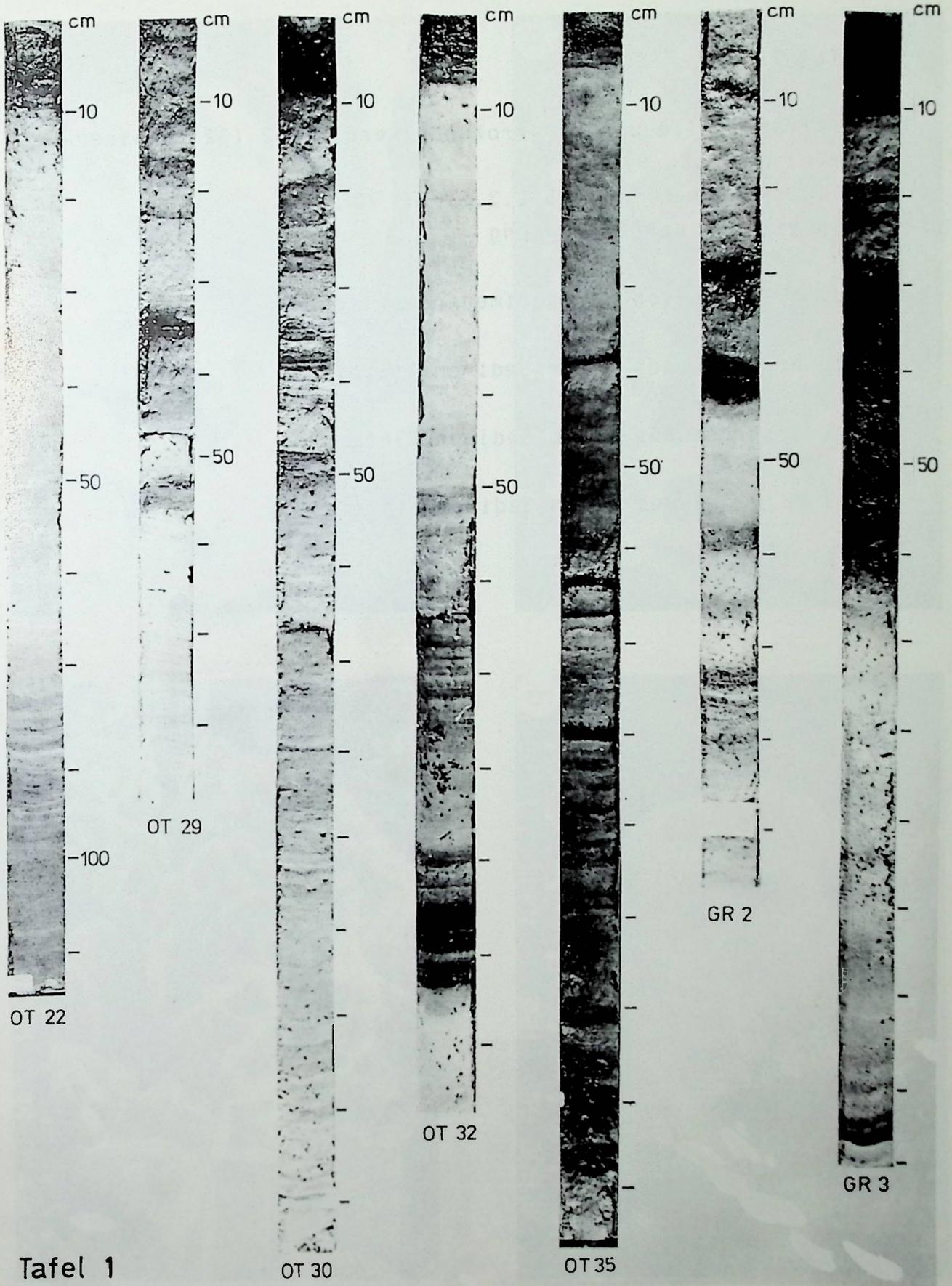
ZÜLLIG, H. (1982): Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früherer Phytoplankton-Entfaltungen.- Schweiz. Z. Hydrol., 44, 1-98.

Tafel 1

Repräsentative Auswahl von Sedimentkernen aus dem Obertrumer See und dem Grabensee.

Makroskopische Sedimentbeschreibung s. Kap. 4.1 S. 24

Lage der Kernstationen S. Abb. 9, S. 73



Tafel 1

Tafel 2

Kalzitkristalle aus dem Profundalkern OT 62 (32 m Wassertiefe, s. Abb...9)

Erläuterungen s. Kap. 5.2.3.5, S. 73:

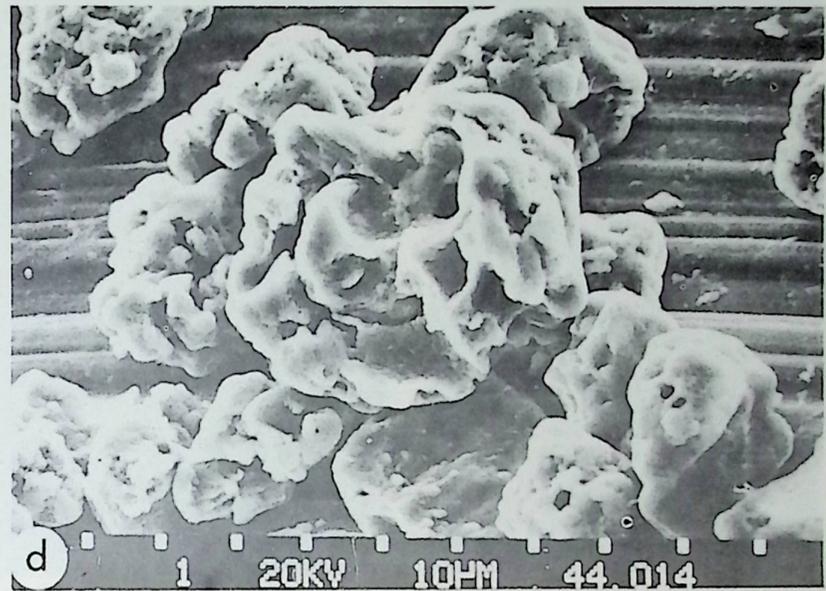
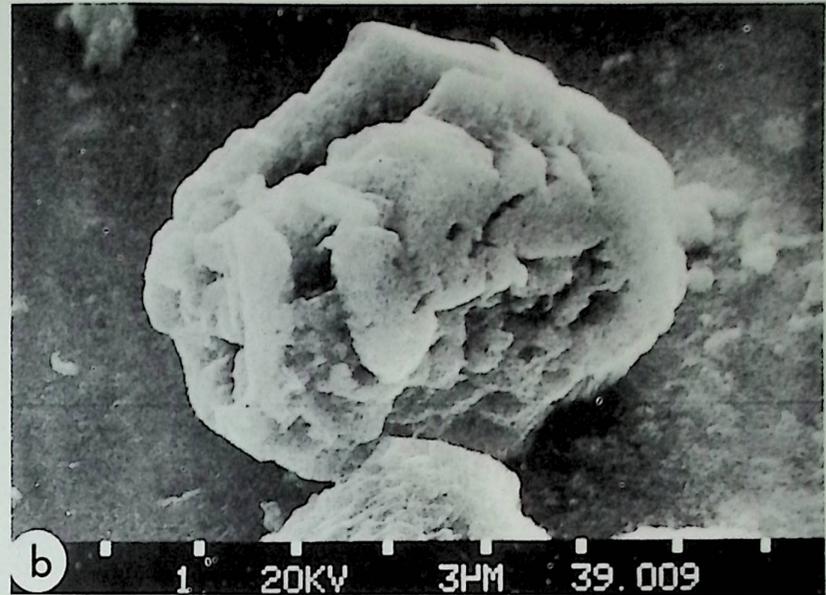
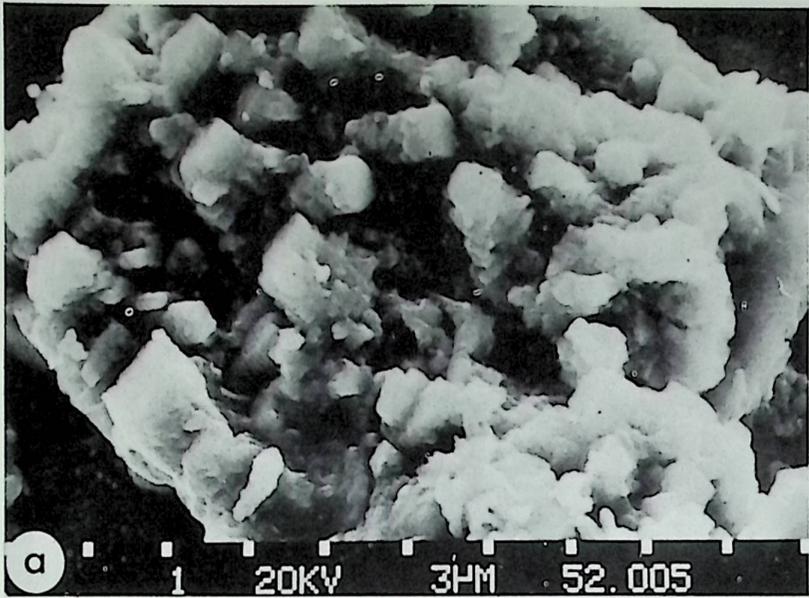
Diagnetische Karbonatlösung

Fig. a: Probe von der Sedimentoberfläche

Fig. b: Probe aus 15 cm Sedimenttiefe

Fig. c: Probe aus 25 cm Sedimenttiefe

Fig. d: Probe aus 40 cm Sedimenttiefe



Tafel 2

Tafel 3

REM-Untersuchungen zur Frage der P-Bindung an Mineralphasen (s. Kap. 5.2.5.2, S. 91)

Fig. a: Pyritframboid und Kalzitkristalle von der Sedimentoberfläche des Litoralkerns OT 63 (2 m Wassertiefe, s. Abb. 9)

Fig. b: Elementscan: Ca

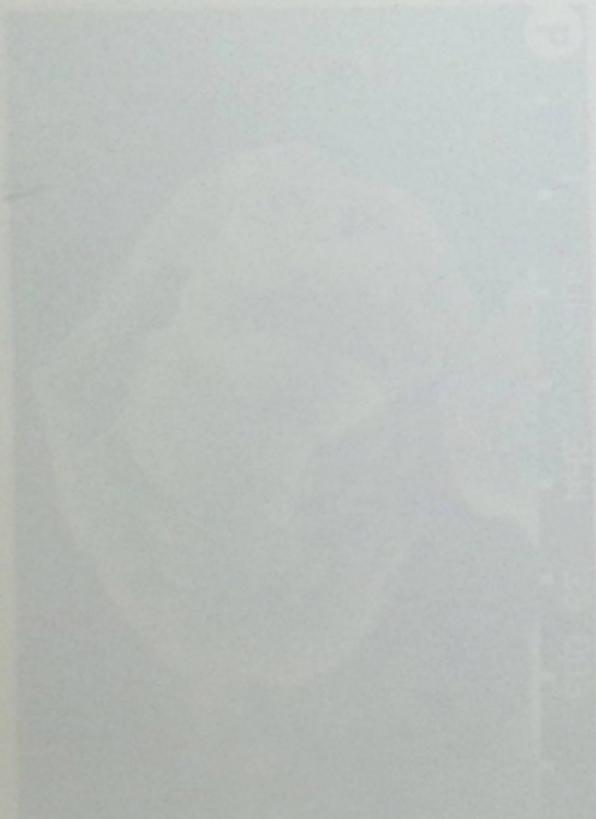
Fig. c: Elementscan: Fe

Fig. d: Elementscan: P

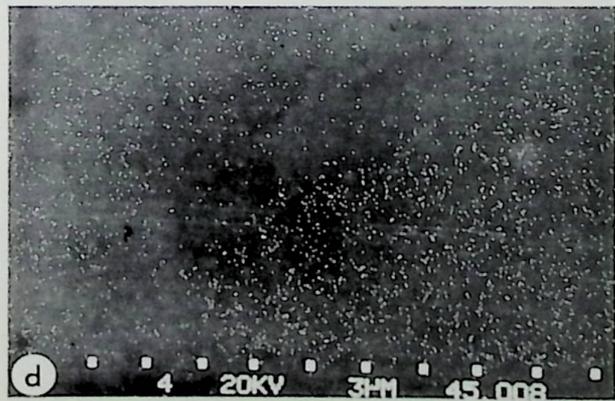
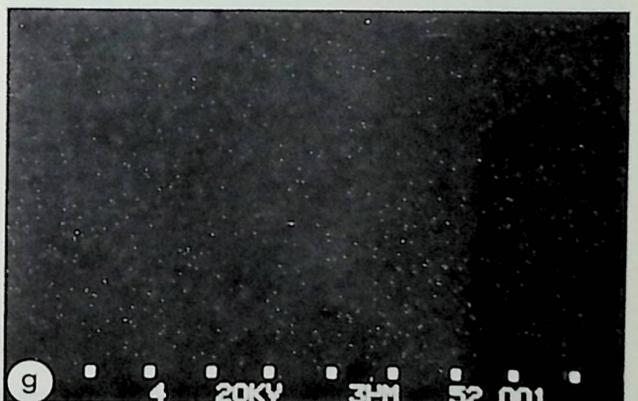
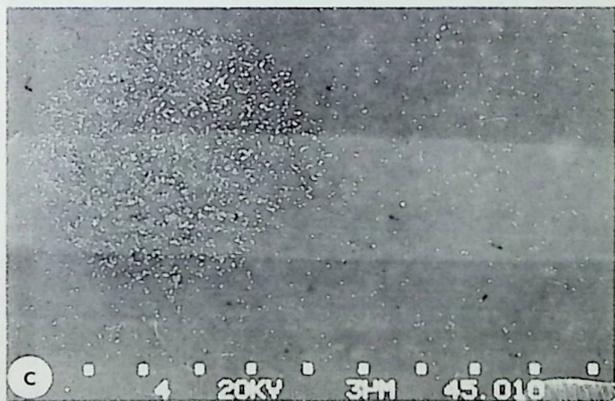
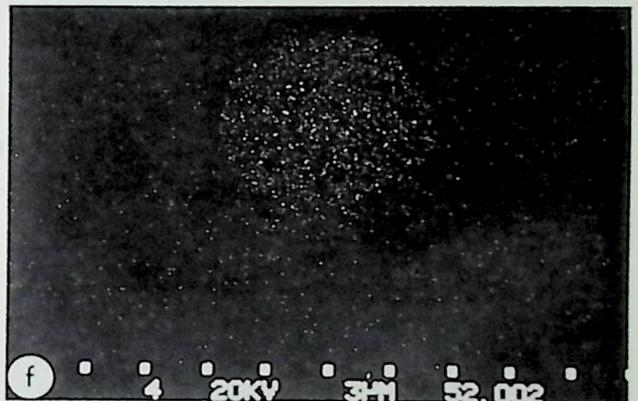
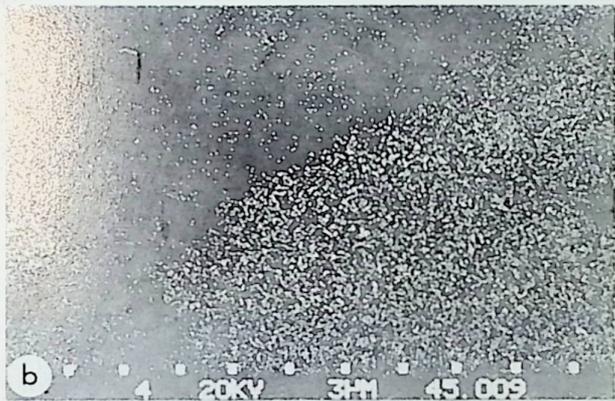
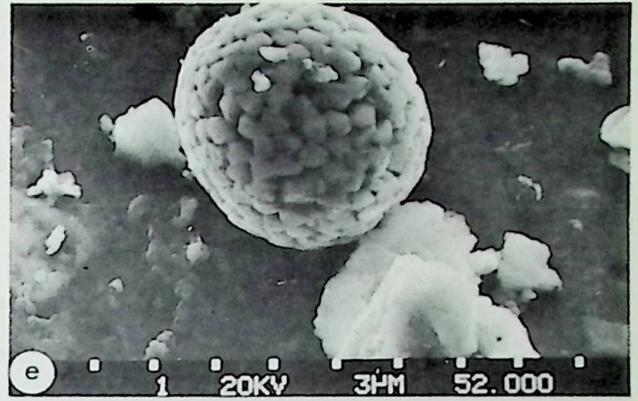
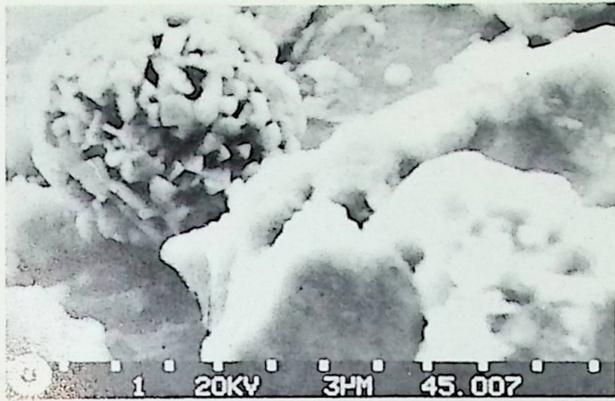
Fig. e: Pyritframboid aus 20 cm Sedimenttiefe des Litoralkerns OT 63

Fig. f: Elementscan Fe

Fig. g: Elementscan P



5. 1987



Tafel 3

Tafel 4

REM-Untersuchungen zur Frage der P-Bindung an Mineralphasen (s. Kap. 5.2.5.2, S. 91)

Fig. a: Pyritframboid von der Sedimentoberfläche des Profundalkerns OT 62 (32 m Wassertiefe, s. Abb. 9)

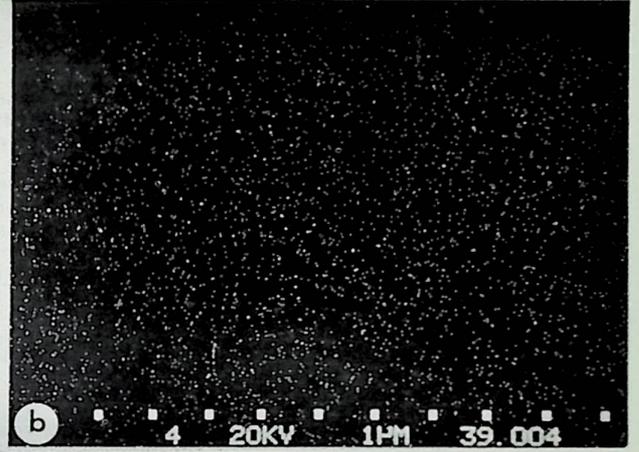
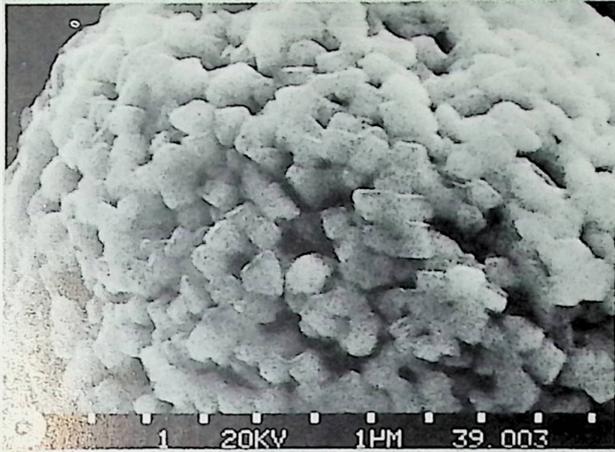
Fig. b: Elementscan: P

Fig. c: Typischer Mineralbestand (Pyrit, Kalzit) aus 40 m Sedimenttiefe des Profundalkerns OT 62

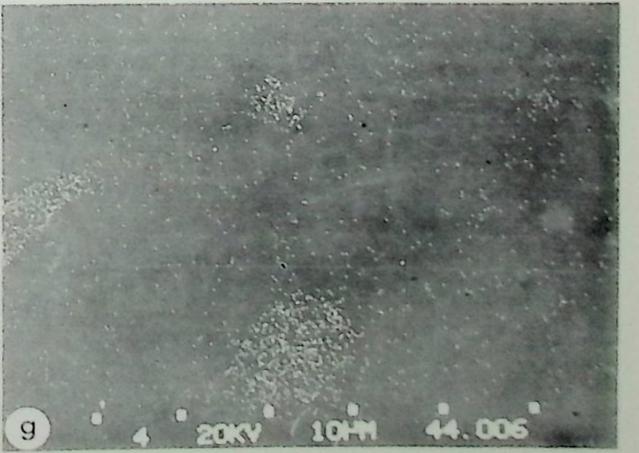
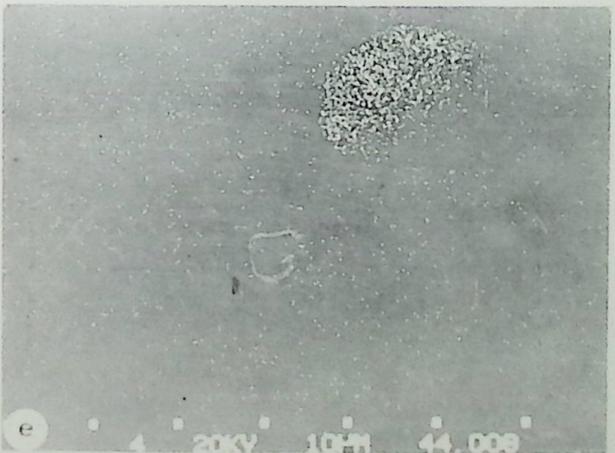
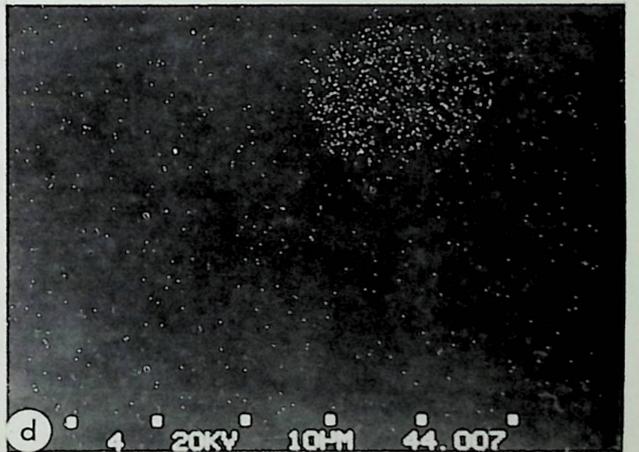
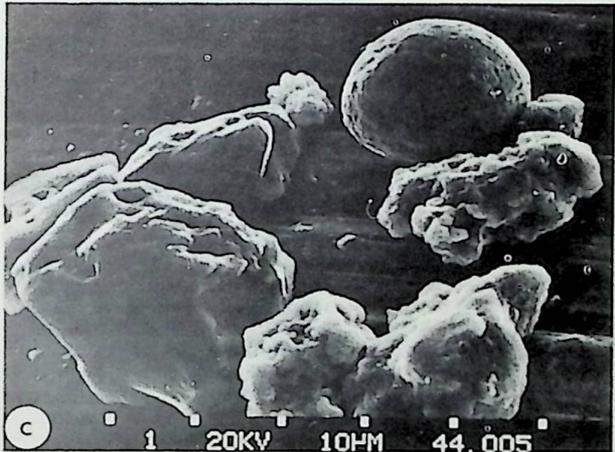
Fig. d: Elementscan: Fe

Fig. e: Elementscan: S

Fig. g: Elementscan: P



Tafel 4



Danksagung

Das Thema dieser Dissertation wurde von Prof. Dr. J. Schneider, Institut für Geologie und Dynamik der Lithosphäre der Universität Göttingen, vergeben. Für sein ständiges Interesse an der Arbeit und für seine stets konstruktiven und motivierenden Anregungen möchte ich mich an erster Stelle bedanken.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprogramms der Salzburger Landesregierung. Bei dem Koordinator dieses Projektes, Herrn Dr. P. Jäger, bedanke ich mich für die hervorragende Organisation vor Ort. Nur dadurch war es möglich, die Geländearbeiten an den Salzburger Vorlandseen jederzeit erfolgreich und in angemessener Zeit zu erledigen. Ein Teil der Laborarbeiten wurden im Labor des hydrobiologischen Dienstes der Salzburger Landesregierung mit großer Sorgfalt von Herrn W. Wendtner durchgeführt.

Herr Dr. M. Sturm, Eidgen. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) in Zürich ermöglichte es mir, einen Teil der Probenaufbereitung und die Korngrößenanalysen im Seenforschungslaboratorium der EAWAG in Luzern-Kastanienbaum durchzuführen, wobei mir Herr A. Zwysig quasi rund um die Uhr behilflich war.

Herr Prof. Dr. W. Krumbein, Abtlg. Geomikrobiologie, Univ. Oldenburg, ermöglichte mir Untersuchungen mit dem REM (incl. energiedispersivem System) im Labor für Elektronenmikroskopie der Universität Oldenburg.

Bei Herrn Prof. Dr. W. Schmidt bedanke ich mich für die Erlaubnis, große Analysenserien (Phosphor) im Labor des Instituts für Geobotanik, Universität Göttingen, durchzuführen.

Bei den Herren Dres. R. Schmidt und E. Schultze, Institut für Limnologie der österr. Akademie der Wissenschaften in Mondsee, bedanke ich mich für die gute fachliche Zusammenarbeit und für den vielen Spaß bei gemeinsamen Geländearbeiten. Herr Dr. R. Psenner und Frau R. Pucsko (Institut für Zoologie, Abtlg. Limnologie, Univ. Innsbruck) halfen mir freundlicherweise bei der Entnahme von Sedimentkernen für vergleichende Untersuchungen am Piburger See (Tirol).

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr. Otto Moog (Leiter des "Labors Weyregg" der österr. Akad. d. Wiss. in Weyregg am Attersee) sowie seiner Frau Marianne für die vorzügliche Gastfreundschaft, die sie mir in ihrem Hause während der Geländeaufenthalte gewährten.

Zahlreiche Impulse und Ideen zum Thema der Arbeit erhielt ich durch Diskussionen mit Kollegen und Kommilitonen, bei denen ich mich darüber hinaus auch für viele praktische Hilfen während der Geländearbeiten und im Institut (Labor etc.) bedanken möchte; besonders bei: J. F. Adam, A. R. Behbehani, C. Chondrogianni, M. Claes, I. Germsidis, J. Helbig, E. Horsthemke, D. Lindner, F. Niessen (Zürich), Ch. Pöhlig, A. Reuter, I. Strackenbrock, A. Unterwenger (Salzburg) und W. Wiener (Salzburg).

Viele technische Arbeiten waren im Rahmen dieser Dissertation notwendig und wurden stets zuverlässig durchgeführt. Dafür bedanke ich mich bei Frau C. Kaubisch, Herrn H. Schellenberg, Herrn H. Scholz und Herrn H. Tkacz.

Die Arbeit wurde durch Sachbeihilfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Salzburger Landesregierung gefördert.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Barbara, die mir nicht nur tatkräftig bei den Schreibarbeiten zur Seite stand. Sie hat mir die Anfertigung der Dissertation sehr erleichtert, indem sie es jederzeit mit großer Geduld und Verständnis ertrug, wenn die Familie bei all der "Forscherei" das Nachsehen hat; in Anerkennung und Dankbarkeit widme ich ihr das Ergebnis.