© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

Experimentelle Untersuchungen über die Schlammbildung in unberührten und kulturbeeinflußten Seen der Schweiz

von E. A. Thomas

Einleitung

In der ursprünglichen, oft sehr unregelmäßig gestalteten Wanne eines Sees beginnen sich schon beim Auffüllen der Wanne mit Wasser Schlammbildungen abzulagern, die im Laufe langer Zeiträume das Seevolumen verkleinern und aus der Seewanne ein Seebecken herausmodellieren, dessen Form rundlicher und ausgeglichener ist. Das sich ablagernde Sediment kann je nach seiner Herkunft in seiner Zusammensetzung äußerst vielgestaltig sein. Entsprechend verschiedenartig sind deshalb auch die Rückwirkungen des Seesedimentes auf die Vorgänge im freien Wasser.

Für die Geschichte eines Sees bedeutet das Sediment ein wertvolles Archiv. Wie ein Geschichtsbuch von vorn nach hinten von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart Auskunft gibt, so macht uns das Seesediment von seinen tiefstgelegenen Schichten bis zur Sedimentoberfläche Informationen zugänglich über das Seegeschehen von der Entstehung bis zur Gegenwart. Besonders die oberste Zone des Sedimentes übt aber auch einen ständigen Einfluß aus auf die Beschaffenheit des darüberliegenden Wassers. So können die Zersetzungsvorgänge im Seeschlamm zur Folge haben, daß Sauerstoff verbraucht und Nährstoffe und Wuchsstoffe ans Wasser zurückgegeben werden, ebenso Bakterien und andere Organismen. Sodann stellt das Seesediment einen Lebensraum dar, von dem aus Pflanzenkeime, obschon im Dunkeln liegend, wieder in das lichtreiche Gebiet gelangen können und von dem aus Tiere in ähnlicher Weise Ruheperioden durchmachen oder als Abbauer organischer Substanz tätig sind und als Fischfutter dienen. Zahlreiche Stoffkreisläufe berühren also das Sediment.

Totalanalysen von Seeschlämmen, wie sie schon seit vielen Jahrzehnten ausgeführt werden, tragen dazu bei, den See „systematisch" zu beurteilen. Untersuchungen über die Austauschvorgänge zwischen Schlamm und Wasser lassen Einzelheiten erkennen, die das ganze Seegeschehen beeinflussen. Um jedoch den jahreszeitlichen Ablauf der Schlammbildung in einem See verfolgen zu können, müssen im Hypolimnion Schlammsammler (Sedimentmeßpfannen) aufgestellt werden,

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

aus denen sich allmonatlich eine Rate des Jahressedimentes gewinnen läßt.

Die biologische und chemische Untersuchung solcher Schlammraten beleuchtet schlagartig die Beziehungen zwischen Planktonproduktion und Schlammbildung. Experimente mit derartigem Schlamm erlauben Berechnungen über die Mengen der aus dem Schlamm ins Wasser zurückkehrenden Stoffe und über die Bedeutung der Sauerstoffzehrung des Schlammes im Hypolimnion.

Die Untersuchungen, über die hier zusammenfassend berichtet wird, genossen in sehr dankenswerter Weise die Unterstützung der Stiftung für wissenschaftliche Forschung an der Universität Zürich sowie des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung.

Meßmethodik für die Intensität der Schlammbildung im Jahresverlauf

Von den im Epilimnion eines Sees schwebenden Stoffen geht ein kleiner Teil bereits in Lösung, wenn diese Stoffe zu sinken beginnen. Viele Bestandteile erreichen aber beim Absinken den Seeboden, bevor sie den Zersetzungsprozessen anheimfallen. Daß z. B. die verbreitete Planktonalge *Oscillatoria rubescens* in dieser Beziehung widerstandsfähig ist, erkennt man schon daran, daß man sie nach Absinkperioden bei sorgfältiger Schlammprobenahme (z. B. mittels Naumann-Lotes) unversehrt auf der Schlammoberfläche wiederfinden kann, im Zürichsee sogar in der größten Tiefe (138 m). Nach einigen Wochen bis Monaten Lagerung auf der Schlammoberfläche lösen sich jedoch diese Fäden ganz auf. Ähnliche Beobachtungen kann man für viele andere Planktonorganismen machen.

Berücksichtigt man, daß die auf den Seegrund gesunkenen Stoffe sich trotz der dort niedrigen Temperatur bald zu zersetzen beginnen, so ergibt sich daraus die Notwendigkeit, die abgesetzten Stoffe in kurzen Intervallen zu sammeln und zu untersuchen, wenn man die ganze im Verlaufe des Jahres sedimentierte Stoffmenge erfassen will. Über die Bedingungen, unter denen die verschiedenen Stoffe aus dem Seeschlamm ins freie Wasser übertreten, hat *C. H. Mortimer* (1941/42) auf Grund exakter experimenteller Untersuchungen berichtet. Bei den Seen in der Umgebung von Zürich interessierte uns vor allem, die Beziehung zwischen einerseits der Gesamtmenge der abgesetzten Stoffe und andererseits der unlöslich bleibenden Sedimente und der in gelöster Form wieder ins freie Wasser übergehenden Sedimente abzuklären. Wir konstruierten deshalb eine Sedimentmeßpfanne, mit der wir in Ab-

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

ständen von 3—5 Wochen die sich über einer konstanten Schlammoberfläche absetzende Sedimentmenge in verschiedenen Seen im Jahresverlauf bestimmten.

Abb. 1 Sedimentmeßpfanne geöffnet, auf unebenem Boden, wie sie im See aufgestellt wird.

Die genaue Beschreibung des Apparates (Abb. 1) befindet sich an anderer Stelle (*Thomas,* 1950). An Einzelheiten sei hier daran erinnert, daß wir eine Oberfläche von 500 cm² wählten, um von eventuellen Einflüssen der Pfannenwandung weniger abhängig zu sein, wie das bei kleinen Krügen der Fall sein könnte. In der Pfanne sinkt das Sediment durch ein Gitter mit 2,8 mm Maschenweite (28 Drähte pro 10 cm), um zu verhindern, daß eventuell Fische oder Krebse usw. das abgelagerte Sediment stören. Dieses vierbeinige Sieb befindet sich 3 cm unterhalb vom Rand der Pfanne, stört also das Verschließen des Deckels in keiner Weise. Nach dem Heraufziehen der Pfanne zur Sedimententnahme werden sorgfältig der mit Fallgewicht geschlossene Deckel geöffnet und die auf dem Gitter haftenden Sedimentbestandteile mit einer Gummifahne ins Pfannenwasser gewischt, so daß sie sich nach kurzer Zeit zum Sedi-

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

ment absetzen. Ein solcher Einsatz hat sich gut bewährt; auch wenn aus irgendeinem Grunde beim Heraufziehen der Pfannendeckel nicht geschlossen war, verhinderte das Gitter das Ausschwemmen von Sedimentteilen. Das Anbringen eines Gitters scheint uns bei allen Apparaturen zur Gewinnung von Sedimentraten notwendig (*Thomas,* 1956).

Mit der Sedimentmeßpfanne sind bisher Untersuchungen ausgeführt worden im Aegerisee, Pfäffikersee, Greifensee, Türlersee, Sempachersee, Zürichsee, Zürich-Obersee und Walensee (*Thomas,* 1950, 1951, 1955, a, 1955, b, 1956) sowie im Baldeggersee und Hallwilersee (*Bachofen,* 1960) und im lac de Joux (*Bosset,* 1962). In Österreich hat im Fuschlsee Chemiker *J. Kopecky* mit einem ähnlichen Apparat gearbeitet. Auch in den USA wird voraussichtlich diese Apparatur verwendet.

Die Sedimentbeschaffenheit im Jahresverlauf in einem unberührten und in zwei kulturbeeinflußten Seen

Da die Sedimentmeßpfanne in unseren Versuchen jeweils in 20 m Tiefe aufgestellt wurde, können die erhaltenen Ergebnisse gut miteinander verglichen werden. Ein ausgedehnter Vergleich in der Sedimentbeschaffenheit war im Jahre 1951 möglich zwischen dem oligotrophen Aegerisee und dem eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. In den folgenden Ausführungen werden wir hauptsächlich die Sedimentbeschaffenheit dieser drei Seen vergleichen. Die Maximaltiefe des Aegerisees beträgt 82 m, diejenige des Pfäffikersees 34 m, des Greifensees 32 m. In der Nachkriegszeit war die Nährstoffzufuhr beim Aegerisee noch klein, so daß der See damals noch als oligotroph bezeichnet werden durfte; seither scheint die Überdüngung zu beginnen, indem die Abwasserzufuhr zunimmt.

Die Farbe der Aegerisee-Sedimente veränderte sich im Jahresverlauf nur wenig und könnte im nassen Zustand mit olivgrau charakterisiert werden. Besonderes Interesse verdiente die Farbe des zentrifugierten Schlammes an der Oberfläche für die Sedimentrate von Ende Mai bis Juni, die sich durch intensives Rot auszeichnete; die mikroskopische Untersuchung bestätigte unsere Vermutung, daß es sich hier um eine Massenansammlung von Wasserbakterien handle, die sich beim Zentrifugieren dank des geringeren spezifischen Gewichtes zuletzt absetzten.

Von ähnlicher Farbe waren die Sedimente des eutrophen Greifensees, wobei gallertige, voluminöse Bakterienschleime sich an der Oberfläche des Sedimentes ansammelten, oft vermischt mit dem Grün von abgesunkenen Planktonalgen. Im allgemeinen dunkler erschienen die

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

Sedimentraten des Pfäffikersees, zu bezeichnen als dunkeloliv. Diese Farben gelten natürlich nur für die frischen Sedimente, da unter anaeroben Bedingungen besonders die Sedimente der beiden eutrophen Seen sich nach wenigen Wochen schwarz verfärben.

Charakteristisch für alle drei Seen ist eine geringe Schlammbildung im Winter und anschließend ein rasches Ansteigen, sofort nach Beginn der Vegetationsperiode. Beim Aegerisee wurde sogar die nahezu maximale Sedimentationstätigkeit schon im Monat März erreicht; daß im Sommer keine Steigerung erfolgte, dürfte für diesen oligotrophen See damit zusammenhängen, daß im Sommer erheblich weniger zusätzliche Nährstoffe durch Abwässer zugeführt werden als bei den beiden eutrophen Seen. Beim Aegerisee wurde gesamthaft im Jahresverlauf viel weniger Sediment abgelagert als beim Pfäffiker- und Greifensee; hingegen erfolgte die Ablagerung während der Vegetationsperiode auffällig gleichmäßig (1955, b, S. 412/413).

Wie zu erwarten war, verlaufen die Transparenzkurven der drei Seen großenteils spiegelbildlich zu den Kurven, die über die Intensität der Schlammbildung im Jahresverlauf Auskunft geben. Aus der Zusammensetzung der Sedimentraten kann rückblickend herausgelesen werden, ob Trübungen des Oberflächenwassers vorwiegend organischer Natur, also planktogenen Ursprungs waren, oder vorwiegend mineralisch. Der Aegerisee erlitt im Untersuchungsjahr hartnäckig andauernde tonige Trübungen, die die Durchsichtigkeit des Oberflächenwassers im Hochsommer herabsetzten. In den beiden anderen Seen blieben Trübungen auch nach dem Absterben von Wasserblüten teilweise bestehen, wobei noch unabgeklärt ist, ob bei den Trübungsstoffen vorwiegend typische Planktonbakterien beteiligt sind (die auf die üblichen Nährböden für Wasserbakterien bekanntlich meistens nicht ansprechen) oder ob kolloidal gelöste Zersetzungsprodukte trübend wirkten.

Aus Abb. 2 erkennen wir, wie im Pfäffikersee die Transparenz von Jahresbeginn bis Mitte April ständig abnahm, dann während drei Monaten ungefähr gleichblieb, um gegen den Herbst und Winter hin wieder anzusteigen. Da beim Pfäffikersee wenig Trübungsstoffe durch Zuflüsse eingeschwemmt werden, ist die Verminderung der Transparenz hauptsächlich eine Folge der Planktonentwicklung und -tätigkeit, indem sowohl die Planktonorganismen als auch die bei der biochemischen Kalkfällung sich bildenden Kalkkristalle die Durchsichtigkeit herabsetzen. Beim Aegerisee verursachen eingeschwemmte feinste Tonteilchen zeitweise Trübungen; die Messung der Transparenz gibt also keinen befriedigenden Maßstab für die Planktonproduktion.

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

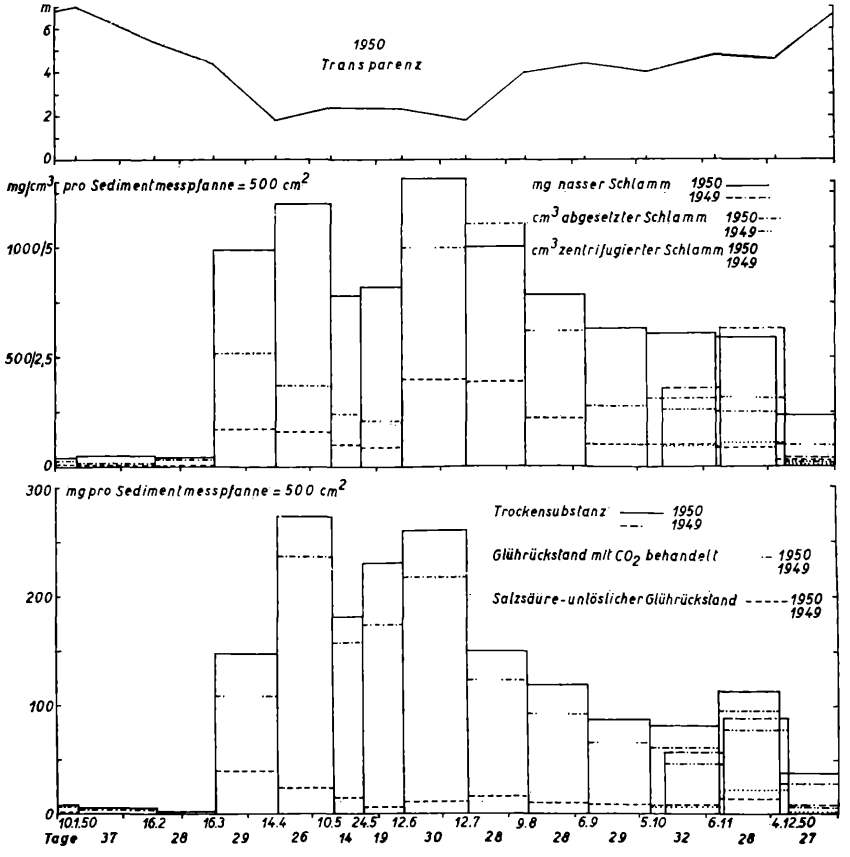

Abb. 2 Transparenz des Wassers und Schlammengen der Sedimentmeßpfanne, naß, nach drei Stunden Absetzenlassen und Zentrifugieren, Trocknen, Glühen und nach Salzsäurebehandlung beim Pfäffikersee (1949—50).

In Abb. 2 und 3 ist die Schlammenge ausgedrückt als nasser Schlamm, wie er nach Abtropfenlassen auf dem Filter zurückbleibt, sowie als abgesetzter Schlamm und als zentrifugierter Schlamm. In den Zahlen des nassen Schlammes kommt das Wasserrückhaltvermögen des Schlammes zum Ausdruck, das dann besonders groß ist, wenn der Schlamm viel organisches Material enthält. Aber auch Trockenrückstand

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

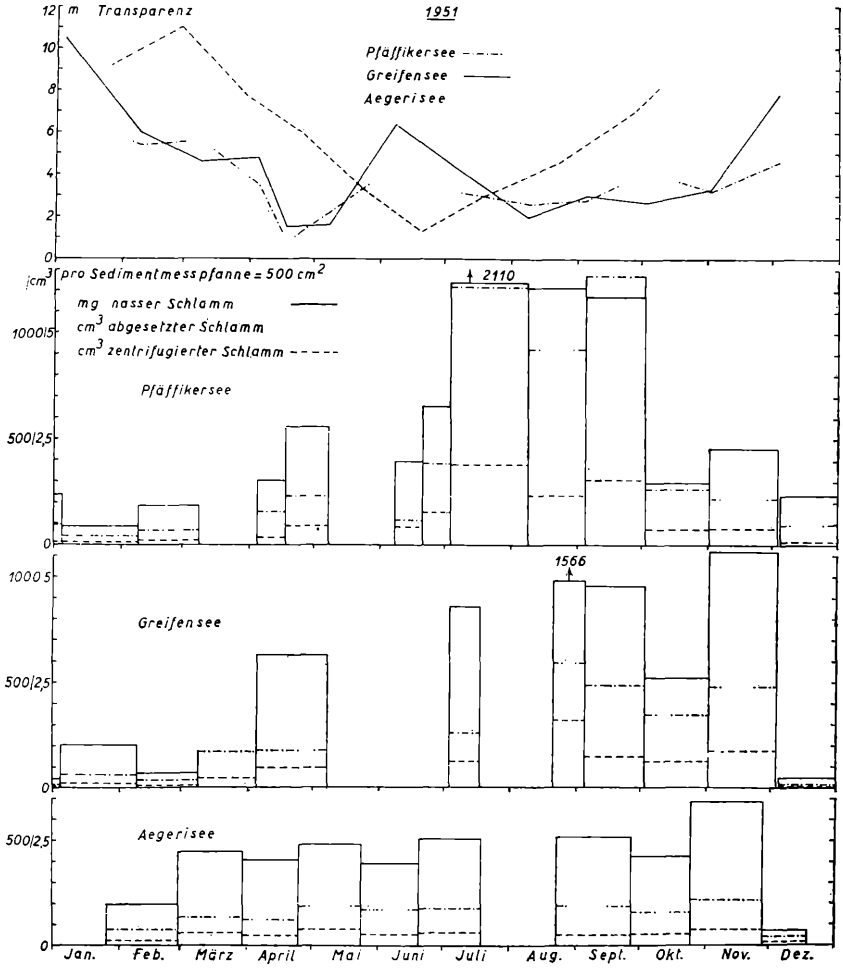

Abb. 3 Transparenz des Wassers und Schlammengen aus den Sedimentmeßpfannen, naß, nach drei Stunden Absetzenlassen und nach Zentrifugieren beim Aegerisee, Pfäffikersee und Greifensee (1951).

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

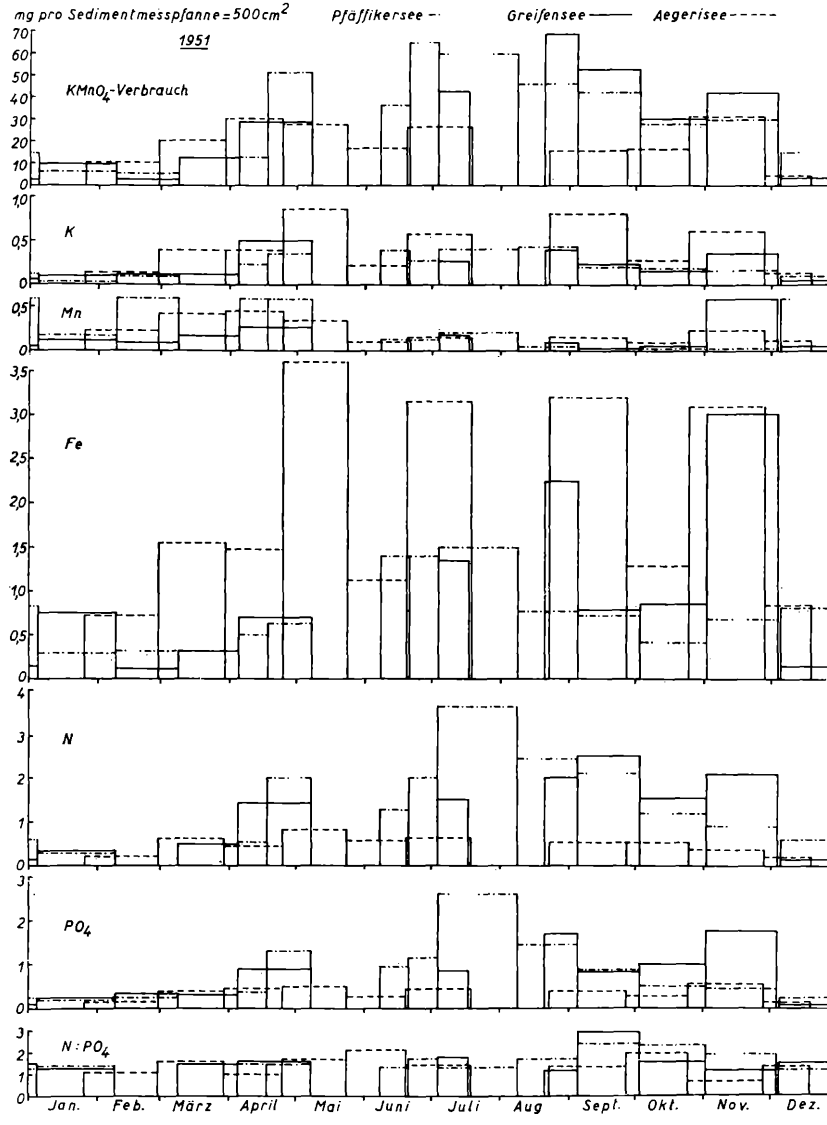

Abb. 4 Kaliumpermanganatverbrauch, Kalium-, Mangan-, Eisen-, Stickstoff- und Phosphatgehalt der Schlammengen der Sedimentmeßpfannen beim Aegerisee, Pfäffikersee und Greifensee (1951).

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

und Glührückstand des Schlammes gehen mit der Naßschlammenge in diesem Falle weitgehend parallel.

Um Aufschluß zu erhalten über die wichtige Frage, wieviel organisches Material in den verschiedenen Sedimenten enthalten sei, bestimmten wir den Glühverlust, den Kaliumpermanganatverbrauch und die Sauerstoffzehrung des Schlammes. Damit die Glühverlustbestimmung unabhängig vom Kalkgehalt der Sedimente sei, behandelten wir nach dem Glühen mit kohlensäurehältigem Wasser; dadurch entsprechen die Glühverlustwerte eher dem verbrannten organischen Material. Als wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen sei hervorgehoben, daß die Glühverluste bei den Sedimentraten des oligotrophen Aegerisees viel kleiner waren als in den untersuchten eutrophen Seen, vor allem im Sommer. In ähnlicher Weise kam auch bei der Bestimmung des Kaliumpermanganatverbrauches zum Ausdruck, daß die Sedimentraten der beiden eutrophen Seen besonders im Sommer erheblich mehr organisches Material enthielten als beim oligotrophen See (Abb. 4).

Bei der Bestimmung der Sauerstoffzehrung des Schlammes tendierten wir nicht danach, die Oxydation des Schlammes soweit zu treiben, bis praktisch keine weitere Sauerstoffzehrung mehr stattfindet; solche Verhältnisse finden wir ja nicht einmal in unseren oligotrophen Seen. Die zu erreichende Oxydationsstufe soll einen Vergleich verschiedener Seen untereinander ermöglichen und gleichzeitig Rückschlüsse erlauben über die durch die Sedimente im Tiefenwasser der Seen hervorgerufene Sauerstoffzehrung. Bei der von uns angewandten Verdünnungswasser-Methodik wird bei 20° C schon nach 20 Tagen eine ansehnliche Menge von Sauerstoff verbraucht. Läßt man die Proben weitere 20 Tage stehen, so werden zusätzlich weniger als 50% des von 0—20 Tage verbrauchten Sauerstoffes aufgezehrt. Unter diesen Umständen gibt unsere Methodik eine gute Grundlage für den Vergleich verschiedenartiger Seetypen.

Eine Gegenüberstellung der Sauerstoffzehrung der Sedimente des Aegerisees mit denen des Pfäffikersees und Greifensees macht deutlich, wie wenig die Zehrungszahlen beim oligotrophen See schwanken und wieviel kleiner sie sind als bei den beiden eutrophen Seen. Im Sommerhalbjahr sind die Unterschiede wie erwartet offensichtlicher als im Winterhalbjahr.

Die Kalium-, Mangan- und Eisenverbindungen der Aegerisee-Sedimente (Abb. 4) waren beeinflußt durch die Einschwemmung feinster Gesteinstrümmer, während die Sedimente des Pfäffiker- und Greifensees in dieser Beziehung vorwiegend autochthon sind.

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

Verglichen mit den Wintersedimenten war die Menge der sedimentierten Stickstoff- und Phosphorverbindungen in den beiden eutrophen Seen im Sommer sehr groß, entschieden größer als beim Aegerisee (Abb. 4), bei dem die jahreszeitlichen Schwankungen klein sind. Das Stickstoff-Phosphor-Verhältnis blieb bei den drei Seen im allgemeinen auffallend konstant, meist $N : PO_4 = 1{,}5 : 1$ oder $N : P = 4{,}5$ 1; in den Pfäffikersee-Sedimenten vom 6. 9.—4. 12. 1950 war der Phosphatgehalt kleiner.

Gesamtzufluß, Gesamtabfluß, Stoffrückhalt und Sedimentmenge der Seen

Für die limnologische Beurteilung eines Sees ist es von großem Interesse zu wissen, welche Mengen von bestimmten Stoffen dem See durch die Zuflüsse oder durch Regen und Wind zugetragen und welche Mengen von diesen Stoffen durch den Seeabfluß oder durch direkten Verlust in die Luft (entfliegende Insekten-Imagines; denitrifizierte Stickstoffverbindungen; bei Übersättigung frei gewordener Sauerstoff usw.) aus dem See entfernt werden. Die direkte, exakte Messung der dem See zugetragenen und der aus dem See entfernten Stoffe ist mit großen Schwierigkeiten verbunden, da die Gesamtsummen unter Berücksichtigung des Wasserhaushaltes aus verhältnismäßig wenigen Einzelbestimmungen berechnet werden müssen, wobei die Bedeutung mancher Faktoren noch unbekannt ist. Aus diesem Grunde ist es erwünscht, die Kenntnisse über Stoffkreisläufe im See durch Sedimentmessungen zu erweitern.

Da die mittels Sedimentmeßpfanne gewonnenen Sedimente ratenweise alle Monate aus kühler Tiefe dem See entnommen wurden, untersuchten wir immer relativ frisches Material. Bei langer Lagerung im See unterliegen jedoch die Sedimente mancherlei Umsetzungen, von denen wir im folgenden Abschnitt einige erwähnen. Es ist deshalb leicht verständlich, daß der Seerückhalt (= Differenz zwischen der mit den Zuflüssen in den See gebrachten Stoffmenge und der Stoffmenge des Seeabflusses) im allgemeinen nicht identisch ist mit der aus den Einzelraten summierten Menge des Jahressedimentes.

Aus den Untersuchungsergebnissen sei hier hervorgehoben, daß beim oligotrophen Aegerisee die Phosphatzufuhr, berechnet auf die Seeoberfläche, weit geringer war als beim eutrophen Pfäffikersee und Greifensee. Im Sediment kamen diese Unterschiede zwar noch deutlich, aber etwas weniger ausgeprägt zum Ausdruck, weil das Sediment des Aegerisees zeitweise reichlich eingeschwemmte Gesteinstrümmer enthielt, die

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

bei starken Regenfällen schubweise in den See gelangen. Auch die Stickstoffzufuhr war beim Aegerisee wesentlich geringer als bei den beiden eutrophen Seen, doch verließen prozentual viele Stickstoffverbindungen den See wieder, weil die knapp vorhandenen Phosphate deren biologische Verwertung nur teilweise zuließen. Das Verhältnis N : P war bei den Zuflüssen des Aegerisees besonders groß, in den Sedimenten der drei Seen aber ziemlich ausgeglichen. — Die Sauerstoffzehrung der Sedimente des oligotrophen Sees war entschieden kleiner als diejenige der beiden eutrophen Seen.

Rückwanderung sedimentierter Phosphor- und Stickstoffverbindungen ins Wasser

Die Rückwanderung von Stoffen aus den sich zersetzenden Sedimenten ins freie Wasser spielt besonders bei eutrophen Seen für den Stoffhaushalt eine große Rolle und ist leicht erkennbar am erhöhten Ionengehalt in der bodennahen Wasserschicht solcher Seen. Zur Prüfung der Frage, wieviel von den sedimentierten Stickstoff- und Phosphorverbindungen bei anaerober Zersetzung des Schlammes wieder in Lösung gehe, füllten wir von jeder Sedimentrate 50 ml in ein mit eingeschliffenem Glasstopfen versehenes Fläschchen und verhinderten den Luftzutritt durch Isolierung des Glasschliffes mit Paraffinöl. Parallel dazu wurden weitere 50 ml in ein Fläschchen abgefüllt, das nur mit lockerem Wattebausch verschlossen war, so daß die Luft gut zutreten konnte (aerobes Milieu). In Tab. 1 sind die in den drei Seen gefundenen Jahressummen des mit den Sedimenten abgelagerten Phosphors, Stickstoffs, Eisens und Mangans angegeben und verglichen mit den aus den Sedimenten ins Wasser zurückkehrenden Stoffen.

Nach Tab. 1 ist zwar in den Sedimenten des eutrophen Pfäffiker- und Greifensees der Phosphor- und Stickstoffgehalt zwei- bis dreimal so groß wie beim oligotrophen Aegerisee; bei den beiden eutrophen Seen kehren aber im Experiment sechs- bis zehnmal mehr Phosphorverbindungen und vier- bis fünfmal mehr Stickstoffverbindungen ins freie Wasser zurück als beim Aegerisee. Ferner zeigt Tab. 1, daß beim Aegerisee prozentual, bezogen auf die Summe der ursprünglich abgelagerten Sedimentraten, wesentlich weniger Stickstoff- und Phosphorverbindungen ins freie Wasser zurückkehren als bei den beiden eutrophen Seen. Bei allen drei Seen sind die aus den Sedimenten ins freie Wasser zurückkehrenden Stoffmengen bezüglich des Stickstoffes entschieden größer als als bezüglich des Phosphors. Für den ins freie Wasser zurückkehrenden Sedimentanteil ist N : P beim Aegerisee besonders hoch, aber auch bei

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

Tabelle 1

		Aegerisee	Pfäffikersee	Greifensee
im Sediment im mg pro Jahr und Pfanne	P	42,0	103,5	92,5
	N	174,4	506,4	452,0
	N : P	4,1 1	4,9 1	4,9 1
	Fe	747,6	271,8	375,4
	Mn	78,8	97,3	54,7
Rückkehr ins Wasser in mg pro Jahr und Pfanne (anaerobes Milieu)	P	4,7	45,8	31,3
	N	77,1	324,0	313,4
	N : P	16,4 1	7,1 : 1	10,0 1
	Fe	74,8	42,8	44,8
	Mn	27,2	46,6	16,8
Rückkehr ins Wasser in % (anaerobes Milieu)	P	11,2	44,3	33,8
	N	44,2	64,0	69,3
	Fe	10,0	15,7	11,9
	Mn	34,5	47,9	30,7

den beiden eutrophen Seen viel höher als im ursprünglichen Sediment. Diese Beobachtungen stehen im Einklang mit den früheren Untersuchungsergebnissen, wonach in schweizerischen Seen ursprünglich Phosphor als Minimumstoff zu gelten hat (*Thomas,* 1949, 1953, S. 78 und 1963).

Der sprungartige Verlauf des Eutrophierungsvorganges

Bei einer größeren Anzahl von Seen ist beobachtet worden, daß der Eutrophierungsvorgang nicht geradlinig erfolgt (also nicht „rasant" im echten Sinne des Wortes), sondern sprungartig, also „saltant" So ist der Felchenbestand im Pfäffikersee und im Greifensee plötzlich durch Fischsterben ausgestorben, die beim Verschwinden des Sauerstoffes im Hypolimnion erstickten. Auf Grund der Sedimentationsforschungen war es möglich, die Ursache des sprunghaften Verlaufes der Eutrophierung nachzuweisen (Thomas, 1955, b, S. 442, Abb. 19).

Für den Türlersee und den Zürich-Obersee bestimmten wir ebenfalls während eines Jahreszyklus die allmonatlichen Sedimentraten und dehnten hier die Experimente betreffend die Nährstoffrückkehr aus dem

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

Sediment ins freie Wasser auf das aerobe und das anaerobe Milieu aus. Bei den Sedimentraten des Türlersees gingen dabei im aeroben Milieu 2% (1%) der Phosphorverbindungen und 6% (7%) der Stickstoffverbindungen und im anaeroben Milieu 28% (8%) der Phosphorverbindungen und 88% (31%) der Stickstoffverbindungen in das über dem Schlamm liegende Wasser hinaus, wobei die eingeklammerten Zahlen die entsprechenden Verhältnisse im Zürich-Obersee angeben[1].

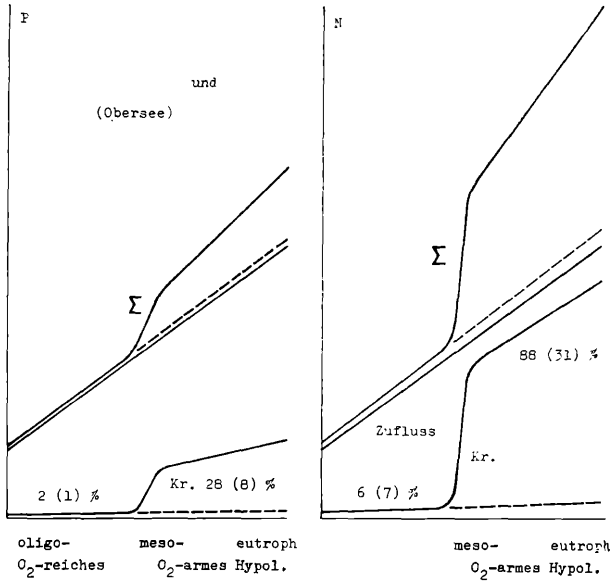

Abb. 5 Schema der sprungartigen (saltanten) See-Eutrophierung. Kr. = Menge der aus dem Sediment ins Wasser zurückkehrenden P- und N-Verbindungen (Kreislaufsediment), Σ = Summe der zufließenden und der aus dem Sediment zurückkehrenden P- und N-Verbindungen.

Nimmt in einem oligotrophen See die Zufuhr von Stickstoff- und Phosphorverbindungen gleichmäßig zu, wie in Abb. 5 schematisch dargestellt, dann schreitet die Eutrophierung solange nur geradlinig vorwärts, bis oberhalb vom Bodenschlamm bei Stagnationsperioden eine

[1] In der Originalbeschreibung (Thomas, 1955, b, S. 442) ist leider an dieser Stelle eine Zeile ausgefallen, was hier berichtigt ist.

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

ausgedehnte Sauerstoffzehrung erfolgt. Wenn erstmals eine Sauerstoffzehrung über dem Bodenschlamm stattfindet, dann können viel mehr von den vorher im Sediment verankerten Nährstoffen ins freie Wasser und damit in die erneuten Stoffkreisläufe zurückkehren. Mit anderen Worten ist also die Sauerstoffzehrung des Hypolimnions die auslösende Ursache einer plötzlichen, zusätzlichen See-Eutrophierung. Ist der Boden des Seebeckens flach und ausgedehnt, was oft vorkommt, dann wird durch das erstmalige Auftreten von sauerstofffreiem Tiefenwasser ein schroffer Eutrophierungssprung erzeugt; ist das Seebecken halbkugelig, trichter- oder schluchtartig, so erfolgt dieser Sprung wenig ausgeprägt. Wird während der Stagnationszeit das ganze Hypolimnion sauerstofffrei, dann ist der Eutrophierungssprung überwunden und ein Zustand erreicht, in dem die Eutrophierung wieder geradlinig fortschreitet, entsprechend der Summe der zugeführten und der aus dem Sediment ins Wasser zurückkehrenden Nährstoffe (Abb. 5).

Unser 1955, b gegebenes Schema (wie Abb. 5) der sprungartigen („saltanten") See-Eutrophierung ist auch von *Ohle* (1958, S. 129) übernommen worden.

Schwefelwasserstoffresistente Algen

Bei unseren Experimenten über die Stoffrückwanderung aus Sedimenten wurden die Sedimentraten nach Versuchsabschluß dem Tageslicht ausgesetzt. Trotz reichem Schwefelwasserstoffgehalt blieben von einer Anzahl von Algen noch Keime am Leben, die sich am Licht reichlich entwickelten. Wir fanden Kolonien von *Chroococcus, Spirulina, Phormidium, Anabaena constricta, Anabaena* sp. z. T. mit Heterocysten, *Stigonematacee, Nostocacee, Navicula, Melosira, Stigeoclonium flagelliferum, Scenedesmus quadricauda* und andere.

Obschon diese Algen im Dunkeln ein volles Jahr im anaeroben Milieu verbracht hatten, fand nachher am Licht schon nach wenigen Wochen eine vom Auge sichtbare, reichliche Entwicklung statt.

Beziehungen zwischen Sauerstoffzehrung des Seewassers und des Sedimentes

Es ist verhältnismäßig leicht, für einen See zu berechnen, wie groß die Sauerstoffzehrung im Hypolimnion ist. Am sichersten läßt sich eine solche Berechnung durchführen für den Zeitraum von der beginnenden Sommerstagnation bis zum Beginn der herbstlichen Teilzirkulation; während dieser Stagnationsperiode wird dem Hypolimnion einerseits kein

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

neuer Sauerstoff von oben her zugeführt, anderseits finden zu dieser Zeit im Hinblick auf die Maxima der Entwicklung und des Absterbens des Planktons die größten Zehrungen statt.

Für eine Beurteilung der Bedeutung der Sauerstoffzehrung des Sedimentes berechneten wir einerseits, wieviel Sauerstoff vom hypolimnischen Vorrat prozentual während der Sommerstagnation im See verbraucht wird, anderseits aber auch wie viele Prozente des hypolimnischen Vorrates auf Grund unserer experimentellen Ermittlungen durch die Seesedimente verbraucht werden.

Tabelle 2.

	Aegerisee	Pfäffikersee	Greifensee
O_2-Verbrauch im Hypolimnion bei Sommerstagnation	18,92%	93,02%	93,98%
Durch experimentelle Sedimentoxydation verbrauchter O_2, bezogen auf Hypolimnion	12,00%	136,18%	115,41%
Verhältnis von O_2-Zehrung des Jahressedimentes zu O_2-Zehrung im Hypolimnion bei Sommerstagnation	1 : 1,66	1 : 0,68	1 : 0,81

Der hypolimnische Sauerstoffvorrat des Aegerisees wird im Sommer gemäß Tab. 2 nur kleinenteils angegriffen, während beim Pfäffiker- und Greifensee fast aller Sauerstoff aufgezehrt wird. Der Einfluß des Bodenschlammes ist beim Aegerisee noch sehr gering, hingegen ist die Sauerstoffzehrung des Jahressedimentes beim Pfäffikersee und Greifensee größer als der Sauerstoffvorrat des Hypolimnions. Abgesehen von allen anderen sauerstoffzehrenden Faktoren im Hypolimnion kann bereits die Sauerstoffzehrung des Sedimentes den totalen Sauerstoffschwund im Hypolimnion hervorrufen. Der Sauerstoffvorrat des Hypolimnions im Frühjahr reicht nicht aus, um den Sedimentschlamm von leicht oxydierbaren Stoffen zu befreien.

Zusammenfassung

Die Gewinnung von Sedimentraten mittels Sedimentmeßpfannen ermöglicht aufschlußreiche Ergebnisse. Der experimentell bestimmte Sauer-

© Bundesamt für Wasserwirtschaft, download www.zobodat.at

stoffverbrauch der Sedimentraten erlaubt es, die weitere Entwicklung eines Sees zu beurteilen, d. h. die oft erfragte Prognose zu stellen. Dabei ist allerdings eine Berücksichtigung der Phosphor- und Stickstoffbilanzen nötig.

Literatur

Bachofen, Reinhard 1960. Stoffhaushalt und Sedimentation im Baldegger- und Hallwilersee. Inaugural-Dissertation der Universität Zürich. 118 S., 41 Abb., 16 Tab., Juris-Verlag, Zürich.

Bosset, E.: 1962. Le lac de Joux. Schweiz. Z. f. Hydrologie, Vol. 24, S. 90—151. Der ausführliche Text der Arbeit, eingereicht als Dissertation, kann eingesehen werden in der Bibliothek von Kanton und Universität Lausanne.

Kopecky, J.: Sedimentation im Fuschlsee bei Salzburg (unveröffentlicht).

Mortimer, C. H.: 1941/42. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. Journ. of Ecology, 29/30.

Ohle, W.: 1958. Die Stoffwechseldynamik in Abhängigkeit von der Gasausscheidung ihres Schlammes. Vom Wasser, Nr. 15, S. 127—149.

Thomas, E. A.: 1950. Beitrag zur Methodik der Produktionsforschung in Seen, Schweiz. Z. f. Hydrologie, Nr. 12, S. 25—37.

Thomas, E. A.: 1951. Produktionsforschungen auf Grund der Sedimente im Pfäffikersee und Zürichsee. Verh. I. V. L., Nr. 11, S. 409—421.

Thomas, E. A.: 1953. Zur Bekämpfung der See-Eutrophierung: Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete. Monatsbull. Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachm., Nr. 2/3.

Thomas, E. A.: 1955, a. Sedimentation in oligotrophen und eutrophen Seen als Ausdruck der Produktivität. Verh. I. V. L., Nr. 12, S. 383—393.

Thomas, E. A.: 1955, b. Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Aegerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., Suppl. 8, S. 357—465. Colloque I. U. B. S., Nr. 19.

Thomas, E. A.: 1956. Sedimentation und Stoffhaushalt im Türlersee. Monatsbull. Schweiz. Ver. Gas- u. Wasserfachm., Nr. 12.

Thomas, E. A.: 1963. Die Veralgung von Seen und Flüssen, deren Ursache und Abwehr. Monatsbull. Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachm., Nr. 6/7.

Thomas, E. A. und Märki, E.: 1949. Der heutige Zustand des Zürichsees. Verh. I. V. L., Nr. 10, S. 489—495.

Anschrift des Verfassers: PD Dr. E. A. Thomas, Limnologische Abteilung des kant. Laboratoriums, Fehrenstr. 15, 8032 Zürich.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Wasser und Abwasser

Jahr/Year: 1963

Band/Volume: 1963

Autor(en)/Author(s): Thomas E. A.

Artikel/Article: Experimentelle Untersuchungen über die Schlammbildung in unberührten und kulturbeeinflußten Seen der Schweiz 154-169