

Extreme Sauerstoffminima im Greifensee; Mitwirkung meteorologischer Faktoren

Von

E. A. THOMAS

(Universität und Kantonales Laboratorium Zürich)

Naturzustand und erste Veränderungen des Greifensees

Aus fischereilichen Angaben, aus biologischen Untersuchungen (besonders GUYER, 1910) und aus unseren Untersuchungen von Seeschlammprofilen geht hervor, dass der Greifensee vor zirka 1910 dem oligotrophen Seetypus angehörte. Der See verfügte über einen guten Felchenbestand, und an seinen Ufern blühten nach GUYER (1910) noch Seerosen (*Nymphaea*). Die vorhandene Menge an Phytoplanktonorganismen war noch gering, und die für eutrophe Seen charakteristischen Plankter waren noch nicht vorhanden.

Auf einen ersten Schritt zur Eutrophierung haben in den Jahren 1915 und 1916 Prof. Dr. W. SILBERSCHMIDT und Prof. Dr. W. FEHLMANN hingewiesen. Sie beobachteten, dass der reichlich mit Abwässern belastete Aabach bis weit in den See hinaus ein Delta von fauligem Schlamm gebildet hatte, während der Seeschlamm im übrigen aus heller, oxydierter Seekreide bestand. Mit anderen Worten: Der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers (Hypolimnion) war damals noch während des ganzen Jahres befriedigend, mit Ausnahme der bodennahen Wasserschichten im engeren Gebiet der Aabachmündung. Die beiden Forscher haben schon damals die Befürchtung ausgesprochen, dass der See infolge der Einschwemmung grosser Abwassermengen durch den Aabach in kurzer Zeit den eutrophen Zustand erreichen könnte, wobei sie auf die damit verbundenen schlimmen Folgen hinwiesen.

In einem nicht veröffentlichten Gutachten legte sodann Dr. L. MINDER (1918) dar, dass der See in 23 m Tiefe am 7. Oktober 1917 nur noch 3,4 mg/l Sauerstoff enthalten hatte, im Gegensatz zu 11,1 mg/l (25 m Tiefe) am 1. Mai 1917. Ohne diese Arbeit zu kennen, schrieben wir später (THOMAS, 1944): «Eine zweite, weit gefährlichere Stufe der Eutrophierung muss der Greifensee ungefähr im Jahre 1917 erreicht haben, wie aus unseren Schlammprofil-Untersuchungen hervorgeht. Damals lagerte sich erstmals ziemlich dunkler, also nicht restlos oxydierter Schlamm ab. Wenn auch von eigentlichem Faulschlamm noch nicht gesprochen werden kann, so lässt doch seine Beschaffenheit darauf schliessen, dass im Hypolimnion mindestens zeitweise ein erheblicher Sauerstoffmangel herrschte.»

Dieser Zustand dauerte rund 15 Jahre. Interessanterweise ging nun dieser letzte Schritt zur vollständigen Eutrophie nicht allmählich vor sich, sondern sprunghaft ungefähr im Jahre 1932. Damals erfolgte die Invasion von *Tabellaria fenestrata*, einer planktischen Kieselalge, ein grosses Fischsterben fand statt, und es lagerte sich in Tiefen von mehr als 25 m erstmals echter, dunkler Faulschlamm ab; der See hatte den eutrophen Zustand erreicht, nicht auf natürlichem Wege, sondern infolge von Abwässereinleitung und damit verbundener Überdüngung des Planktons.

Die zunehmende Eutrophierung des Sees nach 1940

Immer lauter werdende Klagen über die künstliche Verunreinigung des Greifensees liessen das dringende Bedürfnis erkennen, den limnologischen Charakter des Sees genauer zu kennen. Im Jahre 1941 übernahm der diplomierte Naturwissenschaftler E. MÄRKI die Aufgabe, eingehende chemische, physikalische und bakteriologische Untersuchungen am Greifensee durchzuführen, deren Ergebnisse als Dissertation publiziert wurden (MÄRKI, 1943).

Von den im Jahre 1941 durchgeführten Untersuchungen seien hier besonders die Sauerstoffuntersuchungen erwähnt. Im Oberflächenwasser war der Sauerstoffgehalt während des ganzen Jahres genügend hoch, im ungünstigsten Monat (Dezember) noch 7,7 mg/l. In der grössten Tiefe enthielt das Wasser bei Jahresbeginn 6,5 bis 6,8 mg/l, ein Wert, der im Februar auf 2,7 mg/l sank. Im April 1942 brachte eine gute Zirkulation ob Grund einen Gehalt von 8,9 mg/l, doch sank dieser Wert anschliessend von Monat zu Monat bis auf 0,0 im August. In den drei Monaten August bis Oktober verschwand im Hypolimnion der Sauerstoff fast vollständig (weniger als 1 mg/l). Teilzirkulationen im November und Dezember brachten wieder sauerstoffhaltiges Wasser zu 10 m, dann zu 20 m Tiefe hinunter. Ähnliche Verhältnisse lagen im Jahre 1950 vor (THOMAS, 1955) und in den anschliessenden Jahren.

Im Oberflächenwasser trat erstmals ein besonders ungünstiger Sauerstoffgehalt von nur 2,5 mg/l im Dezember 1961 auf, sodann von Dezember 1964 bis Januar 1965 mit 2,7 mg/l. Einen neuen traurigen Rekord boten der Dezember 1968 mit 1,3 mg/l und schliesslich die Monate November und Dezember 1972 mit weniger als 1 mg/l. Es drängt sich deshalb auf, die limnologischen Vorgänge im Greifensee für die Jahre 1972–1975 im folgenden genauer zu betrachten.

Den Mitarbeitern der Limnologischen Abteilung des Kantonalen Laboratoriums Zürich sei an dieser Stelle der beste Dank für ihre sorgfältigen Erhebungen ausgesprochen.

Extrem ungünstige Sauerstoffverhältnisse im Jahre 1972

Bei Jahresbeginn enthielt zwar das Wasser in den obersten 10 m etwas über 4 mg/l Sauerstoff; unterhalb von 20 m Tiefe war der See jedoch sauerstofffrei und enthielt sogar Schwefelwasserstoff. Somit hatte als Folge des warmen und windarmen Herbstes 1971 im See keine Vollzirkulation stattgefunden. Die Oberflächentemperatur blieb in den Monaten Januar und Februar mit 3,2° und diejenige des Tiefenwassers mit 4,6° C

stabil. Zwischen dem 16. März und dem 10. April bewirkten starke Stürme eine teilweise Durchmischung des Wassers, so dass die Tiefentemperatur auf $5,3^{\circ}$ und im Laufe des Sommers auf $6,3^{\circ}$ stieg. Diese geringe und allmähliche Einmischung von wärmerem Wasser hatte aber nicht genügt, um den Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers wesentlich zu verbessern.

So enthielt der See auch im März unterhalb von 20 m Tiefe keinen Sauerstoff, und schon im Mai war in der Wassermasse unterhalb von 12 m Tiefe nirgends ein Sauerstoffgehalt von mehr als 0,2 mg/l vorhanden. Das Tiefenwasser war also im Winter 1971/72 nicht durch Vollzirkulation mit Sauerstoff angereichert worden. Dies hatte zur Folge, dass sich im Laufe des Sommers unterhalb von 8 m Tiefe im See sauerstoffzehrende Abbauprodukte ansammelten, was besonders in den Monaten September und Oktober in einem hohen Gehalt an Schwefelwasserstoff zum Ausdruck kam. Das Tiefenwasser des Sees befand sich also schon im Herbst in einem ungewöhnlich ungünstigen Zustand.

Die Hauptursache dieses ungünstigen Zustandes ist die immer noch zu hohe Düngstoffzufuhr; ferner trugen die für den See ungünstigen Witterungsverhältnisse des Winters 1971/72 dazu bei, dann aber auch diejenigen des Sommers 1972, als besonders gegen den Herbst hin sehr wenig Niederschläge fielen. Die sich im Herbst an der Seeoberfläche ansammelnden Blaualgen werden normalerweise durch Regen und anderes Zuflusswasser weitgehend aus dem See geschwemmt. Der Wassermangel des Jahres 1972 liess jedoch allzu grosse Mengen von Algen in das Tiefenwasser absinken, wodurch sich die Menge sauerstoffzehrender Produkte noch vergrösserte (THOMAS, 1973).

Andererseits hatten sich im Einzugsgebiet des Sees als Folge des Niederschlagsmangels reichlich Abfallprodukte angesammelt. Die extrem starken Regenfälle im Monat November haben deshalb in kurzer Zeit sehr viele Schmutzstoffe in den See geschwemmt, die er nicht innert kurzer Zeit verarbeiten konnte. Durch Hochwasser wurden sogar die Ufer überschwemmt; von Staueen weiss man, dass in solchen Fällen eine besonders grosse Sauerstoffzehrung entsteht. Zusätzlich vermischten während kurzer Zeit wirkende Stürme sauerstoffzehrendes Tiefenwasser mit dem Oberflächenwasser, und anschliessend trat Windstille ein, so dass der Sauerstoffmangel von der Oberfläche her nicht genügend rasch beseitigt werden konnte.

Diese verschiedenen, den See ungünstig beeinflussenden Faktoren führten dazu, dass gegen Jahresende im Greifensee extrem ungünstige Sauerstoffverhältnisse auftraten, wie sie nie vorher beobachtet worden sind. Wahrscheinlich führten die bei Jahresende sehr niedrigen Sauerstoffgehalte von weniger als 1 mg/l nur darum nicht zu einem Fischsterben, weil die Wassertemperatur sehr niedrig war ($4,5^{\circ}$ bis $3,8^{\circ}$ C). Bei dieser kritischen Situation wurde der Betrieb der Kläranlagen vermehrt überwacht, und es wurden Aufrufe erlassen, der Abwasserbeseitigung auch in der Industrie und Landwirtschaft höchste Beachtung zu schenken.

Milderung des Sauerstoffmangels im Jahre 1973

Während die Wassertemperatur am 27. Dezember 1972 bei voller Zirkulation noch $4,5^{\circ}$ C betragen hatte, ergab sich bis zum 18. Januar 1973 eine inverse Schichtung mit

2,4° an der Oberfläche und 3,5° in 30 m Tiefe. Diese typische Winterstagnation hatte zur Folge, dass die oberste 2,5-m-Schicht Sauerstoff aufnehmen konnte bis zu 3,3 bis 3,6 mg/l, während die Werte unter 20 m Tiefe noch unter 1 mg/l blieben. In den Monaten März und April fanden kräftige Zirkulationsströmungen statt, die den Sauerstoffgehalt auch im Tiefenwasser auf über 6–7 mg/l ansteigen liessen. Wie seit Jahrzehnten sanken diese Werte im Laufe des Sommers in mehr als 5 m Tiefe auf wenige Zehntelmilligramme, während das Oberflächenwasser durch rege Photosynthesetätigkeit der Planktonalgen an Sauerstoff übersättigt war. Da der Oktober überdurchschnittlich warm war, liess sich zu dieser Zeit noch keine Prognose für den Winter aufstellen. Dann aber traten kräftige Stürme auf, die sich trotz des noch relativ warmen Wassers für den See günstig auswirkten.

Im November und Dezember kühlte sich das Wasser auf 4° C ab, und gleichzeitig führten die Stürme zu einer guten Wasserzirkulation. Bei Untersuchungen vom 11. Dezember 1973 enthielt der Greifensee von 0 bis 25 m Tiefe 3,2 bis 2,7 mg/l Sauerstoff, worauf vor allem an den Flachufeln ein weiterer rascher Anstieg erfolgte. Die Sauerstoffverhältnisse waren deshalb bei Jahresende wesentlich besser als im Vorjahr, was aber in diesem Falle nicht auf eine Verminderung der Düngstoffzufuhr, sondern lediglich auf meteorologische Faktoren zurückzuführen ist.

Der See im Jahre 1974

Zwischen dem 11. Dezember 1973 und dem 9. Januar 1974 sank die Oberflächentemperatur von 4,8° auf 3,4° C, wobei die Phase der Homothermie offenbar rasch durchschritten wurde, so dass keine andauernde Vollzirkulation zustande kam. Hingegen war der See am 11. Februar gut durchmischt, was in der zwischen 3,8° und 4,0° C liegenden Wassertemperatur und im ausgeglichenen Chemismus der gesamten Wassermasse zum Ausdruck kam. Der Sauerstoffgehalt schwankte im ganzen Profil nur zwischen 5,0 und 5,6 mg/l. Bis zum 5. März sank er auf 1,2 mg/l (in 30 m Tiefe) bis 4,2 mg/l (Oberflächenwasser).

Schon anfangs April machte sich im Oberflächenwasser der Beginn der Sommerstagnation deutlich bemerkbar durch eine Oberflächentemperatur von 10,8° C und eine intensive Phytoplanktonentwicklung. Bei einer auf 0,5 m gesunkenen Durchsichtigkeit stieg der Sauerstoffgehalt im Oberflächenwasser auf 27,1 mg/l. Die im Oberflächenwasser reichlich enthaltenen Nitrate und Phosphate wurden bereits teilweise zur Planktonsubstanz umgewandelt. Während des Sommers sank der Gehalt an Nitraten nicht unter 0,8 mg/l NO_3^- , während das Oberflächenwasser am 9. Juli weniger als 0,02 mg/l PO_4^{3-} enthielt. Also waren im Düngstoff-Engpass des Sommers nicht die Stickstoffverbindungen, sondern die Phosphate Minimumstoff.

Der im Sommer hohe Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers glich sich durch Teilzirkulationen bis zum 8. Oktober zwischen 0,3 und 7,5 m auf 6,9 mg/l aus; das Wasser in 10 m Tiefe enthielt noch 4,4 mg/l, in grösserer Tiefe weniger als 0,2 mg/l. Am 6. November enthielt das Oberflächenwasser noch 5,0 mg/l Sauerstoff, doch sank der Gehalt zwischen 2,5 m und 12,5 m auf 4,8 bis 4,7 mg/l; in 15 m Tiefe waren wieder

2,3 mg/l vorhanden, während die Werte in grösserer Tiefe immer noch unter 0,2 mg/l lagen.

Unsere letzte See-Untersuchung des Jahres 1974 stammt vom 6. Dezember. Zu dieser Zeit hatten die Teilzirkulationen den See bis zu einer Tiefe von 25 m gut durchgemischt. Dabei war sauerstoffreiches Tiefenwasser, das zusätzlich sauerstoffzehrende Stoffe enthielt, mit dem Wasser der oberen Schichten gemischt worden. Bei einer für diese Jahreszeit ungewöhnlich hohen Wassertemperatur von immer noch über 6° C fanden im Mischwasser Abbauprozesse statt, was zu einem Sauerstoffgehalt von 3,4 mg/l (Oberfläche) bis 3,0 mg/l (25 m Tiefe) führte.

Der am 6. Dezember 1974 noch nicht zirkulierende Rest des Tiefenwassers machte weniger als 8% der gesamten Wassermasse des Sees aus, so dass im Winter 1974/75 nach diesen Untersuchungen keine so ungünstigen Sauerstoffverhältnisse auftraten wie Ende 1972. Vielmehr glichen sich die Sauerstoffverhältnisse der Jahre 1973 und 1974 im Dezember aus; lediglich die Wassertemperatur war im Dezember 1974 um fast 2° C höher. Die anschliessenden meteorologischen Verhältnisse brachten dem See eine deutliche Auffrischung des Sauerstoffgehaltes.

Vergleichende Bemerkungen zum Seejahr 1975

Zwischen dem 3. Dezember 1974 und dem 14. Januar 1975 kühlte sich das Greifenseewasser von 6,1° C auf 4,6° C ab, wobei der See eine volle Zirkulation erreichte. Erfreulicherweise stieg der Sauerstoffgehalt in dieser Zeit von 3,2 mg/l auf im Mittel 5,8 mg/l. In den Monaten Februar und März veränderte sich der Sauerstoffgehalt des Sees nur wenig. Eine gute Durchmischung brachte erst die kalte und stürmische Periode in der zweiten Hälfte des Monats März; als Folge stieg der Sauerstoffgehalt bis zum 8. April auf 11,1 (Oberfläche) bis 7,3 mg/l (Grund). Bis zum 12. Mai führte die Erwärmung des Oberflächenwassers zur Sommerstagnation des Sees. Die Photosynthesetätigkeit der Algen erhöhte den Sauerstoffgehalt zwischen 0 und 5 m Tiefe, während der Sauerstoffvorrat des Tiefenwassers durch Zehrungsvorgänge bereits wieder vermindert wurde. Eine extreme Schichtung trat im August auf mit starker Sauerstoffübersättigung im Oberflächenwasser und Sauerstoffgehalten unter 0,3 mg/l in Tiefen unter 5 m.

Am 10. Dezember war das Oberflächenwasser mit 6,2° C noch ungewöhnlich warm, und die Durchmischung reichte erst von 0 bis 15 m Tiefe; das eigentliche Tiefenwasser von 17,5 bis 32 m Tiefe war zu dieser Zeit noch annähernd sauerstofffrei. Über dem Bodenschlamm stieg der Ammoniakgehalt auf über 2 mg/l, ebenso der Phosphatgehalt (angegeben als PO_4^{3-}).

Anforderungen an den Zustand des Greifensees

Zu den Anforderungen, die an den Zustand des Greifensees gestellt werden müssen, gehören vordringlich Sauerstoffverhältnisse, bei denen der heutige Fischbestand zu keiner Zeit von Sauerstoffmangel bedroht ist. Sodann muss das Wuchern der Plank-

tonmassen durch eine weitere Einschränkung der Phosphatzufuhr verkleinert werden; damit wird ein klareres Seewasser erreicht.

Die ohne Ringleitung im Gebiete des Greifensees möglichen Gewässerschutzmassnahmen sind heute ohne Zweifel noch nicht vollendet. Der soeben vollendete Ausbau der Kläranlage der Stadt Uster bedeutet hierzu einen wichtigen Schritt. Es gibt aber noch viele weitere Schritte, die heute getan werden könnten.

Zu diesen notwendigen Gewässerschutzmassnahmen gehört die Erweiterung der überlasteten Kläranlagen, das Erstellen von Abwasserrückhaltebecken für intensive Regenfälle, die genügende Vorreinigung der Abwässer und Fällmittelzugabe für die Phosphatelimination, regelmässige Abflussprüfungen, Sanierung der landwirtschaftlichen Abwässer, wo dies noch nicht geschehen ist, dann aber auch sparsamer Verbrauch von phosphathaltigen Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Kunstdünger. Schliesslich ist zu berücksichtigen, dass das Einzugsgebiet des Greifensees schon heute sehr stark besiedelt ist, und es stellt sich auch im Hinblick auf die Wasserplanung die Frage, ob eine weitere Zunahme der Bevölkerung in diesem Gebiet erwünscht und tragbar ist.

Ergänzungen und Zusammenfassung

Am 27. November 1972 bestimmten wir zwischen 0,3 und 20 m Tiefe bei einer Wassertemperatur von 7,1 bis 7,2° C lediglich 0,66 bis 0,44 mg/l Sauerstoff, während das tiefer liegende Wasser (6,7 bis 6,5° C) sauerstofffrei und schwefelwasserstoffhaltig war. Am 20. Dezember 1972 befand sich der See zwar im Zustand der Vollzirkulation (5,4 bis 5,2° C); sein Sauerstoffgehalt bewegte sich aber zwischen 0,08 und 0,83 mg/l. Damit war das Leben des Fischbestandes hochgradig gefährdet.

Auch im ufernahen Wasser war der Sauerstoffgehalt zu dieser Zeit sehr niedrig; wir bestimmten beim Strandbad Maur (Schilfgürtel) 0,2 bis 0,4 mg/l, beim Zeltplatz Uesikon 0,8 bis 1,2 mg/l, bei Jungholz, Niederuster 0,15 bis 1,01 mg/l. An diesen Stellen wurden vereinzelt Fische in träger Bewegung beobachtet. Tote, erstickte Fische wurden auch durch Taucher keine gefunden, offenbar dank der niedrigen Wassertemperatur, die die Lebenstätigkeit der Fische zusammen mit dem niedrigen Sauerstoffgehalt stark herabsetzte.

Hingegen brachten die Zuflüsse am 20. Dezember 1972 sauerstoffreiches Wasser: der Dorfbach Maur 13,34 mg/l (0,8° C), die Mönchaltorferaa 10,21 mg/l (2,8° C), der Riedikerbach oberhalb Rückstau 12,72 mg/l (4,9° C), der Aabach bei Niederuster 12,79 mg/l (3,5° C).

Nach Vermutung von Herrn Fischerei- und Jagdverwalter M. STRAUB dürften sich Fischschwärme im Einmündungswasser aufgehalten haben.

Am 19. Dezember 1972 erhobene Proben hatten einen biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB₅ als Mittel von je zwei Proben) von 1,58 mg/l (Verdünnung 1 : 1) bzw. 1,75 mg/l (Verdünnung 1 : 2). Bei sauerstoffarmem Greifenseewasser, im kühlen Raum in einem 1-Liter-Becherglas aufgestellt, stieg der Sauerstoffgehalt innerhalb von 5 Tagen trotzdem von 1,58 auf 7,12 mg/l bzw. von 0,74 auf 6,35 mg/l.

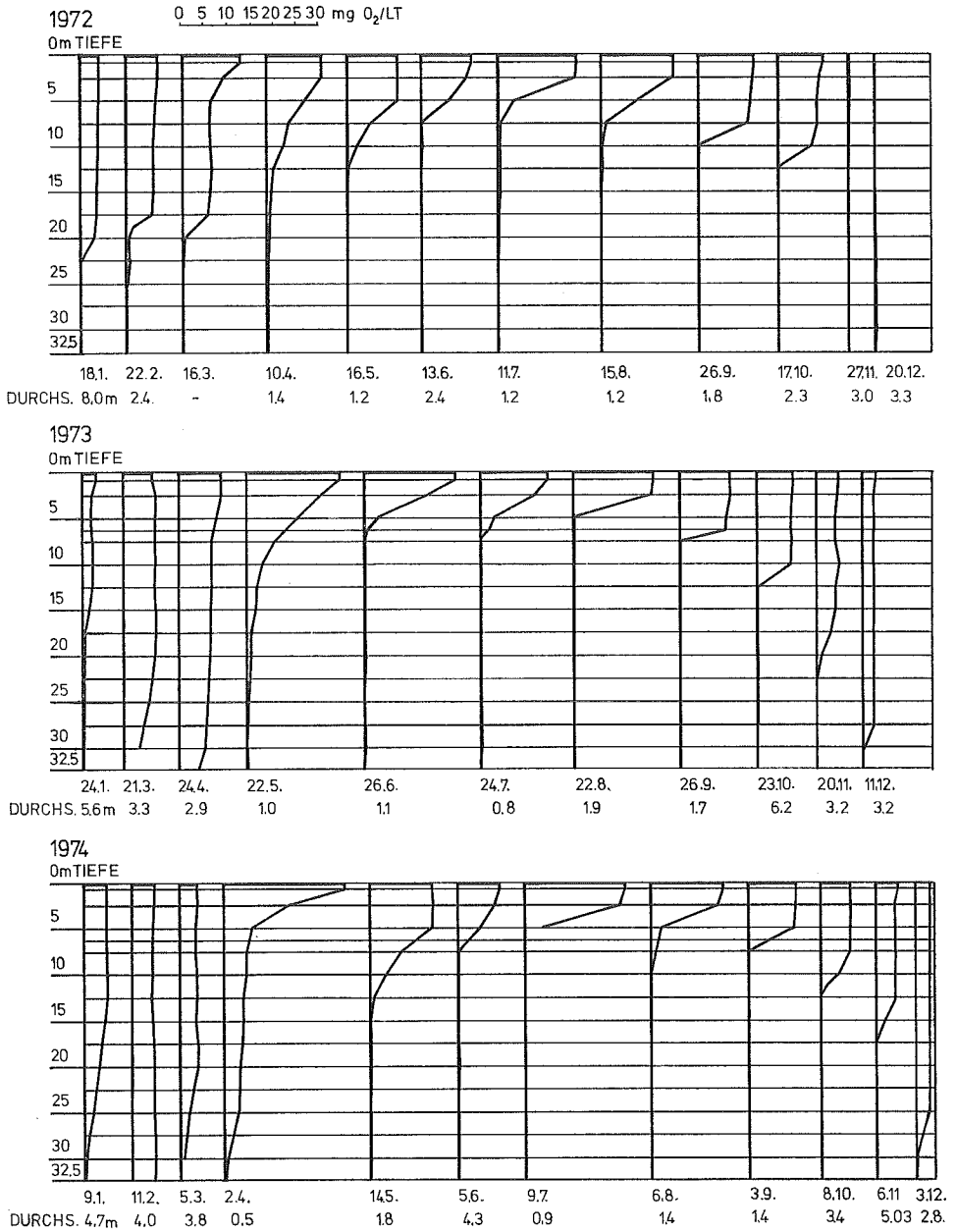


Abb. 1. Der Sauerstoffgehalt des Greifenseewassers in den Jahren 1972 bis 1974, tiefste Stelle (del. Verband zum Schutze des Greifensees).

Ein Vergleich des Seejahres 1972 mit den drei folgenden Jahren zeigt, dass für die extremen Sauerstoffminima ausser der immer noch zu hohen Düngstoffzufuhr verschiedene meteorologische Faktoren des Vorjahres (1971) sowie des Sommers und Herbstes 1972 verantwortlich waren; in Betracht kommen besonders Winde, Wassertemperatur, mangelnde Niederschläge, dann plötzliches Hochwasser. Da über die Sauerstoffverhältnisse des Greifensees ein sich über drei Jahrzehnte erstreckendes Zahlenmaterial vorliegt, ist eine statistisch-mathematische, gemeinsame Bearbeitung der limnologischen und meteorologischen Daten erwünscht. Diese von mir geplante Bearbeitung kann allgemeingültige Angaben über Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Hypolimnions unserer grösseren Seen liefern.

Zitierte Literatur

- FEHLMANN, W. (1915): Gutachten betreffend die Fischereiverhältnisse im Greifensee und Aabach z. H. der Finanzdirektion des Kantons Zürich.
- GUYER, O. (1910): Beiträge zur Biologie des Greifensees. Diss. Zürich, ETH, 96 S.
- MÄRKI, E. (1944): Chemische, physikalische und bakteriologische Untersuchungen am Greifensee. Ber. Schweiz. Bot. Ges. 54, 75–140.
- MINDER, LEO (1918): Bericht und Gutachten über chemische Untersuchungen des Greifensees z. H. der Finanzdirektion des Kantons Zürich, 31 S.
- SILBERSCHMIDT, W. (1916): Gutachten betreffend Greifensee und Aabach vom 8. Januar 1916 an die Finanzdirektion des Kantons Zürich.
- THOMAS, E. A. (1944): Biologische Untersuchungen am Greifensee. Ber. Schweiz. Bot. Ges. 54, 141–196.
- (1955): Stoffhaushalt und Sedimentation im oligotrophen Ägerisee und im eutrophen Pfäffiker- und Greifensee. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., suppl. 8, 357–465.
- (1973): Pfäffikersee und Greifensee bei Winteranfang 1973/74. Der Zürcher Oberländer, 31. Dez. 1973, S. 13, und 3. Jan. 1974, S. 13.
- (1975): Limnologische Untersuchungen am Greifensee. Verband zum Schutze des Greifensees, Dokumentation 1975, 7 S.