

Wärme-, Sauerstoff- und Schichtungsverhältnisse im Lützelsee vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung

Autor(en): Örn, Christer G. / Livingstone, David M. / Schanz, Ferdinand

Objektyp: Article

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Band (Jahr): 80 (1988)

Heft 7-8

PDF erstellt am: 13.09.2024

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940725>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wärme-, Sauerstoff- und Schichtungsverhältnisse im Lützelsee vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung

Christer G. Örn, David M. Livingstone und Ferdinand Schanz

Zusammenfassung

Die Wärme-, Sauerstoff- und Schichtungsverhältnisse im Lützelsee im Jahre 1980 vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung folgten nicht nur dem jahreszeitlichen Rhythmus des Wetters, sondern reagierten auch empfindlich auf kurzfristige Wetterumschläge, vor allem zwischen April und September. Während dieser Zeit waren die hypolimnischen Sauerstoffvorräte zeitweise fast verbraucht.

Résumé: La chaleur, l'oxygène et la stratification dans le Lützelsee avant la mise en service du drainage en profondeur

En 1980, c'est à dire avant la mise en service du drainage en profondeur, la chaleur, l'oxygène et la stratification thermique dans le Lützelsee ne dépendaient pas seulement des changements de saisons mais aussi des changements météorologiques de courte durée, surtout entre avril et septembre. Pendant cette période et par intervalles, l'oxygène hypolimnique était presque consommé.

Summary: Heat, oxygen and thermal stratification in Lützelsee before the installation of the deep-water diversion system

Heat, oxygen and thermal stratification in Lützelsee in 1980 before the installation of the deep-water diversion system were found to exhibit not only a seasonal dependence on the weather, but also to react to short-term meteorological events, especially between April and September. During this period the hypolimnetic oxygen was found at times to be almost completely depleted.

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit über den Lützelsee bildet einen Teil eines Untersuchungsprogramms über die Beeinflussung der Sauerstoffverhältnisse in nordostschweizerischen Seen durch meteorologische Faktoren. Bereits abgeschlossen sind Studien über den Zürichsee [5–9, 17] und den Greifensee [16]. Im Gegensatz zu diesen Gewässern konnte beim kleinen, seichten Lützelsee (Bild 1) nicht auf langjährige, fast lückenlose Reihen von monatlichen Messungen limnologischer Parameter zurückgegriffen werden. Vor 1980 liegen nur vereinzelt Messprofile des Kantonalen Laboratoriums Zürich vor. Wegen der Projektierung einer Tiefenwasserableitung zur Sanierung des eutrophen Lützelsees wurden jedoch 1980 vermehrt limnologische Daten aufgenommen. Dies ermöglichte den Jahresverlauf physikalischer und chemischer Faktoren näher zu verfolgen, was nach der Inbetriebnahme der Seesanierungsmaßnahme im März 1982 zum Vergleich herangezogen werden sollte. Die erste wissenschaftliche Arbeit über den Lützelsee wurde von Waldvogel [18] schon um die Jahrhundertwende verfasst. Thomas [13] und Steinemann [15] werteten Daten aus, die vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung erhalten worden waren. Storni [14] führte seine Algenwachstumsversuche mit Wasser von den Zu- und Abflüssen des Sees nach deren Inbetriebnahme aus. 1984 verfasste Leu-

mann [4] eine Studie über die Wirksamkeit der Sanierungsmaßnahme.

2. Bearbeitungsgrundlagen

Physikalische und chemische Messungen von 29 Messtagen zwischen dem 15. Januar und 30. Dezember 1980 stellte uns das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (AGW, Zürich) zur Verfügung. An 26 Tagen (Ausnahmen: 15. Januar, 21. November, 30. Dezember 1980) waren jeweils zwei Messprofile an verschiedenen Stellen (Bild 1) aufgenommen worden (Tiefen: 0,3 m, 1, 2, 3, 4, 5 und 5,5 m). Tabelle 1 enthält morphometrische Angaben zum See. Wenn keine anderen Angaben gemacht werden, verstehen wir unter dem Hypolimnion des Lützelsees die Wassermasse von 3 m Tiefe bis zum Grund (35% des gesamten Seevolumens). Die benötigten meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Windstärke, Globalstrahlung, Luftdruck) stammen von der Messstation Zürich der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (569,3 m ü. M.; Südhang), die sich 20 km nordwestlich des Lützelsees befindet.

3. Lufttemperatur und Windstärke

Die Auswirkungen von kurzfristigen meteorologischen Einflüssen auf den Lützelsee werden hier vorwiegend anhand des Verlaufs der Lufttemperatur und von Starkwindereignissen erläutert:

- Die Lufttemperatur (Bild 2a) hat eine direkte Wirkung auf die Wärmebilanz von Seen, indem sie die Verdunstung und den konvektiven Wärmeaustausch beeinflusst [2]. Die Lufttemperatur selbst wird aber durch die Strahlungsverhältnisse wesentlich mitbestimmt und kann deshalb als grober Indikator einiger der wichtigsten meteorologischen Faktoren, die den Wärmeaustausch bestimmen, betrachtet werden. Im Frühling und Sommer wurden drei Perioden mit stark unterdurchschnittlichen Lufttemperaturen verzeichnet (3. bis 13. April, 19. bis 29. April, 17. Juni bis 22. Juli 1980), die für den Lützelsee von Bedeutung waren.
- Starkwindereignisse spielen bei der Übertragung kinetischer Energie in den See – und deshalb bei Mischvorgängen – eine überragende Rolle, weil der Energieeintrag der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit proportional ist [12]. Um einen Überblick über die im Jahre 1980 vorgekommenen Starkwindereignisse zu geben, ist deshalb in Bild 2a der Windweg abgebildet, der während jeweils 10 Tagen von Winden mit einer Stärke von mindestens $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (im Stundenmittel) zurückgelegt worden war [5].

4. Wärmeverhältnisse

4.1 Wassertemperatur

Das Jahresminimum der Wassertemperatur wurde in allen Tiefen am 15. Januar gemessen, das Jahresmaximum von der Oberfläche bis in 3 m Tiefe am 6. August, in 4 m Tiefe am 1. September und in 5 m Tiefe erst am 9. Oktober (Bilder 2b und 3). Die Jahresamplitude betrug zwischen 12,2 K in 5 m und 23,9 K in 0,3 m.

Während die Oberflächentemperatur von kurzfristigen meteorologischen Ereignissen direkt beeinflusst wurde und deshalb einen ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperatur (Bild 2a) aufwies, verzeichnete man unterhalb 4 bis 5 m Tiefe von Januar bis Oktober eine annähernd stetige Temperaturzunahme (Bild 2b). Verglichen mit der Oberflächenschicht (0 bis 3 m) erfolgte die Erwärmung des Tiefenwas-



Bild 1. Ansicht des Lützelsees von Süden Richtung Bachtel. Die Region steht weitgehend unter Landschafts- und Naturschutz.

sers mit einer zeitlichen Verzögerung von etwa 2 Monaten. Für jedes Temperaturprofil wurde der grösste Temperaturgradient (dT/dz) bestimmt. Im Jahresverlauf trat die maximale Temperaturzunahme mit der Tiefe am 15. Januar mit $3,7 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ auf, die maximale Temperaturabnahme mit $5,0 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ am 24. Juli. Die Tiefenlage des jeweils grössten Temperaturgradienten wanderte in der Periode April bis September von 1,6 m Tiefe (März) bis in 4,5 m (September; Bild 2e). Für alle Messtage vom 18. April bis 26. September wurde ein Temperaturgradient von mehr als $1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ berechnet; sehr hohe Temperaturgradienten von mehr als $4 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ stellten wir zwischen dem 24. Juli und dem 18. August fest. Wasserschichten mit Temperaturgradienten von $1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ oder grösser sollen im folgenden als Sprungschicht bezeichnet werden. Wie in Kap. 6 noch eingehend dargelegt wird, reicht die Sprungschicht häufig bis zur Oberfläche. Überlagern Wassermassen mit Temperaturgradienten unter $1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ die Sprungschicht, ist eine vertikale Unterteilung des Sees in Epi-, Meta- (Sprungschicht) und Hypolimnion gegeben. In Abweichung der in Kap. 2 gegebenen Definition darf in solchen Fällen als Hypolimnion nur das Tiefenwasser mit Temperaturgradienten unter $1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$ betrachtet werden.

4.2 Wärmeinhalt des Sees

Die über einer Wassertemperatur von 0°C vorhandene Wärmemenge (Q : Bild 2c) variierte zwischen $50 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ am 15. Januar (mittlere Seetemperatur: $2,9^\circ\text{C}$) und $360 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ am 6. August (mittlere Seetemperatur: $20,8^\circ\text{C}$). Die Differenz der beiden Werte (=jährliches Wärmebudget, Q_{ba}) betrug $310 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, was einem mittleren Wärmestrom von $18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ entspricht.

Von den $310 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ entfielen etwa $30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ auf Winterwärme [1] (Q_{dw} = Wärmeaufnahme vom minimalen Wärmeinhalt – am 15. Januar – bis zum Zeitpunkt der Frühlingsvollzirkulation – Anfang März) und $280 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ auf Sommerwärme [1] (Q_{bs} = Wärmeaufnahme vom Zeitpunkt der Frühlingsvollzirkulation bis zum maximalen Wärmeinhalt – am 6. August). Die $280 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ entsprechen etwa 14% der während der gleichen Zeitperiode gemessenen Globalstrahlung von $2 \text{ GJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Die Werte der Wärmeaufnahme des Lützelsees sind wesentlich kleiner als diejenigen benachbarter Seen mit grösseren Wärmespeicherkapazitäten,

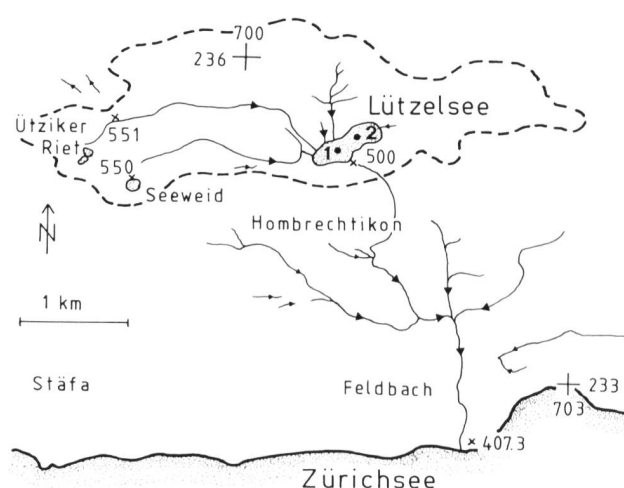
Tabelle 1. Morphometrische Daten zum Lützelsee. Vermessung: Dr. R. A. Schlund, Zürich. Mittlerer Wasserspiegel: 499,93 m; jährliche Schwankungen: 499,15 bis 500,10 m. A_z = Fläche der horizontalen Schicht in der Tiefe z ; V_z = Seevolumen unterhalb der Fläche A_z .

Tiefe z (m)	A_z (m ²)	V_z (m ³)
0	128300	533000
1	126400	405200
2	110300	286200
3	92000	185200
4	75400	101500
5	55500	35600
6,1	0	0

Tabelle 2. Extreme Sauerstoffwerte in den Probennahmetiefen des Lützelsees während des Jahres 1980.

Tiefe z (m)	Minimum (mg O ₂ · l ⁻¹)	Monat	Maximum (mg O ₂ · l ⁻¹)	Monat
0,3	5,0	Oktober	20,2	März
1	4,8	Oktober	19,8	Juli
2	4,6	Oktober	21,8	März
3	0,3	Juni	18,5	März
4	< 0,1	August/ September	13,5	März
5	< 0,1	Mai, August/ September	11,5	April

Bild 1a. Das Einzugsgebiet des Lützelsees.



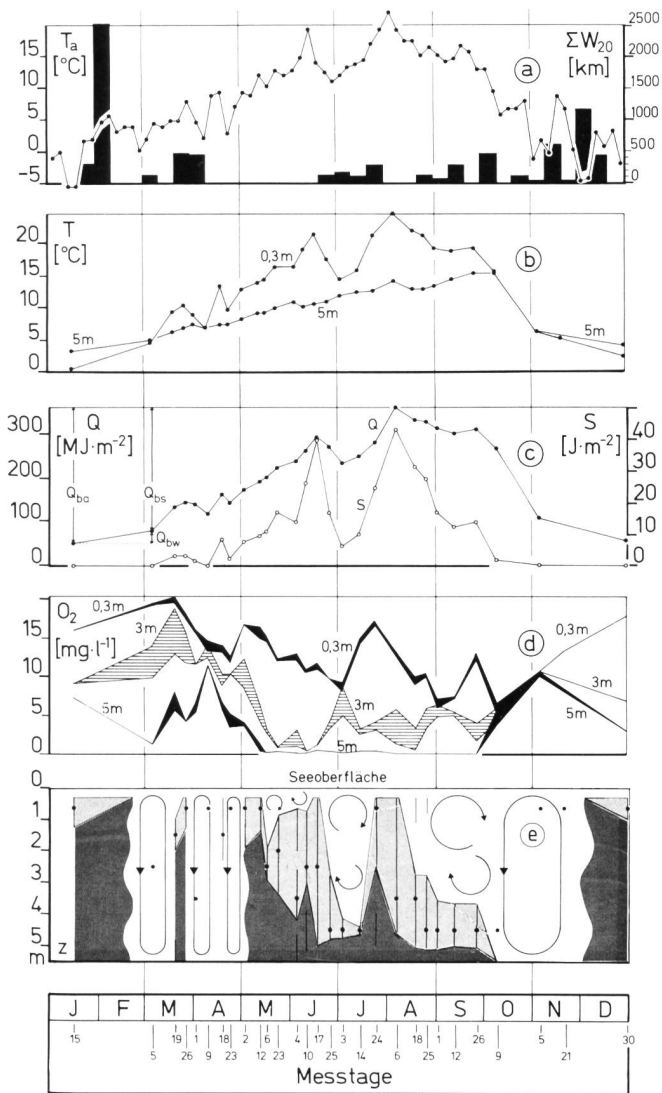


Bild 2. Meteorologische Parameter und limnologische Verhältnisse im Lützelsee im Jahresverlauf 1980. a: Lufttemperatur (T_a = Mittel von 5 Tagen) und Windweg (ΣW_{20} = Summe der Stundenmittel von Windstärken über $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ für Perioden von 10 Tagen); b: Wassertemperaturen in 0,3 m und 5 m Tiefe; c: Seewärme (Q = Wärmemenge über einer Wassertemperatur von 0°C) und Seestabilität (S , nach Schmidt [11]), Q_{ba} = Wärmeaufnahme vom minimalen zum maximalen Wärmeinhalt, Q_{bw} = Wärmeaufnahme vom minimalen Wärmeinhalt bis zur Frühlingsvollzirkulation (Winterwärme, nach Birge [1]), Q_{bs} = Wärmeaufnahme von der Frühlingsvollzirkulation bis zum maximalen Wärmeinhalt (Sommerwärme, nach Birge [1]); d: Sauerstoffgehalt in 0,3, 3 und 5 m Tiefe (Bandbreiten = Differenzen zwischen Messwerten an zwei Messstellen am gleichen Tag); e: Vermutete Zirkulationsverhältnisse und thermische Schichtung (weiss = Zirkulation, hellgrau = Metalimnion bei Temperaturgradienten von $\geq 1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$, dunkel = Hypolimnion; vertikale Linien = Wasserschichten mit Temperaturgradienten $dT/dz \geq 1 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$, schwarze Punkte = Wassertiefe mit dem maximalen Temperaturgradienten des Profils).

wie zum Beispiel des Zürichsees mit $Q_{ba} = 910 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, $Q_{bw} = 50 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ und $Q_{bs} = 860 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ oder des Greifensees mit $Q_{ba} = 670 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, $Q_{bw} = 80 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ und $Q_{bs} = 590 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ [3].

Ein Vergleich zwischen Wärmeinhalt (Bild 2c) und Oberflächentemperatur des Lützelsees (Bild 2b) sowie der Lufttemperatur (Bild 2a) zeigt die unmittelbare Abhängigkeit der Wärmeverhältnisse im See von der jeweils herrschenden Witterung: Der Wärmeinhalt 1980 zeigte den gleichen Jahresverlauf wie die Temperatur der Wasseroberfläche und der Luft. Während der drei oben erwähnten Perioden mit stark unterdurchschnittlicher Lufttemperatur (3. bis 13. April, 19. bis 29. April, 17. Juni bis 22. Juli) nahm auch der Wärmeinhalt des Sees merklich ab; diese Abnahme war

zwischen dem 17. Juni und dem 3. Juli besonders ausgeprägt (Bilder 2c und 3).

4.3 Seestabilität

Thermische Seestabilität

Unter thermischer Stabilität (S) wird die Zufuhr an kinetischer Energie verstanden, die benötigt würde, um ohne Erwärmung oder Abkühlung ein ausgeglichenes vertikales Temperaturprofil herbeizuführen [11]. Geringe Stabilitätswerte (unter $1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) wurden für die Perioden Januar bis April sowie Oktober bis Dezember berechnet (Bild 2c). Das Stabilitätsminimum ergab sich für den 9. April ($S = -0,18 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$). Von Mai bis September traten erhöhte Stabilitätswerte auf, die am 6. August vor dem Beginn der Herbstteilstirkulation mit $43 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ das Jahresmaximum erreichten.

Salzgehalt und Seestabilität

Der Gehalt an gelösten Ca- und Mg-Salzen bewegte sich im Jahresverlauf um 200 bis 250 ppm. Eine Ausnahme war der 25. August, als über Grund 423 ppm gemessen wurde. Meist nahm der Salzgehalt mit der Tiefe zu, oft allerdings nur geringfügig.

Die Zunahme des Salzgehaltes mit der Tiefe bewirkt eine Erhöhung der Seestabilität. Wie bereits oben erwähnt, war die Schichtung am 6. August mit $43 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ am stabilsten. Berücksichtigt man den Einfluss der gelösten Salze, erhöht sich der Wert auf $48 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$.

5. Sauerstoff

5.1 Sauerstoffgehalt

Die Sauerstoffkonzentration in verschiedenen Tiefen des Lützelsees im Jahresverlauf 1980 ist in den Bildern 2c und 3 veranschaulicht. Auffallend sind grosse Schwankungen in allen Tiefen (Tabelle 2), die vom jahreszeitlichen Rhythmus des Wetters sowie von kurzfristigen Wetterumschlägen abhängen.

Maximale Sauerstoffkonzentrationen traten im Frühling auf, bei intensiver Primärproduktion und niedriger Oberflächentemperatur. Nach der Bildung einer Sprungschicht nahm der Sauerstoffgehalt des Hypolimnions rasch ab, da der in den Sedimenten und im Tiefenwasser verbrauchte Sauerstoff nicht mehr durch Nachschub aus dem Oberflächenwasser ersetzt werden konnte. Während meteorologischer Ereignisse, die zu Teilzirkulationen führten (3. bis 13. April, 19. bis 29. April, 17. Juni bis 22. Juli), wurde das Hypolimnion vorübergehend mit Sauerstoff aufgefrischt. Die Periode mit niedrigen Lufttemperaturen und starken Winden vom 17. Juni bis 22. Juli (Bild 2a) bewirkte den Transport von sauerstoffreichem Oberflächenwasser in die Tiefe und von vergleichsweise sauerstoffarmem Tiefenwasser an die Oberfläche, was zu einem markanten Anstieg des Sauerstoffgehalts im oberen Hypolimnion bzw. zu einer Verminderung im Oberflächenwasser führte (Bild 2d). Während etwa $4\frac{1}{2}$ Monaten – von Mitte Mai bis Ende September – lag die Sauerstoffkonzentration in 5 m Tiefe immer unterhalb $0,5 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$; während August und September konnte überhaupt kein Sauerstoff in dieser Tiefe nachgewiesen werden (Bild 2d).

Anfang Oktober erfasste die Herbstzirkulation die unterste Region des Sees (Bilder 2d, e; Bild 3) und beendete damit die Periode der Anoxie. Das nach oben gemischte sauerstoffarme Tiefenwasser verursachte an der Oberfläche eine markante Verminderung des Sauerstoffgehaltes. Wegen der andauernden Vollzirkulation nahm schliesslich die Sauerstoffkonzentration in allen Tiefen wieder zu. Im De-

zember bildete sich eine Eisschicht, wodurch der Sauerstoffeintrag an der Oberfläche unterbunden war und die hauptsächlich durch das Sediment verursachte Zehrung einen raschen Sauerstoffschwund im Tiefenwasser zur Folge hatte.

Wie aus den in Bild 2d dargestellten Bandbreiten hervorgeht, unterschieden sich die am gleichen Tag, aber an zwei verschiedenen Messstellen gemessenen Sauerstoffprofile z. T. beträchtlich: Die grösste Differenz zwischen zwei in der gleichen Tiefe durchgeführten Messungen betrug $4,4 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ in 3 m am 6. August. Obschon die Sauerstoffgradienten manchmal hoch waren (z. B. $3,9 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ am 6. August), können solch grosse Differenzen nicht allein durch Messfehler erklärt werden. Es ist anzunehmen, dass windbedingte Seiches, interne Wellen und eine unvollständige Ausbreitung des eingeschichteten Zuflusswassers eine horizontale Inhomogenität der Sauerstoffkonzentration im Lützelsee bewirkten.

5.2 Sauerstoffsättigung

Unter Sauerstoffsättigung wird normalerweise die relative Sättigung verstanden. Sie bezieht sich auf den an der Seeoberfläche herrschenden Luftdruck. Die absolute Sättigung berücksichtigt dagegen den aktuellen Druck (Luftdruck plus Wasserdruck) in einer bestimmten Tiefe. Auch bei hoher relativer Sättigung kommt es wegen des Wasserdruckes meist nicht zur Bildung von Sauerstoffblasen, da die absolute Sättigung mit zunehmender Tiefe rasch abnimmt [10]. Am 19. März wurde in 2 m Tiefe bei $7,0^\circ\text{C}$ ein Sauerstoffgehalt von $21,8 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ bestimmt, was einer relativen Sättigung von 190% entspricht. Wegen des hydrostatischen Druckes betrug die absolute Sättigung in dieser Tiefe lediglich 98%. Ein Sauerstoffverlust durch Blasenbildung war jedoch bis in etwa 2 m Tiefe möglich, da hier Werte absoluter Sättigung von über 100% erreicht worden waren. Von einer kurzen Periode der Untersättigung (Ende Juni bis Anfang Juli) abgesehen, war der See von der Oberfläche bis in 1 m Tiefe von Januar bis Ende August immer mit Sauer-

stoff übersättigt (maximaler Wert der relativen Sättigung in 0,3 m Tiefe: 204% im Juli; in 1 m Tiefe: 222% im Juli). Geringe relative Sättigungswerte wurden bei Beginn der Vollzirkulation im Oktober ermittelt (0,3 m Tiefe: 53%; 1 m Tiefe: 51%).

5.3 Sauerstoffinhalt des Sees

Während einer kurzen Stagnationsperiode am 19. März erreichte der Lützelsee den maximalen Sauerstoffinhalt des Jahres 1980 von 9,0 Tonnen O_2 , wovon 2,3 Tonnen O_2 auf das Hypolimnion (unterhalb 3 m Tiefe) entfielen. Der minimale Sauerstoffinhalt wurde am Ende der Sommerstagnation (18. August) festgestellt, und zwar mit 2,1 Tonnen O_2 . Davon befanden sich im Hypolimnion unterhalb 3 m Tiefe 0,04 Tonnen O_2 ; verglichen mit dem Sauerstoffvorrat bei der Frühjahrszirkulation am 19. März waren dies lediglich noch 2%.

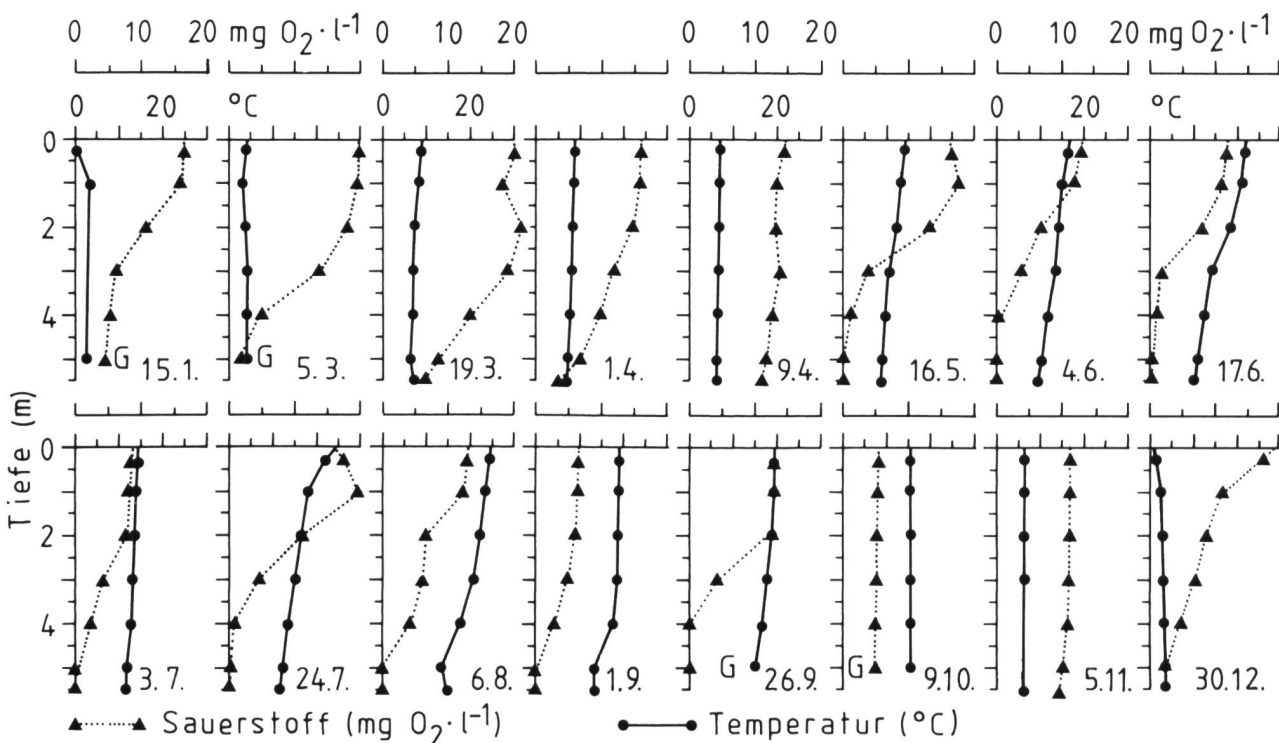
6. Schichtungen und Zirkulationen

In diesem Kapitel wird die Entstehung der in Bild 2e schematisch dargestellten Schichtungs- und Zirkulationsverhältnisse behandelt. Für die Diskussionen werden meteorologische und limnologische Parameter der Bilder 2a bis 2d sowie Bild 3 herangezogen.

6.1 Winterstagnation

Im Winter 1979/80 dürfte die Eisbedeckung des Lützelsees mindestens bis zum 20. Februar gedauert haben. Die Winterstürme von Ende Januar und Anfang Februar (Bild 2a) hatten somit keinen Einfluss auf den See. Die Wassertemperatur zeigte am 15. Januar unter der Eisdecke eine leicht inverse Schichtung (Bild 3). Bei Berücksichtigung der vorherrschenden Salzverteilung wurde ein labiler Gleichgewichtszustand errechnet ($S = -0,35 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$). Trotzdem befand sich der See offensichtlich nicht in einem Zustand der Umwälzung, da die Differenz zwischen der Sauerstoffkonzentration an der Oberfläche und in 5 m Tiefe $8,7 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ betrug. Am selben Probenahmetag (15. Januar 1980) hatte

Bild 3. Ausgewählte Temperatur- und Sauerstoffprofile an einer der zwei Messstellen des Lützelsees, Untersuchungen des Jahres 1980. G = Grund.



die Photosynthesetätigkeit des Phytoplanktons in 0,3 m und 1 m Tiefe eine geringe Übersättigung an Sauerstoff (116% bis 119%) zur Folge.

6.2 Frühlingszirkulation

Eine Teilzirkulation setzte möglicherweise schon in der zweiten Februarhälfte durch thermische Konvektionsvorgänge unter der Eisdecke ein (Erwärmung des Oberflächenwassers unter der Eisdecke gegen 4°C und dichtebedingtes Absinken in das kältere und somit spezifisch leichtere Wasser).

Das milde Wetter führte in der vierten Februarwoche zum Schmelzen der Eisdecke. Zwischen diesem Zeitpunkt und dem 5. März, als von der Oberfläche bis zum Grund ausgeglichene Dichteverhältnisse ($S = 0,45 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$) vorgefunden wurden, waren erstmals die thermischen Bedingungen für die Frühlingsvollzirkulation gegeben. Ob sie tatsächlich eingesetzt hatte, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, da die Sauerstoffverhältnisse am Ende der Eisbedeckungsperiode unbekannt sind. Vom 15. Januar bis 5. März nahm der Sauerstoffgehalt des Hypolimnions um 56% ab. Vom Greifensee ist bekannt, dass es unter Eis durchaus zu Sauerstoffverlusten in einer Grössenordnung kommen kann, die sonst nur im späteren Frühling oder im Sommer verzeichnet werden [16]. Möglicherweise dauerte im Lützelsee die Zehrung des hypolimnischen Sauerstoffs auch nach Ende der Eisbedeckungsperiode an, weil die Windkraft zu schwach war, um die Teilzirkulation auf tiefere hypolimnische Regionen auszudehnen und dort für Sauerstoffnachschub von oben zu sorgen.

Ein Vergleich der Profile vom 5. und 19. März (Bild 3) zeigt, dass der See irgendwann in dieser Periode voll zirkuliert haben muss und dass die Durchmischung intensiv genug gewesen war, um das Tiefenwasser bis zum Grund mit beträchtlichen Mengen an Sauerstoff aufzufrischen, aber doch von zu kurzer Dauer, um einen Eintrag bis zur Sättigungsgrenze zu ermöglichen. Zwischen der Eisschmelze und dem 27. März wurden lediglich während 8 Stunden am 7. März Windstärken über $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ registriert (Bild 2a). Die für die Vollzirkulation notwendige Energie stand möglicherweise nur während dieser kurzen Windperiode zur Verfügung.

Schönes Wetter (überdurchschnittliche Lufttemperaturen) führte zur vorübergehenden thermischen Schichtung des Sees in der zweiten Märzhälfte mit merkbarem Sauerstoffschwund im Tiefenwasser. Durch die kühle Witterung (unterdurchschnittliche Lufttemperaturen) Anfang April wurde die Stagnationsperiode unterbrochen. Die am 1. und 2. April aufgezeichneten Winde beschleunigten die Abkühlung der oberen Wassermassen und trugen damit zur Verminderung der Sprungschichtstabilität bei. Am 9. April konnte ein annähernd vollständiger Ausgleich von Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoff von der Oberfläche bis in 5,5 m Tiefe beobachtet werden (Bild 3). Die Durchmischung dauerte zu diesem Zeitpunkt vermutlich immer noch an ($S = -0,11 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$).

Wegen der warmen Witterung vom 14. bis 18. April (mittlere Lufttemperatur: 12,1°C) bildete sich wiederum eine Sprungschicht aus, die am 18. April von der Oberfläche bis in 2,3 m Tiefe reichte ($S = 9,0 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$). Vom 9. bis 18. April gingen 37% der hypolimnischen Sauerstoffvorräte durch Zehrung verloren ($1,0 \text{ g O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ bezogen auf die Iso bathenfläche in 3 m Tiefe).

Die kühle Witterung vom 19. bis 29. April führte erneut zum Abbau der thermischen Schichtung; wegen zu geringer Windwirkung kam es jedoch nicht mehr zu Vollzirkulation.

6.3 Sommerstagnation

Der See war zwischen dem 2. Mai und dem 26. September immer geschichtet. Bei wechselhafter Witterung konnten jedoch grosse Stabilitätsunterschiede und beträchtliche Verschiebungen der Sprungschicht beobachtet werden.

Der Wärmeinhalt des Sees nahm von Mai bis Mitte Juni annähernd linear zu. Die anfänglich nahe an der Seeoberfläche liegende Sprungschicht mit einer Mächtigkeit von 1,0 bis 1,5 m wurde infolge der kühlen Witterung Mitte Mai durch konvektive Vergrösserung des Epilimnions in 2 bis 3 m Tiefe gedrängt.

Die windarme Periode der ersten Junihälfte führte zu einer beträchtlichen Stabilitätszunahme. Am 17. Juni zeigte die Temperaturverteilung eine von der Oberfläche bis in 5 m Tiefe reichende Sprungschicht (Bild 3). Zu diesem Zeitpunkt waren unterhalb 3 m Tiefe 94% des bei der Vollzirkulation vom 9. April beobachteten Sauerstoffinhalts aufgezehrt. Der Kälteeinbruch vom 17. Juni bis 22. Juli (häufig Lufttemperaturen unter 10°C) hatte durch konvektive und windbedingte Abkühlung der oberen Wassermassen eine starke Ausweitung des Epilimnions zur Folge: Am 3. Juli konnte an einer der zwei Probenahmestellen bei einer Seestabilität von nur $5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ (ein Wert, der üblicherweise nur von Herbst bis Frühjahr gefunden wird) ein Ausgleich sowohl der Wärme als auch des Sauerstoffs von der Oberfläche bis in 3 m Tiefe festgestellt werden (Oberfläche: 14,2°C, 9,0 mg $\text{O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$; 3 m: 13,9°C, 8,7 mg $\text{O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$). Am 14. Juli, zur Zeit der grössten Ausdehnung des Epilimnions im Sommer 1980 bis in die Tiefe von 4,4 m, war die Sprungschicht auf 4,4 m bis 4,6 m eingeschränkt; das Hypolimnion reichte streng genommen nur von 4,6 m bis zum Grund. Die wesentlich wärmere Witterung der folgenden Tage brachte dann aber rasch wieder eine normale Sommerschichtung (Bild 3: 24. Juli).

Die grösste Wärmezunahme im Jahre 1980 fand zwischen dem 24. Juli und dem 6. August statt und betrug im Mittel $6,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Am 6. August wurden auch die Jahresmaxima des Wärmeinhaltes (Q), der Wassertemperatur von der Oberfläche bis in 3 m Tiefe und der Seestabilität (S) gefunden (Kap. 4). Die Sprungschicht reichte von der Seeoberfläche bis in 4,6 m Tiefe.

6.4 Herbstzirkulation

Die Herbstteilzirkulation setzte nach dem Erreichen des Wärmemaximums (am 6. August 1980) ein, wahrscheinlich nach dem Ende der bis zum 11. August dauernden Schönwetterperiode, und erstreckte sich etwa bis zum Monatswechsel September/Oktobre.

Vom 6. bis zum 18. August dehnte sich das Epilimnion bis etwa 2,5 m Tiefe aus. Bei einer Seestabilität (S) von $29,9 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ wurde am 18. August der kleinste hypolimnische Sauerstoffgehalt gefunden (Abschnitt 5.3). Die überdurchschnittlichen Lufttemperaturen im September hatten einen nur zögernden Abbau der Wärmevorräte des Sees zur Folge. Im ganzen Monat September war die Seestabilität (S) annähernd konstant, und das Metalimnion lag während Wochen zwischen 3,6 m und 5,1 m Tiefe. Die seit dem Winter beobachtete stetige Erwärmung des Wassers in 5 m Tiefe setzte sich fort (Bild 2b). Der Abbau des Temperaturgefälles im Tiefenwasser führte zu einer Verminderung der Sprungschichtstabilität. Nach der vorwiegend konvektiven Ausdehnung der Teilzirkulation bis ins Tiefenwasser bewirkten die Winde der Periode vom 7. bis 8. Oktober (Bild 2a) die Zerstörung der noch verbleibenden Schichtung und eine vollständige Durchmischung.

Die Herbstvollzirkulation konnte für den 9. Oktober bestätigt werden (Bild 3): Sowohl Temperatur- als auch Sauerstoff-

verteilung waren ausgeglichen. Von der Witterung begünstigt dauerte die Vollzirkulation mindestens bis zum 5. November an. Während dieser Zeitspanne wurde der intensivste Wärmeverlust des Sees beobachtet: $6,0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Der Sauerstoffinhalt wurde dagegen verdreifacht. Am 5. November bestimmte man in allen Tiefen Wassertemperaturen um $6,1 \pm 0,1^\circ\text{C}$ und von der Oberfläche bis zum Grund $10,5 \pm 0,1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ (Bild 3).

Wegen des lückenhaften Messprofils vom 21. November kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob die Vollzirkulation noch bis Ende November andauerte. Die dafür günstigen Lufttemperatur- und Windverhältnisse sprechen jedoch eher dafür. In der Windperiode vom 5. und 6. Dezember kühlte der See schliesslich genügend ab, so dass wenig später bei kalter Witterung Eisbildung möglich wurde. Die vollständige Eisbedeckung im Winter 1980/81 erfolgte vermutlich am 10. Dezember. Spätestens zu diesem Zeitpunkt dürfte die Herbstvollzirkulation in die Winterstagnation (inverse Temperaturschichtung) übergegangen sein. Beim Messprofil vom 30. Dezember (unter Eis genommen) wurden an der Oberfläche $2,2^\circ\text{C}$ und in 5,5 m Tiefe $3,9^\circ\text{C}$ festgestellt (Bild 3). Verglichen mit dem 5. November hatte der Sauerstoffvorrat unterhalb 3 m Tiefe als Folge der Zehrung in den Sedimenten und im Tiefenwasser von 1,9 Tonnen auf 0,8 Tonnen abgenommen.

7. Schlusswort

Die Auswertung limnologischer Daten des Lütelsees während des Jahres 1980 (vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung) zeigt, dass die Wärme- und Sauerstoffverhältnisse in diesem See nicht nur dem klimatisch gegebenen jahreszeitlichen Rhythmus des Wetters folgten, sondern auch empfindlich auf kurzfristige Witterungsschwankungen reagierten.

Zwar ging wegen der Eisbedeckung im Januar und Februar dem See sehr viel Windenergie verloren (Bild 2a); dennoch führte die günstige Witterung Anfang April innerhalb kürzester Zeit zu einer Sauerstoffauffrischung bis nahe an die Sättigungsgrenze von der Seeoberfläche bis zum Grund (Bild 3: 9. April). Verglichen mit den Verhältnissen während der Frühlingzirkulation waren am Ende der Sommerstagnation lediglich noch 2% des hypolimnischen Sauerstoffinhalts vorhanden.

Als Folge der drei Perioden unterdurchschnittlicher Lufttemperatur im Frühling und Sommer (Bild 2a) waren Auswirkungen sowohl auf die Wärme- als auch auf die Sauerstoffverhältnisse bis ins Tiefenwasser feststellbar. Infolge des Kälteeinbruchs vom 17. Juni bis 22. Juli (Bild 2a) dehnte sich das Epilimnion bis unterhalb 4 m Tiefe aus, und es wurden Werte der Seestabilität berechnet, die sonst nur in der Periode Oktober bis März vorkommen (Bild 2c). Die nachfolgende warme Witterung bewirkte aber eine schnelle Rückkehr zur normalen Sommerschichtung.

Die vorliegende Arbeit zeigt den für künftige Vergleiche wertvollen ursprünglichen Zustand des Lütelsees vor Inbetriebnahme der Tiefenwasserableitung im Jahre 1982. Die sich aufgrund von Witterungseinflüssen rasch und tiefgreifend ändernden Zirkulationsverhältnisse in Kleinseen verlangen eine differenziertere Beurteilung des trophischen Zustandes als bei den grossen Voralpenseen. Vor der Planung von Sanierungsmassnahmen in Kleinseen sind deshalb häufige Probenerhebungen notwendig, um die bedeutenden Auswirkungen von kurzfristigen meteorologischen Ereignissen erfassen zu können.

Verdankungen

Wir sind dem verstorbenen Prof. Dr. E. A. Thomas dankbar, der die Untersuchungen anregte. Die vorliegende Arbeit wurde vom Schweiz. Nationalfonds durch die Kredite Nr. 3.760-1.80 und Nr. 3.125-0.81 unterstützt. Die verwendeten limnologischen Messresultate stellte uns das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau (P. Leumann), die meteorologischen Daten die Schweiz. Meteorologische Anstalt (Dr. F. Mäder) zur Verfügung.

Literatur

- [1] Birge, E.A. (1916): The work of the wind in warming a lake. «Trans. Wis. Acad. Sci. Arts Lett.», 18: 341–391.
- [2] Edinger, J.E., D.W. Duttweiler und J.C. Geyer (1968): The response of water temperatures to meteorological conditions. «Water Resour. Res.», 4 (5), 1137–1143.
- [3] Hutchinson, G.E. (1957): A treatise on limnology, Bd. I: Geography, physics and chemistry. New York: Wiley, 1015 S.
- [4] Leumann, P. (1984): Gewässerschutzmassnahmen für den Lützelsee. «Gas Wasser Abwasser», 64 (3), 103–112.
- [5] Örn, C.G. (1980): Die Sauerstoffverhältnisse im Zürichsee (Untersee) von 1937 bis 1975 und ihre Beeinflussung durch meteorologische Faktoren. «Vierteljahrsschr. naturf. Ges. Zürich», 125 (4), 259–364.
- [6] Örn, C.G. (1983): Zürich-Obersee von 1946 bis 1981: Vergleich der Wärme- und Sauerstoffverhältnisse in den Becken von Bollingen und Altendorf. «Gas Wasser Abwasser», 63 (11), 693–701.
- [7] Örn, C.G. (1984): Starkwinde im ersten Vierteljahr von 1891 bis 1982 und die Sauerstoffanreicherung im Zürichsee. «Vierteljahrsschr. naturf. Ges. Zürich», 129 (2), 172–180.
- [8] Örn, C.G., F. Schanz, E.A. Thomas (1981): An empirical model relating wind action and hypolimnetic oxygenation during vernal circulation in Lake Zurich from 1950–1979. «Verh. Internat. Verein. Limnol.», 21, 109–114.
- [9] Örn, C.G., E.A. Thomas (1983): Bedeutung von Zufluss und Wind auf die Wärme- und Sauerstoffverhältnisse im Zürich-Obersee von 1950 bis 1975. «Gas Wasser Abwasser», 63 (1), 33–44.
- [10] Ricker, W.E. (1934): A critical discussion of various measures of oxygen saturation in lakes. «Ecology», 15, 348–363.
- [11] Schmidt, W. (1928): Über Temperatur- und Stabilitätsverhältnisse von Seen. «Geogr. Ann.», 10, 145–177.
- [12] Stauffer, R.E. (1980): Windpower time series above a temperate lake. «Limnol. Oceanogr.», 25 (3), 513–528.
- [13] Steinemann, U. (1983): Das Plankton des Lütelsees und der Vergleich mit zwei benachbarten Kleinseen im Jahr 1980/81. Diplomarbeit Universität Zürich (unveröffentlicht), 71 S.
- [14] Storni, A. (1983): Nährstoffgehalte und Wachstum von *Selenastrum capricornutum* Prütz in Wässern der Zu- und Abflüsse des Lütelsees. Diplomarbeit Universität Zürich (unveröffentlicht), 77 S.
- [15] Thomas, E.A. (1949): Regionallimnologische Studien an 25 Seen der Nordschweiz. «Verh. Internat. Verein. Limnol.», 10, 489–495.
- [16] Thomas, E.A., C.G. Örn (1982): Eisbedeckung und hypolimnische Sauerstoffanreicherung im Greifensee von 1950 bis 1980. «Schweiz. Z. Hydrol.», 44 (1), 117–148.
- [17] Thomas, E.A., C.G. Örn (1984): Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse im Zürich-Obersee und im Zürich-Untersee von 1936 bis 1982. «Arch. Hydrobiol.», 101 (1/2), 327–342.
- [18] Waldvogel, T. (1900): Der Lützelsee und das Lautikerried, ein Beitrag zur Landeskunde. «Vierteljahrsschr. naturf. Ges. Zürich», 45, 277–351.

Adresse der Verfasser: Christer G. Örn, Dr., dipl. Bauing. ETH, David M. Livingstone, M.S., Ferdinand Schanz, Dr., Hydrobiologisch-limnologische Station der Universität Zürich, Seestrasse 187, CH-8802 Kilchberg.