25 Jahre Vierwaldstättersee-Untersuchungen

Autor(en): **Wicki, Josef**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern**

Band (Jahr): **25 (1977)**

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-523554

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

25 Jahre Vierwaldstättersee-Untersuchungen

von

JOSEF WICKI, LUZERN

INHALTSVERZEICHNIS

I. Einleitung 263

1. Allgemeines 263
2. Geographisches 264
3. Probenahmestelle und Untersuchungsprogramm 264
4. Untersuchungsmethoden 264

II. Physikalische und chemische Untersuchungsergebnisse 266

1. Sichttiefe 266
2. Temperatur 267
3. Sauerstoffgehalt 269
4. Stickstoff- und Phosphorhaushalt 271
5. Der Kreislauf der Kohlensäure 273
6. Weitere Untersuchungen 274

III. Biologische Untersuchungen 275

1. Bakteriologische Ergebnisse 275
   a) Die Gesamtkeimzahl 275
   b) Die coliformen Keime 278
2. Das Phytoplankton 281

IV. Zusammenfassung 285

V. Schluss 286

Literaturverzeichnis 287

I. EINLEITUNG

1. *Allgemeines*

Schon zu einer Zeit, da man von den heute geltenden Grundsätzen der Hygiene noch nicht viel wusste, die Bedeutung des Wassers für die Gesundheit mindestens aber erahnte, waren die Luzerner Stadtväter nicht nur um genügend, sondern auch um gesundes Trinkwasser besorgt. 1434 erliess der Rat einen «Ruf zu Kriens, Horb und hier, dass niemand in die Dünkel bohren oder Zapfen schlagt, oder Wasser uslasset oder Wasser nimbt, bey 5 ℔ Buss ohne Gnad nebst Schadenersatz» (nach damaliger Kaufkraft etwa dem Wert eines Schweines entsprechend). 1720 liess der Rat die Krienser Quellen (Doggeliloch) im Hinblick auf eine Neufassung durch KARL NIKLAUS LANG (1670–1741) und den ebenso berühmten MAURITZ ANTON KAPPELER (1683–1796) auf ihre Reinheit untersuchen. Diese erstellten ein gründliches Gutachten, dem sie u. a. auch recht geschickt angestellte qualitative Analysen zu Grunde legten (1).

Im letzten Jahrhundert waren es u. a. die Kantonsschulprofessoren INEICHEN und KAUFMANN, welche die städtische Behörde in Trinkwasserfragen berieten. Mit der Schaffung der Stelle eines Kantonschemikers im Jahre 1876 – Luzern war der erste Kanton, der eine solche Stelle schuf – wurden Trinkwasserfragen diesem zur Begutachtung vorgelegt (1).

Als sich Ende der vierziger Jahre erneut ein Bedarf an Trinkwassergewinnungsanlagen abzeichnete, wurde der damalige Kantonschemiker (1949) beauftragt, zuhanden der städtischen Wasserversorgung im Luzerner Becken des Vierwaldstättersees Wasseruntersuchungen im Hinblick auf eine Seewasserversorgung vorzunehmen (2). Im damaligen Zeitpunkt lagen noch verhältnismässig wenig Untersuchungsergebnisse über den Vierwaldstättersee vor, so dass noch 1963 der französische Limnologe DUSSART zur Feststellung gelangte: «S'il est un grand lac mal connu en Europe Occidentale, c'est bien le lac des quatre cantons» (3). Das mag erstaunen, wenn man bedenkt, dass die Naturforschende Gesellschaft bereits seit 1916 in Kastanienbaum unter dem Kustos Prof. BACHMANN ein in Fachkreisen weltweit bekanntes hydrobiologisches Laboratorium unterhielt. Tatsächlich bezogen sich die Publikationen über den See fast ausschliesslich auf Untersuchungen des Planktons. Eher spärliche chemische Daten aus den Jahren 1896–1904 wurden von SCHUMACHER-KOPP (4) und 1937 von ADAM und BIRRER (5) publiziert. Ergebnisse aus Gutachten waren der Wissenschaft praktisch unzugänglich. Erst mit der Übergabe des Institutes der Naturforschenden Gesellschaft Luzern an die Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) im Jahre 1959 trat eine Wende ein.

2. *Geographisches*

Der Vierwaldstättersee besitzt einen Inhalt von 11,8 Mia m^3. Bei einem mittleren Seeabfluss von 110 m^3/sec. würde es rund 40 Monate dauern, um das leere Vierwaldstättersee-Becken zu füllen (das Sempachersee-Becken würde 17 Jahre erfordern).

Der Vierwaldstättersee stellt ein System hintereinandergeschalteter Seen dar. Einerseits haben wir den fjordartigen Urnersee, das bis 214 m tiefe Becken des Gersauer Sees sowie das ebenfalls tiefe Becken des Kreuztrichters und dasjenige vor Weggis-Vitznau. Anderseits besitzen Luzerner- und Küssnachterarm sowie die Bucht von Horw eher den Charakter von Mittellandseen. Das Luzerner Becken, der Wasserbezugsort für die städtische Wasserversorgung, lässt sich gegen Osten etwas willkürlich durch eine Linie Altstatt – St. Niklausen begrenzen, wo es in etwa 100 m Tiefe in den Kreuztrichter mündet.

3. *Probenahmestelle und Untersuchungsprogramm*

Der Bezugsort sollte ausserhalb lokaler Einflüsse liegen, ein Wasser von möglichst günstiger und konstanter Qualität liefern und ausserdem ein Minimum an baulichen Kosten bedingen. Bereits aufgrund der örtlichen Verhältnisse und einiger Tastversuche wurden in der Folge im Bereich der heutigen Fassungsstelle, also an einer rund 300 m von Seeburg entfernten, etwas mehr als 40 m tiefen Stelle, Proben entnommen (Koord. Einlaufstutzen: 668 897.66/210 526.62). Bis 1960 erfolgten die Probenahmen monatlich, seither nur mehr alle 2 Monate. Für die biologischen Untersuchungen wurden von der Oberfläche bis auf 40 m alle 5 m, für die übrigen alle 10 m Proben entnommen. Die Probenahme erfolgte mittels der Theiler'schen Schöpfflasche. Insgesamt wurden rund 20 000 Einzeldaten bestimmt.

4. *Untersuchungsmethoden*

1. Durchsicht: Secchi-Scheibe
2. Temperatur des Wassers: Bestimmung auf 1/10 ° C genau mittels Kippthermometer
3. pH-Wert: Potentiometrisch
4. Sauerstoffgehalt: Nach Winkler (6 u. 8)
5. Sauerstoffsättigung: Berechnung nach den vorläufigen Empfehlungen über die regelmässige Untersuchung der schweiz. Oberflächengewässer des Eidg. Departementes des Innern vom Juli 1974. Berechnung für 434 m Meereshöhe.
6. Karbonathärte: Titration gegen Methylorange (6) resp. bis pH 4,3 (8)
7. Gesamthärte: Komplexometrisch (7 u. 8)
8. Magnesium: Komplexometrisch (7 u. 8)
9. Freie Kohlensäure: Titration gegen Phenolphthalein (6) resp. bis pH 8,2 (8)
10. Phosphate: Ohle W. (9)
    Ambühl H. und Schmid M. (10)
    Schmid M. und Ambühl H. (11)
11. Nitrate: Salicylatmethode (6 u. 8)

12. Oxidierbarkeit: Permanganatoxidierbarkeit (6)
13. Freies Ammoniak: Kolorimetrisch mit Nesslers Reagens (6)
14. Chloride: Nach Mohr (6)
15. Nitrite: Nach Griess-Ilosvay-Lunge (6)
16. Kieselsäure: Kolorimetrisch (12)
17. Leitfähigkeit: Mit Konduktometer (8 u. 12)
18. Coliforme Keime: Ab 1953 Endoagar (Filtermethode), Bebrütung bei 37° (8). Vorher Titerbestimmung, Milchzucker- und Mannitbouillon bei 37° resp. 43° (6)
19. Gesamtkeimzahl: Gelatine bei 22–25° und Agar bei 30°, Bebrütungsdauer: 5 Tage (6). Ab 1965 Plate Count-Agar bei 20°. Ab 1968 Bebrütungsdauer: 3 Tage (8)
20. Oscillatorien: Fäden unter dem Mikroskop in einer abgemessenen Wassermenge auf einer Zählplatte ausgezählt.
21. Übriges Plankton: Auszählung in einer abgemessenen Wassermenge unter dem Mikroskop auf einer Zählplatte bei 80- bis 100facher Vergrösserung.

II. CHEMISCHE UND PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

1. *Sichttiefe*

Die Sichttiefe ist einer der wenigen Parameter, der sich mit früheren Ergebnissen vergleichen lässt, da die Methode über Jahrzehnte dieselbe geblieben ist. Die Bestimmung erfolgt mit einer genormten weissen Scheibe (Secchi-Scheibe), die soweit eingetaucht wird, dass man sie gerade noch erkennen kann. Die Sichttiefe orientiert uns über Wassertrübungen biologischer und mineralischer Natur. Mineralische Trübungen dürften von untergeordneter Bedeutung sein (etwa biogen ausgefällter Kalk im Sommer).

Sicherlich sind Disponiertheit des Beobachters, Einstrahlung etc. Fehlerquellen. Ausserdem sind Sichtmessungen wie Planktonbestimmungen ausgesprochene Momentaufnahmen. Unter Umständen können von einem Tag auf den andern schon beträchtliche Differenzen auftreten. Trotzdem lässt sich aber im Verlaufe der 25-jährigen Untersuchungsperiode eine Tendenz herauslesen.

Tabelle 1 Vierwaldstättersee, Seeburg
Sichttiefe: Jahresmittel (6 Einzelmessungen)

Jahr	mittlere Sichttiefe	Jahr	mittlere Sichttiefe	Jahr	mittlere Sichttiefe
1950	8,02	1960	5,40	1970	6,13
1951	8.33	1961	4,65	1971	4,72
1952	8,17	1962	5,85	1972	6,13
1953	7,12	1963	5,27	1973	5,80
1954	7,63	1964	4,40	1974	5,07
1955	6,98	1965	4,38	1975	6,48
1956	7,15	1966	4,73	1976	5,92
1957	6,78	1967	4,98		
1958	6,30	1968	5,70		
1959	6,22	1969	5,33		

Während der ersten Hälfte der fünfziger Jahre hatten wir mittlere Sichttiefen von 7 bis 8 Metern zu verzeichnen, in der zweiten Hälfte fielen diese bis auf 6 bis 7 m. Während den sechziger Jahren hielt die Abnahme der Sichttiefe an, so dass die Jahresmittel zeitweilig unter 5 m fielen. Mit den siebziger Jahren scheint sich allmählich wieder eine Besserung der Sichtverhältnisse einzustellen.

Während ARNET (13) bei Seeburg 1895 eine mittlere Sichttiefe (Mittel der 6 Vergleichsmonate) von 11,35 m und 1896 eine solche von 9,38 m gemessen hatte, betrug das beste Jahresmittel während der 25jährigen Untersuchungsperiode 8,33 m (1951).

Vergleichsweise sei erwähnt, dass THEILER (14) 1910/11 im Baldeggersee Werte zwischen 2,9 und 8 m, ADAM und BIRRER (15) 1938/39 1,6–3,0 m und BACHOFEN (16) 1957–59 noch 0,6–2,9 m gemessen hatten. In den Jahren 1965–67 haben wir im Baldeggersee Werte zwischen 1,0 und 4,0 m und 1969–73 solche zwischen 1,1 und 4,3 m ermittelt. Die Jahresmittel im Vierwaldstättersee liegen somit noch deutlich über den Maxima des Baldeggersees.

Im Verlaufe eines Seejahres fällt die Sichttiefe vom Winter bis zum Hochsommer ständig ab, um bis zum nächsten Winter wieder allmählich die üblichen Winterwerte zu erreichen. Genau gegenläufig verhält sich die Temperaturkurve.

Tabelle 2 Vierwaldstättersee, Seeburg
Sichttiefe: Monatsmittel 1950–1974

Monat	Sichttiefe m
Februar	8,89
April	5,45
Juni	5,42
August	3,39
Oktober	5,16
Dezember	7,99

2. *Temperatur*

Tabelle 3 Vierwaldstättersee, Seeburg
Wassertemperaturen: °C: Mittelwerte 1950–74

Monat	Tiefe m				
	0	10	20	30	40
Februar	4,48	4,43	4,43	4,44	4,45
April	8,94	6,54	5,67	5,13	4,91
Juni	16,48	10,46	8,06	6,38	5,62
August	18,76	12,75	9,19	6,56	5,68
Oktober	12,82	12,15	9,68	6,71	5,78
Dezember	6,71	6,69	6,62	6,46	6,09

Im Frühling, zu Beginn des neuen Seejahres, ist der See thermisch und chemisch homogen. Im 25-Jahres-Mittel bewegten sich die im Monat Februar gemessenen Temperaturen bis auf den Grund zwischen 4,43 und 4,48 °. Bei Homothermie ist die Stabilität der Wassersäule gleich Null. Windströmungen können sich ohne Hindernisse ausbreiten und die ganze Wassermasse bis auf den Grund durchmischen. Das

VIERWALDSTÄTTERSEE Seeburg

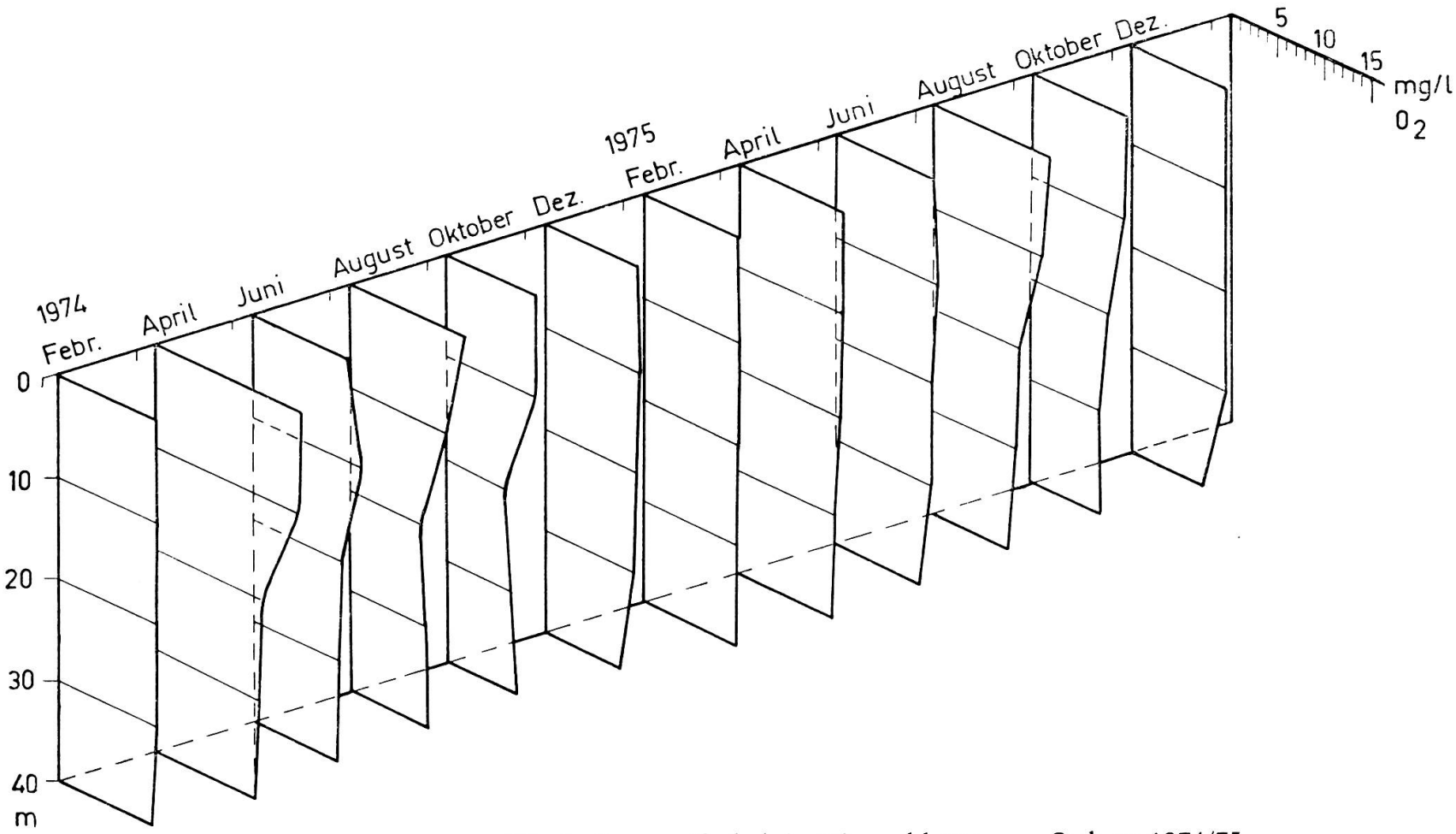

Abb. 1: Sauerstoffgehalt im Vierwaldstättersee, Seeburg 1974/75

trifft allerdings nur für unsere Messstelle bei Seeburg zu. An den tiefsten Stellen erfolgt die Durchmischung u. U. nicht bis auf den Grund.

Wie lange diese *Frühjahrsvollzirkulation* dauert, hängt von den Witterungsverhältnissen ab. Allmählich beginnt sich die Oberflächenschicht unter Einfluss der Sonneneinstrahlung zu erwärmen. Anfänglich vermögen Windbewegungen das erwärmte Wasser noch bis in eine gewisse Tiefe zu verfrachten. Allmählich kommt diese Vertikalströmung aber praktisch zum Erliegen, da das erwärmte Oberflächenwasser erheblich leichter ist als das Tiefenwasser. Die Gewichtsdifferenz eines Oberflächenwassers von 20° beträgt gegenüber einem Tiefenwasser von etwa 4° rund 2 Gramm pro Liter. Die sommerliche Schichtung ist so stabil, dass sie sich auch von Sommerstürmen kaum beeinflussen lässt.

Mit der herbstlichen Abkühlung bzw. der überwiegenden Wärmeabgabe des Sees beginnt auch der Abbau der Temperaturschichtung. Das dichtere Oberflächenwasser beginnt in immer grössere Tiefen vorzudringen, gefördert durch die herbstlichen Stürme. Wenn die ganze Wassermasse auf 4° abgekühlt ist (grösste Dichte des Wassers), wird sich die weitere Abkühlung nur mehr auf die obersten Schichten beschränken, und es stellt sich u. U. wiederum eine Schichtung und damit eine Stagnation, aber eine *inverse Stagnation* ein: Die oberen Schichten sind kälter und leichter als die 4° warmen tieferen Schichten. Allerdings ist die Stabilität in diesem Zustand nicht sehr gross. Solche Verhältnisse treten natürlich nur in kalten Wintern auf. Während der 25jährigen Untersuchungsperiode haben wir nur während 6 Wintern (1953, 54, 56, 63, 64 und 65) inverse Temperaturschichtungen angetroffen.

Erwartungsgemäss nimmt die Temperaturkonstanz nach unten zu, so dass wir in einer Tiefe von 40 m über Jahre nur unbedeutende Schwankungen registrieren konnten. Während der 25jährigen Untersuchungsperiode hatten wir im Februar 1956 mit 3,8° den tiefsten und im Dezember 1954 mit 7,6° den höchsten Wert gemessen. Die mittlere Schwankungsbreite betrug indessen nur etwa 1½°. Für eine Seewasserversorgung sind geringe Temperaturschwankungen, wie sie in 30 bis 40 m tatsächlich angetroffen werden, natürlich erwünscht.

3. *Sauerstoffgehalt*

Dieser rhythmische Wechsel von Zirkulations- und Stagnationsperioden des Sees teilt sich den Inhaltsstoffen mit. Während den Zirkulationsphasen wird das an der Oberfläche mit Luftsauerstoff gesättigte Wasser in die Tiefe transportiert, während das zufolge heterotropher Vorgänge in der Tiefe mit Kohlensäure angereicherte Wasser diese an der Oberfläche an die Luft abgibt, resp. für die Assimiliation bereithält.

Wichtige Hinweise für die Beurteilung des Gesundheitszustandes eines Sees gibt sein Sauerstoffhaushalt. In den lichtdurchfluteten Schichten kann die Sauerstoffproduktion die Zehrung überwiegen, während in den tiefen Bereichen, wo das biologische Geschehen fast ausschliesslich heterotropher Natur ist, Sauerstoff nur verbraucht wird.

Im Februar haben wir aufgrund der Frühjahrszirkulation über die ganze Wassersäule ähnliche Sauerstoffwerte (vgl. Kurve für die Jahre 1974 und 75). Je nach Dauer der Vertikalströmung kann der Sauerstoffgehalt in der Tiefe mehr oder weniger ansteigen. Jedenfalls fanden wir beim tiefsten Punkt (40 m) das Sauerstoff-

maximum jeweils im Februar, gelegentlich erst im April. Nach Erliegen der Frühjahreszirkulation sinkt die Sauerstoffreserve allmählich ab, da die Zufuhr von oben wieder ausbleibt, so dass wir im Oktober oder bei späterem Einsetzen der Herbstzirkulation erst im Dezember ein Sauerstoffminimum finden. Je grösser die Zufuhr von organischen Verunreinigungen und je stärker das Planktonwachstum, umso mehr sinkt organisches Material ab, und umso grösser ist der Sauerstoffverbrauch zufolge aerober Mineralisierung. In den obern lichtdurchfluteten Schichten laufen Assimiliation (Sauerstoffproduktion) und aerober Abbau mittels Kleinlebewesen (Sauerstoffverbrauch) nebeneinander, so dass die Verhältnisse nicht so übersichtlich sind. Dagegen haben wir in den tiefern Schichten kaum mehr Sauerstoffproduktion. Die Sauerstoffabnahme (Sauerstoffzehrung) im Verlaufe der Sommerstagnation ist somit ein Mass für die Verunreinigung der betreffenden Wasserschicht.

Tabelle 4 Vierwaldstättersee, Seeburg
Sauerstoffzehrung mg/l

Jahr	Tiefe m			Jahr	Tiefe m		
	20	30	40		20	30	40
1951	2,8	2,2	2,2	1964	6,1	4,4	3,7
1952	2,9	2,5	2,3	1965	4,1	4,4	3,7
1953	3,7	3,4	2,7	1966	3,6	4,0	3,5
1954	3,6	2,8	1,8	1967	2,8	2,7	2,7
1955	2,8	2,7	2,2	1968	5,6	4,5	1,9
1956	2,8	3,2	1,9	1969	4,3	3,1	2,8
1957	3,4	2,8	2,3	1970	3,4	3,4	3,6
1958	1,3	3,2	2,4	1971	6,9	4,6	4,5
1959	4,2	3,1	3,0	1972	4,0	3,5	3,4
1960	3,6	2,7	2,0	1973	3,1	2,6	2,1
1961	4,9	4,5	3,4	1974	5,1	4,0	3,1
1962	3,3	2,8	2,4	1975	3,3	3,1	2,7
1963	4,6	3,7	3,4	1976	5,0	3,8	3,7

Bis 1960 wurde ein Wert von 3 mg Sauerstoffabnahme in 40 m Tiefe ein einziges Mal erreicht, in den nächsten 10 Jahren bereits sechsmal überschritten. Während den letzten 6 Jahren wurde der Wert von 3 mg wieder viermal überschritten, 1971 ganz massiv, doch verläuft die steigende Tendenz mindestens nicht mehr so eindeutig.

Ähnlich sind die Verhältnisse in 20 und 30 m Tiefe, nur sind die Werte für Sauerstoffzehrung umso grösser, je näher man der Produktionszone kommt.

Eine Entwicklungstendenz des Sees in einer ungünstigen Richtung ist somit den Werten für die Sauerstoffzehrung zu entnehmen.

In ähnlichem Sinne ist auch die Entwicklung der Sauerstoffsättigung zu interpretieren.

Tabelle 5 Vierwaldstättersee, Seeburg
Sauerstoffsättigung % (Mittelwerte)

Monat	Tiefe m	1951–55	1956–60	1961–65	1966–70	1971–75
Februar	0	90,7	90,7	92,5	89,6	86,9
	10	92,3	90,0	91,0	88,5	86,8
	20	90,0	89,2	91,8	86,1	86,6
	30	89,5	88,0	89,6	86,0	85,7
	40	87,2	88,2	86,7	84,6	84,6
Juni	0	112,2	117,0	115,8	127,3	123,8
	10	109,2	108,2	113,5	106,6	109,1
	20	97,9	97,4	96,8	92,4	94,9
	30	90,1	87,6	87,1	84,7	85,1
	40	85,2	82,3	79,6	80,8	80,0

Gewisse Tendenzen sind beim Vergleich dieser 5 Perioden unverkennbar. Während den 2 letzten 5-Jahres-Perioden wurden im Februar eindeutig tiefere (um 3–4 %) Sättigungswerte gegenüber den 3 vorangehenden Perioden ermittelt. Anderseits beobachten wir im Juni bis 1965 in 0 m Sättigungswerte, die etwa bei 115 %, in den beiden letzten 5-Jahres-Perioden aber bei 125 % lagen. In den sauerstoffzehrenden Schichten ist dagegen eine rückläufige Tendenz offensichtlich. Entsprechend der Sauerstoffzunahme im Epilimnion nimmt der Sauerstoff im Hypolimnion ab, so dass die Mittelwerte von 0–40 m bei allen 5-Jahres-Perioden voneinander nur um ein halbes Prozent abweichen (98,4–98,8 %). Ähnlich wie die Sicht sind natürlich auch die Sauerstoffwerte nicht ganz frei von Zufälligkeiten, wie Massenvegetation im Zeitpunkt der Probenahme.

Bei den zunehmend ungünstigeren Sauerstoffverhältnissen handelt es sich indessen nur um Symptome und nicht um die eigentliche Krankheitsursache. Als letztere kommt die Düngung, also die Verschmutzung des Sees in Frage. Vom wasserwerktechnischen Standpunkte aus sind die Sauerstoffverhältnisse allerdings von vordergründigem Interesse.

4. *Stickstoff- und Phosphorhaushalt*

Stickstoff und Phosphor sind Bestandteile der lebenden Substanz, des Protoplasmas und damit als Nährstoffe von überragender Bedeutung. Beide Elemente kommen in einem nährstoffarmen Wasser in so geringen Mengen vor, dass deren genaue quantitative Ermittlung erst mit der Verfeinerung der Analysentechnik möglich wurde. Deshalb sucht man in älteren Analysen von nährstoffarmem Seewasser vergebens nach genauen Mengenangaben dieser Elemente. Für Phosphor haben AMBÜHL und MITARBEITER (10 u. 11) und für Stickstoff STADELMANN (17) im hydrobiolo-

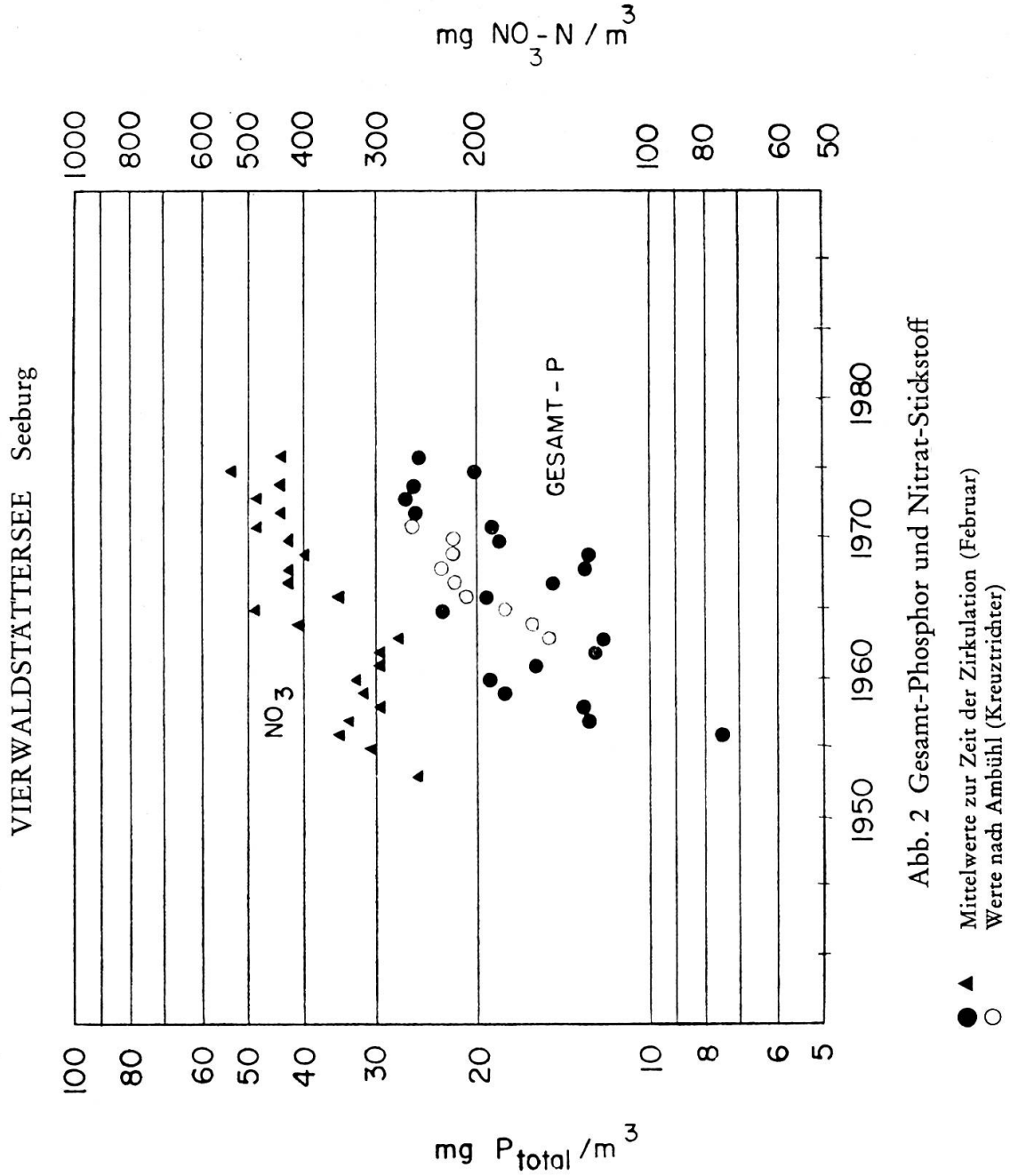

Abb. 2 Gesamt-Phosphor und Nitrat-Stickstoff

gischen Institut der ETH in Kastanienbaum in neuerer Zeit methodische Verbesserungen erzielt.

Stickstoffverbindungen kommen in organischer (gebunden in lebenden und toten Organismen, in eingeschwemmtem Detritus) wie in anorganischer Form (Ammoniak, Nitrite, Nitrate) vor. Bei der Zersetzung von organischem Material entsteht vorwiegend Ammoniak, welches in Gegenwart von Sauerstoff kurzfristig auf biologischem Wege in Nitrate überführt wird. Nitrate sind die vorherrschenden anorganischen Stickstoffverbindungen im Seewasser, weshalb sich Seewasseruntersuchungen in der Regel auf diesen Stickstoffträger beschränkten. Seit 1953 wurden regelmässig

Nitratbestimmungen durchgeführt. Die Werte schwankten zwischen weniger als 50 mg und rund 800 mg Nitrat-Stickstoff pro m^3 Wasser (der Ammoniak-Stickstoff betrug in der Regel, abgesehen von der tiefsten Stelle, weniger als 40 mg pro m^3 Wasser, während der Nitrit-Stickstoff kaum 1 % des Nitrat-Stickstoffes ausmachte). Im Februar finden wir über die ganze Wassersäule, als Folge der winterlichen Zirkulation, ähnliche Nitratwerte. Mit zunehmendem Algenwachstum wird der Nitrat-Stickstoff zum Aufbau organischer Substanz aufgezehrt, so dass in der Regel im August bis zu einer Tiefe von 20 m die Minimalwerte vorliegen.

Bis etwa zu Beginn der sechziger Jahre lag kaum ein signifikanter Nitratanstieg vor. Seither ist aber eine laufende Zunahme zu verzeichnen, so dass innert 20 Jahren annähernd eine Verdoppelung des Nitrat-Stickstoffes an unserer Messstelle im Vierwaldstättersee eingetreten ist.

Der Gehalt an Gesamtphosphaten als Phosphor berechnet liegt rund zwanzigmal tiefer als derjenige für Nitrat-Stickstoff. Einzelwerte können u. U. auf wenig mg pro m^3 Wasser abfallen, so dass genaue Bestimmungen früher noch relativ problematisch waren. Phosphor dürfte im Vierwaldstättersee heute noch als wachstumsbestimmender Faktor anzusehen und damit für die Eutrophierung des Sees massgebend sein (17). Im Verlaufe der relativ kurzen Untersuchungsperiode (1956-75), für welche uns vergleichbare Werte zur Verfügung stehen, liegt zweifellos ähnlich wie für den Nitrat-Stickstoff eine steigende Tendenz vor.

Der um die Mitte der sechziger Jahre einsetzende Anstieg ist unverkennbar. Einen ähnlichen Anstieg beobachtete Ambühl im Kreuztrichter und Gersauersee (18 und 19, vgl. Abb. 2). Nachdem seit etwa 1971 die Abwasser rings um den Luzernersee abgeleitet werden, ist zu vermuten, dass der noch anhaltende Phosphatanstieg mindestens nicht bloss auf eine externe Zufuhr, sondern auch auf die Rephosphatierung in den sauerstoffarmen Tiefenzonen zurückzuführen ist, wie sie von Ambühl (19) im Kreuztrichter beobachtet wurde.

5. *Kreislauf der Kohlensäure*

Karbonathärte, freie Kohlensäure und pH-Wert sind bekanntlich in einem System verknüpft. Wo autotrophe Vorgänge gegenüber heterotrophen überwiegen, kommt es zu einer Kohlensäureabnahme. Zur Herstellung des Gleichgewichtes fällt Kalk aus, das Wasser wird weicher. Das ist der Fall in den lichtdurchfluteten Oberflächenschichten während der Vegetationszeit. So kann dort die Härte von über 10° auf weniger als 7 abfallen. Im Februar wurden als Folge der winterlichen Zirkulation die geringsten Schwankungen festgestellt. Während der 25jährigen Beobachtungszeit lagen sämtliche Werte zwischen 9,2 und 10,2 franz. H°.

Wenn bei vorherrschender heterotropher Tätigkeit eine Überproduktion von Kohlensäure vorliegt, kann Kalk in Lösung gehen oder das Wasser bleibt mit Kohlensäure angereichert und nimmt aggressive Eigenschaften an.

Mit zunehmender Tiefe haben wir auch in bezug auf die Karbonathärte ausgeglichenere Verhältnisse. Während der 25jährigen Beobachtungszeit liessen sich in 40 m Schwankungen von bloss 2,1 franz. H° beobachten (8,8–10,9 franz. H°).

Wassertechnisch ist von Bedeutung, dass im Tiefenwasser im Verlaufe der Sommerstagnation mit zunehmender Kohlensäureproduktion zu rechnen ist, so dass das

Wasser aus 40 m Tiefe während gewisser Zeit jeweils kalkaggressiv wird, 1949–51 wurde die kalkaggressive Kohlensäure mittels des Marmorlösungsversuches nach HEYER ermittelt (6 u. 8). In den Tiefen von 0–20 m waren in dieser Zeit 17 von 54 Proben kalkaggressiv (31 %) und in 30 und 40 m (Bereich der Trinkwasserentnahme) 22 von 36 Proben (61 %). In der Regel lagen die Werte zwischen 1 und 2 mg kalkaggressiver Kohlensäure pro l Wasser. Die Berechnung aus Karbonathärte und freier Kohlensäure nach LEHMANN und REUSS (6) ergab etwa um 1 mg höhere Werte. Zweifellos war eine 24stündige Kontaktzeit mit dem Marmor, wie sie in der 4. Auflage des Lebensmittelbuches empfohlen wurde, zur Erzielung eines Gleichgewichtes ungenügend. In den Jahren 1959–65 wurde die überschüssige Kohlensäure (davon ist nur ein Teil kalkaggressiv) nach den Vorschlägen von ZEHENDER, STUMM und FISCHER (20) aus den Werten für Gesamt-, Karbonat- und Calciumhärte sowie der freien Kohlensäure berechnet. Die gefundenen Werte lagen fast ausnahmslos zwischen 1 und 3 mg pro Liter. Im Bereich von 0–20 m liess sich für 18 % der Proben und in 30–40 m für 54 % überschüssige und damit auch kalkaggressive Kohlensäure errechnen, womit die frühern, nach andern Verfahren errechneten, aber auch die experimentell ermittelten Ergebnisse grundsätzlich bestätigt wurden.

Im Verlaufe der biogenen Entkalkung steigt auch der pH-Wert an, der beispielsweise im August 1973 bei einer Karbonathärte von 7° bis auf 8,5 angestiegen war (Rotfärbung bei Zusatz von Phenolphthalein, dessen Umschlagspunkt bei pH 8,3 liegt). Anderseits kann der pH-Wert in den Tiefenschichten als Folge der Kohlensäure-Anreicherung gegen Ende der Sommerstagnation bis unter 7,5 abfallen (7,3 in 30 m im Oktober 1973).

Während einigen Jahren wurde ausser der Karbonathärte auch die Nichtkarbonathärte, die sogenannte bleibende Härte bestimmt. Diese repräsentiert denjenigen Anteil an Erdalkali-Ionen, welcher insbesondere den Chlorid-, Nitrat- und Sulfat-Ionen aequivalent ist. Sie schwankt praktisch durchwegs zwischen 1 und 2 franz. Härtegraden, entsprechend einem Betrag von 10 bis 20 mg pro Liter Wasser als Kalziumkarbonat berechnet. Bei den gelösten Substanzen handelt es sich fast ausschliesslich um Salze des Kalziums und Magnesiums, wobei der Wert für Kalzium in der Regel etwa um 40 mg und derjenige für Magnesium um 2 bis 3 mg pro Liter liegt.

6. *Weitere Untersuchungen*

Nachdem Kieselsäure die Schutzschichtbildung auf Metalloberflächen mindestens unterstützt, wurden während einiger Zeit auch Kieselsäurebestimmungen vorgenommen. In der Regel lagen die Werte bei 1 bis 3 mg SiO_2/l. Während der Sommerstagnation kann dieser Wert in den lichtdurchfluteten Oberflächenschichten unter 1 mg absinken, weil offenbar die Kieselalgen daraus ihren Panzer aufbauen. In der Tiefe fanden wir aber meistens 2 bis 3 mg und gelegentlich mehr Kieselsäure, was für die Ausbildung metallschützender Schichten von Vorteil ist.

Anfänglich wurden auch die Chloridwerte bestimmt, die u. a. unter bestimmten Bedingungen Aussagen über Abwassereinflüsse machen können. Die gefundenen Werte lagen in der Regel aber unter 1 mg/l, so dass auch aus Langzeitbeobachtungen keine zusätzlichen Informationen erwartet wurden, weshalb wir auf weitere Bestimmungen verzichteten.

III. BIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

1. *Bakteriologische Ergebnisse*

Im Hinblick auf eine hygienische Beurteilung des Seewassers als Trinkwasser wurde die bakteriologische Untersuchung von allem Anfang an bis heute ohne Unterbruch durchgeführt. Dabei wurden die sog. Gesamtkeimzahl und die coliformen Keime bestimmt. Leider lassen die Werte nur einen bedingten Vergleich zu, weil im Verlaufe der Untersuchungsperiode die Methodik verschiedentlich modifiziert wurde. Die Untersuchung erfolgte in Tiefenstufen von 5 zu 5 m, entsprechend 9 Proben pro Profil.

a) *Gesamtkeimzahl*

Bis 1965 wurde die sog. Gesamtkeimzahl auf Gelatine bei einer Bebrütungstemperatur von 22 bis 25 ° und einer Bebrütungszeit von 5 Tagen bestimmt. Nachher erfolgte die Keimzahlbestimmung auf Agar und schliesslich wurde 1968 auch die Bebrütungszeit von 5 Tagen auf 3 Tage, gemäss den Vorschlägen des neuen Lebensmittelbuches reduziert.

Tabelle 6 Vierwaldstättersee, Seeburg
Gesamtkeimzahl, Jahresmittel über das ganze Profil

Jahr	Gesamtkeimzahl	Untersuchungsmethodik	Jahr	Gesamtkeimzahl	Untersuchungsmethodik
1949	15	Gelatine	1963	50	
1950	23	22–25 °, 3 Tage	1964	60	
1951	33		1965	86	Agar 20 °,
1952	69		1966	252	5 Tage
1953	44		1967	511	
1954	26		1968	354	Agar 20 °,
1955	39		1969	365	3 Tage
1956	24		1970	310	
1957	16		1971	153	
1958	29		1972	198	
1959	23		1973	169	
1960	11		1974	236	
1961	16		1975	348	
1962	18		1976	185	

Was als Gesamtkeimzahl bezeichnet wird, entspricht an sich nicht der gesamten im Wasser vorhandenen Bakterienzahl. Viele Bakteriengruppen werden mit dieser Methode nicht erfasst (z.B. Salpeter-, Schwefelbakterien, obligate Anaerobier, psychrophile Keime etc. entwickeln sich unter den gegebenen Kulturbedingungen nicht). Indessen ist die Gesamtkeimzahl ein Parameter, der qualitative Aussagen über die Intensität mikrobiologischer Tätigkeit in einem Wasser und damit über dessen Verschmutzungsgrad machen kann. Ein Einzelwert ist wenig aussagekräftig, da er mit sehr vielen Zufälligkeiten behaftet ist (gerade vorhandene Bakterienflora, Verschmutzungswelle).

In bezug auf die Gesamtkeimzahl lässt sich nicht eindeutig eine Tendenz herauslesen. Der sprunghafte Anstieg 1965/66 dürfte methodisch bedingt sein. Mit der Gesamtkeimzahl erfassen wir Verunreinigungen und Selbstreinigungsvorgänge. Wie die ufernahen Proben vor Seeburg zeigten (ca. 20 m Uferabstand), lagen für diese mit 2 Ausnahmen die mittleren Gesamtkeimzahlen (Jahresmittel) etwa um das Zwei- bis Zehnfache höher (vgl. Tabelle 7). Dabei kam zweifellos die Abwassersituation im Gebiete von Seeburg zum Ausdruck. Anfangs der fünfziger Jahre waren noch kaum Unterschiede zu verzeichnen. In der Folge stieg die Gesamtkeimzahl der ufernahen

Tabelle 7 Vierwaldstättersee, Seeburg
Gesamtkeimzahl, Jahresmittel

1 Vor Post Seeburg } ca. 20 m Uferabstand, 0 m
2 Vor Restaurant Seeburg }
3 Über Einlaufstutzen, 0 m

Jahr	Gesamtkeimzahl			Jahr	Gesamtkeimzahl		
	1	2	3		1	2	3
1950	55	44	68	1963	1242	427	122
1951	76	90	98	1964	1514	2161	67
1952	111	103	83	1965	460	765	118
1953	304	161	76	1966	404	453	333
1954	118	172	45	1967	950	792	423
1955	180	231	138	1968	360	935	352
1956	198	160	34	1969	877	654	379
1957	860	98	16	1970	468	1277	396
1958	175	134	28	1971	402	398	112
1959	238	56	21	1972	460	390	166
1960	631	236	14	1973	268	372	182
1961	413	327	12	1974	672	718	349
1962	803	510	21	1975	726	661	297

Tabelle 8 Vierwaldstättersee, Seeburg
Gesamtkeimzahl, Verteilung der Maxima

(Die Zahlen beziehen sich auf das Jahr, in welchem im betr. Monat und in der betr. Tiefe die maximale Keimzahl vorlag.)

Monat	Tiefe m								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Februar	50, 55 56, 58 60, 63 66	54, 68 75	53, 64	51, 61 71, 72 74	52, 57	62	65	49, 59 67	69, 70 73
April	51, 52 53, 56 59, 63 64, 65 67	49, 60 61, 66 71, 73 74	68, 69	50, 54	62		72	57, 58 70, 75	55
Juni	50, 53 54, 57 62, 65 68, 70 72	52, 61 67, 69 71, 73 74, 75	51, 55 58, 59 60		49, 63		64	56	66
August	51, 54 55, 66 68, 74 75	49, 52 56, 58 61, 62 65, 70 71, 72 73	67	50	53, 60	59		64	57, 69
Oktober	49, 50 51, 54 55, 56 57, 62 68, 74	60, 61 63, 64 65, 70	52, 67 71, 72		58, 66 75			53	59, 69 73
Dezember	49, 50 53, 68 70	55, 66	52, 54 67	61, 65		51, 74	59, 60 64	56, 57 58, 62 63, 72 73, 75	69, 71

Partien bis um die Mitte der sechziger Jahre gegenüber den pelagialen Proben um mehr als das Zehnfache. Ab 1965 begann man gemäss Auskunft des städtischen Tiefbauamtes die Abwasser aus dem Raume Seeburg sukzessive abzuleiten. Tatsächlich hatten wir dort 1964 in bakteriologischer Hinsicht die schlimmsten Verhältnisse. Heute, nach erfolgter Abwassersanierung, finden wir bei den ufernahen Proben in der Regel etwa noch die doppelten Werte.

Zwei Drittel der Maxima fanden sich in den obersten 10 m (63 %), die wenigsten in der Tiefenstufe von 20 bis 30 m. Die meisten Maxima finden sich in 0 m. Einzig im Dezember, also während der Zirkulationsperiode, finden sich die meisten Maxima auf 35 m. Eine weitere Ausnahme machen die Augustproben. Zu dieser Jahreszeit fanden wir die meisten Maxima in 5 m. Möglicherweise hängt das mit der Belichtung und eventuell mit der Temperatur zusammen. Jedenfalls fanden wir in 0 m in der Regel keine Maxima, wenn das Wasser überdurchschnittlich warm war, der Probenahme somit offenbar eine längere Sonneneinstrahlung vorausgegangen war. Tatsächlich soll die Einstrahlung in oberflächennahen Zonen der Gewässer das Bakterienleben negativ beeinflussen (21).

b) *Die coliformen Keime*

Unter dem Begriff «coliforme Keime» wird eine Gruppe von Darmbakterien wie Escherichia coli und verwandte (Klebsiella, Aerobacter, Citrobacter) zusammengefasst. Deren Auftreten in einem Wasser spricht für eine Verunreinigung fäkaler Natur.

Bis 1953 wurde mit einer Titermethode gearbeitet, d. h. man ermittelte die geringste Wassermenge, die noch coliforme Keime aufwies. 1953 wurde die Membranfiltertechnik eingeführt. Mittels eines Spezialfilters werden die Keime abgetrennt und das Filter dem Nährboden (Endoagar) aufgelegt. Die auf dem Filter befindlichen coliformen Keime wachsen zu fuchsinrot glänzenden Kolonien aus.

Die coliformen Keime sind ein spezifisches Mass für Verunreinigungen, die dem See von aussen zugeführt werden. Eine Vermehrung dieser Keime im Seewasser dürfte praktisch nicht erfolgen, vielmehr tritt eine allmähliche Abnahme der vermehrungsfähigen Zellen ein (22). Als Fäkalindikatoren machen sie Aussagen über die Zufuhr von Abwässern. In den ufernahen Partien fanden wir während der 2. Hälfte der fünfziger Jahre und in der 1. Hälfte der sechziger Jahre in der Regel 20 bis 100 mal mehr coliforme Keime als über der Trinkwasserfassungsstelle in 0 m. Vor und nachher wurden nur 5- bis 20fach höhere Werte ermittelt. Diese Werte wiederspiegeln die Abwassersituation im Raume Seeburg womöglich noch deutlicher als die Gesamtkeimzahl (vgl. Tabelle 9).

Mit der Abnahme der coliformen Keime in der litoralen Partie wurden auch im Pelagial allmählich geringere Werte ermittelt. Heute finden wir für die Gruppe der Fäkalkeime wiederum ähnliche Werte wie zu Beginn der fünfziger Jahre. (Nachdem die Methode seit 1953 nicht mehr modifiziert wurde, dürften Vergleiche zulässig sein.)

Tabelle 9 Vierwaldstättersee, Seeburg
Coliforme Keime (Jahresmittel)
Methode: Membranfiltermethode, Endoagar, 37°

1 Vor Post Seeburg
2 Vor Restaurant Seeburg } ca. 20 m Uferabstand, 0 m
3 Über Einlaufstutzen, 0 m

Jahr	Coliforme Keime in 100 ml			Jahr	Coliforme Keime in 100 ml		
	1	2	3		1	2	3
1953	34	36	10	1965	1113	574	60
1954	64	142	20	1966	65	81	27
1955	255	252	40	1967	47	84	15
1956	489	1222	11	1968	9	40	13
1957	1477	654	34	1969	88	65	6
1958	1135	631	49	1970	24	16	8
1959	1349	384	11	1971	13	50	4
1960	3375	980	17	1972	95	186	3
1961	1500	1178	47	1973	5	11	5
1962	2600	2167	51	1974	58	26	13
1963	380	266	33	1975	6	3	1
1964	700	245	29	1976	—	—	3

Das Ergebnis entspricht natürlich den Erwartungen, wenn wir bedenken, dass heute durch die Seeanstösser von Horw bis Meggen auch nicht mehr geklärte Abwässer dem See zugeführt werden.

Vergleichsweise sei erwähnt, dass im Genfersee (Grand Lac) 1973 in 42 % und 1974 in 33 % der Proben mehr als 600 coliforme Keime pro Liter gefunden wurden (23). Über der Trinkwasserentnahmestelle bei Seeburg war das 1973 bei 6 % und 1974 bei 2 % der Proben der Fall.

Tabelle 10 Vierwaldstättersee, Seeburg
Coliforme Keime, Verteilung der Maxima
(Zur Bedeutung der Zahlen vgl. Tabelle 8)

Monat	Tiefe m								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Februar	61, 73	56	57, 60 63, 64 66, 70	54, 68 76	71	55, 62 69, 75		53, 59 67, 72 74	58, 65
April	54, 55 61, 63	53, 56 62, 70 72	58, 60 66, 67	59, 65 71	57, 68 69	74		75	64, 73 76
Juni	54, 55 57, 58 62, 64 65, 69	53, 56 60, 61 63, 66 67, 68 70, 71 74, 75 76	59, 73	72					
August	53, 55 57, 58 65, 66 68, 70 73, 74	54, 61 62, 67 69, 71 72	59, 60 64, 75 76						56
Oktober	53, 65	55, 57 61, 62 63, 66 67, 68 69, 71 76	54, 56 58, 59 64, 72 73	60, 70 74	75				
Dezember	57	69, 74	61, 65 66, 67	70, 73	53, 54	62, 71	56, 59 64, 72	55, 58 60, 63	68, 75 76

Abwässer gelangen in der Regel in den obersten Wasserschichten in den See. Während der Stagnationszeit haben wir gerade für die coliformen Keime eine recht strenge Schichtung. Im Juni und August traten die Maxima praktisch während der ganzen Beobachtungszeit nur in den obersten 10 m auf. Im Oktober, mit Beginn der herbstlichen Zirkulation, dringen sie etwas in die Tiefe vor, in den Wintermonaten Dezember und Februar finden wir sie fast in allen Tiefen, und im April setzt die Einschichtung wiederum ein.

Tabelle 11 Vierwaldstättersee, Seeburg
Coliforme Keime in 100 ml (Mittel 1953–1975)

Tiefe	Februar	April	Juni	August	Oktober	Dezember
0	20	22	23	26	18	23
5	22	24	36	25	27	25
10	26	17	19	16	30	27
15	20	16	13	7	18	27
20	19	13	6	7	14	23
25	21	11	5	6	6	23
30	20	10	4	5	5	37
35	27	9	3	6	4	35
40	26	11	5	5	5	29
Mittel	22	15	13	11	14	28

Die Mittelwerte für die ganze Beobachtungszeit zeigen, dass die Zahlen für coliforme Keime während der kalten Jahreszeit höher liegen und bereits im April absinken, im August ein Minimum erreichen, vom Oktober weg wieder leicht ansteigen, so dass wir im Dezember ein Maximum haben. Ähnliche Beobachtungen wurden u. a. auch im Bodensee gemacht (24). Die coliformen Keime sind im Winter offenbar länger lebensfähig. Ob tiefere Wassertemperaturen oder unterschiedliche Begleitflora dafür verantwortlich sind, bleibe dahingestellt. Im Hinblick auf die Wasserversorgung ist von Bedeutung, dass in der Zone zwischen 30 und 40 m in der Regel die kleinsten Werte auftreten.

2. *Das Phytoplankton*

Zur Beobachtung der Entwicklung des Sees, vor allem aber im Hinblick auf die Filterbelastung eines künftigen Seewasserwerkes wurde versucht, das Phytoplankton quantitativ zu erfassen. Die Ermittlung erfolgte durch Auszählung bei einer zirka achtzigfachen Vergrösserung. Damit wurde praktisch auf die Erfassung des Nannoplanktons verzichtet. Die Oscillatorien, die als besondere Verschmutzungsindikatoren galten, wurden separat ausgezählt. Zur Vereinfachung wurden ausserdem nur ganze Kolonien ausgezählt. Damit war die Methode mit erheblichen Unzulänglichkeiten behaftet.

Von Jahr zu Jahr traten relativ grosse Schwankungen auf. Wann wir die 5-Jahres-Mittel miteinander vergleichen, ist indessen bis 1970 eine mehr oder weniger laufend steigende Tendenz unverkennbar, während für das letzte 5-Jahres-Mittel sich eher eine rückläufige Bewegung abzuzeichnen scheint.

Tabelle 12 Vierwaldstättersee, Seeburg
Phytoplankton,
ohne Oscillatorien

Die Maxima des Phytoplanktons (ohne Oscillatorien) wurden während der 25-jährigen Untersuchungsperiode während der Sommerstagnation in der Regel in den oberen Wasserschichten angetroffen, fanden sich aber vor allem während der Zirkulationsperiode auch in tieferen Schichten (vgl. Tabelle 13).

5-Jahres-Mittel	Organismen- resp. Kolonienzahl pro Liter
1950–54	44 100
1955–59	37 000
1960–64	68 200
1965–69	159 100
1970–74	29 000

Tabelle 13 Vierwaldstättersee, Seeburg
Phytoplankton ohne Oscillatorien, Verteilung der Maxima
(Zur Bedeutung der Zahlen vgl. Tabelle 8)

Monat	Tiefe m								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Februar	66	55, 62 68	52, 58	53, 56 63, 64	50, 51 61, 71	69, 73	54, 57 60	65, 72	59, 67 70, 74
April	63, 72	62, 69 70, 73	51, 54 58, 61 66, 68 71	50, 52 59, 60 65, 74	64	53, 67		55, 56	57
Juni	68	52, 61 67, 69 70, 72 73, 74	53, 55	51, 54 59	63, 66	50, 65 71	56, 58	57, 64	60, 62
August	59, 61 68	51, 52 57, 60 62, 64 67, 69 71, 74	53, 55 58, 70 73	50, 54 56, 65 72	66				
Oktober	62, 64 66, 69 71	58, 60 68, 70 73	50, 53 57, 61 67, 72	51, 74	54, 56	52, 63	55, 65	59	
Dezember	50, 55 56, 62 73	51, 54 67, 70	59, 68 72	52, 53 61	63, 65 74	57, 60 64, 66 71	58, 69		

Noch weniger zerstreut treten naturgemäss die Maxima der Oscillatorien auf (vgl. Tabelle 14). Während der winterlichen Zirkulation sind sie zwar auch in allen Tiefen anzutreffen, im Verlaufe der Sommerstagnation aber praktisch bloss auf eine rund 10 m mächtige Schicht beschränkt. Bis zum Dezember dringen die Maxima allmählich gegen die Oberfläche vor. Oscillatorien und übriges Phytoplankton bilden während der sommerlichen Einstrahlung nur ausnahmsweise ihre Maxima dicht an der Oberfläche. Eine kräftige Belichtung soll auch die Photosynthese beeinträchtigen (21, p. 78).

Tabelle 14 Vierwaldstättersee, Seeburg
Oscillatorien, Verteilung der Maxima
(Zur Bedeutung der Zahlen vgl. Tabelle 8)

Monat	Tiefe m								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Februar	63	55, 56 66, 67	52, 57 60, 64 71	53, 59 72	51, 54 61	65, 70	50, 58 69	62, 73 74	68
April	64, 67	62, 69 70	59, 65 66, 68	56, 60 63, 71 73	50, 53 54, 61	51, 57 58	52	55, 74	72
Juni	67	69	59, 61 63, 66 70, 71	53, 56 57, 58 60, 64 72, 74	51, 52 54, 62 65, 68 73		50, 55		
August		68, 70	55, 61 62, 66 69, 71 72, 73 74	51, 54 56, 57 58, 59 60, 64 65, 67	50, 53	52			
Oktober	64	62, 63 65, 66 68, 69 73	59, 60 61, 67 70, 71 72, 74	50, 51 52, 53 55, 56 57, 58	54				
Dezember	65, 66 67, 70 73	50, 52 56, 58 61, 62 71	51, 57 59, 63 72	53, 55 68	64	54, 74	69	60	

Die zahlenmässige Erfassung der Oscillatorien war übrigens weniger schwierig, aber auch nicht unproblematisch. Fäden bis 0,1 mm Länge wurden als 1 und grössere bis 0,2 mm als 2 Individuen ausgezählt etc.

Tabelle 15 Vierwaldstättersee, Seeburg
Oscillatoriafäden, 6 Monatsmittel

Jahr	Oscillatoriafäden in 1 ml	Jahr	Oscillatoriafäden in 1 ml
1950	1	1963	38
1951	5	1964	98
1952	6	1965	55
1953	51	1966	27
1954	12	1967	33
1955	18	1968	91
1956	12	1969	68
1957	24	1970	18
1958	15	1971	27
1959	21	1972	12
1960	27	1973	9
1961	44	1974	8
1962	41		

Bereits 1911 führte BACHMANN aus (25, p. 68), dass er oft im untern Seeteil Oscillatoria rubescens beobachtet habe. Sie stamme offenbar aus dem Sarnersee, wo sie seit vielen Jahren beobachtet wurde, ohne dass sie dort die Üppigkeit, z. B. des Zürichsees, erreiche. Zu Beginn unserer Untersuchungsperiode lagen so niedrige Werte vor, dass man sehr wohl vermuten darf, dass die Situation gegenüber 1911 in bezug auf Oscillatorien nicht wesentlich verschieden war. In der Folge wurde eine rasche Zunahme registriert, die 1964 im Jahresmittel mit 98 000 Fäden pro Liter Wasser ein Maximum erreichte. In der 2. Hälfte der sechziger Jahre lagen noch durchwegs hohe Werte vor. Erst ab 1970 war ein signifikanter Rückgang zu verzeichnen. 1973 und 74 hatten wir wiederum Werte, wie sie zu Beginn der fünfziger Jahre angetroffen wurden.

Wenn die Zahlenwerte auch gewisse relative Aussagen über Planktonverteilung, allenfalls über Zu- oder Abnahme machen können, vermochten sie doch in quantitativer Hinsicht nie zu befriedigen. Auf die Schwierigkeiten der Zentrifugationsmethode hatte schon BACHMANN 1911 hingewiesen (25). Wir versuchten deshalb, das Plankton durch Filtration gravimetrisch zu erfassen, was auf die Dauer aber an den enormen Filtrationszeiten scheiterte. Mit dieser Methode fanden wir an organischen Anteilen in der Tiefe des Einlaufstutzens (ca. 35 m) 1957/58 80 bis 460 mg Trockensubstanz pro m^3 Wasser. Die Ermittlung der sog. Biomasse wäre für unsere Verhältnisse zu aufwendig.

Nachdem keine Methode zu befriedigen vermochte, wurden die Planktonbestimmungen ab 1975 aufgegeben.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Die Sichtverhältnisse hatten sich von 1950 bis 1965 etwa gleich stark verschlechtert wie in den 50 vorausgehenden Jahren. Um die Mitte der sechziger Jahre ist die Sichtabnahme zu einem Stillstand gekommen. Ob die in den letzten Jahren beobachteten günstigeren Zahlen als Tendenz zu bewerten sind, wird sich erst später erweisen.
2. An der untersuchten Stelle war die Wasserdurchmischung bis auf den Grund die ganze Beobachtungszeit über vollständig.
3. Die Sauerstoffzehrung des Tiefenwassers hat bis zu Beginn der siebziger Jahre laufend zugenommen. Der seit 1950 dauernde Anstieg der Sauerstoffsättigung im Epilimnion und die entsprechende Abnahme im Hypolimnion im Verlaufe des Sommers sowie die stetige Abnahme der Sauerstoffsättigung in allen Tiefen im Winter, lassen ebenfalls auf eine Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse, d. h. auf eine zunehmende Eutrophierung des Sees schliessen.
4. Der Gehalt an Nitrat-Stickstoff ist im Verlaufe einer rund 20jährigen Beobachtungszeit um mehr als 50 % angestiegen.
5. Die Werte für den sog. Gesamtphosphor zeigen ebenfalls eine steigende Tendenz. Die Zunahme während den letzten 15 Jahren betrug mindestens 50 %.
6. Das Tiefenwasser in 30 und 40 m befindet sich meistens während der sommerlichen Stagnationsperiode nicht im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. In der Regel haben wir in der Tiefe etwas aggressive Kohlensäure. Gleichzeitig liegt der bestimmte pH-Wert tiefer als der berechnete, was ebenfalls für einen aggressiven Charakter des Tiefenwassers spricht.
7. Proben aus ufernahen Zonen erwiesen sich naturgemäss als keimreicher. Bis 1964 machte sich die Überbauung im Raume Seeburg durch zunehmende bakteriologische Verschlechterung der ufernahen Proben bemerkbar, so dass diese bis 20 mal so hohe Keimzahlen aufwiesen wie diejenigen des Pelagials. 1965 liefen Sanierungsmassnahmen an, so dass die ufernahen Proben heute bloss noch etwa doppelt so keimreich sind.
8. Die coliformen Keime, ein Mass für die exogene Verunreinigung, zeigten bis zur 2. Hälfte der sechziger Jahre eine zunehmende Tendenz, während die derzeitigen Werte wiederum etwa denjenigen zu Beginn dieser Untersuchungsperiode entsprechen. Die ufernahen Werte widerspiegeln die Abwassersituation im Raume Seeburg. Zeitweilig waren die Werte für coliforme Keime rund hundertmal grösser als bei den entsprechenden pelagialen Proben. Heute finden wir in der Regel noch etwa die zehnfachen Werte. Die Maxima waren während der Sommerstagnation strenger als bei der Gesamtkeimzahl auf die obersten 10 m beschränkt. In den tiefern Schichten fanden sich ausserhalb der Zirkulationsperiode praktisch keine Maxima. Während der kalten Jahreszeit waren die Werte höher als im Sommer.

9. Die Auszählmethode ist für eine quantitative Erfassung des Phytoplanktons mit erheblichen Unzulänglichkeiten behaftet. Indessen ergeben die 5-Jahres-Mittel während den ersten 20 Jahren einen deutlichen Anstieg und ab 1970 einen ebenso deutlichen Abfall.
10. Ähnlich wurde für die separat ausgezählten Oscillatorien bis Ende der sechziger Jahre eine steigende Tendenz beobachtet, während die ab 1970 ermittelten Werte eher wieder denjenigen zu Beginn der fünfziger Jahre entsprachen.

SCHLUSS

1960 schrieb der damalige Kantonschemiker, Dr. Adam, in einem Bericht über die Untersuchungen des Seewassers: «Es ist vielleicht der Moment gekommen, um die Frage wieder aufzurollen, ob der See im verflossenen Jahrzehnt einen auch chemisch erfassbaren Schritt zur Eutrophierung erfahren habe, ob also die Anzeichen von Sauerstoffschwund in der Tiefe und Anreicherungen von Stickstoffverbindungen etc. zugenommen hätten.» In guten Treuen konnte der Berichterstatter damals feststellen: «Das ist aber keineswegs der Fall.» In der Tat kann man sagen, dass die ungünstige Entwicklung zu Beginn der sechziger Jahre verschärft wurde. Heute, da wir einen grösseren Zeitraum überblicken können, dürften doch verschiedene Ergebnisse aus den fünfziger Jahren bereits als Verschlechterung des Sees gewertet werden.

Wenn vielleicht seit 1970 nicht mehr alle Parameter in einer unheilvollen Richtung weisen, sich unsere Bemühungen um den Gewässerschutz somit zu lohnen scheinen, soll das für alle Seeanstösser in erster Linie Ansporn sein, weitere längst fällige Sanierungsmassnahmen mit aller Energie voranzutreiben.

Heute sind wir in der Lage, anhand eines umfangreichen Zahlenmaterials die Entwicklung des Luzerner Sees während eines Vierteljahrhunderts zu überblicken. Es ist das vor allem ein Verdienst unseres Auftraggebers, der Direktion der städtischen Wasserwerke. Ich möchte es deshalb nicht verfehlen, abschliessend allen Mitarbeitern bei der städtischen Wasserversorgung, die uns während diesen langen Jahren geholfen haben, herzlich zu danken.

LITERATUR

1 STIRNIMANN, V., Die Trinkwasserversorgung der Stadt Luzern. Buchdruckerei H. Keller, Luzern, 1902.

2 ADAM, F., Der Vierwaldstättersee als Trinkwasserreservoir. Monatsbull. d. Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, 1952.

3 DUSSART, B. H., Les grands lacs d'Europe Occidentale.
Ann. Biol. — T. II, Fasc. 11—12, 1963.

4 SCHUMACHER-KOPP, E., Analysen des Wassers des Vierwaldstättersees und dessen Hauptzuflüssen.
Mitt. d. Naturf. Ges. Luzern, *7*, 1917.

5 ADAM, F. und BIRRER, A., Eine Untersuchung im Vierwaldstättersee.
Mitt. aus dem Gebiet der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene *28*, 1937.

6 SCHWEIZERISCHES LEBENSMITTELBUCH, 4. Aufl., 1937.

7 SCHWARZENBACH, G., Die komplexometrische Titration (Die chemische Analyse, Bd. 45). Enke, Stuttgart, 1955.

8 SCHWEIZERISCHES LEBENSMITTELBUCH, 5. Aufl., 1964.

9 OHLE, W., Zur Vervollkommnung der hydrochemischen Analyse, III. Die Phosphorbestimmung. Z. angew. Chemie *49*, 1936.

10 AMBÜHL, H. und SCHMID, M., Die Bestimmung geringster Mengen von Phosphation im Wasser von Binnenseen.
Schweiz. Z. Hydrol. *27*, 1965.

11 SCHMID, M. und AMBÜHL, H., Die Bestimmung geringster Mengen von Gesamtphosphor im Wasser von Binnenseen.
Schweiz. Z. Hydrol. *27*, 1965.

12 EINHEITSVERFAHREN der pysikalischen und chemischen Wasseruntersuchung. Verlag Chemie GmbH, Berlin, 1936.

13 ARNET, X., Die Durchsichtigkeit des Wassers, die Temperatur der Wasseroberfläche und einzelne Bestimmungen der Farbe des Seewassers im Luzerner Becken des Vierwaldstättersees in den Jahren 1894—1897.
Mitt. d. Naturf. Ges. Luzern, *2*, 1898.

14 THEILER, A., Beiträge zur Planktonkunde des Sempacher- und Baldeggersees.
Mitt. d. Naturf. Ges. Luzern, *7*, 1917.

15 ADAM, F. und BIRRER, A., Biologisch-chemische Studie am Baldeggersee.
Mitt. d. Naturf. Ges. Luzern, *14*, 1943.

16 BACHOFEN, R., Stoffhaushalt und Sedimentation im Baldegger- und Hallwilersee.
Dissertation Universität Zürich, 1960.

17 STADELMANN, P., Stickstoffkreislauf und Primärproduktion im mesotrophen Vierwaldstättersee (Horwer Bucht) und im eutrophen Rotsee, mit besonderer Berücksichtigung des Nitrats als limitierenden Faktors.
Schweiz. Z. Hydrol., *33*, 1971.

18 AMBÜHL, H., Heutiger Zustand und zukünftige Entwicklung der Alpenrandseen.
Jahrbuch f. Umweltschutz, 1973.

19 AMBÜHL, H., Versuch der Quantifizierung der Beeinflussung des Oekosystems durch chemische Faktoren: Stehende Gewässer.
Schweiz. Z. Hydrol., *37*, 1975.

20 ZEHENDER, F., STUMM, W. und FISCHER, H., Freie Kohlensäure und pH von Wasser im Calciumcarbonat-Löslichkeitsgleichgewicht.
Monatsbull. d. Schweiz. Vereins von Gas- und Wasserfachmännern, 1956.

21 RHEINHEIMER, G., Mikrobiologie der Gewässer.
Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, 1971.

22 SCHMIDT-LORENZ, W., Mikrobiologie der natürlichen Mineralwässer. — Eine Übersicht.
Alimenta, *14*, 1975.

23 L'ÉVOLUTION DU LÉMAN EN 1974.
Bull. de l'A.R.P.E.A., *74*, 1976.

24 DEUFEL, J., Über die Verbreitung von Colikeimen im Bodensee und ihre Zunahme während der letzten zehn Jahre.
Schweiz. Z. Hydrol., *27*, 1965.

25 BACHMANN, H., Das Phytoplankton des Süsswassers mit besonderer Berücksichtigung des Vierwaldstättersees.
Mitt. d. Naturf. Ges., Luzern, *6*, 1911.