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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 76 (1984)

Heft: 5-6

Artikel: Die Zustandsentwicklung des Baldeggersees (1900 bis 1980) und die Auwirkung von seeinternen Massnahmen

Autor: Stadelmann, Pius

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941202

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Zustandsentwicklung des Baldeggersees (1900 bis 1980) und die Auswirkung von seeinternen Massnahmen

Dr. Pius Stadelmann

1. Einleitung

Der Zustand des Baldeggersees beschäftigte schon früh die Anwohner und die Naturwissenschafter. Über den See sind etwa 80 limnologische Arbeiten veröffentlicht worden, die im Literaturverzeichnis aufgelistet sind. Alle diese Daten werden in der folgenden Zustandsbeschreibung berücksichtigt. Die limnologischen Daten bildeten auch die Grundlage für die Eichung eines Seemodells über den Baldeggersee, das an der EAWAG entwickelt wurde.

Die Zustandsentwicklung des Baldeggersees vor 1900, d. h. vor den ersten systematischen limnologischen Untersuchungen, kann nur indirekt über die Fischereiverhältnisse oder durch Sedimentuntersuchungen verfolgt werden. Schon im Mittelalter war der Baldeggersee als reicher *Felchensee* bekannt, so ist urkundlich im Jahr 1315 erwähnt, dass die Herzöge von Österreich als jährlichen Zins für die Fischereirechte 1200 geräuchte Balchen (volkstümlicher Name für Felchen) erhielten. Der gute Bestand an Salmoniden war bis um 1900 gewährleistet. Um 1940 brach der Felchenbestand zusammen und die *karpfenartigen* Fische nahmen überhand. Seit den 50er Jahren wurden Fischsterben gemeldet, die auf die prekären Sauerstoff-Verhältnisse (Sauerstoffmangel im Tiefenwasser und Übersättigungen in den oberflächennahen Schichten) zurückzuführen waren. Der Baldeggersee wies schon in den 20er und 40er Jahren jeweils im Herbst unterhalb 50 m keinen Sauerstoff auf. In den 60er Jahren setzten die abwassertechnischen Sanierungen ein. Die Eutrophierung stieg trotzdem bis Mitte der 70er Jahre, bis dann gezielt den Ursachen nachgegangen wurde. Da durch abwassertechnische Massnahmen allein der Baldeggersee nicht in einen besseren Zustand zurückgebracht werden konnte und aus den diffusen Quellen (landwirtschaftlich genutzten Böden) weiterhin zuviel Phosphor in den See gelangte, wurde der Baldeggersee in den Jahren 1982/83 mit Hilfe sogenannter *seeinterner* Massnahmen (Zwangszirkulation im Winter und Begasung mit Reinsauerstoff im Sommer) kuriert.

Die vorliegende Studie soll die Zustandsentwicklung des Baldeggersees bis zu diesen internen Massnahmen aufzeigen. Gleichzeitig werden die Auswirkungen der Zwangszirkulation und Sauerstoffbegasung auf die Sauerstoffverhältnisse beschrieben.

2. Geologie und Hydrographie

Der Baldeggersee und der nachfolgende Hallwilersee liegen im Seetal, das seine Gestalt einer tektonisch bedingten Bruchform des felsigen Untergrundes und der glazialen Erosion verschiedener Vorstösse des Reussgletschers verdankt. Beim Felsuntergrund handelt es sich um Sandsteine und Mergel der oberen Süsswassermolasse (Tortonian). Die Süsswassermolasse ist grossflächig mit Moränen überdeckt, daneben findet man im oberen Einzugsgebiet des Baldeggersees auch grundwasserführende Schotter.

Östlich und westlich ist der Baldeggersee von bis zu 400 m hohen Hügelzügen (Lindenberg und Erlosen) umgeben, die seine windgeschützte Lage bewirken. In der vorletzten Eiszeit, der *Riss*-Eiszeit, waren diese beiden Hügelzüge noch mit Eis bedeckt. Bei der letzten Eiszeit (*Würm*) blieben diese Hügelzüge in den oberen Bereichen eisfrei. Der Reussgletscher stirnte beim Rückzug im Gebiet von Ermensee (sog. Zürich-Stadium), und hinterliess als natürlichen Abschluss einen Stirnmoränenkranz. Zur Landgewinnung wurde der See zweimal abgesenkt (1806 um etwa 35 cm, 1870 um weitere 115 cm).

Tabelle 1. Hydrogeographische Eigenschaften des Baldeggersees.

Höhe über Meer	463	m
Seeoberfläche	5,2	km^2
Volumen	0,173	km^3
Volumen des Hypolimnions (10 bis 66 m)	0,124	km^3
grösste Tiefe	66	m
mittlere Tiefe	33	m
mittlerer Abfluss (1976–1981)	1,37	m^3/s
mittlere Aufenthaltszeit	5,5	Jahre
Einzugsgebiet	69,0	km^2
Einwohner im Einzugsgebiet	10200	

Die hydrographischen Kenngrössen des Baldeggersees sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Im Verhältnis zu seiner Oberfläche (5,2 km^2) ist der See ziemlich tief (maximale Tiefe 66 m). Sein mittlerer Wasserdurchfluss beträgt 1,4 m^3/s somit wird die theoretische Aufenthaltszeit des Wassers mit 6 Jahren berechnet. In den Baldeggersee entwässern 14 Bäche, der Hauptzufluss (die Ron) bringt etwa 40 % der Wassermenge. Das Einzugsgebiet ohne Seefläche umfasst rund 69 km^2 und liegt 460 bis 820 m über Meer. Der grösste Teil wird landwirtschaftlich intensiv genutzt; etwa 15 % des Einzugsgebietes sind bewaldet.

3. Landwirtschaft und Besiedlung

Bei der Landwirtschaft spielt neben der Milchviehhaltung die Schweineproduktion eine bedeutende Rolle, und die klimatischen Verhältnisse begünstigen Acker- und Obstbau. Der Trend zur intensiven Bewirtschaftung der Landflächen und zur Aufstockung der Tierbestände ist ersichtlich, wenn wir den Zeitraum von 1931 bis 1973 betrachten. In diesen rund 40 Jahren stiegen in den 12 Gemeinden des Einzugsgebietes des Baldeggersees der Rindviehbestand um 40 % und der Schweinebestand um 480 %, während die Bevölkerung nur um 20 % zunahm. Heute lässt sich aufgrund der Tierbestände ein Düngeranfall von 230 Tonnen Phosphor und 1350 Tonnen Stickstoff pro Jahr ermitteln (rund 15000 Düngergrossvieheinheiten).

Im Einzugsgebiet des Baldeggersees leben rund 10200 Einwohner (Tabelle 2). Ende 1982 waren 70 % an eine Kläranlage angeschlossen. Das gewerbliche und industrielle Zentrum liegt im Raume Hochdorf, wo als wichtigste Abwasserlieferanten eine milchverarbeitende Industrie, eine Brauerei und eine Getränkefirma mit Brennerei zu erwähnen sind. Die Abwasserentsorgung der Siedlungsgebiete ist in Bild 1 aufgezeigt. Zum Hauptteil erfolgt die Abwasserreinigung über die ARA Hochdorf, die seit 1967 in Betrieb steht und mit einer Phosphat-Fällung ausgerüstet wurde. Ebenfalls entwässert die ARA Rain in den Baldeggersee, auch in dieser Kläranlage werden seit der Inbetriebnahme im Jahr 1975 die Phosphate im Simultanverfahren entfernt. Verschiedene kleinere Siedlungsgebiete werden über Kläranlagen, die ausserhalb des Einzugsgebietes liegen, entsorgt. Die Abwässer der nördlichen Gemeinden werden vom Baldeggersee ferngehalten und der ARA Hitzkirchertal zugeleitet (Inbetriebnahme 1980). In der ARA Hochdorf wurde 1980 zusätzlich eine Abwasserflockungsfiltration eingebaut, um die Phosphatelimination noch zu vergrössern (*Boller* et al. 1981).

Die Aufsalzung des Baldeggersees durch menschliche und tierische Exkremente, teilweise auch durch die Verwendung von Salz bei der Lebensmittelverarbeitung (Käsereien) und Strassensalzung, kann Bild 2 entnommen wer-

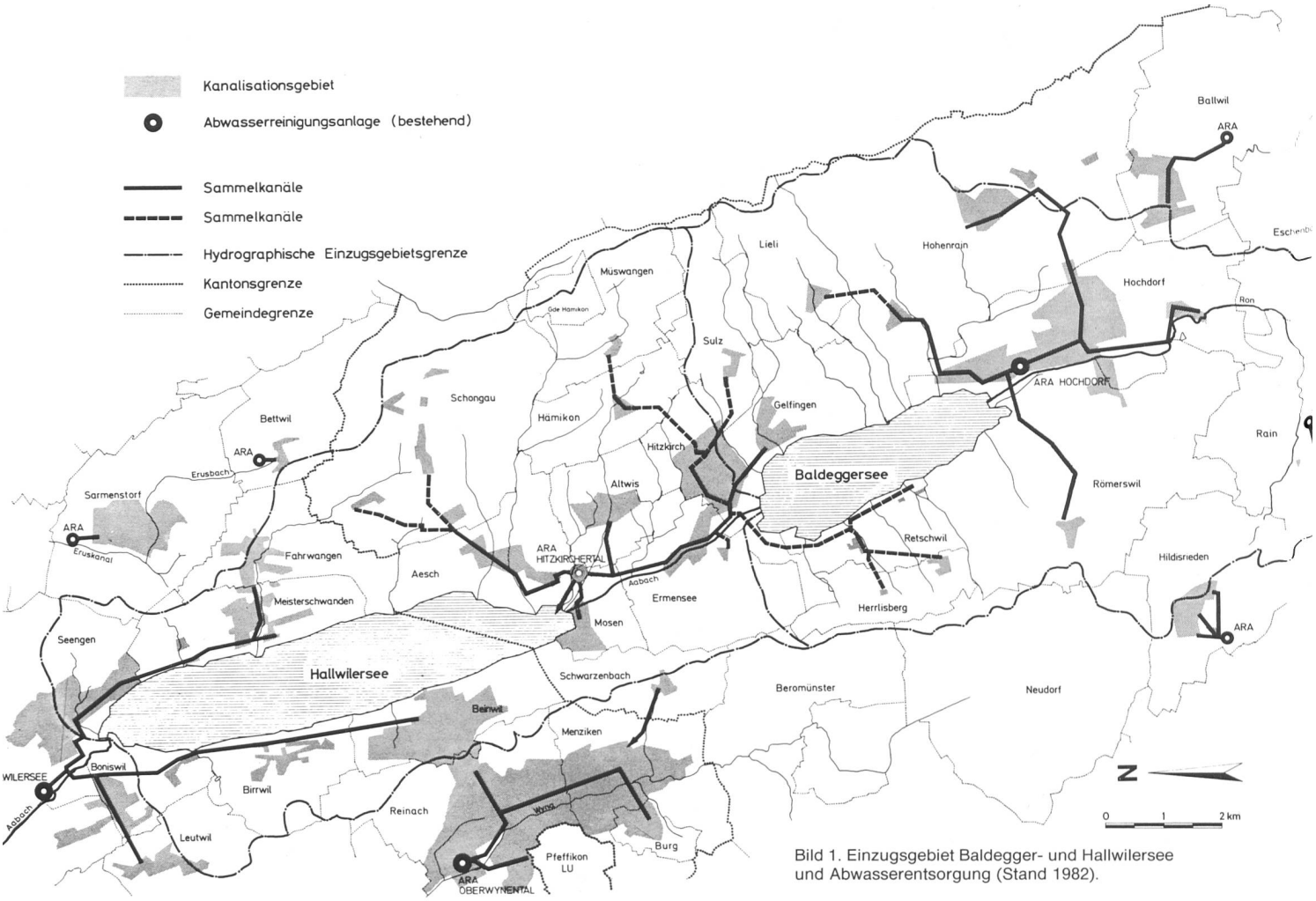


Bild 1. Einzugsgebiet Baldegger- und Hallwilersee und Abwasserentsorgung (Stand 1982).

den. Der Chloridgehalt stieg in den letzten 60 Jahren von 5 auf 15 mg/l.

4. Temperaturverteilung im Baldeggersee

Erste systematische Temperaturmessungen mit einem Kipptermometer wurden in den Jahren 1910/11 von *Theiler* (1917) durchgeführt. Weitere Jahreszyklen wurden 1938/39, 1958/59, 1974 bis 1977 und 1981 bis 1983 gemessen (*Adam* und *Birrer* 1943, *Bachofen* 1960, *Schiess* 1976 und EAWAG/Gewässerschutzamt). Als Beispiel ist die Temperaturverteilung von 1974/75 in Bild 3 dargestellt. Wegen der windgeschützten Lage zeigt der Baldeggersee im Frühjahr rasch eine markante Temperaturschichtung. Im Sommer liegt die Thermokline (Temperatursprungschicht) in 5 bis 10 m Tiefe. An der Oberfläche werden im Sommer bis zu 25 °C gemessen, während am Seegrund die Temperatur nicht über 5 °C steigt. Die Abkühlung im Herbst und Winter führt nur sporadisch zu einer Vollzirkulation und einer gleichmässigen vertikalen Verteilung der chemischen Verbindungen. In der Untersuchungsperiode 1934 bis 1981 konnte aufgrund der gemessenen Sauerstoffprofile nur in den Jahren 1938, 1951, 1958, 1967 und 1981 eine längere, tiefgreifende Zirkulation erfasst werden. Für die Mischungsintensitäten sind in erster Linie meteorologische Bedingungen verantwortlich, weiter gefriert der Baldeggersee verhältnismässig rasch zu. Es konnten vielfach auch thermische Anomalien festgestellt werden, d. h. die vorhandene Schichtung entsprach nicht der theoretischen Temperaturschichtung (*Imboden* et al. 1983).

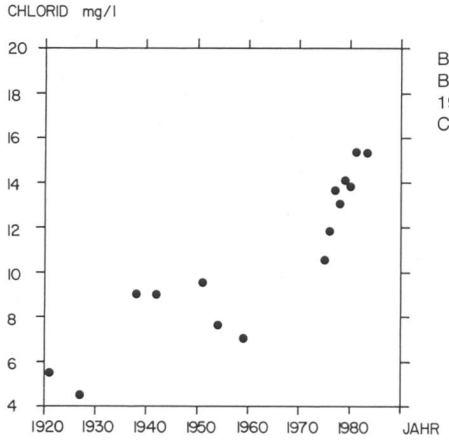


Bild 2. Aufsalzung des Baldeggersees von 1921 bis 1983 in mg Chlorid/l.

5. Biologische Indikatoren

Phytoplankton

Unter dem Phytoplankton vermochte vor allem die Blaualge *Oscillatoria rubescens* (Burgunderblutalge) das Interesse der Anwohner und Wissenschafter zu wecken. Erste Meldungen stammen aus den Jahren 1870 und 1885 (*Bachmann* 1897). Sowohl im Herbst 1899 und im Frühjahr 1904 war Oscillatoria im Plankton vorherrschend. Seitdem war sie immer im Plankton vertreten und von 1938 bis 1965 wurde die Fadenanzahl jeweils im Frühjahr und Herbst vom Kantonalen Laboratorium ausgezählt, dabei wurden Höchstwerte von 4,3 Mio Fäden pro Liter (13. Juni 1952, 0 m Tiefe) gefunden. Seit 1965 ist diese Blaualge nicht mehr im Plankton häufig und andere Arten traten an ihre Stelle. *«Algenblüten»* wurden später von der Grünalge *Coelastrum* (April 1973) und von den Blaualgen *Microcystis* (Oktober 1975 und August 1978) und *Aphanizomenon flos-aquae* (Juni 1976 und Juli 1979) gemeldet. Die Geschichte des Phytoplanktons lässt sich aber auch durch die im Seesediment abgelagerten Pflanzenfarbstoffe verfolgen. Im Jahr 1978 entnahm *Züllig* (1982) einen 115 cm langen Bohrkern aus der grössten Tiefe des Baldeggersees und analysierte

Tabelle 2. Einwohner im Einzugsgebiet des Baldeggersees, Stand 1982 (ohne Einwohnergleichwerte).

Gemeinde	Total Einwohner im Einzugsgebiet des Sees	Einwohner mit landwirtschaftlicher Abwasserverwertung	Einwohner an ARA angeschlossen	Einwohner noch anzuschliessen
ARA Hochdorf				
Hochdorf	6 052	182	5 835	35
Hohenrain	1 630	600	970	60
Römerswil	1 048	628	172	248
Lieli	150	20	0	130
ARA Moosmatten				
Sulz	180	50	0	130
Gelfingen	494	34	182	278
Ermensee	0	0	0	0
Retschwil	121	71	0	50
Herrlisberg	219	131	0	88
ARA Winon				
Gunzwil	10	10	0	0
Neudorf	0	0	0	0
Gemeindeeigene ARAs				
Hildisrieden	80	80	0	0
Rain	130	130	0	0
Eschenbach	60	60	0	0
Ballwil	10	10	0	
Total	10 184	2 006	7 159	1 019
	100%	19,7%	70,3%	10,0%

die konservierten Pflanzenfarbstoffe (Carotinoide) in den verschiedenen Sedimenttiefen.

Sedimentuntersuchung und frühere Planktonentfaltung

Beim 115cm langen Bohrkern waren die ersten 35cm schwarz gefärbt, was auf eine mächtige Faulschlammschichtung (Eisensulfid) hinweist. Die Rückdatierung aufgrund der Jahresschichten ergab, dass der Baldeggersee schon um 1900 an der tiefsten Stelle anaerobe Verhältnisse aufwies. Mit Hilfe der abgelagerten *Pflanzenfarbstoffe* konnte *Züllig* (1982) die Phytoplanktonentfaltung bis ins Jahr 1600 zurückverfolgen.

Er unterscheidet dabei drei Phasen.

1. Phase mit noch geringer zivilisatorischer Beeinflussung und geringer Phytoplanktonproduktion: vor 1900.

Aufgrund der qualitativen Zusammensetzung der Sedimente und des Rohcarotinoidgehaltes entsprach die Phytoplanktonproduktion noch oligotrophen Verhältnissen. Die gefundenen Blaualgenpigmente weisen aber schon damals auf die Anwesenheit von *Oscillatoria rubescens* hin.

2. Phase des ersten Eutrophierungsschubes und der Hochblüte von *Oscillatoria rubescens:* 1900–1964.

Die Rohcarotinoide nehmen nach 1900 schlagartig zu. Die Jahresraten deuten daraufhin, dass Oscillatoria zwischen 1953 und 1963 die grössten Dichten erreichte.

3. Phase des zweiten Eutrophierungsschubes und Umgestaltung in eine Oscillatoria-arme Phytoplanktonzusammensetzung: 1964–1978.

Die Rohcarotinoide verdoppelten sich ab 1964, anstelle der Burgunderblutalge traten aber andere Planktonorganismen mit hoher Produktion auf. Züllig vermutet, dass im Zeitraum von 1968 bis 1975 die maximale Algenproduktion erreicht wurde.

Sichttiefen

Seit der Jahrhundertwende liegen auch vergleichbare Ergebnisse über die Sichttiefe im Freiwasser vor. Diese Messgrösse gibt Auskunft über die vorhandene Trübung durch Partikel und somit über die Phytoplanktondichte. Die minimalen und maximalen Werte sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Um 1910 wies der Baldeggersee noch minimale Sichttiefen von 3m auf. In den 30er Jahren wurden minimale Werte von 1,6m gemessen, in den 50er Jahren sogar nur noch 0,6m. Auffallend ist der monatliche Verlauf der Sichttiefe im Jahr 1974, als im April 0,8m und einen Monat später die Rekordtiefe von 10m festgestellt wurden. Dieses Klarwasserstadium kann durch ein starkes Weiden des algenfressenden Zooplanktons erklärt werden. Heute

Bild 3a. Jahresverlauf der Temperatur (°C) in der Seemitte des Baldeggersees 1974/75.

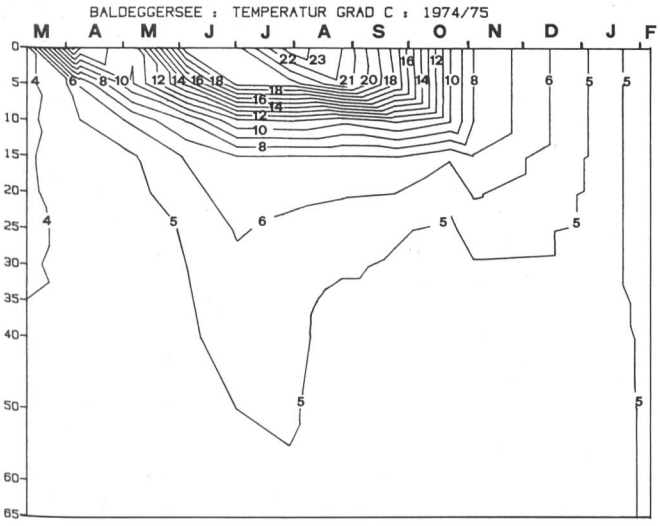
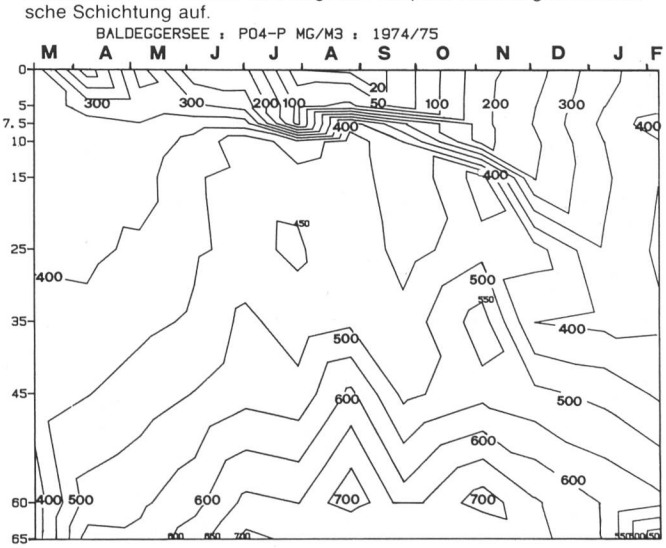


Bild 3b. Jahresverlauf der Phosphatkonzentration (mg PO_4-P/m³). Trotz Homothermie im Februar 1975 zeigt die Phosphat-Verteilung eine chemische Schichtung auf.



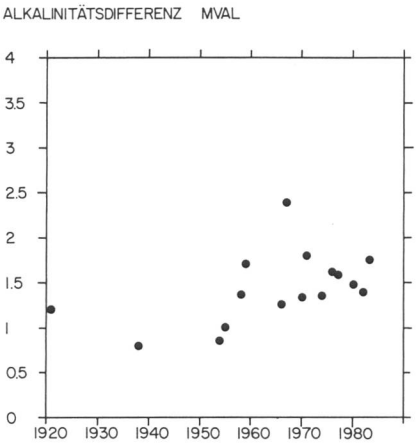


Bild 4a. Alkalinitätsdifferenz zwischen Winter und Sommer in Millival im Epilimnion.

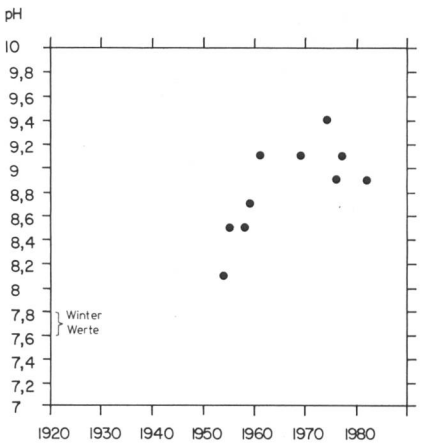


Bild 4b. Maximale pH-Werte im Epilimnion.

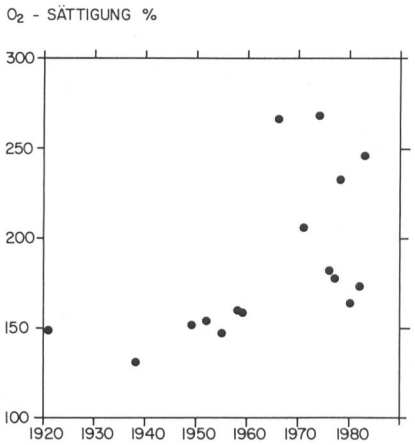


Bild 4c. Maximale Sauerstoffübersättigungen im Epilimnion.

schwanken die minimalen Werte zwischen 1,1 und 1,3 m, die Maximalwerte werden normalerweise im Winter gemessen.

Fischbestand

Die Auswirkungen der Eutrophierung lassen sich auch im Fischbestand verfolgen.

Schon zur Zeit der Habsburger (1100–1740) war der Baldeggersee als reiches Felchengewässer bekannt. Ab 1884 wurde die Erhaltung des Felchenbestandes durch künstlich aufgezogene Brütlinge abgesichert und bis um 1900 war der Ertrag gut. 1907/1908 bemerkte man zur Laichzeit einen starken Felchenrückgang (*Heller* 1909). Am 17. Juni 1926 wurde – nach vielen Handänderungen – der Baldeggersee vom Berufsfischer *Julius Stirnimann* gekauft und bewirtschaftet. Nach einem Gutachten von *Ammann* (1945) blieb der Felchenertrag bis 1933 befriedigend. Anfang der 40er Jahre brach dann der Bestand trotz Einsätzen zusammen, ebenfalls blieben die Hechtbestände klein. Stirnimann musste, nachdem die Felchenfischerei kein Auskommen gewährte, den See verkaufen. Seit dem Jahr 1943 gehört er dem Schweizerischen Bund für Naturschutz. Im gleichen Jahr stellt der Biologe *Birrer* fest, dass der Baldeggersee sich von einem Felchen- in einen *Ruchfischsee* umgewandelt hat.

Die Bewirtschaftung des Baldeggersees wurde ab 1947 von der Berufs-Fischerfamilie *Hofer* übernommen. Später nahm ein Sohn der Familie (*Hofer Alois*) am Baldeggersee Wohnsitz. Dank grossem Einsatz von Hechten, Felchen, Forellen, Zandern konnten die Fischerträge anfänglich wieder bis 1960 gesteigert werden. Immer wieder traten aber grosse Fischsterben auf, und zwar nicht nur von Felchen (August 1956 und 1961, Mai 1963), sondern auch von Brachsen (August 1978). Beim Brachsensterben im August 1978 wurde während einer gleichzeitigen Blüte von *Microcystis* eine Sauerstoffübersättigung von 230% festgestellt.

Eine Bestandesaufnahme im Jahr 1975 ergab, dass Felchen und Forellen nur noch selten waren, dafür aber die Karpfenartigen (Rotfelder, Plötzen, Karpfen) überwiegten. Der Fischertrag zu diesem Zeitpunkt betrug etwa 12 kg/ha, wobei die Felchen – früher Hauptfische der Berufsfischer – nur noch etwa 5% des Ertrages ausmachten (*Schiess* 1976 und *Durrer* 1977). Die Verschiebung des Fischbestandes von den Salmoniden zu den Karpfenartigen ist eng mit den Sauerstoffverhältnissen verbunden. Mit der Eutrophierung engte sich der Lebensraum in der Vertikalen immer mehr ein. So waren um 1900 erst die grössten Tiefen anaerob, um 1940 bereits diejenigen unter 40 m, und um 1970 wurden unter 10 m Tiefe im Sommer sauerstofflose Verhältnisse angetroffen. In den oberen Schichten traten hingegen starke Sauerstoffübersättigungen (bis zu 270%) auf, was sich vor allem auf die Jungfische schädigend auswirken kann (Gasblasenkrankheit).

6. Chemische Zustandsänderungen

Der Zustand des Baldeggersees kann erst seit 1920 aufgrund von chemischen Messungen beurteilt werden. Damals begannen Professor *H. Bachmann* und später Dr. *F. Adam* (Kantonschemiker) und Dr. *A. Birrer* (Biologe) den See bezüglich Sauerstoffverhältnisse, Karbonathärte und Stickstoffverbindungen zu untersuchen. Der für die Eutrophierung wichtigste Nährstoff Phosphor wurde erst um 1950 analytisch erfasst und 1974/75 wurden erstmals Algen-Produktionsmessungen (*Schiess* 1977) durchgeführt. Aus der zeitlichen Veränderung verschiedener chemischer Messgrössen kann die Eutrophierung des Baldeggersees schön verfolgt werden (Bild 4). Als Mass für die Photosynthese der Algen kann die Zehrung des anorganischen Kohlenstoffs, die pH-Erhöhung, oder die Sauerstoffübersättigung im Epilimnion herangezogen werden. Die Zehrung des anorganischen Kohlenstoffs lässt sich aus der Differenz der Karbonathärte (Alkalinität) zwischen Winter- und den minimalen Sommerwerten berechnen. *Vollenweider* (1968) verwendete folgende Alkalinitätsdifferenzen zur Klassifizierung des Trophiegrades.

oligo-mesotrophe Seen:	bis 0,6 mval (Millival)
meso-eutrophe Seen:	0,6 bis 1,0 mval
polytrophe Seen:	mehr als 1,0 mval

Im Baldeggersee betrug die *Alkalinitätsdifferenz* bis 2,4 mval (1974), ebenfalls wurde im Jahr 1974 ein *maximaler pH-Wert* von 9,4 gemessen, während im Winter der pH-Wert bei ca. 7,7 liegt. Die maximale *Sauerstoffübersättigung* zeigt von 1920 bis 1975 mit bis zu 270% Übersättigung eine steigende Tendenz auf. Alle diese Messgrössen weisen darauf hin, dass um 1975 die höchste Algenproduktion erreicht wurde. Diese *Algenproduktion* wurde mit Hilfe der C^{14}-Me-

Tabelle 3. Sichttiefen im Baldeggersee.

Jahr	Anzahl Messungen	Minimum m	Maximum m
1910	6	2,9 (Juli)	5,5 (März)
1911	4	4,2 (Mai)	8,0 (März)
1938	8	1,6 (März)	3,0 (Dezember)
1958	12	1,2 (September)	2,9 (Juli)
1959	10	0,6 (April)	2,4 (Januar)
1966	4	1,0 (April)	3,9 (Februar)
1974	12	0,8 (April)	10,0 (Mai)
1976	7	2,5 (April)	6,3 (Juli)
1977	9	1,0 (März)	10,8 (Juni)
1982	13	1,1 (Mai)	8,2 (November)
1983	12	1,3 (August)	8,2 (November)

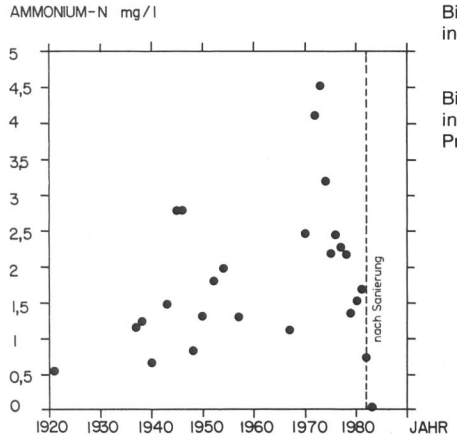
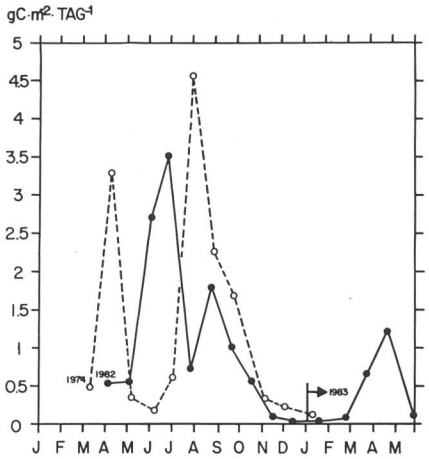


Bild 5, links. Ammoniumkonzentration im Herbst in 60 m Tiefe (mg NH_4-N/l).

Bild 6, rechts. Algenproduktion im Baldeggersee in g Cm^{-2} Tag^{-1}. 1974/75 betrug die jährliche Produktion 420 und 1982/83 350 g C m^{-2} Tag^{-1}.



thode erstmals im Jahr 1974 (*Schiess* 1976) und in den Jahren 1982/83 gemessen, sie ergab eine jährliche Kohlenstoffassimilation von 420 bzw. 350 g C pro m^2 und Jahr. Nährstoffarme Seen weisen weniger als 150 g C/m^2 und Jahr auf (Bild 6).

Unter anaeroben Bedingungen, wie sie jeweils im Herbst schon seit den 20er Jahren herrschen, liegt der anorganische Stickstoff in Form von Ammonium vor. In Bild 5 sind die jeweils im Oktober festgestellten *NH_4-Konzentrationen in 60 m Tiefe* dargestellt, wieder traten die höchsten Werte (4 bis 5 mg NH_4-N/l) um 1975 auf, was auf stark reduzierte Verhältnisse hinweist.

Alle biologischen Beobachtungen und chemischen Messungen lassen erkennen, dass um 1975 der Höhepunkt der Eutrophierung erreicht wurde.

Diese Feststellungen werden bestätigt, wenn man die *Phosphoranreicherung* im Baldeggersee aufzeichnet (Bild 7). Um 1950 lag der mittlere Gesamt-Phosphorgehalt noch bei 100 mg P/m^3. Es folgte eine stetige Zunahme, bis um 1975 die maximale Konzentration von 500 mg P/m^3 gemessen wurde. Die Inbetriebnahme der verschiedenen Abwasserreinigungsanlagen und deren Ausrüstung mit Phosphat-Fällungsstufen bewirkte dann einen Rückgang der Eutrophierung. Heute liegt im Mittel der Phosphorgehalt bei 250 mg/m^3, das sind etwa die Werte, wie sie um 1965 vorlagen. Es ist nicht auszuschliessen, dass bei einem weiteren Rückgang der Eutrophierung *Oscillatoria rubescens,* die heute im Phytoplankton nicht überwiegt, wieder erscheint.

7. Sauerstoff und reduzierte Substanzen

Für alle höheren Lebewesen ist Sauerstoff lebenswichtig, und es können nur Bakterien in einem anaeroben Milieu überleben. Gutdurchlüftete Seen mit kleiner Algenproduktion weisen auch im Herbst in allen Tiefen mehr als 4 mg O_2/l auf. Fällt der Sauerstoffgehalt unter diesen Wert, dann ist die natürliche Fortpflanzung der Tieflaicher (Felchen) und vieler Bodentiere nicht mehr gewährleistet. In Bild 8 sind die Sauerstoffprofile jeweils vor und nach der Sommerstagnation von 1918 bis 1977 aufgezeichnet. Da der Baldeggersee selten für längere Zeit im Winter zirkulierte, wurde nur zweimal mehr als 4 mg O_2/l von 0 bis 60 m Tiefe im Frühjahr gemessen, nämlich 1951 und 1958. Ein erstes Sauerstoffprofil wurde am 18. August 1918 (Autor unbekannt) erhoben, damals konnte man noch bis auf 40 m Tiefe mindestens 4 mg O_2/l feststellen. Seitdem wurde im Herbst unterhalb 40 m weniger als 2 mg O_2/l gemessen. Am 16. September 1921 wurde schon ab 50 m kein Sauerstoff nachgewiesen und über Grund traten erstmals beträchtliche Mengen an Schwefelwasserstoff (1,6 mg S^{2-}/l) auf.

Die vertikale Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffverteilung im Jahresablauf 1974/75 ist in Bild 9 dargestellt. Die 1 mg O_2-Grenze war im Sommer in 8 bis 10 m Tiefe zu finden, und der Schwefelwasserstoff reichte im Herbst bis auf 20 m Tiefe hinauf. Bei anaeroben Verhältnissen treten reduzierte Substanzen auf wie:

Nitrite (NO_2^-)
Ammonium (NH_4^+)
Mangan (Mn^{2+})
Eisen (Fe^{2+})
Sulfide (S^{2-})
und Methan (CH_4)

Die Oxidation dieser reduzierten Substanzen braucht jeweils viel Sauerstoff und verhindert eine deutliche Zunahme der absoluten Sauerstoffkonzentration zur Zirkulationszeit.

Bild 7. Konzentrationen an Gesamt-Phosphor und PO_4-P in mg P/m^3 im Baldeggersee (mittlere Konzentration im Frühjahr).

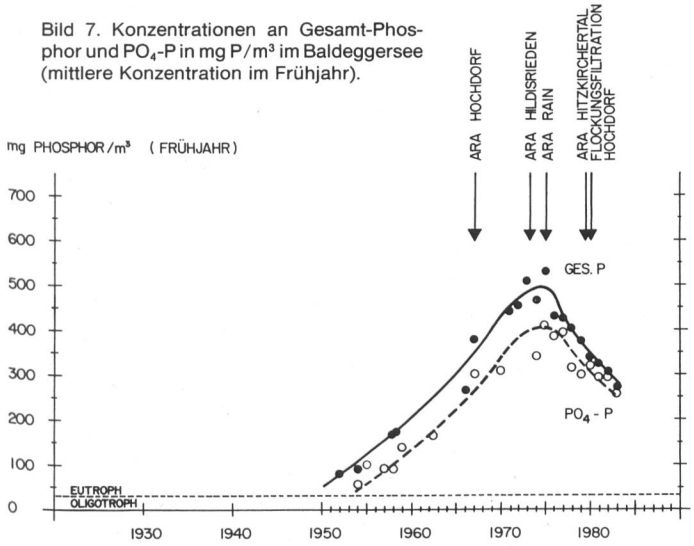


Tabelle 4. Sauerstoffgehalt, reduzierte Verbindungen und deren Sauerstoffbedarf im Baldeggersee (Herbst 1977 und 1983 nach Begasung mit O_2).

	Oktober 1977		Oktober 1983	
Hypolimnion: Seevolumen 10 bis 66 m Tiefe	Tonnen	Tonnen O_2-Bedarf	Tonnen	Tonnen O_2-Bedarf
Sauerstoff	+ 9,2	—	+715,0	—
Nitrit (NO_2^-)	12,2	13,9	0,8	0,9
Ammonium (NH_4^+)	120,5	550,7	1,2	5,5
Mangan (Mn^{2+})	27,9	8,1	10,3	3,0
Eisen (Fe^{2+})	0,8	0,1	1,8	0,3
Sulfid (S^{2-})	73,8	147,6	0	0
Methan (CH_4)	116,4	465,6	0	0
O_2-Bedarf für die Oxidation der reduzierten Substanzen		1185,0		9,7
Vorhandener Restsauerstoff		−1169,5 *	+705,3 *	

* Nach der Verordnung über Abwassereinleitungen müsste im Hypolimnion überall mindestens 4 mg O_2/l vorhanden sein, d.h. +500 t O_2.

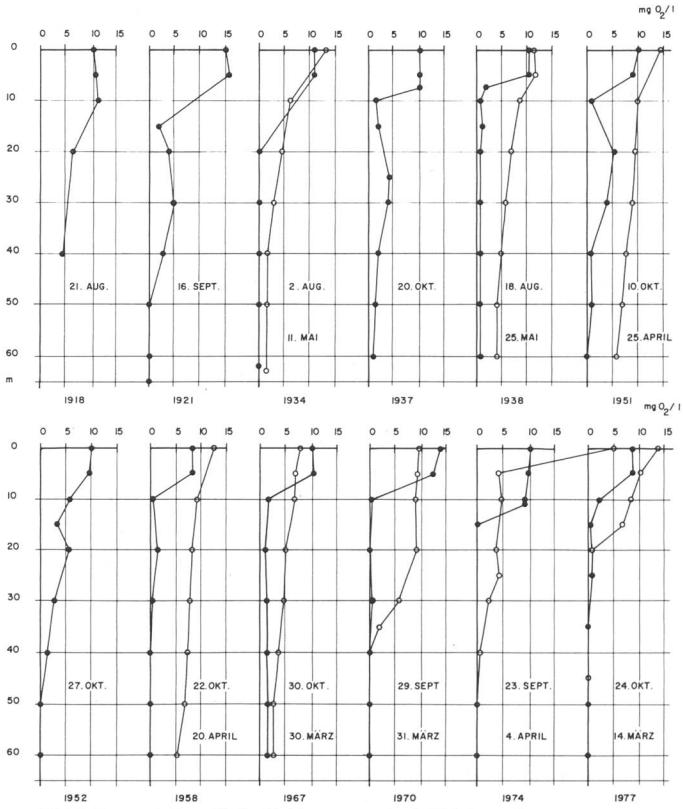


Bild 8. Sauerstoffprofile im Baldeggersee im Frühjahr und Herbst (mg O_2/l).

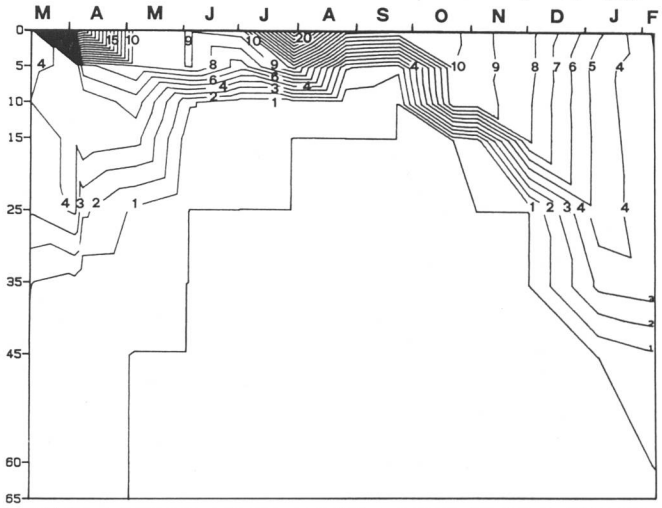


Bild 9a. Jahresverlauf der Sauerstoff-Konzentrationen (mg O_2/l) im Baldeggersee 1974/75.

Bild 9b. Jahresverlauf der Sulfid-Konzentrationen (mg S^{2-}/l).

Die Verhältnisse im Herbst 1977 sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Im Seevolumen 10 bis 66 m (Hypolimnion) wurden nur 9,2 t O_2 gemessen, allein die Oxidation der reduzierten Substanzen benötigt 1178,7 t Sauerstoff. Als Vorwegnahme sind die verbesserten Sauerstoffverhältnisse im Herbst 1983, nach der Begasung mit Rein-Sauerstoff, aufgezeigt: Die Sauerstoffverhältnisse waren, seit Messungen vorliegen, noch nie so gut. Schwefelwasserstoff und Methan waren verschwunden und Ammonium nur noch in geringen Mengen vorhanden.

8. Nährstoffbilanz für den Baldeggersee

Nach einer Modellvorstellung darf ein See mit einer mittleren Tiefe von 33 m und einer theoretischen Wassererneuerungszeit von etwa 6 Jahren mit nicht mehr als 2 t Phosphor pro Jahr belastet werden, wenn er nicht eutroph werden darf (*Vollenweider* 1969).

Erste Messungen über die Nährstoffzufuhren stammen von *Bachofen* (1960), der 1958 20 Bäche viermal untersuchte. Vor der Abwassersanierung betrugen die jährlichen Nährstoff-Frachten 9,4 t Gesamt-P, 6,3 t gelöster anorganischer P und 108,8 t anorganischer Stickstoff (Tabelle 5).

Die Ausfuhr von Nährstoffen über den Seeabfluss wurde 1956/57 von *Ambühl* (1960 und 1958) von *Bachofen* (1960) ermittelt, beide Frachtberechnungen stimmen gut überein. Damals wirkte der Baldeggersee noch als gute Phosphorfalle, da rund 80 % der Zufuhr im See verblieb.

In der Zeit vom November 1975 bis November 1976 wurden die Hauptzuflüsse zum Baldeggersee zweimal monatlich untersucht (*Lohri* 1977), und die Frachten wurden mit Hilfe von Abfluss-Konzentrationsbeziehungen berechnet. Obwohl das Einzugsgebiet inzwischen abwassertechnisch saniert wurde, musste eine Zunahme der Phosphorfracht festgestellt werden. Die Stickstoff-Frachten waren gleich wie 1958, dabei muss man aber berücksichtigen, dass das Jahr 1976 trocken war und die Auswaschung von Nitraten daher niedriger ausfiel. Auffallend ist der schlechte P-Rückhalt des Sees von ca. 40 %, während der hohe N-Rückhalt von 70 % teilweise durch Denitrifikationsprozesse erklärt werden kann.

Die Untersuchung 1976 ermöglichte eine Aufschlüsselung der Phosphorfrachten auf verschiedene Verursacher und eine gezielte Ursachenbekämpfung (Tabelle 6).

9. Sanierungskonzept

Mit Hilfe eines Sanierungskonzeptes versucht der Kanton Luzern die Phosphorzufuhr um 50 % zu senken, das sich auf folgende zum Teil bereits verwirklichte Strategie stützt:

1. Sanierungen im *Siedlungsraum:* Vervollständigung des Kanalisationssystems und Ausbau der Kläranlagen für eine optimale Phosphorelimination (zum Beispiel Flockenfiltration in Hochdorf).

Tabelle 5. Nährstoff-Frachten in und aus dem Baldeggersee in Tonnen pro Jahr. Der Seerückhalt ergibt sich aus der Differenz Zufuhr minus Ausfuhr.

	Gesamt-P t/Jahr	PO_4-P t/Jahr	anorgan. N t/Jahr
Zufuhren 1958			
(*Bachofen* 1960)	9,4	6,3	108,8
Ausfuhr	2,0	1,6	11,8
Seerückhalt 1958	7,4	4,6	97,0
%	79	73	89
Zufuhr 1975/76			
(*Lohri* 1977)	11,3	8,2	96,7
Ausfuhr	6,9	5,2	29,1
Seerückhalt 1975/76	4,4	3,0	67,6
%	39	37	70

Mittlere Abflussmenge aus dem Baldeggersee 1956/57 1,28 m^3/s
1975/76 0,75 m^3/s

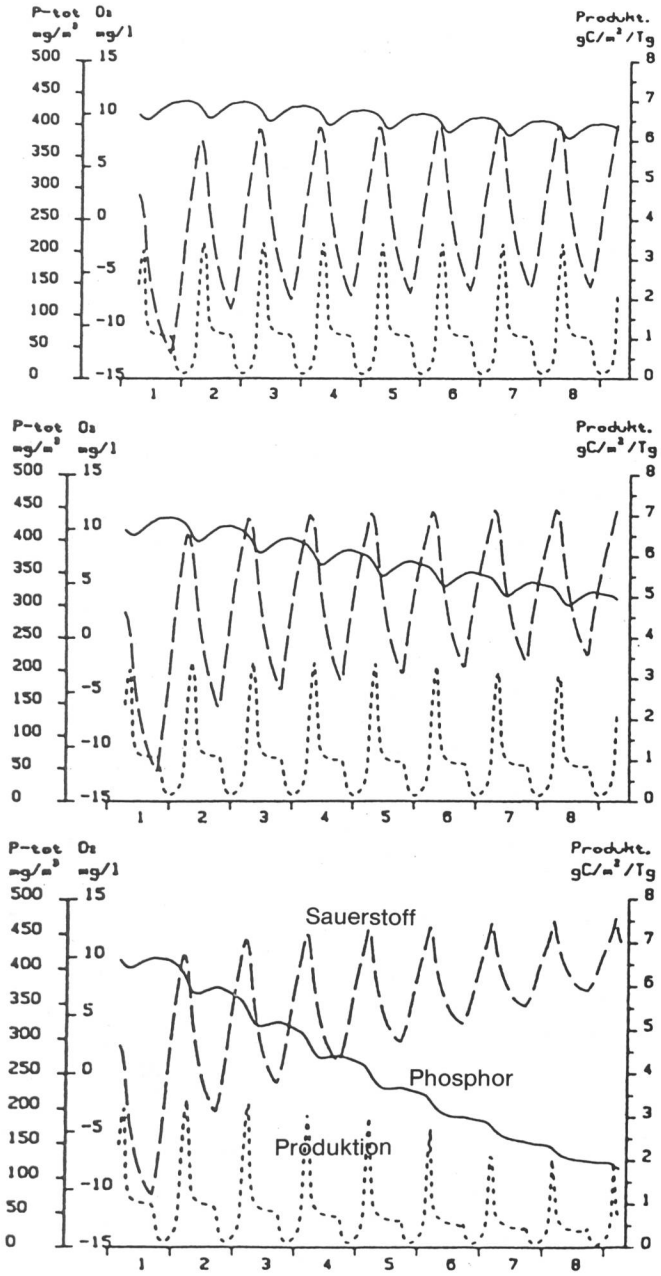


Bild 10. Seemodell der EAWAG für den Baldeggersee
a) bei gleichbleibender Phosphorzufuhr von 11,3 t/Jahr
b) bei 50% Reduktion der Phosphorzufuhr
c) bei Zwangszirkulation und Sauerstoffeintrag (1,5 t O_2/Tag) und gleichzeitiger Phosphor-Reduktion von 50%

2. Sanierung im *ländlichen Raum:* Reduktion der Phosphorfrachten aus Abwässern, die nicht an eine Kläranlage angeschlossen werden können.
3. Massnahmen in der *Landwirtschaft,* d.h. Verhindern der Überdüngung und der Phosphorabschwemmung durch eine sinnvolle Düngpraxis, Schaffung von Speichervolumen für Jauche und einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Tierbeständen/Düngfläche.
Die Schätzungen zeigen, dass alle diese Anstrengungen die Phosphorbelastung nur auf 6 bis 7 t/Jahr zu senken vermögen, wobei es vor allem schwierig ist, den Phosphoreintrag aus den landwirtschaftlich genutzten Böden (Dünger) wesentlich zu verringern.
Es ist deshalb nicht möglich, den Baldeggersee durch *externe* Gewässerschutzmassnahmen allein in den gesetzeskonformen Zustand zurückzuführen. Dies veranlasste den Kanton Luzern, *seeinterne* Massnahmen zu ergreifen.
In der Schweiz schreibt die bundesrätliche Verordnung

Tabelle 6. Phosphor-Zufuhren in den Baldeggersee in Tonnen Gesamt-P pro Jahr.

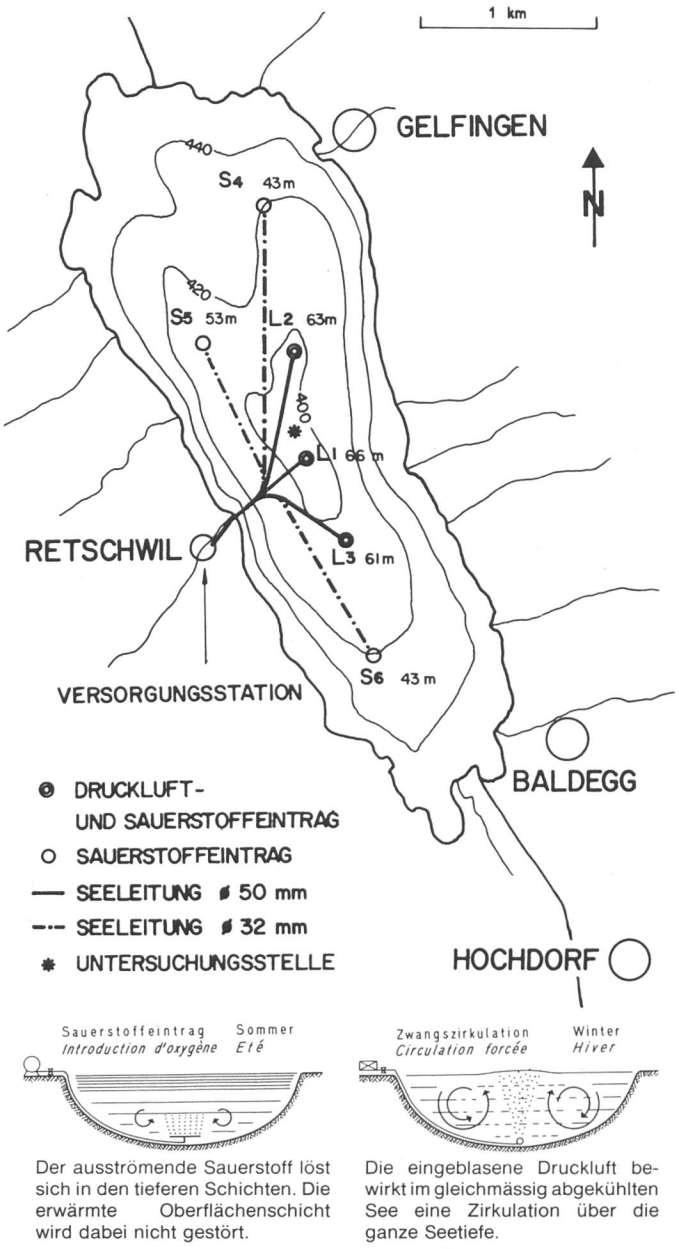
Zulässige Zufuhr (*Vollenweider* 1969)			2,0 t
Zufuhr 1958 (*Bachofen* 1960)			9,4 t
Zufuhr 1975/76			
Niederschläge	0,5	4%	
Abschwemmung der Kulturböden	2,7	24%	
Abwässer	3,8	34%	
Kläranlagenabläufe	4,3	38%	
Total		100%	11,3 t
Sanierungsziel 1984			
Niederschläge	0,8	* 12%	
Abschwemmung der Kulturböden	3,0	43%	
Abwässer	2,6	38%	
Kläranlagenabläufe	0,5	7%	
Total		100%	6,9 t

* umgerechnet auf ein Jahr mit mittleren Niederschlägen

über Abwassereinleitungen vor, welche Qualität ein See aufweisen muss. Unter der Berücksichtigung der natürlichen Gegebenheiten
– soll die Sauerstoffkonzentration überall und jederzeit *mindestens 4 mg O_2/l betragen;*
– ferner soll ein See höchstens dem mesotrophen Produktionstypus entsprechen (d.h. Jahresproduktion kleiner als 150 g C/m² und Jahr);
– aus den beiden Bedingungen kann abgeleitet werden, dass die Konzentration an Gesamt-Phosphor 30 mg/m³ zur Zirkulationszeit nicht überschreiten darf.
Diese Qualitätsziele bildeten die Grundlage für die Sanierung des Baldeggersees. Vorgängig wurden von der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) mit Hilfe von Seemodellen die Auswirkungen von externen (Frachtreduktion) und seeinternen Massnahmen simuliert (EAWAG 1979). Die Seemodelle zeigten, dass durch eine sinnvolle Kombination von externen *und* internen Massnahmen ein gesetzeskonformer Zustand erreicht werden kann (Bild 10). Neben der angestrebten Phosphorfracht-Reduktion um 50%, wurden die Zwangszirkulation im Winter und der künstliche Eintrag von Sauerstoff ins Hypolimnion während der Sommerstagnation empfohlen.
Die seeinternen Massnahmen zielen daraufhin, die natürliche Mischung des Sees im Winter zu unterstützen und durch künstlichen Sauerstoffeintrag ins Hypolimnion die Sauerstoffverhältnisse zu verbessern und die Phosphorrücklösung während des Sommers zu unterbinden.
Im folgenden werden die Anlagen im Baldeggersee vorgestellt und die Auswirkungen auf den Seezustand beschrieben. Zu bemerken ist hier, dass unseres Wissens zum ersten Mal ein See von dieser Grösse mit Reinsauerstoff belüftet wurde.

10. Die technischen Anlagen für die Zwangszirkulation und die Begasung mit Sauerstoff

Für die Zwangszirkulation (Destratifikation) und die Sauerstoffbelüftung wurde aufgrund eines öffentlichen Ingenieurwettbewerbes das System *Tanytarsus* der Ingenieurgemeinschaft Jungo/Schaffner (Zürich und Wohlen, AG) ausgewählt. Das Prinzip der beiden Verfahren und die Anlagen im Baldeggersee sind im Bild 11 dargestellt.
In einer Landstation bei Retschwil ist in einem kleinen Gebäude ein Kompressor (Leistung 37 kW) untergebracht, daneben steht ein Tank für Flüssigsauerstoff (25 m³), der periodisch mit Lastwagen von einem Sauerstoffwerk aufgefüllt wird. Von der Landstation führen 6 Leitungen zu 6 Standorten im See (Bild 14).
In den Wintermonaten wird über drei Leitungen grobblasig Druckluft (ca. 160 Nm³/h) in ca. 60 m Tiefe eingeblasen, um den Baldeggersee zur Zirkulation zu bringen. Während der



Der ausströmende Sauerstoff löst sich in den tieferen Schichten. Die erwärmte Oberflächenschicht wird dabei nicht gestört.

Die eingeblasene Druckluft bewirkt im gleichmässig abgekühlten See eine Zirkulation über die ganze Seetiefe.

Bild 11. Verfahren der Zwangszirkulation und Sauerstoffbegasung im Baldeggersee.

Stagnationsperiode (15. April bis 15. November) wird an 6 Stellen über feinporige Diffusoren reiner Sauerstoff (4,5 t O_2/Tag) eingebracht, die zwischen 40 bis 60 m Tiefe versetzt sind. Ausser einigen Positionsbojen sind die Anlagen auf dem See nicht sichtbar (Bild 15).

Die technischen Daten und Kosten der Anlagen können der Tabelle 7 entnommen werden.

11. Symptombekämpfung und Sanierungserfolge

Die Zwangszirkulation und Sauerstoffbegasung des Baldeggersees sind Symptombekämpfungs-Massnahmen.

Die *Zwangszirkulation* im Winter soll insbesondere die chemische Schichtung des Sees zerstören, dabei wird sauerstoffarmes Tiefenwasser an die Oberfläche gebracht und so auf natürliche Weise mit Sauerstoff angereichert. Der Baldeggersee weist auch im Winter selten eine längere tiefgreifende Zirkulation auf, so dass das Frühjahr schon mit einem Sauerstoffdefizit im Hypolimnion begonnen wird.

Mit dem *künstlichen Sauerstoffeintrag* während der Sommerstagnation will man erreichen, dass der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser nie unter 4 mg O_2/l fällt. Dabei soll folgendes angestrebt werden:

– Das Auftreten von reduzierten Substanzen – wie Methan, Schwefelwasserstoff und Ammonium – soll unterbunden werden.

– Gleichzeitig sollen Sauerstoffverhältnisse geschaffen werden, die das Überleben von höhern Wasserorganismen – vor allem von Fischen – ermöglichen und die Phosphorrücklösung unterbinden.

Am 26. Februar 1982 wurde die Zwangszirkulation erstmals in Betrieb gesetzt und dauerte rund zwei Monate. Schon nach zwei Wochen konnte eine gleichmässige Verteilung von Temperatur und Sauerstoff erreicht werden. Erstmals seit 1958 wurden wieder bis über Grund mehr als 4 mg O_2/l gemessen. Ab Mitte November 1982 bis zum Frühjahr 1983 wurde die Zwangszirkulation wieder in Gang gesetzt. Mitte April 1983 konnten bis zu 8 mg O_2/l über Grund gemessen werden. Die Sauerstoffprofile vom März 1981 und nach der Zwangszirkulation vom März 1983 zeigen die verbesserten Verhältnisse auf (Bild 12).

Nachdem vorgängig im Sommer 1982 die Sauerstoff-Diffusoren technisch getestet wurden, wurden von Mai bis No-

Tabelle 7. Technische Daten der Anlagen für die Zwangszirkulation und die Begasung mit Reinsauerstoff.

Zwangszirkulation (15. November bis 15. April)	
Kompressorleistung	37 kW
3 Leitungen, 50 mm, PEH	
3 Düsen auf ca. 60 m Tiefe	
Luftdurchsatz	200 N m³/h
induzierter Wassertransport	ca. 300 000 m³/h
Begasung mit Reinsauerstoff (15. April bis 15. November)	
Sauerstofftank	25 m³
6 Leitungen, 50 bzw. 32 mm, PEH	
6 Diffusoren auf 40 bis 60 m Tiefe	
mittlere Porenwerte der Filter	2,5 µm
Filterfläche	23 m²
Sauerstoffdurchsatz	4,5 t O_2/Tag
Anlagekosten	
Anlagen an Land	Fr. 430 000
Anlagen im See	Fr. 780 000
Total	Fr. 1 210 000
Betriebskosten pro Jahr	
Stromkosten (Zwangszirkulation)	Fr. 20 000
Sauerstoff (300 Fr./t)	Fr. 300 000
Allgemeine Kosten und Unterhalt	Fr. 115 000
Total	Fr. 435 000

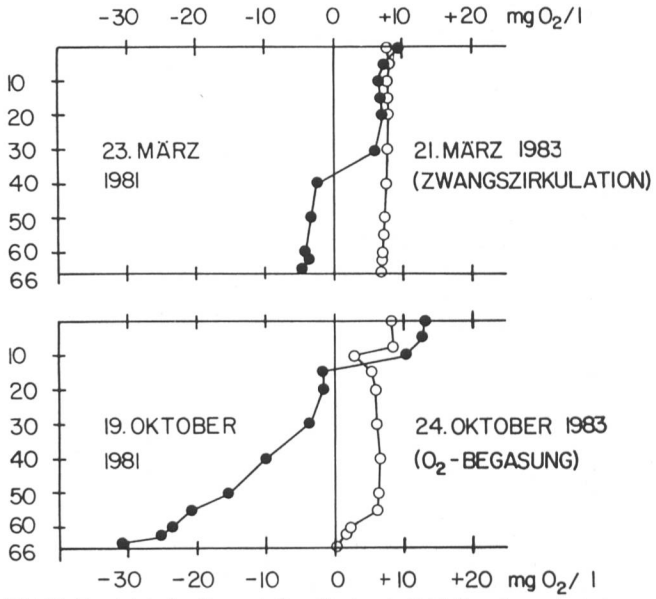


Bild 12. Vergleich der Sauerstoffprofile (nach Oxidation der reduzierten Substanzen wie NO_2^-, NH_4^+, Mn^{2+}, Fe^{2+}, S^{2-}, CH_4) vor und nach seeinternen Massnahmen.

vember 1983 an sechs Stellen 4,5 Tonnen Sauerstoff/Tag eingetragen. Ein Vergleich der Oktober-Sauerstoffprofile der Jahre 1981 und 1983 verdeutlicht die Auswirkungen dieser O_2-Begasung.

Nach Abzug des Sauerstoffbedarfes für die reduzierten Substanzen wurden 1983 bis auf 55 m Tiefe noch mehr als 5 mg O_2/l gemessen. In 10 m und unterhalb 55 m Tiefe wurden kleinere Sauerstoffwerte ermittelt.

Unterhalb der produktiven Schicht trat in ca. 12 m Tiefe ein metalimnisches Sauerstoffminimum auf, das durch die angewandte Begasung nicht beeinflusst wurde. Die Schichten unter 55 m Tiefe weisen niedrigere Sauerstoffkonzentrationen auf, weil die Diffusoren nicht tiefer als auf 58 m versetzt waren. Als sie anschliessend tiefer gesetzt wurden, erhöhte sich auch die Sauerstoffkonzentration unterhalb 55 m.

Mit Hilfe des Sauerstoffeintrages konnte die starke Sauerstoffzehrung im Hypolimnion wettgemacht werden. Im Gegensatz zu früheren Jahren wurden Sulfid und Methan nicht mehr nachgewiesen und auch NH_4^+ und Fe^{2+} waren nur noch in niederen Konzentrationen vorhanden (Tabelle 4).

Zusammenfassend ist im Bild 13 die Reaktion des Baldeggersees auf die Zwangszirkulation und die O_2-Begasung mit Hilfe des Restsauerstoffgehaltes im Seevolumen zwischen 10 und 66 m Tiefe dargestellt. Während früher das Sauerstoffdefizit bis zu minus 1200 t O_2 (= Sauerstoffbedarf) betrug, konnten 1983 auch im Herbst immer positive Werte ermittelt werden. Bezüglich Sauerstoff wurden – seit dem Messungen vorliegen – noch nie so gute Verhältnisse im Baldeggersee angetroffen. Trotzdem ist der Nährstoffgehalt des Sees mit 250 mg Gesamt-P/m³ immer noch rund 10 Mal über dem kritischen Wert, und es bedarf weiterer Anstrengungen, um die Phosphorzufuhr zu vermindern.

Die Zwangszirkulation im Frühjahr 1982 und 1983 und die anschliessende Sauerstoffbegasung scheinen sich auf den Fischbestand ausgewirkt zu haben. So wurde 1983 der beste Felchenfang seit den letzten Jahren erzielt (mündl. Mitteilung des Berufsfischers). Im Frühjahr 1984 konnten Felchen in 40 m Tiefe in Bodennetzen unmittelbar über dem Seegrund gefangen werden. Durch die verbesserten Sauerstoffbedingungen war deshalb zu erwarten, dass die eingesetzten Felchen des Jahrganges 1982 besser überlebten.

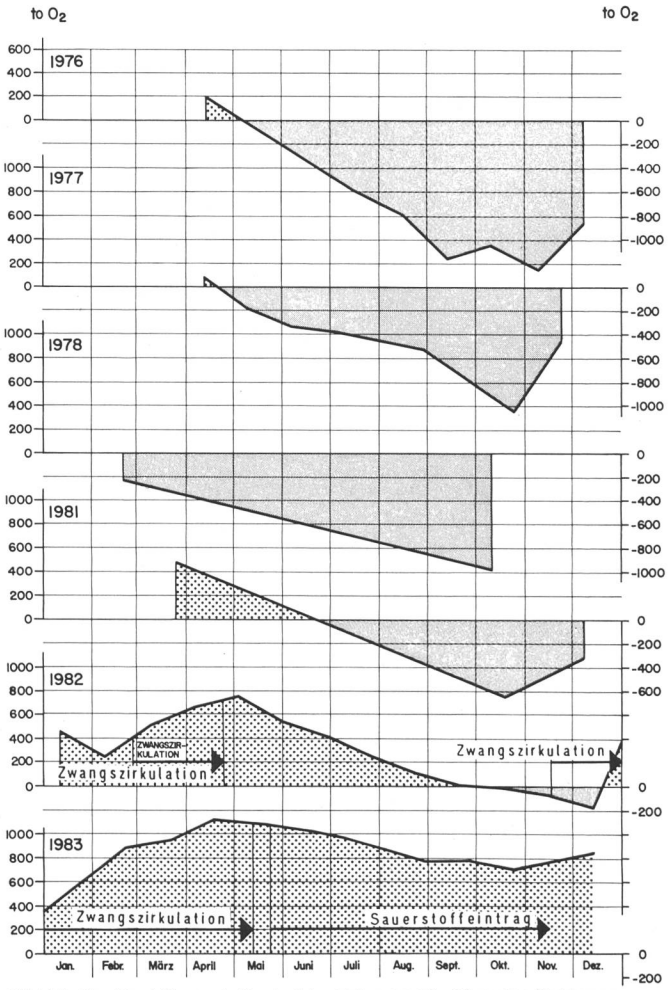


Bild 13. Der Rest-Sauerstoffgehalt im Volumen 10–66 m des Baldeggersees vor (1976 bis 1981) und nach internen Massnahmen
1982 nur Zwangszirkulation und 1983 Zwangszirkulation und anschliessend Begasung mit 4,5 t O_2/Tag.

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Veränderungen des Fischbestandes, des Phytoplanktons und limnologischer Untersuchungen wird die Eutrophierung des Baldeggersees aufgezeigt. Der See war vor 1900 noch oligotroph und ein gutes Felchengewässer. Um 1940 brach der Felchenbestand zusammen und karpfenartige Fische nahmen überhand. Starke Sauerstoffübersättigungen an der Oberfläche und anaerobe Verhältnisse im Tiefenwasser wirkten sich ungünstig auf die fischereilichen Verhältnisse aus. Von 1900 bis 1965 war die Blaualge *Oscillatoria rubescens* im Phytoplankton vorherrschend, mit der weiteren Eutrophierung verschwand sie, und eine andere Phytoplankton-Zusammensetzung trat an ihre Stelle. Alle limnologischen Messungen wie Sichttiefe, pH-Erhöhungen im Sommer, Sauerstoffübersättigungen und Phosphorkonzentration weisen daraufhin, dass um 1975 das Maximum der Eutrophierung erreicht wurde. Die Frühjahrskonzentration betrug damals 500 mg Gesamt-P/m³, und es wurde eine Primärproduktion von 420 g C/m² und Jahr ermittelt.

Im Hypolimnion traten erhöhte Konzentrationen von Ammonium, Sulfid, Methan und Mangan auf, was auf stark reduzierte Verhältnisse hinweist. Die Phosphorzufuhr in den Baldeggersee überstieg zu diesem Zeitpunkt rund 6 Mal den gefährlichen Wert von 2 t Gesamt-P/Jahr. Da durch externe

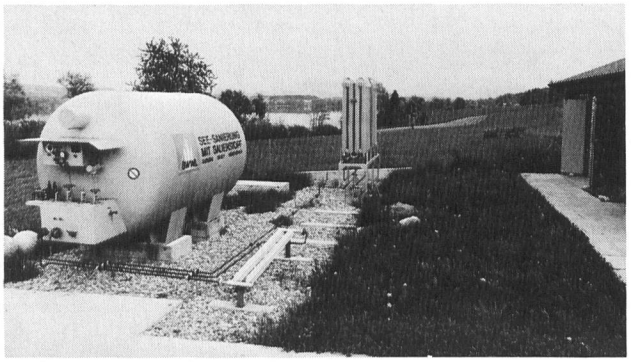


Bild 14. Landstation in Retschwil. Sauerstofftank mit Verdampfer und Kompressorenraum.

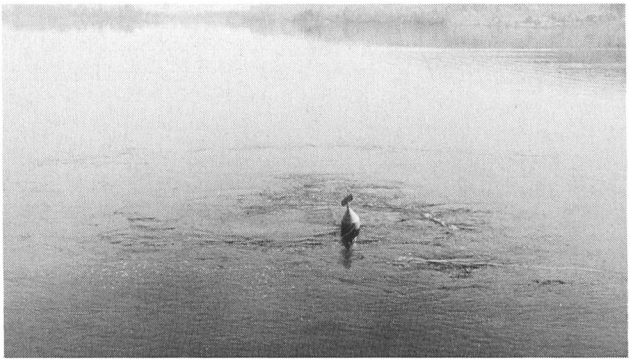


Bild 15. Zwangszirkulationsstrudel auf dem Baldeggersee.

Massnahmen (Abwassersanierung, Phosphatfällung in den Kläranlagen) die hohe Phosphorzufuhr nicht genügend rasch und nur auf 50% gesenkt werden kann, entschloss man sich, den See mit Hilfe der Zwangszirkulation im Winter und der Sauerstoff-Begasung im Sommer zu kurieren.
Schon nach der einmaligen Zwangszirkulation verschwand Sulfid im Tiefenwasser. Der Eintrag von 4,5 t Sauerstoff/Tag ins Tiefenwasser erbrachte erstmals ganzjährig aerobe Verhältnisse im ganzen See. Es wurden im Herbst Sauerstoffkonzentrationen gemessen, wie sie nie, seitdem Messungen vorliegen, gefunden wurden. Die reduzierten Substanzen Sulfid und Methan wurden nicht mehr nachgewiesen; Ammonium und Mangan nur noch in niederen Konzentrationen festgestellt. Dank den externen Massnahmen fiel nun die Frühjahrskonzentration auf 250 mg P/m³.
Die verbesserten Sauerstoffverhältnisse ermöglichten wieder einen besseren Felchenfang.
Ein vollständiges Verzeichnis enthält die gesamte limnologische Literatur über den Baldeggersee.

Literaturzusammenstellung über den Baldeggersee

von Lieberau Th., 1891, Geschichte der Fischerei im Kanton Luzern: Fischereiverhältnisse im Baldeggersee.

Arnet X., 1896, Das Gefrieren der Seen in der Zentralschweiz während der Winter 1890/91 bis 1895/96, «Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern», 1895/96, 59–194.

Bachmann H., 1897, Das «Burgunderblut» im Baldeggersee, «Biol. Centralblätter», *7*, 230–241.

Heller F., 1909, Vom Baldeggersee, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *17*, 38–39.

Surbeck G., 1915, Die Bedeutung der Coregonenzucht in der Schweiz, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *23*, 296–305.

Theiler A., 1917, Beiträge zur Planktonkunde des Sempacher- und Baldeggersees 1910–1915, «Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern», *7*, 310–357.

Bachmann H., 1921, Gutachten über die chemische, bakteriologische und biologische Beschaffenheit von Wasser und Schlammproben aus dem Gebiete des Baldeggersees, 16/20. Sept. 1921, Kant. Gewässerschutzamt Luzern, unveröffentlicht. Hydrobiol. Kommission der Schweiz. Naturforsch. Ges.

Brutschy A. und *Güntert A.*, 1923, Gutachten über den Rückgang des Fischbestandes im Hallwilersee 1918, «Arch. Hydrobiol.», *14*, 523–571.

Bachmann H., 1928, Gutachten betreffend Verunreinigung von Fischereigewässern des Kantons Luzern, Auszug: Die Ron bei Hochdorf, Kant. Gewässerschutzamt des Kantons Luzern.

Nipkow F., 1928, Über das Verhalten der Skelette planktischer Kieselalgen in geschichtetem Tiefenschlamm des Zürich- und Baldeggersees, «Schweiz. Zeitschr. für Hydrol.», *4*, 71–120.

Nipkow F., 1928, Vom Baldeggersee, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *51*, 7.

Kantonales Labor Luzern, 1934–58, Untersuchung des Baldeggersees I, 1. bis 18. Erhebung, Kant. Gewässerschutzamt Luzern, unveröffentlicht.

Gamma H., 1939, Bericht über makrophytische Uferflora des Baldeggersees.

Steinmann P., 1941, Die Gewässersanierung als dringlichstes Arbeitsbeschaffungsprojekt, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *49*, 294–302.

Wüest, 1941, Regulierung des Baldeggersees, Technischer Bericht, Gutachten an den SBN, Standort SBN Basel.

Adam F. und *Birrer A.*, 1943, Biologische und chemische Studien am Baldeggersee 1938/39, «Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern», *14*, 21–98.

Ammann E., 1945, Bericht über die Fischereibewirtschaftung des Baldeggersees, Gutachten an SBN (Schweiz. Bund für Naturschutz, Basel).

Keller R., 1945, Limnologische Untersuchungen im Hallwilersee, «Mitt. Naturforsch. Ges. Aargau», *22*, 127 S.

Hofer G., 1946, Fischereifragen des Baldeggersees, Kleine Notiz an SBN (Schweiz. Bund für Naturschutz, Basel).

Hofer G. und *A.*, 1946–1975, Protokolle betreffend Einsätze im Baldeggersee, Schweiz. Bund für Naturschutz, Basel.

Jaag O., 1949, Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizer Seen, «Verh. Int. Ver. Limnol.», *10*, 192–209.

Märki E., 1949, Die Limnologie der schweizerischen Seen und Flüsse. Zusammenstellung der Literatur seit 1900, «Schweiz. Z. Hydrol.», *11*, 650–707.

Vollenweider R. A., 1950, Ökologische Untersuchungen von planktischen Algen auf experimenteller Grundlage, «Schweiz. Z. Hydrol.», *12*, 193–262.

Anonym, 1951, Vom Baldeggersee, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *59*, 110–111.

Boegli A., 1951, Die Entstehung des Baldeggersees, In: Heimatkunde aus dem Seetal, Seengen, 25, 33–38.

Jaag O., 1952, Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand schweizerischer Gewässer, Gewässerschutz der Schweiz, «Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachmänner», *93*, Heft 6, 1952.

Thomas E. A., 1953, Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumsstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete, «Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachmänner, Monatsbull.», 9/10, 1–11.

Vollenweider R. A. und *Frei M.*, 1953, Vertikale und zeitliche Verteilung der Leitfähigkeit in einem eutrophen Gewässer während der Sommerstagnation, «Schweiz. Z. Hydrol.», *15*, 158–167.

Thomas E. A., 1955, Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumsstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete, «Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachmänner, Monatsbull.», *35*, 119.

Züllig H., 1955, Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers, «Mem. Ist. Ital. Idrobiol., suppl.», *8*, 485– 530.

Züllig H., 1956, Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers, «Schweiz. Z. Hydrol.», *18*, 5–143.

Bussmann J., 1956, Vom Baldeggersee, «Plan», *5*, Heft 56.

Meier H., 1957, Fischereiverhältnisse im Baldeggersee (Referat), Fischereiverwaltung, Kanton Luzern.

Baldinger F., 1957, Das Hallwilersee-Projekt als Beispiel einer grosszügigen Seesanierung, «Schweiz. Z. Hydrol.», *19*, 18–37.

Anonymus, 1958, Gewässerschutz im Kanton Luzern, «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *66*, 147.

Thomas E. A., 1958, Das Plankton-Test-Lot, ein Gerät zum Studium des Verhaltens von Planktonorganismen im See, «Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachmänner, M.-bull.», *38*, 1–6.

Hofer G., 1959, Die fischereiliche Bewirtschaftung eines stark verschmutzten Sees (Baldeggersee), «Schweiz. Fischerei-Zeitung», *67*, 252–254.

Thomas E. A., 1959, Versuche mit Plankton-Test-Loten im Baldeggersee, I. Teil, vom 19. März bis 13. Mai 1958, «Vierteljahresschrift Naturforsch. Ges. Zürich», *104*, 330–340.

Ambühl H., 1960, Die Nährstoffzufuhr zum Hallwilersee. Chemische Untersuchungen an seinen Zuflüssen, «Schweiz. Z. Hydrol.», *22*, 563–597.

Bachofen R., 1960, Stoffhaushalt und Sedimentation im Baldeggersee und Hallwilersee, Dissertation Universität Zürich, Juris-Verlag, Zürich 1960, 118 S.

Bachofen R., 1960, Methodische und experimentelle Studie über Stoffwandlungen in Sedimenten, «Schweiz. Zeitschr. Hydrol.», *22*, 84–95.

Thomas E. A., 1960, Chloridzugabe bei Plankton-Test-Loten im Baldeggersee, «Schweiz. Z. Hydrol.», *22*, 320–329.

Thomas E. A., 1961, Vergleiche über die Planktonproduktion in Flaschen und im Plankton-Test-Lot nach Thomas, «Verh. Internat. Verein. Limnol.», *14*, 140–146.

Kopp J., 1962, Veränderungen von Seen und Flussläufen in der Zentralschweiz in interglazialer und postglazialer Zeit, «Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern», *19*, 153–166.

Thomas E. A., 1962, Versuche mit Plankton-Test-Loten im Baldeggersee. Schlussteil, vom 13. Mai bis 14. Oktober 1958, «Vierteljahresschrift Naturforsch. Ges. Zürich», *107*, 3, 155–196.

Bachofen R., 1963, Von der Verschmutzung des Baldegger- und des Hallwilersees, «Schweiz. Nat.schutz», *29*, 6.

Thomas E. A., 1964, Nährstoffexperimente in Plankton-Test-Loten 1958, «Verh. Internat. Verein. Limnol.», *15*, 342–351.

Kantonales Labor Luzern, 1965–73, Untersuchung des Baldeggersees II. 1. bis 16. Erhebung, Kant. Gewässerschutzamt Luzern, unveröffentlicht.

Ambühl H., 1966, Der Einfluss chemischer Düngung auf stehende Oberflächengewässer, «FEG-Inform.blatt», Nr. 13, April 1966.

Bussmann J., 1968, Der Baldeggersee im Verlauf der Zeiten, «Seetaler-Bote» vom 29.3.1968, Hochdorf.

Thomas E. A., 1968, Der Eutrophierungsvorgang bei Seen Zentraleuropas, «Wasser- und Energiewirtschaft», *60*, 4/5, 115–125.

Vollenweider R. A., 1968, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Seen- und Fliessgewässer-Eutrophierung, unter besonderer Berücksichtigung des Phosphors und des Stickstoffs als Eutrophierungsfaktoren, OECD/dascsi/ 68.27.

Vollenweider R. A., 1969, Möglichkeiten und Grenzen elementarer Modelle der Stoffbilanz von Seen, «Arch. Hydrobiol.», *66*, 1–36.

Ambühl H., 1972, Vorschläge für die Überwachung des Zustandes von Gewässern: Stehende Gewässer, Föderation Europäischer Gewässerschut, FEG, Vortrag 1972.

Ambühl H., 1972, Wie sauber sind unsere Seen? «Schweiz. Maschinenmarkt», Nr. 29.

Gächter R. und *Furrer O. J.*, 1972, Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz, «Schweiz. Z. Hydrol.», *34*, 41–70.

Keller M., 1972, Kleinräumige Verbreitung von Pflanzenarten im Luzerner Seetal im Vergleich zu Gesamtverbreitung und Umwelt, «Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern», *23*, 1– 123.

Ambühl H., 1975, Die jüngste Entwicklung schweizerischer Seen, «Neue Zürcher Zeitung», Beilage Forschung Nr. 53, 5.3.1975.

Ambühl H., 1975, Forschung am Vierwaldstättersee und die jüngste Entwicklung schweizerischer Seen, «Gas, Wasser, Abwasser, Zürich», *55,* Nr. 1, 5–15.

Baccini P., 1976/1977, Untersuchungsdaten der Jahre 1976/1977 (Baldeggersee), Seenforschungslaboratorium der EAWAG/ETH, Kastanienbaum.

Durrer H.K., 1977, Der Baldeggersee und sein Fischbestand, Diplomarbeit, Lehrerseminar Hitzkirch, Zentralbibliothek Luzern, 168 S.

Stadelmann P., 1977, Limnologie als Aufgabe einer kantonalen Gewässerschutzfachstelle, «Wasser, Energie, Luft», *69,* Heft 10, 258–263.

Baumann P., 1978, Weitergehende Gewässerschutzmassnahmen zum Schutze des Baldeggersees, Verbands-Bericht Nr. 135/1, Verband Schweiz. Abwasserfachleute.

Ambühl H., 1979, Der Anteil der Waschmittel-Phosphate bei der Eutrophierung der Seen, «Fischerei-Zeitung», Nr. 2, 28–30.

Gächter R. et. al. 1979, MELIMEX, an experimental heavy metal pollution study (Baldeggersee), mit verschiedenen Ko-Autoren, «Schweiz. Z. Hydrol.», *41,* 165–314.

Stumm W. und *Ambühl H.* (EAWAG), 1979, Gutachten über die Sanierungsmöglichkeiten für den Baldegger- und Hallwilersee, EAWAG, Dübendorf, 101 S., Polizeidepartement des Kantons Luzern, Baudirektion des Kantons Aargau.

Fricker Hj., 1980, OECD Eutrophication Programme, Regional Project alpine Lakes, Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 234 S.

Jungo E. und *Schaffner U.*, 1980, Projektwettbewerb Sanierung Baldeggersee, Hallwilersee und Sempachersee, Bericht Baldeggersee: Tanytarsus, unveröffentlichter Bericht, 55 S., Kantonales Amt für Gewässerschutz, Luzern.

Baccini P. und *Joller Th.*, 1981, Transport processes of copper and zinc in a highly eutrophic and meromictic lake (Baldeggersee), «Schweiz. Z. Hydrol.», *43,* 176–199.

Boller M., Eugster J. und *Weber A.*, 1981, Erfahrungen mit der ersten schweizerischen Flockungsfiltration auf der Kläranlage Hochdorf, «Gas, Wasser, Abwasser», *61,* 349–365.

Imboden D.M., Lemmin U., Joller Th., Fischer K.H. und *Weiss W.*, 1981, Lake mixing and trophic state, «Verh. Internat. Verein. Limnol.», *21,* 115–119.

Bossard P., Joller Th. und *Szabo E.*, 1981, Die quantitative Erfassung von Methan im Seewasser, «Schweiz. Z. Hydrol.», *43,* 200–211.

Ambühl H., 1982, Eutrophierungskontrollmassnahmen an Schweizer Mittellandseen, «Z. Wasser, Abwasser, Forsch.», *15,* 113–120.

Imboden D., 1982, Mischungsprozess im Baldeggersee, Mitteilungen der EAWAG, Dübendorf, Nr. 13, 5–10.

Sturm M. und *Niessen F.*, 1982, Die Oberflächensedimente des Baldeggersees: Sedimentologische Untersuchungen im Zusammenhang mit den Sanierungsmassnahmen des eutrophen Baldeggersees, EAWAG, Dübendorf, unveröffentlicht, 11 S.

Züllig H., 1982, Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früher Phytoplanktonentfaltungen, «Schweiz. Z. Hydrol.», *44,* 1–98.

Imboden D., 1983, Interne Massnahmen am Baldeggersee, «Neue Zürcher Zeitung», Nr. 85 vom 13. April 1983.

Imboden D.M., Lemmin U., Joller T. und *Schurter M.*, 1983. Mixing processes in lakes: mechanisms an ecological relevance, «Schweiz. Z. Hydrol.,» 45, 11–44.

Joller Th., 1983, Pilotstudie zur Sanierung der drei Mittellandseen Baldegger-, Hallwiler- und Sempachersee, Mitteilung der EAWAG, Dübendorf, Nr. 15, 1–5.

Stadelmann P., Joller Th. und *Imboden D.*, 1983, Die Auswirkungen von internen Massnahmen im Baldeggersee: Zwangszirkulation und Sauerstoff-Begasung des Hypolimnions, «Intern. Verein. Limnol.», *21,* in Vorbereitung.

Stumm W., Imboden D. und *Joller Th.*, 1983, Versuche am Baldeggersee zur Zwangszirkulation und Begasung des Tiefenwassers, EAWAG, Dübendorf, unveröffentlichter Bericht, 15. Februar 1983, 85 S.

EAWAG, 1984. Versuche am Baldeggersee zur Zwangszirkulation und Begasung des Tiefenwassers mit Sauerstoff in den Jahren 1982 und 1983, Schlussbericht; ein Auftrag des Polizeidepartementes des Kantons Luzern, Nr. 4662, EAWAG, Dübendorf, Mai 1984, 63 S.

Verdankungen
Die neuesten limnologischen Untersuchungen wurden von der Abteilung Hydrobiologie der EAWAG (Professor Dr. *H. Ambühl*) ausgeführt. Die Isopleten-Darstellungen wurden von *Th. Joller* ausgearbeitet, und *A. Riechsteiner* (Kantonales Labor) half bei der Probenahme auf dem Baldeggersee mit. Die wissenschaftliche Projektleitung für die see-internen Massnahmen lag bei Dr. *D.M. Imboden* (EAWAG).

Adresse des Verfassers: Dr. sc. nat. ETH *Pius Stadelmann,* kantonales Amt für Gewässerschutz, Klosterstrasse 31, 6002 Luzern.

Die Belüftungsanlage Hüttnersee

Wie die Mehrzahl der Seen im schweizerischen Mittelland leidet auch der Hüttnersee an den Folgen der Überdüngung (Eutrophierung) mit Pflanzennährstoffen, insbesondere mit Phosphor. Dadurch wird der See zu einer intensiven Algenproduktion angeregt. In der Folge stellte sich während der Sommermonate im Tiefenwasser ein durch absterbendes Algenmaterial verursachter Sauerstoffschwund ein. Der Phosphorgehalt im Hüttnerseewasser beträgt gegenwärtig rund das Dreifache der tolerierbaren Menge. Der Sauerstoffvorrat wurde deshalb nach der periodischen Regeneration im Frühjahr jeweils bereits in wenigen Wochen vollständig aufgezehrt. Zwischen August und Oktober war die Region unterhalb von 3 m Seetiefe vollkommen sauerstofffrei und stand als Lebensraum für höhere Lebewesen nicht mehr zur Verfügung.

Die Ursachen der Überdüngung des Hüttnersees

Phosphor gelangt aus verschiedenen Quellen in unsere Gewässer: über Abwassereinleitungen, Auswaschungen aus der Atmosphäre, als unvermeidliche Verluste aus der Landwirtschaft und als vermeidbare landwirtschaftliche Verluste. Für den Hüttnersee waren in der Vergangenheit Abwassereinflüsse und vermeidbare landwirtschaftliche Verluste entscheidend. Die Abwassersanierung in seinem Einzugsgebiet ist heute weitgehend abgeschlossen. In der Landwirtschaft sind leider teilweise noch immer Bewirtschaftungsformen üblich, die den See schädigen können (Düngen von schneebedeckten, gefrorenen oder durchnässten Böden usw.). Neben diesen externen Faktoren war im Hüttnersee mit seinem sauerstofffreien Tiefenwasser die Eigendüngung aus dem Nährstoffdepot im Sediment von grosser Bedeutung.

Gewässerschutz-Strategie

Will man den Zielsetzungen des eidgenössischen Gewässerschutzgesetzes gerecht werden und den Hüttnersee als Erholungsgebiet nicht ernsthaft gefährden, so müssen nunmehr neben weitergehenden Massnahmen zur Herabsetzung der Nährstoffzufuhr see-interne Verbesserungen vorgenommen werden. Diese sollen im Sommer durch Belüften des Tiefenwassers die Eigendüngung verhindern und im Winter die natürliche Regeneration durch Zirkulationshilfe fördern.
Der kürzlich durch den Regierungsrat bewilligte Kredit ermöglichte nun die Installation einer derartigen Belüftungsanlage (welche im Winter als Zirkulationsanlage betrieben wird). Der Betrieb wurde im Dezember 1983 aufgenommen.

Näheres zur Belüftungsanlage

Die sichtbaren Teile der Anlage (sie ist 300 m ausserhalb der Badanlage in der Seemitte verankert) haben bescheidene Abmessungen. Die bedeckte Seefläche beträgt 2 × 10 m und der Aufbau über einer Fläche von 2 × 2 m ragt rund 1 m, der übrige Aufbau nur ½ m über den Seespiegel empor. Lärm- und Geruchsemissionen sind keine entstanden. Das Annähern und Betreten des Schwimmkörpers durch Badende ist ungefährlich und daher statthaft. Im Winter wird die Seefläche im engeren Bereich der Anlage allerdings eisfrei bleiben und muss mit Rücksicht auf Schlittschuhläufer abgeschrankt werden.
Nach Versuchen im oberen Zürichsee gab der Kanton Zug im Juli 1981 die Erlaubnis zum Erproben einer Anlage mit 50 kg/Tag Eintrag von gelöstem Sauerstoff im Wilersee bei Menzingen. Die dort eingesetzten Felchen und Regenbo-