Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Luzern
Band: 37 (2002)

Artikel: 20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees
Autor: Stadelmann, Pius / Lovas, Robert / Butscher, Ernst
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-523529

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

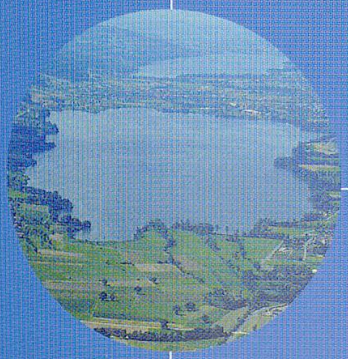
Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on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

Download PDF: 10.08.2025

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

PIUS STADELMANN
ROBERT LOVAS
ERNST BUTSCHER

20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees



20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees

PIUS STADELMANN, ROBERT LOVAS & ERNST BUTSCHER

Zusammenfassung

Der 66 Meter tiefe und 5,2 Quadratkilometer grosse Baldeggersee wird seit 1982 künstlich belüftet. Schon um 1905 wurde er durch die Einleitung von ungereinigten Abwässern aus Siedlungen und Industrien und ab 1965 noch zusätzlich durch intensive Landwirtschaft mit hohen Tierbeständen mit Phosphor überdüngt. Die Eutrophierungsgeschichte wird mittels Sedimentanalysen für die Jahre 1885 bis 2000 illustriert und ab 1950 mit chemischen Messungen von Phosphor und Stickstoff belegt. Die Reaktion des Baldeggersees auf die getroffenen Gewässerschutzmassnahmen wird mit Hilfe von physikalischen, chemischen, biologischen und sedimentologischen Untersuchungen umfassend dargestellt.

Dank der Kombination von externen und seeinternen Massnahmen haben die Phosphorkonzentrationen in den Jahren 1974 bis 2001 von 520 auf 60 mg P/m^3 abgenommen. Der Zielwert von mindestens 4 mg Sauerstoff pro Liter zu jeder Zeit und in jeder Tiefe konnte mit der künstlichen Belüftung eingehalten werden. Die Artenvielfalt des Phytoplanktons hat sich erhöht und das Wasser ist klarer geworden, dies ermöglicht auch das bessere Aufkommen von Makrophyten rund um das Seeufer. Bodentiere wie Würmer *(Oligochaeta)* und Insektenlarven *(Chironomidae)* drangen in grössere Tiefen vor und bewirkten eine Bioturbation und bessere Mineralisation der Sedimente.

Die langfristigen Untersuchungen der jährlichen Phosphorzufuhren über Zuflüsse und über gereinigte und ungereinigte Siedlungsabwässer zeigen auf, dass heute über 85 % der jährlichen Phosphorfrachten in den See aus den überdüngten landwirtschaftlich genutzten Böden stammen. Die heutige Phosphorbelastung des Baldeggersees ist zwei- bis dreimal über dem kritischen Wert von rund vier Tonnen Gesamt-Phosphor beziehungsweise zwei Tonnen gelöstem Phosphor pro Jahr.

Aufgrund der Langzeitüberwachung der Gewässer, der Forschungsergebnisse und der gesetzlichen Rahmenbedingungen werden neue Zielsetzungen für die Gesundung des Wasserkreislaufes des ganzen See-Einzugsgebietes formuliert. Weiter wird aufgezeigt, mit welchen Folgen im Baldeggersee zu rechnen ist, wenn die seit 1982 betriebene Zwangszirkulation im Winter und Tiefenwasserbelüftung im Sommer eingestellt würde.

Résumé

20 ans d'assainissement et de suivi du Baldeggersee. – Le Baldeggersee, d'une profondeur de 66 mètres pour une superficie de 5,2 km^2, est oxygéné artificiellement depuis 1982. Depuis 1905 déjà, il reçoit un excès de phosphore en raison du rejet d'eaux usées domestiques et industrielles. Le phénomène est encore accentué depuis 1965 par l'agriculture intensive et un cheptel important.

L'histoire de l'eutrophisation de 1885 à 2000 est illustrée au moyen des analyses de sédiments et documentée depuis 1950 par des mesures chimiques de phosphore et d'azote. La réaction du Baldeggersee aux mesures de protection des eaux est présentée à l'aide d'analyses physiques, chimiques, biologiques et sédimentologiques.

Grâce à la combinaison de mesures externes et internes au lac, les concentrations de phosphore ont diminué de 520 à 60 mg P/m^3 de 1974 à 2001. Le seuil fixé à 4 mg d'oxygène par litre en tout temps et à toute profondeur n'a pas été franchi grâce à l'oxygénation artificielle. La diversité des espèces du phytoplancton a augmenté et l'eau est devenue plus claire, ce qui permet aussi un meilleur développement des macrophytes sur les berges. Les animaux du sol comme les vers *(Oligochaeta)* et les larves d'insectes *(Chironomidae)* se rencontrent plus profondément et provoquent une bioturbation et une meilleure minéralisation des sédiments.

Les recherches à long terme sur les apports annuels de phosphore par les affluents et par les eaux usées domestiques et industrielles épurées et non traitées montrent que 85 % des apports annuels de phosphore dans le lac proviennent des terres agricoles surfumées. La pollution actuelle du Baldeggersee par le phosphore est deux à trois fois supérieure à la valeur critique d'environ quatre tonnes de phosphore total ou de deux tonnes de phosphore dissous par année.

Sur la base du suivi à long terme des eaux, des résultats des recherches et des conditions-cadre légales, de nouveaux objectifs sont formulés pour l'assainissement de tout le bassin versant du lac. L'étude montre aussi les conséquences escomptées pour le Baldeggersee de l'introduction en 1982 de la circulation forcée hivernale et de l'oxygénation estivale en profondeur.

Abstract

20 years rehabilitation and surveillance of Lake Baldegg. – Lake Baldegg, with a surface area of 5.2 square kilometres and a maximum depth of 66 m, has been artificially aerated since 1982. Already around 1905 the lake was polluted by untreated sewage from settlements and industry. Starting from about 1965, intensive farming and high animal stocking caused an additional phosphorus loading. The history of eutrophication is illustrated by sediment analysis relating to the years 1885 to 2000 and in addition by chemical analysis of phosphorus and nitrogen since 1950. The reaction of Lake Baldegg to applied water protection measures is described in detail with the help of physical, chemical, biological and sedimentological investigations.

With the combination of external and lake internal measures the concentration of phosphorus has decreased from 520 to 60 mg P/m^3 during the period 1974 to 2001. The target value of at least 4 mg of oxygen per litre at any time and any depth in the lake was reached by artificial aeration. Species diversity of phytoplankton increased and the water became clearer, which enabled better growth of macrophytes along the lakeshore. Benthic animals such as worms *(Oligochaeta)* and insect larvae *(Chironomidae)* were able to live at greater depths and caused bioturbation and better mineralisation of the sediments.

Long-term investigations of the annual phosphorus input from tributaries and from treated and untreated sewage show that, at present 85 % of the annual phosphorus loading of the lake originates from overfertilised agricultural land. The present annual phosphorus loading of Lake Baldegg is two to three times higher than the critical loading. The critical loading for Lake Baldegg is assumed to be about four tons of total phosphorus and two tons of soluble phosphorus respectively.

New objectives for the recovery of the entire lake drainage basin will be set based on long-term monitoring of the lake and its tributaries, on the new research results and within legal restrictions. The consequences of cessation the artificial mixing in winter and hypolimnetic oxygenation in summer, wich are in operation since 1982, are discussed.

Einleitung

Der 66 Meter tiefe Baldeggersee war schon im Mittelalter als gutes Felchen-Gewässer (VON LIEBENAU 1891) bekannt und wahrscheinlich bis 1850 in einem nährstoffarmen, so genannten oligotrophen Zustand. SCHIESS (1976) beschreibt die fischereilichen Verhältnisse von 1884 bis 1974. Ausgehend von einem guten Felchenertrag, wurde ein starker und stetiger Ertragsrückgang beobachtet. Dies führte bis zum völligen Zusammenbruch der Felchenbestände um 1940, was auch der Grund war für den Verkauf des Baldeggersees im Jahr 1942 an den damaligen Schweizerischen Bund für Naturschutz.

Erste physikalische, chemische und biologische Studien wurden von THEILER (1917), ADAM & BIRRER (1943) und anschliessend vom Kantonalen Laboratorium Luzern ausgeführt.

Hochauflösende Analysen von Sedimentschichten belegen, dass der Baldeggersee wegen der Industrialisierung von Hochdorf durch das Einleiten von ungereinigten Abwässern aus Siedlungen und Industriebetrieben sich bereits ab 1905 rasch in ein überdüngtes (eutrophes) Gewässer verwandelte (LOTTER & BIRKS 1997). Erste Anzeichen der Eutrophierung fallen in die Periode von 1850 bis 1900, so wurde um 1870 das gehäufte Auftreten der Burgunderblut-

Abb. 1: Baldeggersee mit Hallwilersee im Hintergrund.

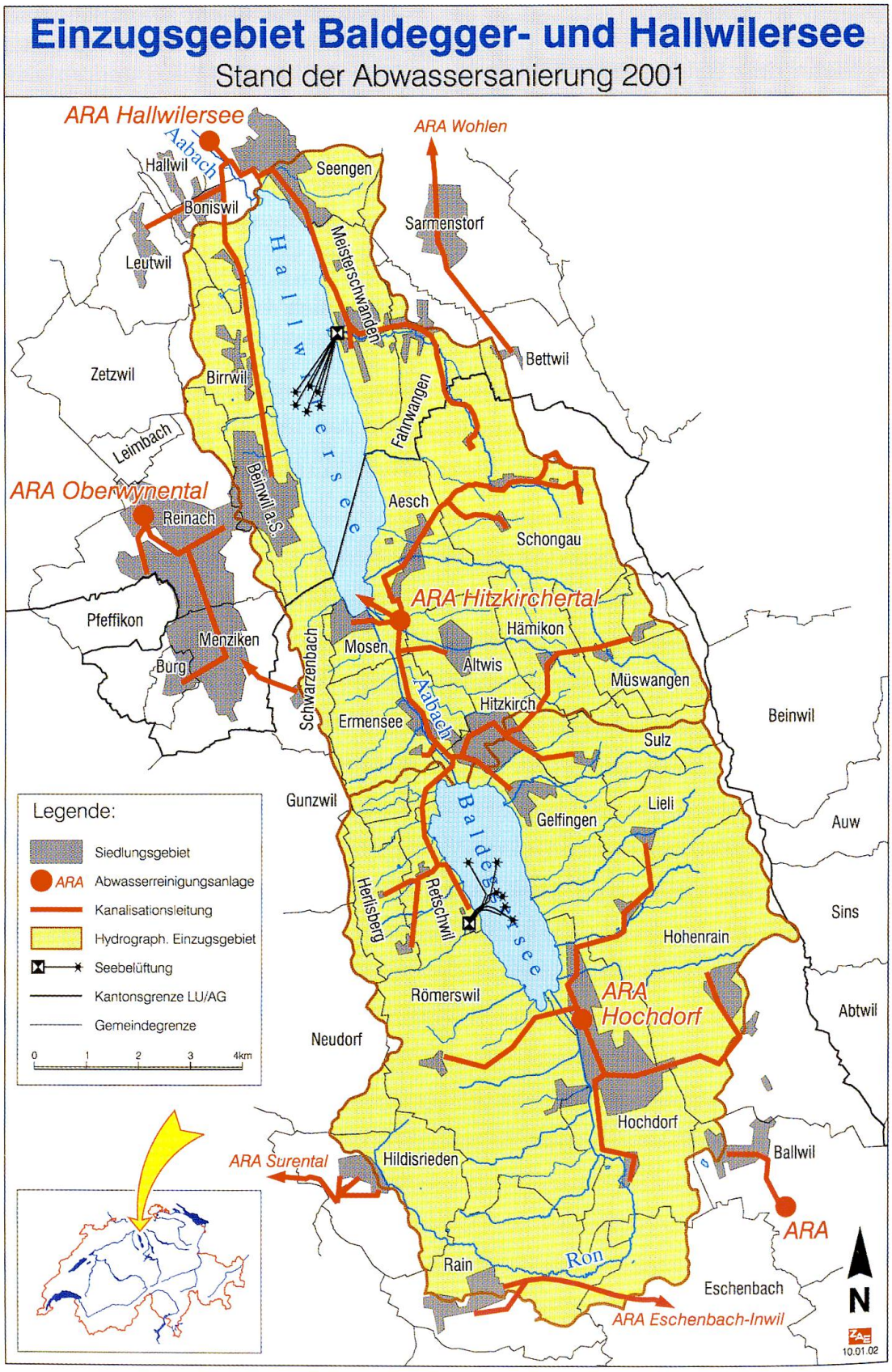


Abb. 2: Einzugsgebiet des Baldegger- und Hallwilersees mit Siedlungsentwässerung, Abwasserreinigungsanlagen und Belüftungsleitungen, Stand 2001.

alge *(Planktothrix rubescens)* von BACHMANN (1897) festgestellt. Mit der fortschreitenden Nährstoffanreicherung im See verschwand diese Algenart um 1965 (ZÜLLIG 1982), sie dominiert erst seit 1985 wieder die Phytoplankton-Zusammensetzung. Durch die Einleitung von Siedlungsabwässern und später durch die Intensivierung der Landwirtschaft mit erhöhtem Hofdüngeranfall aus der Schweinezucht nahm in den Jahren von 1950 bis 1974 die Gesamtphosphorkonzentration im See von 80 auf 520 mg P/m^3 zu. Die Folgen waren hohe Algendichten, das Aufkommen von toxischen Blaualgen, Fischsterben und völliger Sauerstoffschwund im Tiefenwasser mit Bildung von Fäulnisprodukten. Die Entwicklung des Baldeggersees bis Anfang der 1980er-Jahre ist von STADELMANN (1984) beschrieben worden.

Wegen des prekären Zustands des Baldeggersees wurden neben den klassischen Gewässerschutzmassnahmen zur Verminderung der Phosphorbelastung aus dem Einzugsgebiet im Jahr 1982 auch seeinterne Massnahmen ergriffen. Im Februar 1982 wurde der Baldeggersee erstmals mit Hilfe von Druckluft zwangsdurchmischt. Ab 1983 wurde jeweils im Sommerhalbjahr zusätzlich Reinsauerstoff ins Tiefenwasser eingetragen. Die gleichen Belüftungsanlagen wie im Baldeggersee wurden im Jahr 1984 im Sempachersee und 1985/86 im Hallwilersee eingebaut.

Seit 20 Jahren wird nun der Baldeggersee im Winter zwangszirkuliert und im Sommer mit Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser künstlich belüftet. Dies ist Anlass, Rechenschaft zu geben über Erfolge und Fehlschläge der getroffenen Seesanierungsmassnahmen. Über Erfahrungen und Wirkung der externen und seeinternen Massnahmen der ersten zehn Jahre sei auf die Publikationen von WEHRLI & WÜEST (1996) sowie STADELMANN et al. (1997) verwiesen. Die Auswirkungen der Seesanierungsmassnahmen auf die Zusammensetzung und die Artenvielfalt des pflanzlichen und tierischen Planktons wurden kürzlich von BÜRGI & STADELMANN (2000) beschrieben.

Die Zielsetzung dieser Publikation ist es, die Zustandsentwicklung des Baldeggersees vor und nach den seeinternen Eingriffen unter Verwendung der neueren Untersuchungen darzustellen, und die anfangs geplanten Zustands- und Qualitätsverbesserungen mit Hilfe von externen und seeinternen Massnahmen mit der Reaktion des Sees zu vergleichen. Die Frage soll beantwortet werden, ob die Zielsetzungen noch weiterhin zweckmässig sind, um eine langfristige Gesundung der Gewässer des Seetals mit Baldeggersee und Hallwilersee zu erreichen. Weiter wird versucht, auf die verbleibenden Probleme und den Handlungsbedarf einzugehen sowie auch ungeplante Effekte der Seesanierung aufzuzeigen. Die Gewässerschutzmassnahmen für die Gesundung des Baldeggersees wirken sich auch unmittelbar auf den Zustand des unterliegenden Hallwilersees aus.

Im Einzugsgebiet von Seen kann konkret dem Prinzip der Nachhaltigkeit nachgelebt werden. Seen sind Spiegelbilder unseres Verhaltens. Um einen guten ökologischen Zustand zu erreichen, braucht es jedoch einen Bewirtschaftungs- und Massnahmenplan für das ganze Einzugsgebiet beider Seen unter Berücksichtigung der Belastungsgrenzen aller Gewässer.

Einzugsgebiete und Hydrographie

Die hydrographischen Kenndaten, die Anzahl der Einwohner und die Tierbestände in Düngergrossvieheinheiten (DGVE) der Einzugsgebiete des Baldegger- und Hallwilersees sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Das ganze Einzugsgebiet der beiden Seen mit der Siedlungsentwässerung und den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) zeigt Abbildung 2.

Die beiden Seen sind nach der letzten Eiszeit vor rund 15 000 Jahren nach dem Rückzug des Reussgletschers entstanden. Der Gletscher hinterliess einen Stirnmoränenkranz bei Ermensee (so genanntes Zü-

Tab. 1: Hydrographische Kenndaten des Baldegger- und Hallwilersees

	Baldeggersee	Hallwilersee
Höhe über Meer	463 m	449 m
Seeoberfläche	5,2 km^2	10,2 km^2
Einzugsgebiet (ohne See)	67,8 km^2	123,9 km^2
Volumen total	0,173 km^3	0,285 km^3
Volumen von 15 bis 66 m des Baldeggersees	0,104 km^3	–
Maximale Tiefe	66 m	47 m
Mittlere Tiefe	33 m	29 m
Mittlerer Abfluss (1976–1999)	1,30 m^3/s	2,31 m^3/s
Mittlere Aufenthaltszeit	4,2 Jahre	3,9 Jahre
Einwohner im Einzugsgebiet	15 000 Einw.	12 000 Einw.
Tierbestand in Düngergrossvieheinheiten (DGVE[1])	11 327 DGVE	6 181 DGVE
Tolerierbare jährliche Zufuhr an Gesamt-Phosphor	3,6 t P_{Gesamt}/Jahr	3,0 t P_{Gesamt}/Jahr
Tolerierbare jährliche Zufuhr an gelöstem Phosphor	1,8 t $P_{gelöst}$/Jahr	2,4 t $P_{gelöst}$/Jahr

[1] Für die Umrechnung der Nutztiere auf DGVE ist ihre jährlich ausgeschiedene Düngestoffmenge massgebend. Diese beträgt für eine DGVE, was einer Kuh entspricht, 15 kg Phosphor und 105 kg Stickstoff.

rich-Stadium) und so bildete sich der Baldeggersee. Östlich und westlich ist der Baldeggersee von zwei Seitenmoränen, die bis auf 850 Meter über Meer reichenden Hügelzüge Lindenberg und Erlosen, umgeben (BÖGLI 1951 und 1969). Dies bewirkt eine windgeschützte Lage, die im Winter auch natürlicherweise eine Vollzirkulation des Sees verhindern kann. Zur Landgewinnung wurde der Baldeggersee zweimal abgesenkt: 1806 um etwa 35 Zentimeter und 1870 um weitere 115 Zentimeter.

Das hydrographische Einzugsgebiet des Baldeggersees umfasst 67,8 Quadratkilometer. Landwirtschaftlich genutzt werden 83 Prozent der Flächen, 13 Prozent sind Wald und vier Prozent Siedlungsflächen (Abb. 1).

Im Verhältnis zur Seeoberfläche (5,2 Quadratkilometer) ist der See relativ tief (maximale Tiefe 66 Meter, mittlere Tiefe 33 Meter). In den Baldeggersee entwässern 14 Bäche. Der mittlere Abfluss über den Aabach bei Richensee beträgt 1,30 Kubikmeter pro Sekunde, was eine mittlere theoretische Wasseraufenthaltszeit von 4,2 Jahren ergibt.

Nach der Modellvorstellung von VOLLENWEIDER (1968 und 1969) dürfte der Baldeggersee mit nicht mehr als zwei Tonnen Phosphor pro Jahr belastet werden, um eine Qualitätsanforderung von weniger als 30 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter zu erreichen.

Eutrophierungsgeschichte des Baldeggersees

Die Eutrophierungsgeschichte des Baldeggersees von 1885 bis 2000, das heisst seine Anreicherung mit dem Düngestoff Phosphor, kann der Abbildung 3 entnommen werden. Der Verlauf der Phosphorkonzentration stützt sich auf Sedimentkern-Untersuchungen an der tiefsten Stelle des Baldeggersees (66 m). LOTTER (1998) ermittelte mit Hilfe von Kieselalgen-Analysen in den jährlich abgelagerten Sedimentschichten die zugehörigen Phosphorkonzentrationen zur Zirkulationszeit. Für die Jahre 1950 bis 2000 liegen zudem chemische Phosphoranalysen vor, so dass die Gesamtphosphorkonzentrationen mit dieser Eichung zurückverfolgt

werden können. Basierend auf weiteren 55 Sedimentkern-Untersuchungen, verteilt auf die ganze Seebodenfläche des Baldeggersees, können folgende Eutrophierungsperioden unterschieden werden (NIESSEN & STURM 1987):

vor 1885, oligotroph: Phosphorkonzentration weniger als 30 mg P/m^3,
guter Felchenfangertrag,
um 1870 wurde das massenhafte Auftreten der Burgunderblutalge *(Planktothrix rubescens)* festgestellt,
oxische Verhältnisse bis in 65 m Tiefe

1885–1905, mesotroph: Phosphorkonzentration um 30 mg P/m^3,
oxische Verhältnisse bis in 60 m Tiefe

1905–1910, eutroph: rascher Anstieg der Phosphorkonzentration auf 100 mg P/m^3,
Industrialisierung von Hochdorf,
massive Abwassereinleitungen aus Siedlungen, Industrien und Gewerbe,
Rückgang des Felchenfanges um 1907

1910–1940, eutroph: Anstieg der Phosphorkonzentration von 100 auf 150 mg P/m^3,
noch keine Abwassersanierung,
Rückgang der Felchenfangerträge,
oxische Verhältnisse bis in 40 m Tiefe

1940–1960, eutroph: Phosphorkonzentration um 150 mg P/m^3,
Zusammenbruch der Felchenfangerträge und im Jahr 1942 Verkauf des Baldeggersees an den Schweizerischen Bund für Naturschutz (heute Pro Natura),
massive Fischsterben,
oxische Verhältnisse bis in 20 m Tiefe

1960–1980, polytroph: starker Anstieg der Phosphorkonzentration von 150 auf 520 mg P/m^3
Ausbau der Siedlungsentwässerung und von Kläranlagen mit Phosphorfällungsstufen,
ab 1965 starke Aufstockung der Schweinebestände,
oxische Verhältnisse nur noch bis in 10 m Tiefe

1980–1990, polytroph: Abnahme der Phosphorkonzentration auf 100 mg P/m^3
vor allem dank Abschluss der Abwassersanierung und Phosphatverbot in Textil-Waschmitteln,
seit 1982 Kombination von externen und seeinternen Massnahmen,
künstliche Belüftung bewirkt oxische Verhältnisse bis in 60 m Tiefe

1990 – 2000, eutroph: Phosphorkonzentration um 100 mg P/m^3,
also ähnliche Werte wie von 1910 bis 1940,
Weiterführung der künstlichen Belüftung,
oxische Verhältnisse bis in 65 m Tiefe

Entwicklung der Phosphorkonzentration im Baldeggersee ab 1885

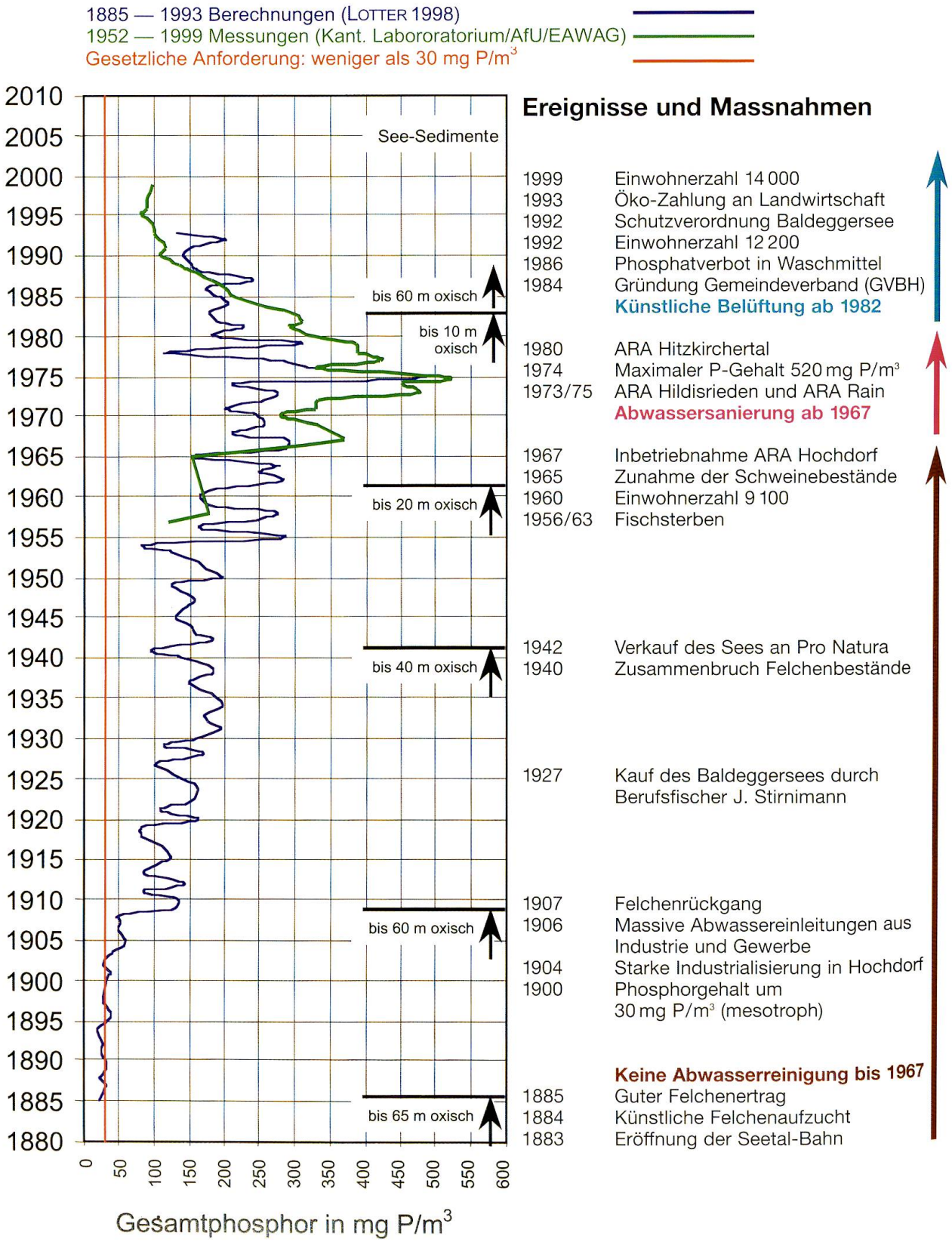


Abb. 3: Eutrophierungsgeschichte des Baldeggersees. Ermittlung der Gesamtphosphorkonzentrationen mit Hilfe der Kieselalgenzusammensetzung nach LOTTER (1998).

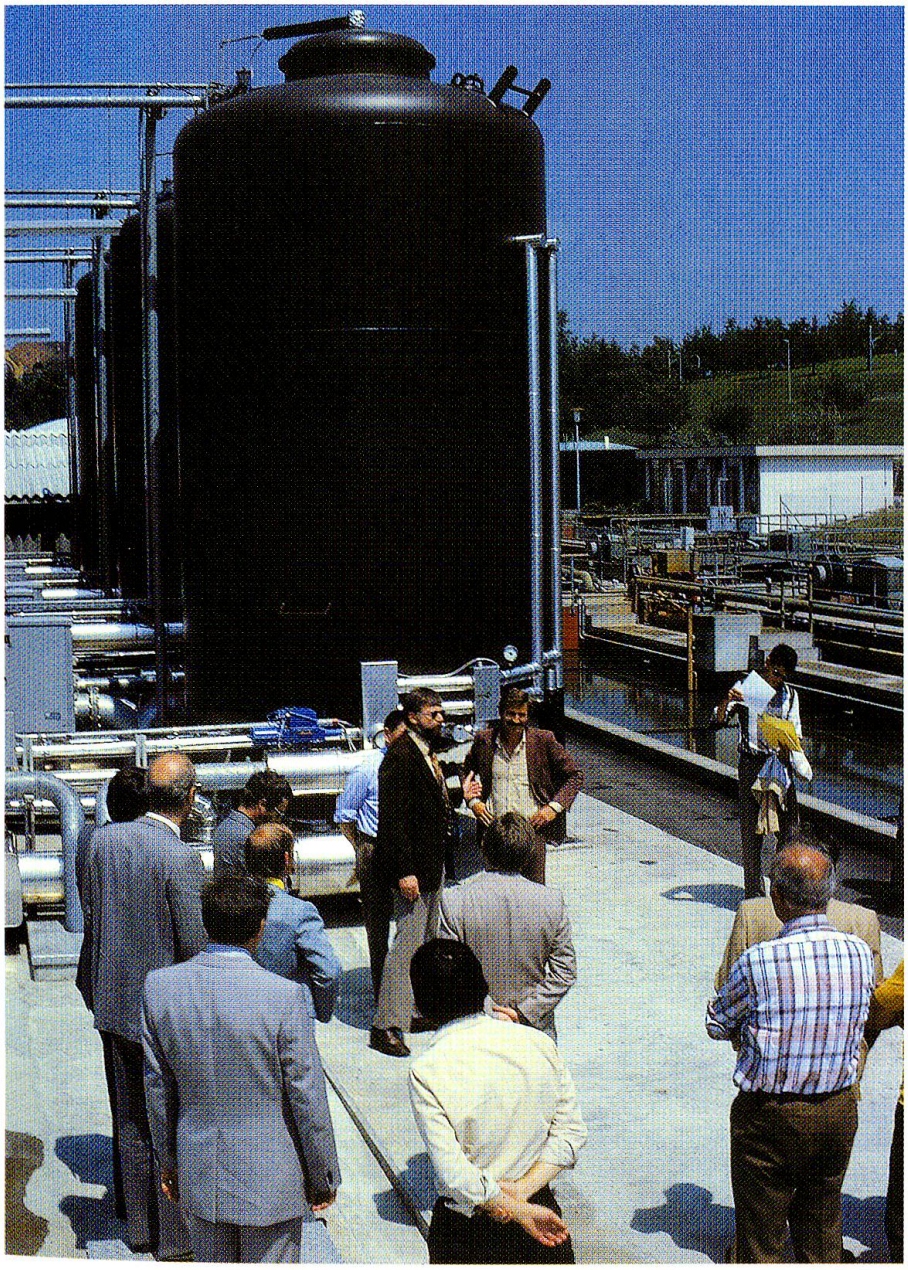


Abb. 4: ARA Hochdorf mit Flockungsfiltrationsstufe zur Phosphorelimination. In Betrieb seit 1980.

Seit 1905 wurde der Baldeggersee durch die rasante Industrialisierung von Hochdorf (SCHNIDER 1998) mit ungereinigten Siedlungs- und Industrieabwässern, mit Düngestoffen und Sauerstoff zehrenden Schmutzstoffen belastet. Ab 1960 begannen die Gemeinden ihre Kanalisationssysteme auszubauen. Die Reinigung der Abwässer im Einzugsgebiet des Baldegger- und Hallwilersees fand erst mit dem Bau der ARA Hitzkirchertal (Moosmatten) im Jahre 1980 ihren Abschluss.

In der ARA Hochdorf wurde 1980 zusätzlich eine Flockungsfiltrationsstufe eingebaut (Abb. 4), um die Phosphoreliminationsleistung aus dem Abwasser noch zu vergrössern (BOLLER et al. 1981).

Von 1965 bis 1980 erfolgte eine Intensivierung der Landwirtschaft und eine Erhöhung der Tierbestände, vor allem mit Schweinen. Diese intensive Landwirtschaft mit hohen Tierbeständen führte zu einer Überdüngung der Böden und zu einem erhöhten Austrag von Düngestoffen wie Phosphor

Tab. 2: Ursachen und Wirkungen erhöhter Phosphorzufuhren in einen See

Düngestoffe aus Abwässern innerhalb und ausserhalb der Siedlungsgebiete

- Ungereinigte häusliche, industrielle und gewerbliche Abwässer
- Gereinigte Abwässer aus Kläranlagen
- Entwässerungen von Strassen und Plätzen
- Einleitungen aus Hochwasserentlastungen und Regenklärbecken

Düngestoffe aus der Landwirtschaft

- Zu hoher Hofdüngeranfall wegen zu hohen Tierbeständen
- Überdüngte und verdichtete Böden
- Hofdüngeraustrag zu ungeeigneter Zeit, Güllenunfälle
- Erosion, Abschwemmung und Auswaschung von Düngestoffen
- Einleitungen über Drainagen und Kurzschlüsse

↘ ↙

Erhöhte Phosphorzufuhr in den See

↓

Erhöhte Algenproduktion

↙ ↑ ↘

In den oberen Wasserschichten (Epilimnion: 0–15 m)

- Erhöhte Photosynthese und Algenproduktion
- Gefährdung der Fische durch Gasübersättigung (Gasblasensyndrom bei Felchenbrütlingen) oder durch toxische Algen
- Hohe pH-Werte
- Starke Trübung und Verfärbung des Wassers durch Algen
- Abnahme der Sichttiefen
- Abnahme der Unterwasserpflanzen infolge Lichtmangels, Schilfrückgang
- Beeinträchtigung der Wassernutzungen (Badequalität, Fischertrag)
- Verarmung der Flora und Fauna

In den tieferen Wasserschichten (Hypolimnion: 15 m bis Seegrund)

- Hoher Sauerstoffbedarf für den Abbau der produzierten Biomasse im Tiefenwasser
- Auftreten von reduzierten Substanzen und giftigen Stoffwechselprodukten wie Methan, Schwefelwasserstoff, Ammonium, Eisen, Mangan und Nitrit
- Zunahme der Dichteschichtung im Tiefenwasser und als Folge davon verminderte Winterzirkulation
- Vermehrte Phosphorrücklösung aus den Sedimenten und Eigendüngung des Sees
- Beeinträchtigung von Wasserentnahmen (Trinkwasser)
- Einengung des Lebensraumes von sauerstoffbedürftigen Tieren

und Stickstoff in die Gewässer. Neben der Eutrophierung der Seen mit Phosphor erfolgte eine starke Anreicherung von Nitrat im Grundwasser und im Quellwasser (AfU 2001b).

Im Zeitraum von 1960 bis 2000 nahm auch die Bevölkerung im Einzugsgebiet des Baldeggersees von 9 100 auf 15 000 Einwohner zu. Die Bevölkerungsentwicklung, die Produktionserhöhungen in den Lebensmittelindustrien und die Intensivierung der Landwirtschaft mit einer Zunahme der Tierbestände erfolgten weiterhin ohne Berücksichtigung der Belastungsgrenzen der Gewässer.

Zustand des Baldeggersees um 1980, vor den seeinternen Eingriffen

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, wurden in verschiedenen Seen des Kantons Luzern um 1980 hohe Phosphorkonzentrationen im Frühjahr nach der Winterzirkulation gemessen. Mit Ausnahme des Vierwaldstättersees waren alle Seen stark überdüngt. Baldeggersee, Hallwilersee und Sempachersee waren öfters von unästhetischen Algenteppichen überzogen. Einige Male machten Fischsterben Schlagzeilen. Sowohl die Trinkwassergewinnung als auch die Badewasserqualität der Seen waren beeinträchtigt (Abb. 6–9).

Durch die Anwendung des Pflanzenbehandlungsmittels Atrazin im Maisanbau und durch das Spritzen von Bahngeleisen der SBB lagen die Atrazingehalte im Sempacher- und Baldeggersee bis viermal über dem Grenzwert für Trinkwasser von 0,1 Mikrogramm pro Liter.

Natürlicherweise sind Seen nährstoffarm. Phosphor ist in so niederen Konzentrationen vorhanden, dass er als Minimumstoff das Wachstum der mikroskopisch kleinen Algen begrenzt. Alle anderen Nährstoffe sind im Vergleich dazu im Überfluss verfüg-

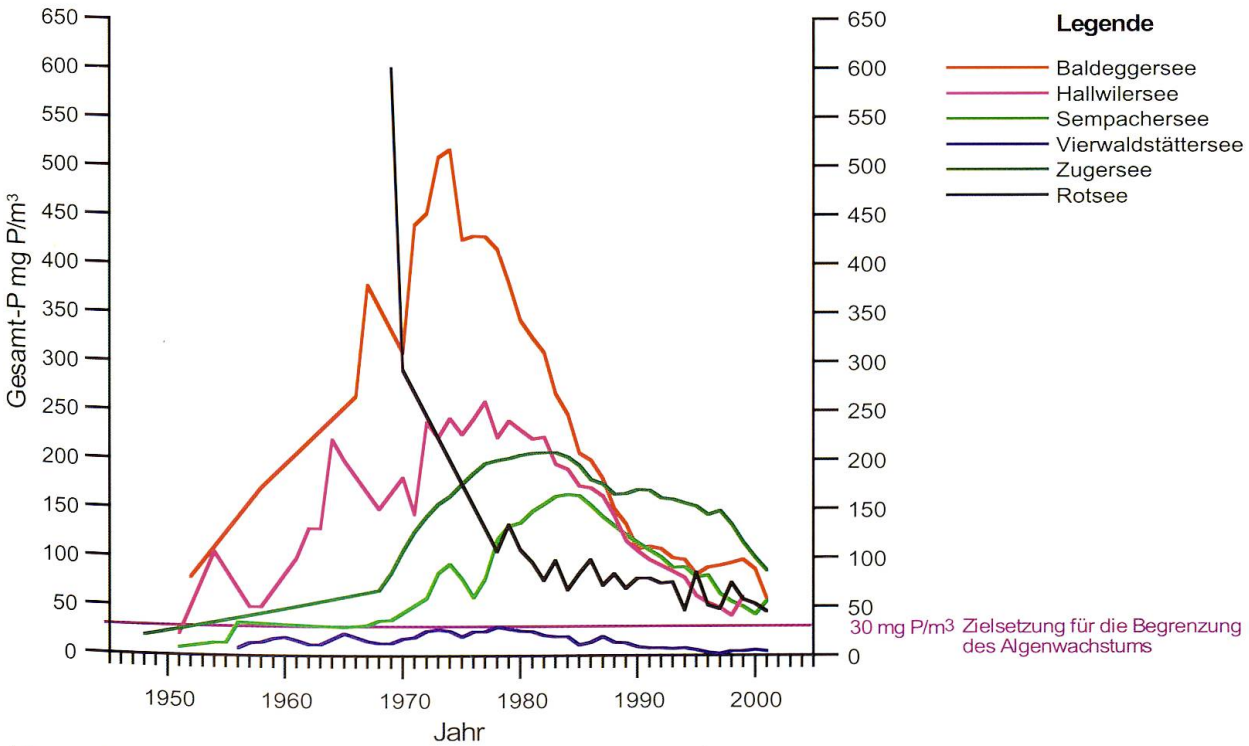


Abb. 5: Phosphorkonzentrationen im Baldegger-, Hallwiler-, Sempacher-, Vierwaldstätter-, Zuger- und Rotsee von 1950 bis 2001, jeweils im Frühjahr gemessen.

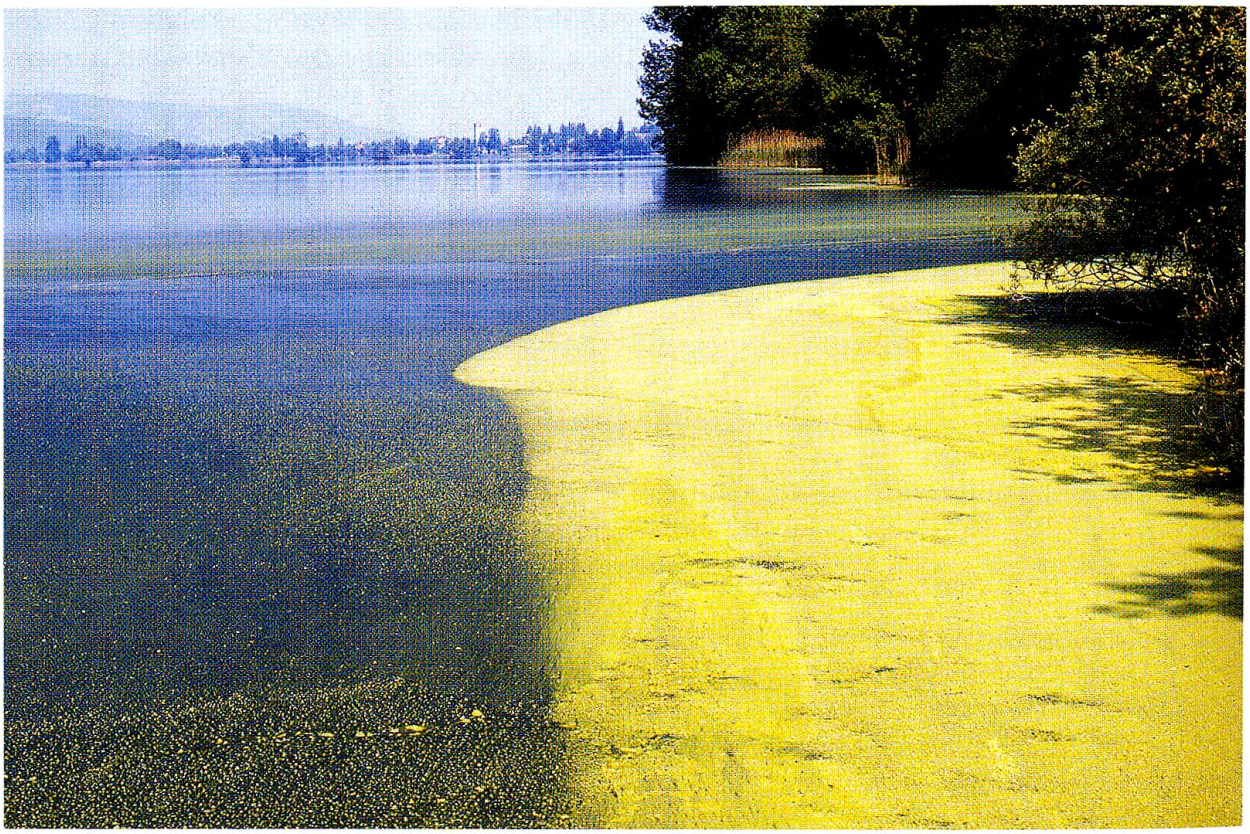


Abb. 6: Blüte von Grünalgen im Mai 1982.

Abb. 7: Blüte von Burgunderblutalgen *(Planktothrix rubescens)* im März 1988.

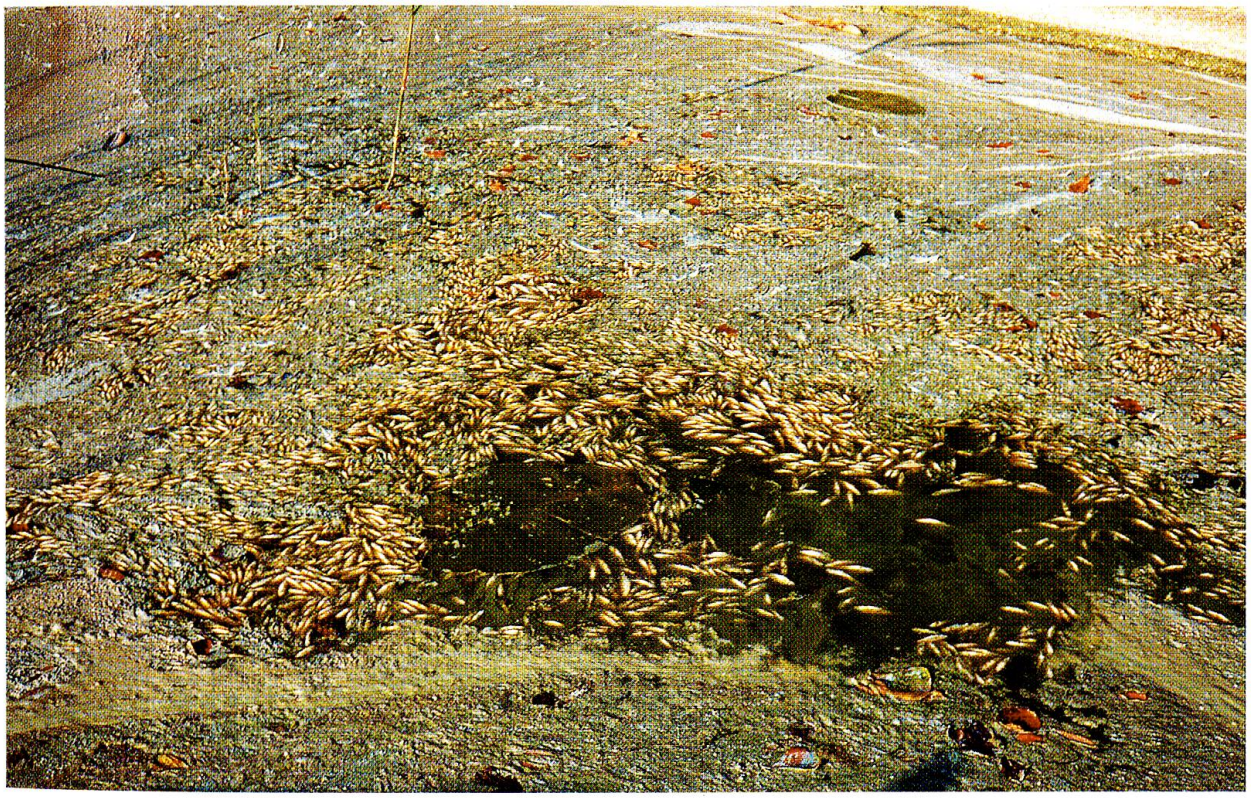


Abb. 8: Fischsterben durch toxische Blaualgen *(Microcystis sp.)* am 23. August 1978: Brachsmenjungfische (0^+).

Abb. 9: Felchenbrütlinge mit Gasblasensyndrom vom 11. Mai 1986.

Tab. 3: Vergleich der Zustände des Baldeggersees vor der Sanierung (1974/75) und nach seeinternen Massnahmen (1984/85 und 1995/99) mit den gesetzlichen Anforderungen gemäss der Verordnung über Abwassereinleitungen vom 8. Dezember 1975 und der neuen Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998

Gesetzliche Qualitätsanforderungen	1975/1976 ohne künstliche Belüftung	1984/1985 mit künstlicher Belüftung	1995/1999 mit künstlicher Belüftung
Höchstens eine mittlere Algenproduktion: Algenproduktion kleiner als 200 g C pro m^2 und Jahr	420 g C/m^2 und Jahr	390 g C/m^2 und Jahr	—
Minimale Sauerstoffkonzentration: überall und jederzeit mindestens 4 mg O_2 pro Liter	im Herbst: unterhalb 10 m kein Sauerstoff im Winter: unterhalb von 25 m weniger als 4 mg O_2/l keine Zirkulation	im Herbst: bis auf 65 m Sauerstoff im Winter: überall mehr als 8 mg O_2/l Vollzirkulation	im Herbst: bis auf 65 m Sauerstoff im Winter: überall mehr als 8 mg O_2/l Vollzirkulation
Maximale Phosphorkonzentration im See im Frühjahr: weniger als 30 mg P_{Gesamt} pro m^3	450 mg P_{Gesamt}/m^3	200 mg P_{Gesamt}/m^3	90 mg P_{Gesamt}/m^3
Maximale Phosphorzufuhr, um die Algenproduktion zu begrenzen: weniger als 4 Tonnen P_{Gesamt} pro Jahr weniger als 2 Tonnen $P_{gelöst}$ pro Jahr	11,5 Tonnen P_{Gesamt}/Jahr 8,4 Tonnen $P_{gelöst}$/Jahr	21,1 Tonnen P_{Gesamt}/Jahr 8,4 Tonnen $P_{gelöst}$/Jahr	14,4 Tonnen P_{Gesamt}/Jahr 4,6 Tonnen $P_{gelöst}$/Jahr
Minimale Sichttiefe: mindestens 3 m	0,8 m	1,2 m	1,4 m
Gelöster organischer Kohlenstoff: weniger als 2–3 mg DOC pro Liter	—	3,5 mg C/l	3,1 mg C/l
Atrazin: weniger als 0,1 Mikrogramm pro Liter	—	0,4 µg/l	0,2 µg/l

bar. Wird Phosphor dauernd nachgeliefert, vermehren sich die Algen massenhaft. Wenn die Algen ins Tiefenwasser absinken, werden sie unter Sauerstoffverbrauch bakteriell abgebaut. Je grösser die Algenproduktion im See ist, desto mehr Sauerstoff wird bei deren Abbau im Tiefenwasser aufgezehrt (Abb. 10). Ist aller Sauerstoff aufgebraucht, bilden sich giftige Fäulnisprodukte. Höhere Lebewesen wie Würmer, Insektenlarven und Fische können in diesen Wasserschichten nicht mehr existieren. Zudem wird unter sauerstofflosen Verhältnissen aus dem Seeboden eingelagerter Phosphor wieder zurückgelöst. Die Ursachen und Wirkungen der Phosphoranreicherung in den Seen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Als die Verordnung über Abwassereinleitungen am 8. Dezember 1975 in Kraft trat, war der Qualitätszustand des Baldeggersees am Tiefpunkt angelangt. Die Phosphorkonzentration lag im Frühjahr 1974 bei 520 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter, und die Algenproduktion erreichte Höchstwerte von 420 Milligramm assimiliertem Kohlenstoff (C) pro Quadratmeter Seefläche und Jahr. Ziel des qualitativen Gewässerschutzes wären nährstoffarme Seen mit weniger als 30 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter und eine jährliche Algenproduktion von weniger als 200 Gramm C/m^2.

Im Sommer war im Baldeggersee unterhalb von acht Metern und im Winter unterhalb von 25 Metern Tiefe kein Sauerstoff mehr vorhanden. Jeweils im Herbst wurden im Tiefenwasser reduzierte Substanzen wie Methangas, Schwefelwasserstoff, Ammonium sowie II-wertiges Eisen und Mangan festgestellt. Der Sauerstoffbedarf in 65 Metern Tiefe betrug für die Oxidation dieser reduzierten Substanzen im Oktober 1981 über 30 mg O_2/l (Sauerstoffdefizite siehe Abb. 11).

Hohe Algendichten führten zu minimalen Sichttiefen von 0,8 Metern, und toxische Blaualgen *(Microcystis sp.)* bewirkten im August 1978 ein Massensterben von Brachsmenjungfischen (Abb. 8).

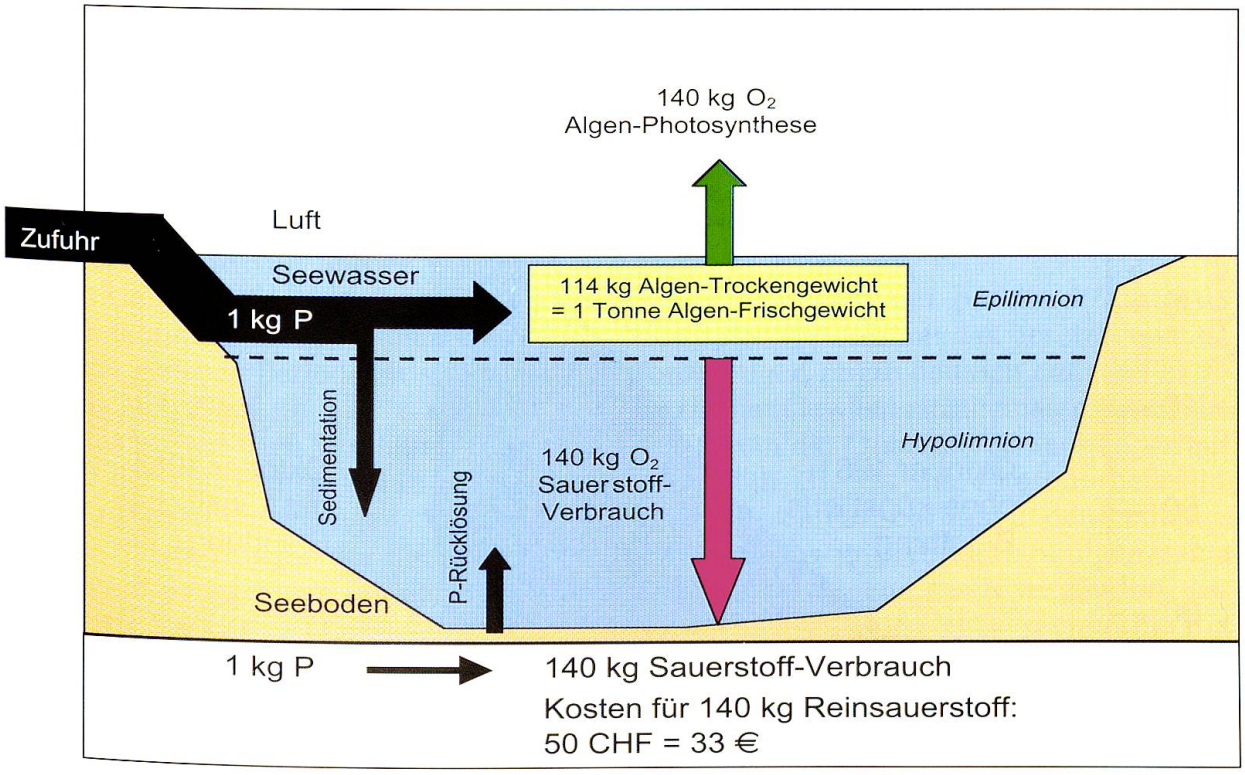


Abb. 10: Wirkung der Zufuhr von 1 kg Phosphor auf die Algenproduktion und den Sauerstoffverbrauch im Hypolimnion eines Sees.

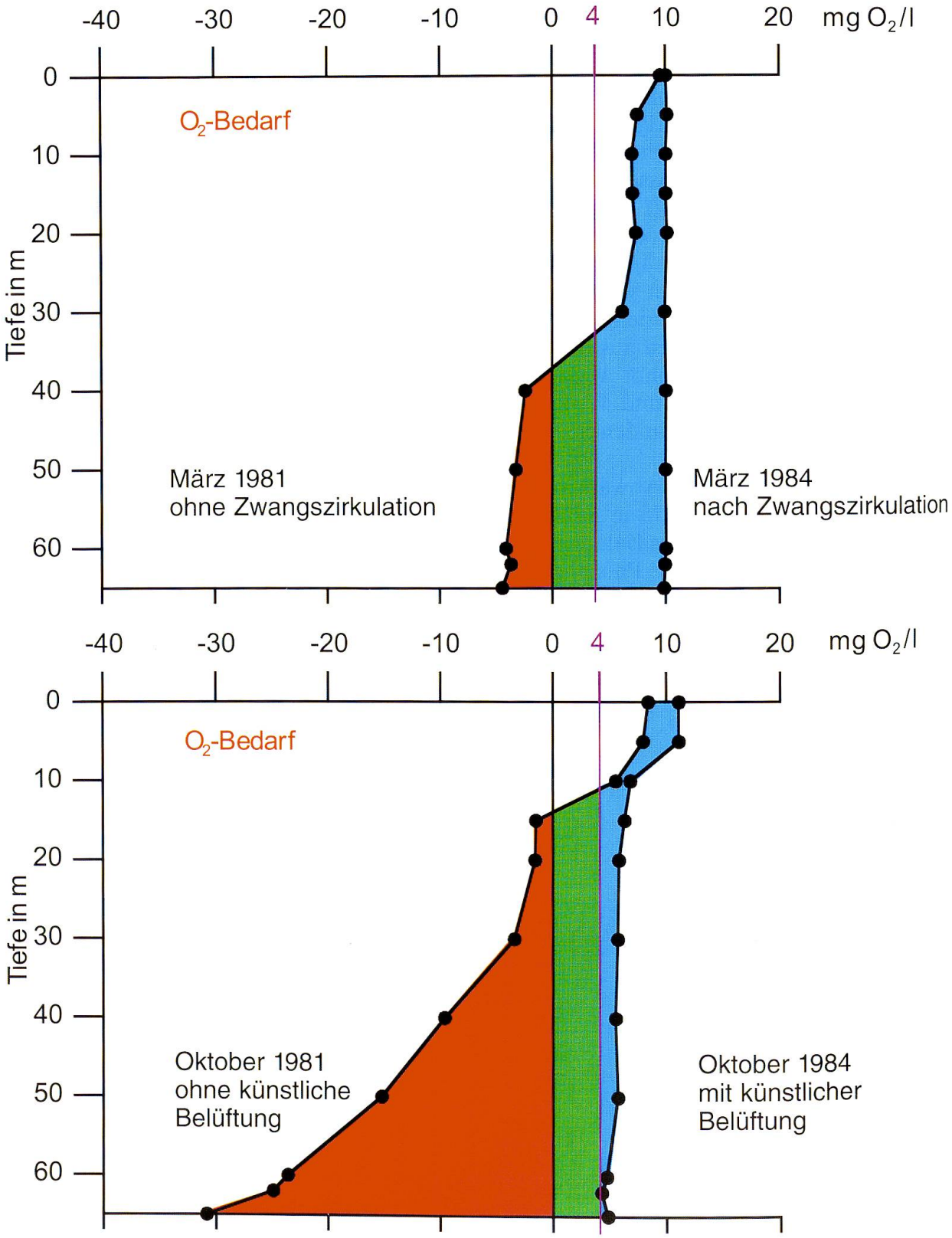


Abb. 11: Sauerstoffkonzentrationen im Baldeggersee nach der Oxidation der reduzierten Substanzen 1981 (ohne künstliche Belüftung) und 1984 (mit künstlicher Berlüftung) in mg O_2/l. Die negativen Werte bedeuten den O_2-Bedarf für die Oxidation von NO_2^-, NH_4^+, H_2S, CH_4, Fe^{2+} und Mn^{2+}.

Abbildungen 12a und 12b zeigen für die Periode 1940 bis 1981 die jeweils gemessene maximale Sauerstoffsättigung (%) und die Alkalinitätsdifferenz zwischen Winter und Sommer in mval pro Liter auf. Beide Messgrössen stellen ein indirektes Mass für die Algenproduktion dar. In dieser Zeitspanne stieg die maximale Sauerstoffsättigung von 130 Prozent bis auf 240 Prozent und die Alkalinitätsdifferenz im Epilimnion von 0,8 bis auf 2,4 mval/l. VOLLENWEIDER (1968) bezeichnete Seen mit einer Alkalinitätsdifferenz von mehr als 0,8 mval/l als polytroph.

Hohe Nährstoffkonzentrationen, starke Sonneneinstrahlung und rasche Erwärmung des Seewassers im April/Mai bewirkten hohe Photosyntheseraten der Algen und als Folge davon Sauerstoffübersättigung. Eine hohe Gesamtgas-Übersättigung kann infolge des Gasblasensyndroms zu Fischsterben führen (siehe Abbildung 12a). Die Gasblasenkrankheit wurde auch bei den künstlich eingesetzten Felchenbrütlingen jeweils im Frühling in den Jahren 1961, 1963 und von 1986 bis 1993 beobachtet (Abb. 9).

In den Abbildungen 12c und 12d sind jeweils die im Herbst gemessenen Sauerstoff-Konzentrationen in 60 Metern Tiefe und zur Charakterisierung der reduzierten Verhältnisse ebenfalls die Ammoniumkonzentrationen dargestellt. In der Periode 1940 bis 1981 herrschten jeweils im Oktober völlig anaerobe Verhältnisse vor, und es wurde in 60 Metern Tiefe kein Sauerstoff nachgewiesen. Die Ammoniumkonzentrationen schwankten in der gleichen Periode zwischen 600 bis 5 500 mg NH_4-N/m^3.

Auf die verbesserten Verhältnisse seit dem Betrieb der künstlichen Belüftung im Jahr 1982 wird später eingegangen.

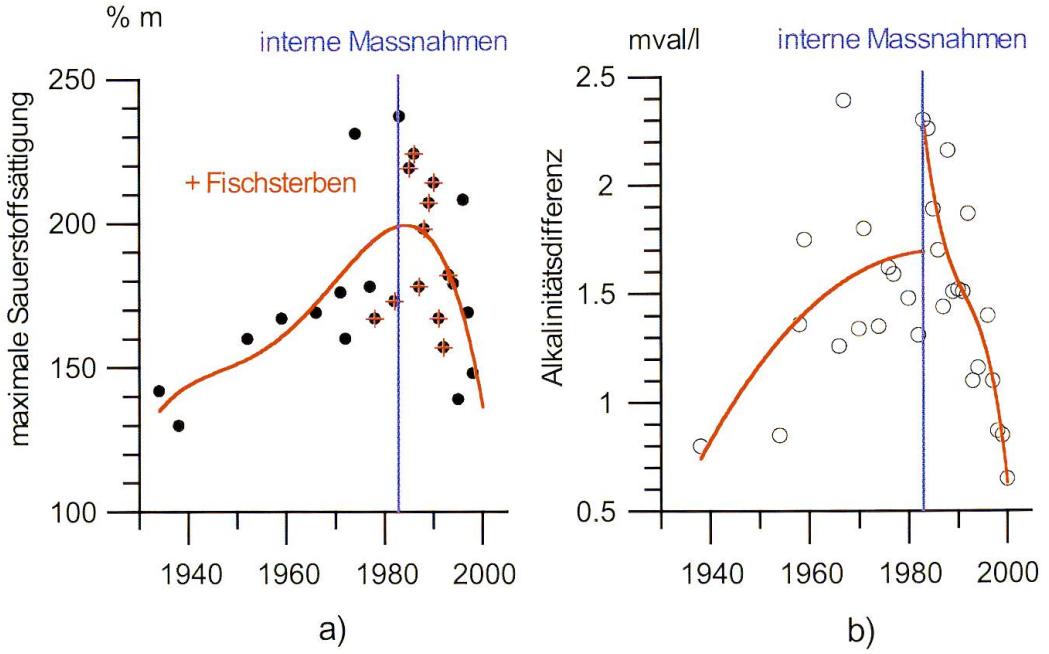
Erste Abschätzungen der Phosphorbelastung des Baldeggersees für das Jahr 1958 publizierte BACHOFEN (1960). Um eine Aufschlüsselung der Phosphorzufuhren in den Baldeggersee auf verschiedene Verursacher zu ermöglichen, wurden vom November 1975 bis November 1976 die Zuflüsse zweimal monatlich untersucht und die Phosphor- und Stickstofffrachten mit Hilfe von Abfluss-Konzentrations-Beziehungen ermittelt (LOHRI 1977).

Die jährlichen Phosphorzufuhren für das relativ trockene Jahr 1975/76 betrugen 9,6 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 8,4 Tonnen gelösten Phosphor. Diese Werte lagen bis viermal über der tolerierbaren Grenzbelastung von 4 bzw. 2 Tonnen P/Jahr (siehe Abb. 13). Rund 70 Prozent der jährlichen Phosphor-Belastung stammten damals aus gereinigten und ungereinigten Abwässern, rund 25 Prozent aus den landwirtschaftlich genutzten Böden und der Rest aus Niederschlägen direkt auf die Seeoberfläche.

SCHIESS (1976) untersuchte in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum für Limnologie der EAWAG/ETH in Kastanienbaum den Baldeggersee limnologisch und fischbiologisch vom März 1974 bis Februar 1975. Im März 1974 zirkulierte der See nur bis etwa in 30 Meter Tiefe. In den oberen Schichten wurden nicht mehr als 4 mg O_2/l gemessen und unterhalb von 35 Metern sogar weniger als 1 mg O_2/l. Am 26. August 1974 lag die Sauerstoffkonzentration in 7,5 Metern Tiefe sogar nur bei 0,3 mg O_2/l, und gleichzeitig wurden hohe fischtoxische Nitritkonzentrationen von 139 Mikrogramm NO_2-N pro Liter gemessen. Das Fäulnisgas Schwefelwasserstoff wurde bereits ab 15 Meter Tiefe nachgewiesen. In 65 Metern Tiefe betrug die Konzentration 5,2 mg H_2S/l.

Der Vergleich des prekären Zustandes des Baldeggersees mit den gesetzlichen Anforderungen zeigte deutlich auf, dass es zusätzlicher Gewässerschutzmassnahmen bedurfte, um die Qualität des Sees zu verbessern (Tab. 3). Da die Phosphorbelastung trotz grossen Fortschritten in der Siedlungsentwässerung mit Abwasserreinigungsanlagen nicht genügend rasch vermindert werden konnte, wurden auch seeinterne Eingriffe in Betracht gezogen. Die Kantone Luzern und Aargau beauftragten die EAWAG, in einem wissenschaftlichen Gutachten aufzuzeigen, wie die drei Mittellandseen Baldegger-, Hallwiler- und Sempachersee mit Hilfe von seeinternen Massnahmen saniert

Baldeggersee im Epilimnion (0–15 m)



Baldeggersee in 60 m Tiefe

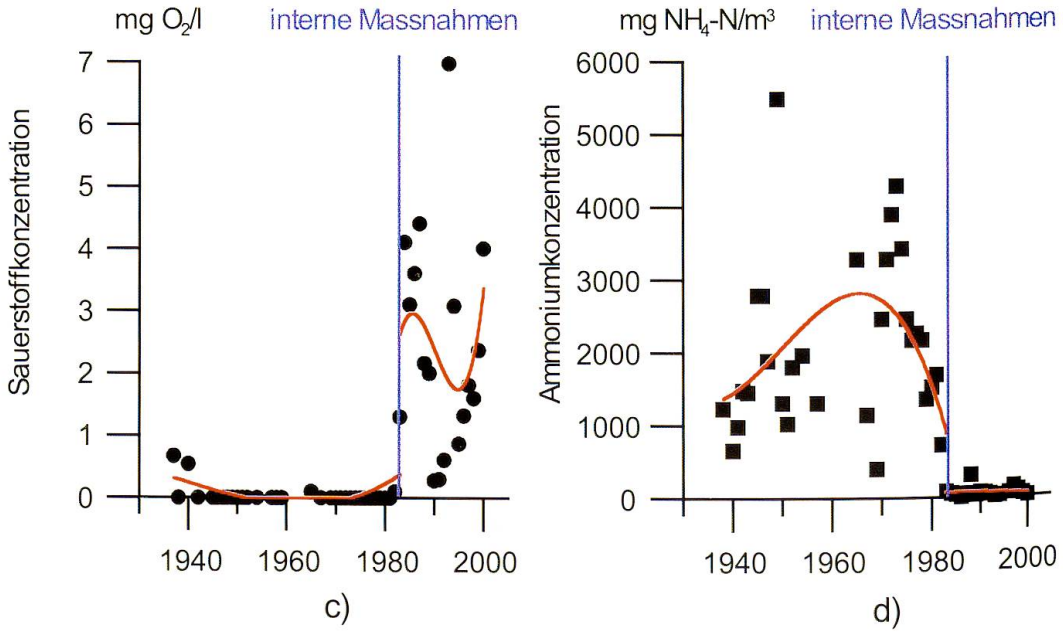


Abb. 12: a) Maximale Sauerstoffsättigung im Epilimnion; in Prozenten
b) Alkalinitätsdifferenz zwischen Winter und Sommer im Epilimnion; in mval/l
c) Sauerstoffkonzentration in 60 m Tiefe im Oktober; in mg O_2/l
d) Ammoniumkonzentration in 60 m Tiefe im Oktober; in NH_4^+-N mg/m^3

werden könnten. Die EAWAG (1979) empfahl das Verfahren der künstlichen Belüftung, bestehend aus Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser im Sommer und Zwangszirkulation im Winter. Mit Hilfe von Computermodellen der EAWAG (1979) konnten die Auswirkungen der geplanten seeinternen Massnahmen simuliert werden. Diese Seemodelle prognostizierten, dass bei einer Reduktion der im Jahr 1975/76 gemessenen Phosphorbelastungen um mindestens 50 Prozent (Abb. 13) und der künstlichen Belüftung ein gesetzeskonformer Zustand innerhalb von etwa zehn Jahren erreicht werden kann. Dabei wurde vorausgesetzt, dass bei genügend grossen Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser auch die Phosphorrücklösung aus dem Sediment unterbunden wird.

Nach der Ausschreibung eines öffentlichen Ingenieurwettbewerbes wurde das Belüftungssystem «Tanytarsus» der Ingenieurgemeinschaft Jungo und Schaffner (Zürich und Wohlen, Aargau) zur Ausführung ausgewählt.

Die Gewässerschutzfachstelle des Kantons Luzern erstellte im Jahr 1980 ein Sanierungskonzept und war damals ein Hauptakteur der Seesanierungsmassnahmen. Dieses Konzept umfasste folgende externe und seeinterne Massnahmen (Abb. 14–20):

- Aufklärung und Einbinden der Bevölkerung durch Gründung des Seesanierungs-Gemeindeverbandes Baldegger- und Hallwilersee (GVBH).
- Ursachenbekämpfung im Siedlungsgebiet durch vollständige Sammlung der Abwässer und deren Reinigung in zentralen Kläranlagen mit optimaler Phosphorfällungsstufe.
- Ursachenbekämpfung im ländlichen Raum durch Sanierung aller Abwassereinleitungen sowie Nutzungs- und Düngerbeschränkungen im Seeuferbereich.
- Ursachenbekämpfung in der Landwirtschaft zur Verhinderung der Überdüngung der Böden und des Düngestoff-Austrages in die Gewässer.
- Künstliche Belüftung der Seen mit Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser im Sommer und durch Zwangszirkulation mit Druckluft im Winter.

Zielsetzung der externen und seeinternen Gewässerschutzmassnahmen

Seesanierung beinhaltet alle Massnahmen zur Verbesserung eines Seezustandes. Das Ziel ist ein gesunder See in einem gesunden Einzugsgebiet, sowohl unter Berücksichtigung einer nachhaltigen Nutzung als auch

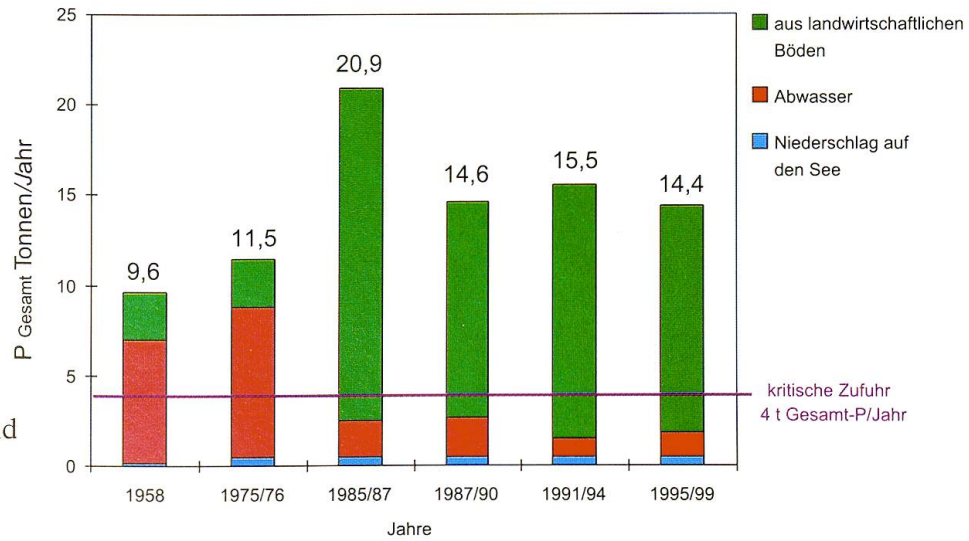


Abb. 13: Jährliche Zufuhren an Gesamtphosphor in Tonnen in den Baldeggersee und Aufschlüsselung auf verschiedene Verursacher.

Abb. 14: Abwassereinleitung im ländlichen Raum: Burgbach, April 1983.

Abb. 15: Güllen auf Schnee im März 1983, heute gesetzlich verboten.

Abb. 16: Bau von Lagervolumen für Gülle, Retschwil 1984.

zur Erreichung eines guten ökologischen Zustandes.

Die Massnahmen sollen die Belastungen eines Sees soweit vermindern, dass er zur Selbstregulation befähigt wird und eine standorttypische Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren aufkommen kann.

Externe Massnahmen

Unter seeexternen Massnahmen versteht man alle Gewässerschutzmassnahmen im ganzen Einzugsgebiet, um die Schadstoffbelastung der Gewässer zu vermindern oder um die Funktion des Wasserkreislaufes zu verbessern.

Seeinterne Massnahmen

Im Baldeggersee wurde in den Jahren 1982/83 erstmals durch die Kantone Luzern und Aargau die künstliche Belüftung erfolgreich getestet.

Im Sommer wird feinblasig Reinsauerstoff ins Tiefenwasser eingeleitet. Dadurch werden auch die untersten Schichten des Sees ausreichend mit Sauerstoff versorgt. Man musste darauf achten, dass die natürliche Temperaturschichtung im Sommer erhalten bleibt und nicht ein Nährstoffeintrag aus dem Tiefenwasser ins Epilimnion erfolgt. Weiterhin sollten im Sommer angenehme Badetemperaturen gewährleistet sein.

Im Winter wird der See mit grobblasiger Druckluft zwangszirkuliert. Die vorhandene Dichteschichtung im Tiefenwasser wird dabei zerstört (JOLLER 1985), und es kommt zu einer vollständigen Durchmischung der Wassermassen. An der Oberfläche wird das sauerstoffarme Wasser beim Kontakt mit der Atmosphäre mit Sauerstoff angereichert. Ein Vorgang, der sich natürlicherweise bei guten topografischen und klimatischen Verhältnissen im See jährlich wiederholt. Im Baldeggersee wurde die letzte natürliche Vollzirkulation vor den internen Massnahmen im Winter 1958 festgestellt (BACHOFEN 1960).

Folgende Zielsetzungen für die kombinierten externen und seeinternen Massnahmen wurden bereits vor den internen Eingriffen um 1980 vom damaligen Gewässerschutzamt formuliert:

1. Verminderung der im Jahr 1975/76 ermittelten jährlichen Phosphorzufuhren in den Baldeggersee von 11,5 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 8,3 gelöstem Phosphor um mindestens 50 Prozent innerhalb von 10 Jahren.
2. Einhaltung einer Sauerstoffkonzentration von mindestens 4 mg/l in jeder Tiefe und ganzjährig.
3. Ausweitung des Lebensraumes für sauerstoffbedürftige Wasserorganismen und Ermöglichung einer natürlichen Fortpflanzung der Fische, inbesondere der bodenlaichenden Felchen.
4. Verbesserung der Mineralisation über dem Seeboden und Erhöhung des Phosphorrückhaltes in den Sedimenten.
5. Durch die Kombination von externen und seeinternen Massnahmen eine raschere Abnahme der Phosphorkonzentrationen im See.
   Anforderung: höchstens 30 mg P/m^3, mittlere Algenproduktion, geringer Sauerstoffschwund im Tiefenwasser.
6. Sicherung und Erhöhung der Artenvielfalt von Wasserpflanzen und -tieren.
7. Einbinden der Bevölkerung in die langfristige Gesundung und nachhaltige Nutzung der Gewässer des Seetales.

Gewässerüberwachung und Reaktion des Baldeggersees

Bereits vor Beginn der künstlichen Zwangszirkulation im Jahr 1982 wurde der Baldeggersee physikalisch, chemisch und biologisch untersucht. Die verschiedenen Literaturhinweise können der Publikation von STADELMANN (1984) entnommen werden. Seit 1982 wird der Baldeggersee an der tiefsten Stelle (65 m, ein Meter über dem Grund) monatlich von der EAWAG in Auftrag des Amtes für Umweltschutz limnolo-

Tab. 4: Jährliche Phosphorfrachten aus den Zuflüssen, Abwassereinleitungen und Niederschlägen in den Baldeggersee von 1986 bis 1999 (HERZOG 2001)

	Gesamtphosphor in kg/Jahr													
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Zuflüsse gemessen	10303	9718	10401	6010	8673	7026	9688	7862	9464	9750	5135	3580	6414	16360
Resteinzugsgebiet	3772	2982	3962	2075	3843	2375	3925	3355	4242	5125	2569	1306	3576	11735
ARA Hochdorf	394	274	311	277	391	303	362	215	339	482	479	515	277	1062
Regenentlastungen in See	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
im Niederschlag auf den See	500	528	541	414	532	431	506	485	521	609	453	390	441	606
Total Zufuhr in See	15168	13702	15415	8976	13639	10335	14681	12116	14766	16166	8836	5991	10908	29963
	Gelöster Phosphor in kg/Jahr													
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Zuflüsse gemessen	3820	4208	4274	2692	3921	3488	4901	3966	4668	4431	2229	1106	1931	4526
Resteinzugsgebiet	1546	1490	1702	921	1585	1053	1661	1373	1671	1905	854	381	624	1486
ARA Hochdorf	213	135	110	120	179	80	121	84	120	146	157	80	113	777
Regenentlastungen in See	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
im Niederschlag auf den See	300	338	346	264	339	275	323	310	332	389	289	249	282	387
Total Zufuhr in See	5979	6271	6532	4097	6125	4996	7106	5833	6891	6971	3629	1916	3050	7276
	PO_4-P in kg/Jahr													
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Zuflüsse gemessen	3430	3824	3733	2252	3145	2575	3743	3173	4000	3801	1909	929	1599	3819
Resteinzugsgebiet	1305	1285	1422	714	1140	721	1135	1016	1346	1551	706	306	495	1102
ARA Hochdorf	150	101	83	90	134	60	91	63	90	110	118	60	85	583
Regenentlastungen in See	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
im Niederschlag auf den See	200	229	234	180	230	187	219	210	226	264	197	169	191	263
Total Zufuhr in See	5185	5539	5571	3336	4749	3644	5287	4562	5762	5826	3030	1564	2470	5867

partikulärer Posphor in kg/Jahr	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Zuflüsse gemessen	6483	5510	6127	3318	4751	3538	4787	3895	4796	5318	2906	2474	4483	11834
Resteinzugsgebiet	2226	1492	2260	1154	2258	1322	2264	1982	2571	3220	1715	925	2952	10249
ARA Hochdorf	181	139	201	157	212	223	241	131	219	336	322	435	164	285
Regenentlastungen in See	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
im Niederschlag auf den See	200	190	195	150	193	156	183	175	189	220	164	141	159	219
Total Zufuhr in See	9190	7431	8883	4879	7514	5339	7575	6283	7875	9194	5207	4074	7858	22687

gisch überwacht; dies auch, um die Betriebsweise und den Sauerstoffeintrag für den See optimal und wirtschaftlich zu führen.

Ab dem 26. Februar 1982 wurde während rund zweier Monate die Zwangszirkulation im Baldeggersee erstmals in Betrieb gesetzt. Sie erfolgte mittels grobblasigem Druckluftteintrag über sechs Düsen im See. Schon nach zwei Wochen konnte eine gleichmässige Temperatur- und Sauerstoffverteilung bis auf 65 Meter Tiefe erreicht werden. Erstmals seit 1958 wurden im Winter bis über den Seegrund mehr als 4 mg O_2/l gemessen, und der Baldeggersee durchmischte sich vollständig (Abb. 19).

In der Sommerperiode 1982 wurden die Diffusoren für den Sauerstoffeintrag technisch ausgetestet. Ab Mitte November 1982 bis Mitte April 1983 erfolgte die zweite Zwangszirkulation mit Druckluft. Im März 1983 konnte man bereits über das ganze Tiefenprofil 9 mg O_2/l messen. Seitdem wird der Baldeggersee jeden Winter zur Vollzirkulation gebracht. Vom Mai bis November 1983 wurden über Diffusoren an sechs Stellen feinblasig insgesamt 740 Tonnen Reinsauerstoff eingetragen (Abb. 20). Im Jahr 1984 wurde mit rund 500 Tonnen Reinsauerstoff bereits routinemässig gefahren.

Der Vergleich der Sauerstoffprofile in Abbildung 11 vom Oktober 1981 mit demjenigen vom Oktober 1984 zeigt auf, dass dank des künstlichen Sauerstoffeintrages auch in grossen Tiefen mindestens 4 mg O_2/l vorhanden waren. Der hohe Sauerstoffbedarf, bedingt durch reduzierte chemische Verbindungen wie CH_4, H_2S, NH_4^+, Fe^{2+} und Mn^{2+}, trat seit der künstlichen Belüftung nicht mehr auf.

Die Wirkung der künstlichen Belüftung auf die Sauerstoffverhältnisse im Frühjahr (März) und Herbst (Oktober) ist in der Abbildung 21 mit Hilfe der mittleren Sauerstoffkonzentration für das Wasservolumen 15 bis 65 Meter dargestellt. Die Abbildung 21 zeigt auch auf, dass sowohl die Zwangszirkulation als auch der Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser gut funktionieren und sogar im Herbst in jeder Tiefe mindestens 4 mg

Abb. 17: Informationstafeln an der Landstation Retschwil über Zwangszirkulation im Winter und Tiefenwasserbelüftung im Sommer.

Abb. 18: Bau der seeinternen Anlagen im Baldeggersee, Januar 1982.

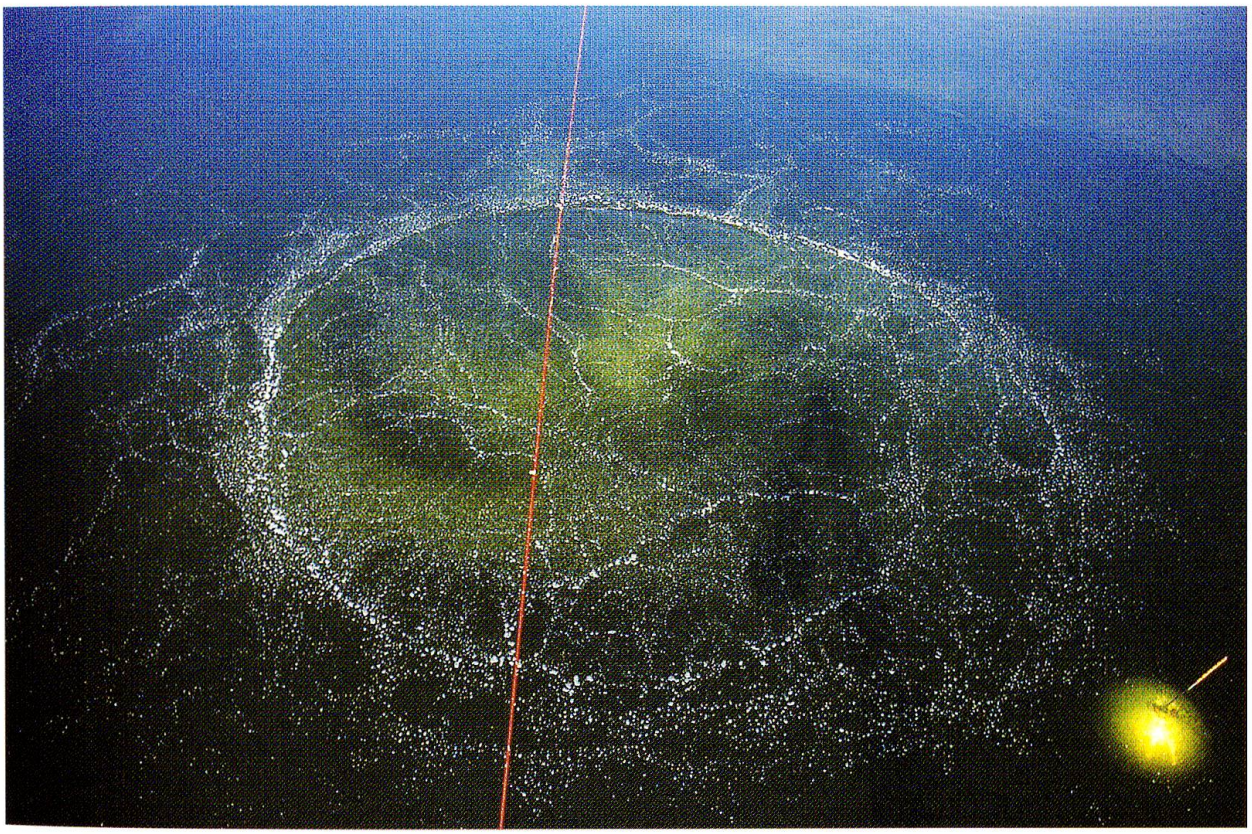


Abb. 19: Erste Zwangszirkulation des Baldeggersees im Winter 1982.

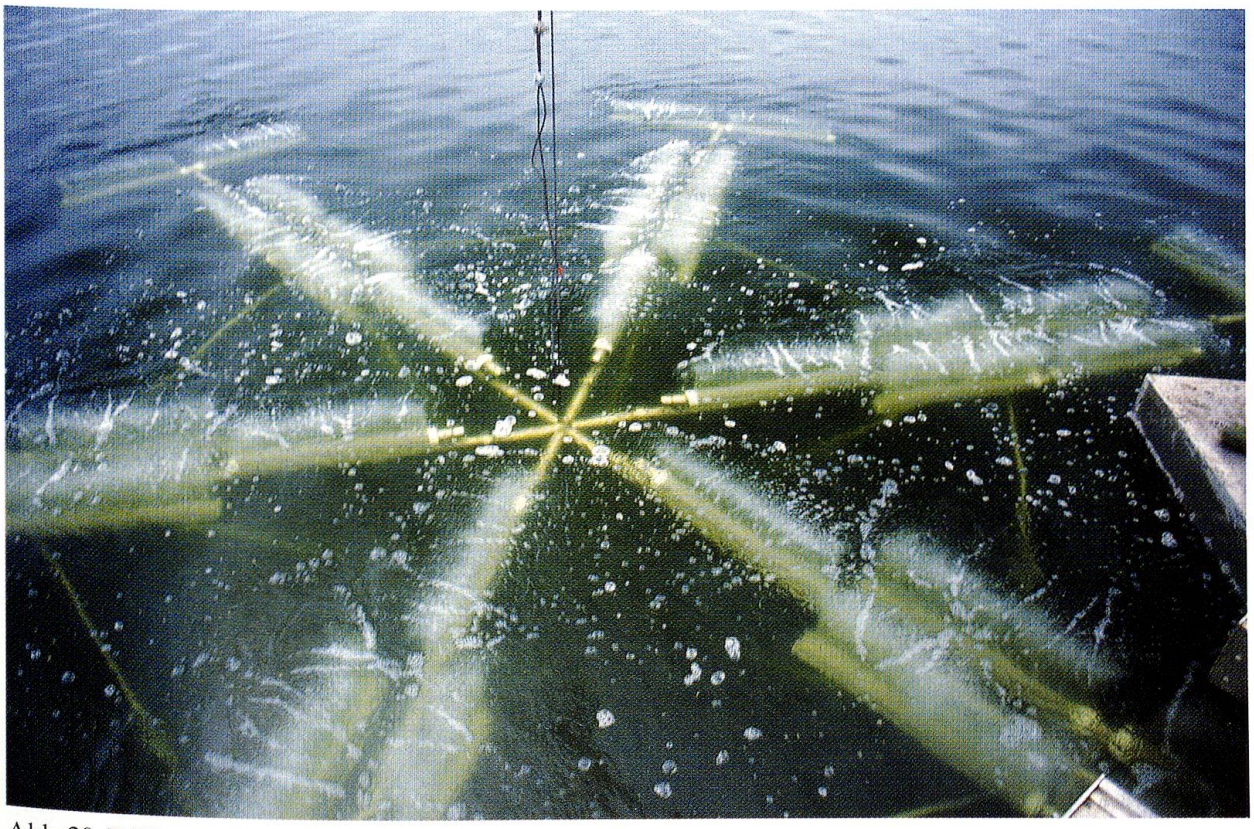


Abb. 20: Diffusor für feinblasige Tiefenwasserbelüftung im Sommer.

O_2/l vorhanden waren. Die Analysemethoden haben sich seit den 1930er-Jahren zwar verändert, aber die Vergleichbarkeit der Resultate ist über diese Zeitreihe gewährleistet. Verglichen mit den Messungen der Jahre 1934 bis 1981 werden heute im Winter und im Herbst deutlich höhere Sauerstoffwerte erreicht. Nur in den Jahren 1990 bis 1992 lagen im Herbst die mittleren Sauerstoffkonzentrationen unter 2 mg O_2/l. Dies war bedingt durch Bakterienbeläge an den Diffusoren und damit verbunden die Bildung von grossen Sauerstoffblasen, die ins Epilimnion entwichen. Seit 1993 werden die Diffusoren periodisch gereinigt, was wieder zu höheren Sauerstoffwerten führte.

In der Abbildung 22 ist die Temperaturverteilung der Jahre 1974 und 1975 – noch ohne interne Eingriffe – an der tiefsten Stelle des Baldeggersees in Form von Isoplethen dargestellt. Wegen der windgeschützten Lage und der Dichteschichtung durchmischte sich früher der Baldeggersee im Winter selten vollständig. Im Frühling kommt es jeweils rasch zu einer markanten Temperaturschichtung. Im Sommer liegt die Thermokline (Temperatursprungschicht) in 5 bis 10 Metern Tiefe. An der Oberfläche werden im Sommer bis zu 25° C (gute Badetemperaturen) gemessen, während in den tieferen Schichten die Temperatur selten über 5° C steigt.

Der Vergleich mit den monatlichen Temperaturprofilen der Jahre 1985/86 in Abbildung 22 zeigt deutlich auf, dass seit dem Betrieb der seeinternen Anlagen der Baldeggersee im Winter Homothermie mit Vollzirkulation aufweist. Im Sommer werden ähnliche Temperaturen wie vor den seeinternen Eingriffen gemessen. Die natürliche Temperaturschichtung, wie sie je nach klimatischen Verhältnissen auftritt, wurde somit durch den Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser nicht verändert. Physikalische Messungen und Versuche mit Markierstoffen zeigten auf, dass durch den Sauerstoffeintrag über die Diffusoren kein Wasser- bzw. Nährstofftransport ins Epilimnion erfolgt (WÜEST et al. 1992).

Die Abbildung 23a zeigt die monatlichen Sauerstoffinhalte für das gesamte Seevolumen (bis 65 m) und für das Volumen des Hypolimnions (15 bis 65 m). Gleichzeitig ist auch der jeweilige jährliche Sauerstoffeintrag im Sommerhalbjahr in Tonnen aufgelistet. Dieser beträgt in neuerer Zeit etwa 400 bis 500 Tonnen O_2 im Sommerhalbjahr. Verglichen mit den Jahren 1980/81 liegt seit der künstlichen Belüftung der Sauerstoffinhalt wesentlich höher. Dank der Zwangszirkulation beginnt das Seejahr im Frühling mit einem Vorrat von 1600 bis 2200 Tonnen Sauerstoff im Hypolimnion. Wegen der Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser werden jeweils die minimalen Werte im Oktober/November gemessen.

Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration in 65 Metern Tiefe vor und nach internen Eingriffen verdeutlicht die gute Wirkung der künstlichen Belüftung (Abb. 23b).

Erfreulich ist die stetige Abnahme des Phosphorinhaltes im Seevolumen zwischen 15 bis 65 Metern Tiefe. Die im Spätherbst festgestellte Phosphorakkumulation macht deutlich, dass jeweils durch Sedimentation und Phosphorrücklösung der Phosphorinhalt ansteigt. Die Spitzen haben mit der Phosphorabnahme im See ebenfalls abgenommen und die Phosphorakkumulation im Hypolimnion ist heute geringer als in den 1970er-Jahren (Abb. 23c).

Um die Belastung der Seen mit Düngestoffen, vor allem Phosphor und Stickstoff, aus punktuellen und diffusen Quellen zu erfassen und Bilanzen dieser Stoffflüsse zu erstellen, werden die Zuflüsse und der Abfluss, aber auch die Kläranlagen-Abläufe und die Niederschläge direkt auf die Seefläche seit 1985 systematisch untersucht (Abb. 24). Diese langfristigen Zuflussuntersuchungen stellen eine direkte Kontrolle der externen Gewässerschutzmassnahmen sicher. Für die Periode 1995 bis 1999 wurde kürzlich die neueste Auswertung veröffentlicht (HERZOG 2001).

Um den Gesamtphosphoreintrag in den Baldeggersee ermitteln zu können, sind zu den bodenbürtigen Phosphorfrachten auch

diejenigen aus der ARA Hochdorf sowie aus Regenüberläufen zu addieren. Ebenso sind die Phosphorfrachten aus Niederschlägen direkt auf den See zu berücksichtigen. In der Tabelle 4 sind für die Perioden 1986 bis 1999 die jährlichen Frachten für verschiedene Phosphorkomponenten aufgelistet. Noch immer werden die für die Gesundung des Baldeggersees kritischen Belastungen von 3,6 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 1,8 Tonnen gelöstem Phosphor pro Jahr deutlich überschritten. Für die Periode 1995 bis 1999 betrugen die mittleren Phosphorzufuhren 14,4 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 4,6 Tonnen gelöstem Phosphor pro Jahr.

Die Abbildung 25 veranschaulicht, dass die jährlichen Frachten von gelöstem Phosphor stark von den jährlichen Niederschlägen bzw. Zuflussmengen abhängen. Die Aufschlüsselung auf verschiedene Verursacher wie Landwirtschaft, Abwässer und Niederschläge direkt auf den See machen deutlich, dass heute der bodenbürtige Anteil 85 % der jährlichen Zufuhren an gelöstem Phosphor ausmacht (Periode 1995–1999).

Diskussion und Erfolgskontrolle der vor 20 Jahren gesetzten Ziele

In Anlehnung an die auf Seite 135 definierten sieben Zielsetzungen wird versucht, über die Zielerreichung Auskunft zu geben.

Ziel 1: Verminderung der im Jahr 1975/76 ermittelten jährlichen Phosphorzufuhren um mindestens 50 % – nicht erreicht

Die jährlichen Phosphorzufuhren in der letzten Untersuchungsperiode 1995 bis 1999 ergeben immer noch eine hohe Belastung von 14,4 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 4,6 Tonnen gelöstem Phosphor pro Jahr. Der bodenbürtige Anteil (Landwirtschaft) macht

Tab. 5: Jährliche Zufuhr und Export über den Seeabfluss in kg P/Jahr, Zufuhr minus Export ergibt den Phosphorrückhalt (ohne Berücksichtigung der Phosphorinhaltsänderung im See)

	Phosphorbilanz Baldeggersee 1986–1999 Gesamtphosphor in kg/Jahr			
Jahr	Eintrag total	Export über Aabach	Rückhalt im See	%
1959 (BACHOFEN 1960)	9600	3600	6000	63 %
1976 (LOHRI 1977)	11500	6800	4700	41 %
1986	15170	6580	8590	57 %
1987	13700	5630	8070	59 %
1988	15410	4540	10870	71 %
1989	8980	2450	6530	73 %
1990	13640	2670	10970	80 %
1991	10330	2680	7650	74 %
1992	14680	3700	10980	75 %
1993	12120	1900	10220	84 %
1994	14770	2950	11820	80 %
1995	16170	3220	12950	80 %
1996	8840	2150	6690	76 %
1997	5990	1540	4450	74 %
1998	10910	1860	9050	83 %
1999	29960	4280	25680	86 %

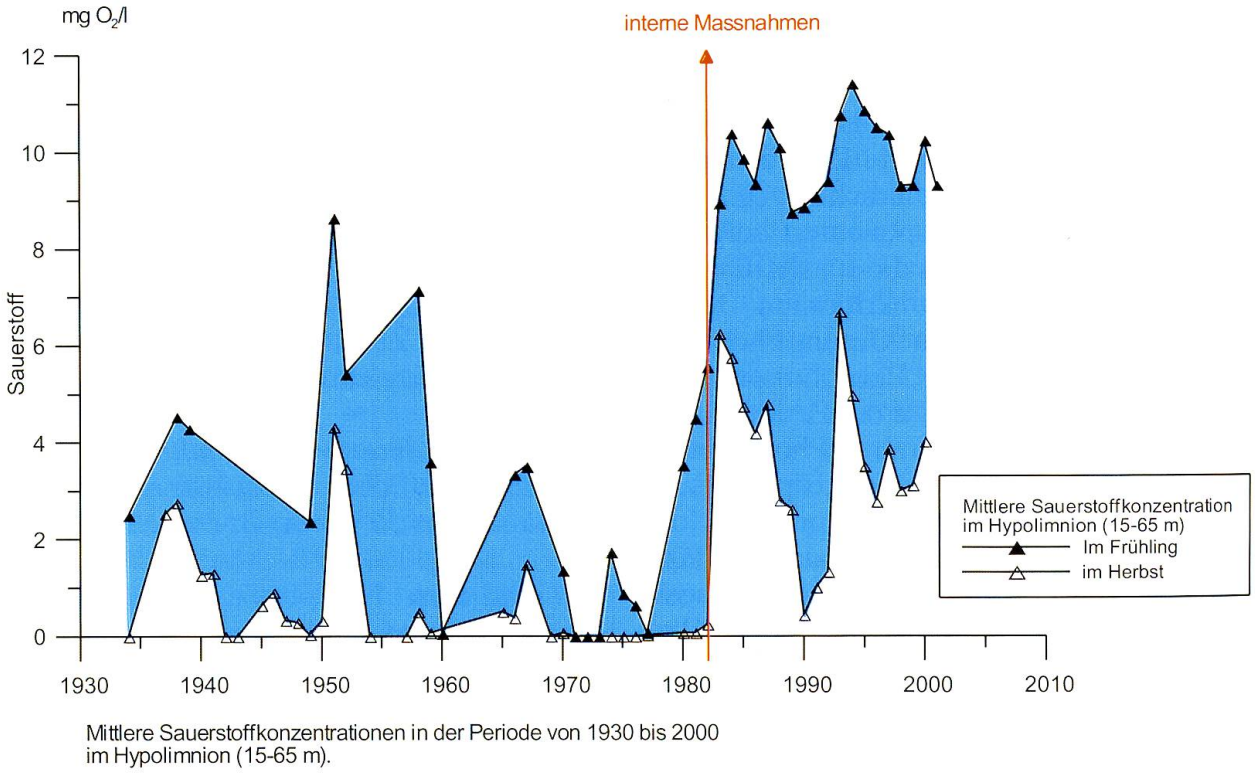


Abb. 21: Mittlere Sauerstoffkonzentration im Baldeggersee in der Periode von 1930 bis 2000 im Volumen 15 bis 65 m, jeweils im Frühling (März) und Herbst (Oktober) gemessen.

88 % für Gesamtphosphor bzw. 85 % für gelösten Phosphor aus. Dank der Abwassersanierung konnte der Abwasseranteil stark vermindert werden, aber diese Reduktion wurde durch höhere Zufuhren aus der Landwirtschaft wieder wettgemacht (Abb. 13).

Die für den Baldeggersee neu definierten kritischen Belastungen von 1,8 Tonnen gelöstem Phosphor bzw. 3,6 Tonnen Gesamtphosphor werden nicht eingehalten. Trotzdem zeigen die getroffenen externen Massnahmen vor allem in der Abwassersanierung auf, dass zumindest der Anteil an gelöstem Phosphor leicht abgenommen hat (Abb. 26). Ob die niederschlagsarmen Jahre 1996 bis 1998 und demzufolge der geringere Phosphoreintrag in die Gewässer oder bereits die getroffenen Gewässerschutzmassnahmen in der Landwirtschaft dafür verantwortlich waren, werden die künftigen Zuflussuntersuchungen aufzeigen.

Ziel 2: Einhaltung des Sauerstoffkriteriums – erreicht

Der Vergleich der Sauerstoffprofile vor internen Massnahmen in den Jahren 1958 und 1959 (BACHOFEN 1960) mit denjenigen in den Jahren 1993 und 1994 in Abbildung 27 beweist, dass mit dem künstlichen Sauerstoffeintrag im Sommer mindestens 4 mg O_2/l auch in grösseren Tiefen ganzjährig eingehalten werden können.

Da heute ähnliche Phosphorkonzentrationen im Baldeggersee wie in den 1950er-Jahren vorliegen, würde ein Abstellen der künstlichen Belüftung zu ähnlichen Sauer-

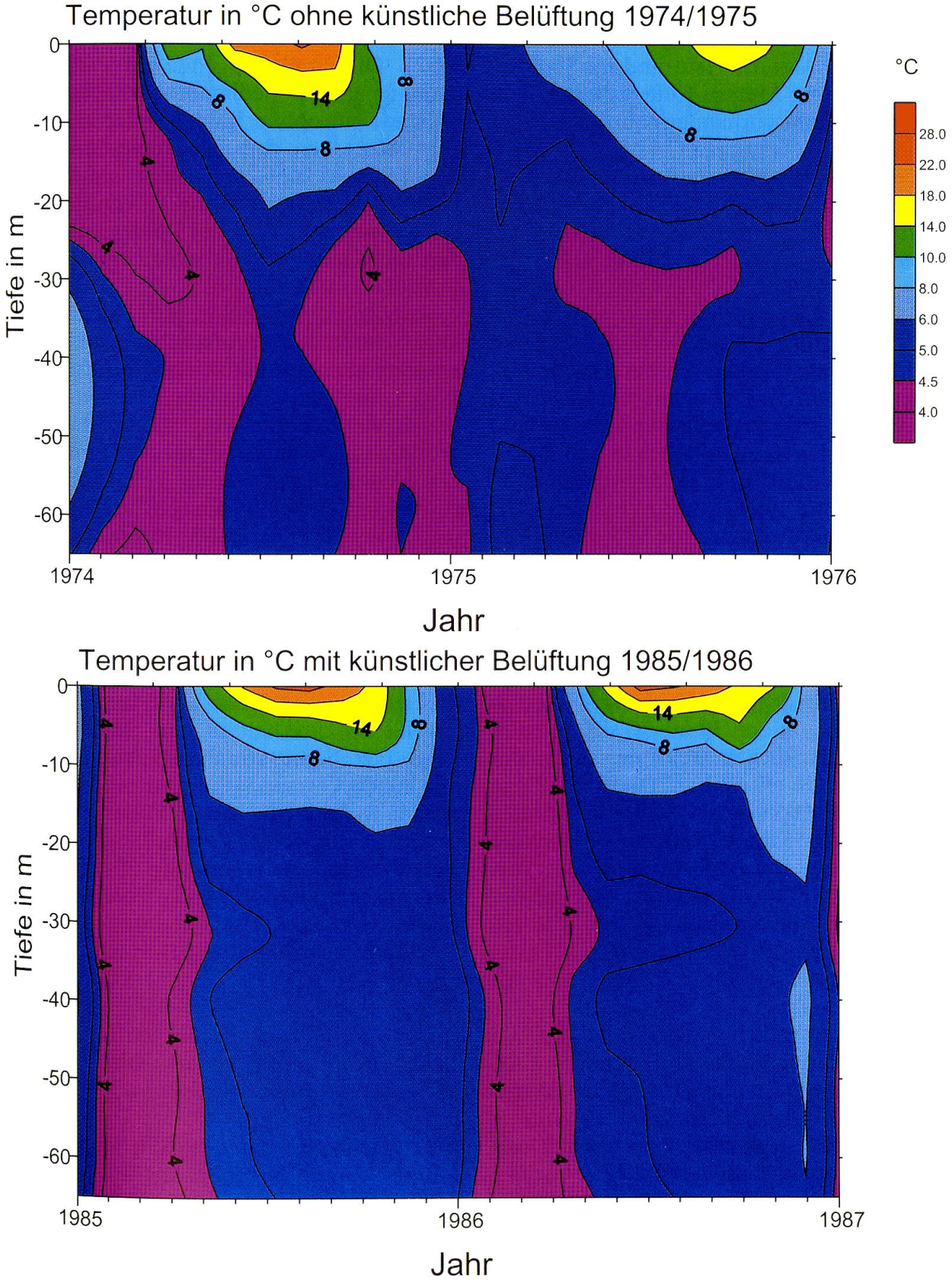


Abb. 22: Temperaturverteilung an der tiefsten Stelle des Baldeggersees ohne Belüftung (1974/1975) und mit künstlicher Belüftung (1985/1986).

stoffgehalten wie 1958/59 führen. Im Winter würde wegen fehlender Zirkulation unterhalb von 30 Metern Tiefe und im Sommer unterhalb von 8 Metern Tiefe praktisch kein Sauerstoff mehr vorhanden sein.

Ziel 3: Ausweitung des Lebensraumes für Tiere und Ermöglichung der natürlichen Fortpflanzung von Felchen – teilweise erreicht

Biologische Untersuchungen von Würmern und Insektenlarven im Seeboden können als Indikatoren für das Vorhandensein von Sauerstoff an der Sedimentoberfläche genutzt werden. Biologische Beprobungen der Sedimente des Baldeggersees in den Jahren 1989 (STÖSSEL 1989), 1994 (SPENGELER 1994 und 1995) und 1999 (BERNEGGER 2001) ergaben einen Vormarsch von Würmern (Oligochaeta) und Zuckmückenlarven (Chironomidae) bis in die grössten Tiefen. Um die Diffusorenstandorte fand SPENGELER (1994) den Schlammröhrenwurm *(Tubifex tubifex)* in Dichten von 150 bis 1050 Individuen pro Quadratmeter. Die Tiefenverteilung der Bodentiere (Benthos) sieben Jahre nach der künstlichen Belüftung ist in der Abbildung 28 erkennbar. Diese Benthos-Organismen lockern das Sediment, so dass eine bessere Mineralisation von organischem Material ermöglicht wird. Das Vordringen der Bodenfauna seit Beginn der seeinternen Massnahmen im Hallwilersee ist in der Veröffentlichung von STÖCKLI (1998) beispielhaft für die Jahre 1985 bis 1994 dargestellt.

Vor der künstlichen Belüftung war der Lebensraum für Fische im Sommer auf die obersten 8 Meter und im Winter bis auf eine Tiefe von 30 Metern beschränkt. Dank der Ausweitung des Lebensraumes werden heute Felchen bis in 40 Metern Tiefe beobachtet.

Studien im nahen, weniger eutrophen Sempachersee ergaben, dass die etwa zwei Millimeter grossen Felcheneier auf dem Seeboden nicht überleben können, weil in dieser Grenzschicht zwischen Sediment und überstehendem Wasser der Sauerstoff durch noch nicht mineralisiertes organisches Material aufgezehrt wird (MÜLLER 1992). Diese ungenügende Sauerstoffversorgung an der Sedimentoberfläche führt im stark eutrophen Baldeggersee ebenfalls zum Absterben der Felcheneier und eine Naturverlaichung kann nicht stattfinden. Dies ergaben auch Kontrollen von Felcheneiern in geringer Tiefe des Baldeggersee, die sich nicht entwickeln konnten (MÜLLER & STADELMANN 2002).

Trotz ständigem Besatz von Felchenbrütlingen durch den Berufsfischer Alois Hofer konnten auch mit künstlicher Belüftung bis 1995 keine befriedigenden Felchenerträge erzielt werden. Die eingesetzten Felchenbrütlinge starben jeweils im April und Mai. Die Ursache dafür war die hohe Algenproduktion mit hohen Sauerstoffsättigungswerten. Von 1985 bis 1993 führte dies zur Gasblasenkrankheit und zum vollständigen Verlust der eingesetzten Felchenbrütlinge (Abb. 9).

Seit 1991 füttert der Berufsfischer die Felchenbrütlinge in einer Teichanlage an, und rund 300 000 Vorsömmerlinge werden jeweils erst im Juni in den Baldeggersee ausgesetzt. Somit kann die kritische Phase mit hohen Gesamtgaskonzentrationen umgangen werden. Mit diesem Vorgehen konnte ein bescheidener Felchenfangertrag erzielt werden, wie Abbildung 29 zeigt. Die Arterhaltung der Felchen ist zumindest gesichert. Im Jahr 1995 konnte sogar ein Laichfischfang durch den Berufsfischer erfolgen (Abb. 30).

Ziel 4: Verbesserung der Mineralisation und Erhöhung des Phosphorrückhaltes im Seeboden – teilweise erreicht

Eine Annahme bei der künstlichen Seenbelüftung war, dass bei Sauerstoffkonzentrationen von mindestens 4 mg O_2/l über dem Sediment die Rücklösung von Phosphor aus dem Seeboden abnehme, das heisst der Phosphorrückhalt bzw. die Nettosedimentation zunehme (EAWAG 1979). Verschiedene Autoren postulieren aufgrund von Mes-

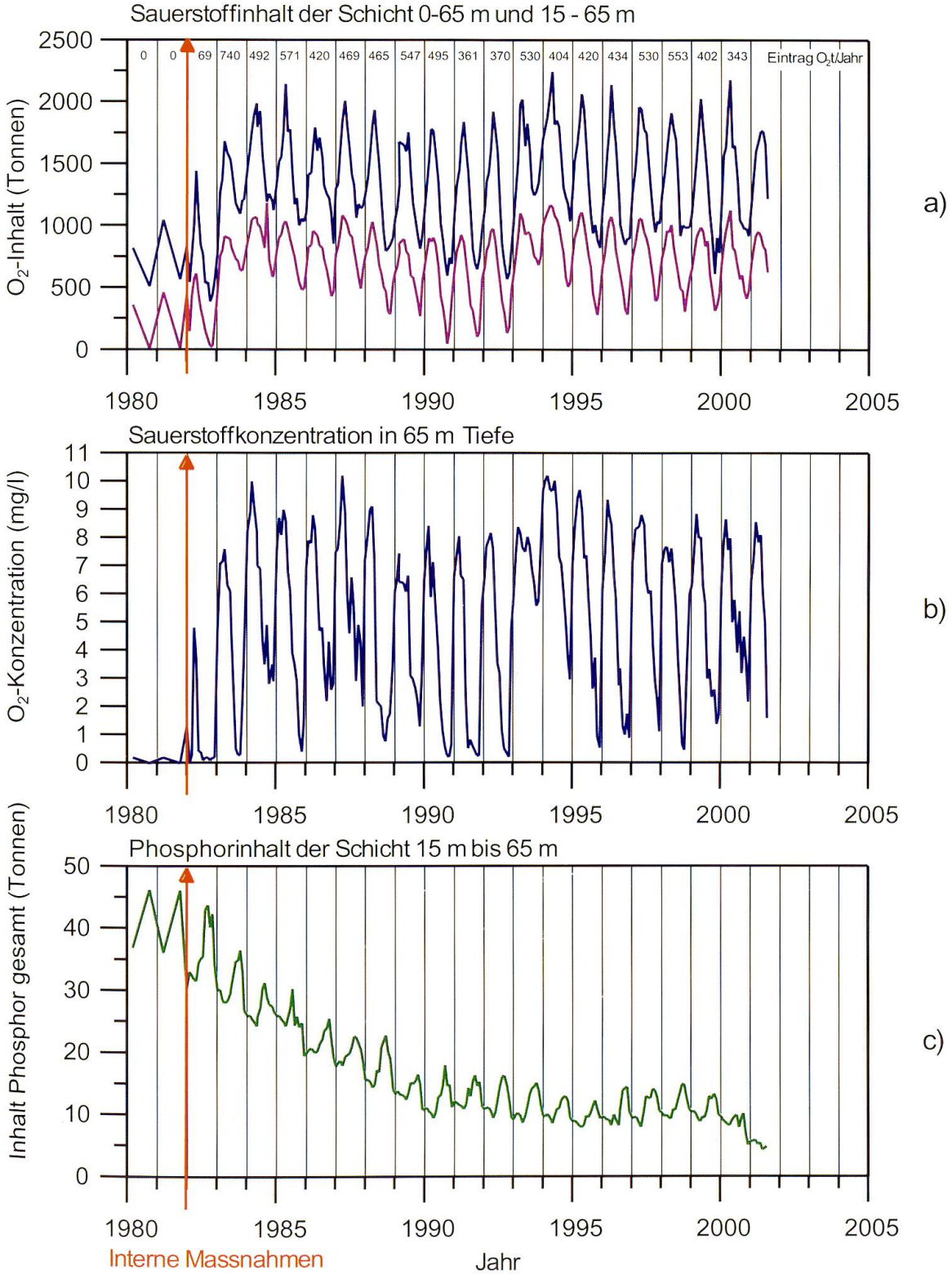


Abb. 23: Sauerstoff und Gesamtphosphor im Baldeggersee
a) Sauerstoffinhalt von 1980 bis 2001 und künstlicher Sauerstoffeintrag in Tonnen O_2 im Wasservolumen in 0–65 m (blau) und 15–65 m (violett)
b) Sauerstoffkonzentration in 65 m Tiefe vor und nach dem künstlichen Sauerstoffeintrag in mg O_2/l
c) Phosphorinhalt im Wasservolumen in 15–65 m Tiefe von 1980 bis 2001 in Tonnen P

sungen im Sediment, dass durch die künstliche Belüftung die Phosphoreinlagerung nicht erhöht wurde (GÄCHTER & WEHRLI 1998, WEHRLI & WÜEST 1996).

Abbildung 31 zeigt aber auf, dass die herbstliche Phosphorakkumulation im Hypolimnion (15–65 m) seit den seeinternen Massnahmen geringer ausfällt. Ein Vergleich des jährlichen Phosphorrückhaltes (Phosphorimport im See minus Phosphorexport über Abfluss) der langjährigen Messungen von 1986 bis 1999 mit denjenigen der Jahre 1958/59 (BACHOFEN 1960) und 1975/76 (LOHRI 1977) weist auf einen verbesserten Phosphorrückhalt hin (Tab. 5). Vor internen Eingriffen betrug der Phosphorrückhalt rund 40 bis 60 %. In den letzten sechs Jahren ermittelte HERZOG (2001) hingegen 74 bis 86 %. Nachdem der Phosphorrückhalt eine zunehmende Tendenz aufweist und die Phosphorkonzentration im Baldeggersee weiterhin abnimmt, könnte dank der künstlichen Belüftung die Phosphoreinlagerung im Sediment erhöht worden sein.

Die neuesten Untersuchungen belegen, dass durch die Bioturbation der Würmer und Insektenlarven bis in 65 Metern Tiefe eine bessere Mineralisation in den Seesedimenten stattfindet (AMBÜHL 1995, LOTTER & BIRKS 1997). Diese Bioturbation in den oberen Zentimetern (Abb. 32) führte zu einer verminderten Ablagerung von organischem Kohlenstoff und Stickstoff von 20 Prozent, beziehungsweise 15 Prozent (WEHRLI & WÜEST 1996).

Ziel 5: Raschere Abnahme der Phosphorkonzentrationen – teilweise erreicht

Die externen Gewässerschutzmassnahmen, vor allem die Abwassersanierungen mit Phosphor-Eliminationsstufen in den Kläranlagen und das seit 1986 eingeführte Phosphatverbot für Textilwaschmittel, sowie die künstliche Belüftung bewirkten eine markante Abnahme der Phosphorkonzentrationen von 520 mg P/m^3 im Jahr 1974 auf 60 mg P/m^3 im Jahr 2001 (siehe Abb. 33). Wegen der immer noch zu hohen Phosphorzufuhren in den Baldeggersee von 4,6 Tonnen gelöstem Phosphor pro Jahr konnte die Anforderung von 30 mg Gesamtphosphor/m^3 im Frühjahr auch nach 20 Jahren Gewässerschutzmassnahmen nicht erreicht werden.

In Abbildung 33 sind auch die Konzentrationen an anorganischem Stickstoff (NO_3-N und NH_4-N) im Frühjahr aufgezeichnet. Da sich die Sanierungsmassnahmen hauptsächlich auf die Verminderung der Phosphorbelastung konzentrierten, nahm der anorganische Stickstoff nicht ab. Vor internen Massnahmen lag der Stickstoff meist in der reduzierten Form als Ammonium vor. Seit der künstlichen Belüftung kommt der Stickstoff in der vollständig oxidierten Form des Nitrats vor, gegenwärtig rund 2000 mg NO_3-N/m^3. Nimmt man eine durchschnittliche Algenbiomassen-Zusammensetzung von $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ an, so war im Zeitraum von 1965 bis 1980 Stickstoff für die Algenproduktion der wachstumsbegrenzende Nährstoff. Dies förderte das Aufkommen von stickstofffixierenden Blaualgen wie *Aphanizomenon-* und *Anabaena*-Arten (BÜRGI & STADELMANN 2000). Bezogen auf die relativ hohe Stickstoffkonzentration begrenzt heute wieder Phosphor das Algenwachstum im See.

Ziel 6: Sicherung und Erhöhung der Artenvielfalt – erreicht

Mit der Phosphorabnahme und den seit 1982 betriebenen internen Massnahmen änderte sich die Zusammensetzung des Phytoplanktons (Abb. 34). In den Jahren 1959 und 1976 wurden 31 bzw. 38 Taxa bestimmt, in den letzten Jahren bis zu 84 Taxa; somit hat sich die Biodiversität der Algen erhöht (BÜRGI & STADELMANN 2000).

Die Abbildung 35 lässt erkennen, dass das Wasser des Baldeggersees klarer geworden ist und die Variation zwischen minimaler Sichttiefe (hohe Algendichte) und maximaler Sichttiefe (Leerfrass der Algen durch das Zooplankton) seit 1993 weniger ausgeprägt ist. Die minimalen Sichttiefen, die bei

hohen Algendichten auftreten, fallen heute höher aus. Doch wird die minimale Sichttiefe von drei Metern nicht eingehalten; dies war letztmals in den Jahren 1910 und 1911 der Fall (THEILER 1917).

Der klarere See ermöglicht ein besseres Vordringen der höheren Wasserpflanzen (Makrophyten) in die Flachwasserzone. Die letzte Erhebung im Jahr 1987 von LACHAVANNE et al. (1995) zeigt dies auf, aber von den früher dokumentierten 25 Arten (GAMMA 1951) waren nur noch 13 Makrophytenarten vorhanden (Abb. 36).

Die Algenbiomasse pro Quadratmeter Seefläche (0–15 m) nahm sogar teilweise zu, bedingt durch die verbesserten Lichtverhältnisse in der Wasserschicht von 0 bis 15 Metern Tiefe (BÜRGI & STADELMANN 2000). In Abbildung 37 ist das Jahresmittel der Algenbiomasse in der Schicht von 0 bis 15 Metern und die Zooplanktonbiomasse in der Schicht von 0 bis 65 Metern pro Quadratmeter dargestellt. Die Algenbiomasse variierte von 20 bis 60 Gramm Frischgewicht pro Quadratmeter, ohne dass ein deutlicher Trend ersichtlich ist. Das Zooplankton zeigte hingegen eine Abnahme von 250 auf 80 Gramm Frischgewicht pro Quadratmeter. Dies ist damit zu erklären, dass ab 1988 Blaualgen wie zum Beispiel *Planktothrix rubescens* vermehrt aufkamen. Algen fressende Kleinkrebse (*Daphnia, Bosmina* usw.) können diese langfädigen Algenarten schlecht verwerten.

Abb. 24: Abflussmengenmessstation des Mülibaches bei Retschwil. Limnigraf und Probenahmengerät für Chemie, in Betrieb seit 1985.

Die verbesserten Sauerstoffverhältnisse ermöglichten ein Vordringen von Würmern und Insektenlarven in grössere Tiefen, und wahrscheinlich wurden auch Dauerzellen von Algen und Cysten von tierischem Plankton im Sediment wieder zum Leben erweckt.

Im Baldeggersee kommen 17 Fischarten vor (MUGGLI 2000). Dank dem künstlichen Besatz mit Vorsömmerlingen aus einer Teichanlage an Land und der Ausweitung des sauerstoffhaltigen Lebensraumes konnte wieder ein Felchenbestand aufgebaut werden (Abb. 29). Weiter weist ENZ (2000) darauf hin, dass die künstliche Sauerstoffanreicherung des Tiefenwassers den Lebensraum für Fische und Bodentiere im Hallwilersee wesentlich vergrössert hat.

Die Abbildung 11 zeigt auf, dass aufgrund der niedrigeren gemessenen maximalen Sauerstoffsättigung und der Abnahme der Alkalinitätsdifferenzen zwischen Frühjahr und Sommer die maximalen Algenproduktionsraten heute geringer ausfallen. Gasübersättigungen führten seit 1994 zu keinem Felchenbrütlingssterben mehr.

Die stark gefährdete Seeforelle wandert in geeignete Zuflüsse wieder zum Laichen hinauf. Sie wurde zum Beispiel im Stägbach (MUGGLI 1997), in der Ron bei Hochdorf (ESCHER et al. 2002) und im Seeabfluss (Aabach) beobachtet.

Ziel 7: Einbinden der Bevölkerung in den Schutz der Gewässer des Seetals – erreicht

Nachdem die seeinternen Anlagen unter der Projektleitung des Kantons ausgetestet wurden, kam es 1984 zur Gründung des Gemeindeverbandes Baldegger- und Hallwilersee (GVBH), vor allem um die seeinternen Anlagen zu betreiben. Ihm gehören alle 19 luzernischen Gemeinden im Einzugsgebiet der beiden Seen an.

Das Vorgehenskonzept von 1980 wurde im Jahre 1994 aufgrund einer Situationsanalyse (AfU 1993) und der 10-jährigen Erfahrungen mit der Seesanierung durch ein neues «Konzept zur Gesundung und Nutzung der Gewässer des Seetals» ergänzt. Diese neue Ausrichtung wurde in der Bro-

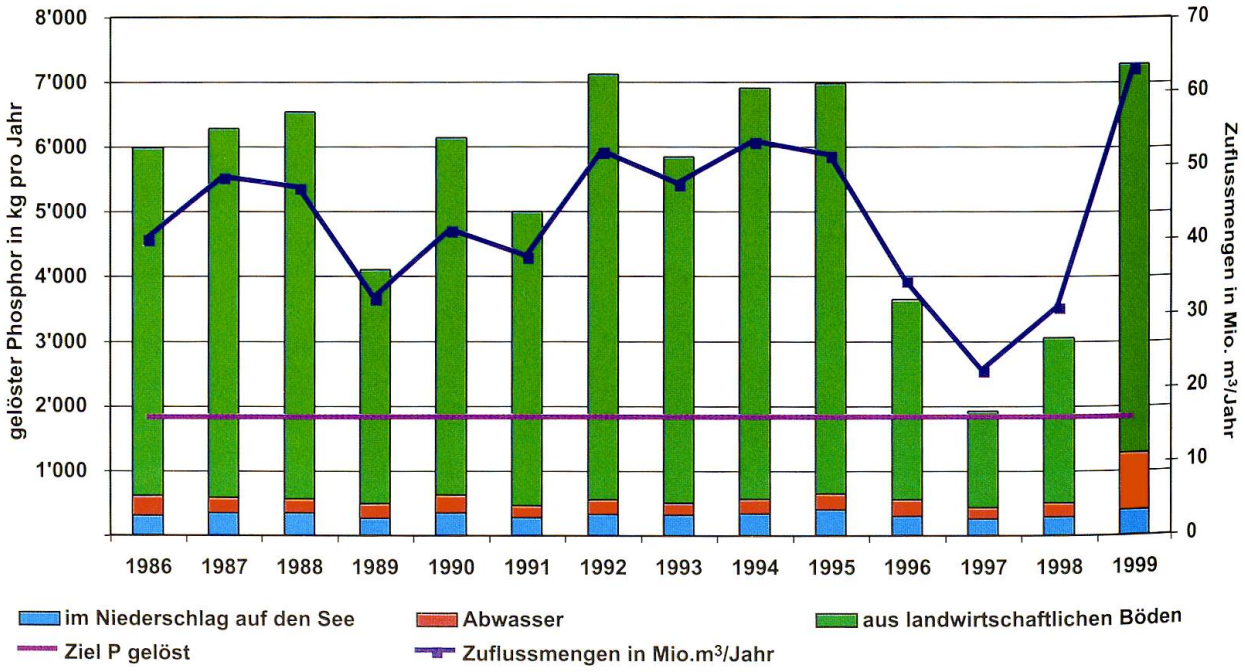


Abb. 25: Jährliche Zufuhren an gelöstem Phosphor in Kilogramm in den Baldeggersee von 1986 bis 1999, aufgeschlüsselt auf verschiedene Verursacher (HERZOG 2001). Der Zielwert beträgt maximal 1800 kg gelöster Phosphor pro Jahr.

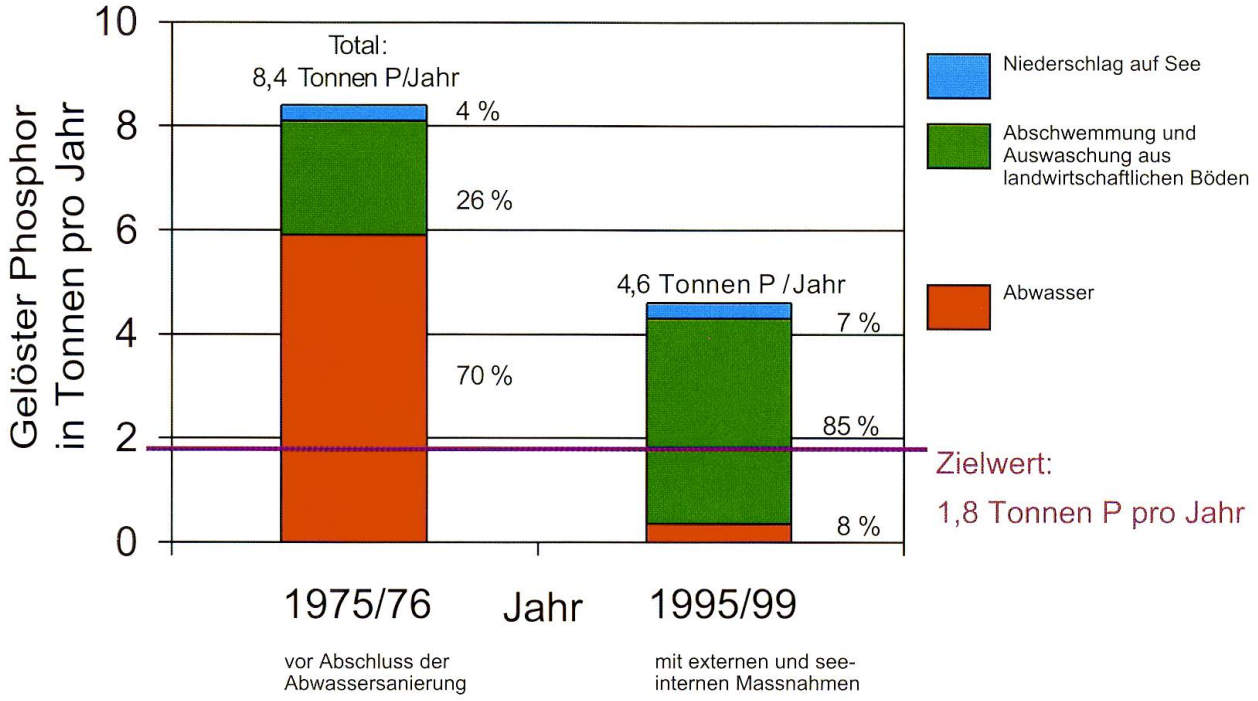


Abb. 26: Zufuhren an gelöstem Phosphor in den Baldeggersee für die Jahre 1975/76 und 1995/1999 in Tonnen und Aufschlüsselung auf verschiedene Verursacher.

schüre «Hallo Seetal, wie geht's?» an alle Einwohner und Einwohnerinnen verschickt (GVBH 1994).

Im Zweckartikel der Statuten des Gemeindeverbandes (GVBH) vom 18. Januar 2000 wurden die Aufgaben neu umschrieben:

«Der Verband koordiniert, unterstützt und fördert gemäss Gewässerschutzgesetzgebung von Bund und Kanton Massnahmen zur Sicherung, Erhaltung und Verbesserung aller Gewässer. Er berücksichtigt den gesamtheitlichen Schutz der Gewässer und deren nachhaltige Nutzung. Er will gemeinsam mit den Gemeinden und kantonalen Stellen mit Hilfe von externen und seeinternen Massnahmen eine Verbesserung der Wasserqualität erreichen.»

Für die Gesundung der Seen erfolgte somit eine Verantwortungsübergabe an die Bevölkerung. Die Kosten von rund 500 000 Franken pro Jahr für die künstliche Belüftung, die Koordination von externen Massnahmen sowie für die Erfolgskontrolle werden je zur Hälfte von den Gemeinden und vom Kanton getragen. Der Kostenverteiler ist verursacherbezogen und hat somit einen Lenkungseffekt für ein Gewässer schonendes Verhalten. Da der Baldeggersee seit 1942 als privates Gewässer der Pro Natura gehört, besteht jedoch bei der lokalen Bevölkerung ein Mangel an Identifikation mit dem See.

Schlussfolgerungen und weiterer Handlungsbedarf für die Seensanierung

Mit Hilfe der Kombination von externen und seeinternen Massnahmen konnte die bis Anfang der 1980er-Jahre fortschreitende Phosphoranreicherung im Baldeggersee gestoppt werden. Dieser Erfolg ist zu würdigen; er wäre ohne klare Zielsetzung, ständige Anstrengungen und Durchsetzung von Gewässerschutzmassnahmen der kantonalen Stellen und des Gemeindeverbandes (GVBH) nicht zustande gekommen.

Heute verharrt der Baldeggersee bei einer

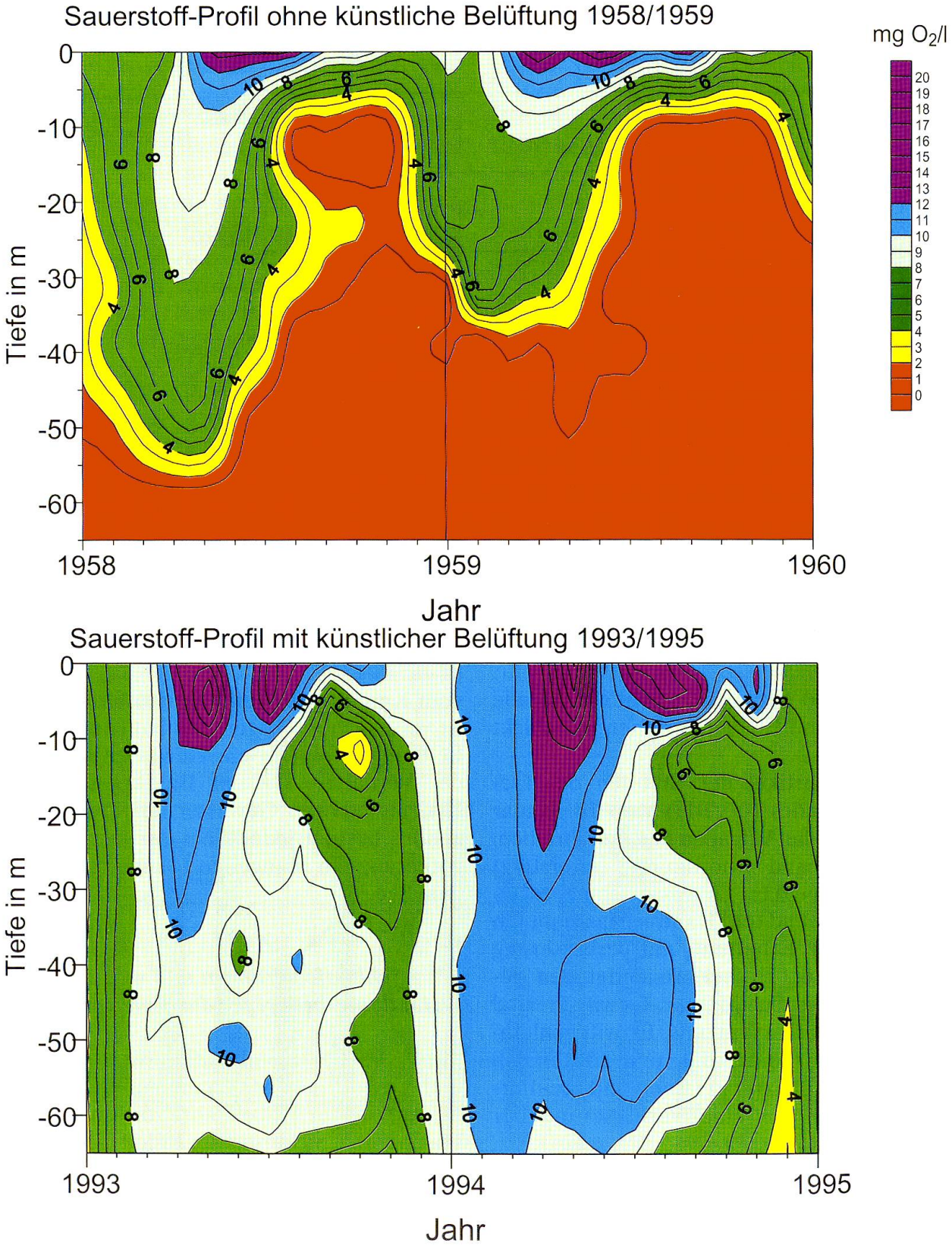


Abb. 27: Sauerstoffverteilung an der tiefsten Stelle des Baldeggersees. 1958/1959 vor seeinternen Eingriffen, 1993/1994 mit künstlicher Belüftung.

Phosphorkonzentration von 60 bis 90 mg P/m³, das heisst, er ist immer noch als stark überdüngt (eutroph) zu bezeichnen. Die hohen jährlichen Belastungen von 14,4 Tonnen Gesamtphosphor bzw. 4,6 Tonnen gelöstem Phosphor sind dafür verantwortlich. Dabei macht der bodenbürtige Anteil (Landwirtschaft) heute 88 Prozent für den Gesamtphosphor bzw. 85 Prozent für den gelösten Phosphor aus. Das heisst, dass durch Erosion sowie Abschwemmung und Auswaschung der landwirtschaftlich genutzten Böden zu viel Phosphor in die Gewässer gelangt.

In Abbildung 38 ist der Phosphorkreislauf des Baldeggersees und seines Einzugsgebietes dargestellt. Die Berechnung basiert auf einer Import-Export-Bilanz. Die landwirtschaftlichen Nährstoffflüsse des Baldeggersees sind geprägt durch einen hohen Import von Futtermitteln für Schweine, Rindvieh und Geflügel von 96,3 Tonnen Phosphor pro Jahr. Mineraldünger machen nur noch einen geringen Anteil des Phosphorimportes aus.

Im Teilsystem Boden beträgt die Überschussdüngung jährlich 29,5 Tonnen Phosphor. Der Export von Phosphor findet vorwiegend über den Verkauf von tierischen Produkten wie Milch und Fleisch statt. Aus den landwirtschaftlich genutzten Böden werden jährlich durchschnittlich 14,1 Tonnen Gesamtphosphor über die Zuflüsse in den Baldeggersee eingetragen. Dies ist rund dreimal mehr, als der See verkraften kann.

Die Hauptursache für die Überdüngung der Böden liegt also darin, dass durch den Futtermittelimport vor allem für Schweine mehr Phosphor im Einzugsgebiet ausge-

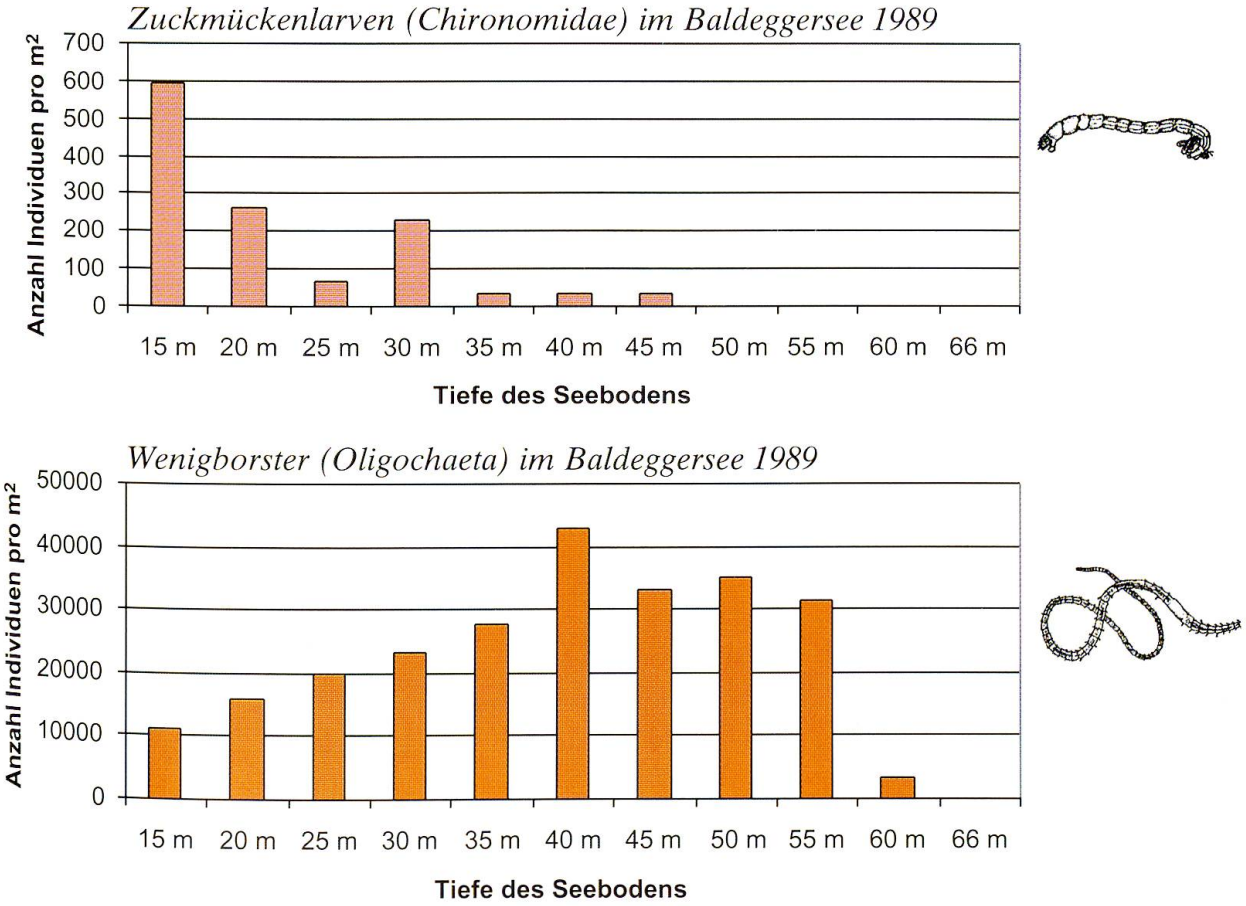


Abb. 28: Anzahl von Zuckmückenlarven (Chironomidae) und Wenigborstenwürmern (Oligochaeta) in verschiedenen Tiefen des Baldeggersees (STÖSSEL 1989).

bracht wird, als für den Pflanzenertrag notwendig wäre. Es kommt zu einer Überschussdüngung, und in den Böden reichert sich ein ständig wachsendes Phosphordepot an.

Wenn Gewässer eine ungenügende Qualität aufweisen, verpflichtet das neue Gewässerschutzgesetz (GSchG) vom 24. Januar 1991 in Artikel 14 die Kantone, die pro Hektare zulässigen DGVE niedriger anzusetzen.

Mit Artikel 62a des ergänzten GSchG (Stand 21. Dezember 1999) leisten zusätzlich der Bund und Kanton Abgeltungen an Massnahmen der Landwirtschaft zur Verhinderung der Abschwemmung und Auswaschung von Stoffen wie Düngern oder Pflanzenbehandlungsmitteln. In den Jahren 2000 und 2001 wurden deshalb im Einzugsgebiet des Baldegger- und Hallwilersees so genannte Phosphorprojekte nach Art. 62a GSchG in Angriff genommen, um mit zusätzlichen finanziellen Beiträgen Massnahmen zur Verminderung der Phosphorbelastung von oberirdischen Gewässern aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung zu unterstützen.

Im Einzugsgebiet des Baldeggersees sind in den nächsten zehn Jahren für diese Massnahmen 14 Millionen Franken vorgesehen (GVBH 2000). Sofern alle Landwirte mitmachen, könnten die jährlichen Zufuhren an gelöstem Phosphor um ein Drittel reduziert werden. Dies wird nicht genügen, um den Baldeggersee in einen gesetzeskonformen Zustand, wie er vor 1905 war, zurückzuversetzen. Gezielte Massnahmen zur Reduktion des Futtermittelimportes werden nur beschränkt ergriffen. Statt die Nährstoffkreisläufe im Einzugsgebiet des Sees zu schliessen, führt der ständige Futtermittelimport in dieses sensible Gebiet zu einer weiteren Überdüngung der Gewässer. Eine Verminderung der Überschussdüngung der Böden ist nur möglich, wenn langfristig mindestens 30 Prozent weniger Hofdünger ausgebracht sowie die Bewirtschaftung und Düngung der Böden an die Belastungsgrenzen des Baldeggersees angepasst würden. Um eine Gesundung des Baldeggersees in absehbarer Zeit zu erreichen, müsste die aktuelle Phosphorbelastung der Böden theoretisch auf die Hälfte reduziert werden. Ohne diese massive Reduktion des

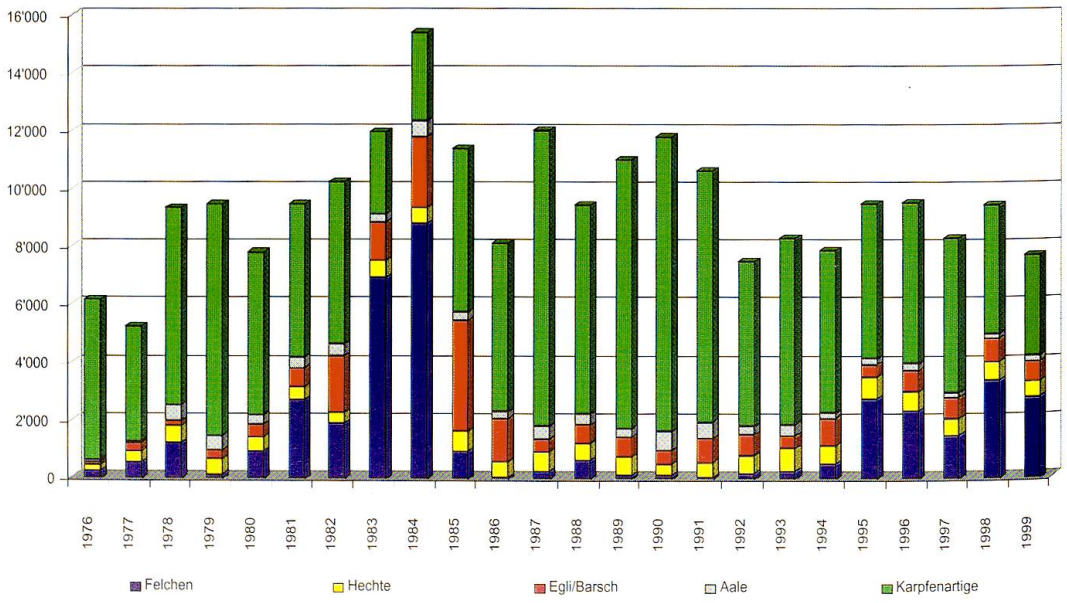


Abb. 29: Fangstatistik der Berufs- und Sportfischer im Baldeggersee, Gesamtfangertrag in kg pro Jahr (Quelle: Fischerei- und Jagdverwaltung des Kantons Luzern).

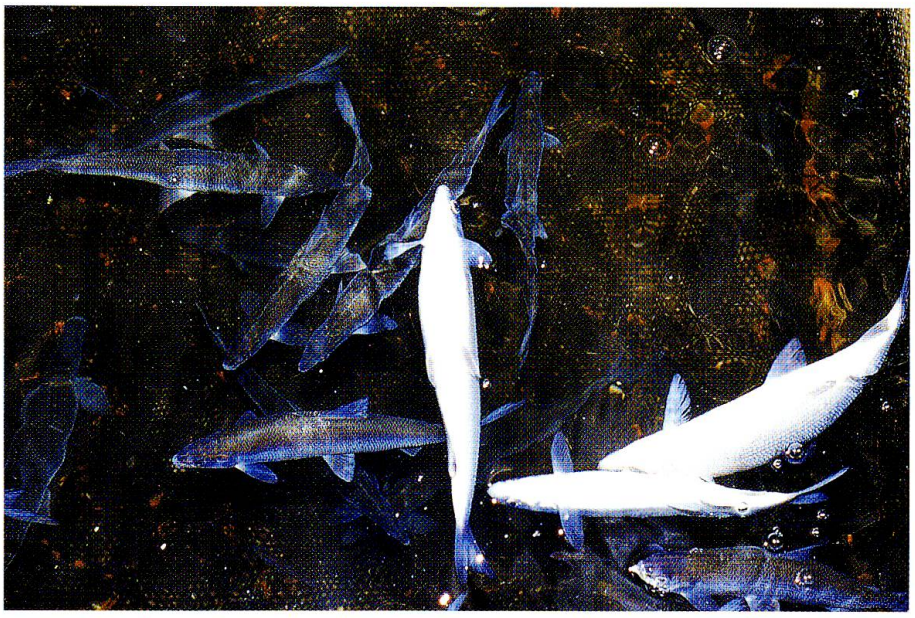


Abb. 30: Laichreife Felchen vom Dezember 2001.

Düngeranfalls ist im Verlaufe der nächsten Jahrzehnte vermutlich mit einer erheblichen Mehrbelastung der Luzerner Mittellandseen zu rechnen, weil das Phosphordepot im Boden aufgefüllt ist und zu «überlaufen» droht (EGLI 1998). Die Massnahmen nach Art. 62a GSchG müssten in Zukunft je nach Belastbarkeit der Böden und der Gewässer verschärft werden.

Ein Kilogramm Phosphor ermöglicht eine Algenproduktion von 114 Kilogramm Trockensubstanz, deren Abbau im Tiefenwasser 140 Kilogramm Sauerstoff verbraucht (siehe Abb. 10). 140 Kilogramm Sauerstoff kosten 50 Schweizer Franken (33 €). Heute werden durchschnittlich 2,8 Tonnen gelöster Phosphor zu viel in den Baldeggersee eingetragen; dies benötigt rund 400 Tonnen Reinsauerstoff zur Mineralisation der produzierten Algenbiomasse. Diese Menge wird auch tatsächlich jedes Jahr während des Sommerhalbjahres ins Tiefenwasser eingebracht. Daraus lassen sich jährliche Kosten für die Sauerstoffbelüftung von rund 140 000 Franken abschätzen. Verglichen mit den hohen Beträgen für Direktzahlungen in der Landwirtschaft sind diese Kosten als gering zu bezeichnen. Solange die Landwirtschaft ihre Nährstoffkreisläufe nicht schliesst und damit die Überdüngung der Böden nicht wesentlich reduziert, darf auf die künstliche Belüftung des Baldeggersees keineswegs verzichtet werden.

Ein abruptes Abstellen der Zwangszirkulation und des künstlichen Sauerstoffeintrages ins Tiefenwasser würde zu einer misslichen Lage führen. Da heute die Verhältnisse bezüglich der Phosphorbelastung und den Phosphorkonzentrationen im See denen um 1958/59 entsprechen, wäre beim Verzicht auf die künstliche Belüftung im Sommer unterhalb von 8 Metern und im Winter unterhalb von 30 Metern kein Sauerstoff mehr vorhanden (siehe Abb. 27). Ohne künstliche Belüftung wäre der Lebensraum für Fische im Sommer auf die warmen obersten acht Meter eingeschränkt und die Bodentiere würden unterhalb von 30 Metern absterben. Bedingt durch die windgeschützte Lage und die globalen Klimaveränderungen (Temperaturanstieg) würde der Baldeggersee im Winter nicht mehr vollständig zirkulieren. Im Winter bestünde zudem die Gefahr, dass wegen der Anhäufung von reduzierten Substanzen im Tiefenwasser bei einer Teilzirkulation der Sauerstoffgehalt auch in den oberen Schichten unter 4 mg O_2/l fallen würde.

Mit Hilfe der seeinternen Massnahmen können immerhin zwei gesetzliche Anfor-

derungen der neuen Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 eingehalten werden:

1. Immer und in jeder Seetiefe müssen mindestens 4 mg O_2/l vorhanden sein (Sauerstoffkriterium).
2. Wenig empfindliche Tiere wie Schlammröhrenwürmer und Zuckmückenlarven im Sediment müssen bis in die grösste Tiefe überleben können.

Die geringeren Phosphorkonzentrationen im See und die höheren Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser verbesserten die Mineralisation über dem Seeboden und erhöhten den Phosphorrückhalt. Die angestrebte Naturverlaichung der Felchen konnte zwar nicht erreicht werden, aber der Lebensraum für Fische wurde in grössere Tiefen ausgeweitet und ein Bestand an Felchen konnte zumindest für die Arterhaltung aufgebaut werden.

Das Wasser des Baldeggersees weist einen geringeren Phosphorgehalt auf und ist wegen geringeren Algendichten klarer geworden. Dem ökologischen Ziel, eine naturnahe und standortgerechte Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren zu erreichen, sind wir näher gekommen (Abb. 34). Die immer noch nährstoffreichen Verhältnisse ermöglichen weiterhin die massenhafte Entwicklung von Blaualgen wie *Aphanizomenon flos-aquae, Microcystis sp.* und *Planktothrix rubescens.* Solche Blaualgen verursachen nicht nur Fischsterben, sondern beeinträchtigen die Badequalität und können bei Viehtränken sogar zum Tod von Rindern führen (MEZ 1998).

In den letzten Jahrzehnten war die Sanierung des Baldeggersees fast nur auf die Verbesserungen der chemischen Wasserqualität ausgerichtet, wobei die Reduktion der Phosphorbelastung im Zentrum aller Massnahmen lag. Es gibt aber noch andere Problemstoffe wie zum Beispiel das Pflanzenbehandlungsmittel Atrazin, das trotz Beschränkung in der Anwendung bis zweimal

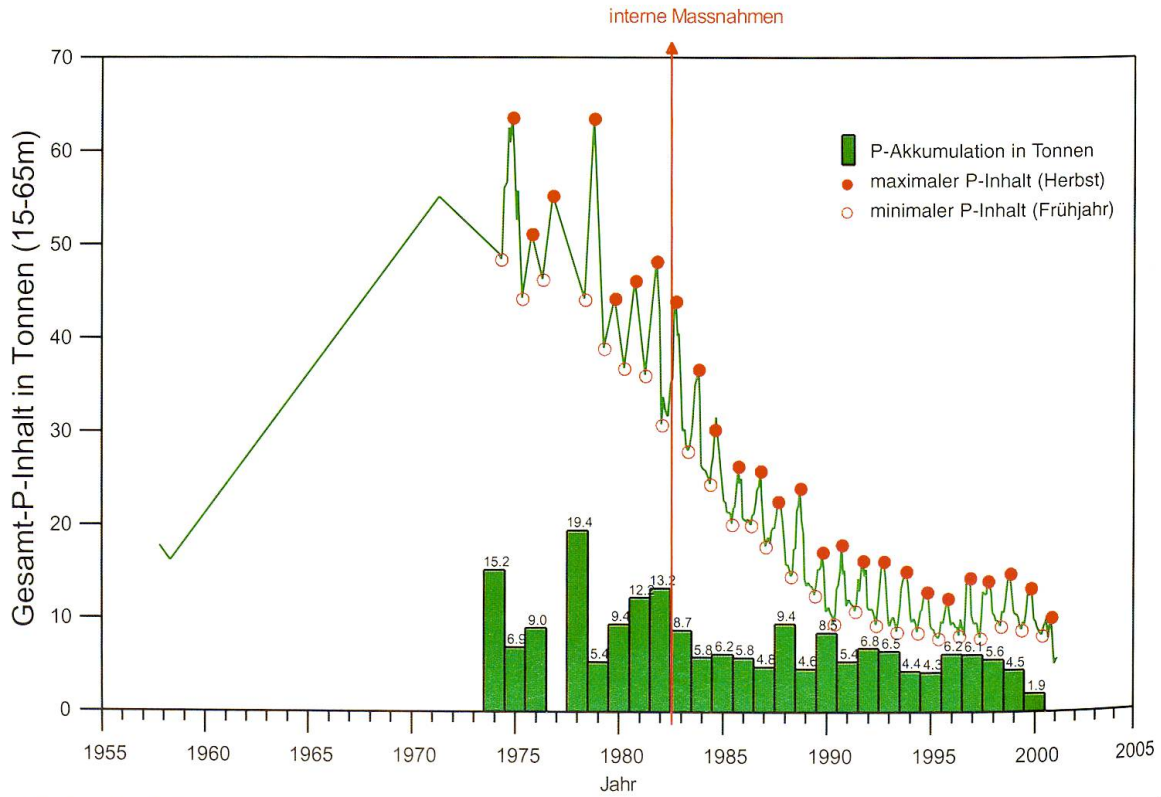


Abb. 31: Verlauf des Phosphorinhaltes im Seevolumen von 15 bis 65 Metern. Die Differenz zwischen Herbst- und Frühjahrswerten eines Jahres ergibt die Phosphorakkumulation im Hypolimnion.

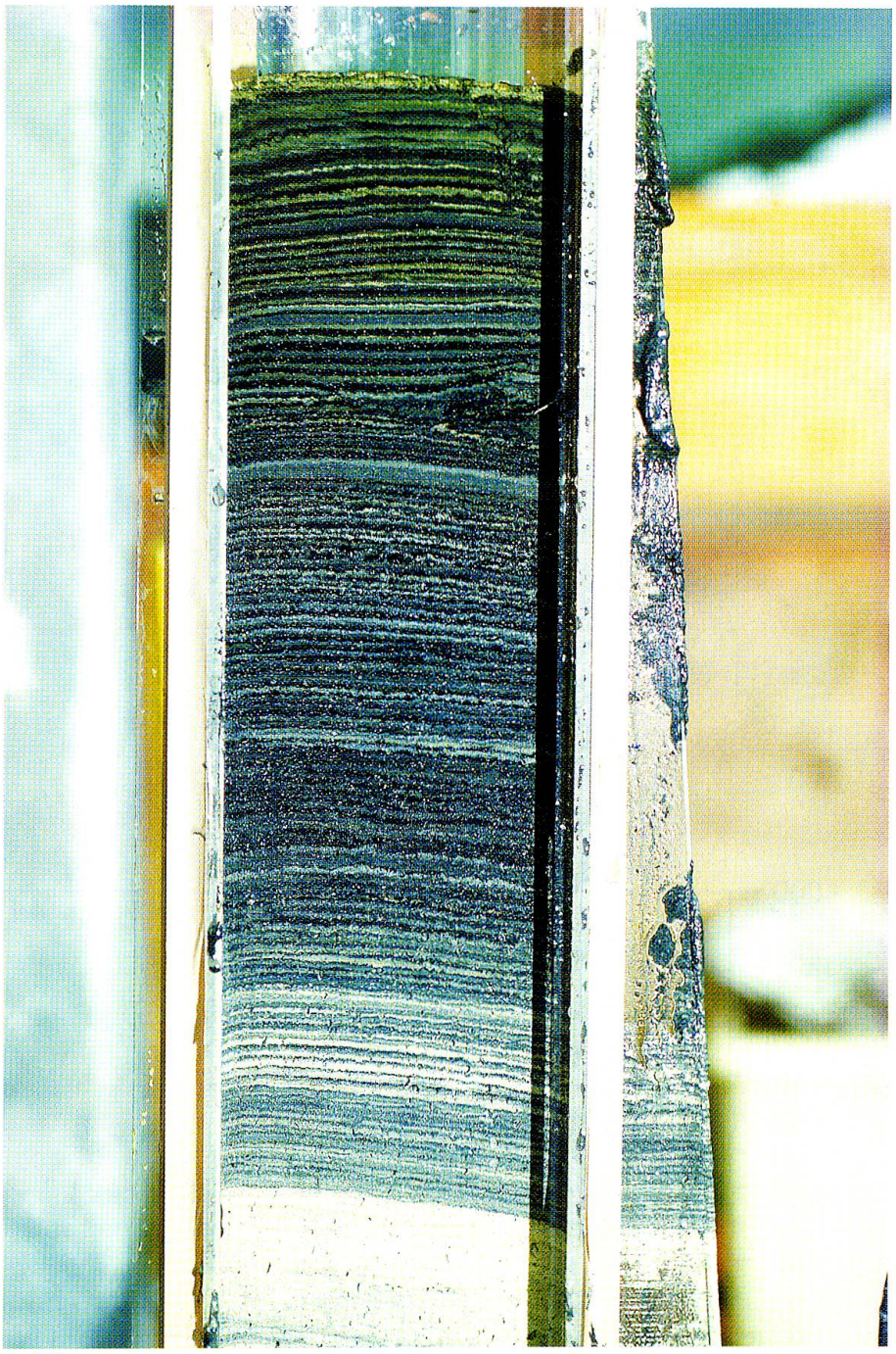


Abb. 32: Sedimentkern aus 66 Metern Tiefe des Baldeggersees vom Juli 1986 (AMBÜHL 1994).

über dem Grenzwert von 0,1 Mikrogramm pro Liter im Baldeggersee liegt (FAW 2001). Auch wurden in der Ron oberhalb der ARA Hochdorf veterinärmedizinische Antibiotika und unterhalb der ARA-Einleitung zusätzlich humanmedizinische Antibiotika von der EAWAG (NIPALES et al. 2000) analysiert. Fischbiologische Untersuchungen an den gleichen Stellen in der Ron belegen einen negativen Einfluss des gereinigten Abwassers aus der ARA Hochdorf auf die Fischgesundheit und die Entwicklung von Bachforelleneiern (ESCHER et al. 2002).

Neben der Wasserqualität sollte vermehrt der Wasserkreislauf im gesamten Einzugsgebiet betrachtet werden, das heisst Verbesserung der Wasserführung der Fliessgewäs-

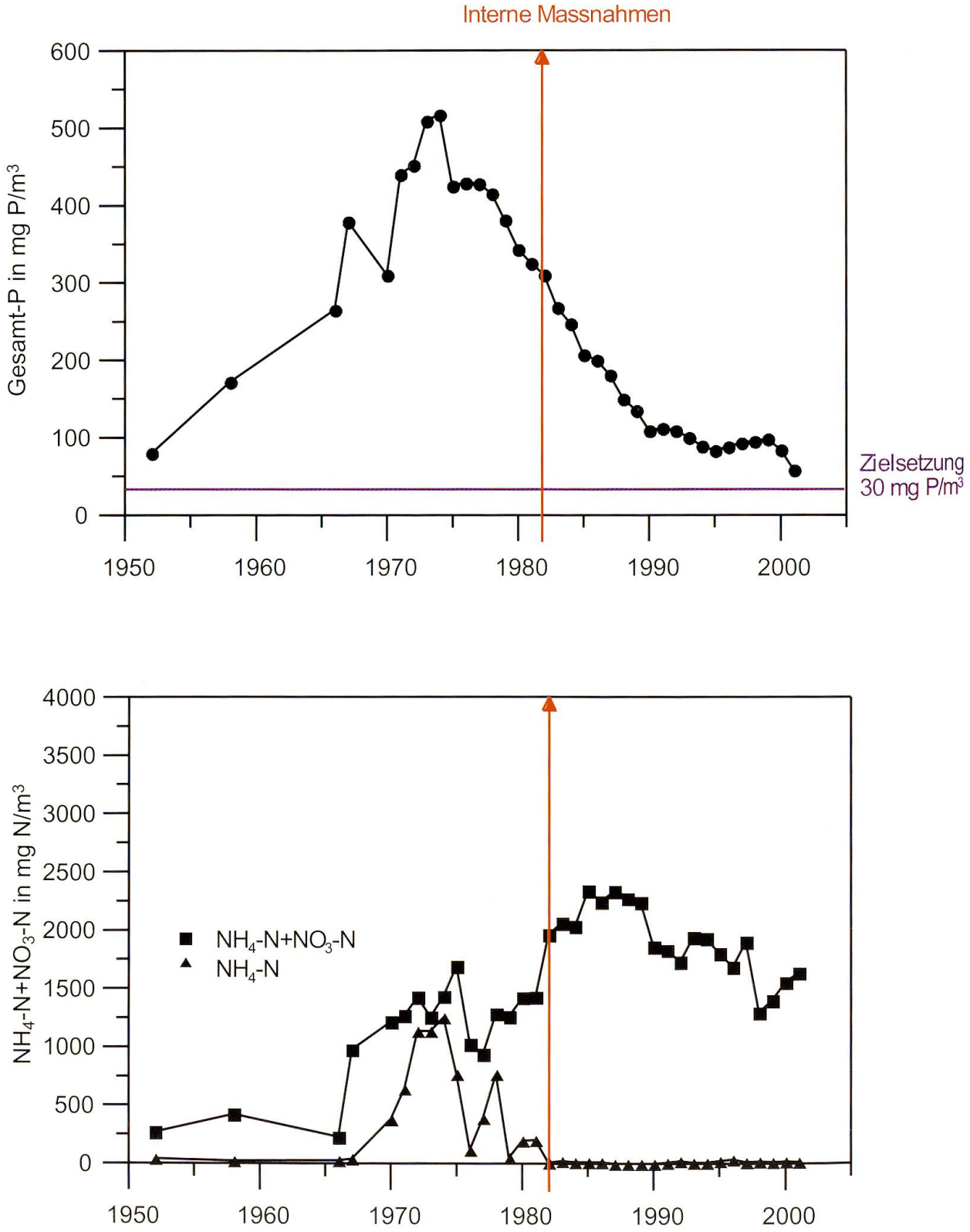


Abb. 33: Verlauf der Konzentrationen an Gesamtphosphor und anorganischem Stickstoff (NO_3-N und NH_4-N) zur Zirkulationszeit (März) im Baldeggersee von 1952 bis 2001.

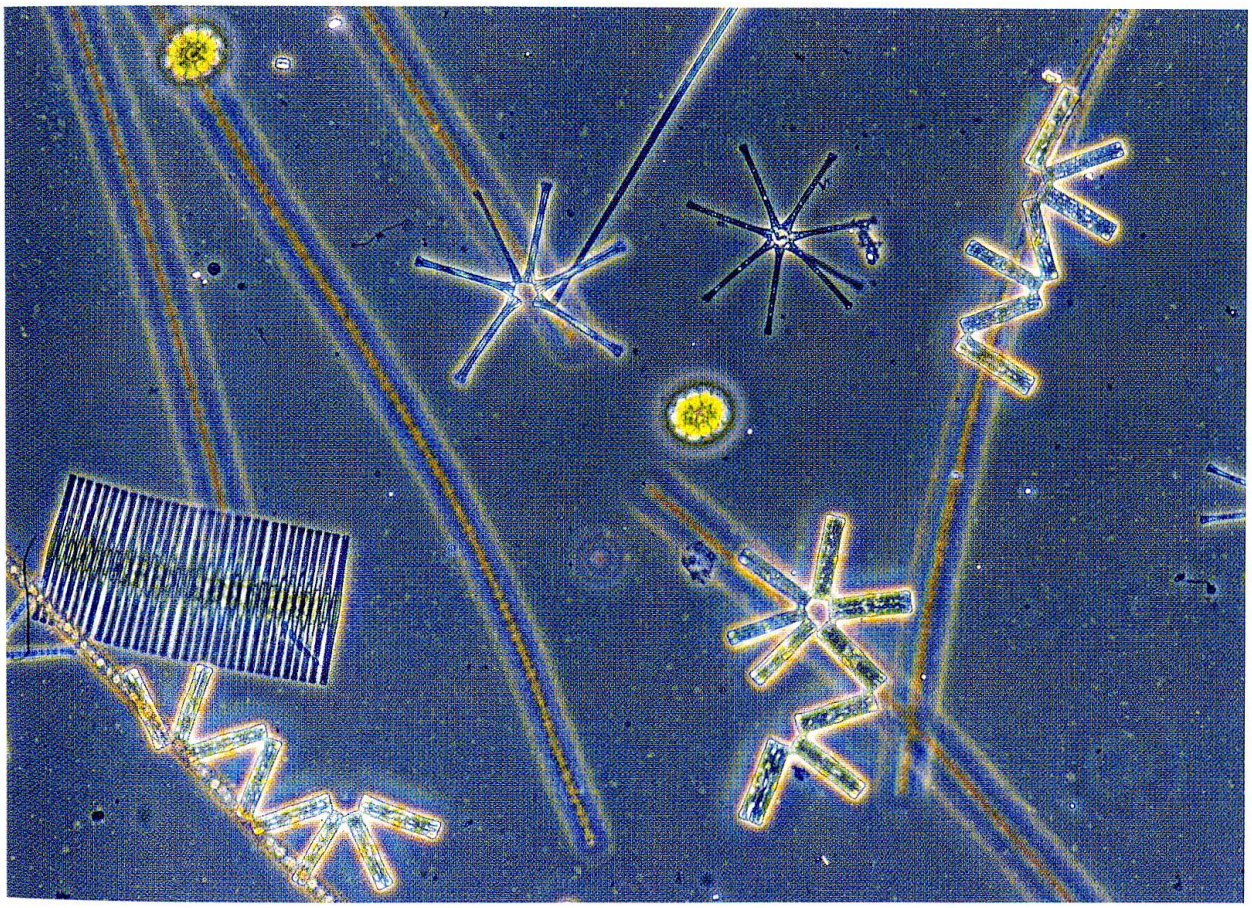


Abb. 34: Phytoplankton im Baldeggersee vom 3. April 1989: Kieselalgen.

ser, des Wasserrückhaltes und der Gewässerstrukturen (Ökomorphologie). Für ein Teileinzugsgebiet wurde erstmals dieser Ansatz im Pilotprojekt Stägbach (ARNOLD et al. 1997) angewandt. Im Zusammenhang mit dem Generellen Entwässerungsplan (GEP) der ARA Hitzkirchertal wurden Untersuchungen am Aabach und an acht Zuflüssen in den Hallwilersee durchgeführt (LOVAS 2001). Dabei ergaben sich folgende Probleme:

- entlang der Bäche werden immer noch viele Abfälle abgelagert
- den Bächen steht wenig Raum für eine Eigendynamik zur Verfügung
- der Düngstoffeintrag aus der Landwirtschaft über Abschwemmung und Drainagen ist gross
- viele Abstürze und Verbauungen behindern oder verunmöglichen die Fischwanderung
- von den rund 60 Kilometern ökomorphologisch beurteilten Fliessstrecken waren 11 Prozent eingedolt, 29 Prozent künstlich oder stark beeinträchtigt, 22 Prozent wenig beeinträchtigt und 37 Prozent in einem naturnahen Zustand

In der Schweiz wird unter dem Begriff «Regionaler Entwässerungsplan (REP)» ein ganzheitliches Vorgehenskonzept verlangt, das – bezogen auf ein grösseres Gewässereinzugsgebiet – alle Massnahmen zur Erreichung der vorgeschriebenen Gewässerschutzziele beinhaltet (VSA 2000).

Das gleiche Prinzip verfolgt die neue Wasserrahmen-Richtlinie der Europäischen Union (WRRL-EU 2000), um eine nachhaltige Wassernutzung sicherzustellen. Sie schreibt ein gesamtheitliches Management ganzer Gewässereinzugsgebiete innerhalb von zehn Jahren vor, unter Berücksichtigung der Wasserqualität, Wassermenge und Gewässerstrukturen. Dabei sollen die

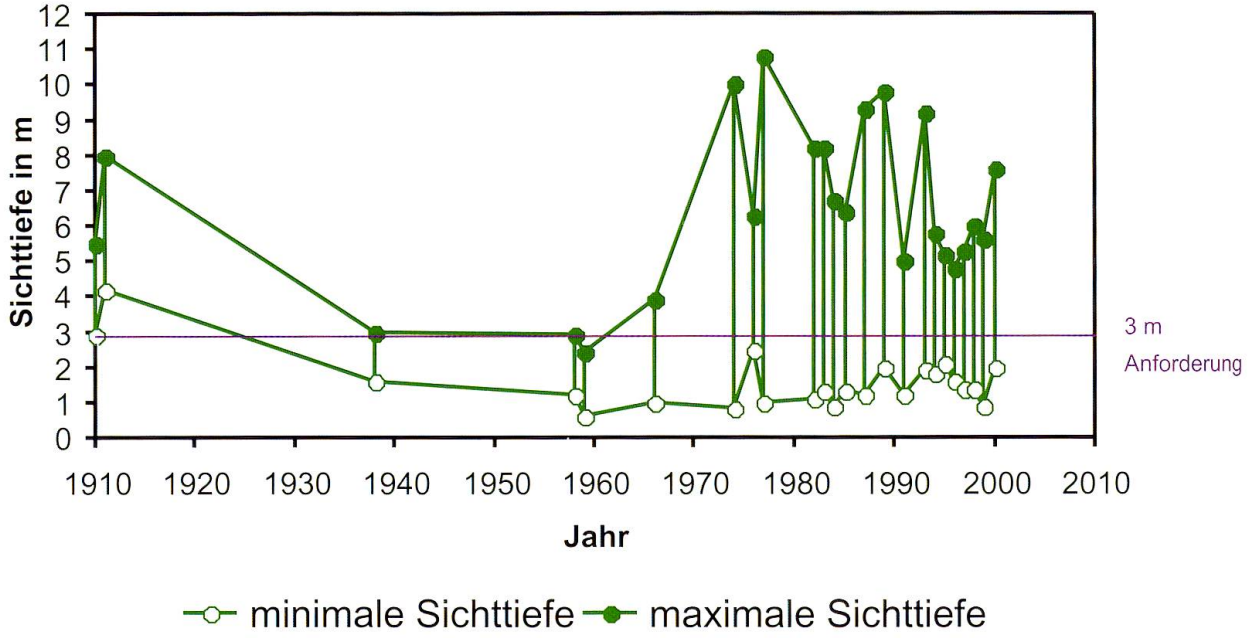


Abb. 35: Jährliche Variation zwischen minimaler und maximaler Sichttiefe im Baldeggersee.

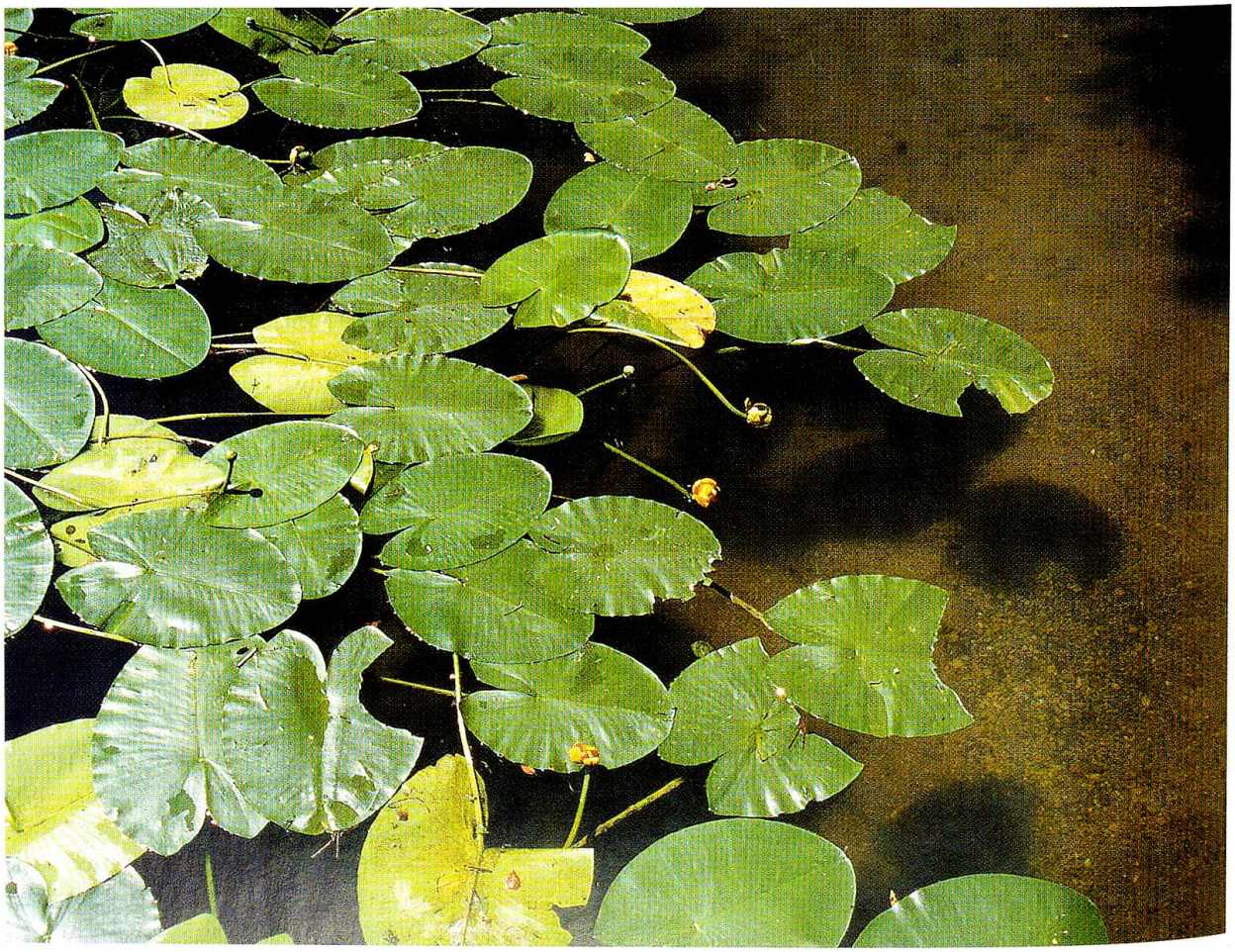
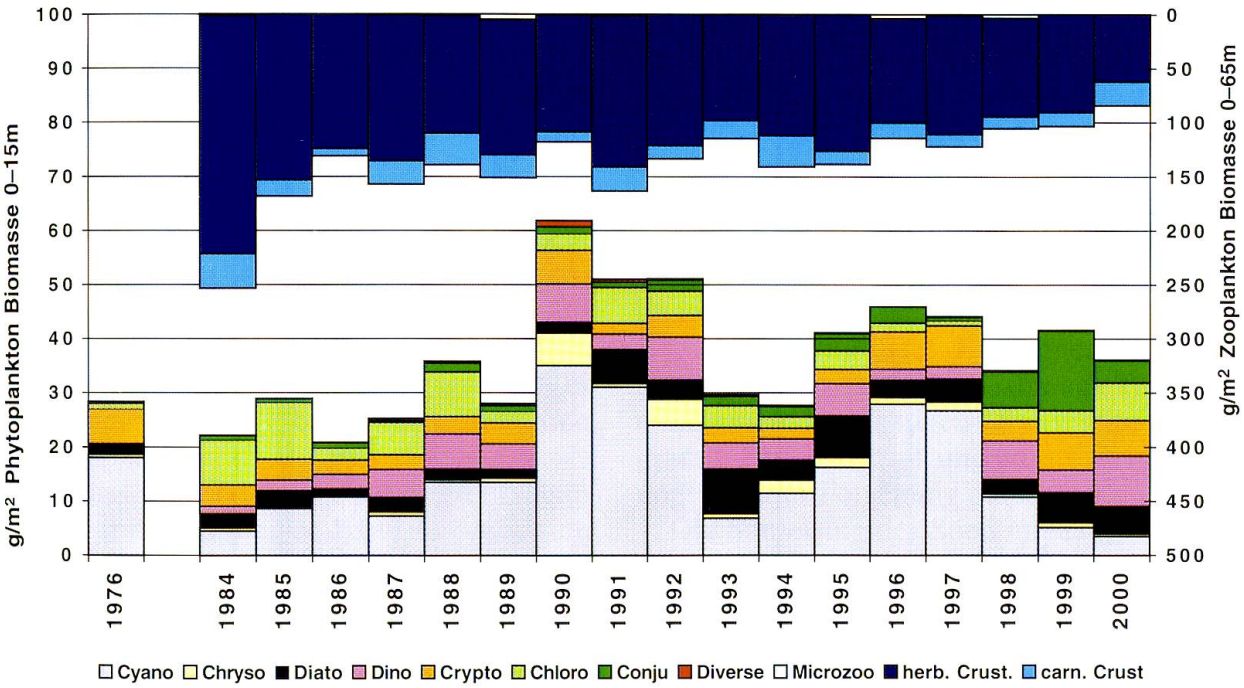


Abb. 36: Gelbe Teichrose *(Nuphar lutea)* bei Retschwil, Juni 2001.



Cyano	Blaualgen	Diato	Kieselalgen
Crypto	Schlundalgen	Dino	Panzerflagellaten
Chryso	Goldalgen	Microzoo	Einzellige Tiere und Rädertiere
Chloro	Grünalgen	herb. Crust.	Algenfressende Kleinkrebse
Conju	Jochalgen	carn. Crust.	Räuberische Kleinkrebse

Abb. 37: Entwicklung des Planktons im Baldeggersee von 1976 bis 2000. Phytoplanktonzusammensetzung für das Jahr 1976 und die Periode 1984 bis 2000 in der Wassersäule 0–15 m, aufgeteilt auf verschiedene Algengruppen in g Frischgewicht/m². Zooplankton in der Wassersäule 0–65 m in g Frischgewicht/m².

Öffentlichkeit und alle interessierten Stellen einbezogen werden.

Wenn auch unbewusst, so enthält das Vorgehenskonzept zur Sanierung des Baldeggersees von 1980 bereits ähnliche Zielsetzungen, wie sie in der neuen europäischen Wasserrahmen-Richtlinie gefordert werden. So führten die seeinternen Eingriffe zur Gründung eines Seesanierungsverbandes (GVBH) und gleichzeitig zu einer Übergabe der Verantwortung an die Bevölkerung der Seeeinzugsgebiete. Die anfallenden Kosten für die Gewässerschutzmassnahmen werden jedes Jahr über den Gemeindeverband verursacherbezogen an die Bevölkerung im Einzugsgebiet der Seen weiter verrechnet. Somit ist hier ein Lenkungsinstrument geschaffen worden, um ein gewässergerechteres Verhalten zu fördern. Gleichzeitig wurden die Öffentlichkeit und die betroffenen Stellen jeweils in die Planungs- und Entscheidungsprozesse eingebunden. Im Gegensatz zum Hallwilersee besteht jedoch ein Identifikationsproblem für den Gemeindeverband GVBH und die Bevölkerung mit dem Baldeggersee, der seit 1942 im Eigentum der Pro Natura ist. Als privates Gewässer ist seine Zugänglichkeit stark eingeschränkt.

Ein neuer Fahrplan für die weitere Gesundung der Seen wurde der Bevölkerung im Jahr 2001 in der Broschüre «Zwei Seen – ein Ziel» (AfU 2001a) bekannt gemacht. Jede Verbesserung des ökologischen Zustands des Baldeggersees wirkt sich auch unmittelbar auf die Wasserqualität des

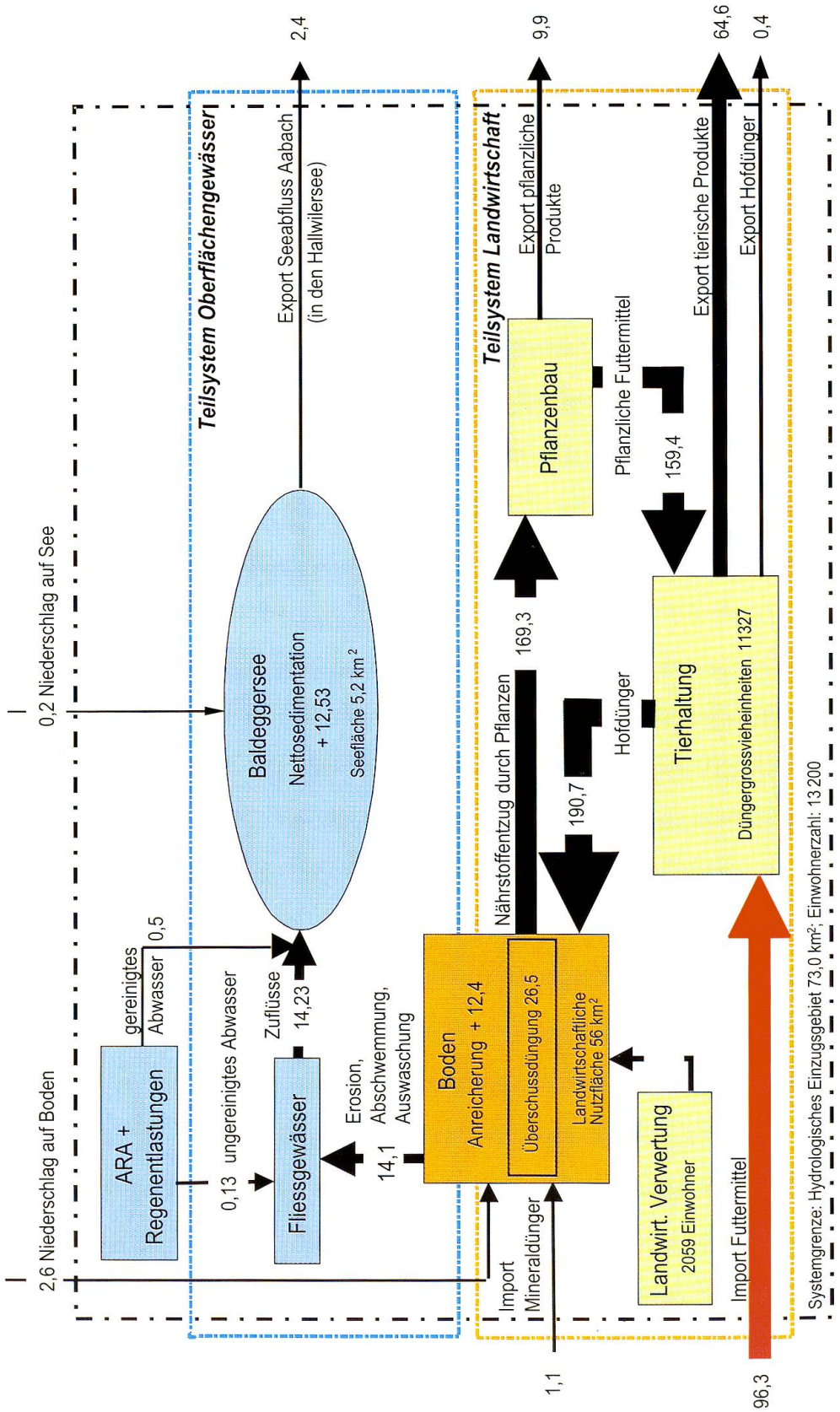


Abb. 38: Phosphorbilanz im Einzugsgebiet des Baldeggersees (1995/1999) in den Teilsystemen Landwirtschaft/Boden und Oberflächengewässer. Phosphor-Stoffflüsse in Tonnen pro Jahr.

unterliegenden Hallwilersees aus. Als Zielsetzungen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustands der Gewässer und zur Förderung einer nachhaltigen Wassernutzung gelten weiterhin:

- Erhaltung und Wiederherstellung eines gesunden Wasserkreislaufes im gesamten Einzugsgebiet
- Regionalisierung der Wasserbewirtschaftung und Abwasserentsorgung unter Berücksichtigung der Belastungsgrenzen eines Gewässers (Regionaler Entwässerungsplan)
- Gewässer schonende Siedlungsentwässerung mit optimierter Abwasserreinigung und Phosphorelimination
- Verbesserung des Wasserkreislaufes und des Wasserrückhaltes im ländlichen Raum und im Siedlungsgebiet
- Extensivierung und Ökologisierung der Landwirtschaft und Massnahmen zur Verhinderung der Erosion von Böden und gegen die Abschwemmung und Auswaschung von Schadstoffen aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen
- Weiterführung der bereits installierten seeinternen Anlagen (Belüftung) je nach Reaktion und Zustand des Sees mit Reinsauerstoff oder Druckluft
- Aufwertung der Wasserlebensräume, Revitalisierungen von Gewässerstrukturen und Herstellung der Fischwanderung
- Erstellung von Bewirtschaftungs- und Massnahmenplänen für die Seeeinzugsgebiete mit unabhängiger Wirkungskontrolle
- Weiterführung der Überwachungsprogramme im See und an den Zuflüssen als Erfolgskontrolle der getroffenen Massnahmen

Der Baldeggersee gehört zu den am besten untersuchten Seen der Welt. Vor 1980 gab es etwa 90 limnologische Literaturhinweise über den Baldeggersee (STADELMANN 1984). Seitdem wurden im Zusammenhang mit der Sanierung von Baldegger-, Hallwiler- und Sempachersee über 200 Arbeiten veröffentlicht, davon betrafen rund 50 den Baldeggersee. Hier sind vor allem die Wissenschafter der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) zu erwähnen, welche die Seen limnologisch untersuchten und Fachgutachten erstellten. Mit Befriedigung lässt sich feststellen, dass sich der ökologische Zustand des Baldeggersees deutlich verbessert hat. Diese Aussage kann nur dank einem langfristigen Überwachungsprogramm (Monitoring) und multidisziplinärer angewandter Forschung gemacht werden.

Die Sanierung der Seen mit Hilfe von externen und seeinternen Massnahmen förderte die Partizipation verschiedener Stellen auf lokaler, regionaler und kantonaler Stufe. Eine enge Zusammenarbeit mit Wissenschaft und Forschung war Voraussetzung für ein verantwortbares Vorgehen bei diesen Biomanipulationen (FREIBURGHAUS & ZIMMERMANN 1984). Die erstmalige Anwendung der künstlichen Belüftung eines tiefen Sees fand weltweite Beachtung, förderte die Seenforschung, brachte neue wissenschaftliche Erkenntnisse, hatte Auswirkungen auf Politikbereiche wie Umweltschutz und Landwirtschaft und beeinflusste die schweizerische Gewässerschutzgesetzgebung (KNOEPFEL 1994). Die Reaktion des Baldeggersees auf die kombinierten Gewässerschutzmassnahmen lässt sich beispielhaft für Forschung, Lehre und Umsetzung des Gewässerschutzes verwenden.

Beim Baldeggersee wurde die Verantwortung für ein ganzes Gewässereinzugsgebiet der Bevölkerung übertragen. In dieser Region kann konkret nachhaltiges Handeln gelebt werden. Ein See ist ein unmittelbares Spiegelbild für das Wirtschaften und die Lebensweise der Bevölkerung in seinem Einzugsgebiet. Die Vision bleibt, dass in den Gasthäusern des Seetals einmal Felchen bestellt werden können, die sich im selbstregulierenden Baldegger- und Hallwilersee natürlich fortpflanzen konnten.

Dank

Wir möchten vor allem denjenigen Personen danken, die seit längerer Zeit die Untersuchungen des Baldeggersees ausführen oder die Belüftungsanlagen im See betreuen: Anton Mares und Erwin Grieder vom Forschungszentrum für Limnologie (EAWAG) in Kastanienbaum, Anton Riechsteiner vom Kantonalen Laboratorium Luzern sowie Dominik Zurmühle, Jean-Claude Bernegger und Peter Herzog vom Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern.

LITERATURVERZEICHNIS

ADAM, F. & BIRRER, A. 1943. Biologische und chemische Studien am Baldeggersee 1938/39. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 14: 21–98.

AfU (Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern) 1993. Sanierung des Baldegger- und Hallwilersees und deren Einzugsgebiete: Situationsanalyse und Rechenschaftsbericht. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 84 S. mit Anhang.

AfU 2001a. «Zwei Seen – ein Ziel». Broschüre Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 10 S.

AfU 2001b. Der Kanton Luzern – auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung? Grundlagen und Kommentare zur Umweltsituation im Kanton Luzern. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 6. März 2001, 190 S.

AMBÜHL, H. 1995. Die Feinstruktur jüngster Sedimente von Seen verschiedenen Trophiegrades und von Seen in technischer Sanierung. In: 30. Arbeitstagung der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Donauforschung (IAD) in Zuoz, 1994. Limnologische Berichte Donau, 1994, Band II, Dübendorf/Wien, 101–126.

ARNOLD, PH., STADELMANN, P. & FISCHER L.A. 1997. Bewertung der Ökomorphologie von Fliessgewässern am Beispiel des Stägbachs. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 35: 43–60.

BACHMANN, H. 1897. Das Burgunderblut im Baldeggersee. Biol. Centralblätter 7: 230–241.

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

BERNEGGER, J.-C. 2001. Biologische Untersuchungen von Sedimentproben des Baldeggersees Oktober 1999. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 9 S.

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

BÖGLI, A. 1969. Geographie Innerschweiz. Kantonaler Lehrmittelverlag Luzern, 143 S.

BOLLER, M., EUGSTER, J., WEBER, A. 1981. Erfahrungen mit der ersten schweizerischen Flockungsfiltrationsanlage auf der Kläranlage Hochdorf. Gas, Wasser, Abwasser (1981), 11: 349–365.

BÜRGI, H.R. & STADELMANN, P. 2000. Change of phytoplankton diversity during long-term restoration of Lake Baldegg (Switzerland). Verh. Internat. Verein. Limnol., 27: 574–581.

EAWAG (Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) 1979. Gutachten über die Sanierungsmöglichkeiten für den Baldegger- und Hallwilersee. Im Auftrag des Militär-, Polizei- und Umweltschutzdepartementes des Kantons Luzern und der Baudirektion des Kantons Aargau, EAWAG-Auftrag Nr. 4559, 110 S.

EGLI, M. 1998. Entwicklung der P-Konzentration im Boden in Abhängigkeit der Nährstoffbelastung: Abschätzungen und langfristige Perspektiven. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, Ressort Bodenschutz, Februar 1998, 30 S.

ENZ, C. A. 2000. Population dynamics of whitefish *(Coregonus suidtreri* Fatio) in artificially oxygenated Lake Hallwil, with special emphasis on larval mortality and sustinable management. Dissertation ETH No. 13706, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zürich, 177 p.

ESCHER, M., LOVAS, R. & STADELMANN, P. 2002. Fischbiologische Untersuchungen in der Ron oberhalb und unterhalb der Kläranlagen Rain und Hochdorf. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 37: ••–••.

FAW, 2001. Rückstände von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen im Baldeggersee 1997–2000. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau (FAW), CH-8820 Wädenswil, 13 S.

FREIBURGHAUS, D. & ZIMMERMANN, W. 1984. Der Fall der See-Sanierung. Informationsbulletin des Nationalen Forschungsprogramms 6: «Entscheidungsvorgänge in der schweizerischen Demokratie», Forschungsstelle Wissenschaft und Politik, CH-3005 Bern, Bulletin 8, 137 S.

GÄCHTER, R. & WEHRLI, B. 1998. Ten years of artificial mixing and oxygenation: No effect on the internal P-loading of two eutrophic Swiss lakes. Environ. Sci. Technol. 32: 3659–3665.

GÄCHTER, R., MARES A., GRIEDER E., ZWYSSIG A. & HÖHENER P. 1989. Auswirkungen der Belüftung

und Sauerstoffbegasung auf den P-Haushalt des Sempachersees. wasser – energie – luft 81: 335–341.

GAMMA, H. 1951. Zur Uferflora der zentralschweizerischen Seen und zum Problem des Uferschutzes. Verh. der Schweiz. Naturforsch. Ges. Luzern: 11–25.

GVBH (Gemeindeverband Baldegger- und Hallwilersee) 1994. «Hallo Seetal, wie geht's?» Broschüre. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 16 S.

GVBH 2000. Phosphorprojekt Baldeggersee zur Verminderung der Phosphorbelastung von oberirdischen Gewässern aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung gemäss Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes. Gemeindeverband Baldegger- und Hallwilersee 10. Januar 2000, 53 S. und Anhang.

HERZOG, P. 2001. Baldeggersee-Auswertung der Zuflussuntersuchungen 1995–1999. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 37 S.

JOLLER, T. 1985. Untersuchung vertikaler Mischungsprozesse mit chemisch-physikalischen Tracern im Hypolimnion des eutrophen Baldeggersees. Dissertation ETH Zürich Nr. 7830, 94 S.

KNOEPFEL, P. 1994. See-Sanierung: Rehabilitierung eines Toten. Bedingungen erfolgreicher Umweltpolitik in der Schweiz. Institut de Hautes Etudes en Administration Publique (IDHEAP), Chavannes-près-Renens, cahiers de l'IDHEAP No. 126, 46 S.

LACHAVANNE, J.-B., DEMIRE, A., JUGE, R. & PERFETTA, J. 1995. Zustand, Erhaltung und Schutz der Ufer des Baldeggersees, Pflanzenökologische und Morphologische Beurteilung. Universität Genf, Kanton Luzern und BUWAL, Band I und Band II, Mai 1995, 81 S. und 3 Karten.

LOHRI, F. 1977. Untersuchung der Zuflüsse des Baldeggersees. Schweiz. Bund für Naturschutz Basel und Kantonales Amt für Gewässerschutz Luzern, 68 S.

LOTTER, A. F. 1998. The recent eutrophication of Baldeggersee (Switzerland) as assessed by fossil diatoms assembleges. The Holocene 8, 4 (1998), 395–405.

LOTTER, A. F. & BIRKS, H. J. B. 1997. The separation of the influence of nutrients and climate on the varve time-series of Baldeggersee. Switzerland. Aquat. Sci. 59/4: 362–375.

LOVAS, R. 2001. Zustandsbericht Gewässer – Generelle Entwässerungsplan (GEP) ARA Hitzkirchertal. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 98 S.

MEZ, K. 1998. Erste Untersuchungen über toxische Cyanobakterien in Schweizer Mittelland- und Voralpenseen. Bericht des Instituts für Pflanzenbiologie/Mikrobiologie, Universität Zürich, 46 S.

MUGGLI, J. 1997. Fischereiliche Aspekte der Revitalisierung von Fliessgewässern am Beispiel des Stägbaches, Baldegg. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 36: 61–69.

MUGGLI, J. 2000: Baldeggersee: Fischereiliche Standortbestimmung. Kantonale Fischerei- und Jagdverwaltung Luzern, 14 S.

MÜLLER, R. 1992. Trophic state and its implication for natural reproduction of salmonid fish. Hydrobiologia, 243/244: 261–268.

MÜLLER, R. & STADELMANN, P. 2002. Fish habitat requirements as the basis for objectives in the rehabilitation of eutrophic lakes by artificial oxygenation, in preparation.

NIESSEN, F., STURM, M. 1987. Die Sedimente des Baldeggersees (Schweiz) – Ablagerungsraum und Eutrophierungsentwicklung während der letzten 100 Jahre. Arch. Hydrobiol., 108: 365–383.

NIPALES, N. S., MCARDELL, CH. S., MOLNAR, E. & GIGER, W. 2000. Occurrence of Macrolide and Sulfonamide Antibiotics in the Aquatic Environment of Switzerland. EAWAG-Manuscript presented at the 219th ACS National meeting in San Francisco, CA, USA, March 2000, 8 p.

SCHIESS, T. 1976. Limnologisch-fischbiologischer Bericht über den Baldeggersee 1974/75. Im Auftrag des Schweizerischen Bundes für Naturschutz (SBN), Basel, und Kantonales Gewässerschutzamt Luzern, 119 S.

SCHNIDER, P. 1998. Grosse Projekte, fette Gewinne und grandiose Pleiten. Geschichten aus Stadt und Land Luzern, Band 5. Herausgeber Martin Merki, Luzern, Comenius Verlag Hitzkirch, 112 S.

SPENGELER, R. 1994. Besiedlung des Benthos durch Oligochaeten und Chironomiden, 12 Jahre nach Beginn der seeinternen Massnahmen. Diplomarbeit an der EAWAG Dübendorf, 46 S.

SPENGELER, R. 1995. Die Sanierung des Baldeggersees: Besiedlung durch Oligochaeten und Chironomiden 12 Jahre nach Beginn der seeinternen Massnahmen. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 34: 208–211.

STADELMANN, P. 1984. Die Zustandsentwicklung des Baldeggersees (1900–1980) und die Auswirkung von seeinternen Massnahmen. wasser – energie – luft, 76: 85–95.

STADELMANN, P., BUTSCHER, E. & BÜRGI, H.R. 1997. Massnahmen zur Seesanierung: Beispiel des Baldeggersees. Gas, Wasser, Abwasser 77/1: 1–18.

STÖCKLI, A. 1998. Die Sanierung des Hallwilersees macht Fortschritte. Umwelt Aargau (Umweltinformationsbulletin des Kantons Aargau) Nr. 1 (1998): 7–10.

STÖSSEL, F. 1989. Biologische Untersuchungen von Sedimentproben im Baldeggersee. Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, 4 S.

THEILER, A. 1917. Beiträge zur Planktonkunde des Sempacher- und Baldeggersees 1910–1915. Mitt. Naturforsch. Ges. Luzern, 7: 310–357.

VOLLENWEIDER, R. A. 1968. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Seen- und Fliessgewässer-Eutrophierung, unter besonderer Berücksichtigung des Phosphors und des Stickstoffs als Eutrophierungsfaktoren. OECD-Report 68.27 (1968), Paris, 159 S.

VOLLENWEIDER, R.A. 1969. Möglichkeiten und Grenzen elementarer Modelle der Stoffbilanz von Seen. Arch. Hydrobiol, 66: 1–36.

VON LIEBENAU, TH. 1891. Geschichte der Fischerei im Kanton Luzern: Fischereiverhältnisse im Baldeggersee. Staatsarchiv Luzern.

VSA, 2000. Der regionale Entwässerungsplan (REP), Empfehlungen für die Bearbeitung des REP im

Rahmen einer ganzheitlichen Gewässerplanung. Verband Schweiz. Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), CH-8026 Zürich, 78 S.

WEHRLI, B. & WÜEST, A. 1996. Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. Schriftenreihe EAWAG Dübendorf, Schweiz, ISBN: 3-906484-14-9, 157 S.

WRRL-EU, 2000. Wasserrahmen-Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000. 62 S. mit Anhang.

WÜEST, A., BROOKS, N. H. & IMBODEN, D. M. 1992. Bubble Plume Modeling for Lake Restoration. Water Resources Research, 28: 3235–3250.

ZÜLLIG, H. 1982. Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früherer Phytoplankton-Entfaltungen. Schweiz. Z. Hydrol. 44/1: 1–98.

Pius Stadelmann, Dr. sc. nat. ETH (stadelmann.pius@bluewin.ch)
Robert Lovas, dipl. Natw. ETH (robert.lovas@lu.ch)
Ernst Butscher, Chemiker HTL (ernst.butscher@lu.ch)
Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern
Libellenrain 15
CH-6002 Luzern