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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 80 (1988)

Heft: 3-4

Artikel: Zustand des Sempachersees vor und nach der Inbetriebnahme der see-internen Massnahmen : künstlicher Sauerstoffeintrag und Zwangszirkulation 1980 - 1987

Autor: Stadelmann, Pius

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940705

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: 08.07.2025

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

Zustand des Sempachersees

vor und nach der Inbetriebnahme der see-internen Massnahmen: künstlicher Sauerstoffeintrag und Zwangszirkulation 1980–1987

Pius Stadelmann

Zusammenfassung

Der Sempachersee hat seit den 70er Jahren eine rasante Qualitätsverschlechterung erfahren, und um 1980 wurde eine mittlere Gesamt-Phosphorkonzentration von 150 mg P/m³ gemessen. Zu diesem Zeitpunkt wurde überlegt, mit welchen see-externen und see-internen Massnahmen eine schnellere Gesundung des Sempachersees erreicht werden könnte. Das Sanierungskonzept führte zu einer grossen Anstrengung auf der Seite der Siedlungsabwässer, und Mitte 1984 wurde mit dem künstlichen Sauerstoffeintrag begonnen. Der Einfluss der Sauerstoffbegasung im Sommer und der Zwangszirkulation im Winter auf den Zustand des Sees wird beschrieben. Der künstliche Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser bewirkte, dass die reduzierten Substanzen (CH_4, NH_4^+, Mn^{2+}, NO_2^-) über dem Seegrund deutlich abnahmen und der Grenzwert von 4 mg O_2/l im Hypolimnion eingehalten werden konnte.

In den Jahren 1984 bis 1986 wurde die Phosphorzufuhr zum Sempachersee mit Hilfe von Zuflussuntersuchungen neu ermittelt. Die neuesten Messungen zeigen, dass die jährliche Phosphorfracht zum See in den letzten 10 Jahren nicht abgenommen hat und immer noch rund 4mal über dem gefährlichen Wert von 4 t Phosphor liegt. Als Hauptverursacher der Eutrophierung tritt heute die Landwirtschaft auf; rund 80% der jährlichen Phosphorzufuhr gelangen über Erosion und Abschwemmung der überdüngten Böden in den See.

Eine wesentliche Verbesserung des Sempachersees kann nur durch eine Verminderung der Überdüngung auf den landwirtschaftlich genutzten Böden (Abbau der Tierbestände) erreicht werden.

Bedingt durch die hohe Phosphorzufuhr liegen die Konzentrationen im See immer noch bei 140 mg P/m³. Mit rund 400 g C/m² und Jahr weist der See eine hohe Algenproduktion auf. Durch die Belüftung des Tiefenwassers konnte die P-Rücklösung nicht wesentlich vermindert werden. In den oberflächennahen Schichten werden weiterhin hohe Algendichten festgestellt. Starke Sauerstoffübersättigungen und hohe pH-Werte bilden eine Gefahr für Jungfische. Der Betrieb der see-internen Anlagen wird noch lange weitergeführt werden müssen. Der Sempachersee wurde in den letzten Jahren in physikalischer, chemischer und biologischer Hinsicht intensiv untersucht, die neueren Arbeiten sind im Literaturverzeichnis zusammengetragen.

1. Einleitung

Als Schlüsselfaktor für die Überdüngung unserer Seen kommt dem Phosphor weiterhin die grösste Bedeutung zu, da dieser Nährstoff die Bioproduktion in einem See steuert. Nach den heutigen Kenntnissen liegt die kritische Phosphorkonzentration, gemessen jeweils nach der Winterzirkulation, bei 20 bis 30 mg Gesamt-Phosphor pro m³. Beim Überschreiten dieses Wertes tritt erhöhtes Algenwachstum ein und als Folgeerscheinung starker Sauerstoffschwund im Tiefenwasser. Diese Veränderungen führen zu einer Artenverarmung von Flora (Algen, Makrophyten) und Fauna (Zooplankton, Fische). Bei stark fortgeschrittener Überdüngung mit Phosphor kann auch Stickstoff die Bioproduktion begrenzen, wobei verschiedene Blaualgen mittels Stickstoff-Fixierung den im Wasser gelösten elementaren Stickstoff nutzen können.

Eine routinemässige Bestimmung von niederen Phosphorkonzentrationen im Wasser wurde erst um 1955 erarbeitet. Zu dieser Zeit wiesen von den vier grösseren Seen des Kantons Luzern nur der Vierwaldstättersee und der Sempachersee einen oligotrophen (nährstoffarmen) Zustand auf, der Baldeggersee und der unterliegende Hallwilersee waren mit 80 bzw. 50 mg Gesamt-P pro m³ deutlich eutroph (nährstoffreich).

Die fortschreitende Verschlechterung der Seen des Luzerner Mittellandes beunruhigte die Öffentlichkeit zusehends. Die in den 60er Jahren einsetzenden abwassertechnischen Massnahmen, wie Sammlung der Abwässer

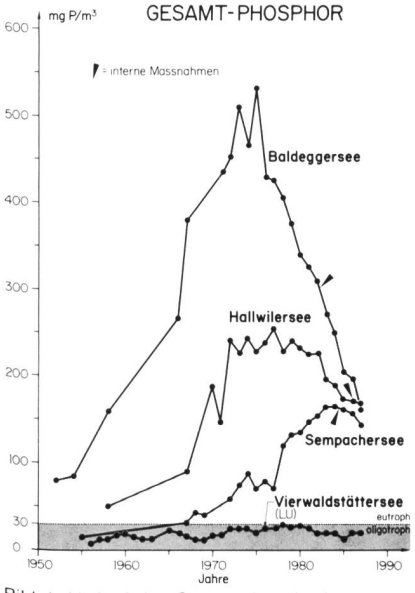


Bild 1. Verlauf der Gesamtphosphorkonzentration (mg P/m³) in den Seen des Kantons Luzern. Mittelwerte jeweils nach der Winterzirkulation.

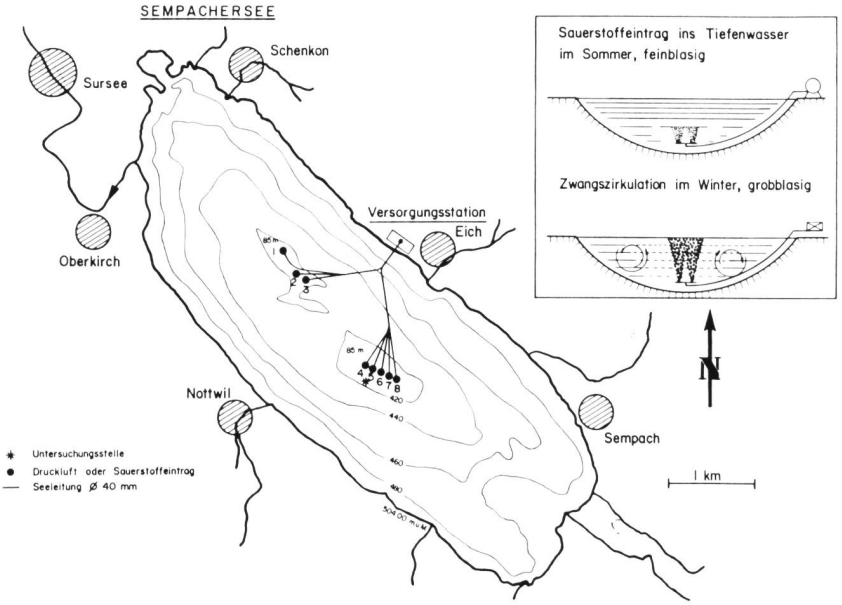


Bild 2. See-interne Anlagen im Sempachersee mit Verfahrensprinzip für den Sauerstoffeintrag und die Zwangszirkulation.

Bild 3a. Fotografische Dokumentation der internen Anlagen. Versorgungsstation mit Sauerstofftank und Betriebsgebäude.

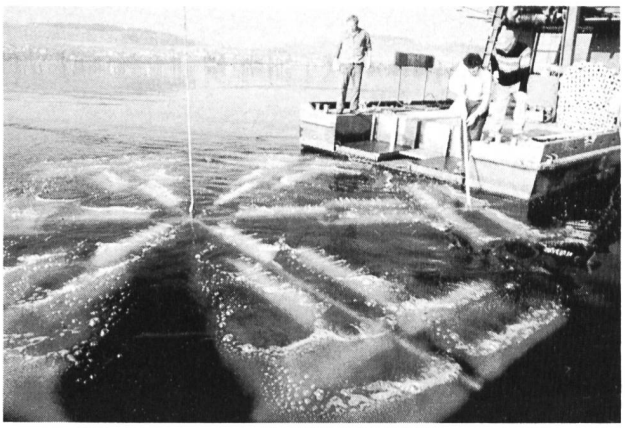


Bild 3b. Diffusor im feinblasigen Testbetrieb (Sommer).

und deren Reinigung in zentralen Kläranlagen, die teilweise mit einer Phosphat-Eliminationsstufe ausgerüstet wurden, vermochten vor allem im Baldegger-, Hallwiler- und Sempachersee die Eutrophierung nicht aufzuhalten (Bild 1).

Am 8. Dezember 1975 erliess der Schweizerische Bundesrat die «Verordnung über Abwassereinleitungen», die fordert, dass im Einzugsgebiet von Seen die Abwasserreinigungsanlagen mit einer Phosphat-Eliminationsstufe auszurüsten sind. Als Novum wurden auch Qualitätsziele für stehende Gewässer festgelegt. Trotz zusätzlichen Anstrengungen im Bereich der Abwassersanierung konnte die erfolgte Nährstoffanreicherung nicht rückgängig gemacht werden, obwohl im Einzugsgebiet der luzernischen Seen bei den kommunalen Abwasserreinigungsanlagen die Phosphorfällung sofort eingeführt wurde. Um 1975 wurden im Baldeggersee mittlere Phosphorkonzentrationen von über 500 mg P/m³ und im Hallwilersee solche von 250 mg P/m³ gemessen. Der Sempachersee reagierte zuerst wegen seiner grossen Wasseraufenthaltszeit von rund 17 Jahren verzögert auf die Zunahme der Phosphorbelastung, doch um 1970 wurde der kritische Phosphorgehalt ebenfalls überschritten, und in den nachfolgenden 10 Jahren erhöhten sich die Konzentrationen bis auf 160 mg P/m³. Mit Hilfe von Frachtberechnungen in den Zuflüssen zu den Luzerner Mittellandseen und einer Aufschlüsselung auf Verursacher konnte nachgewiesen werden, dass mit abwassertechnischen Massnahmen allein keine dauernde bzw. genügend rasche Gesundung der Seen zu erreichen war. Unter den heutigen Verhältnissen ist der Nährstoffeintrag aus den landwirtschaftlich genutzten und gedüngten Böden zu gross, als dass die Seen in einen oligotrophen Zustand zurückgeführt werden könnten. Dies veranlasste die beiden Kantone Luzern und Aargau, zusätzliche Massnahmen zu ergreifen, um die Zielvorstellungen der Gesetzgeber zu erfüllen. Ziel dieser internen Massnahmen ist es, Bedingungen zu schaffen, die eine schnellere Selbstregulation der Seen ermöglichen.

Vorgängig wurden verschiedene seeinterne Eingriffe von der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz EAWAG in Gutachten für jeden See überprüft und schliesslich die Verfahren der Zwangsdurchmischung im Winter (Zwangszirkulation) und der Tiefenwasserbelüftung im Sommer (hypolimnischer Sauerstoffeintrag) empfohlen. Die technische Ausführung der see-internen Anlagen wurde nach einer öffentlichen Wettbewerbsausschreibung der Ingenieurgemeinschaft Tanytarsus (Zürich und Wohlen) übertragen. Die erste Anlage im Grossmassstab wurde 1982 im Baldeggersee erfolgreich ausgetestet. Über diese Anlagen ist an anderer Stelle schon berichtet worden [*Stadelmann* 1984, *Imboden* 1985]. Die seeinternen Anlagen stehen im Baldeggersee seit fünf Jahren in Betrieb, begleitet von einer intensiven limnologischen Überwachung durch die EAWAG und das Kantonale Amt für Umweltschutz Luzern. Die guten Erfahrungen im 67 m tiefen Baldeggersee führten dazu, dass die gleichen technischen Anlagen mit Modifikation 1984 im Sempachersee und 1985/86 im Hallwilersee eingebaut wurden [*Stadelmann* 1984, *Stöckli* und *Schmid* 1987].

In den Veröffentlichungen von *Stadelmann* [1980] und *Gächter* et al. [1983] ist die Zustandsentwicklung des Sempachersees bis vor dem Betrieb der see-internen Anlagen beschrieben. Die folgende Berichterstattung soll die Auswirkungen der Seesanierung (externe Massnahmen) und Seerestaurierung (see-interne Massnahmen) auf dem Sempachersee aufzeigen und auf die neuesten Arbeiten, die im Zusammenhang mit dieser Seetherapie ausgeführt wurden, hinweisen.

2. Hydrographie und Demographie

Die geologischen und geographischen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Sempachersees können aus früheren Veröffentlichtungen entnommen werden [*Stadelmann* 1980]. Die hydrographischen Kenngrössen und die neuesten Besiedlungsdaten sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der Einwohner-Anschlussgrad an eine Abwasserreinigungsanlage (ARA) mit 98% einen hohen Stand erreicht hat. Rund 1900 Einwohner entsorgen ihre Abwässer landwirtschaftlich, d.h. in eine abflusslose Güllengrube. Nur noch für 180 Einwohner werden die Abwässer nicht gesetzeskonform entsorgt.

In den Sempachersee entwässern zwei kommunale Abwasserreinigungsanlagen (ARA Sempach/Neuenkirch und ARA Hildisrieden), beide

Tabelle 1. Hydrographische Kenndaten des Sempachersees und Besiedlung im Einzugsgebiet.

Einzugsgebiet ohne See	61,44 km²
Seeoberfläche	14,40 km²
Höhe über Meer	504 m
grösste Tiefe	87 m
mittlere Tiefe	44 m
Seevolumen	0,639 km³
Volumen des Hypolimnions (15 bis 87 m)	0,440 km³
mittlerer Abfluss (1976 bis 1985)	1,17 m³/s
mittlere Aufenthaltszeit	17 Jahre
Einwohner im Einzugsgebiet (Stand 1986)	10656
Einwohner an eine ARA angeschlossen	8578
Einwohner mit landwirtschaftlicher Verwertung	1895
nicht angeschlossene Einwohner	180

Bild 3c. Positionsbojen im Sempachersee (Winterbetrieb).

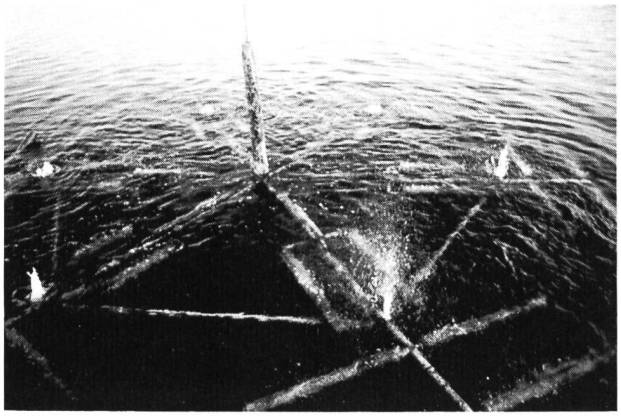


Bild 3d. Diffusor im grobblasigen Testbetrieb (Winter) mit Lufteintrag über 6 Düsen.

sind mit einer wirkungsvollen Phosphatfällung ausgerüstet. Die Abwässer des nördlichen Einzugsgebietes werden vom See ferngehalten und der ARA Surental zugeführt. Nachdem die abwassertechnische Sanierung zum grössten Teil abgeschlossen ist, wird der Sempachersee hauptsächlich durch die Erosion und Abschwemmung der überdüngten landwirtschaftlichen Böden belastet. Im Jahr 1979 wurde eine Düngerbilanz aufgrund der Tierhaltung, des zugekauften Mineraldüngers und des Klärschlammaustrages über das ganze Einzugsgebiet erstellt. Der jährliche Phosphoranfall wurde mit 306 t ermittelt, wobei für die pflanzenbaulichen Durchschnittserträge nur 180 t Phosphor benötigt würden. Die Überdüngung betrug demnach 126 t. Inzwischen wurden die Tierbestände (hauptsächlich Schweine) im Einzugsgebiet nochmals erhöht, so dass die Überdüngung aus den tierischen Abgängen weiter angestiegen ist. Verluste von 1 bis 2 Prozent des ausgebrachten Düngers durch Abschwemmung genügen bereits, um den Sempachersee dauernd zu überdüngen (3 bis 6 t P/Jahr).

Wichtige Nutzungen des Sempachersees sind die Trinkwasserentnahme und die Fischerei. Der Bezug von Trinkwasser beträgt bis 700 000 m³ pro Jahr, und die drei Berufsfischer fangen hauptsächlich Felchen. Der jährliche Fischfang inklusive Sportfischerei betrug in der Periode 1979 bis 1984 im Mittel 86,6 t bzw. 60 kg pro Hektare.

3. Technische Anlagen für den Sauerstoffeintrag und die Zwangszirkulation

Für die Zwangszirkulation (Destratifikation) und die Sauerstoffbegasung des Tiefenwassers wurde das System Tanytarsus ausgewählt, die technische Ausführung übernahm *E. Jungo*, dipl. Ing. ETH, Zürich. Das Verfahrensprinzip und die Anlagen im Sempachersee sind im Bild 2 dargestellt. In einer Landstation bei Eich sind in einem kleinen Gebäude zwei Kompressoren (Leistung 2 × 37 kW) untergebracht, daneben steht ein Tank für Flüssigsauerstoff (25 m³), der periodisch mit Lastwagen von einem Sauerstoffwerk aufgefüllt wird. Von der Landstation führen Leitungen zu 8 Eintragsorten im See, die in rund 85 m Tiefe liegen. In den Sommermonaten (1. Mai bis 1. Oktober) werden an den 8 Stellen über Diffusoren feinblasig 3 t Sauerstoff pro Tag eingebracht. Eine Diffusoreneinheit besteht aus 36 Metallfritten von 1 m Länge. Die austretenden kleinen Sauerstoffblasen lösen sich nach einer Aufstiegshöhe von etwa 15 m im umgebenden Wasser auf, wobei gleichzeitig ein Wasserstrom induziert wird, der jedoch die natürliche Temperaturstruktur nicht wesentlich verändert und in einer Tiefe von 55 bis 70 m entkoppelt wird [*Wüest* 1985]. In den Wintermonaten (Oktober bis Ende April) wird über acht Leitungen mit Hilfe von zwei Kompressoren Druckluft grobblasig eingepresst. An jedem der 8 Diffusoren sind zu diesem Zwecke 6 Düsen angebracht (Durchmesser 2 mm), der gesamte Luftdurchsatz beträgt 340 Nm³/h. Die Anlagen an Land und im See sind in den Bildern 3a bis 3d dokumentiert.

Tabelle 2. Technische Daten und Kosten der Anlagen im Sempachersee.

Zwangszirkulation (Oktober bis April)	
2 Kompressoren à 37 kW	
Luftdurchsatz	340 Nm³/h
8 Leitungen, Länge	12,3 km
Durchmesser 40 mm	
6 Eintragdüsen pro Diffusoreneinheit auf	ca. 85 m Tiefe
Stromkosten	0,11 Fr./kWh
Begasung mit Reinsauerstoff (Mai bis Oktober)	
Sauerstofftank	25 m³
8 Leitungen	
8 Diffusoren auf	ca. 85 m Tiefe
Sauerstoffdurchsatz	3 t O_2/Tag
Anlagekosten (inklusive Projektierung)	
Landanlagen	0,838 Mio Franken
Seeanlagen, Arbeitsfloss, Landeplatz	1,362 Mio Franken
Total	2,200 Mio Franken
Jährliche Betriebskosten	
Sauerstoffverbrauch	0,200 Mio Franken
Energie (Elektrisch, Treibstoffe, Kühlwasser)	0,045 Mio Franken
Unterhalt	0,042 Mio Franken
Total	0,287 Mio Franken

Die technischen Daten und Kosten der Anlagen können der Tabelle 2 entnommen werden. Die Anlagen werden vom Gemeindeverband Sempachersee betrieben, an dem 13 Gemeinden im Einzugsgebiet des Sempachersees beteiligt sind.

4. Ziele der Sanierung und Restaurierung von Seen

In der Schweiz sind für stehende Gewässer die Qualitätsziele in der bundesrätlichen Verordnung über Abwassereinleitungen vom 8. Dezember 1975 folgendermassen umschrieben:

- In der Uferzone sollen lästige Wucherungen von Algen und höheren Wasserpflanzen nicht auftreten.
- Der biologische Zustand der Freiwasserzone soll höchstens dem mesotrophen Produktionstypus entsprechen, d.h. höchstens eine mittlere organische Produktion aufweisen.
- Der Sauerstoffgehalt soll, unter Vorbehalt ungünstiger natürlicher Verhältnisse, zu keiner Zeit und in keiner Tiefe weniger als 4 mg O_2/l betragen.

- Die hygienischen Voraussetzungen für die Trinkwassergewinnung und das Baden sollen gewährleistet sein.

In Übereinstimmung mit dieser Verordnung lassen sich weitere limnologische Kriterien für einen See ableiten:

- Die *Phosphorkonzentration,* gemessen jeweils bei Vollzirkulation, sollte 20 bis 30 mg Gesamt-Phosphor pro m^3 nicht überschreiten.
- Die *Primärproduktion* sollte höchstens 150 bis 200 g Kohlenstoff pro m^2 und Jahr betragen.
- Die Algenproduktion sollte nicht zu übermässigem Sauerstoffschwund im Tiefenwasser führen.
- Die minimale Sichttiefe sollte 3 m nicht unterschreiten.

Diese Forderungen können nur erfüllt werden, wenn die Phosphorbelastung eines Sees eine kritische Grösse nicht überschreitet.

In der Tabelle 3 ist der Zustand des Sempachersees der Jahre 1983/84 mit diesen Qualitätszielen verglichen worden. Alle Anstrengungen zielen nun auf eine wesentliche Zustandsverbesserung hin. Dies soll einerseits mit Hilfe *externer Massnahmen,* d.h. Ursachenbekämpfung bei den Phosphorlieferanten, geschehen. Die Ursachenbekämpfung stützt sich auf drei teilweise schon verwirklichte Strategien.

1. *Abwassertechnische Sanierungen im Siedlungsgebiet:* Sammlung aller Abwässer und Reinigung in einer zentralen Abwasserreinigungsanlage (ARA) mit optimaler Phosphorfällung, oder Fernhaltung der Abwässer vom See. Diese Massnahme steht vor dem Abschluss.
2. *Abwassertechnische Sanierung im ländlichen Raum:* Verhindern von Abwassereinleitungen in die Gewässer, d.h. Sammlung der Abwässer in eine abflusslose Grube (landwirtschaftliche Verwertung) oder Ableitung in eine ARA (Sanierungsleitung).
3. *Massnahmen in der Landwirtschaft:* Verhindern der Überdüngung und Herabsetzung der Phosphorabschwemmung durch umweltgerechte Düng- und Anbaupraxis; Schaffung eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen Düngeranfall (Tierbeständen) und verfügbarer landwirtschaftlicher Nutzfläche; Schaffung von Speichervolumen für Jauche, um einen gezielten Einsatz von Hofdünger zu ermöglichen.

Die *see-internen Massnahmen* andererseits bezwecken als technische Unterstützungshilfen die schnellere Selbstregulation des Sees.

Mit der *Zwangszirkulation* soll jedes Jahr eine vollständige Durchmischung des Sees erreicht werden. Dabei wird sauerstoffarmes Tiefenwasser künstlich mit Hilfe grobblasiger Druckluft nach oben transportiert, so dass sich der See über die Oberfläche mit Sauerstoff sättigen kann. Im Gegensatz zum nahen Baldeggersee durchmischt sich der Sempachersee im Winter normalerweise ohne Zirkulationshilfe, doch wurden auch Jahre mit ungenügender Durchmischung (z.B. 1969, 1971, 1972, 1976, 1977) festgestellt. Mit zunehmender Eutrophierung wird zusätzlich noch eine chemische Schichtung im Tiefenwasser aufgebaut, die überwunden werden muss [*Joller* 1985].

Mit dem künstlichen *Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser* sollen sauerstofflose Verhältnisse im Hypolimnion und über dem Seegrund verhindert werden, damit die Bildung von reduzierten Verbindungen wie II-wertigem Mangan und Eisen, Ammonium, Methan und Sulfid unterbunden und die Phosphorrücklösung aus dem Sediment vermindert werden kann. Die verbesserten Sauerstoffverhältnisse vergrössern den Lebensraum für höhere Wasserorganismen, und es werden Voraussetzungen geschaffen, so dass sich eine für den See typische Faunazusammensetzung entwickeln kann.

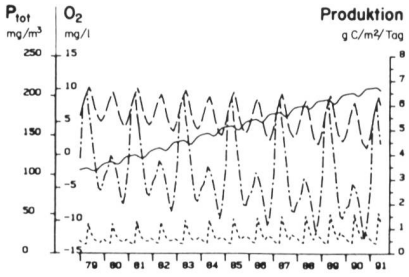
Der Sempachersee wird seit 50 Jahren mehr oder weniger systematisch limnologisch überwacht. Vorgängig zu see-internen Massnahmen wurde er in den Jahren 1975/76 und 1983/84 intensiver untersucht, und die Auswirkungen verschiedener gewässerschutztechnischer Massnahmen wurden von der EAWAG in Seemodellen prognostiziert [*Gächter* et al. 1983].

Im Bild 4 ist der Verlauf der mittleren Gesamt-Phosphorkonzentration, der mittleren Sauerstoffkonzentration im See und am Seegrund und der Primärproduktion bei verschiedenen Annahmen simuliert. Im Fall a) ist eine unveränderte jährliche Phosphorbelastung von 14,7 t (Stand 1977) angenommen worden, im Fall b) eine Verminderung von 50%. In der Variante c) ist aufgezeigt, wie der Sempachersee gleichzeitig auf eine Phosphorfracht-Reduktion von 50% und interne Massnahmen (Zwangszirkulation und Tiefenwasserbelüftung) reagieren würde. Rückblickend ist es erstaunlich, wie gut die Modelle das Verhalten des Sees voraussagten. In der Zeitperiode

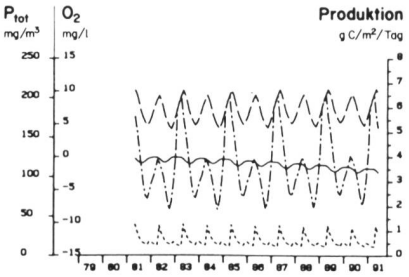
Tabelle 3. Zustand des Sempachersees vor den internen Massnahmen und Vergleich mit den Qualitätszielen.

Qualitätsziele für CH-Seen (VO über Abwasser-einleitungen)	*Sempachersee 1983/1984*
höchstens mesotropher Zustand, d.h. *Algenproduktion* kleiner als 150 g C/m^2 Jahr	380 g C/m^2 Jahr
Sauerstoffkonzentration überall und jederzeit mind. 4 mg O_2/l	Sauerstoffdefizit −14 mg O_2/l in 85 m Tiefe
Phosphorkonzentration weniger als 30 mg Gesamt-P/m^3	165 mg P/m^3
Phosphorzufuhr weniger als 4 t P/Jahr	14,7 t/J (1976/77) 14,6 t/J (1984/86)
Sichttiefe mindestens 3 m	1,2 m (Minimum)
Qualitätsziel für Trinkwasser weniger als 2 mg DOC/l	3 mg/l

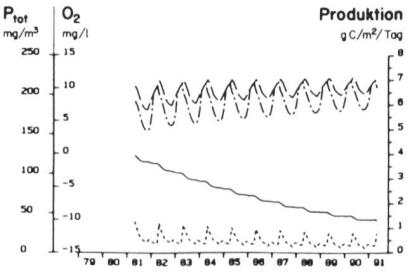
Bild 4. Seemodell der EAWAG für den Sempachersee,



a) bei einer gleichbleibenden Phosphorzufuhr von 14,7 t Gesamt-P pro Jahr (Stand 1977)



b) bei einer Verminderung der Phosphorzufuhr um 50%



c) bei einer Verminderung der Phosphorzufuhr um 50% künstlichem Sauerstoffeintrag im Sommer (7 t O_2 pro Tag) und Zwangszirkulation im Winter.

——— mittlere O_2-Konzentration
—·—·— O_2-Konzentration über Seegrund
——— Gesamt-Phosphor P_{tot}
-------- Produktion

1979 bis 1984 stieg die mittlere Phosphorkonzentration von 110 auf 160 mg P/m³ (Fall a). Dies weist deutlich darauf hin, dass die angestrebte Verminderung der Phosphorfrachten von 50% nicht erreicht wurde.

5. Auswirkungen der see-internen Massnahmen

Temperaturverteilung

Die Anlagen im Sempachersee wurden so konzipiert, dass der Sauerstoffeintrag während der Sommerstagnation möglichst tief und ohne Veränderung der vertikalen Temperaturstruktur erfolgt. Im Spätherbst und Winter soll hingegen durch den Lufteintrag die natürliche Durchmischung des Wasserkörpers beschleunigt werden.

Für die Jahre 1984/85 wies *Gächter* [1986] nach, dass sich der Verlauf der Temperatur am Seegrund verglichen mit früheren Jahren nicht signifikant veränderte. Trotzdem die aufsteigenden Gasblasen über den Diffusoren einen nach oben gerichteten Wasserstrom bewirken, der sich in 55 bis 70 m Tiefe entkoppelt, wurde eine Temperaturschichtung wie in früheren Jahren festgestellt. Bild 5 zeigt die Temperaturschichtung vor und während des Betriebes der see-internen Anlagen.

In den Winterperioden 1984/85 und 1985/86 wurde versuchsweise die Zwangszirkulation feinblasig über die 8 Diffusoren betrieben. Diese Betriebsart konnte auch nach mehrmonatiger Dauer die Konzentrationsgradienten im Tiefenwasser nicht beschleunigt abbauen, auf natürliche Weise wurde trotzdem bis zum Februar/März eine vollständige Durchmischung erreicht. Erstmalig wurde im Winter 1986/87 grobblasig zwangszirkuliert und bereits im Januar 1987 eine Vollzirkulation festgestellt. Ob dies auf das grobblasige Verfahren oder die klimatischen Verhältnisse zurückzuführen war, konnte nicht ausgemacht werden.

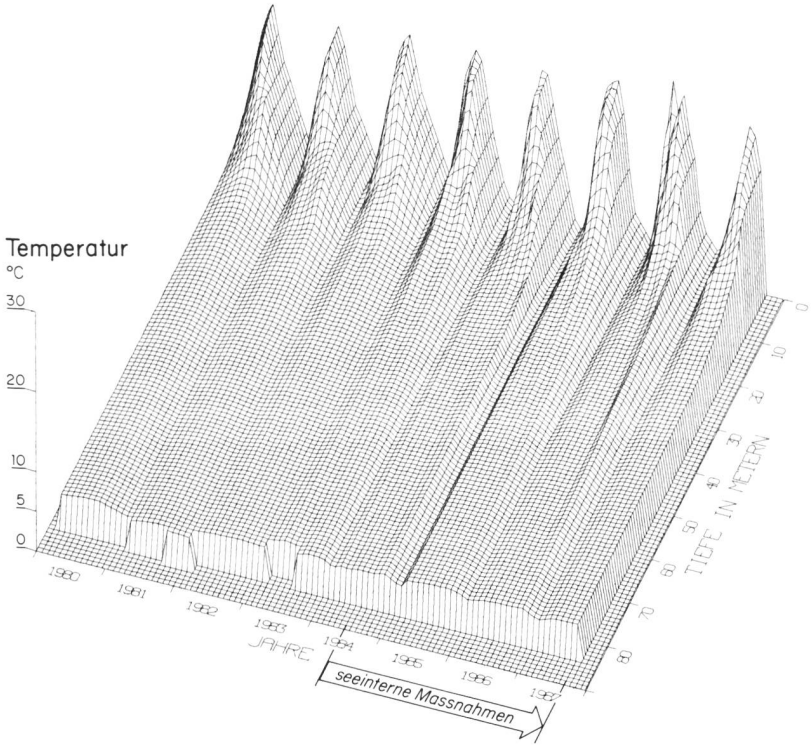


Bild 5. Saisonaler Verlauf der Temperatur (°C) in der Seemitte des Sempachersees vor und nach internen Massnahmen von 1980 bis 1987.

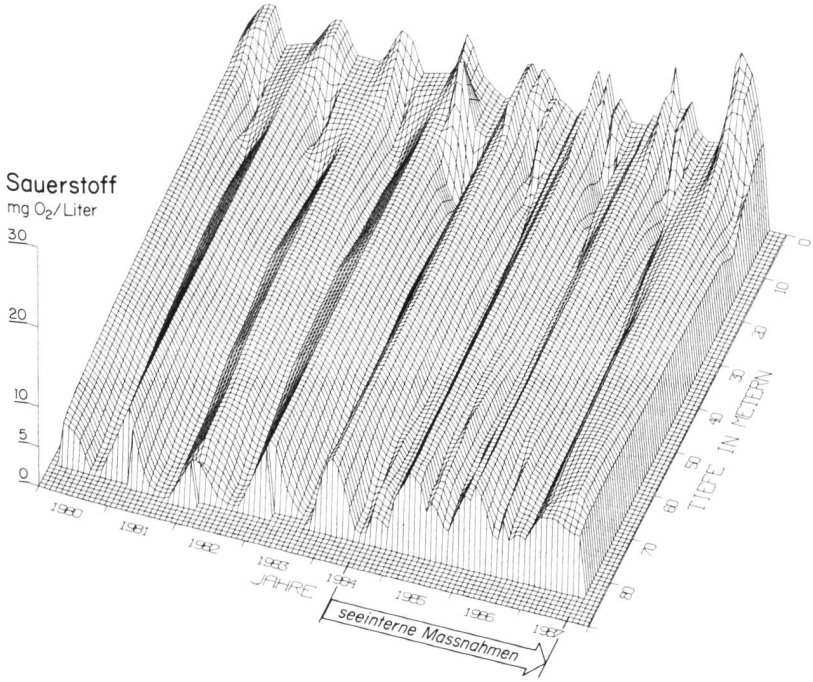


Bild 6. Saisonaler Verlauf des Sauerstoffs (mg O_2/l) in der Seemitte.

5.2 Sauerstoffverhältnisse

Die tiefenabhängige Veränderung der Sauerstoffkonzentration von 1980 bis Oktober 1987 ist in Bild 6 dargestellt. Der jahreszeitliche Verlauf der Sauerstoffkonzentration zeigt, dass der Sempachersee jeweils bis zum Februar/März durchmischt wurde und Sauerstoff bis in die grösste Tiefe gemessen wurde. Anschliessend setzte im Hypolimnion eine starke Sauerstoffzehrung ein, wobei im Spätherbst über Grund kein Sauerstoff mehr nachgewiesen und erhöhte Konzentrationen von reduzierten Substanzen (CH_4, NH_4^+, Mn^{2+}, NO_2^-) gemessen wurden. Der ab dem 6. Juli 1984 einsetzende künstliche Sauerstoffeintrag von 3 t O_2/Tag bewirkte bereits im ersten Jahr, dass keine anaeroben Verhältnisse eintraten. Im Jahr 1985 wurden anfänglich ab April 2 t und ab August 3 t O_2/Tag eingetragen, und das Qualitätsziel von mindestens 4 mg O_2/l im Hypolimnion wurde beinahe eingehalten. Dieses Ziel konnte im Jahr 1986 erreicht werden, als mit 3 t O_2/Tag gearbeitet wurde. Inzwischen sind zwei Diffusoren nochmals tiefer versetzt worden, um die Durchmischung der sedimentnahen Wasserschichten und die Sauerstoffanreicherung in den untersten Schichten zu erhöhen.

Aus Bild 6 kann weiter entnommen werden, dass die hypolimnische O_2-Begasung das in rund 10 m liegende herbstliche metalimnische Sauerstoffminimum nicht beeinflussen kann, dies war auch nie vorgesehen. Dieses O_2-Minimum ist direkt von der Algen-

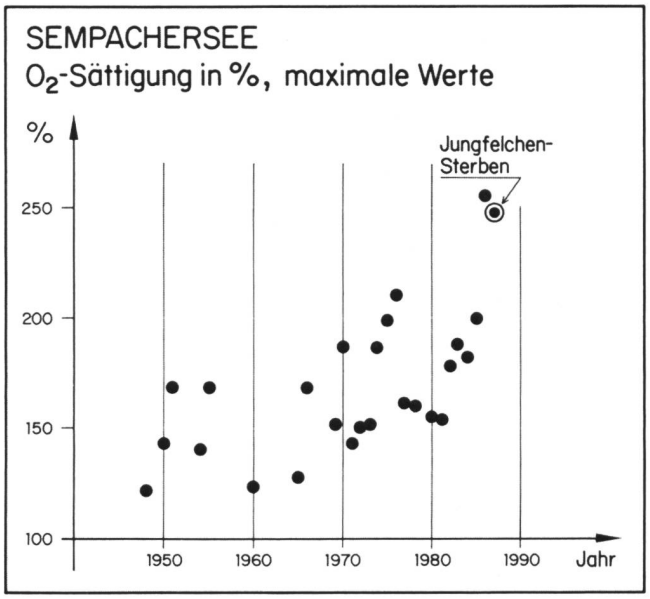


Bild 7a. Maximale Sauerstoffsättigungswerte (%) im Epilimnion des Sempachersees.

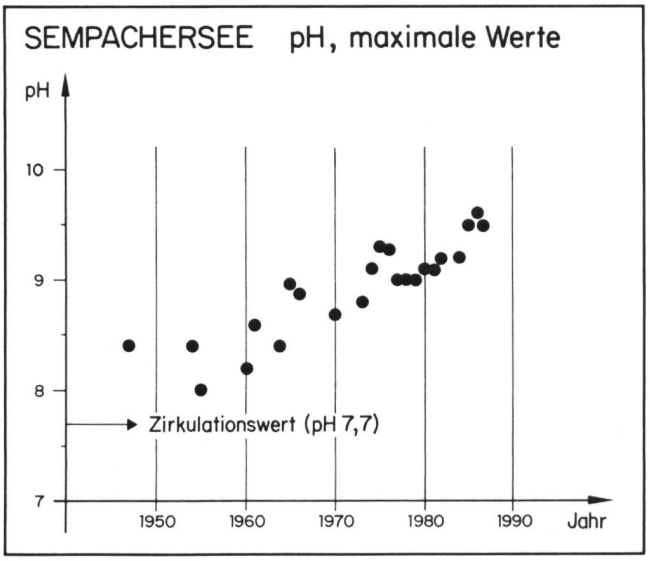


Bild 7b. Maximale pH-Werte im Epilimnion.

Tabelle 4. Gehalt an Sauerstoff und reduzierten Verbindungen im Hypolimnion des Sempachersees und berechneter Restsauerstoff in t.

Hypolimnion 15 bis 86 m (0,440 km³)		26.10.83 t	28.10.85 t	Faktor[2]
Sauerstoff	(O_2)	1430	2485	
Methan	CH_4	45	0	4,00
Sulfid	S^{2-}	0	0	2,00
Eisen	Fe^{2+}	5,7	6,9	0,14
Mangan	Mn^{2+}	26,6	7,1	0,29
Ammonium	NH_4-N	27,1	1,2	4,57
Nitrit	NO_2-N	5,6	0,6	1,14
O_2-Bedarf für die Oxidation der reduzierten Verbindungen		318,8	9,2	
Restsauerstoff[1]		+1111,2	+2475,8	

[1] Nach der Verordnung über Abwassereinleitungen müsste im Hypolimnion überall mindestens 4 mg O_2/l vorhanden sein, d.h. 1760 t O_2.

[2] Faktor = Umrechnungsfaktor für die vollständige Oxidation der reduzierten Verbindungen.

Bild 8. Jungfelchen mit Gasblasenkrankheit, bedingt durch die grosse Sauerstoffübersättigung (Baldeggersee 11. Mai 1986). Sauerstoffeintrag 579 t; 2. April bis 5. Oktober 1986).

produktion im Epilimnion abhängig und kann nur durch eine weitere Verminderung der Phosphorkonzentrationen im See verringert werden.

Im Epilimnion sind im April/Mai und August/ September deutliche O_2-Maxima erkennbar. Diese hohen Sauerstoffkonzentrationen fallen mit erhöhter Phytoplankton-Biomasse und Photosyntheseaktivität zusammen und sind ein weiteres Zeichen für die immer noch stark eutrophen Verhältnisse des Sempachersees.

Die steigende Tendenz der maximalen Photosyntheseraten, indirekt dargestellt mit Hilfe der maximalen Sauerstoffsättigung und der maximalen pH-Werte, im Zeitraum 1950 bis 1987 ist in Bild 7 aufgezeichnet. Die jeweils in einem Jahr festgestellten Maxima-Werte steigen bis auf 250% Sauerstoffsättigung bzw. pH 9,6. Die starke Sauerstoffsättigung führte im Frühjahr 1987 erstmals zu einem Felchenbrütlingsterben, einer Erscheinung, die auch von anderen hocheutrophen Seen der Schweiz, wie z.B. Baldeggersee und Greifensee, gemeldet wurde. Die etwa 2 cm grossen Felchen wiesen am Körper grosse Gasblasen auf und verendeten durch innere Verletzungen (Bild 8). Die diagnostizierte Gasblasenkrankheit ist bei starker Sauerstoffsättigung und bei raschem Wechsel des Gasdruckes feststellbar. Dieses Fischsterben steht in direktem Zusammenhang mit der Eutrophierung und nicht mit den seit 1984 betriebenen see-internen Massnahmen. Die starke Sauerstoffsättigung beschränkt sich jeweils auf die oberflächennahen Schichten (0 bis 3 m Tiefe). Bei der Aufzucht von Felchenbrütlingen sollte deshalb die Wasserentnahme aus diesen Tiefen gemieden werden. Im Sempachersee werden seit 1986 die Jungfelchen in Netzkäfigen aufgezogen. Dies ermöglicht eine Haltung der Felchen unterhalb der kritischen Tiefe von 0 bis 3 m. Mit diesem Verfahren kann das Felchenbrütlingsterben, wie die Erfahrungen aus dem Jahr 1987 zeigen, umgangen werden.

5.3 Reduzierte Verbindung und Restsauerstoff

Durch den künstlichen Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser werden die Redox-Verhältnisse so verändert, dass die reduzierten Verbindungen oxidiert werden und deren Konzentrationen sich vermindern.

In der Tabelle 4 sind die Gehalte an Methan, Sulfid, Eisen, Mangan, Ammonium und Nitrit im Volumen 15 bis 86 m – jeweils im Oktober 1983 und Oktober 1985 – zusammengestellt, um die Auswirkungen des Sauerstoffeintrages zu verdeutlichen. Zu bemerken ist, dass trotz früheren anaeroben Verhältnissen im Sempachersee *Sulfid* nie nachgewiesen wurde. Schon nach der erstmaligen Tiefenwasserbegasung verschwand *Methan* vollständig im Hypolimnion.

Deutlich nahmen auch die Mangan-, Ammonium- und Nitritkonzentrationen ab. *Eisen* lag schon in früheren Jahren in niederen Konzentrationen vor, und die veränderten Redoxverhältnisse führten nicht zu einer Verminderung des Eisengehaltes im Hypolimnion.

Die saisonale Verteilung von *Mangan* in der Zeit von 1980 bis 1987 ist im Bild 9 dargestellt. Mangan reagiert bei fal-

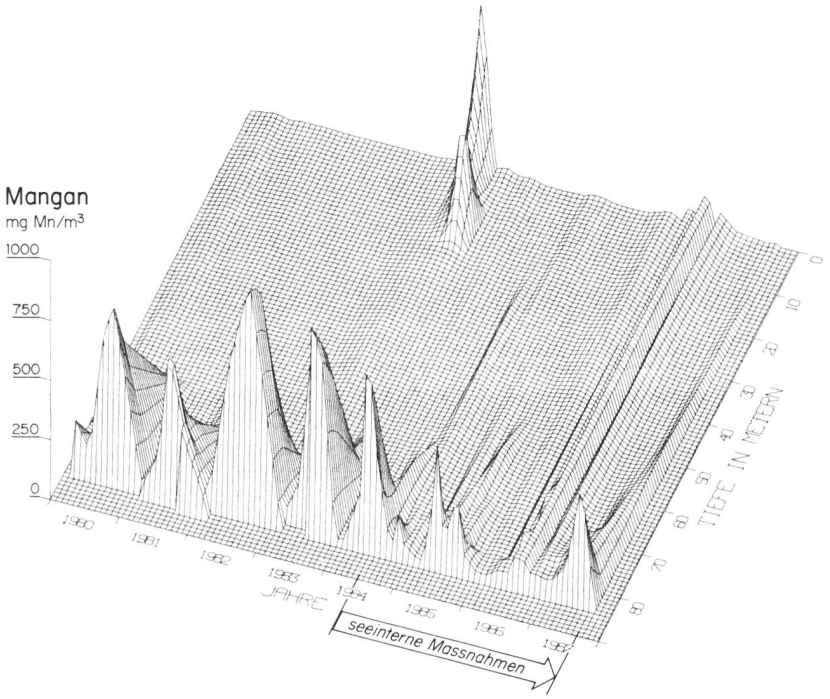


Bild 9. Saisonaler Verlauf der Mangankonzentration (mg Mn/m³) in der Seemitte des Sempachersees vor und nach internen Massnahmen.

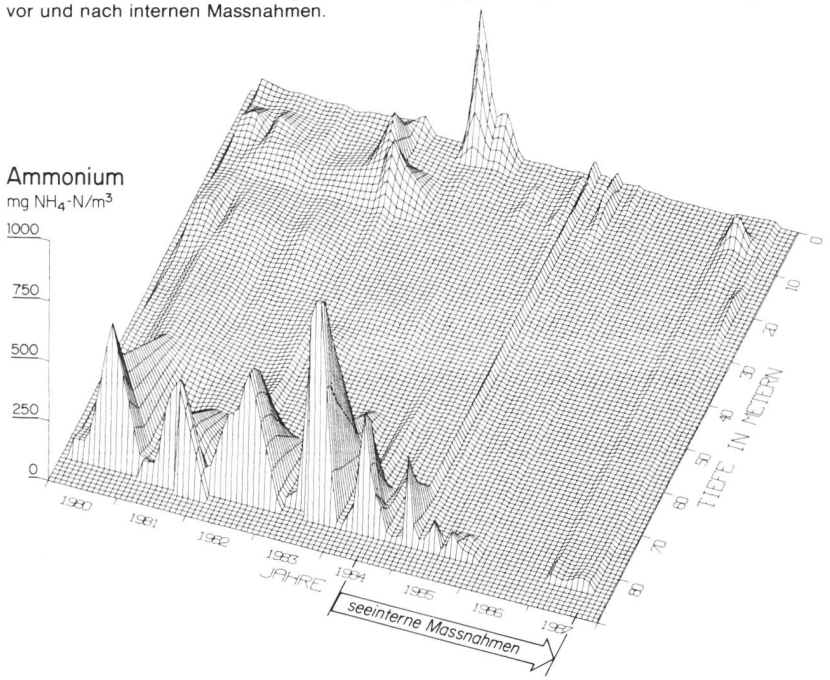


Bild 10. Saisonaler Verlauf der Ammoniumkonzentration (mg NH_4-N/m³) in der Seemitte.

lenden Sauerstoffkonzentrationen rasch mit einer typischen Anreicherung über dem Sediment. Während in früheren Jahren bis 1000 mg Mn/m³ über dem Sediment gemessen wurden, liegen die Werte heute deutlich niedriger. Für die epilimnische Spitze im Juni 1983 konnte keine Erklärung gefunden werden. Ein ähnliches Verhalten wie Mangan zeigt auch *Ammonium* (Bild 10), das bei einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration deutlich zunimmt. Seit den internen Massnahmen liegen die Ammoniumkonzentrationen tiefer. Dies bedeutet, dass die Sedimente weniger NH_4^+ abgeben oder dass freigesetztes NH_4^+ rascher zu Nitrat oxidiert wird.

Nitrit zeigte im Tiefenprofil deutliche Veränderungen (Bild 11). Vor dem Sauerstoffeintrag wurden im Herbst über dem Sediment bis zu 190 mg NO_2-N/m³ gemessen. Konzentrationen von mehr als 50 mg NO_2-N/m³ gelten für Salmoniden (forellenartige Fische) als toxisch. Dank den verbesserten Sauerstoffverhältnissen im Hypolimnion lagen die Werte seit 1984 unter diesem Wert. Die epilimnischen Konzentrationen verblieben im gleichen Schwankungsbereich (0 bis 40 mg NO_2-N/m³). Vor Beginn des künstlichen Sauerstoffeintrages konnten jeweils in den Tiefen 70 bis 86 m im Herbst deutliche *Nitrat*abnahmen beobachtet werden, wobei die Werte über dem Sediment bis auf 20 mg $N0_3$-N/m³ fielen, während im Frühjahr nach der Vollzirkulation wieder rund 700 mg NO_3-N/m³ gemessen wurden. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich mehr Nitrat durch Denitrifikation aufgebraucht wurde. Bereits nach einmaligem O_2-Eintrag trat dieser Nitratgradient im Hypolimnion nicht mehr auf. Die epilimnischen Konzentrationen schwankten im üblichen Rahmen und fielen wegen der Assimilationstätigkeit der Algen im Sommer bis zur Nachweisgrenze von 10 mg NO_3-N/m³. Bezüglich der Stickstoffverbindungen NH_4^+, NO_2^-. NO_3^- lässt sich zusammenfassen, dass heute NH_4^+ und NO_2^- im Tiefenwasser in geringeren Konzentrationen auftreten und der anorganische Stickstoff heute hauptsächlich in der vollständig oxidierten Form von Nitrat vorliegt (Bild 12). Seit der Sauerstoffbegasung hat die Nitratkonzentration im Hypolimnion zugenommen.

Der Sauerstoffbedarf für die Oxidation der reduzierten Verbindungen wie S^{2-}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, NH_4^+, NO_2^- und Methan (CH_4) lässt sich berechnen. Bei bekanntem Gehalt an Sauerstoff und an reduzierten Verbindungen lässt sich der *Restsauerstoff* ermitteln. In Tabelle 4 ist der Sauerstoffgehalt, der Sauerstoffbedarf für die vollständige Oxidation der erwähnten Verbindungen und der noch vorhandene Restsauerstoffgehalt im Volumen 15 bis 86 m vor und nach den internen Massnahmen zusammengestellt. Der Vergleich der Oktoberwerte 1983 und 1985 zeigt, dass dank dem künstlichen O_2-Eintrag der Sauerstoffbedarf um rund 310 t O_2 abgenommen hat. Der Restsauerstoffgehalt war 1985 erstaunlicherweise deutlich höher, als aufgrund des künstlich eingebrachten Sauerstoffs von rund 530 t zu erwarten war. Unter der Annahme einer gleichmässigen Verteilung der Sauerstoffkonzentration im Hypolimnion wäre schon im Jahr 1985 die Zielvorstellung von mindestens 4 mg O_2/l erfüllt gewesen.

Die genauen Tiefenprofile des Sauerstoffgehaltes unter Berücksichtigung der reduzierten Substanzen jeweils im Frühjahr (Vollzirkulation) und Herbst (Oktober) vor und nach den internen Massnahmen sind im Bild 13 aufgezeichnet. Da jeweils im Frühjahr eine Vollzirkulation herrscht, sind die Profile für die jeweilige Sauerstoffzehrung direkt vergleichbar. Im Herbst 1983 führte die Sauerstoffzehrung im Hy-

polimnion zu einem Restsauerstoffgehalt über dem Sediment von minus 15 mg O_2/l. Seit Inbetriebnahme der Sauerstoffbegasung konnten keine negativen Werte festgestellt werden. Das Herbstprofil 1986 zeigt, dass das Sauerstoffqualitätsziel von 4 mg O_2/l bis in die grösste Tiefe eingehalten werden konnte.

5.4 Phosphorkreislauf und N:P-Verhältnisse

Die Eutrophierung des Sempachersees kann mit Hilfe der Phosphorkonzentration gut verfolgt werden, die von 1955 bis 1985 von etwa 15 bis auf 160 mg Gesamt-P/m³ anstieg. Obwohl seit den 70er Jahren grosse Anstrengungen unternommen wurden, um die abwasserseitige Phosphorzufuhr zu erniedrigen, konnte erst ab 1982 ein Stationärzustand erreicht werden (Bild 1). Das Ziel von Sanierung und Restaurierung ist es, die Phosphorzufuhr zum See und die Phosphorkonzentration im See zu reduzieren. Mit dem hypolimnischen Sauerstoffeintrag sollte auch eine Verminderung der Phosphor-Rücklösung aus den Sedimenten erreicht werden.

Der saisonale Verlauf von Gesamt-P und gelöstem PO_4-P in der Seemitte von 1980 bis 1987 ist in Bild 14a und b dargestellt. Da in den letzten Jahren der Phosphorgehalt des Sees etwa gleich war, sind im Epilimnion die normalen Schwankungen festzustellen mit der typischen Zehrungserscheinung durch die Algenassimilation während der Sommerstagnation. Seit der künstlichen Belüftung sind die herbstlichen Maximalwerte über dem Sediment aber geringer ausgefallen. Dies kann teilweise auch durch die mit der Belüftung verursachte Wasserdurchmischung in den untersten Schichten erklärt werden.

Um den Gehalt an Gesamt-P und gleichzeitig Nitrat-N im Hypolimnion zu veranschaulichen, wurde deren Verlauf von 1954 bis 1987 in Bild 15 aufgezeichnet. Die jahreszeitlichen Schwankungen ermöglichen eine Aussage über Phosphorrücklösung und Änderungen des Nitratgehaltes, bedingt durch Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse.

Vergleicht man die März/April-Werte mit denjenigen von Oktober/November, so fällt die jeweilige Zunahme des Phosphorgehaltes auf. Die jährliche hypolimnische Phosphoranreicherung machte in den letzten 10 Jahren bis zu 32 t aus. In den Jahren 1985/86 fiel die Rücklösung mit etwa 12 t doch niedriger aus. Ab Oktober 1986 bis Mai 1987 trat eine markante Abnahme des

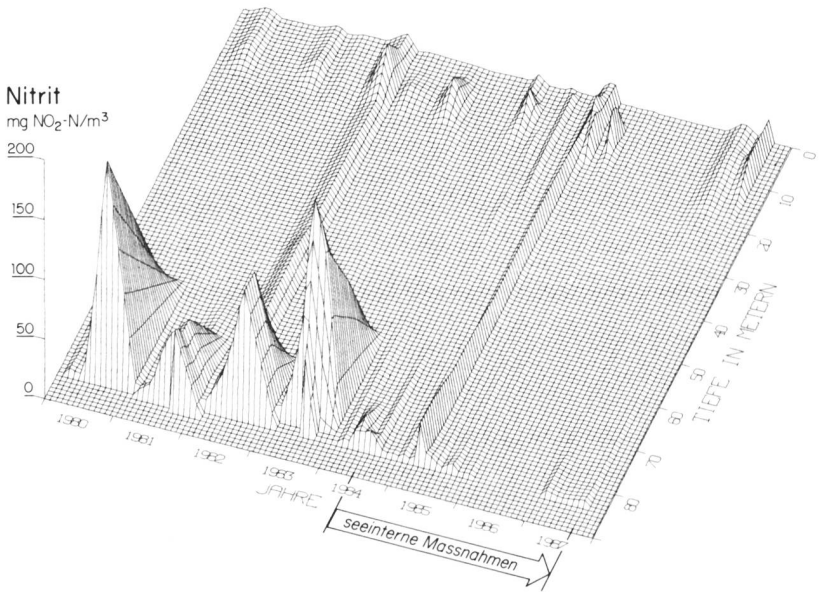


Bild 11. Saisonaler Verlauf der Nitritkonzentration (mg NO_2-N/m³).

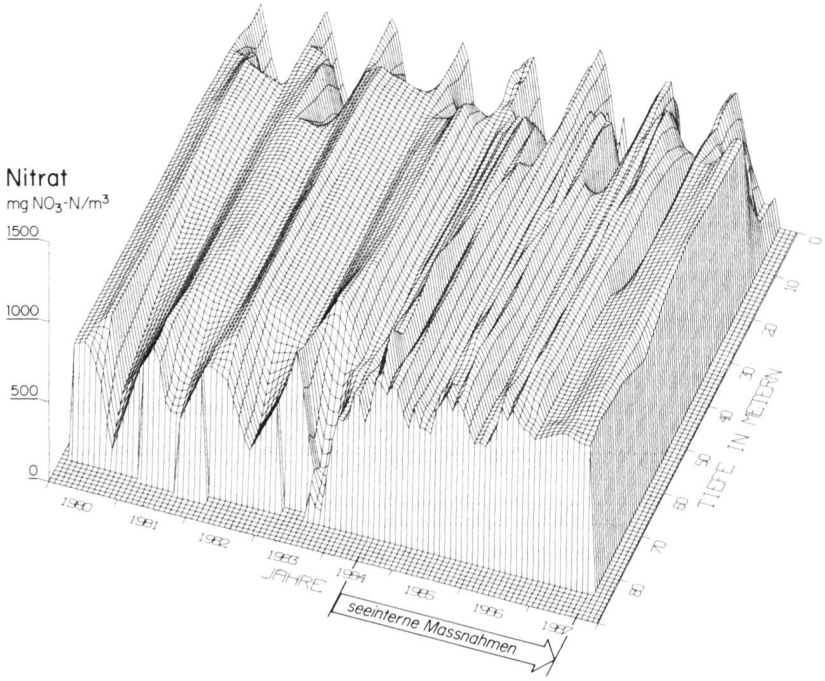


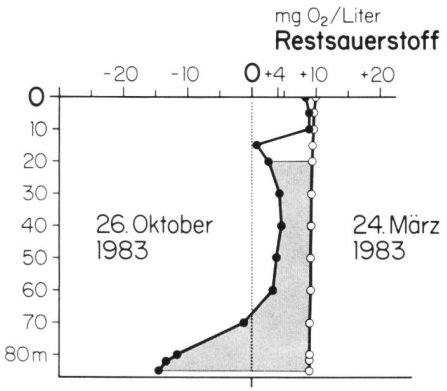
Bild 12. Saisonaler Verlauf der Nitratkonzentration (mg NO_3-N/m³).

Phosphorgehaltes im Volumen 15 bis 86 m ein, die aber im Sommer wieder rückgängig gemacht wurde. Neuere Untersuchungen von *Gächter* [1987] zeigen, dass ohne deutliche Verringerung der Phosphorbelastung die Sedimente eines eutrophierten Sees auch unter aeroben Verhältnissen Phosphor ins Wasser abgeben und die Rücklösungsprozesse nicht genügend unterbunden werden können.

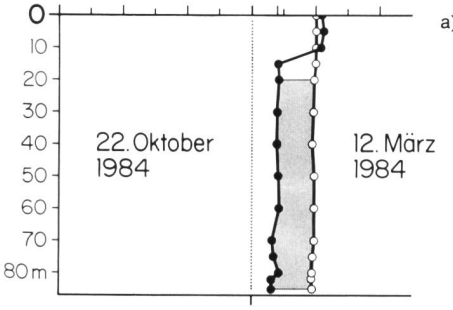
Im Bild 15 ist gleichzeitig auch der Nitratgehalt im Volumen 15 bis 86 m aufgetragen. In den Algen wird ein N:P-Gewichtsverhältnis von 7:1 als ideal angenommen, was voraussetzt, dass auch im Wasser dieses Verhältnis vorliegt. Da in unserem Fall Gesamt-P mit NO_3-N verglichen wird und ein Teil des Gesamt-Phosphors physiologisch nicht direkt verwertbar ist, dürfte ein N:P-Verhältnis von 10:1 dieser Idealvorstellung entsprechen. Die Graphik ist so gewählt, das bei diesem N:P-Verhältnis die Kurven zusammenfallen.

Betrachtet man die N:P-Verhältnisse jeweils während der Vollzirkulation (März), so hat sich dieses Verhältnis im Verlauf der letzten 30 Jahre stark verändert. Bis Anfang der 70er Jahre war – bezogen auf Phosphor – Stickstoff im Überfluss vorhanden. In den letzten 10 Jahren hat sich das Verhältnis zu ungunsten des Stickstoffs verschoben, und unter bestimmten Umständen

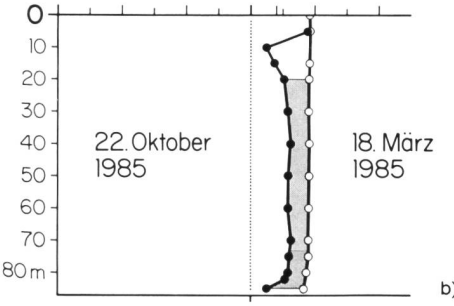
Bild 13. Sauerstoffprofile im Sempachersee jeweils im März und Oktober vor und nach internen Massnahmen. Restsauerstoff (mg O_2/l) unter Berücksichtigung der Oxidation der gelösten reduzierten Verbindungen.



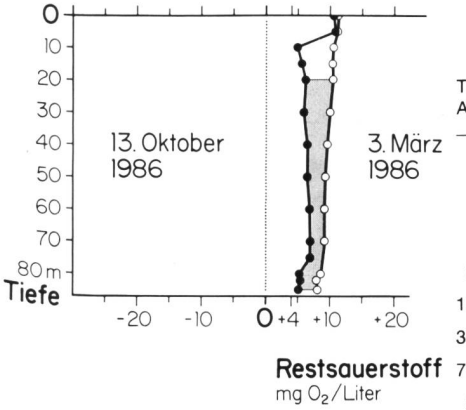
a) Vor internen Massnahmen.



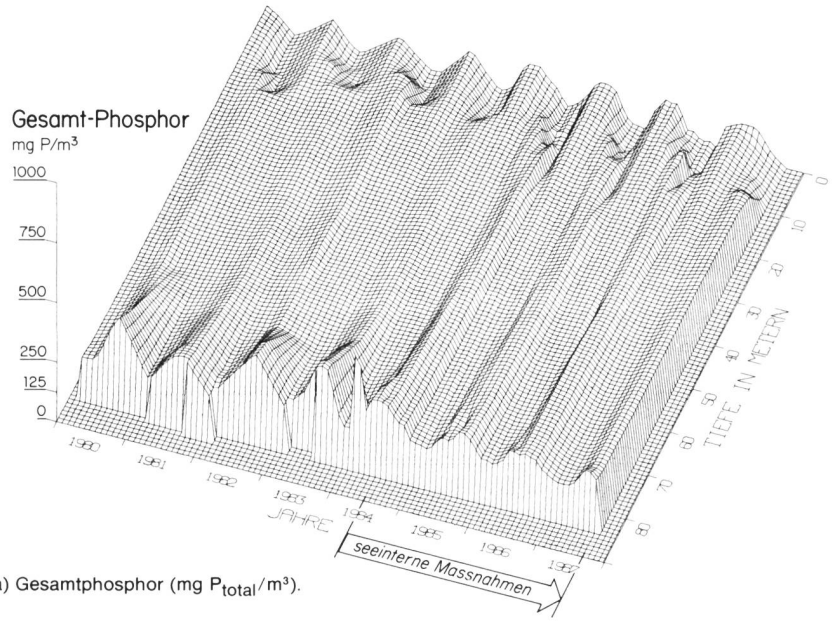
b) Nach internen Massnahmen (Sauerstoffeintrag 264 t; 6. Juli bis 1. Oktober 1984).



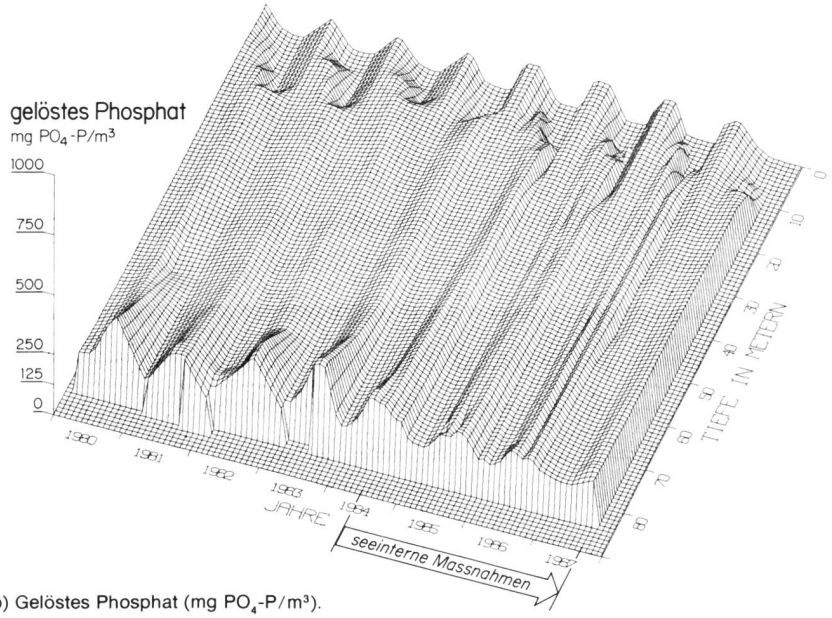
Sauerstoffeintrag 529 t; 5. April bis 5. November 1985.



Sauerstoffeintrag 579 t; 2. April bis 5. Oktober 1986.



a) Gesamtphosphor (mg P_{total}/m^3).



b) Gelöstes Phosphat (mg PO_4-P/m³).

Bild 14. Saisonaler Verlauf der Phosphorkonzentrationen in der Seemitte vor und nach internen Massnahmen.

Tabelle 5.
Algenbiomasse, Anteil der Blaualgen und Zellzahl von *Aphanizomenon flos-aquae f. gracile.*

	Algenbiomasse g/m² (0 bis 15 m)	Blaualgenbiomasse g/m² (0 bis 15 m)	*Aphanizomenon flos-aquae* Zellen/Liter
2. Juli 1984	29,5	27,5	nicht festgestellt
16. Juli 1984	37,8	32,3	500000
30. Juli 1984	75,8	53,9	22000000
7./8. August 1984	Fischsterben		Zusammenbruch!
8. August 1984	84,6[1]	55,2[1]	260000[2]
13. August 1984	55,2	27,6	670000
27. August 1984	27,9	10,9	180000
10. September 1984	34,3	16,0	120000

[1] Probe nur aus 0 m Tiefe
[2] Hauptsächlich Dauerzellen von Aphanizomenon

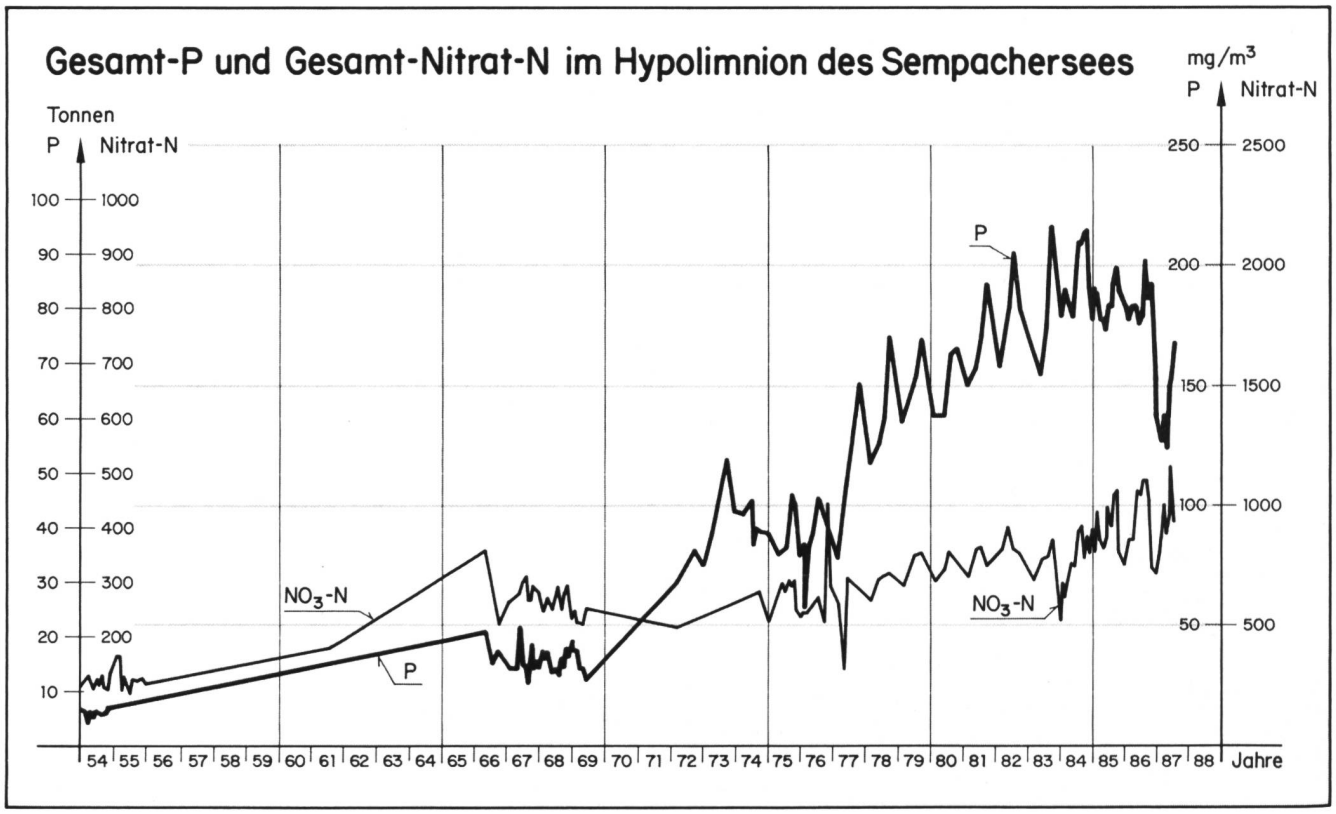


Bild 15. Verlauf des Gesamt-Phosphor- und -Nitratgehaltes im Hypolimnion des Sempachersees (Volumen 15 bis 86 m).

kann auch Stickstoff das Algenwachstum begrenzen. Es gibt aber Blaualgen, die bei Stickstofflimitierung den gelösten elementaren Stickstoff (N_2) binden können. Diese physiologischen Bedingungen können zu einem Konkurrenzvorteil von unliebsamen Blaualgen führen.

Tatsächlich kam es dann im Sommer 1984 zu einer Massenentwicklung von *Aphanizomenon flos-aquae,* die zur N_2-Fixierung befähigt ist. Anfang August 1984 brach diese Aphanizomenon-Population zusammen, und es kam zu einem massiven Fischsterben, das die Öffentlichkeit stark bewegte (Tabelle 5). Da kurz vorher mit dem künstlichen Sauerstoffeintrag begonnen worden war, wurde auch in wissenschaftlichen Kreisen ein Zusammenhang zwischen Fischsterben und O_2-Belüftung vermutet. Die eingesetzte Expertengruppe wies nach, dass die Symptome des Fischsterbens auf eine Vergiftung mit Algentoxinen hinwiesen und der gleichzeitige hypolimnische O_2-Eintrag sich nicht auf das epilimnische Fischsterben auswirken konnte [*Stadelmann* et al. 1985].

Verglichen mit den Frühjahrswerten, wurden jeweils im Herbst höhere Nitratgehalte ermittelt. Seit den internen Massnahmen scheint die Nitratanreicherung im Herbst zuzunehmen, wobei nicht unterschieden werden kann, ob dies auf vermehrte Nitrifikation oder verminderte Denitrifikation zurückzuführen ist. Auf den Stickstoffkreislauf und die Wechselwirkungen zwischen Ammonium, Nitrit und Nitrat ist im früheren Abschnitt schon eingegangen worden.

6. Externe Massnahmen im Einzugsgebiet

Neben den see-internen Massnahmen wurden alle Anstrengungen weitergeführt, um die Phosphorzufuhr aus dem Einzugsgebiet und über Kläranlagenabläufe zu vermindern. Das Vorgehen und die Kontrollverfahren sind im Bild 16 dargestellt.

6.1 Erfassung der Abwassereinleiter in den Zuflüssen

Nach einer ersten Begehung der Zuflüsse des Sempachersees durch die Gruppe *Gächter* [1979] wurden in den Jahren 1981 bis 1983 alle Zuflüsse von den Quellen bis in die See-Einmündungen und die Seeufer abgeschritten und auf Abwassereinleitungen, Entwässerungen und Drainagen untersucht. Nachdem die Wasserführung abgeschätzt und eine Phosphoranalyse ausgeführt worden war, wurden die Einleitungen in einen Katasterplan eingetragen. Insgesamt wurden 110 km Bachstrecke und 30 km Seeufer kontrolliert und 1320 Einleiter identifiziert [*Kost* et al. 1984].

Unter der Annahme, dass alle Bäche und Einleitungen weniger als 60 mg Phosphor pro m³ aufweisen, könnte mit einer jährlichen P-Zufuhr von weniger als 3 t gerechnet werden, und die gefährliche Phosphorbelastung wäre unterschritten. Deshalb wurden die Einleitungen mit Hilfe der Phosphoranalyse in drei Klassen eingeteilt (Tabelle 6), um die notwendigen Sanierungen zu staffeln. Nur 21 % der Analysen lagen unter 60 mg PO_4-P/m³, 32 % der Einleiter lagen über diesem Wert. In einem ersten Schritt wurden die Einleitungen von mehr als 160 mg P/m³ genauer untersucht und den Ur-

Tabelle 6. Ergebnisse des Abwasser-Einleitungskatasters an den Zuflüssen zum Sempachersee 1981 bis 1983.

Länge der kontrollierten Bäche	109,4 km	
Länge des kontrollierten Seeufers	30,0 km	
Anzahl der Bachproben	340	
Anzahl der identifizierten Einleitungen	1320	100 %
Konzentration weniger als 60 mg PO_4-P/m³	270	21 %
Konzentration 60 bis 160 mg PO_4-P/m³	230	17 %
Konzentration mehr als 160 mg PO_4-P/m³	200	15 %
Keine chemische Analyse oder trocken	620	47 %

sachen für die hohen Phosphorkonzentrationen in Zusammenarbeit mit den Gemeinden nachgegangen. Bei den meisten dieser 200 Abwassereinleitungen konnte der Verursacher gefunden werden, und die notwendige Sanierung wurde terminlich festgelegt. Diese Kontrolle der Zuflüsse gab nicht nur Auskunft über Abwassereinleitungen im ländlichen Raum, sondern auch Rechenschaft über immer noch bestehende Abwassereinleitungen im Siedlungsgebiet, die eigentlich an eine Kläranlage angeschlossen sein sollten. Die aufgrund dieser Kontrollmassnahme zu erwartende Phosphorverminderung wurde mit 2,4 t pro Jahr abgeschätzt. Die Sanierung der Abwassereinleiter wird laufend überwacht; ein grosser Teil ist verwirklicht.

6.2 Massnahmen in der Landwirtschaft

Die im Jahre 1979 durchgeführte Erhebung der 454 landwirtschaftlichen Betriebe ergab folgende Ergebnisse [*Baumann* 1984]:

- Die Landwirtschaft im Einzugsgebiet zeichnete sich durch eine hohe Tierhaltung, insbesondere Schweinehaltung aus. Die flächenbezogene Tierbelastung betrug im Mittel 2,9 *Düngergrossvieheinheit* (DGVE) pro Hektare, d.h. die Düngerbelastung betrug im Mittel allein durch den hofeigenen Tierdünger 45 kg Phosphor pro Hektare und Jahr.
- Rund 20% der Betriebe wiesen sogar mehr als 4 DGVE pro Hektare auf.
- Rund 30% der Betriebe hatten zu wenig Volumen für eine genügend lange Stapelung des flüssigen Hofdüngers während der Winterzeit.
- Bei vielen Betrieben fehlte eine genügende Ausbringfläche für die Verwertung der Hofdünger, oder es fehlten schriftliche Güllenabnahmeverträge.
- Fast alle verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen wurden mit Hofdünger gedüngt, unabhängig davon, ob der Boden dazu geeignet war oder nicht.
- Ein Düngbewirtschaftungsplan unter Berücksichtigung der Belastbarkeit der Böden und des Pflanzenbedarfes fehlte bei den Betrieben, und dies führte zu unnötigen Düngerzukäufen.
- Öfters wurden häusliche Abwässer und Düngstoffe aus undichten Gruben, Sammlern oder Plätzen in die Bäche eingeleitet.

Anschliessend auf die Erhebung wurde bei 25% Betrieben eine Sanierungsverfügung erlassen, die sich auf die Wegleitung für den Gewässerschutz in der Landwirtschaft des Bundes abstützte. Mit Hilfe der Zuflusskontrolle wurden die sanitären Anlagen der Bauerngehöfte durch Anschluss an bestehende Güllengruben saniert. Im Einzugsgebiet des Sempachersees setzte eine rege Bautätigkeit von Güllengruben ein. Die Disziplin der Landwirte führte in neuerer Zeit zu einem verminderten Güllenaustrag während der Vegetationsruhe. Die notwendige Reduktion der Tierbestände konnte aber nur in Einzelfällen erreicht werden. Die Statistik des Bundesamtes für Landwirtschaft zeigte inzwischen, dass in der Periode 1978 bis 1983 die Schweinebestände in den Gemeinden um den Sempachersee massiv aufgestockt wurden und somit die Düngerbelastung der Böden weiterhin zugenommen hat. Die Überdüngung der Böden infolge zu hoher

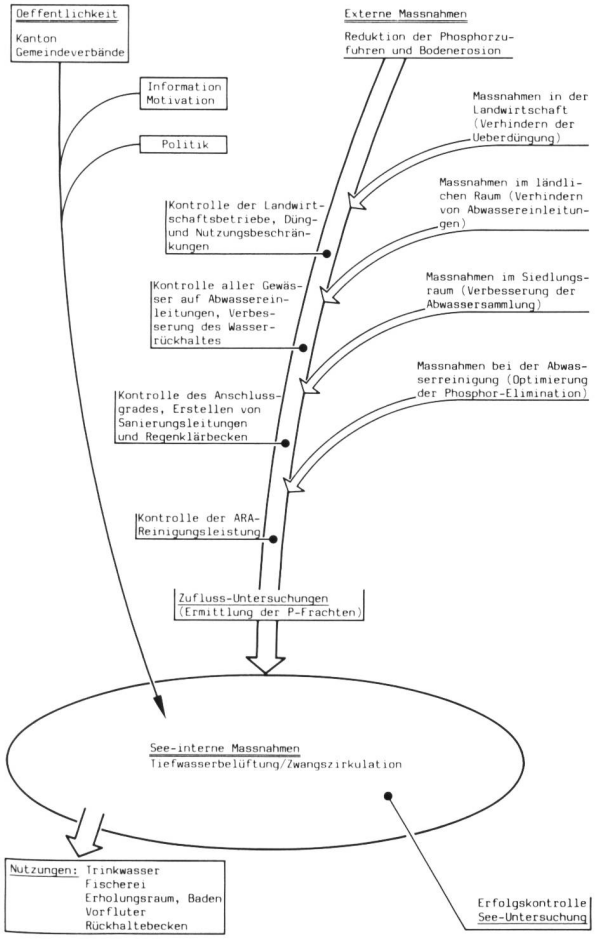


Bild 16. Konzept und Kontrollverfahren zur Sanierung (externe Massnahmen) und Restaurierung (see-interne Massnahmen) des Sempachersees.

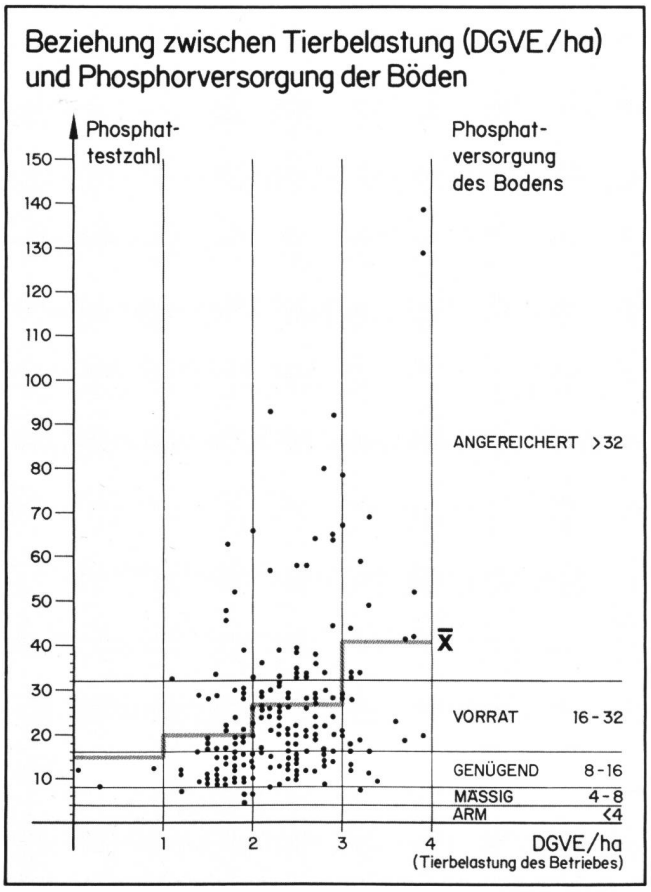


Bild 17. Beziehung zwischen Tierbelastung (DGVE/ha) und Phosphorversorgung der Böden (Phosphat-Testzahl). Aus Erhebungen im Einzugsgebiet des Sempacher-, Baldegger- und Hallwilersees. Mittlere Tierbelastung im Sempachersee rund 3 DGVE/ha.

Zentralstelle für Ökologie Dr. *J. Blum*

Tierbestände ist im Bild 17 aufgezeigt. Böden mit einer genügenden Phosphorversorgung weisen eine Phosphat-Testzahl von 8 bis 16 auf. Bereits bei einer Tierbelastung von 2 bis 3 DGVE/ ha weisen die Böden im Mittel einen deutlichen Vorrat an Phosphor auf, der den Entzug durch Pflanzen übersteigt. Es kommt somit zu einer fortschreitenden Überdüngung und Phosporanreicherung in den obersten Bodenschichten. Ohne eine deutliche Reduktion der Tierbestände, sogar je nach Verhältnissen unter 3 DGVE/ha, kann die Überdüngung der Böden und die Abschwemmung der Düngstoffe in die Gewässer nie verhindert werden, und der Sempachersee wird in seinem hoch eutrophen Zustand verbleiben.

Als weitere Massnahme, um den Nährstoffaustrag aus landwirtschaftlich genutzten Flächen zu vermindern, wurde im Jahre 1986 ein Schutzgürtel um den Sempachersee ausgeschieden [Gemeindeverband Sempachersee 1986]. In diesem Ufergürtel von 207 Hektaren soll je nach Bodenbeschaffenheit, Vernässungsgrad und Nähe zu Seeufer und Gewässern die Düngung und Bewirtschaftung eingeschränkt werden. Dieser Ufergürtel umfasst nur 3% des gesamten Einzugsgebietes, und es ist vorgesehen, weitere Bacheinzugsgebiete in einem ähnlichen Verfahren zu untersuchen. Als erstes Testgebiet wurde das Einzugsgebiet des Lippenrütibaches ausgewählt, das den höchsten flächenspezifischen Phosphoraustrag (356 kg P/km² Jahr) aufweist.

6.3 Zuflussuntersuchungen als Kontrolle der Gewässerschutzmassnahmen

Vor zehn Jahren wurden während eines Jahres (Oktober 1976 bis Oktober 1977) an 8 Zuflüssen zum Sempachersee Untersuchungen zur Ermittlung der Phosphorfrachten durchgeführt. Unter Berücksichtigung der damals noch nicht abgeschlossenen Abwassersanierung, der Kläranlagenabläufe und der Niederschläge auf die Seeoberfläche wurde eine Gesamtphosphorzufuhr von 14,7 t pro Jahr ermittelt. Die Aufschlüsselung der Beiträge aus Abwasser, Bodenerosion/ Landwirtschaft und Niederschlägen ergab 1976/77 die in Tabelle 7 aufgelistete Verteilung. Unter Berücksichtigung der damaligen Unsicherheiten auf dem Abwasseranteil (5,5 bis 9,3 t P pro Jahr) lieferte die Erosion und Abschwemmung der landwirtschaftlich genutzten Böden 4,2 bis 8,0 t P pro Jahr. Die Beiträge aus Abwasser und Erosion/Landwirtschaft waren damals etwa gleich gross und jeder für sich allein genügte, um den Sempachersee in einem überdüngten Zustand zu halten.

Tabelle 7. Jährliche Phosphorzufuhren zum Sempachersee 1976/77 und Aufschlüsselung auf Verursacher.

		Phosphor-Frachten t/Jahr	%
Gesamtanteil Abwässer	t/Jahr		
ARA-Abläufe	2,0		
Abläufe Klärgruben	3,5		
Restbevölkerung	0 bis 3,8	5,5 bis 9,3	37 bzw. 63
Bodenerosion/Landwirtschaft		4,2 bis 8,0	29 bzw. 54
Niederschläge		1,2	8
Total		14,7	100
Gefährliche Phosphorzufuhr		4,0 t/Jahr	

Je nach Annahme des Abwasseranteils betrug der spezifische Phosphoraustrag aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen 100 bis 190 kg P pro km² und Jahr. Im Mittel konnte mit einem P-Austrag von 160 kg/km² Jahr gerechnet werden. Diese hohen Werte überraschten schon damals die Fachkreise, wurde doch um 1970 für schweizerische Verhältnisse ein Phosphoraustrag von 30 kg $P_{filtriert}$ pro km² und Jahr als charakteristisch angenommen [*Gächter* und *Furrer* 1972]. Neben der Abwassersanierung im Siedlungsgebiet und im ländlichen Raum wurde als Zielvorstellung eine Reduktion des Phosphoraustrages auf weniger als 50 kg P/km² und Jahr angestrebt. Die damalige Prognose lautete, dass nach der vollständigen abwassertechnischen Sanierung und der Verminderung des Phosphoraustrages aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen noch mit einer jährlichen Phosphorzufuhr von 6 bis 7 t zu rechnen sei [*Stadelmann* 1980].

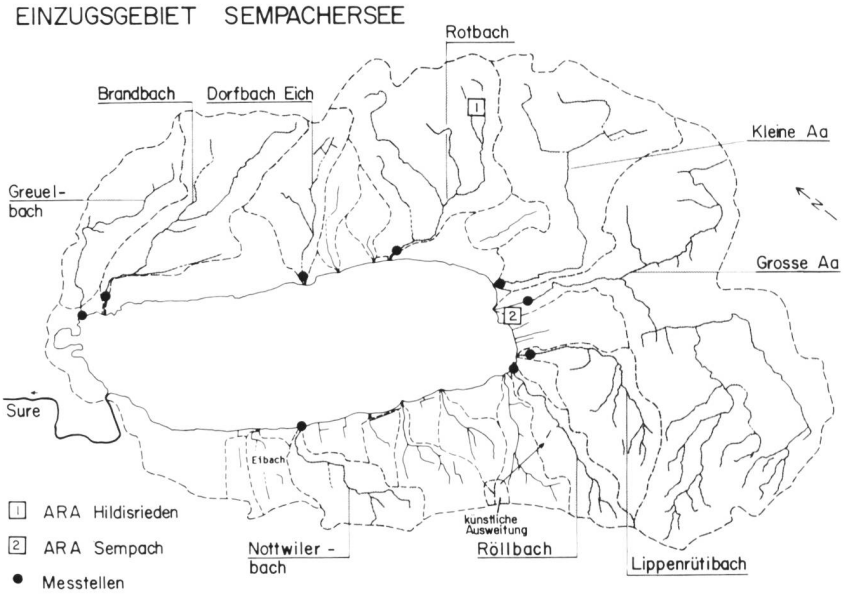


Bild 18. Zuflussuntersuchung 1984/86. Untersuchte Zuflüsse zum Sempachersee und deren Einzugsgebiete. Erfasstes Einzugsgebiet 73% von total 61,44 km².

Zur Überprüfung der Wirkung der *externen Massnahmen* wurden ab April 1984 neun Zuflüsse zum Sempachersee in einem regelmässigen Rhythmus (alle 11 Tage) untersucht (Bild 18). Diese neun Zuflüsse erfassen 73% des hydrologischen Einzugsgebietes. Gleichzeitig wurden durch das Kantonale Amt für Umweltschutz Luzern die Phosphorfrachten der Kläranlagenabläufe ARA Sempach und ARA Hildisrieden ermittelt. Die Abflussmengen der Bäche wurden mit Hilfe von dauernd registrierenden Limnigraphen oder täglichen Pegelablesungen von der Landeshydrologie ausgewertet. Die chemischen und physikalischen Analysen umfassten:

- Temperatur, pH, Leitfähigkeit
- Gesamtphosphor im Rohwasser und Filtrat
- Ortho-Phosphat
- Nitrat und Ammonium
- gelösten organischen Kohlenstoff (DOC)
- Chlorid.

Um eine Aussage über die Phosphorbelastung für die zweijährige Untersuchungsperiode Mai 1984 bis Mai 1986 zu erhalten, wurden zuerst die Phosphordaten ausgewertet. Mit Hilfe mathematischer Modelle wurde für jeden Bach eine Beziehung zwischen Abflussmenge *(Q)* und der gemessenen Phosphorkonzentration *(c)* bestimmt. Ist die mathematische Beziehung festgelegt, kann für jede Abflussmenge – die dauernd gemessen wird – die dazugehörige Konzentratration *c* und die

Tabelle 8. Jährliche Phosphorzufuhren der untersuchten Bäche 1984/86 und flächenspezifischer Phosphoraustrag (kg P/km² und Jahr).

	P_{tot}		$P_{tot\ filtriert}$		PO_4-P	
Bach	F [kg/Jahr]	spez. Fracht [kg/km² Jahr]	F [kg/Jahr]	spez. Fracht [kg/km² Jahr]	F [kg/Jahr]	spez. Fracht [kg/km² Jahr]
Grosse Aa	4040	259	2660	171	2110	135
Kleine Aa	1150	166	790	114	680	98
Rotbach[1)]	1140	182[2)]	610	97[3)]	530	84[3)]
Dorfbach	160	71	80	36	70	29
Brandbach	610	143	240	56	200	48
Greuelbach	300	115	160	61	140	54
Nottwilerbach	320	161	200	101	170	85
Röllbach	380	189	190	94	170	84
Lippenrütibach	1180	356	680	205	570	151
SUMME	9280	206	5610	125	4640	103

1) Die Berechnungen für den Rotbach schliessen den Beitrag aus der ARA Hildisrieden (200 kg P_{tot}/Jahr) mit ein, da diese in den Rotbach entwässert.

2) Ohne ARA : 150 kg P_{tot} /km² Jahr.

3) Für $P_{tot\ filt}$ und PO_4-P aus der ARA liegen keine Daten vor.

Fracht ermittelt werden [*Marti* 1987]. Mit den gewählten *c-Q*-Beziehungen lassen sich für alle Bäche Monats- und Jahresfrachten ermitteln. Die Jahresfrachten für die neun Bäche sind in der Tabelle 8 zusammengestellt. Auf die Fraktionen Gesamtphosphor (P_{tot}), Gesamtphosphor im Filtrat ($P_{tot\text{-}filtr.}$) und gelöster anorganischer Phosphor (PO_4-P) aufgeteilt ergeben sich für die neun Zuflüsse Frachten von 9,3, 5,6 bzw. 4,6 t Phosphor pro Jahr. Die gefährliche Phosphorbelastung für den Sempachersee liegt bei 4 t Gesamtphosphor pro Jahr.

Auffallend ist der grosse Unterschied im Phosphoraustrag pro km² und Jahr. Beim Dorfbach Eich wurde ein Minimalwert von 71 kg P_{tot}/km² Jahr, beim Lippenrütibach ein Maximalwert von 356 kg P_{tot}/km² Jahr ermittelt. Der mittlere Phosphoraustrag im Einzugsgebiet der neun Bäche betrug 206 kg P_{tot}, 125 kg $P_{tot\text{-}filtr.}$ und 103 kg PO_4-P pro km² und Jahr. Diese hohen Werte machen deutlich, dass das vor rund 10 Jahren angestrebte Ziel, einen Phosphoraustrag unter 50 kg P_{tot}/km² Jahr einzuhalten, keinesfalls erreicht wurde. Die hohe Phosphorabschwemmung im Einzugsgebiet des Sempachersees veranlasste die verantwortlichen Stellen, Teileinzugsgebiete näher zu untersuchen und den Ursachen nachzugehen (Projekt Lippenrütibach).

Tabelle 9. Jährliche Phosphorzufuhren zum Sempachersee Mittelwerte der Periode 1984 bis 1986 und Aufschlüsselung auf Verursacher.

		Phosphor-Frachten t/Jahr	%
Gesamtanteil Abwässer	t/Jahr		
ARA Sempach	0,3	1,9	13
ARA Hildisrieden	0,2		
Regenüberläufe	0,3		
Übrige	1,1		
Bodenerosion/Landwirtschaft		11,4	78
Niederschläge		1,3	9
Total		14,6	100

Die gefährliche Zufuhr beträgt 4,0 t P/Jahr.

6.4 Aufschlüsselung der Phosphorfrachten

Mit den Zuflussuntersuchungen wurden vom Einzugsgebiet 73% erfasst (45 km²). Dem nicht erfassten Resteinzugsgebiet (16,45 km²) wurde ein mittlerer Phosphoraustrag von 206 kg P_{tot} pro km² und Jahr zugeschlagen, was eine jährliche Phosphorfracht von 3,4 t ergibt. Die Untersuchungen der Kläranlagenabläufe der ARA Sempach und ARA Hildisrieden ergaben 0,3 bzw. 0,2 t Gesamt-P pro Jahr. Nicht berücksichtigt sind hier die Phosphorabgänge über Regenentlastungen, die mit 0,3 t geschätzt wurden.

Niederschläge enthalten ebenfalls Phosphor. In unserem Fall wurde mit 83 mg Gesamtphosphor pro m³ Regenwasser gerechnet, was bei einer mittleren Niederschlagsmenge von 1105 mm/Jahr und einer Seefläche von 14,4 km² 1,3 t Gesamt-P/Jahr ergibt. Mit Hilfe von zwei verschiedenen Verfahren wurde der Abwasseranteil in den einzelnen Bächen ermittelt. Die Abwasserbeiträge enthalten die noch nicht angeschlossenen Einwohner und punktuelle Abwassereinleitungen, die noch nicht saniert sind. In der Arbeit von *Marti* [1987] wird mit 1,1 t pro Jahr gerechnet.

Die neueste Untersuchung der Zuflüsse und Kläranlagenabläufe ermöglicht wieder eine Aufschlüsselung auf die Verursacher für die Überdüngung des Sempachersees Tabelle 9). Die Hauptbelastung des Sempachersees (78%) stammt heute aus der Erosion und Abschwemmung der landwirtschaftlich genutzten Böden. Dieser Beitrag macht 11,4 t Phosphor pro Jahr aus und genügt schon allein, den Sempachersee in einem dauernd hochüberdüngten Zustand zu halten. Der Anteil des Abwassers inklusive Kläranlagenabläufe macht nur 13% der Gesamtbelastung aus und dürfte mit dem im Jahre 1986 ausgesprochenen Phosphatverbot in den Waschmitteln nochmals einen rückläufigen Trend aufweisen. Die Abwassersanierung darf als abgeschlossen betrachtet werden, und die weiteren Einzelsanierungen werden nur noch Frachtreduktionen in Kilogrammen bringen. Die direkt auf den See fallenden Niederschläge tragen 9% der Gesamtbelastung bei.

Die berechneten P-Frachten von 1976/77 und 1984/86 sind in der Tabelle 10 verglichen. Da beide Auswertungen nicht mit derselben Methode durchgeführt wurden, muss der Vergleich mit einer gewissen Vorsicht vorgenommen werden. Doch fällt auf, dass die Gesamtzufuhr nicht wesentlich abgenommen hat. Bei einzelnen Bächen, z. B. Dorfbach/ Eich und Nottwilerbach ist eine deutliche Abnahme der P-Frachten festzustellen, die auf Abwassersanierungen zurückzuführen ist. Der Abwasseranteil, der 1976/77 noch auf 5,5 bis 9,3 t P pro Jahr geschätzt wurde, ist heute auf 1,9 t P gefallen und liegt somit sogar unter dem ursprünglichen Prognoseziel von 3,0 t P/Jahr. Dies zeigt als positives Ergebnis auf, dass die seit 1980 mit grossem Aufwand angestrebte Sanierung der Abwässer im Siedlungsgebiet und teilweise im ländlichen Raum mit Hilfe des Abwassereinleitungskatasters zum Erfolg führte. Diese abwasserseitige Frachtreduktion hat dafür die Landwirtschaft mit der Überdüngung der Böden wettgemacht. Die Phosphorzufuhr in den Sempachersee hat somit in den vergangenen zehn Jahren nicht abgenommen, sondern liegt mit 14,6 t P_{tot} pro Jahr immer noch auf der gleichen Höhe.

Von der mittleren Gesamtzufuhr der zweijährigen Untersuchung kann noch der Phosphor abgezogen werden, der durch Fischfang aus dem See entfernt wird. Er liegt bei einem Fischertrag von 60 kg pro Hektare und unter der Annahme eines 0,6%-P-Gehaltes im Lebendgewicht bei rund 0,5 t P/ Jahr.

7. Erfahrungen mit den see-internen Anlagen

Nach einer kurzen Bauzeit von 6 Monaten und Investitionskosten von 2,2 Mio Franken wurden die see-internen

Tabelle 10. Vergleich der Jahres-P-Frachten der Zuflüsse zum Sempachersee 1976/77 und 1984/86

	P_{tot} [kg/Jahr]		$P_{tot\ filt}$ [kg/Jahr]		PO_4-P [kg/Jahr]	
Name des Bachs	1976/77	1984/86	1976/77	1984/86	1976/77	1984/86
Grosse Aa	3747	4040	3130	2660	2224	2110
Kleine Aa	—	1150	—	790	—	680
Rotbach	745	1140	613	610	492	530
Dorfbach Eich	515	160	394	80	231	70
Brandbach	793	610	485	240	388	200
Greuelbach	548	300	431	160	177	140
Nottwilerbach	1187	320	1008	200	753	170
Röllbach	319	380	207	190	123	170
Lippenrütibach	—	1180	—	680	—	570
Eibach	700	—	595	—	481	—
ARA Sempach	412	300	—	—	—	—
ARA Eich	366	ARA aufgehoben	—	—	—	—
Resteinzugsgebiet	4233*	3390*	—	—	—	—
Niederschläge	1200	1300	—	—	—	—
Summe	14725	14270	—	—	—	—

*Diese beiden Zahlen können nicht direkt miteinander verglichen werden, da die Resteinzugsgebiete nicht identisch waren.

Anlagen für den künstlichen Sauerstoffeintrag und die Zwangszirkulation im Juli 1984 vom Gemeindeverband Sempachersee in Betrieb genommen.

Die Anlage im See und die Versorgungsstation an Land führten zu keiner wesentlichen ästhetischen Beeinträchtigung der Seelandschaft, da nur gerade die Positionsbojen an der Seeoberfläche sichtbar sind.

Vor und während der see-internen Massnahmen erfolgte von der EAWAG in enger Zusammenarbeit mit dem Kantonalen Umweltschutzamt und dem Kantonalen Labor Luzern eine intensive physikalische, chemische und biologische Untersuchung des Sempachersees, deren Ergebnisse erst teilweise veröffentlicht sind. Verschiedene zusätzliche Grundlagenforschungsarbeiten wurden im Bereich Seenphysik [*Marti* und *Imboden* 1986, *Wüest* 1987], Sedimente [*Gächter* 1987, *Sturm* und *Obenlüneschloss* 1986], Phytoplankton [*Bürgi* in Vorbereitung] und Fischerei [Dissertation] veranlasst. Dank der intensiven Seeüberwachung konnte auch das grosse Fischsterben vom 7./8. August 1984 nachträglich mit dem Vorkommen der Blaualge *Aphanizomenon flos-aquae* erklärt werden (Tabelle 5).

Die Forderung, dass der Sauerstoffeintrag vor allem im Bereich von 60 bis 86 m Tiefe erfolgen soll, konnte eingehalten werden. Ebenfalls wurde das Qualitätsziel von mindestens 4 mg O_2/l in den Jahren 1986/87 erreicht.

Die aeroben Verhältnisse im Tiefenwasser führten auch zu einer deutlichen Abnahme von reduzierten Substanzen (CH_4, NH_4^+, NO_2^-, Mn^{2+}). Ursprünglich waren die Wissenschafter der Meinung, dass mit der hypolimnischen Belüftung die Phosphorrücklösung an den Sedimenten deutlich abnehmen würde. *Gächter* [1987] zeigte auch am Beispiel des Sempachersees, dass, wenn ein *eutropher* See saniert werden soll, die künstliche Belüftung kein Ersatz für die notwendige Phosphorabminderung darstellt.

In neuester Zeit sind die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser etwa wie sie um 1930 waren. Statt 3,0 t beträgt der Sauerstoffeintrag heute von 1. Mai bis 1. Oktober 2,5 t/Tag.

Im Gegensatz zum windstill gelegenen Baldegger- und Hallwilersee findet die Winterzirkulation im Sempachersee meistens auf natürliche Weise statt. Die künstliche Zwangszirkulation soll vor allem eine vollständige Durchmischung in ungünstigen Jahren sicherstellen.

Die Erfahrungen mit der Zwangszirkulation zeigen, dass bei einem Luftdurchsatz von 340 Nm^3/h über 8 Diffusoren die Konzentrationsgradienten im Tiefenwasser nicht beschleunigt abgebaut werden können. Die Umstellung von Sauerstoff auf grobblasigen Luftdurchsatz sollte technisch noch vereinfacht werden.

Nach zweijährigem Betrieb waren die Metallfritten der acht Diffusoren so verkalkt, dass sie mit Säure gereinigt werden mussten. Es wird empfohlen, diese Reinigung mindestens alle zwei Jahre durchzuführen.

8. Schlussfolgerungen für die Sanierung des Sempachersees

Seit den 80er Jahren wird der Sempachersee nach einem Konzept, das externe wie auch see-interne Massnahmen enthält, saniert. Dadurch konnte der Trend zur weiteren Eutrophierung gebrochen werden. Vergleicht man heute den Zustand des Sees mit den Qualitätszielen der schweizerischen Gesetzgebung, so stellt man fest, dass aufgrund der Phosphorkonzentration und der Algenproduktion der Sempachersee immer noch ein *hocheutrophes* Gewässer ist. Die Phosphorkonzentration nach der Winterzirkulation (140 mg P/m^3) liegt rund 5mal über dem gefährlichen Wert und die Algenproduktion gemäss Messungen in den Jahren 1984/85 bei rund 400 g C pro m^2 und Jahr. Wegen dieser hohen Algenproduktion kommt es im Epilimnion zu starken Sauerstoffübersättigungen und hohen pH-Werten, die Fische gefährden. Die minimalen Sichttiefen fallen, bedingt durch die hohe Algenproduktion im Wasser, bis auf 1,7 m (Mai 1987). Der See weist eine übermässige Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser auf. Dank dem künstlichen Sauerstoffeintrag konnte jedoch die Zielvorstellung von mindestens 4 mg O_2/l in jeder Tiefe eingehalten werden, und der Lebensraum für höher entwickelte Tiere wurde somit wieder ausgedehnt. Diese Therapie ist aber kein Ersatz für die notwendige Verminderung des Phosphoreintrages aus dem Einzugsgebiet.

Die jährlichen Phosphorzufuhren zum Sempachersee wurden seit 1954 verschiedentlich mit Hilfe von Zuflussuntersuchungen berechnet oder indirekt abgeschätzt und sind im Bild 19 dargestellt. Die gefährliche Belastung von 4 t Gesamt-P pro Jahr wurde bereits um 1960 überschritten und hat um 1980 bis zum 6fachen Betrag zugenommen. Die Zuflussuntersuchungen ermöglichten eine Aufschlüsselung der Phosphorfrachten auf verschiedene Verursacher. Während bis 1975 Siedlungsabwässer den Hauptanteil der Phosphorbelastung ausmachten, stammt heute der grösste Teil aus der Abschwemmung und Erosion der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die Ursache liegt in den zu hohen Tierbeständen und der Überdüngung der Böden mit Hofdünger (Gülle und Mist) und Kunstdünger. Die Frachtspitzen in den Jahren 1977 bis 1980 sind wahrscheinlich auf den Mangel an Lagerkapazität für Hofdünger zurückzuführen, so dass zu ungeeigneten Zeiten Gülle ausgebracht werden musste und die Abschwemmung vor allem in der Vegetationsruhe vermehrt auftrat. Die Sanierung der Siedlungsabwässer darf als Erfolg gebucht werden. Unmissverständlich liegt heute das Hauptgewicht der Seesanierung darin, dass die Überdüngung unserer Böden verhindert wird und geeignete Massnahmen bei der Landwirtschaft getroffen werden, um die Bodenerosion und Abschwemmung zu vermindern. Das Ziel einer Gesundung des Sempachersees (Oligotrophierung) bleibt weiterhin, den jährlichen Phos-

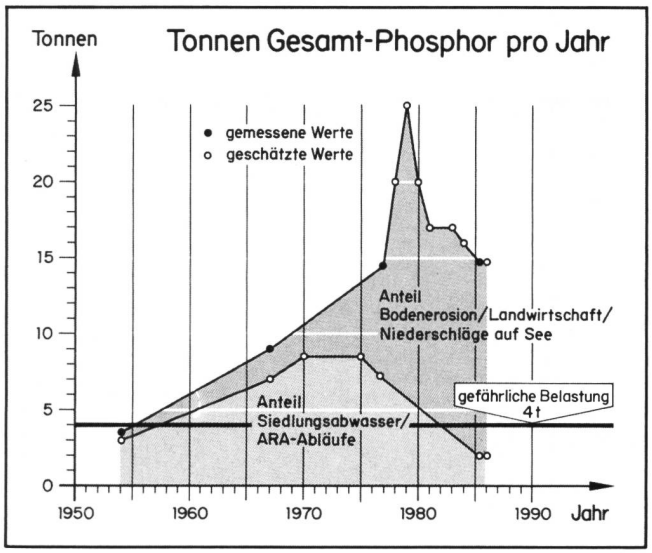


Bild 19. Jährliche Phosphorfrachten in Tonnen pro Jahr zum Sempachersee mit Anteil Siedlungsabwässer/Kläranlagen und Anteil Bodenerosion/Landwirtschaft/Niederschläge. Zuflussuntersuchungen 1954, 1966/67, 1976/77 und 1984/86.

phoreintrag von 4 t nicht zu überschreiten. Dies bedeutet unter der Annahme, dass etwa 1 t durch Niederschläge auf den See gelangen und unter Ausschöpfung aller technischen Mittel der Abwasseranteil nicht unter 1 t gesenkt werden kann, dass der Beitrag aus Bodenerosion/Landwirtschaft 2 t Phosphor pro Jahr nicht übersteigen darf.

Als Zwischenziel, das (wie Messungen im Einzugsgebiet des Dorfbaches von Eich aufzeigen) erreicht werden kann, sollte ein flächenspezifischer Phosphoreintrag von weniger als 100 kg Phosphor/km² und Jahr angestrebt werden, d. h. eine Phosphorzufuhr von weniger als 6 t/Jahr aus Bodenerosion und Landwirtschaft. Dies ist ohne einen deutlichen Abbau der Tierbestände nicht möglich.

Eine umweltgerechtere Landwirtschaft ist notwendig, dazu sind die gesetzlichen Grundlagen bereitzustellen. Ohne eine grundlegende Verminderung der Bodenbelastung durch Düngstoffe wird der Sempachersee in seinem eutrophen Zustand verharren, und die Seetherapie wird zur dauernden Erhaltung eines in Agonie verbleibenden Patienten.

Verdankungen

Die limnologischen Untersuchungen wurden von der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) durchgeführt. Die wissenschaftliche Projektleitung lag in den Händen von Dr. *R. Gächter*. Bei der Probenahme halfen auch Mitarbeiter des Kantonalen Laboratoriums mit (*A. Riechsteiner*). Die Kosten für die see-interne Anlage und für die Überwachung der externen Massnahmen wurden vom Gemeindeverband Sempachersee (Präsident *J. Muff*) und dem Kanton Luzern getragen. Das Bundesamt für Umweltschutz (BUS) leistete einen Beitrag an die Investitionskosten und die Untersuchungen im See und an den Zuflüssen. Die dreidimensionalen Zeichnungen wurden mit Hilfe der EDV-Programme des BUS (Dr. *P. Liechti*) dargestellt.

Literaturzusammenstellung für den Sempachersee

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

Hurter H. J. [1972] Nahrung und Ernährungsweise des Blässhuhns Fulica atra am Sempachersee. «Der Ornithologische Beobachter», *43,* Heft 3/4, 125–149

Stadelmann P. [1977] Limnologie als Aufgabe einer kantonalen Gewässerschutzfachstelle. «wasser, energie, luft» (Baden), *69,* 258–263

Ambühl H. [1978] Untersuchungen des Sempachersees von 1975 bis 1978 und seiner Zuflüsse. Unveröffentlichte Daten der EAWAG, Dübendorf

Casiraghi R. [1978] Vorschlag für eine Vorschrift für die Bedienung der Wehre am Abfluss des Sempachersees aufgrund von Messdaten. Diplomarbeit Abendtechnikum Luzern, unveröffentlicht, 195 S.

Stadelmann P. [1978] Der Zustand des Sempachersees und die Abwassersanierung im Einzugsgebiet. Die Region in der wir leben. Jubiläumsausgabe 100 Jahre «Luzerner Landbote», *100. Jahrgang;* 21. Oktober 1978

Bührer H., Gächter R. und *Stumm W.* (EAWAG) [1979] Gutachten über die Sanierungsmöglichkeiten des Sempachersees. Gutachten der EAWAG Nr. 4564, Dübendorf. Militär- und Polizeidepartement des Kantons Luzern und Kantonales Amt für Gewässerschutz, 31. August 1979, 67 S.

Moos F. und *Jozic M.* [1980] Die Belastung von Boden und Gewässern durch die Landwirtschaft im Einzugsgebiet des Sempachersees unter besonderer Berücksichtigung des Phosphatgehaltes. AGBA AG Ebikon-Luzern. Kant. Amt für Gewässerschutz Luzern, 54 S.

OECD (*Fricker Hj.*) [1980] OECD Eutrophication Programme, Regional Project, Alpine Lakes. Swiss Federal Board for Environmental Protection, Bern, und OECD, Paris, 234 S.

Stadelmann P. [1980] Der Zustand des Sempachersees. «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» (Baden), *72,* Heft 10, 311–318

Ambühl H. [1981] The status of eutrophication and its control in alpine lakes. «Water Quality Bulletin WHO», Vol. 6, 113–157, Oct. 1981

Uehlinger U. [1981] Zur Ökologie der planktischen Blaualge Aphanizomenon flos-aquae in Alpenrandseen «Schweiz. Z. Hydrol.», *43* (1), 69–88

Kanton Luzern, Kanton Aargau [1981] Projektwettbewerb: Sanierung Baldegger-, Hallwiler-, Sempachersee. Bericht des Preisgerichtes, 26 S. Geschäftsstelle: H. Bachmann AG, Münzgasse 2, 6003 Luzern

Brunner J. [1982] Projekt: «Zellmoos» Sursee, Bericht zur Bodenkartierung, 9 S. FAP Eidg. Forschungsanstalt für Landwirtschaftlichen Pflanzenbau, Zürich-Reckenholz

Desserich M. [1982] Projektwettbewerb über die Sanierung der Mittellandseen. Das Projekt «Aqua nostra», Tiefenwasserableitung für den Sempachersee. «VSA – Verbandsbericht», Nr. 214, 16. April 1982, 24 S.

Fahrni H.-P. [1982] Die Belastbarkeit von Seen. «Gas, Wasser, Abwasser», *62,* Nr. 3, 122–134

Lachavanne JB. [1982] Influence de l'eutrophisation des eaux sur les macrophytes des lacs suisses: résultats préliminaires. Studies on Aquatic Vascular Plant, ed. *J. J. Symoens, S. S. Hooper* and *P. Compère.* Royal Botanical Society of Belgium, Brussels, 1982, pp. 333–339

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

Boller M. [1983] Weitergehende Gewässerschutzmassnahmen im Einzugsgebiet stehender Gewässer. «Forum Städte-Hygiene» 34 (1983), Januar/Februar

EAWAG [1983] Prozesse in Seen, Prozesse in natürlichen Gewässern. EAWAG, Jahresbericht 83, Dübendorf, 53–66

Gächter R., Imboden D., Bührer H. und *Stadelmann P.* [1983] Mögliche Massnahmen zur Restaurierung des Sempachersees. «Schweiz. Z. Hydrol.», *45,* 246–266

Heer L. [1983] Der Sempachersee: Die Fischerei in früherer Zeit, sein heutiger Zustand und die Sanierungsmassnahmen. Schriftreihe Fischerei, Nr. 41, Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 1983, 1–20

Muggli J. [1983] Die aktuellen fischereilichen Verhältnisse des Sempachersees. Schriftreihe Fischerei, Nr. 41, Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 1983, 21–45

Gemeindeverband Sempachersee [1983] Informationsschrift: Der Sempachersee muss wieder gesund werden. 16 S. Kant. Amt für Gewässerschutz, Luzern

Joller Th. [1983] Pilotstudie zur Sanierung der drei Mittellandseen Baldegger-, Hallwiler- und Sempachersee (ein Zwischenbericht). Mitteilungen der EAWAG, Nr. 15, Februar 1983

Baumann P. [1984] Untersuchungen im Einzugsgebiet des Sempachersees zur Feststellung der Phosphorbelastung des Sees durch die Landwirtschaft. «Gas, Wasser, Abwasser», *64,* 3, 89–102

Bisang F. [1984] Bericht über die Sonderuntersuchungen auf der ARA Hildisrieden, 20 S. Kantonales Amt für Gewässerschutz Luzern

Bundesamt für Umweltschutz [1984] Fangerträge der schweizerischen Berufs- und Sportfischerei 1979–1984 im Sempachersee. Bundesamt für Umweltschutz, Fischereidirektion

EAWAG [1984] Prozesse in Seen: Zum Fischsterben im Sempachersee vom 8. August 1984. Sempachersee: Veränderung seines Trophiegrades seit 1977. EAWAG, Jahresbericht 1984, EAWAG, Dübendorf, 72–76

Freiburghaus D., Zimmermann W. [1984] Wie wird Forschung relevant? Der Fall Seesanierung. Schweiz. Nationalfonds, Nationales Forschungsprogramm Nr. 6 «Entscheidungsvorgänge in der schweizerischen Demokratie» Bulletin 8, November 1984, 137 S.

Gemeindeverband Sempachersee [1984] Sanierung Sempachersee, Hypolimnionbelüftung und Zwangszirkulation, Ausführungspläne. Tanytarsus, *E. Jungo,* Zürich, 13. September 1984

Hirsig P. und *Petermann J.* [1984] Markierversuch im Sempachersee zur Ermittlung der Ausbreitungsvorgänge am Diffusor L 2. Naturaqua, 3038 Kirchlindach, 8. Dezember 1984, 26 S.

Kantonales Amt für Gewässerschutz [1984] Sanierung Sempachersee, Überprüfung und Sanierung der Zuflüsse, Schlussbericht. Ingenieurbüro Kost + Nussbaumer + Partner, Sursee, März 1984, 47 S.

Meng H. J. [1984] Zustandsaufnahme der Sure vor den see-internen Massnahmen im Sempachersee, Fliessstrecke Sempachersee bis Muhen, Kanton Aargau. Gutachten der EAWAG im Auftrag des Kantonalen Amtes für Gewässerschutz Luzern; EAWAG, Dübendorf, Auftrag Nr. 4681, 66 S., Juli 1984

Stadelmann P. [1984] Die Zustandsentwicklung des Baldeggersees (1900–1980) und die Auswirkung von see-internen Massnahmen, «wasser, energie, luft», *76,* Heft 5/6, 85–95

Tanytarsus Ingenieurgemeinschaft [1984] Bauprojekt, Sanierung Sempachersee, Hypolimnionbelüftung und Zwangszirkulation. Gemeindeverband Sempachersee, 15. November 1984

Baumann P. [1985] Die Untersuchung der Zuflüsse im Einzugsgebiet eines Sees am Beispiel des Sempacher- und Baldeggersees. «Gas, Wasser, Abwasser», *65,* 721–729

Baumann P. [1985] Kommentar des Umweltschutzamtes zum Fischsterben im Sempachersee vom 7./8. August 1984. Kantonales Amt für Umweltschutz, Luzern, 23. April 1985, 12 S.

EAWAG [1985] Prozesse in Seen: Blasenschleier, Modell zur Dimensionierung interner Seesanierungsanlagen, Wärmefluss durch die Seeoberfläche. EAWAG, Jahresbericht 1985, EAWAG, Dübendorf, 65–68

Frey S. und *Ilg T.* [1985] Unser Sempachersee, Konzept zur Förderung see-externer Sanierungsmassnahmen, Juli 85, 8 S. WWF Schweiz, Postfach, 8037 Zürich

Gächter R. und *Imboden D. M.* [1985] Lake Restoration. In *Stumm W.* (ed.): Chemical Processes in Lakes. I. Wiley and Sons, New York, 365–388

Gächter R. und *Mares A.* [1985] Does settling seston release soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of lakes. «Limnol. Oceanogr.», *30* (2), 364–371

Gächter R. und *Stumm W.* (EAWAG) [1985] Auswirkungen der see-externen und see-internen Gewässerschutzmassnahmen auf die Wasserqualität des Sempachersees. EAWAG, Dübendorf, Auftrag Nr. 4691, Gemeindeverband Sempachersee, 22. Mai 1985

Imboden D. M. [1985] Restoration of a Swiss Lake by Internal Measures. Can Models Explain Reality? European Water Pollution Control Association, International Congress: Lake pollution and recovery, Rome 1985, 29–40

Stadelmann P. et al. [1985] Bericht der Expertengruppe über das Fischsterben im Sempachersee vom 7./8. August 1984. Kantonales Amt für Umweltschutz Luzern, 23. April 1985, 40 S.

Bühlmann B. [1986] Patient Sempachersee. In «Schweizer Familie» Nr. 10 vom 5. März 1986, 22–24

Gächter R. und *Stumm W.* (EAWAG) [1986] Auswirkungen der see-externen und see-internen Gewässerschutzmassnahmen auf die Wasserqualität des Sempachersees. 2. Bericht über das Jahr 1985 EAWAG, Dübendorf, Auftrag Nr. 4691, Gemeindeverband Sempachersee, 1. Juni 1986, 46 S.

Gemeindeverband Sempachersee [1986] Konzept für Schutzmassnahmen im Ufergürtel des Sempachersees. Ingenieurbüro Kost + Nussbaumer + Partner, Sursee; AGBA AG, Ebikon; Planteam S AG, Sempach-Station, Juni 1986, 17 S. mit Beilagen

Gemeindeverband Sempachersee [1986] Konzept für Schutzmassnahmen im Ufergürtel des Sempachersees. Gemeindeverband Sempachersee, Kurzbericht, Juli 1986, 18 S.

Kost + Nussbaumer, AfU Luzern und BUS [1986] Sanierung des Sempachersees, Zuflussuntersuchung, Provisorische Auswertung der Messperiode 1984/85. Kost + Nussbaumer + Partner, Sursee, Entwurf 7. Mai 1986

Lachavanne J. B., Perfetta J., Noetzlin A., Juge R. und *Lods-Crozet B.* [1986] Etude chorologique et écologique des macrophytes des lacs suisses en fonction de leur altitude et de leur niveau trophique, 1976–1985. Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, Université de Genève, rapport final, 115 p.

Marti M. [1986] Das Crustaceenplankton im Sempachersee 1984/85 zu Beginn der see-internen Massnahmen und im Vergleich zu früheren Untersuchungen. Zoologisches Institut der Universität Bern, Abteilung Ökologie und Umweltbiologie, Lizentiatsarbeit, Juni 1986, 110 S.

Marti D. E. und *Imboden D. M.* [1986] Thermische Energieflüsse an der Wasseroberfläche: Beispiel Sempachersee «Schweiz. Z. Hydrol.», *48,* 196–229

Wüst R. [1986] Zellmoos. Ornithologischer Verein Sursee, 9. Februar 1986, 11 S.

Sturm M. und *Obenlüneschloss J.* [1986] Die Sedimente im eutrophen und voreutrophen Sempachersee. EAWAG Jahresbericht 1986, EAWAG/ETH Dübendorf, 4–24

Weilenmann U. [1986] The role of coagulation for the removal of particles by sedimentation in lakes. ETH, Diss., Nr. 8018, Zürich, 1986, 163 S.

Baumann P. [1987] Zusammenarbeit zwischen Gewässerschutzfachstelle und landwirtschaftlicher Beratung am Beispiel der Zentralstelle für Ökologie des Kantons Luzern. «Gas, Wasser, Abwasser», *67,* 1–6

Blum J. [1987] Im Sempachersee spiegelt sich unser Umweltverhalten. «Der Staatsbürger», Keller + Co. AG, Luzern, Nr. 4, 30–34

Gächter R. [1987] Lake restoration. Why oxygenation and artificial mixing cannot substitute for a decrease in the external phosphorus loading. «Schweiz. Z. Hydrol.», *49,* 170–185

Gächter R. und *Stumm W.* [1987] Kurzbericht über die Resultate der limnologischen Überwachung des Sempachersees im Zeitabschnitt Januar (3. Bericht) 1986 bis Mai 1987. EAWAG, Auftrag Nr. 4691, 17 S.

Imboden D. M. [1987] Restaurierung von Seen: Eine multidisziplinäre ökologische Aufgabe. «Gas, Wasser, Abwasser», *67,* 427–432

Imboden D. M. [1987] Erfahrungen mit der Bekämpfung der Seen-Eutrophierung in der Schweiz. 11. Arbeitstagung, Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR), Oktober 1987, 113–127

Marti D. [1987] Sanierung des Sempachersees: Auswertung der Zuflüsse, Messperiode Mai 1984 bis April 1986. EAWAG, Auftrag Nr. 4691. Kant. Amt für Umweltschutz und Gemeindeverband Sempachersee

Stöckli A. und *Schmid M.* [1987] Die Sanierung des Hallwilersees; Erste Erfahrungen mit der Zwangszirkulation und der Tiefenwasserbelüftung. «wasser, energie, luft» (Baden), *79,* 143–149

Wüest A. [1987] Ursprung und Grösse von Mischungsprozessen im Hypolimnion natürlicher Seen. ETH, Dissertation Nr. 8350, Zürich, 144 S.

Zimmermann W. und *Knoepfel P.* [1987] Landwirtschaft und Umwelt im politischen Alltag. Bundesamt für Umweltschutz, EMDZ Bern, 357 S.

Baumann P. [1988] Problemgebiet Sempachersee, ergriffene und erwogene Massnahmen. FAC-Oktobertagung 1987. «Gas, Wasser, Abwasser», *68,* 1–16

Lachavanne J. B. [1988] Zustand, Erhaltung und Schutz der Ufer des Sempachersees/Unité de biologie aquatique, Université de Genève, in Vorbereitung

Schwank A. [1988–1989] Reproduktion und Jungfischmortalität bei Felchen des Sempachersees während see-internen Sanierungsmassnahmen, Dissertation Universität Zürich, in Vorbereitung

Summary: Lake Sempach

Starting in 1970, Lake Sempach, an 87 m deep lake in central Switzerland, exhibited accelerated eutrophication. By 1980, total phosphorus concentration increased to 150 mg P/m³. The eutrophication was caused by construction of sewer systems, which in the initial phase discharged some raw sewage directly into the lake and its tributaries, and intensive agriculture with high animal densities. At that time, various external and lake-internal measures were considered for lake restoration. Since extrapolation of phosphorus loading to the future showed that the water quality goals could not be achieved within the next few years, internal restoration measures were started in 1984 (oxygenation of the hypolimnion during summer and artificial mixing during winter). The effects of these internal measures on Lake Sempach are described based on intensive physical, chemical and biological investigations (see literature index). Oxygen input of about 500 tons/yr and mixing with compressed air (340 N m³/h) rapidly caused a decrease of reduced substances as CH_4, NH_4^+, Mn^{2+} and NO_2^-. Iron was at low concentrations before and after internal lake restoration measures. Since 1985, the water quality goal for oxygen "always and everywhere at least 4 mg/l" in the hypolimnion has been attained. It is therefore possible to improve the redox conditions even of a large lake, but oxygenation alone is not able to change the trophic state of a lake. In the period from 1984 to 1986, the phosphorus loading did not decrease significantly compared with the loading 10 years ago, even though all sewage is now treated before it is discharged. At 14.6 tons phosphorus per year, the loading is still four times the critical level. The main input of phosphorus into the lake is caused by erosion of overfertilized agricultural land (80% of the loading). A major improvement of lake water quality could be only reached by a reduction of the very high animal density in the drainage area of Lake Sempach. Since phosphorus concentrations (140 mg P/m³) and primary production (400 g C/m² yr) are still high, Lake Sempach remains eutrophic. Hence, oxygen oversaturation and high pH in the epilimnion caused by high algal productivity in spring furthermore endanger the restablishment of fish populations during this critical time. The improvement of redox conditions by internal measures in the hypolimnion will not lead to a total recovery of Lake Sempach as long as external phosphorus loading stays at the present high level.

Adresse des Verfassers: Pius Stadelmann, Dr. sc. nat. ETH, Kantonales Amt für Umweltschutz Luzern, Klosterstrasse 31, CH-6002 Luzern.