

Sanierung Hallwilersee - 20 Jahre Seebelüftung



IMPRESSUM

Sondernummer «Sanierung Hallwilersee
– 20 Jahre Seebelüftung»
aus der Reihe UMWELT AARGAU

Autoren

Baltzer Philippe
Bürgi Hansruedi
Falconi-Bürgi Isabelle
Gächter René
Herzog Peter
Joller Thomas
Lovas Robert
Märki Martin
McGinnis Dan
Moosmann Lorenz
Müller Beat
Müller Rudolf
Nüesch Irina
Schmid Marcel
Stöckli Arno
Stucki Thomas
Suter Bruno
Suter Kurt
Wüest Alfred
Ziltener Christoph
Zimmermann Fritz

Redaktion und Produktion

Dr. Stefan Binder
Abteilung für Umwelt
Buchenhof, 5001 Aarau
Tel. 062 835 33 60
Fax 062 835 33 69
e-mail: umwelt.aargau@ag.ch

Titelbild

Reto Stadler;
Winterstimmung am Hallwilersee

Nachdruck

Mit Quellenangabe erwünscht.
Belegexemplar bitte an die Abteilung
für Umwelt schicken.

Papier

Gedruckt auf hochwertigem
Recyclingpapier.

Umweltinformation



Vorwort: Erfolgreiche Sanierung des Hallwilersees

Der Hallwilersee in seiner Umgebung ist ein landschaftliches Aushängeschild. Er trägt als wertvoller Erholungs- und Naturraum wesentlich zur Wohnqualität in einer dicht besiedelten und industrialisierten Region bei.

Leider ist der Hallwilersee auch ein Dauerpatient. Er wurde, wie der nahe Baldeggersee und der Sempachersee, jahrzehntelang mit zu viel Nährstoffen belastet. Darum ist ihm in der Tiefe die Luft ausgegangen. 20 Jahre ist es nun her, dass der Kanton Aargau zusammen mit dem Kanton Luzern mit der Seebelüftung eine wichtige Massnahme zur Sanierung des Sees begonnen hat. Er betreibt sie auch heute noch.

Soll man ein solches «Jubiläum» überhaupt erwähnen? Schliesslich kämen wir ja gerne ohne die Belüftung aus. Immerhin, wir haben Erfolge vorzuweisen: Der Phosphorgehalt im Seewasser ist mittlerweile von rund 250 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter Wasser auf weniger als 40 Milligramm zurückgegangen. Der Zielwert von 30 Milligramm ist nicht mehr weit entfernt. Diese enorme Verbesserung relativiert auch die vorhin angesprochene lange Zeitdauer der Sanierung, denn die über Jahre aufgebauten Belastungen im komplexen System des Hallwilersees lassen sich nicht einfach innert Jahresfrist abbauen.

Aber es bleiben berechtigte Fragen. Wann wird das Ökosystem See wieder ohne fremde Hilfe funktionieren? Wie erkennen wir überhaupt, dass

wir dieses Ziel erreicht haben? Wie arbeiten die Kantone Aargau und Luzern als Seeanlieger zusammen? Welche Rolle spielt die mysteriöse Burgunderblutalge, welche den See in den letzten Jahren im Frühjahr blutrot färbt? Wie hängt die Zahl der gefangenen Fische vom Zustand des Sees ab?

Die Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau hat im Jahr 2006 mit verschiedenen Anlässen direkt vor Ort über den Stand der Seesanieung informiert und Antworten auf obige und andere Fragen gegeben. Dazu haben wir einen 20-minütigen Dokumentarfilm «Euse See» produziert¹. Für alle, die noch mehr zu den Grundlagen der Seeökologie und der Seesanieung wissen möchten, ist die vorliegende Sondernummer «Umwelt Aargau» gedacht.

Sie umfasst alle Aspekte der Seesanieung, beginnend mit der Wirkung des Düngers Phosphor und den durch uns Menschen steuerbaren Einflussgrössen Abwasser und Landwirtschaft. Dabei wird ein Bogen gespannt von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen über das Funktionieren des Ökosystems Hallwilersee bis hin zu praktischen Umsetzungen von Sanierungsmassnahmen. Die Beiträge am Schluss belegen die berechtigte Hoffnung, dass der Hallwilersee bald wieder gesund ist. Es ist aber auch klar erkennbar, dass dies nur so bleiben wird, wenn es gelingt, den Nährstoffeintrag dauerhaft, nachhaltig und im ganzen

Einzugsgebiet zu verringern. Wir alle können dazu Mitverantwortung übernehmen:

- Die Gemeinden und Abwasserverbände, die sich zur zeitgerechten Werterhaltung und Verbesserung der Abwasseranlagen verpflichten.
- Die Stimmbürgerinnen und Stimmbürger, welche über die dazu notwendigen Ausgaben entscheiden.
- Die Landwirtschaft, die mithilfe von Bundesgeldern die Betriebsstruktur umstellen kann, um die Abschwemmung von Phosphor in den See zu vermindern.

Zu ihrer Verantwortung stehen auch weiterhin die Kantone Aargau und Luzern. Sie setzen in den entsprechenden Fachstellen ihre Arbeit konsequent fort und stimmen sie über die Kantonsgrenzen hinaus miteinander ab. Abschliessend bedanken wir uns bei allen Autorinnen und Autoren für die fachlich fundierten, gleichzeitig aber auch verständlichen und anschaulichen Darstellungen. Die vorliegende Sondernummer ist vielseitig einsetzbar, beispielsweise auch als Unterrichtsmittel in der Schule. Uns ist es wichtig, gerade bei Schülerinnen und Schülern die Freude an einer intakten und attraktiven Umwelt zu wecken und zu erhalten.

Der Hallwilersee soll auch für künftige Generationen ökologisch vielseitig sein und eine vielfältige Nutzung ermöglichen.

*Philippe Baltzer
Thomas Joller*

¹ «Euse See» kann als DVD zum Preis von Fr. 30.– bei AHORN print&film, Seehäuserstrasse 23, 6208 Oberkirch (Tel. 041 921 14 36 oder E-Mail: ahorn@ahornprint.ch), bestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort: Erfolgreiche Sanierung des Hallwilersees	1
<i>Dr. Philippe Baltzer, Abteilung für Umwelt</i> <i>Dr. Thomas Joller, Umwelt und Energie (uwe), Postfach 3439, 6002 Luzern</i>	
Die Überdüngung des Hallwilersees – eine Krankheitsgeschichte	4
<i>Marcel Schmid, Walthersburgstrasse 8, 5000 Aarau</i> <i>Dr. Arno Stöckli, Abteilung für Umwelt</i>	
Abwassersanierung rund um den Hallwilersee	8
<i>Kurt Suter, Abteilung für Umwelt</i> <i>Peter Herzog, Pilatusstrasse 4, 6033 Buchrain</i>	
Blasenschleier belüften den See	10
<i>Dr. Arno Stöckli, Abteilung für Umwelt</i>	
Sauerstoffanreicherung – neue Technik spart Kosten	13
<i>Bruno Suter, Messer Schweiz AG, Seonerstrasse 75, 5600 Lenzburg</i>	
Phosphorverluste aus überdüngten Böden	15
<i>Dr. Beat Müller und Dr. René Gächter, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i>	
Massnahmen der Aargauer Landwirtschaft	17
<i>Christoph Ziltener, Fachstellen Landwirtschaft Liebegg, Ressourcenschutz</i>	
Phosphorprojekte an den Luzerner Mittellandseen	19
<i>Isabelle Falconi-Bürgi, Dienststelle Landwirtschaft und Wald (Iawa), Postfach, 6210 Sursee</i>	
Sanierungsmassnahmen verbessern die Wasserqualität	21
<i>Dr. Arno Stöckli und Martin Märki, Abteilung für Umwelt</i>	
Der See lädt zum Baden	25
<i>Dr. Irina Nüesch, Amt für Verbraucherschutz</i>	
Burgunderblutalgen – ein Zeichen, dass es dem See besser geht	27
<i>Dr. Hansruedi Bürgi, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i> <i>Dr. Arno Stöckli, Abteilung für Umwelt</i>	
Wirkung der Belüftung auf den Sauerstoffhaushalt des Sees	30
<i>Lorenz Moosmann und Dr. Dan McGinnis, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i>	

Seesedimente, eine «Altlast»	32
<i>Martin Märki, Abteilung für Umwelt</i>	
Würmer beleben den Seegrund neu	34
<i>Fritz Zimmermann, Abteilung für Umwelt</i>	
Fische und Krebse im Hallwilersee	37
<i>Dr. Thomas Stucki, Abteilung Wald</i>	
Warum können sich die Felchen noch nicht natürlich vermehren?	40
<i>Dr. Rudolf Müller, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i>	
Die Phosphorbelastung des Hallwilersees nimmt ab	43
<i>Dr. Arno Stöckli, Abteilung für Umwelt</i> <i>Robert Lovas, Umwelt und Energie (uwe), Postfach 3439, 6002 Luzern</i>	
Seesanieung erfordert zusätzliche Massnahmen	47
<i>Dr. René Gächter und Dr. Beat Müller, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i>	
Von der Praxis zur Wissenschaft und zurück – Erfahrungen der Eawag	50
<i>Prof. Dr. Alfred Wüest, Eawag, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum</i>	
Publikationen	53

Die Überdüngung des Hallwilersees – eine Krankheitsgeschichte

Die Bemühungen um die Gesundung des Hallwilersees begannen vor über 50 Jahren mit der Reinigung der Abwässer. Heute werden auch Nährstoffverluste der Landwirtschaft als Problem erkannt. Seit 20 Jahren bringt eine Belüftung wieder genügend Sauerstoff an den Seegrund. Entsprechend verbessert hat sich der Seezustand.

Der Hallwilersee ist der einzige grössere See im Kanton Aargau. Er wurde über Jahrzehnte stark mit Nährstoffen, insbesondere Phosphor, belastet und wies alle Anzeichen eines überdüngten Sees auf: Massenvermehrung von Algen, Verfärbung und Trübung des Wassers, Mangel an Sauerstoff in der Tiefe des Sees, periodische Fischsterben.

Anzeichen der Überdüngung vor hundert Jahren

Bereits 1898 wurde die erste Algenblüte mit Burgunderblutalgen beobachtet. Um 1920 stellten Naturforscher und Fischereifachleute einen dramatischen Rückgang des Felchenbestandes fest und beobachteten, dass Wasser vom Seegrund wegen Schwefelwasserstoff nach faulen Eiern roch. Die Sauerstoffsättigung des Seewassers verschlechterte sich während Jahrzehnten laufend. Bis Mitte des letzten Jahrhunderts war unterhalb von 20 Metern Tiefe im Herbst kaum

mehr Sauerstoff im Wasser vorhanden. Im Oberflächenwasser hingegen, wo sich Algen massenhaft vermehrten, wurden Sauerstoffsättigungen bis zu 250 % beobachtet. Die Belastungsgrenze des Hallwilersees war bereits erreicht, lange bevor ein Ausbau der Siedlungsgebiete und die Intensivierung der Landwirtschaft einsetzten.

Phosphor fördert das Algenwachstum

Die Ursache für den schlechten Zustand vieler Schweizer Seen wurde in den 1950er-Jahren von Gewässerschutzpionieren erkannt. Die Öffentlichkeit wurde für das Problem der überdüngten Seen sensibilisiert. Ein Übermass an Phosphor, der damals vorwiegend durch ungereinigte Abwässer in den See gelangte, fördert das Algenwachstum. Als mikroskopisch kleine Pflanzen schweben die Algen im Wasser und verfärben es je nach Art grünlich bis rötlich oder braun. Später sinken sie an den Grund des Sees, wo deren

Abbau durch Mikroorganismen viel Sauerstoff verbraucht. Unter Sauerstoffmangel in tieferen Wasserschichten löst sich aber Phosphor wieder aus dem Seesediment und steht teilweise für erneutes Algenwachstum zur Verfügung. Der See düngt sich damit selbst.

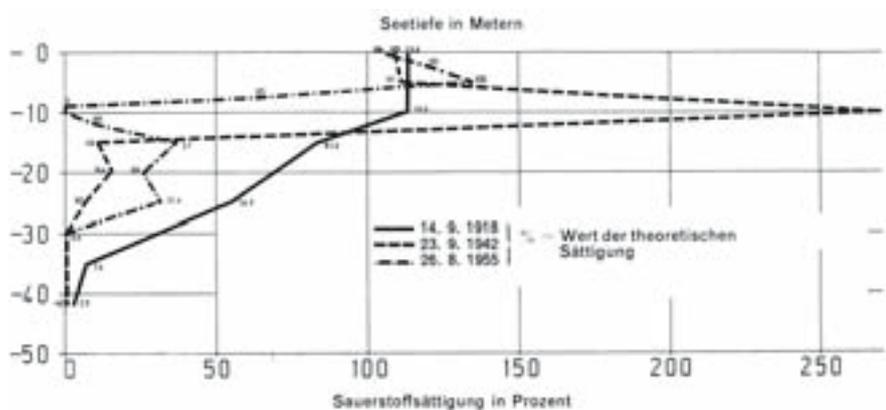
Bereits 1959 stellte der «Kantonale Wasserbiologe» Ambühl aufgrund von Zuflussuntersuchungen eine mengenmässige Bilanz der Phosphorbelastung des Hallwilersees auf und wies auf die Bedeutung des Baldeggersees für den schlechten Zustand des Hallwilersees hin. Von den damals jährlich 6,5 Tonnen Phosphor, die in den See gelangten, stammte die Hälfte aus dem Baldeggersee.

Weitere Faktoren wirkten sich ungünstig auf den Zustand des Hallwilersees aus. Eingebettet zwischen Hügelzügen, hemmt die windgeschützte Lage des Sees die natürliche Umwälzung des Wassers im Winter. Nur alle 5 bis 10 Jahre gelangte ausreichend Sauerstoff bis zum Grund. Hinzu kommt die langsame Wassererneuerung. Rund vier Jahre verbleibt das Wasser im See. Entsprechend lange können eingeschwemmte Nährstoffe wirken.

Erste Sanierungsmassnahmen bringen nur teilweisen Erfolg

Mit der Erkenntnis über die Ursachen der Massenentwicklung von Algen im Hallwilersee waren bereits früh erste seeexterne Massnahmen ergriffen worden. Der Bau einer Gabelleitung, welche die Abwässer der aargauischen Seetalgemeinden vom See fernhält, und einer Abwasserreinigungsanlage in Seengen brachten ab 1964 einen nur vorübergehenden Erfolg. Ursache dafür war der oberhalb liegende Baldeggersee, dessen Zustand noch deutlich schlechter war. Bis Mitte 1970er-Jahre erreichte der Hallwilersee eine Phosphorkonzentration von 250 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter Seewasser. Die aargauischen

Die Sauerstoffverhältnisse im Hallwilersee



Die Sauerstoffverhältnisse im Hallwilersee waren bereits in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kritisch (historische Grafik).



Algenblüte von Burgunderblutalgen am Hallwilersee 1951

Seetalgemeinden gelangten 1976 daher mit einer Petition an den Regierungsrat des Kantons Aargau. Sie forderten, dass auch im luzernischen Einzugsgebiet des Hallwilersees mit dem Gewässerschutz vorwärtsgemacht werden solle.

Aargau und Luzern handeln gemeinsam

Die Aussprache auf höchster Ebene war der Beginn einer intensiven gemeinsamen Zusammenarbeit zur Sanierung des Baldeggersees und des Hallwilersees. Die beiden Kantone Aargau und Luzern erteilten der damaligen Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) den Auftrag zu einer Studie über Möglichkeiten zur Sanierung der Mittellandseen. Im Gutachten von 1979 empfahlen die Wissenschaftler neben der Reduktion der Phosphorbelastung durch Abwässer und die Landwirtschaft auch seeinterne Massnahmen zur rascheren Gesundung der Seen. Ingenieurbüros aus beiden Kantonen wurden eingeladen, wirtschaftlich brauchbare technische Anlagen zu projektieren:

- Belüftung (Luft- oder Sauerstoffeintrag in tiefe Wasserschichten)
- Zirkulationshilfe (Umwälzung der Wassermassen)
- Tiefenwasserableitung (Entfernung von nährstoffreichem Wasser)

Der erste Preis aus zehn eingereichten Projekten wurde der Arbeitsgemeinschaft Schaffner-Hollenweger-Jungo, Wohlen und Zürich, für das System «Tanytarsus» zugesprochen.



Zu viel Phosphor im See führt zu Algenwachstum und Sauerstoffmangel.

Seeinterne Massnahmen starten

Mit finanzieller Beteiligung des Kantons Aargau wurde dieses System in einem einjährigen Versuch am luzernischen Baldeggersee 1983 erfolgreich getestet. Der Kanton Luzern belüftet seither den Baldeggersee und ab 1984 auch den Sempachersee.

Im September 1984 beschloss der Grosse Rat einen Rahmenkredit von 4,5 Millionen Franken für die Sanierung des Hallwilersees. Dieser politische Entscheid dokumentierte den Willen des Kantons Aargau, dem Hallwilersee mit seeinternen Mass-

nahmen zur Gesundung zu verhelfen. Die Anlagen am Hallwilersee wurden in den Jahren 1985 und 1986 erstellt. An den Investitionskosten beteiligte sich neben den beiden Kantonen auch der Bund. Die aargauischen Seetalgemeinden wurden finanziell nicht weiter belastet.

Seeexterne

Massnahmen gehen weiter

Der Kanton Luzern nahm 1981 die Abwasserreinigungsanlage Hitzkirchertal in Mosen in Betrieb. Mit der chemischen Fällung des Phosphors und der Einleitung des gereinigten Wassers in 15 Metern Seetiefe wurde die

Belastung durch das Abwasser minimiert. Bis 1992 waren alle luzernischen Siedlungsgebiete an die ARA angeschlossen.

Mit einer Erhebung über den Gewässerschutz und die Landwirtschaft im Einzugsgebiet des aargauischen und luzernischen Einzugsgebiets des Hallwilersees wurden 1985 erste Grundlagen erarbeitet für Massnahmen zur Reduktion der Nährstoffbelastung durch die Landwirtschaft. Während im Kanton Luzern die hohen Viehbestände als Problem erkannt wurden, war im Kanton Aargau vor allem der Zustand der Hofdüngeranlagen ungenügend. Diese Erkenntnisse lösten finanzielle Unterstützung für erste Sa-

nierungen aus. Durch regelmässige Information und Beratung wurden die Landwirte für das Problem der Phosphorbelastung des Sees sensibilisiert. Seit 2001 erhalten Landwirte für eine besonders gewässerschonende Bewirtschaftung im Rahmen eines interkantonalen Phosphorprojektes finanzielle Unterstützung.

Die Seesanieung erweist sich als eine Langzeitaufgabe

Ursprünglich rechneten die Wissenschaftler der Eawag mit rund sechs Jahren, bis der Hallwilersee mithilfe der Seebelüftung saniert sein werde. Nicht nur der Hallwilersee, sondern auch Baldeggersee und Sempachersee reagierten trotz genügend Sauerstoff in der Tiefe aber nur langsam. Die wissenschaftliche Begleitung der Seesanieungsprojekte zeigte, dass

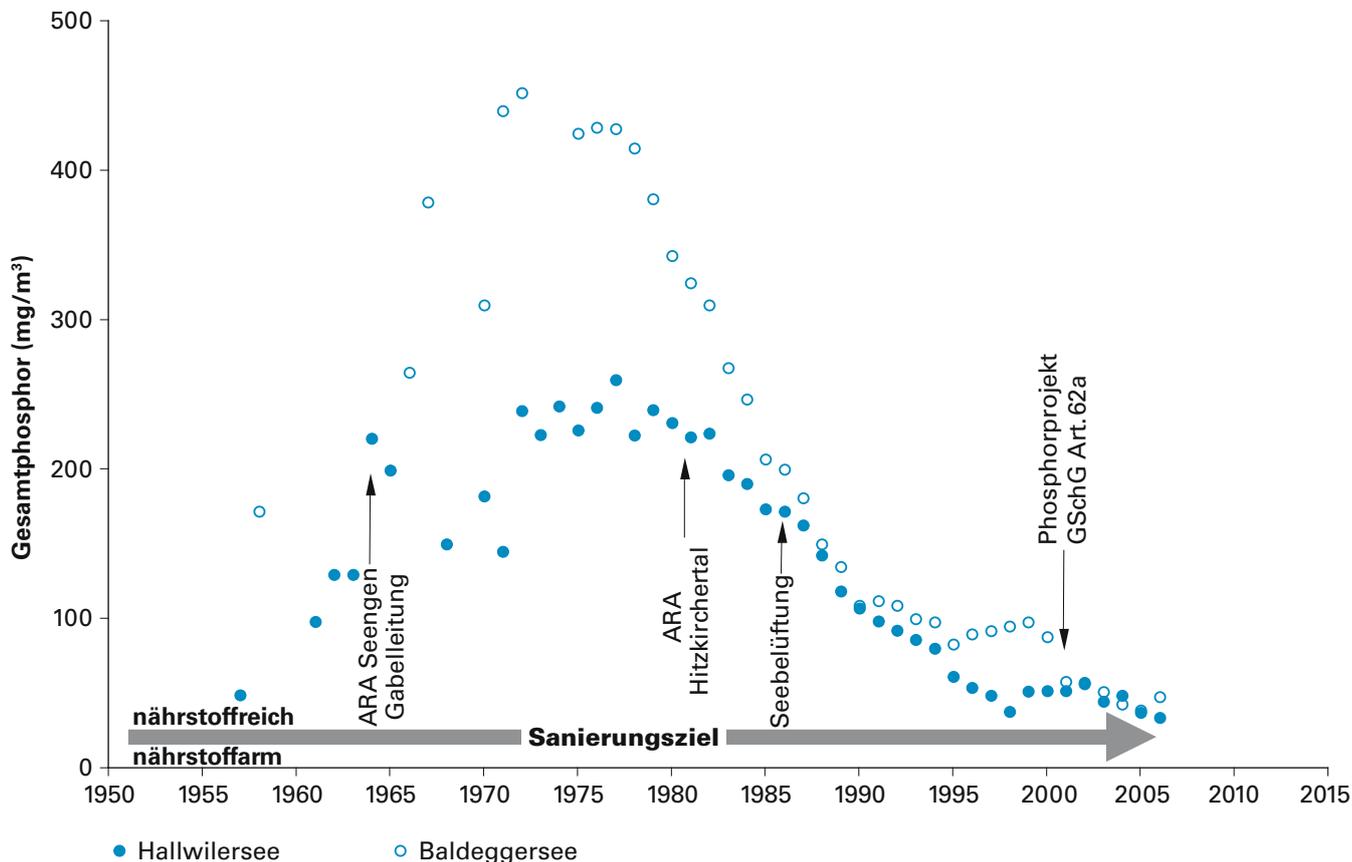
Einzugsgebiete Baldegger- und Hallwilersee mit Siedlungsentwässerung, Abwasserreinigung und Seebelüftungen



«Krankheitsgeschichte» des Hallwilersees

- 1898 Massenentwicklung von Burgunderblutalgen
- 1920 Sauerstoffmangel, Rückgang der Felchenpopulation
- 1956 Phosphorbelastung als Ursache für Algenwachstum
- 1964 Abwasserreinigungsanlage Hallwilersee in Seengen (Gabelleitung)
- 1976 Petition Aargauer Seetalgemeinden
- 1979 Gutachten Eawag (seeinterne Massnahmen)
- 1980 Abwasserreinigungsanlage Hitzkirchertal in Mosen (Phosphorelimination)
- 1984 1. Rahmenkredit zur Seesanieung
- 1985 Abklärungen Gewässerschutz in der Landwirtschaft
- 1985/86 Bau Zirkulationshilfe und Tiefenwasserbelüftung
- 1996 2. Rahmenkredit zur Seesanieung
- 2001 Phosphorprojekt Landwirtschaft
- 2003 3. Rahmenkredit Seesanieung

Die Phosphorgehalte von Baldegger- und Hallwilersee stellen die Fieberkurve dar



die Reaktion der Seesedimente auf die verbesserten Sauerstoffverhältnisse des Wassers nicht mit der erhofften verminderten Rücklösung von Phosphor verbunden war. Dennoch wurde der für das Ökosystem See gewonnene sauerstoffreiche Lebensraum als wertvoll für den Gesundungsprozess erkannt.

Pioniere im schweizerischen Gewässerschutz haben sich für die Sanierung Hallwilersee eingesetzt:

- Prof. Dr. Otto Jaag (Direktor der Eawag 1952–1970)
- Dr. h.c. Friedrich Baldinger (Vorsteher Gewässerschutzamt Aargau 1947–1964, dann Direktor des Eidg. Amtes für Gewässerschutz)
- Dr. Erwin Märki (Vorsteher Gewässerschutzamt Aargau 1965–1982)
- Prof. Dr. Heinz Ambühl (Kantonaler Wasserbiologe 1956–1960, dann Eawag/ETH bis 1994)

1995 wurden daher für eine zweite Sanierungsetappe weitere 2,4 Millionen Franken und 2003 nochmals 2,7 Millionen Franken für die bis 2010 laufende dritte Etappe bewilligt.

Sanierungsziele sind erreichbar

«Der Hallwilersee soll langfristig seine natürliche Regenerationsfähigkeit wieder erlangen», definierte der Regierungsrat des Kantons Aargau 1993. Als umfassender Indikator für die Gesundung des Sees soll die Wiederherstellung der natürlichen Fortpflanzung aller Fischarten gelten, insbesondere der Felchen. Für Phosphor bedingt das angestrebte Sanierungsziel eine Reduktion der Belastung auf weniger als 3 Tonnen pro Jahr. Dadurch wird im Hallwilersee eine mittlere Phosphorkonzentration von weniger als 20–30 Milligramm pro Kubikmeter erreicht. Dies führt zu einer höchstens mässigen Algenproduktion. Die neuere Entwicklung des Phosphorgehaltes des Hallwilersees zeigt, dass sich die langjährigen Anstrengungen zur Gesundung des Hallwilersees lohnen. 2006 lag die Phos-

phorkonzentration bei 34 Milligramm pro Kubikmeter. Das Phosphorziel im See ist in absehbarer Zeit erreichbar.



Marcel Schmid
Arno Stöckli

Ein gesunder See braucht ein gesundes Einzugsgebiet. Für den Hallwilersee wurden gemäss dieser Erkenntnis 1996 folgende Teilziele definiert.

Ziele im Einzugsgebiet:

- naturnahe Bäche und Seeufer
- gewässerbezogene Siedlungsentwässerung
- gewässerverträgliche Landwirtschaft

Ziele im See:

- mässige Algenproduktion
- Sauerstoff im Seewasser natürlicherweise mindestens 4 Milligramm pro Liter
- Besiedlung des Sediments durch sauerstoffbedürftige Wasserorganismen (Würmer)

Abwassersanierung rund um den Hallwilersee

Bereits im Jahr 1949 fanden öffentliche Versammlungen unter dem Motto «Rettet den Hallwilersee» statt. Die Idee, mit einer Gabelleitung die Abwässer vom See fernzuhalten und unterhalb des Sees zu reinigen, ist auch aus heutiger Sicht erstklassig. Die hohen Belastungen des Baldeggersees zwangen auch den Kanton Luzern, Massnahmen zu ergreifen.

Rettet den Hallwilersee

Die Folgen der Nährstoffeinträge waren immer offensichtlicher geworden. Der Wille unter der Bevölkerung wuchs, etwas dagegen zu unternehmen. Im Jahr 1949 fanden in den Gemeinden Fahrwangen und Beinwil am See öffentliche Versammlungen unter dem Motto «Rettet den Hallwilersee» statt. Am 22. September 1954 orientierte das Gewässerschutzamt die Seefergemeinden über die Idee einer regionalen Abwassersanierung.

Die Gabelleitung – eine erstklassige Idee

Einige Gemeinden hatten bereits Generelle Kanalisationsprojekte (GKP) erstellt. Die Kanalisationen sollten zusammengefasst und an gemeindeeigene Kläranlagen angeschlossen werden. Das gereinigte Abwasser wäre in den See eingeleitet worden. Die Gemeindeversammlungen von drei Gemeinden hatten schon grundsätzliche Beschlüsse für solche Kläranlagen gefasst. Nach der Orientierung

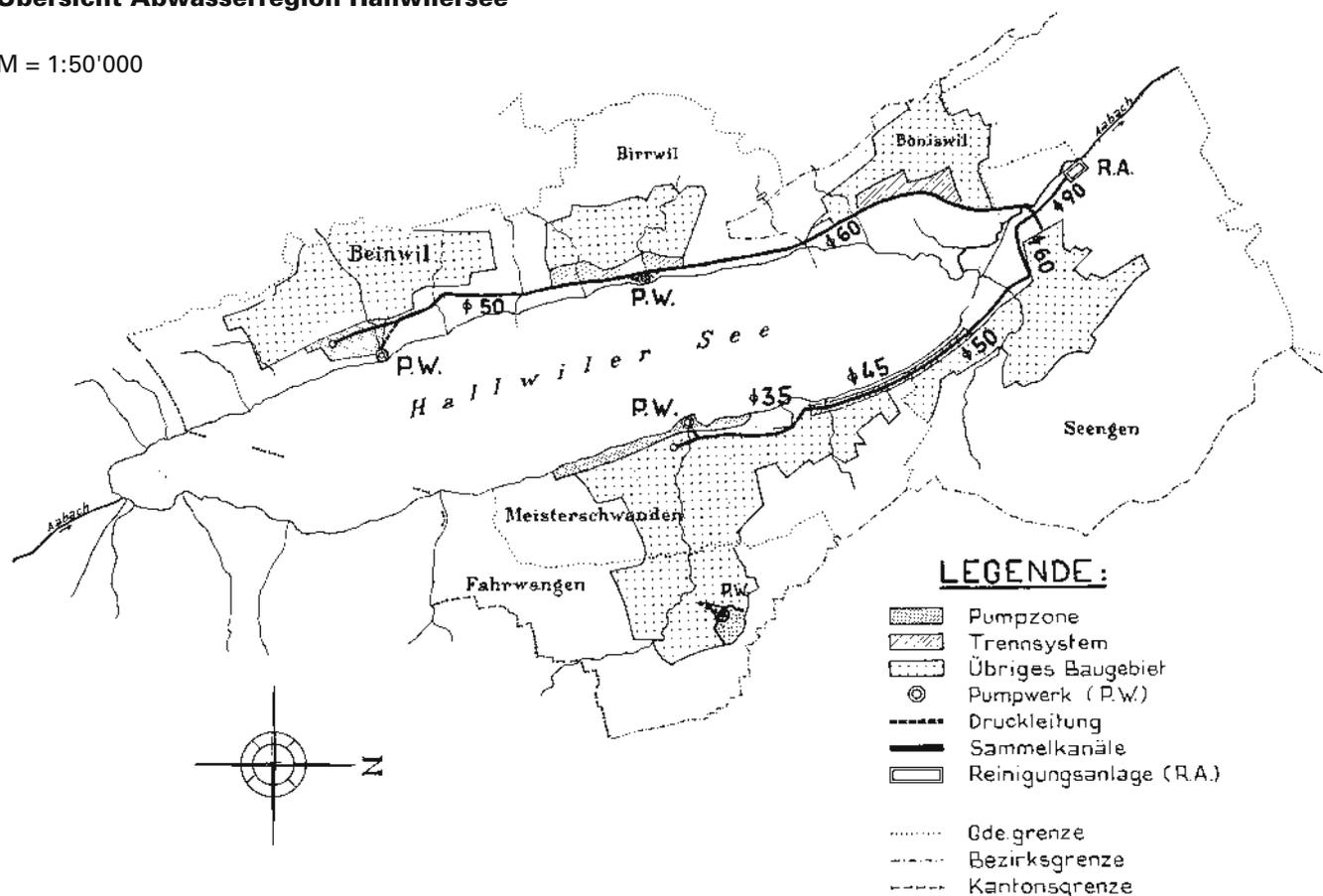
vom 22. September 1954 über die Idee des Gewässerschutzamtes stellte die Aargauische Baudirektion den Gemeinden Mitte 1955 einen Bericht zu, aus dem der folgende Auszug stammt.

«Ein besonderer Schatz der aargauischen Landschaft bedeutet der Hallwilersee. Er ist von schlichter Schönheit» (Charles Tschopp in «Überblick über Landschaft und Siedlung des Aargaus»).

Man hat das aargauische Seetal schon die Visitenstube unseres Kantons genannt. Es ist die Heimat eines Teils unserer Mitbürger. Viele Schweizer und Ausländer finden Freude und Erholung in dieser lieblichen Seelandschaft. Schöne Strassen, ruhige Aussichtspunkte und ein durchgehender

Übersicht Abwasserregion Hallwilersee

M = 1:50'000



Übersichtsplan mit der Gabelleitung aus den Statuten des Abwasserverbandes Hallwilersee (1959)

Seeuferweg ermöglichen es, die Schönheit der Talschaft zu geniessen. Renommierete Gaststätten laden zum Verweilen. Ein ruhiger Wassersport – Baden, Segeln und Fischen – trägt bei zur Gesundung von Leib und Seele der von der Unrast der Zeit gehetzten Menschen. Dem ungeschmälerten Geniessen und Nutzen des Sees droht aber eine grosse Gefahr. Der Silberblick des Sees ist zeitweilig getrübt...»

Für die Missstände wurden die häuslichen und industriellen Abwässer sowie die landwirtschaftliche Bodennutzung verantwortlich gemacht. Als Massnahmen wurden vom Gewässerschutzamt rechts und links des Sees je eine Sammelleitung vorgeschlagen, die zu einer regionalen Abwasserreinigungsanlage unterhalb des Sees – mit Ableitung in den Aabach – führen. Diese Idee fand in der Fachwelt grosse Anerkennung.

Futter für Geometer und Ingenieure

In der Öffentlichkeit stiess das Projekt dagegen zuerst auf heftigen Widerstand. Im Protokoll einer Gemeindeversammlung ist zu lesen, dass ein Mitbürger, seines Zeichens Pferdehändler, das vorliegende Projekt als willkommenes Futter für die Geome-

ter und Ingenieure betrachtete, nachdem die Güterregulierung vorüber sei. Im aargauischen Seetal wurde rigoros gefordert, dass auch die Luzerner aktiv werden. Im «Seetaler» war im Herbst 1959 zu lesen:

«Es hat nun tatsächlich keinen Sinn, den Hallwilersee zu sanieren, solange im Kanton Luzern noch kein Finger gerührt wird zur Gesundheit des Baldeggersees. Erst wenn man Gewissheit hat, dass an der Quelle der Verschmutzung der beiden Seen etwas geschieht, kann man im Aargau ernstlich an die Ausführung dieses Millionenprojekts denken.»

Zweckverband und Realisierung

Nach langen und zähen Verhandlungen des Gewässerschutzamtes mit den Vertretern der Gemeinden konnten den Stimmbürgern der Seetalgemeinden Beinwil am See, Birrwil, Boniswil, Fahrwangen, Meisterschwanden und Seengen am 10. November 1959 die Statuten zur Gründung des Abwasserverbandes Hallwilersee und ein Gesamtprojekt mit einer Bruttobausumme von 3,1 Millionen Franken zur Genehmigung unterbreitet werden. Der Kredit wurde in allen Gemeinden bewilligt. Die Realisierung fand hauptsächlich in den Jahren 1961 bis

1964 statt. Seit 1964 sind noch die Gemeinden Leutwil, Hallwil und ein Dorfteil von Dürrenäsch zum Abwasserverband gestossen.

Massnahmen im Kanton Luzern

Die hohen Belastungen des Baldeggersees mit seinen unschönen Folgen zwangen auch den Kanton Luzern, Massnahmen zu ergreifen. 1967 wurde in Hochdorf die erste Kläranlage in der Region in Betrieb genommen. Da bekannt war, dass die Konzentration an Phosphor entscheidend für die Düngung eines Sees ist, wurde als Pioniertat in Zusammenarbeit mit der Eawag die erste Filtrationsanlage der Schweiz 1979 auf der ARA Hochdorf in Betrieb genommen. Damit konnte der Phosphorausstoss der Kläranlage nochmals deutlich gesenkt werden. Die Abwässer des Hitzkirchertales werden in Mosen zusammengeführt und seit Inbetriebnahme der Kläranlage Moosmatten 1980 so weit gereinigt, dass der Hallwilersee kaum mehr mit Phosphor aus den Siedlungsabwässern gedüngt wird.

Heutige Sicht

Die Gabelleitung mit regionaler Abwasserreinigungsanlage ist auch aus heutiger Sicht eine erstklassige Idee zum Schutz des Sees. Damit wird der See lediglich bei Regenwetter mit Abwasser der Anliegergemeinden des Hallwilersees belastet. Die Abwassersammelungs- und Abwasserreinigungsanlagen beider Kantone im Einzugsgebiet des Hallwilersees sind auf dem neusten technischen Stand und bieten Gewähr für den grösstmöglichen Schutz des Sees. Die Anlagen werden ihre Funktion auch zukünftig erfüllen können, sofern sie stets unterhalten und zeitgemäss erneuert werden.



Die Abwasserreinigungsanlage in Seengen, eingebettet in die schöne Hallwilerseelandschaft



*Kurt Suter
Peter Herzog*

Blasenschleier belüften den See

Anlagen zur Zirkulationshilfe im Winter und Belüftung des Tiefenwassers im Sommer liefern dem Hallwilersee seit 20 Jahren genügend Sauerstoff. Die dazu verwendeten Blasenschleier sind effizient und kostengünstig.

Auf Vorschlag der Wissenschaftler der Eawag wurden in Baldegger-, Sempacher- und Hallwilersee Einrichtungen zur Belüftung des Tiefenwassers erstellt. Die Seebelüftung sollte den sauerstoffarmen Zustand am Seegrund beheben. Zum einen galt es den Lebensraum für Fische und Kleintiere wieder herzustellen. Andererseits wollte man die Rücklösung von Phosphor aus den Sedimenten stoppen und so die Gesundung der Seen beschleunigen.

Blasenschleier aus reinem Sauerstoff belüften den See

Das technisch neuartige System «Tanytarsus», welches im Ingenieurwettbewerb 1981 den ersten Preis erhielt, verwendet feine Blasen aus reinem Sauerstoff. Diese werden am Seegrund mittels Diffusoren erzeugt, steigen frei im Wasser auf und lösen sich vollständig, noch bevor sie die wärmeren Wasserschichten erreichen. Das System hat den Vorteil, dass in den grossen Seen relativ kleine bauliche Anlagen erforderlich sind, um genü-

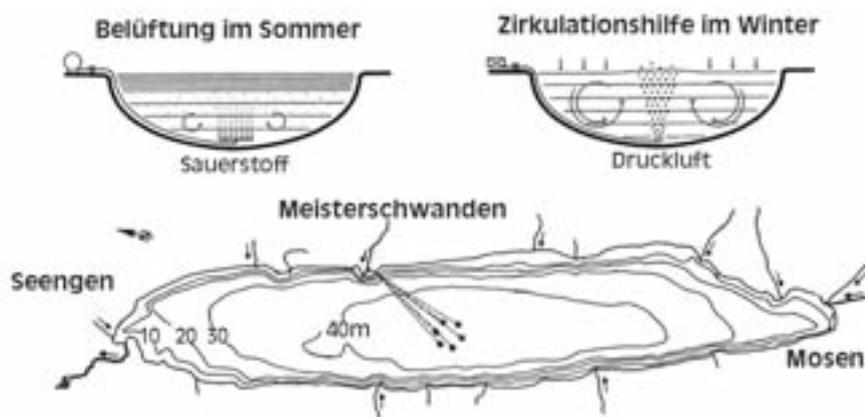
gend Sauerstoff einzutragen. Im Winter wird hingegen Druckluft verwendet, um auf klassische Art und Weise die Schichtung des Wassers zu zerstören. Die groben Blasen transportieren dabei sauerstoffarmes Wasser vom Seegrund an die Oberfläche. Dort nimmt das Wasser Sauerstoff aus der Atmosphäre auf und verteilt sich im ganzen See.

Etappenweiser Start am Hallwilersee

Beim Hallwilersee wurde im Herbst 1985 zuerst die Zirkulationshilfe realisiert. Im Seezopf bei Meisterschwanden wurde angrenzend an einen Bootslagerplatz und ein Abwasserpumpwerk das Betriebsgebäude für die Kompressoren und die Verteilanlagen erstellt. Sechs Leitungen am



Im Seezopf bei Meisterschwanden befinden sich das Betriebsgebäude der Seebelüftung, ein Lagertank für flüssigen Sauerstoff und die Kaltvergaseranlage, um den flüssigen Sauerstoff zu verdampfen.



Vom Betriebsgebäude am Seeufer führen sechs Leitungen zur Seemitte, wo sich in 45 Meter Tiefe sechs Diffusoren befinden, die je nach Bedarf Druckluft oder Sauerstoff in groben oder feinen Blasen ins Tiefenwasser eintragen.

Der Name «Tanytarsus» wurde von der Arbeitsgemeinschaft Schaffner-Hollenweger-Jungo, Wohlen und Zürich, für ihr Belüftungssystem gewählt, da dieser eine Gattung Zuckmückenlarven bezeichnet, welche nur in sauberen, sauerstoffreichen Seen vorkommen. Die Ingenieure symbolisierten damit das Ziel ihres im Ingenieurwettbewerb von 1981 siegreichen Projektes.

Seegrund führen zur tiefsten Stelle im See. Diese Leitungen sind eine spezielle Konstruktion der Kabelwerke Brugg AG aus Kunststoff mit integrierten Metallbändern zur Beschwe- rung. Anfang Dezember 1985 wurde erstmals Druckluft über einfache Dü- sen eingeblasen. Diese wurde mit öl- frei arbeitenden Kolbenkompresso- ren der Firma Haug, St. Gallen, er- zeugt. Die Leistung von 600 Normku- bikmeter Druckluft pro Stunde ge- nügt, um Blasenschleier zu erzeugen, welche den See innert vier Wochen vollständig durchmischen. Im April 1986 erreichte der Hallwilersee erst- mals seit Jahrzehnten 100% Sauer- stoffsättigung bis zum Grund.

Aus organisatorischen Gründen wur- de die Belüftung erst im folgenden Sommer geplant. Beim Betriebsge- bäude erstellte die Sauerstoffwerke Lenzburg AG einen Sauerstofftank und Verdampfer zur Bereitstellung des reinen Sauerstoffs. Der gasförmige Sauerstoff hat von selbst ge- nügend Druck, um in 45 m Tiefe zu ge- langen. Im September 1986 konnten vorerst drei Diffusoren mit reinem Sauerstoff als Test in Betrieb genom- men werden. Der vollständige Betrieb der Belüftungsanlage mit sechs Diffu- soren wurde im folgenden Sommer aufgenommen. Von April bis Oktober wurden in den ersten Jahren je nach Bedarf rund 390 bis 650 Tonnen Sau- erstoff ins Tiefenwasser eingetragen. Messungen an den Blasenschleiern zeigten, dass sich diese in den unter- sten 20 Metern des Sees vollständig auflösten. Das belüftete Tiefenwasser wird von der Seemitte durch die na- türlichen Strömungen im Wasser innert Tagen auf der ganzen Länge des Sees verteilt.

Die Belüftungsanlage braucht wenig Unterhalt

Zirkulationshilfe und Belüftung be- nötigen nur geringen Unterhalt und Überwachung. Wöchentlich kontrol- liert der Brunnenmeister der örtlichen Gemeinde die Anlage. Im Sommer lieferte das Sauerstoffwerk zwei- bis dreimal pro Woche je 10 Tonnen flüssigen Sauerstoff. Jährlich brau- chen die Kompressoren eine Revi-



Jeder der sechs Diffusoren besitzt an den sechs Armen je sieben Filterker- zen, durch die feine Sauerstoffblasen erzeugt werden. Stabilisatoren ermöglichen ein sanftes Absetzen auf dem schlammigen Seegrund. An den Armen befinden sich aussen Düsen zur Erzeugung grober Blasen im Winter.



Funktionstest eines Diffusors an der Wasseroberfläche nach der jährlichen Reinigung. Die Wasserfontänen werden durch die groben Blasen der Düsen erzeugt. Das getrübtete Wasser entsteht durch die feinen Blasen an den Filterkerzen.

sion. Jeden Frühling werden die Dif- fusoren im See gehoben und gerei- nigt. Dies geschieht in Zusammenar- beit mit der Schifffahrtsgesellschaft Hallwilersee. Dazu steht ein mobiler Kran zur Verfügung, der jeweils am Heck des Passagierschiffes «Hallwil» montiert wird. Der Wechsel zwischen grobblasigem Druckluftbetrieb im Win- ter und feinblasigem Sauerstoffbe-

trieb im Sommer braucht keine Um- stellung an den Diffusoren im See. Deren Düsen sind mit Überdruckven- tilen ausgerüstet, die beim grösseren Gasdurchsatz im Winterbetrieb auto- matisch öffnen.

Die auf einen einfachen Betrieb opti- mierte Anlage erlaubt der Abteilung für Umwelt einen flexiblen Betrieb der Belüftung. Es kann rasch auf den

während des Sommers unterschiedlichen Bedarf des Sees nach Sauerstoff reagiert werden. Bis 2002 wurde aus Kostengründen im Frühjahr und im Herbst zeitweise mit Druckluft statt mit reinem Sauerstoff belüftet.

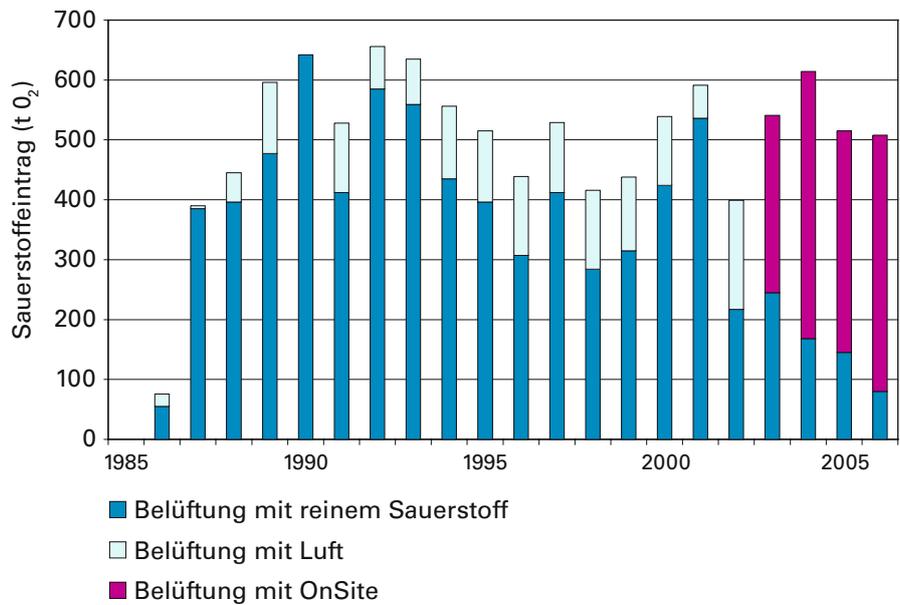
Erneuerung von Kompressoren und Sauerstoffanlage

Nach 18 Jahren Betrieb waren die Kompressoren am Ende ihrer Lebensdauer. Gleichzeitig standen neue Techniken für die Bereitstellung des Sauerstoffes zur Verfügung. Dies führte 2003 zu einer weit gehenden Erneuerung der Anlagen im Betriebsgebäude durch die damalige Sauerstoffwerke Lenzburg AG, heute Messer Schweiz AG (siehe folgenden Artikel). Die Erstellung der Belüftungsanlagen am Hallwilersee kostete ursprünglich 1,8 Millionen Franken. Der Betrieb der Anlagen benötigte früher je nach Bedarf an reinem Sauerstoff zwischen 250'000 und 350'000 Franken im Jahr. Heute sind die Betriebskosten mit der neuen Anlage bei vergleichbarem Sauerstoffeintrag trotz Teuerung um 50'000 Franken günstiger.



Arno Stöckli

Jährlicher Sauerstoffeintrag durch die Belüftung seit Betriebsbeginn



Bis 2002 wurde neben reinem Sauerstoff zeitweise Druckluft eingetragen. Seit 2003 wird der Sauerstoff vorwiegend vor Ort aus der Umgebungsluft angereichert.

Sauerstoffanreicherung – neue Technik spart Kosten

Seit 1986 unterstützt eine künstliche Belüftung den Gesundungsprozess des Hallwilersees. Mit der Dauer der Belüftung wurde die technisch anspruchsvolle Belüftungsanlage optimiert. Damit kann heute markant an den Unterhaltskosten gespart werden.

Seit 1986 unterstützt eine künstliche Belüftung den Gesundungsprozess des Hallwilersees. Dabei wird im Winter aus Düsen am Seegrund Druckluft eingeblasen. Die Druckluft treibt sauerstoffarmes Wasser an die Seeoberfläche, wo es sich mit Sauerstoff aus der Atmosphäre anreichert. Bei der stabilen Schichtung des Sees im Sommer muss dagegen der Sauerstoff direkt ins Tiefenwasser gepumpt werden.

Seit Beginn der Belüftung wurden jeweils zwischen 400 und 600 Tonnen Sauerstoff benötigt. Die Sauerstoffanreicherung ist jedoch aufwändig und daher teuer. Nach der ersten Sanierungsphase wurde ersichtlich, dass eine Weiterführung der Massnahmen bis ca. 2010 notwendig ist. Unter diesen Bedingungen war klar, dass die bestehende Druckluftversorgung aus Altersgründen ersetzt werden musste. Gleichzeitig wurde geprüft, wie die kostenintensive Versorgung mit reinem Sauerstoff optimiert werden konnte. Ein völliger Verzicht auf den Sauerstoffeintrag im Sommer stand danach nicht in Aussicht, jedoch eine schrittweise Reduktion der Sauerstoffeintragsmenge im Verlauf der nächsten Jahre.

Seit 2003 sind neue Anlagen zur Bereitstellung von Druckluft und Sauerstoff in Betrieb. Die Druckluftanlage wurde komplett ersetzt. Anstelle der wartungsintensiven, trockenlaufenden Kolbenkompressoren werden nun moderne Schraubenkompressoren eingesetzt. Die maximale Lieferleistung



Druckluftanlage mit Kältetrockner im Betriebsgebäude der Seebelüftung am Seezopf Meisterschwanden.



Anlage zur Produktion von Sauerstoff mittels Druckwechsel-Adsorption im Betriebsgebäude der Seebelüftung am Seezopf Meisterschwanden.

der Druckluftanlage wurde auf über 660 m³/h erhöht und ein aufwändiges Aufbereitungssystem mit Kältetrocknung und Aktivkohlefilter garantiert, dass nur äusserst reine Luft in den See gelangt.

Gleichzeitig wurde anstelle der bisherigen Kaltvergaseranlage eine Anlage zur Vor-Ort-Produktion («On-Site-Produktion») des Sauerstoffs im bestehenden Gebäude vorgesehen. Diese Anlage reichert den Sauerstoff nach dem Verfahren der Druckwechsel-Adsorption auf einen Anteil von rund 80% an. Es handelt sich um einen physikalischen Vorgang, der ausser der elektrischen Energie keine weiteren Betriebsstoffe (z. B. Chemikalien) benötigt. Die Luft wird der Umgebung entnommen und ohne

Schadstoffe (mit einem leicht reduzierten Sauerstoffgehalt) wieder an diese abgegeben.

Die Anlage liefert während 7 Monaten im Jahr maximal 420 Tonnen Sauerstoff. Braucht der See in einem Jahr mehr, kann dem On-Site-Sauerstoff zusätzlich reiner Sauerstoff ab der vorläufig weiter bestehenden Kaltvergaseranlage zugeführt werden.

Die Aufzeichnung der in den See geleiteten Sauerstoff- oder Druckluftmengen, deren Mischung und die Verteilung auf die einzelnen Diffusoren erfolgen mit einer grösstenteils neu erstellten Steuerung.

Die neuen Anlagen werden von der Messer Schweiz AG, Lenzburg, zu fixen monatlichen Kosten dem Kanton zur Verfügung gestellt. Die ide-

alen Einsatzbedingungen (24 Stunden an 7 Tagen/Woche während mehreren Monaten im Jahr) und die Verwendung der ohnehin erforderlichen Druckluftversorgung ermöglichen Kosteneinsparungen von rund 50'000 Franken pro Jahr gegenüber der bisherigen Lösung. Auch der Energieaufwand pro Tonne eingetragenen Sauerstoff konnte um 20% gesenkt werden. Eine positive Nebenwirkung ist zudem, dass der störende LKW-Verkehr für die Belieferung mit Flüssigsauerstoff mitten durch das im Sommer stark frequentierte Naherholungsgebiet stark reduziert werden konnte und in Zukunft bald ganz wegfallen wird.



Bruno Suter

Druckwechsel-Adsorption, abgekürzt auch als PSA (nach dem Englischen: Pressure Swing Adsorption) bezeichnet, ist ein physikalisches Verfahren zur selektiven Zerlegung von Gasgemischen (z. B. Luft) unter Druck. Spezielle poröse Materialien (z. B. Zeolithe, Aktivkohle) werden als «Siebe» eingesetzt, um Moleküle entsprechend ihres Durchmessers zu adsorbieren. Da Gase unterschiedlich stark an Oberflächen adsorbieren, werden die unerwünschten Komponenten (im Falle der Belüftungsanlage der Luftstickstoff) zurückgehalten und der gewünschte Stoff (im Falle der Belüftungsanlage der Sauerstoff) dadurch angereichert.



Armaturen und Ventile zur Steuerung der Belüftungsanlage im Betriebsgebäude der Seebelüftung am Seezopf Meisterschwanden

Phosphorverluste aus überdüngten Böden

Algen in Seen benötigen zum Wachstum Licht, Wasser, Kohlendioxid und Nährstoffe. Ihr Wachstum wird durch das Phosphatangebot begrenzt. Für einen See sind die Abwässer, die Abschwemmung von gedüngten Böden und die Atmosphäre die wichtigsten Phosphorquellen. Die Begrenzung der Phosphorzufuhr ist daher Voraussetzung einer erfolgreichen Seesanierung.

Seesanierung bedeutet

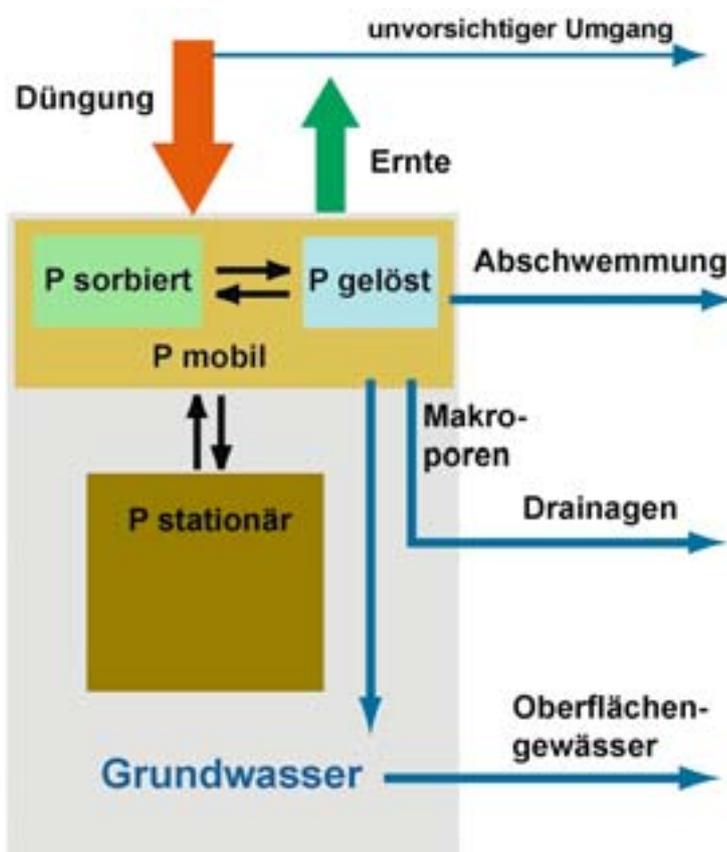
Begrenzung der Phosphorzufuhr

Algen benötigen zum Wachstum Licht, Wasser, Kohlendioxid, verschiedene Nährstoffe wie z.B. Phosphor, Stickstoff, Schwefel und Spurenstoffe (Zink, Kupfer, Kobalt usw.). Sie vermehren sich, solange ihnen alles Lebensnotwendige zur Verfügung steht. In Seen wird ihr Wachstum durch das Angebot an Phosphor begrenzt. Wenn unansehnliche, übel riechende Algenblüten auftreten, wenn der Sauerstoff-

vorrat im Tiefenwasser nicht ausreicht, um die produzierten Algenmassen abzubauen, wenn Algen zu viele Toxine ausscheiden und Fischsterben verursachen, wenn sich Felchen nicht mehr natürlich fortpflanzen können, so muss die Phosphorzufuhr zum See vermindert werden. Für einen See sind die Abwässer, die Abschwemmung von gedüngten Böden und die Atmosphäre die wichtigsten Phosphorquellen.

Nicht alle Phosphorformen sind verfügbar für die Algen

Elementarer Phosphor (P) kommt in der Natur nicht vor. In der natürlichen Umwelt ist das Phosphat seine wichtigste Erscheinungsform. Für Algen sind neben den gelösten anorganischen Phosphaten auch jene P-Formen verfügbar, die aus gelösten organischen Verbindungen freigesetzt werden oder beim Abbau von abgestorbenen Organismen ins Wasser gelangen. Phosphate, die an Bodenpartikeln angelagert rasch sedimentieren und damit aus dem Stoffkreislauf eines Sees ausscheiden, werden als nicht algenverfügbar beurteilt. Aus diesem Grund klassieren wir in den Zuflüssen zum See nur die gelösten P-Verbindungen, in Abwasserquellen und im Abfluss des Baldeggersees aber den Gesamt-P als algenverfügbar.



Wiesland, das mit rot gefärbtem Wasser bewässert und danach aufgedigelt wurde. Deutlich sichtbar sind die Makroporen des Bodens. Der durchwurzelte, poröse Oberboden wurde gleichmässig durchflossen. In tieferen Bodenschichten wurde das Wasser nur durch die angefärbten Makroporen transportiert. Das Schema zeigt die Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser und die Transportwege.

Wie gelangen Phosphate vom Boden in die Gewässer?

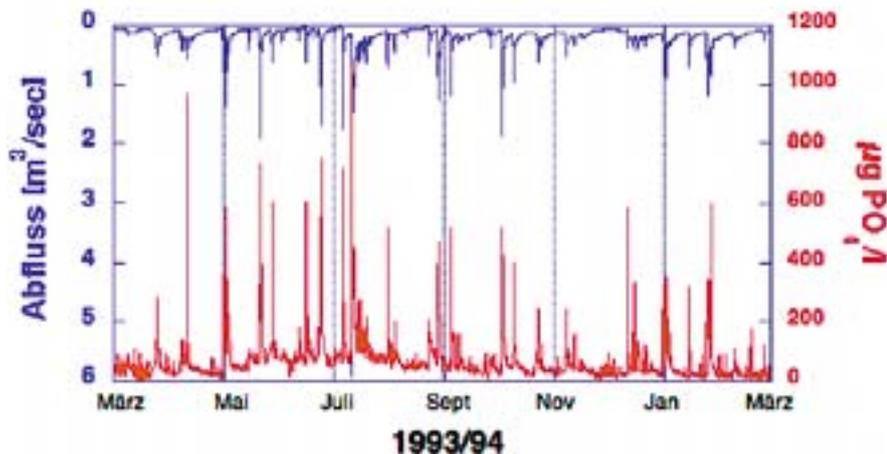
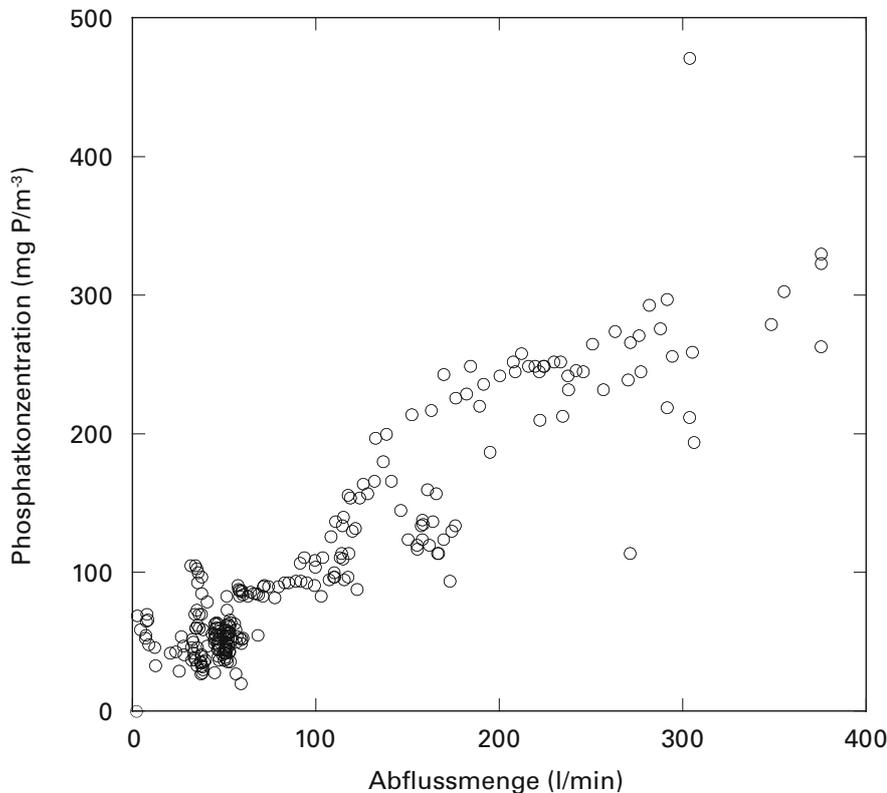
Phosphate, die in Form von Jauche, Mist oder als Mineraldünger auf die Felder ausgebracht werden, um einen hohen Pflanzenertrag zu erzielen, werden von Bodenpartikeln rasch gebunden (adsorbiert) und den Pflanzen bei Bedarf kontinuierlich zur Verfügung gestellt. Die ausgeprägte Affinität des Bodens gegenüber Phosphat bewirkt, dass dieses aus dem Wasser entfernt und in den oberen Bodenschichten akkumuliert wird. Solange diese obere Bodenschicht genügend freie Ka-

pazität hat, Phosphat aus dem durchfließenden Wasser zu binden, gelangt mit dem abfließenden Sickerwasser nur wenig in die Seezuflüsse. Der Landwirt kann den Boden düngen, ohne gleichzeitig auch das Algenwachstum im See anzukurbeln. Häufig weicht aber das Sickerverhalten vom beschriebenen Ideal ab. Der Boden ist kein homogener Filter, sondern durchsetzt von grösseren Hohlräumen (Makroporen) wie Wurmgängen, alten Wurzelhohlräumen und Trockenrissen. Solche Makroporen können mit einem Färbeversuch di-

rekt sichtbar gemacht werden. Über diese Transportwege kann gelöstes Phosphat ohne den Austausch mit der Bodenmatrix über Drainagesysteme rasch in den nächsten Bach gelangen. Bei zunehmendem Abfluss steigt die Phosphatkonzentration des Wassers an. Wenn während Starkregenereignissen die Niederschlagsintensität die Versickerung durch die Bodenmatrix übertrifft, wird entweder P-reicher Oberflächenabfluss erzeugt oder gar Ackererde mitgespült. Diese Transportwege bewirken, dass während Trockenwetter die Phosphatkonzentration in Fließgewässern niedrig ist, aber bei anhaltendem und/oder intensivem Regenwetter sprunghaft ansteigt.

Die Eigenschaft der Böden, zwischen P-Angebot und P-Nachfrage zu vermitteln, ist sensibel und in ihrer Kapazität begrenzt. Wenn ihnen zu viel Phosphat zugeführt wird, können sie diese Funktion nicht mehr wahrnehmen. Das Fass läuft über! Die Phosphatkonzentration des abfließenden Sickerwassers nimmt dramatisch zu. Die Zufuhr zum See übersteigt das tolerierbare Mass. Mit dem Boden so zu wirtschaften, dass er seine natürliche Pufferfunktion dauernd erfüllen kann, liegt in der Verantwortung der Landwirte. Sie müssen alle Aktivitäten vermeiden, die zu einer übermässigen Belastung der Gewässer mit Dünger-P führen: Sie sollen z.B. keine Düngstoffe auf gefrorene oder durchnässte Böden ausbringen, auf das Düngen in Gewässernähe verzichten, nicht über den Pflanzenbedarf hinaus düngen und in ihrer Düngplanung die im Boden vorhandenen Reserven berücksichtigen. Sie müssen genügend Lagerraum für den Hofdünger bereitstellen, vermeiden, dass Phosphat über die Hofplatzentwässerung in die Gewässer gelangen kann, Ackerbau in drainierten Gebieten unterlassen und auf empfindlichen Flächen schonende Bodenbearbeitungsmethoden anwenden oder die Bewirtschaftung extensivieren. Seit zwei Jahrzehnten stossen diese Postulate bei der Mehrheit der Landwirte auf zunehmende Beachtung.

Phosphatkonzentration in Abhängigkeit von der Abflussmenge in einer Drainage



Die Phosphorkonzentration (rot) in der Kleinen Aa kurz vor der Mündung in den Sempachersee steigt immer dann an, wenn bei Regen der Abfluss (blau, invers aufgetragen) zunimmt.

Beat Müller
René Gächter

Massnahmen der Aargauer Landwirtschaft

Seit 2001 werden im Rahmen eines Phosphorprojekts nach Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes in den Einzugsgebieten von Baldegger- und Hallwilersee gezielte Leistungen der Landwirtschaft zugunsten der Phosphorreduktion in beiden Seen abgegolten. Allen Beteiligten ist jedoch klar, dass eine weiter gehende Verbesserung der Situation im Hallwilersee nur durch eine vollständige Sanierung des Baldeggersees zu erreichen ist.

Gemeinsam erarbeitet, aber getrennte Projektumsetzung

Das Phosphorprojekt Hallwilersee nach Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) wurde gemeinsam von den Kantonen Aargau und Luzern ausgearbeitet. Die Strukturen und die Ausrichtung der Landwirtschaftsbetriebe im Aargauer und Luzerner Einzugsgebiet des Hallwilersees unterscheiden sich jedoch stark. Die Nährstoffbelastung durch die intensive Tierhaltung ist im Kanton Luzern bedeutend höher. Dies widerspiegelt sich hauptsächlich im Vergleich von Nährstoffbilanzen und Bodenproben. Die Aargauer Landwirtschaft trägt mit einer Phosphorfracht von 900 Kilogramm pro Jahr nur zu einem kleinen Teil zur geschätzten jährlichen Belastung des Hallwilersees von 5,5 Tonnen Phosphor landwirtschaftlichen Ursprungs bei. Aufgrund dieses Unterschieds drängten sich in den beiden Kantonen unterschiedliche Massnahmen auf.

Projekt basiert auf Freiwilligkeit

Das aargauische Einzugsgebiet des Hallwilersees umfasst eine landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) von rund 1200 Hektaren, die von 90 Landwirtschaftsbetrieben bewirtschaftet wird. Die Betriebe sind unterschiedlich betroffen. Teilweise befinden sich nur einzelne Parzellen eines Betriebes innerhalb des Perimeters. Die Landwirtinnen und Landwirte entscheiden, ob die erwünschten Änderungen bei der Bewirtschaftung und bezüglich Produktionstechnik, die Einbussen oder Mehraufwendungen zur Folge haben,

durch die in Aussicht gestellten Abgeltungen abgedeckt sind.

Grundsätzlich sind zwei Arten von Massnahmen festgelegt, die sich auch in der Dauer der Vereinbarungen unterscheiden. Zu den produktionstechnischen Massnahmen von einjähriger Dauer gehören Direktsaaten von Begrünungen, Mais und Wintergetreide sowie Streifenfrässaat von Mais. Direkt- und Streifenfrässaat reduzieren die Erosionsgefahr und damit das Abschwemmen von Phosphor. Zu den Bewirtschaftungsanpassungen von sechsjähriger Dauer zählen Pufferstreifen entlang von Bächen und am See, der Verzicht auf die acker-

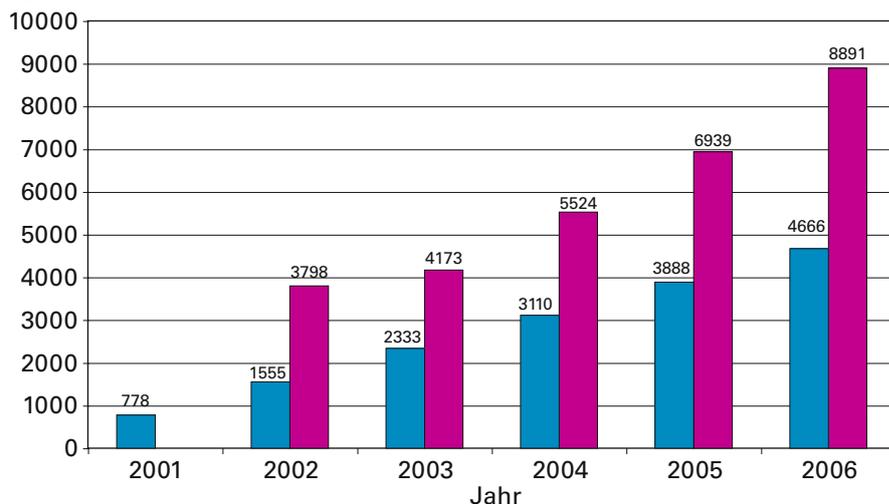
Massnahmen im Aargauer Einzugsgebiet

- Direktsaaten von Begrünungen, Mais und Wintergetreide
- Streifenfrässaat von Mais
- Pufferstreifen entlang von Gewässern
- Stilllegung von drainierten Flächen auf Ackerland
- Reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern

bauliche Nutzung von drainierten Parzellen und ein reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern. Die Bewirtschaftungsanpassungen bezwecken, dass abgeschwemmter Phosphor in Pufferstreifen zurückgehalten wird, Phosphor nicht über Drainagen in den See ausgewaschen wird und weniger Phosphatdünger als zulässig eingesetzt werden.

Massnahme reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern

kg Phosphat



- nicht gedüngte Phosphatmenge (Erwartung gemäss Projektbericht)
- effektiv nicht gedüngte Phosphatmenge

Bei der Massnahme Mengenreduktion an Phosphatdünger übertraf der Erfolg die Erwartungen. Die 27 teilnehmenden Betriebe mit insgesamt 551 Hektaren LN deckten ihren Phosphatbedarf im Jahr 2006 im Durchschnitt zu nur 74 Prozent.

Von den 90 Betrieben im Aargauer Einzugsgebiet des Hallwilersees beteiligten sich 2006 46 an einer oder mehreren Massnahmen. Grosses Interesse zeigen sie bezüglich der Massnahmen Pufferstreifen und reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern. Der reduzierte Düngereinsatz übertraf die Erwartungen der Projektverantwortlichen klar. Die geänderten Strategien zur Phosphatdüngung lassen vermuten, dass auf ein grosses Potenzial für den Einsatz von Nährstoffen aus Luzerner Hofdüngern verzichtet wird. Dies ist umso bemerkenswerter, wenn man sich bewusst ist, unter welchem Druck die Luzerner Landwirtschaft versucht, Hofdüngerüberschüsse in den Kanton Aargau, auch ins Seetal, ab-

zugeben. So gesehen wirken die Beiträge für diese Massnahme wie ein imaginärer Schutzwall gegen den Nährstoffdruck aus dem südlichen Nachbarkanton.

Mit 11 Hektaren Pufferstreifen entlang von Bächen und dem See scheint das momentan Machbare erreicht zu sein. Direkt- und Streifenfrässaaten überzeugen die Bewirtschafter/innen im Gegensatz zu den Aargauer Nitratprojekten kaum. 10 bis 15, maximal 26 Hektaren stehen in keinem Verhältnis zur Ackerfläche im Einzugsgebiet. Seit Frühjahr 2006 sind knapp drei Hektaren drainiertes Ackerland in Meisterschwanden und Seengen stillgelegt.

Ausblick

Die Skepsis und die Zurückhaltung der Bewirtschafter/innen bezüglich Direkt- und Streifenfrässaaten sowie gegenüber der Stilllegung von drainierten Ackerflächen bewirkten einerseits, dass die budgetierten Gelder nicht im geplanten Umfang zur Auszahlung gelangten. Andererseits wurden massiv mehr Finanzmittel für die Massnahme reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern eingesetzt. In den vergangenen sechs Jahren leisteten Bund und Kanton Aargau gemeinsam Beiträge an die Aargauer Betriebe in der Höhe von gut 539'000 Franken. Davon musste der Aargau knapp 117'000 Franken bezahlen.

Die Schwerpunkte des Phosphorprojekts Hallwilersee liegen im Aargauer Teil bei den Massnahmen Pufferstreifen und reduzierter Einsatz von Phosphatdüngern. Dies widerspiegelt die allgemeine Situation der Aargauer Betriebe, die aufgrund des tiefen Viehbesatzes die Wahl haben, auf mögliches Intensivierungspotenzial zu verzichten und sich dies mit Beiträgen aus dem Projekt abgeltet zu lassen. Andererseits kommt jedoch auch zum Ausdruck, dass sich die Aargauer Landwirtschaft nur am Rand für die Phosphorbelastung des Hallwilersees verantwortlich fühlt. Dies äussert sich auch in bäuerlichen Aussagen wie: «Wenn die Luzerner handeln, wird mehr erreicht.» – «Die Verursacher sind bekannt, wir Aargauer können nur noch wenig verbessern.»

Im Rahmen der Umsetzung der Agrarpolitik 2011 ist vorgesehen, viehstarke Landwirtschaftsbetriebe in See-einzugsgebieten bezüglich ihres Hofdüngereinsatzes einzuschränken, da die Parzellen dieser Betriebe im Allgemeinen bezüglich Phosphorversorgung umweltrelevante Überschüsse aufweisen. Als Selektionskriterium soll der Phosphat-Eigenversorgungsgrad aufgrund einer gesamtbetrieblichen Nährstoffbilanzierung gelten. Festgehalten in der Direktzahlungsverordnung und in Anwendung der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung wären diese Betriebe gezwungen, ihre Bodenvorräte gezielt zu nutzen und abzubauen.



Pufferstreifen in Form einer Wiese entlang von Bachläufen und des Sees wirken als «Auffangbecken» für abgeschwemmte Nährstoffe.

Christoph Ziltener

Phosphorprojekte an den Luzerner Mittellandseen

Zur langfristigen und nachhaltigen Sanierung der Luzerner Mittellandseen wurden Phosphorprojekte ins Leben gerufen, welche im Jahr 1999 am Sempachersee, im Jahr 2000 am Baldeggersee und im Jahr 2001 am Hallwilersee gestartet wurden. Der heutige Gesundheitszustand der drei Seen hängt stark von den umgesetzten Massnahmen im Rahmen dieser Phosphorprojekte ab.

Der Seevertrag

Die aktuelle Messung im Sempachersee ergab einen Wert von 25 mg Phosphor/m³, was deutlich unter dem Zielwert von 30 mg/m³ liegt. Auch die Werte im Baldeggersee sinken jährlich, wobei aufgrund des relativ kleinen Seevolumens im Verhältnis zur Grösse des Einzugsgebiets dieser See trotz erfolgreicher Umsetzung der Massnahmen bis Ende 2010 nicht gesund sein wird. Dieser Umstand wirkt sich negativ auf den Hallwilersee aus. Die Genesung des Hallwilersees hängt vom Gesundheitszustand des Baldeggersees ab, da dieser in den Hallwilersee entwässert. Ohne den Baldeggersee könnte es dem Hallwilersee möglicherweise schon heute so gut wie dem Sempachersee gehen, und zwar dank dem grossen Einsatz der Landwirte.

Die Landwirte beteiligen sich entweder am Seevertrag, der mehrere gesamtbetriebliche Massnahmen umfasst, oder sie leisten mit Einzelmassnahmen einen Beitrag zur Sanierung der Mittellandseen. Die Anforderungen und Massnahmen sind an allen drei Seen dieselben und haben zum Ziel, den Phosphoreintrag aus der Landwirtschaft in die Seen zu reduzieren.

Die Anforderungen des Seevertrags umfassen mehrere Massnahmen. Dazu gehören 5 m breite düngerefreie Streifen entlang von Gewässern sowie 5 % nicht düngbare Fläche an der Landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN). Im Weiteren muss der Phosphorgehalt im Boden regelmässig gemessen

werden. Anhand des Phosphorvorrates der Parzellen haben die Landwirte die Düngerausbringmenge anzupassen. Dazu ist es den Landwirten während etwas mehr als drei Monaten im Winter, selbst bei guten Witterungsverhältnissen, nicht erlaubt, Gülle und Mist auszubringen. Über Winter müssen die Äcker begrünt sein und an steilen Hängen (> 18 % Neigung) die Ackerkulturen mit Streifenfräs- oder Direktsaat angebaut werden. Der Anteil Mais, Rüben und Kartoffeln ist wegen der erhöhten Erosionsgefahr zwischen den Anbaureihen auf maximal 20 % an der Ackerfläche beschränkt. Im Hofbereich müssen Entwässerungen, welche direkt in die Gewässer leiten, saniert werden. Zu den Anforderungen gehört auch, die Hofdüngeranlagen so einzurichten, dass keine Gefahr für die Gewässer

besteht. Technische Entwässerungen von Strassen müssen saniert oder in einem Abstand von 6 m düngerefrei gehalten werden. Eine jährliche, obligatorische Weiterbildungsveranstaltung dient dazu, die Landwirte über Änderungen zu informieren und ihnen Wissen zur Seesanieung zu vermitteln.

Die Einzelmassnahmen

Die Einzelmassnahmen können zusätzlich zum Seevertrag oder einzeln auch ohne Seevertrag umgesetzt werden. Zu den Einzelmassnahmen gehören 5 m breite Pufferstreifen entlang von Gewässern, das Erstellen eines Rückhaltweihers, die Stilllegung von Schweine- oder Hühnerställen und die Anwendung von Direkt- und Streifenfrässaat bei allen Kulturen. Bei der Streifenfrässaat wird lediglich ein Band von ca. 30 cm Breite zur Saatgutablage, bei der Direktsaat wird der Boden gar nicht mehr bearbeitet. Es wird nur noch der Säschrift gezogen. Unbearbeiteter Boden ist viel stabiler, vermag wesentlich mehr Wasser aufzunehmen und ist dementsprechend weniger erosionsanfällig.



Streifenfrässaat auf einer Ackerfläche in Aesch LU

Die Landwirte werden mit einem Flächenbeitrag für den Seevertrag und einem Kilobeitrag für den nicht eingesetzten Phosphor entschädigt. Für die Streifenfräs- und Direktsaat sowie die Pufferstreifen wird zusätzlich eine Flächenentschädigung entrichtet. Im Jahr 2005 wurden den beteiligten luzernischen Landwirten am Hallwilersee Beiträge von etwas mehr als einer Million Franken entrichtet.



Erfolge am Hallwilersee

Die Teilnahme am Seevertrag und an den Einzelmassnahmen ist freiwillig. Der Wille, einen Beitrag an die Seesänerung zu leisten, und die Entschädigungen sind für eine Vielzahl der Landwirte Motivation genug, um sich am Phosphorprojekt zu beteiligen. Ende 2005 hatten 134 von 180 Betrieben, die den ÖLN erfüllen, einen Seevertrag.

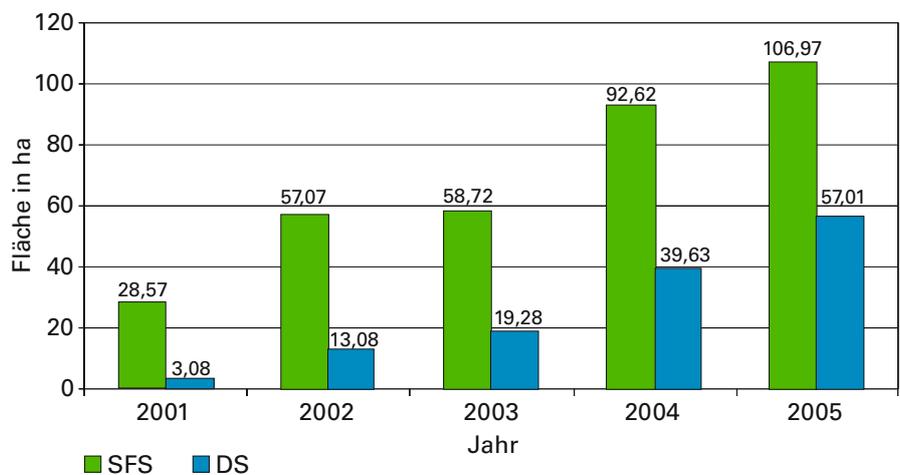
Dank der hohen Beteiligung konnten bereits erfreuliche Resultate erreicht werden. 75 % der LN im luzernischen Einzugsgebiet des Hallwilersees sind unter Seevertrag. Dies sind 10 % mehr als die formulierte Zielgrösse für das Ende der zweiten Projektphase bis 2010. Die Direkt- und Streifenfrässaatflächen nehmen jährlich zu, wobei die Zielfläche bei der Direktsaat noch nicht ganz erreicht werden konnte. Dafür wurden im Jahr 2005 23 Hektaren Streifenfrässaat über der Zielfläche angebaut.



Der eingesetzte Phosphor konnte auf 80 % der erlaubten Menge reduziert werden. Die Zielgrösse wurde somit mehr als das Doppelte übertroffen. Die Pufferstreifenfläche von 51 ha ist noch nicht erreicht, sie lag Ende 2005 bei 42 ha.

Einige Ziele konnten deutlich übertroffen, andere jedoch noch nicht ganz erreicht werden. Dank der weit über dem Ziel liegenden hohen Beteiligung der Betriebe werden die noch nicht erreichten Ziele in absehbarer Zeit erfüllt sein. Die umgesetzten Massnahmen zeigen entsprechend Wirkung, denn die Phosphoreinträge in den Hallwilersee sinken jährlich.

Zunahme Streifenfräs- und Direktsaat am Hallwilersee 2001–2005



Zunahme Direkt- und Streifenfrässaat im EZG Hallwilersee Kt. LU seit dem Jahr 2001

Isabelle Falconi-Bürgi

Sanierungsmassnahmen verbessern die Wasserqualität

Übermässiges Algenwachstum als Folge der Überdüngung beeinträchtigte die Wasserqualität des Hallwilersees während Jahrzehnten. Die Sanierungsmassnahmen haben seit 1986 die Wasserqualität deutlich verbessert. Der Phosphorgehalt ging um 80 Prozent zurück und erreicht nun fast die Zielvorgabe. Das früher grosse Sauerstoffdefizit konnte durch die Seebelüftung kompensiert werden. Im Tiefenwasser ist mittlerweile genügend Sauerstoff für das Leben von Fischen vorhanden.

im See vorhanden sind. Als Folge davon, wenn die Algen absterben, wird der Sauerstoff in der Tiefe aufgebraucht und die aufgenommenen Nährstoffe werden wieder frei. Im Hallwilersee war dadurch das Tiefenwasser seit den 1940er-Jahren im Sommer ohne Sauerstoff, was für das Leben im See gravierende Konsequenzen hatte.

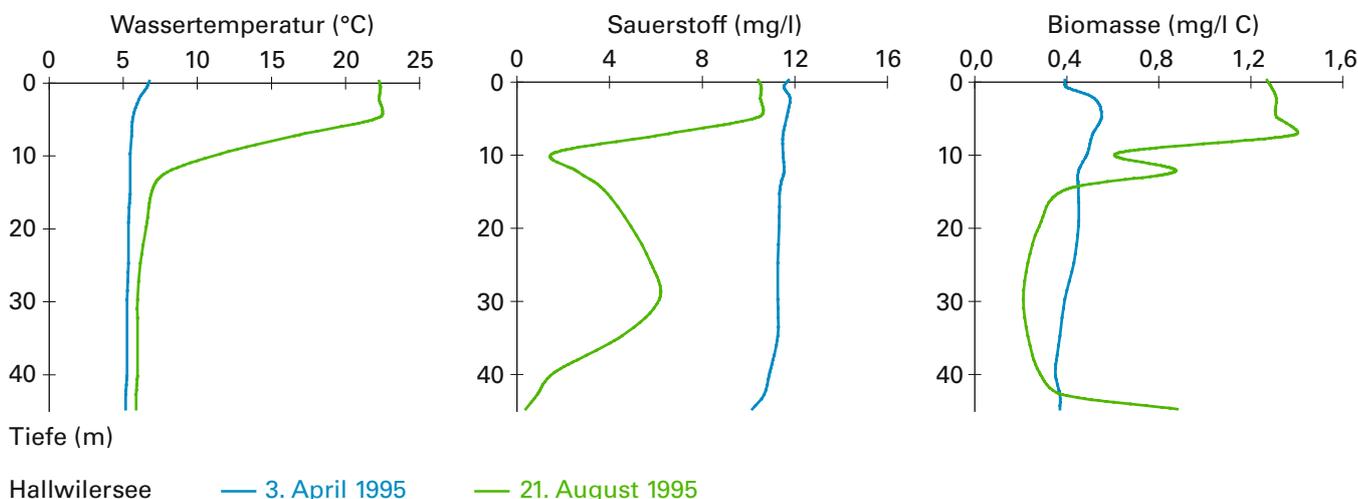
Die chemische Zusammensetzung des Seewassers – das sind hauptsächlich Nährstoffe, Härte und Sauerstoffgehalt – hängt davon ab, aus welcher Tiefe und zu welcher Jahreszeit das Wasser stammt. Verschiedene physikalische, chemische und biologische Prozesse sind für eine Dynamik in der

Zusammensetzung der Wasserinhaltsstoffe verantwortlich. Dazu gehören Mischungs- und Schichtungsprozesse, Fällungs- und Lösungsprozesse und das Wachstum von Phytoplankton – mikroskopisch kleine Algen, die im Wasser schweben. Diese wachsen übermässig, wenn viele Nährstoffe

Das Labor der Abteilung für Umwelt überwacht die Wasserqualität

Zur Beurteilung der Wasserqualität eines Sees müssen die Untersuchungen während des ganzen Jahres und in allen Tiefenzonen des Sees erfol-

Tiefenprofile von Temperatur, Sauerstoff und Biomasse im Hallwilersee Ende Winter und im Sommer 1995



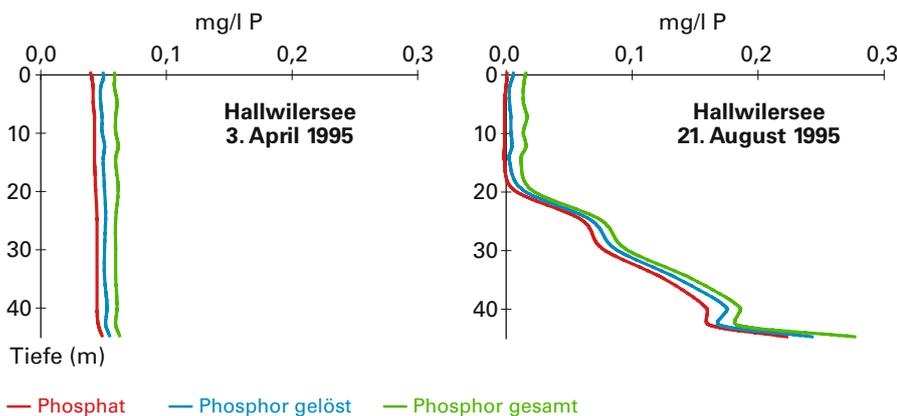
So funktioniert ein See

Durch die Sonneneinstrahlung im Frühjahr und Sommer erwärmt sich das Oberflächenwasser, wird dadurch leichter und schichtet sich über dem kalten Tiefenwasser ein. Die Schichtung hat zur Folge, dass sich Oberflächenwasser mit Tiefenwasser kaum mehr mischt. Im Oberflächenwasser nutzen Algen Sonnenlicht zum Wachstum (Photosynthese). Dabei wird Sauerstoff gebildet. Dies führt teilweise zu einer Sauerstoffübersättigung. Sterben die Algen, sinken sie ins Tiefenwasser ab und fallen auf den Seegrund. Bakterien bauen dieses organische Material ab und verbrauchen dabei Sauerstoff. Bei übermässigem Algenwachstum in einem überdüngten See entsteht mehr organisches Material, als Sauerstoff im Tiefenwasser für diesen Abbau vorhanden ist. Der Sauerstoff wird vollständig aufgebraucht. Dies schränkt den Lebensraum für Fische und tierische Kleinlebewesen am Seegrund stark ein. Im Herbst und Winter kühlt das Oberflächenwasser wieder ab und beginnt sich mit dem Tiefenwasser zu mischen. Sauerstoff gelangt dadurch wieder ins Tiefenwasser.



Die Abteilung für Umwelt untersucht im Hallwilersee an der tiefsten Stelle monatlich Nährstoffe, Sauerstoff und reduzierte Substanzen in verschiedenen Tiefen.

Tiefenprofile von Phosphat, Phosphor gelöst und Gesamtphosphor im Hallwilersee Ende Winter und im Sommer 1995



gen. Der Hallwilersee wird daher seit den 1970er-Jahren regelmässig chemisch untersucht. Mit dem Beginn der Seebelüftung werden gar monatliche Probenahmen im Bereich der tiefsten Stelle durchgeführt. Ein Profil mit 15 Tiefenstufen zeichnet den Verlauf der relevanten Messgrössen auf.

Phosphor steuert das Algenwachstum im See

Phosphor tritt in verschiedenen Formen im See auf, die teils den Algen direkt als Nährstoff dienen (Phosphat), als partikulärer Phosphor für verschiedene Lebensprozesse gebunden werden oder als gelöste organische Verbindungen und Polyphosphate vorkommen. Diese sind für Algen aber als Nährstoffe nicht verfügbar. Alle

Phosphorverbindungen zusammen werden als Gesamtphosphor bezeichnet. Diese Messgrösse gilt als wichtigster Indikator für die Überdüngung eines Sees, denn Phosphor ist der limitierende Nährstoff für das Algenwachstum. Im Sommer wird Phosphat im Oberflächenwasser durch das Phytoplankton vollständig aufgebraucht. Fehlt Phosphat, ist ein weiteres Algenwachstum nicht mehr möglich. Durch Sedimentation der Algen verringert sich der Gesamtphosphor im Wasser. Rücklösung von Phosphat aus dem Sediment hingegen reichert Phosphor im Tiefenwasser an. Erst die Zirkulation des Wassers im Herbst und Winter verteilt den Phosphor im ganzen See neu und ermöglicht weiteres Algenwachstum im Folgejahr.

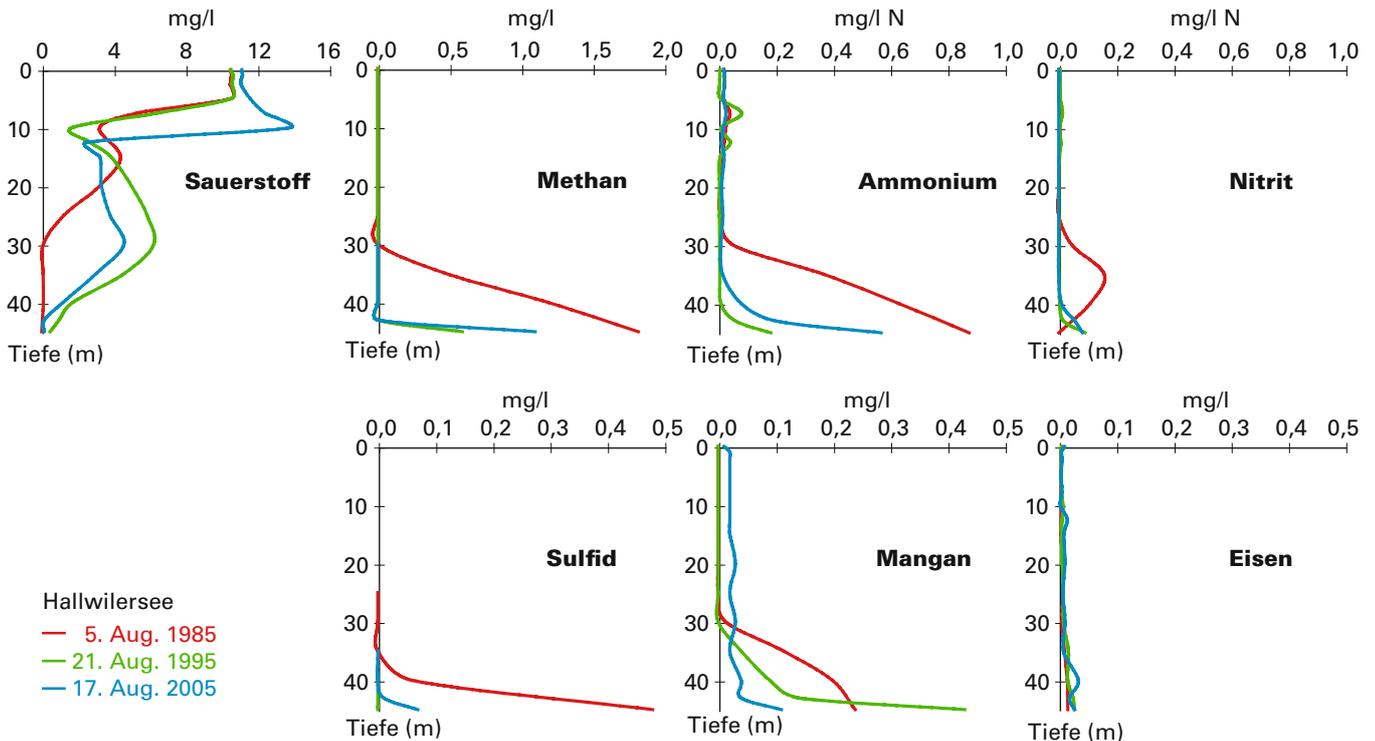
Wie wirkt sich die Photosynthese auf die Wasserqualität aus?

Algen betreiben zum Wachstum Photosynthese, welche neben Sonnenlicht Nährstoffe und Kohlendioxid (CO_2) benötigt. Die Konzentrationen im Wasser gehen dadurch zurück. Im Falle von CO_2 bewirkt die Abnahme eine Verschiebung des pH-Wertes in den deutlich alkalischen Bereich. Als Folge können Kalzite ausfallen, womit die Konzentrationen an Kalzium und Härte im Wasser deutlich abnehmen. Je nach Algenart werden weitere Nährstoffe benötigt. So ist beispielsweise Silikat für die Bildung der Skelette der Kieselalgen notwendig. Bei übermässigem Kieselalgenwachstum kann auch Silikat im Wasser knapp werden und somit die Zusammensetzung der Algen beeinflussen. Falls Nitrat im Herbst knapp werden sollte, behelfen sich gewisse Blaualgen damit, dass sie elementaren Stickstoff fixieren und dann noch wachsen können, wenn für andere Algenarten zu wenig Nitrat vorhanden ist.

Übermässiges Algenwachstum führt zum Sauerstoffschwund in der Tiefe

Sauerstoff gelangt durch die Aufnahme aus der Atmosphäre in den See und wird während der Winterzirkulation bis ins Tiefenwasser verfrachtet. Im Sommer reichert sich Sauerstoff als Produkt der Photosynthese im Oberflächenwasser an. Durch den fehlenden Wasseraustausch aufgrund der Wasserschichtung gelangt dieser Sauerstoff aber nicht in tiefere Wasserschichten. Dort wird vielmehr der Sauerstoff, welcher aus der Winterzirkulation stammt, durch den Abbau der abgestorbenen Algen verbraucht. Bei übermässigem Algenwachstum wird der Sauerstoffgehalt vollständig gezehrt und reduzierte Stoffe aus den Abbauprozessen reichern sich in den untersten Wasserschichten an. Diese sind in erster Linie Ammonium, Nitrit, reduziertes Mangan und Eisen. Bei noch grösserem Sauerstoffbedarf entstehen gar Faulgase wie Schwefelwasserstoff (Sulfid) und Methan.

Chemische Zusammensetzung des Wassers im Hallwilersee im Sommer, ohne (1985) und mit Belüftung (1995, 2005)



Die Seebelüftung verbessert den Sauerstoffhaushalt des Sees entscheidend

Vor Beginn der Belüftung des Hallwilersees reichte die natürliche Anreicherung des Sees mit Sauerstoff im Winter nicht aus, um bis zum Grund das Wasser mit Sauerstoff zu sätti-

gen. Die Tiefenzone unter 25 bis 30 Metern war oft ganzjährig sauerstofffrei. Entsprechend reicherten sich reduzierte Stoffe im See an.

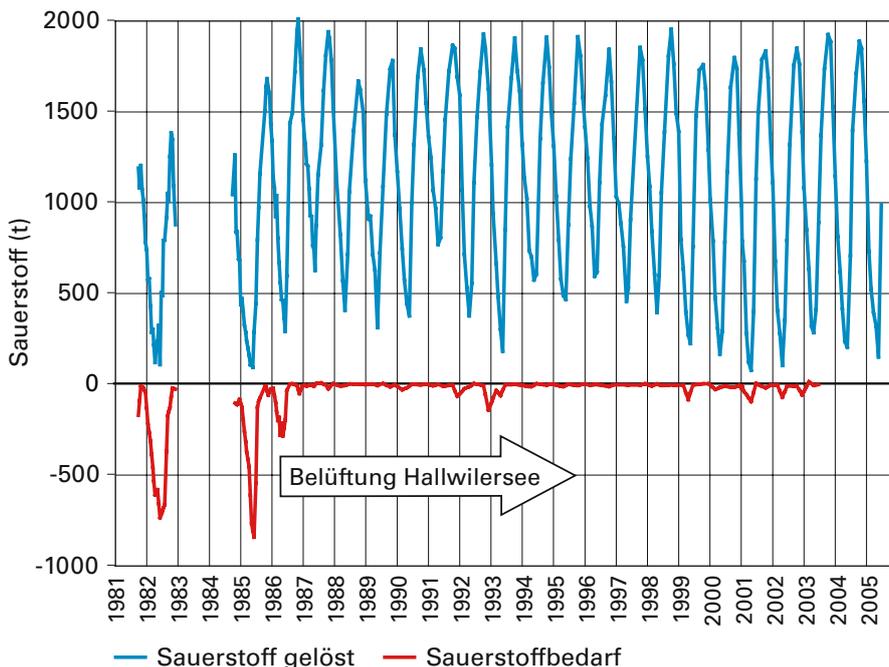
Gelangt nun Sauerstoff in die Tiefe, so werden diese reduzierten Stoffe als Erste oxidiert, bevor sich die Sauerstoffkonzentration im Wasser erhöht.

Spezielle Bakterien im Wasser bewirken diese Oxidation. Der Sauerstoffbedarf dazu lässt sich aus der Konzentration der reduzierten Stoffe berechnen. Er wirkt wie eine Sauerstoffschuld im See.

Mit der regelmässigen Zirkulationshilfe im Winter und Belüftung des Tiefenwassers im Sommer seit 1987 wurde die Sauerstoffschuld im See abgebaut. Die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser liegt im Sommer bei rund 2 bis 6 Milligramm pro Liter. Ganz am Grund und im Herbst kann die Sauerstoffkonzentration vorübergehend noch tiefer sinken. Dann finden wir auch geringe Konzentrationen von reduzierten Verbindungen. Unterhalb von 40 Meter Tiefe ist das Seewasser im Hallwilersee mit einer grossen Sedimentfläche in Kontakt. Dort ist die Mischung des Wassers durch die Belüftung und damit die Nachlieferung von Sauerstoff behindert.

Die Entwicklung des Sauerstoffinhaltes im Tiefenwasser unterhalb von 13 Metern und der Sauerstoffschuld als «negativer Sauerstoff» seit 1982 zeigt die positive Wirkung der seeinternen Massnahmen. Seit 1987 trägt die Seebelüftung jährlich im Sommer zwischen 350 und 650 Tonnen Sauerstoff ins Tiefenwasser ein. Die Sauerstoff-

Jährliche Entwicklung des Sauerstoffs und des Sauerstoffbedarfs durch reduzierte Stoffe im Tiefenwasser (13–46 m) in der Periode 1982–2005



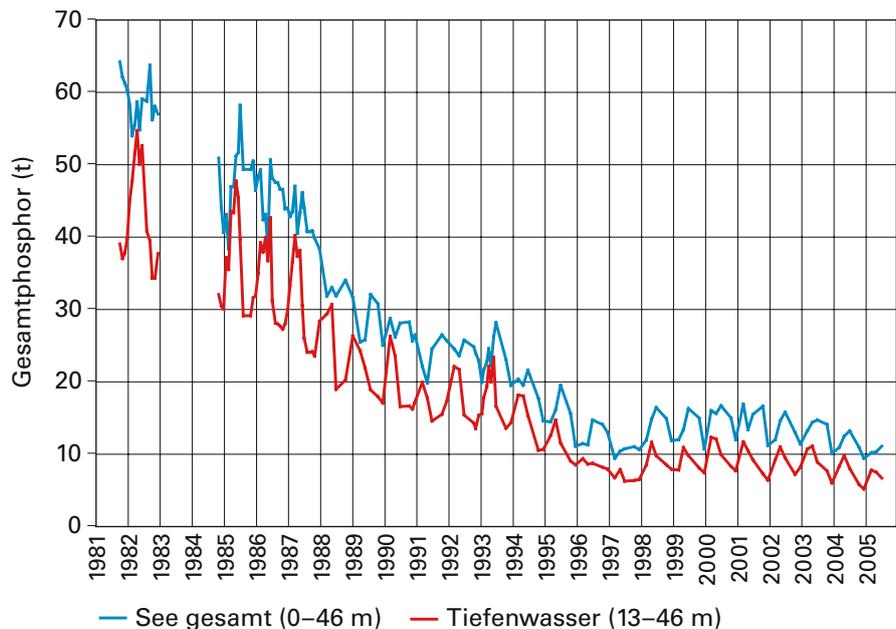
situation im Tiefenwasser hat sich bis 1998 laufend verbessert. Mit der Massenentwicklung der Burgunderblutalgen ab 1999 hat die Algenproduktion jedoch wieder zugenommen und den Sauerstoffbedarf des Sees erhöht.

Der Phosphorinhalt im Hallwilersee ist um 80 Prozent zurückgegangen

Die Überdüngung des Hallwilersees ist in den letzten 20 Jahren von rund 50 Tonnen Gesamtphosphor im See auf 10 Tonnen zurückgegangen. Dies ist im Wesentlichen ein Erfolg der seeexternen Massnahmen – Verbesserung der Wasserqualität des Baldeggersees, Abwassersanierung und Massnahmen in der Landwirtschaft. Im See entspricht der heutige Phosphorinhalt einer mittleren Konzentration von rund 30 Milligramm pro Kubikmeter Seewasser.

Sowohl im gesamten See als auch im Tiefenwasser beobachten wir im Jahresverlauf regelmässige Schwankungen des Phosphorinhaltes. Die höchsten Werte treten im Winter auf, wenn die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment gross und die Mischung des Seewassers vollständig ist. Die tiefsten Werte finden sich im Sommer, da mit den Algen auch ein Teil des Phosphors vorübergehend ins Sediment gelangt. Die Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment ist aus der Schwankung des Phosphorinhaltes im Tiefenwasser während der Stagnationsphase von Mai bis Oktober ersichtlich. Sie hat parallel zum Phosphorinhalt des Sees ebenfalls abgenommen, von rund 18 Tonnen Mitte der 80er-Jahre auf heute rund 3 bis 4 Tonnen.

Verlauf des Phosphorinhalts im gesamten Hallwilersee und im Tiefenwasser seit 1985



Das Sanierungsziel kann erreicht werden

Die gesetzlichen Anforderungen an die Wasserqualität von Seen besagen, dass unter anderem der Nährstoffgehalt höchstens eine mittlere Produktion von Biomasse zulassen darf. Erfahrungsgemäss ist dies bei weniger als 20 bis 30 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter der Fall. Die Algenentwicklung im Hallwilersee wird in den nächsten Jahren zeigen, welcher Wert beim Hallwilersee konkret erreicht werden muss, damit der See nachhaltig gesundet.

Beim Sauerstoff verlangt der Gesetzgeber, dass im Wasser immer mindestens 4 Milligramm pro Liter vorhanden sein sollten. Ohne Belüftung könnte das heute noch nicht erreicht

werden. Die Algenproduktion und die Sauerstoffzehrung durch die Sedimente sind noch zu hoch. Der mit der Belüftung eingetragene Sauerstoff wird so bemessen, dass sich wieder Fische im Tiefenwasser aufhalten und Würmer am Seegrund ganzjährig überleben können. Der Sauerstoffhaushalt des Hallwilersees wird sich in den nächsten Jahren aber verbessern, wenn der Phosphor wie erwartet weiter abnehmen wird.



Arno Stöckli
Martin Märki

Der See lädt zum Baden

Der Hallwilersee bietet viele schöne Badestellen und Rastplätze für Gross und Klein. Das Wasser weist eine sehr gute hygienische Qualität auf. Einzig die ungefährlichen, aber lästigen Entenflöhe trüben gelegentlich nach langen Schönwetterperioden die Badefreuden.

Der See lädt zum Baden – seit vielen Generationen

Seit vielen Generationen bietet der Hallwilersee sommerliches Badevergnügen. Ob an den idyllischen Örtchen des bewaldeten Ufers oder an den offenen, lebhaften Picknickstellen mit Liegewiese – am und im Hallwilersee lässt sich ausgezeichnet baden, schwimmen und die Sonne geniessen. Der Freizeitspass an diesem natürlichen Gewässer bleibt populär wie eh und je.



Badespass am Hallwilersee in diesem Jahrtausend



Badespass am Hallwilersee im letzten Jahrhundert

Badewasser im Kontakt mit dem Körper

Anders als bei Wasser, das wir trinken, kommt Wasser, in dem wir baden, nur beschränkt in Kontakt mit unserem Stoffwechsel. Die menschliche Haut bildet nämlich eine sehr wirksame Barriere gegen das Eindringen von Mikroorganismen und Fremdstoffen. Trotzdem entsteht beim Baden, Schwimmen und Tauchen ein gewisser Kontakt über Schleimhäute, Gehörgang, Augen und Wunden. Zudem wird meist auch eine geringe Wassermenge verschluckt und gelangt so in unser Verdauungssystem. Der Mensch muss also auch beim Baden ein Augenmerk auf eine gute Wasserqualität haben. Das heisst, das Wasser muss mikrobiologisch und chemisch sauber genug sein, dass es keine Infektionen oder sonstige Beschwerden verursacht.

Badewasserqualität am Hallwilersee

Während der Sommersaison entnimmt die Bäderinspektorin (eine Mitarbeiterin des Amtes für Verbraucherschutz) nicht nur in konventionellen Freibädern, sondern auch an den Badestellen entlang dem Hallwilersee mehrfach Proben zur Untersuchung der hygienischen Wasserqualität. Das sind folgende Probenahmestellen:

Birrwil	Badi
Beinwil a. See	Badi
Meisterschwanden	Seerose
Meisterschwanden	Badi Tennwil
Seengen	Brestenberg

■ Bakterien

Die Analysen auf krankheitserregende Bakterien und Bakteriengruppen, die eine gesundheitlich relevante Verunreinigung anzeigen, ergaben in den vergangenen Jahren für den Hallwilersee immer wieder das gleiche Bild: Eine Qualitätsklasse A, was bedeutet, dass das Wasser uneingeschränkt zum Baden empfohlen werden kann. Badestellen an Flüssen erreichen diese konstant guten Ergebnisse leider nur selten. Das hängt damit zusammen, dass im See vergleichsweise riesige Wassermengen vorhanden sind und relativ wenig Nährstoffe, sodass die Belastung mit unerwünschten Bakterien in der Regel geringer ist als bei Flussbädern. Folgende Empfehlung gilt hingegen für Fluss- oder Seebäder gleichermaßen: den Kontakt mit kotverschmutzten Flächen oder Gegenständen vermeiden.

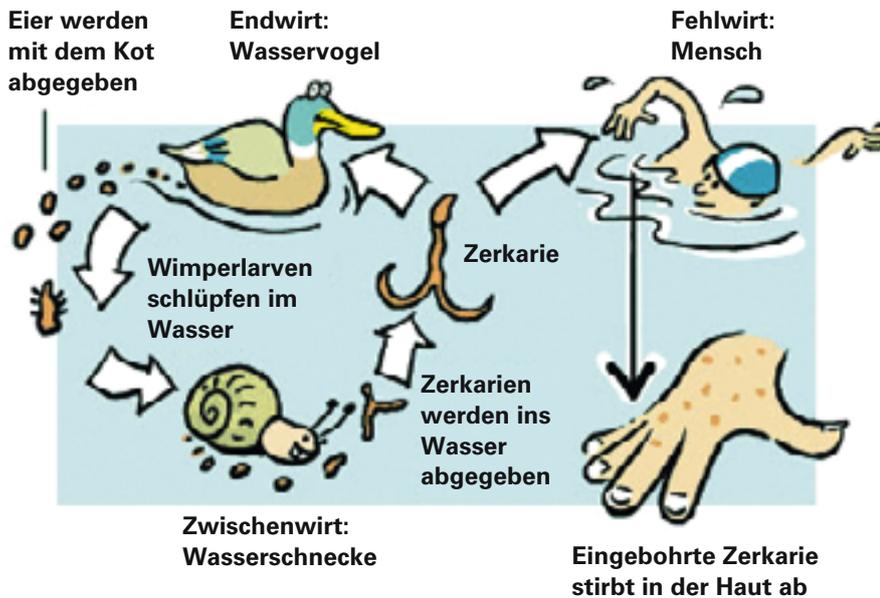
■ Chemikalien

Der Eintrag von chemischen Stoffen aus Abwässern hat sich gegenüber der Zeit vor der Abwassersanierung in den 60er-Jahren stark verringert und stellt heutzutage kein Problem mehr dar. Einzig nach Gewitterregen muss im Bereich von einmündenden Regenentlastungen damit gerechnet werden, dass lokal ungeklärtes, zum Baden nicht geeignetes Wasser vorhanden ist. Hier sind eine vernünftige Wartefrist bis zur Klärung des Wassers und eine zweckmässige Wahl der Badestelle gefordert.

■ Algen

Algen und Wasserpflanzen mögen nicht jedermanns Sache sein – gesundheitlich sind sie aber harmlos. Auch natürliche Giftstoffe sind nicht zu befürchten: Burgunderblutalgen können zwar solche Giftstoffe produzieren, mit den Algen verschwinden jedoch auch die Giftstoffe und dieser Prozess findet rechtzeitig vor der Badesaison statt.

Lebenszyklus der Entenflöhe



Diese Parasiten der Wasservögel können auch den Menschen befallen und Juckreiz verursachen.

■ Kleinlebewesen

Ganz ungeschoren vor Belästigungen durch Mitbenützer des Hallwilersees kommen Badegäste v. a. nach längeren Schönwetterperioden aber nicht immer davon. Bei Wassertemperaturen > 23°C können sich Larven der sogenannten Entenflöhe im Wasser (vor allem an seichten Stellen) befinden. Entenflöhe – eigentlich sind es keine Flöhe, sondern Saugwürmer – zählen zu den Parasiten von Wasservögeln. Sie können sich in die Haut bohren, wo sie allerdings, da der Mensch ein Fehlwirt ist, rasch absterben. Sie beginnen nach ca. 1 Stunde aber zu jucken und verursachen nach 24–48 Stunden einen sehr starken Juckreiz und Entzündungen ähnlich denen von Mückenstichen. Der Juckreiz und diese Entzündungen sind sehr lästig. Die Entzündungen heilen jedoch ohne spezielle Behandlung innert 10–20 Tagen aus. Vorbeugend gilt: sich nach längeren Schönwetterperioden nicht lange im seichten Wasser aufhalten, falls möglich über einen Steg in tieferes Wasser einsteigen und sich nach dem Bad rasch abtrocknen.

Gesundheitsrisiken

Die Gesundheitsrisiken mit der weit-aus grössten Tragweite sind die Badeunfälle. Sie können innert Minuten ein ganzes Leben verändern. Helfen Sie mit, Unfälle zu vermeiden, indem Sie die Baderegeln einhalten!

Irina Nüesch



Nie mit vollem oder ganz leerem Magen schwimmen! – Nach üppigem Essen 2 Stunden warten. Alkohol meiden.



Nie überhitzt ins Wasser springen! – Der Körper braucht Anpassungszeit.



Nicht in trübe oder unbekannte Gewässer springen! – Unbekanntes kann Gefahren bergen.



Kleine Kinder nie unbeaufsichtigt am Wasser lassen! – Sie kennen keine Gefahren.



Luftmatratzen und Schwimmhilfen gehören nicht ins tiefe Wasser! – Sie bieten keine Sicherheit.



Lange Strecken nie alleine schwimmen! – Auch der besttrainierte Körper kann eine Schwäche erleiden.

Damit das Baden ein Spass bleibt: die elementaren Regeln, um Unfälle zu vermeiden

Burgunderblutalgen – ein Zeichen, dass es dem See besser geht

Charakteristisch für den Hallwilersee ist heute die alljährliche Rotfärbung im Frühling, verursacht durch das massenhafte Auftreten der Burgunderblutalge. Paradoxiereise ist dies ein Zeichen für einen Rückgang der Nährstoffbelastung, denn die Burgunderblutalge kann sich nur bei solchen Verhältnissen gegen die anderen Arten durchsetzen. Bei einer vollständigen Gesundung des Sees wird auch sie wieder auf ein normales Mass zurückgedrängt.

Geschichtliche Hintergründe zur Burgunderblutalge

Wichtiges Element im Ökosystem eines Sees ist das Plankton, die Gesamtheit der frei im Wasser schwebenden Kleinorganismen. Plankton besteht aus pflanzlichen Anteilen (Phytoplankton) und aus planktisch lebenden Tieren (Zooplankton). Es ist die Grundnahrung für Jungfische und Felchen und steht somit am Anfang der Nahrungskette. Wie kaum in einem anderen See ist das Phytoplankton des Hallwilersees von einer einzigen Art, der Burgunderblutalge (*Planktothrix rubescens*), charakterisiert. Seit 1998 erlebt der Hallwilersee alljährlich eine Massenentfaltung von *Planktothrix rubescens*.

Den Namen Burgunderblut erhielt *Planktothrix*, weil sie früher im Murtensee oft rote Wasserblüten bildete und deshalb zu der Sage Anlass gab, das Blut der im See anlässlich der Schlacht bei Murten (Burgunderkriege, 1476) ertränkten Burgunder kehre wieder. Die Anwohner konnten die mikroskopisch kleinen Algenfäden nicht sehen. Erst später wurde die Burgunderblutalge mikroskopisch analysiert und als Blaualge beschrieben. Seither ist sie in vielen Seen in Europa invasionsartig erschienen.

Die *Planktothrix* ist Anzeigerin einer schwachen Überdüngung. Wenn die Phosphorkonzentration zu hoch ist, verschwindet sie wieder. Im Hallwilersee trat die Burgunderblutalge schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in grossen Mengen auf, als die Überdüngung des Sees einsetzte. Mit zunehmender Nährstofflast wurde die

Art von anderen Formen verdrängt, welche eine starke Überdüngung ertragen. Das erneute Erscheinen in den späten Achtzigerjahren war zu erwarten und entspricht einer Umkehr der Nährstoffbelastung.

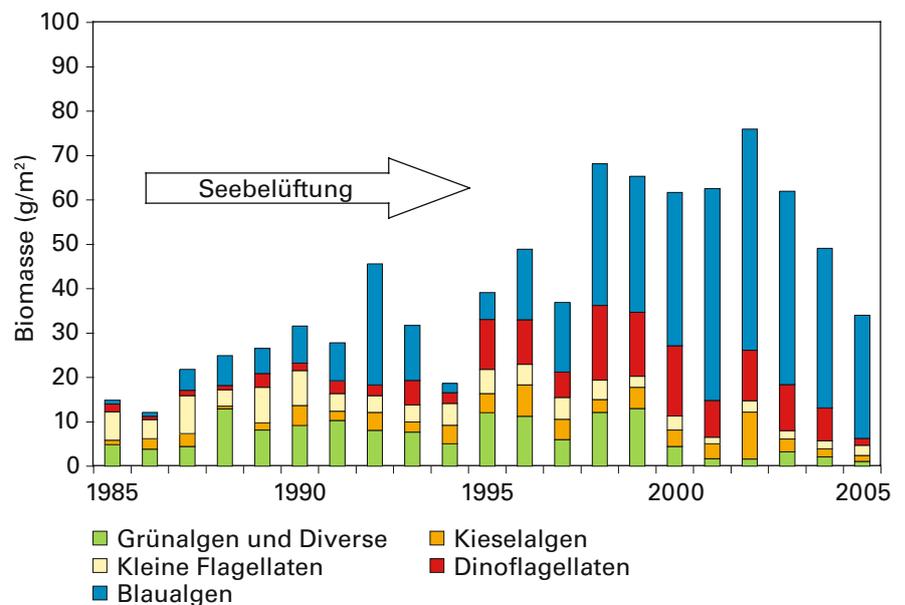
Nicht alle Seen mit ähnlichen Nährstoffgehalten weisen *Planktothrix* auf. Neben dem Nährstoffgehalt sind auch Mischungsverhalten und Seetiefe mitentscheidend. Im Vergleich der drei Mittellandseen Hallwilersee, Baldeggersee und Sempachersee, welche ähnliche Nährstoffgehalte durchlau-

Schon zu biblischen Zeiten

Möglicherweise war eine toxische Blaualge für eine der biblischen Plagen im alten Ägypten verantwortlich: Der Nil färbte sich blutrot und die Fische starben. Das Wasser stank und war ungeniessbar. Alles deutet darauf hin, dass schon damals toxische Planktothrix-Arten, wie sie auch heute im Nil und in Bewässerungsgräben gefunden werden, massenhaft auftraten.

fen haben, ist die Fadenzahl im 46 m tiefen Hallwilersee am grössten, gefolgt vom 67 m tiefen Baldeggersee, während der 88 m tiefe Sempachersee deutlich geringere Individuendichten der *Planktothrix* aufweist.

Phytoplankton (0–13 m)



Die Entwicklung des Phytoplanktons im Hallwilersee seit 1985 zeigt eine Zunahme der jährlichen Biomasse bis 2002. Heute dominiert die Blaualge *Planktothrix rubescens*. Der Hallwilersee erreicht nun mit weniger als 40 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter einen Nährstoffgehalt, der das Algenwachstum zunehmend begrenzt.

Die Wirkung der Belüftung

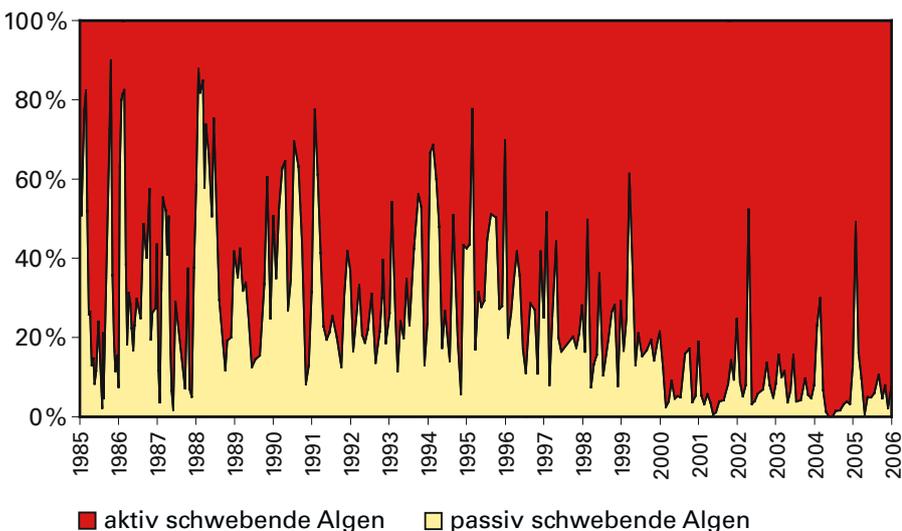
Die Entwicklung des pflanzlichen Planktons verlief im Hallwilersee seit der Einführung seeinterner Massnahmen wie der Zirkulationshilfe und Belüftung in mehreren Wellen.

Unmittelbare Reaktion auf das neue Durchlüftungsregime war ein Rückgang aller Grössenklassen und fast aller systematischen Gruppen. Nur gerade die grossen Kieselalgen konnten etwas zulegen. Ab 1987 setzte der Vor-

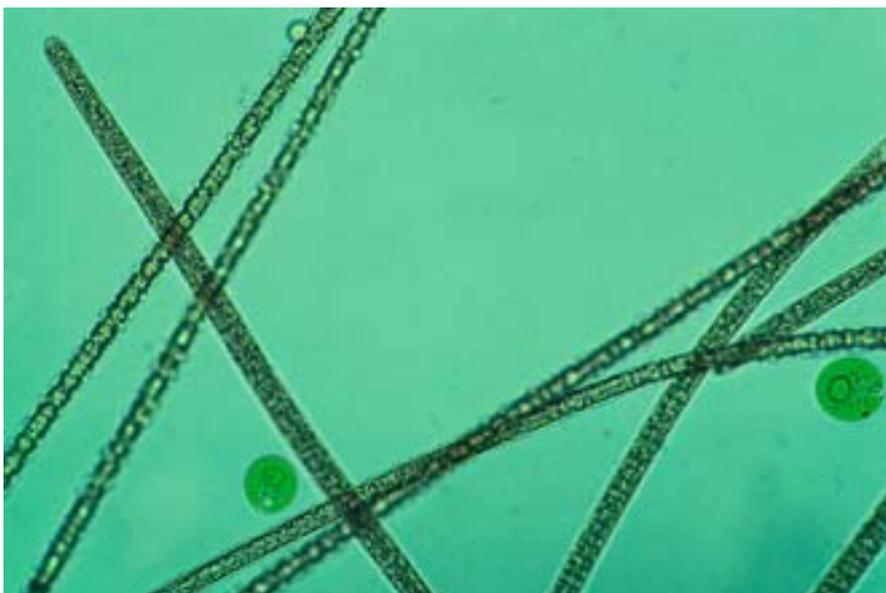
marsch der Blaualgen ein, wobei zunächst Aphanizomenon und Chroococcale dominierten. Erstmals 1992 dominierte die Burgunderblutalge, ohne sich aber in den nachfolgenden vier Jahren durchzusetzen. Ab 1998 erreicht die Burgunderblutalge regelmässig Biomassen von über 30 g/m² im Jahresmittel. Damit drängte sie alle anderen Algengruppen auf 20 bis 30 Prozent des gesamten Phytoplanktons zurück.

Die veränderte Zusammensetzung des Phytoplanktons ist aber auch die Folge der knapper werdenden Nährstoffe im See. 1985 lag der Phosphorgehalt im Hallwilersee bei 170 mg/m³. Inzwischen ist er auf weniger als 40 mg/m³ zurückgegangen.

Zusammensetzung des Phytoplanktons



Die Zusammensetzung des Phytoplanktons hat sich mit dem Rückgang des Phosphors im See verändert. Eine gute Nährstoffversorgung bevorzugt passiv schwebende Algen. Die heute knappen Ressourcen begünstigen Dinoflagellaten und Blaualgen, die sich aktiv dort einschichten, wo noch Phosphat verfügbar ist.



Mikroskopische Aufnahme von Fäden der Burgunderblutalge Planktothrix rubescens. Die Fäden bestehen aus einer Vielzahl von Einzelzellen, die durch eine feine Schleimhülle zusammengehalten werden. Die Fäden haben eine Dicke von 0,01 Millimetern.

Ökologie und Konkurrenz

Zwischen beweglichen und passiv verteilten Algen ist ein klarer Trend bezüglich ihrer relativen Biomasseanteile vorhanden. Die beweglichen Formen wie die Burgunderblutalge nahmen seit 1985 kontinuierlich auf Kosten der passiv verteilten Algen zu.

Ob bei diesem Prozess eine direkte Konkurrenz oder eine indirekte Konkurrenz über Räuber-Beute – Beziehungen (Zooplankton – Algen) zum Wechsel geführt hat, ist unklar. Generell gilt, dass bewegliche Formen eine bessere Nährstoffversorgung ihrer Zellen erreichen und durch die vertikale Bewegung die Photosynthese optimieren können. Die Nährstoffabnahme müsste somit solche Formen begünstigen.

Eine eigentliche Konkurrenz erwarten wir dort, wo sich mehrere Populationen zur gleichen Zeit im gleichen Raum aufhalten und von den gleichen Ressourcen leben. Die zeitliche Abfolge der Algengruppen weist eigentlich nur für die Frühjahrsmonate eine zeitliche und räumliche Überlagerung auf; nachher leben die Populationen in verschiedenen Wassertiefen. Zur Zeit der Wasserblüten im Frühjahr ist es allerdings schon denkbar, dass die Planktothrix die anderen Algen bezüglich Licht und Nährstoffe konkurrenziert.

Die Erklärung der Konkurrenzfähigkeit der Burgunderblutalge ist in ihren ökologischen Eigenschaften zu suchen. Mithilfe von Aerotopen (Gasvakuolen) reguliert sie ihr spezifisches Gewicht so fein, dass sie in der Sprungschicht des Sees (Metalimnion) verharren kann. In dieser Tiefe ist nicht nur wenig Licht vorhanden, dieses ist auch spektral eingeengt (blaugrün). Um diese Lichtqualität optimal zu nutzen, sind zum grünen Chlorophyll zusätzliche rote Pigmente nötig. Die rote Farbe der Burgunderblutalge kommt durch die Dominanz



Von Herbst bis Frühjahr bildet Planktothrix rubescens bei windstillem und schönem Wetter Algenblüten an der Wasseroberfläche.

des roten Farbstoffs Phycoerythrin zustande. Dieses rote Pigment absorbiert das grüne Licht und transferiert seine Energie auf das Chlorophyll zur Photosynthese.

Da sich die Burgunderblutalge ab April in das Metalimnion zurückzieht, stellt sie keine direkte Konkurrenz mehr dar für die Algen in der obersten Wasserschicht. Somit könnte die indirekte Konkurrenz über Räuber-Beute – Zyklen zu einem Nachteil für jene Algen führen. Fädige Algen verheddern sich im Filterapparat der algenfressenden Kleinkrebse des Zooplanktons. Die Blaualgen sind zudem bekannt dafür, dass sie Gifte produ-

zieren (Neurotoxine und Hepatotoxine). Vieles deutet darauf hin, dass sie daher von tierischen Planktonarten im Gegensatz zu den anderen Algen als Nahrung gemieden werden. Im Falle der *Planktothrix rubescens* wurden Hepatotoxine gefunden, welche auf die Leber von Fischen und anderen Wirbeltieren wirken.

Jahreszeitliches Verhalten der Burgunderblutalge

Obwohl Planktothrix oft im Winter und selbst unter Eis grosse Biomassen erreicht und daher als Winterform gilt, wächst sie bei höherer Wassertemperatur besser. Die Kombination von warmem Wasser und wenig Licht ist selten. Erst im Herbst, wenn auch das Metalimnion, wo die Burgunderblutalge während der Phase der stabilen Wasserschichtung lebt, erwärmt wird, sind beide Bedingungen optimal. Die höchsten Zuwachsraten werden dann zu dieser Zeit in dieser Tiefe gemessen.

Sobald die Burgunderblutalgen durch die Herbstzirkulation an die Oberfläche verdriftet werden, weiten sich die Gasvakuolen unter der Druckentlastung auf und schwimmen an der Oberfläche. Dort sind sie dem Untergang geweiht. Gegen die intensive Sonnenstrahlung schützen die Pigmente nicht, die Form geht zugrunde. Das gleiche Phänomen wiederholt sich bei beginnender Stagnation im Frühjahr im Hallwilersee.



*Hansruedi Bürgi
Arno Stöckli*



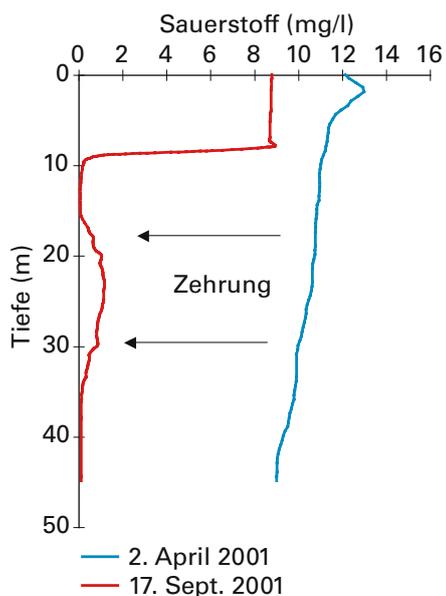
Der Kleinkrebs Eudiaptomus gracilis gehört zu den Ruderfusskrebse. Die bis 1,5 Millimeter grossen Tiere schweben im Wasser. Die langen Antennen dienen als Sinnesorgane, welche Bedrohungen durch Räuber anhand der feinen Wellenmuster erkennen. Dieses Weibchen trägt einen Eiballen am Hinterleib.

Wirkung der Belüftung auf den Sauerstoffhaushalt des Sees

Im Tiefenwasser des Hallwilersees werden im Lauf des Sommers grosse Mengen Sauerstoff gezehrt. Die Belüftung sorgt dafür, dass auch in der kritischen Zeit genug Sauerstoff zur Verfügung steht, um das Überleben von Fischen und Bodenlebewesen zu sichern.

Besonders während der Frühjahrs- und der Sommermonate bilden sich in den obersten Metern des Hallwilersees bedeutende Algenmengen. Diese nehmen Kohlendioxid auf, bilden Biomasse und geben Sauerstoff ab. Im Lauf der Zeit sinken die Algen ins Tiefenwasser ab, wo sich der Vorgang umdreht: Die Biomasse wird abgebaut und Sauerstoff wird verbraucht. Zum Sauerstoffverbrauch trägt auch organisches Material bei, das sich im Lauf der Jahre im Sediment angesammelt hat und ebenfalls durch Bakterien abgebaut wird.

Sauerstoffprofile des Hallwilersees im Frühjahr und Herbst 2001

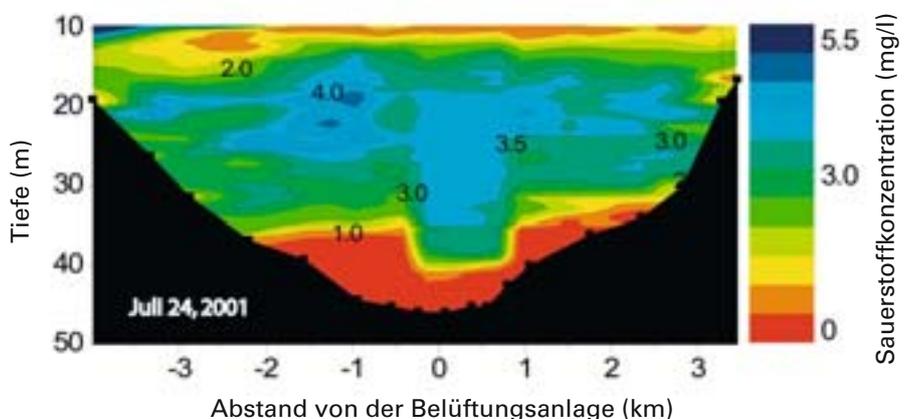


Eawag untersuchte 2001 die Wirkung der Belüftung

Wie viel Sauerstoff verbraucht wird, ist aus Sauerstoffprofilen im Frühjahr und Herbst ersichtlich. Unterhalb von 10 m Tiefe geht die Sauerstoffkonzentration von rund 8 mg/l im April 2001 auf unter 2 mg/l im September zurück. Nahe der Oberfläche ist weiterhin Sauerstoff vorhanden, der aus der darüberliegenden Luft nachgeliefert wird. Weiter nach unten kann der Sauerstoff aber nicht gelangen, da der See im Sommer geschichtet ist und sich das Oberflächenwasser nicht mit dem Tiefenwasser mischt.

Ohne Gegenmassnahmen würde die Zehrung dazu führen, dass praktisch der gesamte Sauerstoff im Tiefenwasser aufgebraucht wird und dadurch das Überleben der Fische und der Bodenlebewesen gefährdet ist. In verschiedenen Schweizer Seen traten in Jahren mit grosser Sauerstoffzehrung Fischsterben auf.

Die Belüftungsanlage des Hallwilersees erfüllt die wichtige Funktion, einen Teil des gezehrten Sauerstoffs zu ersetzen, um einen vollständigen Sauerstoffschwund im Tiefenwasser zu verhindern. Dabei muss gewährleistet sein, dass sich der feinblasige Sauerstoff innerhalb des Tiefenwassers auflöst und ausreichend verteilt. Mithilfe von Sauerstoffprofilen wurde die räumliche Verteilung des Sauerstoffs im Hallwilersee verfolgt. Im Längsschnitt des Sees von Süden nach Norden zeigt sich, dass mit Ausnahme von Tiefen grösser als 35 m der eingetragene Sauerstoff im gesamten Tiefenwasser verteilt wird. Im Jahr 2001 war die Sauerstoffzehrung am Seegrund so hoch, dass dort der von der Belüftung eingetragene Sauerstoff sofort aufgebraucht wurde. Mit Temperaturprofilen im Nahbereich eines der sechs Diffusoren der Belüftung kann die von den aufsteigenden Sauerstoffblasen erzeugte Wasserströmung nachgewiesen werden. Das kalte, mit Sauerstoff angereicherte Wasser steigt bis gegen 10 m Tiefe auf. Bis dorthin haben sich die Blasen vollständig im Wasser aufgelöst. Da kaltes Wasser schwerer ist als warmes, sinkt nun das sauerstoffreiche Wasser wieder ab und vermischt sich in 25–35 m Tiefe im See.



Burgunderblutalgen führten zu einer besonders grossen Sauerstoffzehrung.

Längsschnitt der Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser von Süden nach Norden. Der Sauerstoffeintrag der Belüftung erfolgt in der Seemitte.

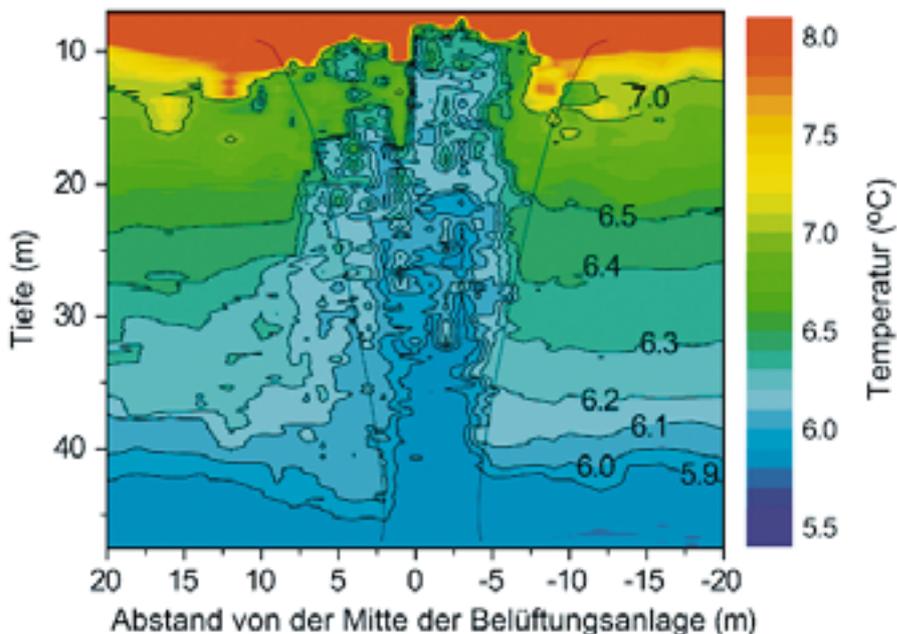
**Ohne Belüftung
fehlt genügend Sauerstoff**

Wie die Situation im Tiefenwasser des Hallwilersees ohne Belüftung heute aussehen würde, verdeutlicht eine Bilanz des Sauerstoffs im Tiefenwasser für das Jahr 2005. Die Sauerstoffzehrung im Lauf des Frühjahrs und Sommers (gelbe Säule) ist grösser als der gesamte Sauerstoffinhalt (blaue Säule). Deshalb würde ohne Sauerstoffeintrag der gesamte Sauerstoff des Tiefenwassers aufgebraucht. Fische und Bodenlebewesen im Tiefenwasser wären damit in Gefahr. Nur durch die Belüftung (rote Säule) kann erreicht werden, dass die Sauerstoffbilanz am Ende des Sommers positiv bleibt.

Die Sauerstoffzehrung in einem bestimmten Jahr hängt von verschiedenen Faktoren ab: Je nach Wind und Temperatur im Winter ist der See mehr oder weniger gut mit Sauerstoff gesättigt (bei niedrigen Temperaturen wird mehr Sauerstoff im Wasser gelöst). Die Wetterverhältnisse im Frühjahr beeinflussen die Stärke und Tiefe der Schichtung und damit das Volumen des Tiefenwassers. Schliesslich schwankt auch die Algenproduktion von Jahr zu Jahr. Von diesen Faktoren hängt ab, wie viel Sauerstoff zur Verfügung steht und wie viel gezehrt wird.

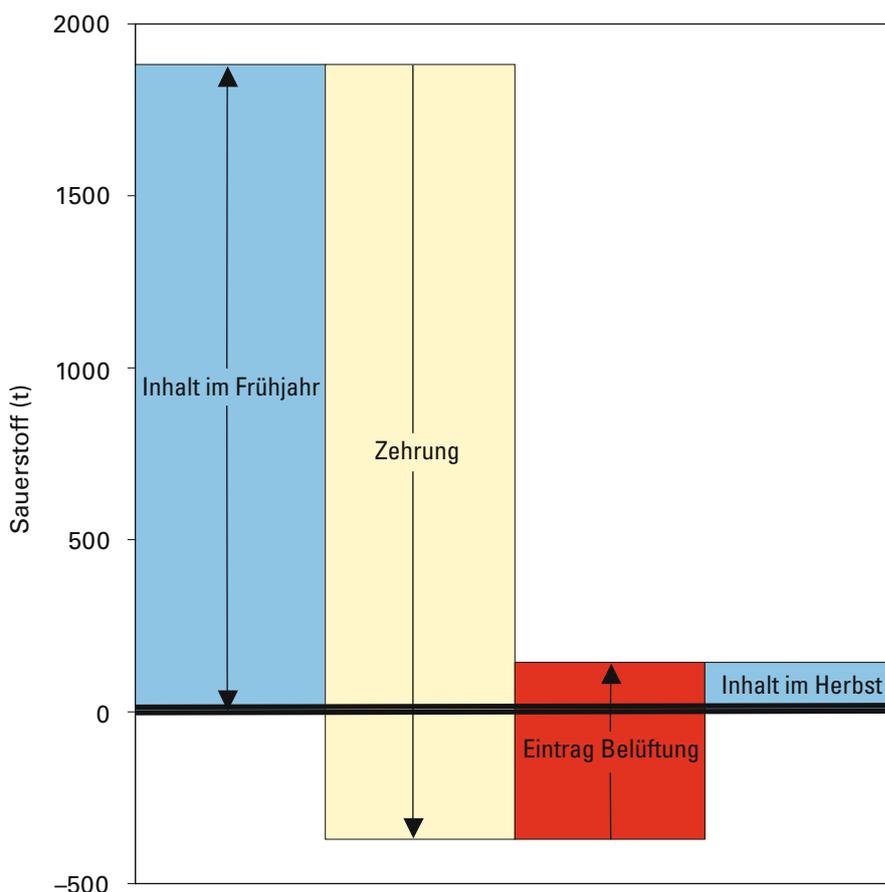
**Abschätzung von
Handlungsoptionen für die
Optimierung der Belüftung**

In den letzten Jahren ist der Sauerstoff im Tiefenwasser mehrmals knapp geworden. Die Analyse der Eawag über die Ursachen und Handlungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der erhöhten Sauerstoffzehrung war Grundlage für die Weiterführung und Optimierung der Belüftung. Die neue Belüftungsanlage gewährleistet nun, dass auch in Zukunft der Hallwilersee jedes Jahr ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird.



Temperaturverteilung im Tiefenwasser in der Umgebung eines der sechs Diffusoren. Es ist der Einfluss der aufsteigenden Luftblasen zu erkennen.

Sauerstoffbilanz des Tiefenwassers im Jahr 2005



Lorenz Moosmann Mit dem Eintrag durch die Belüftung bleibt der Sauerstoffinhalt im Herbst
Dan McGinnis positiv trotz grosser Zehrung.

Seesedimente, eine «Altlast»

Die Seesedimente des Hallwilersees dokumentieren als Archiv Ereignisse der Umweltgeschichte seit der letzten Eiszeit. Sie haben sich markant im Laufe der Überdüngung verändert und belasten den See noch heute.

Seesedimente als Umweltarchiv
Seesedimente bilden ein einzigartiges Archiv der kontinentalen Umweltgeschichte. In den etwa 7 Meter mächtigen Sedimenten des Hallwilersees findet man Hinweise auf teilweise längst vergangene Ereignisse, die bis zur letzten Eiszeit vor 15'000 Jahren zurückreichen. Die markante Änderung der Pollenzusammensetzung in tieferen Sedimentschichten beispielsweise lässt auf grossflächige Abholzungen und Anbau von Kulturpflanzen zu jener Zeit schliessen. In weniger tiefen Schichten dokumentiert der Bleigehalt die Verwendung sowie das Verbot von Blei als Antiklopfmittel in Benzin. Ja selbst Überreste der ersten Atombombentests sind noch deutlich nachweisbar wie auch der nukleare Fallout des Reaktorunglücks von Tschernobyl. Diese Sedimente sind heute mit etwa 5–10 cm jüngeren Material bedeckt, bleiben aber als Zeugnis dieses geschichtsträchtigen Ereignisses noch für viele Generationen im Sediment bewahrt.

Oberste Sedimente erinnern an Baumringe

Das Sediment des Hallwilersees besteht (ausser im Ufer- und Mündungsbereich der Zuflüsse) hauptsächlich aus abgestorbenem Algenmaterial und verschiedenen Mineralien, welche auf den Seegrund gelangen oder dort gebildet werden. In einem intakten See mit genügend Sauerstoff am Seegrund werden sie von Würmern umgegraben. Es entstehen homogene Sedimente, mit hellbrauner Farbe (Ei-

senoxide und -hydroxide) als Zeichen für genügend Sauerstoff im Tiefenwasser des Sees.

Wie in den meisten Mittellandseen haben sich auch die Sauerstoffbedingungen des Tiefenwassers des Hallwilersees im Laufe der Bevölkerungszunahme und Intensivierung der Landwirtschaft im 20. Jahrhundert drastisch verschlechtert. Die Folgen sind bekannt: Zu viele Nährstoffe verursachen übermässiges Algenwachstum. Der Abbau dieser Algenmassen durch Mikroorganismen verbraucht den gesamten Sauerstoff im Tiefenwasser und auf der Sedimentoberfläche. Vielen Lebewesen wurde dadurch die Lebensgrundlage entzogen.

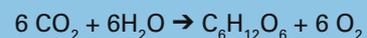
Die veränderten Bedingungen im See veränderten auch die Sedimente, wie ein aufgeschnittener Sedimentkern verdeutlicht. Sie werden nicht mehr durch Würmer umgegraben. Somit ist eine charakteristische Abfolge des sedimentierten Materials sichtbar: Kalzite, die im Frühjahr als Folge erhöhter Photosyntheseaktivität der Algen ausgefällt werden, bedecken den Seegrund weiss. Im Laufe des Jahres verfault darüber abgelagertes abgestorbenes Algenmaterial und es bildet eine Lage von schwarzen Eisensulfid-Verbindungen. Die so entstandene schwarze Sedimentschicht wird im nächsten Frühling wieder mit einer weissen Schicht Kalzite überdeckt. Die Abfolge von schwarzen und weissen Schichten, welche zusammen ein Jahr ausmachen, erinnert an die Jahresringe von Bäumen. Nur, je deutlicher und mächtiger diese Schichten sind, umso schlechter war der Zustand des Sees zu jener Zeit. Diese deutlichen Spuren bleiben als Erinnerung an die übermässige Nährstoffbelastung des Sees seit 1900 im Sediment erhalten. Mittlerweile besiedeln wieder Würmer den Seegrund als Folge der Belüftung und die jüngeren Sedimente werden wieder homogener. Auch die Gesundung des Sees wird im Sediment gespeichert.



Das Bild eines Sedimentkerns aus dem Jahre 1985 verdeutlicht die markante Änderung der Sedimentzusammensetzung um 1900 von älteren hellen zu dunklen Ablagerungen als Folge der Überdüngung. Die Abfolge von schwarzen und weissen Schichten erinnert an Baumringe, ist aber ein Zeichen für Sauerstoffmangel im Tiefenwasser.

Photosynthese und Kalzitausfällung

Bei der Photosynthese entsteht aus gelöstem Kohlenstoffdioxid und Wasser unter Sonnenlicht (Energie) Traubenzucker:



Als Folge dieser Reaktion steigt der pH-Wert des Seewassers an, was eine Erhöhung der Carbonatkonzentration nach sich zieht. Durch intensive Photosyntheseaktivität kann die Carbonatkonzentration derart zunehmen, dass das Seewasser bezüglich Calciumcarbonat (Kalzit) übersättigt ist. Es kommt zur Ausfällung, die sich als sogenannte Seekreide ablagert.

Die Belastung durch die Sedimente ist beträchtlich

Einmal in tiefere Sedimentschichten eingelagert, bleibt das noch vorhandene refraktäre (= schwer abbaubare) organische Material im Sediment konserviert. Zuvor wird das angefallene organische Material in den oberen Sedimentschichten durch verschiedene Prozesse abgebaut und Nährstoffe werden freigesetzt. Gelangen diese in Wasserschichten, in die das Sonnenlicht einzudringen vermag, stehen die Nährstoffe wiederum Algen zum Wachstum zur Verfügung. Es wird von der seeinternen Düngung gesprochen.

Durch stetige Rücklösung belasten die nährstoffreichen Sedimente das Seewasser noch heute beträchtlich mit etwa 2,5–4,5 Tonnen Phosphor jährlich. Verglichen mit anderen Eintragsquellen entspricht dies etwa dem jährlichen Phosphoreintrag aller Zuflüsse des Hallwilersees. Im Gegensatz zu den Zuflüssen, wäre eine Sanierung der Sedimente aber viel zu aufwändig.

Seesedimente als globale Kohlenstoffsenke

Immer mehr CO₂ gelangt in die Atmosphäre als Folge der Verbrennung fossiler Energieträger. In Seen wird durch die Photosynthese von Algen CO₂ wieder fixiert. Der refraktäre Teil davon wird schliesslich im Sediment eingelagert und stellt so eine Senke für den Kohlenstoff dar. Global gesehen sind Seesedimente eine bedeutende Senke. Neuere Schätzungen lassen vermuten, dass möglicherweise die gesamte Einlagerungsrate von Kohlenstoff in die Seesedimente etwa halb so gross ist wie in den Ozeansedimenten. Da die Oberfläche der Ozeane aber 150-mal grösser ist, scheinen Seen die effektiveren Senken zu sein.

Die seeinterne Düngung reduziert sich weiter

Die Inbetriebnahme der Belüftung im Jahr 1986 hat – wie erhofft – zu einer Verbesserung der Lebensbedingungen im See beigetragen. Zudem wurde davon ein Rückgang der Phosphorrücklösung während des Sommers sowie ein grösserer permanenter Rückhalt von Phosphor im Sediment erhofft. Rückblickend beurteilt, hat die Belüftung nicht alle Erwartungen erfüllen können. Laut neuesten Studien genügt eine oxische (= sauerstoffreiche) Sedimentoberfläche allein noch nicht, um Phosphor effizient im Sediment zu binden. Viel eher wird vermutet, dass im sauerstofffreien Sediment das Verhältnis von vorliegendem reaktivem Eisen (II), Sulfid und Phosphat und den daraus entstehenden Mineralien den Rückhalt bestimmt. Dieses Verhältnis hängt wiederum von der Menge des anfallenden organischen Materials sowie den verschiedenen Abbauprozessen ab. Selbst in den Jahren der grössten Belastung vermochte das Sediment nur eine ähnlich beschränkte Menge an Phosphor zu binden und zurückzuhalten wie heute. Wie kürzlich gezeigt wurde, tritt eine Verbesserung des Rückhaltevermögens dann ein, wenn die Phosphorkonzentration im See einen kritischen Wert (geschätzt auf etwa 40 Milligramm Phosphor pro Kubikmeter) unterschreitet. Im Hallwilersee ist dank der verschiedenen Sanierungsmassnahmen dieser Zustand mittlerweile erreicht. Es ist zu erwarten (und zu hoffen), dass die Belastung durch die Sedimente in den nächsten Jahren weiter reduziert wird. Die weiterführende Langzeituntersuchung, welche die Sanierung des Hallwilersees begleitet, wird uns darüber Aufschluss geben. 

Martin Märki

Würmer beleben den Seegrund neu

Schlammröhrenwürmer (Tubifiziden) sind sehr widerstandsfähige Organismen. Sie leben in Bereichen mit grossen Sauerstoffdefiziten und sind unempfindlich gegenüber toxischen Abbauprodukten. Daher lässt sich an ihnen als Bioindikatoren die Wirkung der Sanierungsmassnahmen ablesen.

Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung des Seebodenmaterials

Das Seebodenmaterial (Sediment) besteht einerseits aus den durch Zuflüsse eingetragenen Feststoffen, andererseits aus Ausfällungen der Flach- und Freiwasserzone und abgesunkenem organischem Material. Mit den Feststoffen werden auch Nähr- und Schadstoffe am Seegrund abgelagert. Der Zustand des Seebodens ist somit weitgehend vom Nährstoff- und Energietransport aus den Zuflüssen, dem Uferbereich und dem Freiwasser abhängig.

Bioindikator, auch als *Indikatorart*, *Zeigerart* oder *Indikatororganismus* bezeichnet, ist eine Tier- oder Pflanzenart, deren Vorkommen oder Fehlen in einem Lebensraum innerhalb gewisser Grenzen bestimmte Standort- und Umweltbedingungen anzeigt.

Als **Hämoglobin** bezeichnet man den eisenhaltigen roten Blutfarbstoff in den roten Blutkörperchen. Es stellt einen wichtigen Sauerstofftransporter im Körper dar.

Heterotrophie (griechisch: «sich von anderen ernährend») ist ein Begriff aus der Biologie und bezeichnet die Eigenschaft von Lebewesen, ihre Stoffwechselenergie aus den von anderen Lebewesen aufgebauten organischen Substanzen zu beziehen.

Die Sauerstoffversorgung erfolgt durch seeinterne Strömungen, vor allem aber durch die winterliche Durchmischung des Sees. Diese wird beim Hallwilersee massiv durch technische Massnahmen (Belüftung) unterstützt.

Auf dem Seeboden wird die Biomasse abgebaut

Im Sediment und einer kurz darüber liegenden Wasserschicht wird absinkende Biomasse zersetzt und mineralisiert. Hier lebt vorwiegend eine heterotrophe Organismengemeinschaft. Sie besteht aus Mikroorganismen und Tieren. Der Sauerstoffgehalt spielt für diese eine zentrale Rolle. Unabhängig von der Menge sowie der Zusammensetzung der sedimentierten Stoffe herrscht im Sediment selbst fast immer ein Sauerstoffmangel.

In diesem Lebensraum sind Würmer (Oligochaeten) immer anzutreffen. In unseren Seeböden kommen nur wenige Arten von Oligochaeten vor. Die meisten davon sind im Vergleich zu den Landformen, den Regenwürmern, kleiner und oft durchsichtig. Einige von ihnen werden kaum grösser als 0,5 Millimeter. Die häufigsten Vertreter gehören zu der Familie der Schlammröhrenwürmer (Tubifiziden).

Schlammröhrenwürmer sind Schwerarbeiter

Schlammröhrenwürmer sind weit verbreitet. Sie bauen mit Schlammpartikeln besetzte Schleimröhren, die sie bewohnen und in die sie sich bei Gefahr blitzschnell zurückziehen können. Das Kopfende ragt nach unten und steckt im Schlamm. Sie fressen andauernd organisches Sediment (Schlamm) und verdauen vor allem die darin befindlichen Bakterien. Schlammröhrenwürmer können bis zu 20 cm tief in das Sediment eindringen. Weil sie im Schlamm fressen und an der Oberfläche ausscheiden, kommt es zur Umschichtung und zur



Das Vorderende mit dem Kopfteil des Schlammröhrenwurmes (Tubifex sp.) steckt in der Röhre, während das Hinterende herausragt.

Belüftung des Sedimentes. Die Darm-passagen geben den Ausscheidungen eine krümelige Struktur, sodass sich ein ausgeprägtes Lückensystem entwickeln kann. Die oberen 3–4 cm der von Schlammröhrenwürmern besiedelten Sedimente werden im Jahr mindestens einmal umgeschichtet.

Leben bei geringsten Sauerstoffgehalten möglich

Die hämoglobinhaltige Körperflüssigkeit ermöglicht den Schlammröhrenwürmern den geringen Sauerstoffgehalt am Seeboden effizient zu nutzen. Infolge der Darmatmung kann über einen grossen Teil des Körpers Sauerstoff aufgenommen werden. Zudem ist der hintere Teil des Wurmes, der aus dem Sediment ragt, in ständiger Bewegung. Dadurch wird der Körper geringfügig mit Wasser umströmt, was die Sauerstoffaufnahme begünstigt und den Ausnützungsgrad selbst geringster Sauerstoffkonzentrationen verbessert. Tubifex ist ein bekannter

Vertreter der Schlammröhrenwürmer, da er in Aquarien als lebendes oder getrocknetes Fischfutter genutzt wird und im Zoofachhandel überall erhältlich ist. Ein Tubifex wiegt etwa 1,5 Milligramm.

Würmerfauna dient als biologischer Indikator der Belastung mit abbaubaren organischen Stoffen

Die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft am Seeboden erlaubt Rückschlüsse auf den Belastungszustand beziehungsweise das Nährstoffangebot im See. Schlammröhrenwürmer sind in der Lage, auch sehr sauerstoffarme Bereiche in Gewässern zu bewohnen. Diese Arten sind dann auch weitgehend resistent gegenüber toxischen Abbauprodukten. Sie gelten daher als Bioindikatoren für die Belastung eines Gewässers. Bereits im Jahr 1911 stellten Birge und Juday fest, dass man die Seen in zwei Typen einteilen kann: Seen, deren Tie-

fenwasser stets sauerstoffreich, und solche, deren Tiefenwasser im Sommer sauerstoffarm ist. In Letzteren kommen im Sediment besonders häufig die Mückenlarve Chironomus und der Schlammröhrenwurm Tubifex vor.

1985 wurden die ersten Untersuchungen zur Besiedlung des Seebodens durch Würmer im Hallwilersee durch Fred Stössel (Eawag) durchgeführt, um die Wirkung der eingeleiteten Sanierungsmassnahmen zu dokumentieren. Diese Untersuchungen werden heute durch die Abteilung für Umwelt regelmässig weitergeführt.

Aufwändige Probenahme und spezielle Technik bringen die Tiefenbewohner an den Tag

Mithilfe eines Echolotes werden immer dieselben Probenahmestellen angefahren. Auf der Nord-Süd-Achse sowie der Ost-West-Achse werden ab 20 Meter Seetiefe die Tiefenstufen im Abstand von je 5 Metern beprobt. Mit

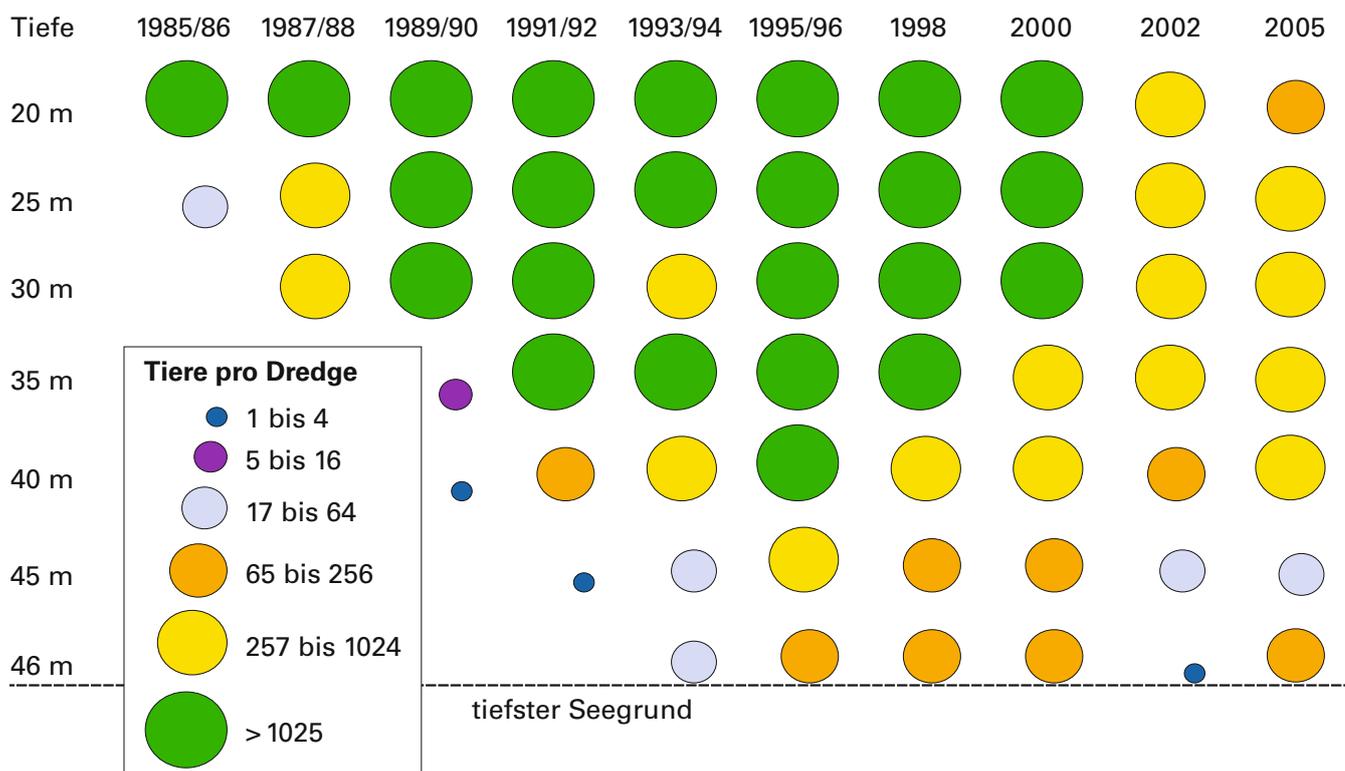


Dredge gefüllt mit Feinschlamm



Vorbereitete Proben für die Auszählung der Würmer

Entwicklung der Würmer im Hallwilersee am Seeboden



einem durch Gewicht beschwerten Netz (Dredge) von 0,3 Millimeter Maschenweite wird der Seegrund abgeschabt.

Das Herausheben der Probe vom Seegrund erfolgt in einem Zuge, um Materialverluste zu minimieren. Der Feinschlamm muss rasch und gründlich vor Ort ausgewaschen werden, um die Fäulnisbildung in den Proben zu verhindern. Die Auszählung der Würmer erfolgt am folgenden Tag im Labor.

Am Seegrund kehrt langsam wieder Leben ein

Der Seegrund ist grundsätzlich ein extremer Lebensraum mit hohen Anpassungsforderungen. Mit der Zunahme der Nährstoffe und des Algenwachstums im Hallwilersee wich auch das Milieu im Sediment und einer

kurz darüber liegenden Wasserschicht immer mehr von dem Bereich optimaler Lebensbedingungen ab, verarmte an Sauerstoff und wurde lebensfeindlich. Bevor der Hallwilersee ab 1986 belüftet wurde, war unterhalb von 25 Metern ganzjährig zu wenig Sauerstoff vorhanden, als dass Kleintiere hätten überleben können. Selbst die widerstandsfähigen Schlammröhrenwürmer konnten nicht mehr existieren.

Die verbesserte Sauerstoffsituation sowie die Reduktion von Schadstoffen erlaubten den Würmern innert weniger Jahre wieder die gesamte Tiefe des Sees zu besiedeln. Seit 1993/94 ist selbst die tiefste Zone im See wieder belebt. Dies belegt, dass sich die lebensfeindlichen Bedingungen langsam verbesserten. Die Artenzahl blieb aber noch gering. Neben den Wür-

mern treten erst wenige Arten von Insektenlarven auf. Der Bereich optimaler Lebensbedingungen stellt sich nur langsam wieder ein. Dies ist aber nicht aussergewöhnlich. Mit der weiteren Reduktion der Nährstoffe wird einerseits die Artenzahl zu-, andererseits die Individuendichte abnehmen. Diese Entwicklung hat in den letzten Jahren in 20 bis 35 Meter Tiefe bereits eingesetzt. Bereits werden wieder verschiedene Mückenlarven (Chironomiden) festgestellt.

Naturgemäss wird auch unter zukünftig optimalen Milieubedingungen die Artenzahl der Lebewesen am schlammigen Seegrund immer nur einen Bruchteil der in der ufernahen Zone vorhandenen Artenzahl erreichen.



Fritz Zimmermann

Fische und Krebse im Hallwilersee

Mit der Entwicklung des Sees hat sich auch die Gewässerfauna verändert. Die steigenden Nährstoffgehalte im Wasser führten zu verbesserten Nahrungsbedingungen, aber auch zu einer starken Veränderung des Lebensraumes und der Verlaichungsmöglichkeiten für einzelne Fischarten. Mit der Verschlechterung des Seezustandes traten Fischsterben mit entsprechenden Bestandeszusammenbrüchen auf. Dank der Gesundung des Sees haben sich die Lebensbedingungen für viele Fischarten wieder verbessert. Grosse Fischsterben aufgrund von Sauerstoffmangel kommen nicht mehr vor. Ein natürlicher Zustand ist jedoch noch nicht in unmittelbarer Reichweite.

Fische und Krebse im Hallwilersee

Die Fischgesellschaften in Schweizer Seen bildeten sich nach der letzten Eiszeit vor ungefähr 15'000 Jahren. Nach dem Rückzug der Gletscher wanderten Fische aus eisfreien Gebieten in die neu entstandenen Seen ein. Von Natur aus ist der Hallwilersee ein Felchensee. Wegen den Folgen der Überdüngung weist er heute aber Merkmale eines Brachsensees auf. Er beherbergt über zwanzig verschiedene Fischarten sowie drei Flusskrebarten. Die grösste Artengruppe im See findet man bei den Karpfenartigen Fischen (Cypriniden). Viele von ihnen sind typische Fische des stehenden oder langsam fliessenden Wassers, wie der Brachsen, der Karpfen, die Rotfeder und die Schleie sowie Arten mit einer grossen Lebensraumbandbreite wie der Alet, die Blicke, der Gründling, der Hasel, die Laube und das Rotaug. Selten wurden auch Barben nachgewiesen, eine typische Fließgewässerart, welche wohl über den Aabach vereinzelt in den See gelangt. Die für Felchenseen typische Gruppe der Lachsartigen Fische (Salmoniden) ist mit dem Hallwilersee-Felchen (Balchen, «Balle») und der Forelle vertreten. Von der Letzteren findet man sowohl die Seeforelle (Seeforelle) wie auch die Bachforelle (Bachforelle). Als weitere Arten kommen der Aal, das Egli, der Hecht, der Kaulbarsch, der Sonnenbarsch, die Trüsche und der Zander vor. Fischereilich von Bedeutung sind der Felchen, der Hecht, das Egli, das Rotaug sowie die Seeforelle. Von den Netzfischern werden vor allem Felchen und Rotaugen in grosser Zahl gefangen. Bei den Angelfischern sind der Hecht und das Egli die Favoriten. Aufgrund der schlechten Felchenfänge in den letzten Jahren hat das Rotaug den Felchen an der Spitze der «Fanghitparade» abgelöst. Der einheimische Edelkreb war bis in die 80er-Jahre sehr häufig im Hallwiler-

Fisch- und Flusskrebarten im Hallwilersee

Fisch-/Krebsart	Häufigkeit	Bemerkung
Aal	nicht häufig	
Aesche	sehr selten	Fließgewässerart
Alet	häufig	
Bachforelle	vereinzelt	Fließgewässerart
Barbe	sehr selten	Fließgewässerart
Blicke	vereinzelt	
Brachsen	häufig	
Egli	häufig	
Felchen	häufig	
Gründling	nicht häufig	
Hasel	nicht häufig	
Hecht	häufig	
Karpfen	häufig	
Kaulbarsch	häufig	
Laube	vereinzelt	
Regenbogenforelle	sehr selten	fremde Art
Rotaug	häufig	
Rotfeder	nicht häufig	
Schleie	häufig	
Schneider	sehr selten	Fließgewässerart
Seeforelle	vereinzelt	
Sonnenbarsch	häufig	fremde Art
Trüsche	vereinzelt	
Wels	sehr selten	
Zander	vereinzelt	
Edelkreb	sehr selten	
Galizierkreb	nicht häufig	fremde Art
Kamberkreb	nicht häufig	fremde Art

see. Mit dem Aufkommen des Galizierkrebses im See ging sein Bestand jedoch kontinuierlich zurück. Der Galizierkrebs, welcher für kulinarische Zwecke importiert wurde und leider verbotenerweise in zahlreiche Mittellandgewässer eingesetzt wurde, war in der Folge die dominierende Krebsart im See. Der Bestand brach jedoch in den 90er-Jahren aufgrund der Krankheit Krebspest mehrmals zusammen. Heute ist ein geringer, wieder zunehmender Galizierkrebsbestand im Hallwilersee vorhanden. Einzelexemplare des Edelkrebses wurden in den letzten Jahren wieder gefunden. Leider wurde im Jahr 2006 der aus Nordamerika stammende Kamberkrebs im See nachgewiesen. Aufgrund der Erfahrung aus anderen Seen (z. B. Zugersee) muss man annehmen, dass sich diese fremde Krebsart auf Kosten der beiden anderen Krebsarten weiter ausbreiten wird.

Bestandeszusammenbrüche

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wies eine erste Blüte der Burgunderblutalge auf die beginnende Eutrophierung hin. Anfang 20. Jahrhundert sank der Sauerstoffgehalt unterhalb

von 10 Meter Tiefe stark ab. 1961 kam es zu einem verheerenden Fischsterben aufgrund der tiefen Sauerstoffkonzentration im See. Im Laufe der Seesanie rung erholten sich die Bestände der meisten toleranten Fischarten wieder. Die Seeforelle und der Hallwilersee-Felchen verloren mit der zunehmenden Verschlammung des Seegrundes und der Sauerstoffzehrung über dem Grund jedoch ihre Laichmöglichkeit. Insbesondere die Fang erträge der Felchen brachen zusammen, dies als klare Folge der Eutrophierung des Sees.

Der Hallwilersee-Balchen

Die schnellwüchsige Grossfelchenart im Hallwilersee war bereits im Mittelalter von grosser wirtschaftlicher Bedeutung. Diese auch heute kulturell und wirtschaftlich im Seetal bedeutende Fischart kann sich aufgrund der Veränderung des Sees im Zuge der Eutrophierung nach wie vor im See nicht natürlich fortpflanzen (siehe Artikel von R. Müller in diesem Heft). In drei Brutanstalten werden daher laichreife Fische aus dem See gestreift und Jungfische aufgezogen, welche dann in den See eingesetzt werden.

Erfolgreiche

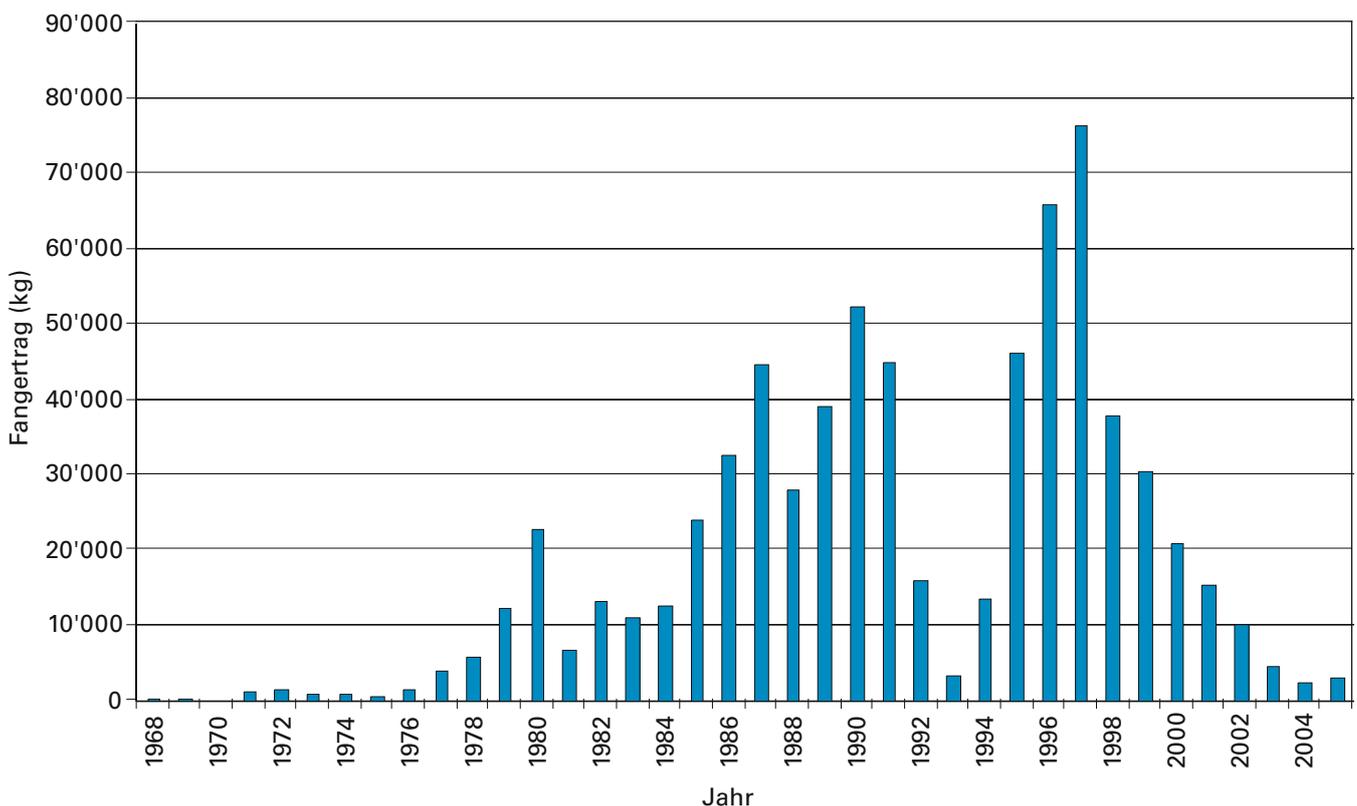
Besatzmassnahmen

Verschiedene Fischarten wurden nach den Fischsterben und später als Unterstützungsbesatz in den See eingesetzt. Im Moment sind dies der Hallwilersee-Balchen, der Hecht und die Seeforelle. Dank der künstlichen Aufzucht und dem Besatz mit Jungfelchen konnten so seit Beginn der Seesanie rung wieder gute Felchenerträge erreicht werden. Trotzdem schwanken die Jahresfangerträge stark.

Die heikle Periode für das Überleben der Jungfische im See ist die Zeit der Algenblüte im Frühling. Sonniges Wetter im April/Mai zusammen mit einer hohen Nährstoffkonzentration führen zu einer starken Algenblüte und entsprechender Photosyntheseaktivität. Dadurch kann sich eine extreme Sauerstoffübersättigung in der obersten Wasserschicht aufbauen. Durch die Sauerstoffübersättigung kommt es zu einem Massensterben der Jungfische (Gasblasensyndrom).

In den letzten Jahren konnte sich kein starker Felchenjahrgang mehr im See entwickeln. Mit einer entsprechenden Optimierung in der Aufzucht möchte man die heikle Periode in den Monaten April/Mai überbrücken. Dabei ste

Die Entwicklung der Felchenfänge am Hallwilersee 1986 bis 2005



hen zwei Aufzuchtmethoden im Vordergrund. Bei der Kalterbrütung werden die Felcheneier bei niedrigen Wassertemperaturen ausgebrütet. Dies erfolgt mit dem Ziel, die Larvenentwicklung und den Schlupf zu verzögern, sodass man die Jungfelchen nach der kritischen Zeitperiode in den See einsetzen kann. Die zweite Methode ist die Aufzucht der Jungfelchen in Netzkäfigen im See. Diese Art der Felchenaufzucht wird an zahlreichen

Seen in der Schweiz sehr erfolgreich betrieben. Die geschlüpften Jungfische werden dabei im See in geeigneter Wassertiefe, d.h. unterhalb des Bereiches mit starker Sauerstoffübersättigung, in würfelförmigen Netzen aufgezogen.

Auch bei der Seeforelle kann mit dem Fischbesatz ein entsprechender Bestand im See gehalten werden. Im Hallwilersee wird jedoch nur ein sehr geringer Forellenbesatz betrieben.

Fazit und Ausblick

Der Fischbestand im Hallwilersee hat sich mit der Entwicklung des Sees verändert. Die steigenden Nährstoffgehalte im Wasser führten zu verbesserten Nahrungsbedingungen und haben als ersten Effekt den Fischbestand und damit auch die Fangerträge erhöht. Die hohen Nährstoffeinträge führten jedoch auch zu einer Verschlammung des Seegrundes und zu tiefen Sauerstoffwerten. Dadurch wurde der Lebensraum für die Fische eingengt, es kam zu Fischsterben aufgrund von Sauerstoffmangel und einzelne Fischarten verloren ihre Laichmöglichkeit am Seegrund. Mit der Gesundung des Sees im Zuge der Seesanie rung haben sich die Lebensbedingungen für verschiedene Fischarten wieder verbessert. Durch die besseren Sauerstoffbedingungen im See kommen gut sichtbare Fischsterben nicht mehr vor, und das für Fische besiedelbare Wasservolumen hat sich wieder stark vergrößert. Die Sedimentschichten am Seegrund sind geblieben und die Sauerstoffzehrung ist nach wie vor zu gross für eine ausreichende natürliche Reproduktion des Hallwilersee-Balchens und der Seeforelle. Um diese Arten im See zu erhalten, braucht es immer noch entsprechende Besatzmassnahmen. Verschiedene tolerante Fischarten, wie z.B. das Rotaug, konnten sich bereits wieder gut im See etablieren. Es ist zu hoffen, dass sich auch die anspruchsvolleren Arten erholen und selbstständig im See halten können. Hierfür muss die Gesundung des Sees weitergehen, was noch einige Zeit beanspruchen wird. 

Thomas Stucki



Edelkrebs



Burgunderblutalge

Warum können sich die Felchen noch nicht natürlich vermehren?

Die Hallwilersee-Felchen können sich heute nicht natürlicherweise fortpflanzen, da ihre Eier auf dem schlammigen Seegrund ersticken. Eine Besserung ist erst dann zu erwarten, wenn der See wieder deutlich nährstoffärmer geworden ist.

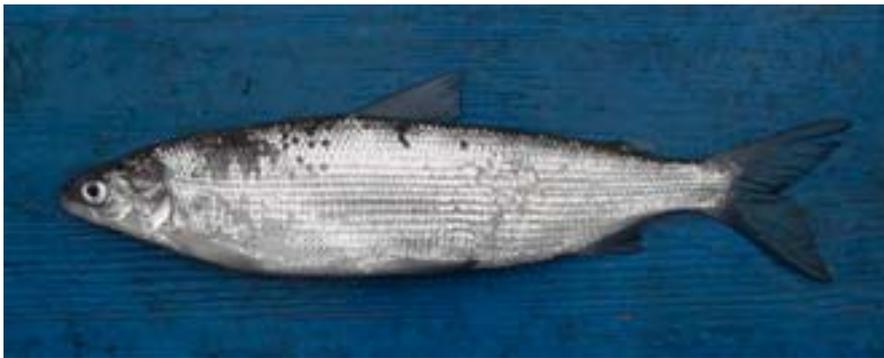
Die Felchen, im Hallwilersee durch den sogenannten «Hallwiler Ballen» vertreten, gehören zu den häufigsten und wirtschaftlich wichtigsten Fischen unserer Seen. Die Geschlechtsreife wird normalerweise gegen Ende des zweiten oder dritten Lebensjahres erreicht. Die Felchen pflanzen sich meist in den Monaten November bis Januar fort. Die Weibchen geben die

Eier im freien Wasser ab, wo sie von den Männchen sogleich befruchtet werden. Die Eier sinken dann auf den Seegrund und bleiben bis zum Schlüpfen der Brütlinge auf der Sedimentoberfläche liegen. Die geschlüpften Brütlinge oder Larven steigen schliesslich an die Seeoberfläche auf, wo sie schon bald zu fressen beginnen.

Damit ein Felchenbestand langfristig überlebt, müssen sich die Fische vor dem Fang mindestens einmal fortpflanzen können. Dies kann durch natürliche Weise im See geschehen oder aber durch den Fang von laichreifen Fischen im See, deren Eier abgestreift und im Bruthaus erbrütet werden.

Felcheneier ersticken im Schlamm

Felchen sind für die natürliche Fortpflanzung auf sauerstoffreiche Seen mit höchstens mittlerer Nährstoffkonzentration angewiesen. Damit die Fort-



Hallwiler Ballen



Frisch geschlüpfte Felchenbrütlinge beim Aufstieg an die Wasseroberfläche. Die Brütlinge sind etwa 10 mm lang.



Normal entwickelte Felcheneier im «Augenpunktstadium». Abgestorbene Eier (linker und rechter Rand) sind undurchsichtig. Oben in der Mitte ein unbefruchtetes Ei. Der Durchmesser der Eier beträgt etwa 2,5 mm. (Aufnahme im Hellfeld)



Normal entwickelte Felcheneier im «Augenpunktstadium». Abgestorbene Eier (linker und rechter Rand) sind undurchsichtig. Oben in der Mitte ein unbefruchtetes Ei. Der Durchmesser der Eier beträgt etwa 2,5 mm. (Aufnahme im Dunkelfeld)

pflanzung im See funktioniert, muss das Sediment ausreichend mit Sauerstoff versorgt sein. Dabei spielt die Produktivität des Sees, d. h. die Belastung mit dem wichtigsten Algennährstoff Phosphor, eine entscheidende Rolle. In nährstoffarmen Seen können sich nur wenige Algen entwickeln, deren Zersetzung nur wenig Sauerstoff verbraucht. Die Oberfläche des Sediments in solchen Seen ist deshalb immer sauerstoffhaltig und ermöglicht eine normale Entwicklung der Felcheneier, wie Mikrofotos im Hellfeld und Dunkelfeld zeigen.

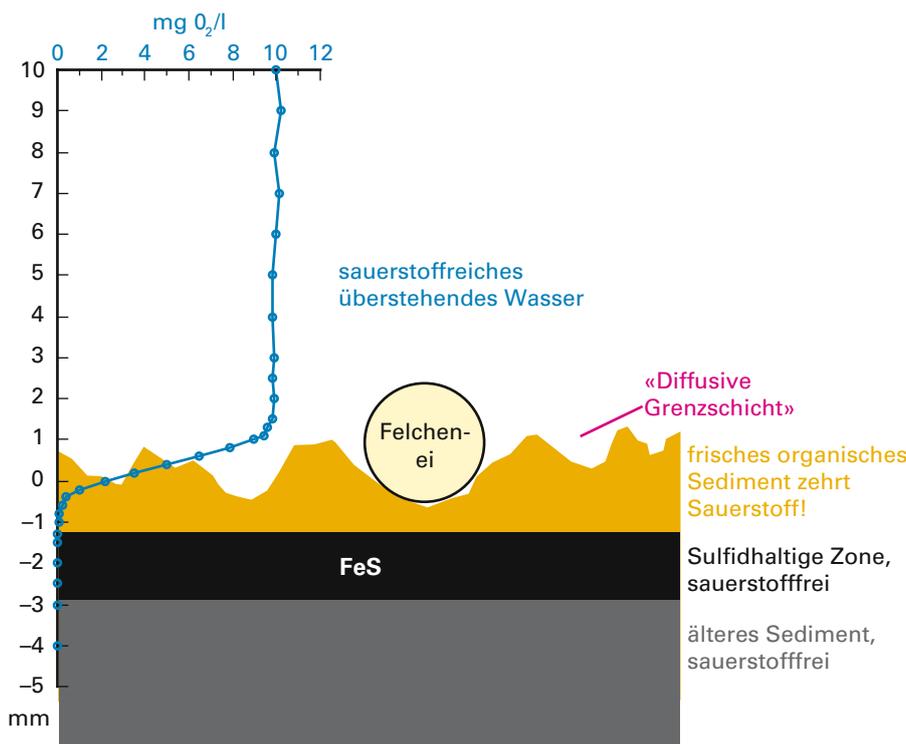
Anders in überdüngten Seen wie dem Hallwilersee. Die grosse Menge Algen, welche wegen der hohen Nährstoffkonzentration jedes Jahr produziert wird, sinkt auf den Seegrund und wird von Bakterien abgebaut. Wegen der zu grossen Menge organischer Substanz wird der Sauerstoff

rasch aufgezehrt, und die Sedimentoberfläche wird sauerstofffrei.

Untersuchungen über die Entwicklung von Felcheneiern in Seen unterschiedlichen Nährstoffgehalts haben ergeben, dass sich Felcheneier in der Regel nur dann normal entwickeln können, wenn die Gesamtposphorkonzentration im See weniger als 30–40 Milligramm pro Kubikmeter beträgt. In stärker gedüngten Seen sterben praktisch alle Felcheneier im Laufe der Embryonalentwicklung ab, da sie auf dem schlammigen Sediment ersticken. Dabei spielt die Feinstruktur des Sediments und der Sauerstoffverteilung eine wichtige Rolle. Felcheneier sind relativ schwer und sammeln sich immer in kleinen Vertiefungen im Sediment an. Dort ist aber die Sauerstoffversorgung ungünstig, weil der Sauerstoff vom Sediment her laufend aufgezehrt wird. Die Eier liegen

mit ihrer unteren Seite zum Teil in einer sauerstofflosen Zone und ersticken langsam.

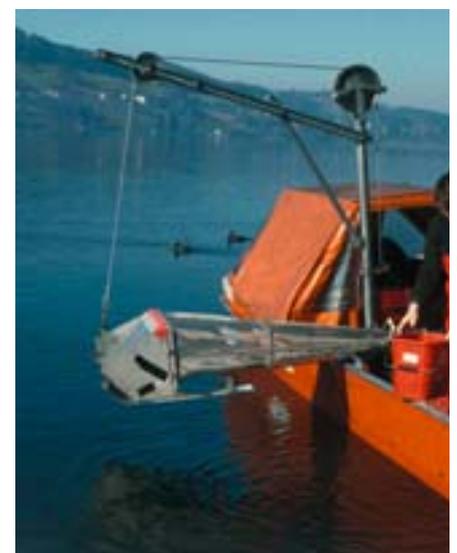
Die Entwicklung von Felcheneiern im Hallwilersee wird von der Eawag seit 1988 untersucht. Mithilfe einer Schlittendredge werden die Eier auf dem Seegrund unmittelbar vor dem erwarteten Schlüpfzeitpunkt Ende Februar eingesammelt und im Labor auf ihren Entwicklungsstand beurteilt. Von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen konnten bisher keine normal entwickelten, schlüpfbereiten Eier gefunden werden. Praktisch alle Felcheneier sterben im Laufe ihrer Entwicklung auf dem Sediment ab und erscheinen in den Proben vom Seegrund als weisse oder verpilzte Eier. Auch teilweise entwickelte, aber abgestorbene Embryonen sind zu beobachten.



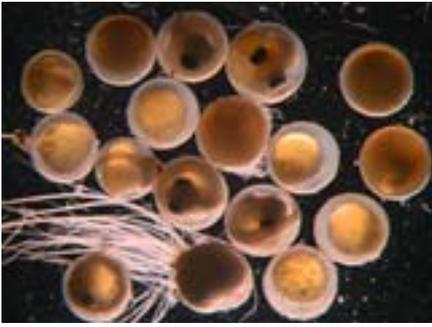
Schema eines Felcheneis, das sich auf dem Seegrund entwickelt. Die vertikale Kurve zeigt den effektiven Verlauf der Sauerstoffkonzentration in Sedimentnähe. Auf dem unebenen Sediment liegt eine dünne Wasserschicht von etwa 1 mm Dicke, innerhalb welcher der Stoffaustausch durch Diffusion erfolgt («Diffusive Grenzschicht»). Das zuoberst liegende Sediment aus frisch abgestorbenen Planktonorganismen (Algen, Kleinkrebse) zehrt Sauerstoff, der aus dem überstehenden Wasser durch Diffusion nachgeliefert wird. Wegen der hohen Zehrung fällt die Sauerstoffkonzentration an der Sedimentoberfläche auf null. Dies führt zum langsamen Absterben der Felcheneier. Etwas tiefer liegende Sedimentschichten sind sauerstofffrei und enthalten schwarzes Eisensulfid sowie den für Fischeier giftigen Schwefelwasserstoff.



Boot für den Einsatz der Schlittendredge zum Einsammeln von Felcheneiern im Hallwilersee



Schlittendredge für das Einsammeln von Felcheneiern



Felcheneier vom Grund des Hallwilersees, eingesammelt mit der Schlittendredge am 25. Februar 2004. Einige Eier sind teilweise entwickelt, mit den Augenanlagen sichtbar. Milchig weisse Embryonen sind auf einem frühen Entwicklungsstadium abgestorben, nur ein Embryo lebt noch (oben Mitte rechts). Helle Eier sind unbefruchtet, abgestorbene Eier erscheinen trübe-undurchsichtig. Ein abgestorbenes Ei ist mit Pilzfäden bewachsen.

Die Existenz des Felchenbestands im Hallwilersee hängt deshalb weiterhin von den Einsätzen von Brütlingen und angeführten Jungfischen aus den Fischbrutanstalten ab. Solange sich der See in einem weiterhin überdüngten Zustand befindet, ist auch nicht damit zu rechnen, dass sich die Felchen selbst wieder fortpflanzen können. Daran ändert leider auch die Belüftung des Sees mit Sauerstoff nichts, da die hohe Algenproduktion, welche das Hauptübel für die Eientwicklung am Seegrund darstellt, dadurch nicht verringert wird (siehe Beitrag A. Wüest in diesem Heft). Auch eine dauernd hoch gehaltene Sauerstoffkonzentration am Seegrund vermag der grossen Sauerstoffzehrung nicht entgegenzuwirken. Nur eine weitere deutliche Senkung der Phosphorkonzentration im See könnte die natürliche Fortpflanzung der Hallwiler Ballen langfristig wiederherstellen.

Fischsterben wegen Gasblasensyndrom

Die wohl wichtigste Ursache für den oft schlechten Felchenbestand im Hallwilersee ist – nebst der fehlenden natürlichen Fortpflanzung – ein Massensterben der (eingesetzten) Jungfelchen im See, welches als Folge hoher Sauerstoffübersättigung im späten Frühling eintreten kann. Dieses Phä-

nomen ist auch an anderen überdüngten Seen immer wieder zu beobachten.

Extrem hohe Sauerstoffsättigungswerte nahe der Seeoberfläche treten in überdüngten und damit hoch produktiven Seen in den Monaten April und Mai regelmässig als Folge der starken Algenentwicklung und der damit verbundenen hohen Sauerstoffproduktion bei Schönwetterperioden auf. Sie bewirken das sogenannte Gasblasensyndrom («Gasblasenkrankheit»), das zum Tode der Jungfische führt, welche sich zu dieser Jahreszeit nahe der Seeoberfläche aufhalten. Es äussert sich dadurch, dass im Körper der kleinen Fischchen Sauerstoffblasen ausperlen, was die Fische an die Wasseroberfläche treibt und zum Tode der Fischchen durch Verhungern oder Gefressenwerden führt.

Das unterschiedlich gute Überleben der (eingesetzten) Jungfelchen hängt somit weitgehend von meteorologischen Faktoren ab, welche von Jahr zu Jahr schwanken und eine Prognose der Jahrgangsstärke aufgrund der Einsatzzahlen sehr erschweren. Nebst dem Gasblasensyndrom können aber auch Raubfische wie Barsche die Felchenjahrgänge in wechselndem Masse dezimieren.



Rudolf Müller

Die Phosphorbelastung des Hallwilersees nimmt ab

Zuflussuntersuchungen zeigen die Wirkung der Massnahmen zur Reduktion der Nährstoffbelastung des Sees. Entscheidenden Erfolg brachte die fortschreitende Gesundung des Baldeggersees. Die neusten Untersuchungen ab 2004 belegen weitere Verminderungen der Belastung durch die direkten Zuflüsse zum Hallwilersee. Das Reduktionsziel für die Massnahmen des Phosphorprojektes im Jahr 2010 ist erreichbar.

Die Nährstoffkonzentration im See wird ursächlich durch die Belastung aus dem Einzugsgebiet bestimmt. Beim Hallwilersee ist Phosphor der entscheidende Nährstoff für das Algenwachstum. Um die Wirkung der seeexternen Massnahmen zu beurteilen, müssen wir die Belastung durch die massgeblichen Quellen erfassen. Dies geschieht durch Zuflussuntersuchungen. Beim Hallwilersee werden die Einträge aus dem oben liegenden Baldeggersee, den Zuflüssen aus dem direkten Einzugsgebiet zum See, der ARA Hitzkirchertal in Mosen und den Niederschlägen bestimmt, welche direkt auf die Seeoberfläche fallen.

Bereits in den 1950er-Jahren – lange vor dem Bau von Abwasserreinigungsanlagen – wurden erste Zuflussuntersuchungen am Hallwilersee durchgeführt. Damals betrug die Belastung des Hallwilersees noch 6,5 Tonnen Gesamtphosphor pro Jahr. Bis Ende der 1970er-Jahre nahm die Phosphorbelastung – als Folge des schlechten Zustands des Baldeggersees – auf rund 16 Tonnen pro Jahr massiv zu. Die Zuflussuntersuchungen von 1988 bis 1990 belegten die ersten Erfolge der Abwassersanierung im Kanton Luzern und der Sanierung des Baldeggersees. Mit dem Phosphorprojekt 2001 bis 2010 beschlossen die Kantone Aargau und Luzern erneut gemeinsame Zuflussuntersuchungen am Hallwilersee, um die Wirkung der Massnahmen in der Landwirtschaft zu dokumentieren. Erste Ergebnisse liegen nun vor.

Die Erfassung von Phosphorfrachten in Fließgewässern ist aufwendig

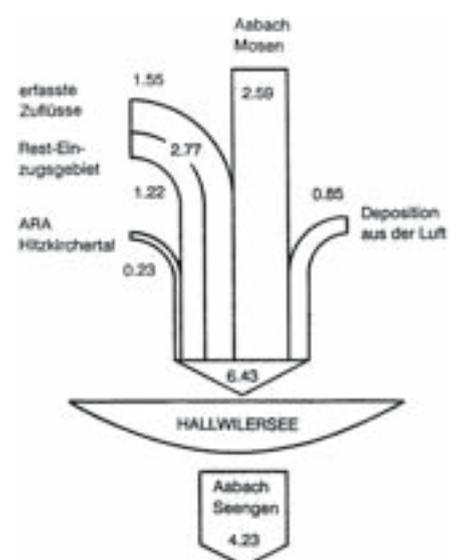
Die Fracht eines Stoffes berechnet sich aus dessen Konzentration im Wasser und der gleichzeitig abfließenden Wassermenge im Bach. Beide Grössen variieren stark. Bei Gewittern kann der Abfluss bis hundertmal mehr als der Trockenwetterabfluss betragen. Aber auch der Phosphorgehalt des Wassers schwankt mit dem Abfluss. Bei Regen wird Phosphor von Böden und Verkehrsflächen abgeschwemmt und aus drainierten Böden ausgewaschen. Mit zunehmendem Abfluss steigt dadurch die Phosphorkonzentration im Bach an. Umgekehrt führte früher die stetige Belastung mit ungereinigtem Abwasser zu hohen Konzentrationen bei Trockenwetter. Denn unter solchen Umständen mit geringer Verdünnung des Bachwassers ist die Konzentration entsprechend gross. Das Beispiel Dorfbach Meisterschwanden 2004 zeigt diese Zusammenhänge anhand der gemessenen Konzentrationen von gelöstem Phosphor bei verschiedenen Abflusssituationen.

Zur Berechnung der Jahresfracht wird zunächst mit statistischen Methoden für jede Messstelle eine optimale Funktion zwischen der Phosphorkonzentration und dem Abfluss bestimmt. Mit Hilfe der täglichen Abflussmittelwerte wird schliesslich die Jahresfracht des Gewässers berechnet. Das nicht durch Messungen erfasste Resteinzugsgebiet lässt sich mittels flächenspezifischer Faktoren hochrechnen.

Zuflussuntersuchungen 1988–1990

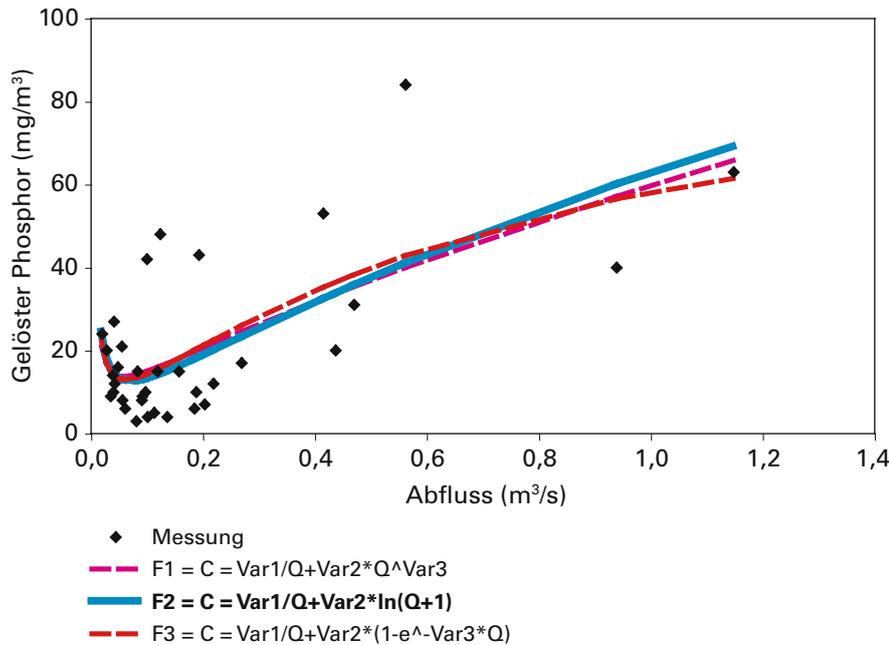
Der Hallwilersee wurde Ende der 1990er-Jahre jährlich mit 6,4 Tonnen Gesamtphosphor belastet. Der Hauptzufluss Aabach brachte mit 2,6 Tonnen allein 40 Prozent der Gesamtbelastung aus dem Baldeggersee. Die gemessenen kleineren Zuflüsse und das übrige Einzugsgebiet trugen zusammen 2,8 Tonnen pro Jahr (43 Prozent) bei. Die ARA Hitzkirchertal leitete 0,23 Tonnen pro Jahr direkt in den See ein, während über Niederschläge 0,85 Tonnen auf die Wasseroberfläche des Sees deponiert wurden.

Die Differenz zwischen der Gesamtbelastung und dem aus dem See abfließenden Phosphor von 4,2 Tonnen pro Jahr entspricht ungefähr dem in den Sedimenten abgelagerten Phosphor. Dieser Anteil betrug damals weniger als 50 Prozent. Bei gesunden Seen hingegen bleibt der Grossteil des Phosphors im Sediment.



Phosphorbilanz 1988–1990: Phosphoreintrag in den Hallwilersee nach Hauptquellen und Phosphoraustrag mit dem Seeabfluss (Tonnen pro Jahr).

Dorfbach Meisterschwanden 2004



Die Konzentration des gelösten, algenverfügbaren Phosphors (C) hängt ab vom Abfluss (Q). Für die Berechnung der Jahresfracht wird diejenige Funktion verwendet, die den geringsten statistischen Fehler ergibt (hier F2).



Bei Hochwasser steigt der Wasserstand und der Probensammler füllt sich. Durch Regulierung der ausströmenden Luft kann die Füllrate vorgegeben werden.

Gemeinsame Untersuchungen durch Aargau und Luzern

Seit 2004 werden an bedeutenden Bächen rund um den See sieben Messstellen betrieben: Gerbibach, Altwiserbach, Vorderbach und Hinterbach im Kanton Luzern sowie die Dorfbäche in Meisterschwanden, Tennwil und Birrwil im Kanton Aargau. Die Zuflussuntersuchung wird von den Gewässerschutzfachstellen der beiden Kantone und dem Luzerner Gemeindeverband Baldegger- und Hallwilersee getragen. Weitere Fachstellen und private Auftragnehmer wirken mit. Die Abflussmessung erfolgt durch kontinuierliche Aufzeichnung des Wasserstandes mittels Drucksonde an geeigneten Bachschwellen. Alle 22 Tage werden mit einem speziellen Sammelgefäß Tagesmischproben erhoben. Für die Beprobung von Regenereignissen werden die Sammelgefäße zwischenzeitlich angehoben, sodass sie sich nur bei erhöhtem Abfluss füllen. Das Labor der Abteilung für Umwelt untersucht die Wasserproben auf den Gehalt an Schwebstoffen, Gesamtphosphor, gelöstem Phosphor, Ammonium und Nitrat. Am Seeausfluss beim Schloss Hallwil werden Stichproben erhoben. Die

Stofffracht aus dem Baldeggersee erhalten wir von einer entsprechenden Untersuchung des Kantons Luzern vom Aabach. Die ARA Hitzkirchertal untersucht ihre gereinigten Abwässer regelmässig selbst. Die Niederschlagsdaten stammen von Messstationen der MeteoSchweiz.

Weniger gelöster Phosphor in den Bächen

Wissenschaftliche Untersuchungen während der 1990er-Jahre zeigten, dass bei den Bächen hauptsächlich der gelöste Phosphor für Algen im See verfügbar ist. Schwebstoffe sin-

ken im See rasch auf den Grund. Zudem wird mineralisch an Boden gebundener Phosphor nur langsam im Wasser gelöst. Aufgrund dieser Erkenntnisse haben wir die Phosphorfrachten der zwischen 1988 und 1990 untersuchten Bäche auf den algenverfügbaren Anteil reduziert und mit den 2004 untersuchten Bächen verglichen. Die Abnahme der relevanten Belastung ist markant! 2004 lag die Fracht an gelöstem Phosphor durchschnittlich noch bei einem Viertel der Fracht vor 15 Jahren.

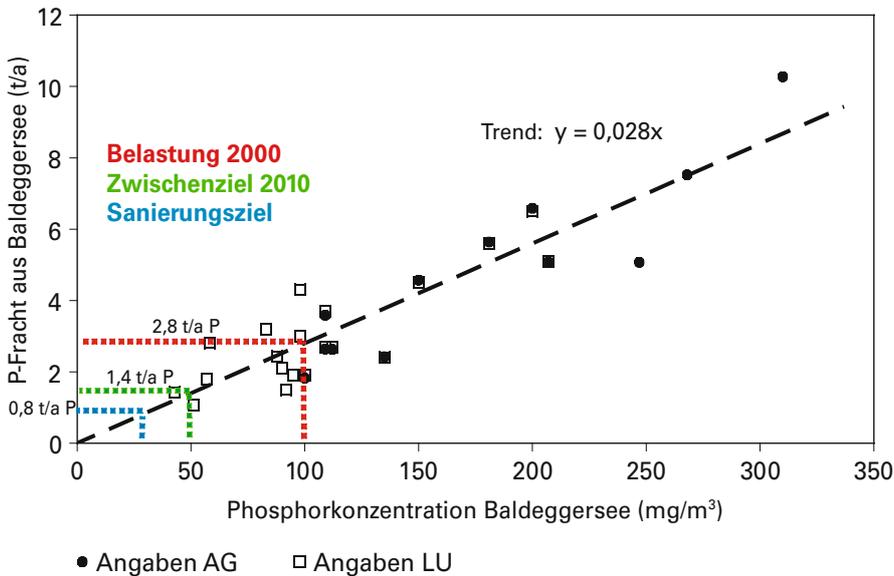
Auch wenn das Jahr 2004 eher trockener war als die Vergleichsperiode, so

Jahresfrachten an gelöstem, algenverfügbarem Phosphor in Zuflüssen zum Hallwilersee 1988–1990 und 2004

Gelöste Phosphorfracht (Tonnen/Jahr)	1988–90	2004	Einzugsgebiet (km ²)
Altwiserbach	0,148	0,023	2,35
Vorderbach	0,230	0,051	8,04
Hinterbach	0,078	0,020	1,94
Db. Meisterschwanden	0,178	0,051	7,13
Dorfbach Tennwil	0,033	0,012	0,97
Dorfbach Birrwil	0,034	0,005	1,29

Der Rückgang der Belastung ist markant, auch wenn 2004 ein eher trockenes Jahr war.

P-Belastung aus dem Baldeggersee



Die Phosphorbelastung aus dem Baldeggersee für ein durchschnittliches hydrologisches Jahr kann mit dem Trend zwischen gemessener P-Fracht aus dem See und der Phosphorkonzentration im See selbst geschätzt werden. Das Zwischenziel 2010 bedeutet für den Baldeggersee $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ und das Sanierungsziel $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ Gesamtposphor im Seewasser.

belegen diese Resultate weitere grosse Fortschritte im Gewässerschutz:

- Abwassersanierung im ländlichen Raum
- Verbesserung der Regenwasserbehandlung
- Ökologischere Ausrichtung der Landwirtschaft
- Massnahmen Phosphorprojekte

$100 \text{ mg}/\text{m}^3$, womit durchschnittlich 2,8 Tonnen Phosphor pro Jahr aus diesem See in den Hallwilersee flossen. Heute liegt die die Phosphorkonzentration des Baldeggersees bei rund $50 \text{ mg}/\text{m}^3$, womit der durchschnittliche Eintrag in den Hallwilersee bei 1,4 Tonnen Phosphor pro Jahr liegt. Die im Jahr 2004 effektiv gemessene Fracht lag bei 1,42 Tonnen Phosphor.

Belastung aus dem Baldeggersee

Der Hallwilersee erhält via Aabach vom Baldeggersee rund die Hälfte des Wassers. Der Abfluss beträgt im Jahresmittel $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Phosphorgehalt des Seeauslaufs wird nicht durch kurzfristige Niederschlagsereignisse beeinflusst, sondern durch den Phosphorgehalt des Sees. Neben gelöstem Phosphat enthält das Seewasser vor allem im Plankton gebundenen organischen Phosphor. Der gesamte Phosphor gilt in diesem Fall als algenverfügbar.

Für ein durchschnittliches hydrologisches Jahr besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Phosphorkonzentration im Baldeggersee und dem Export über den Aabach. Vor dem Jahr 2000 lag die Phosphorkonzentration im Baldeggersee bei rund

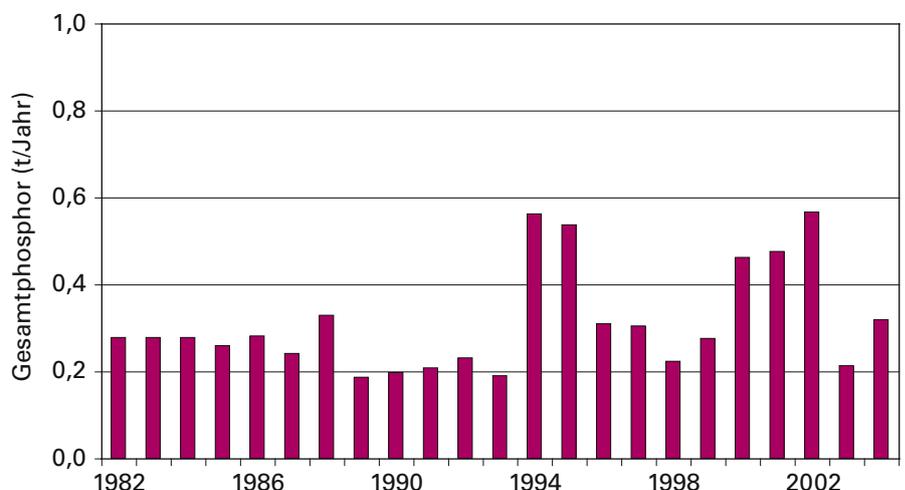
Belastung durch die ARA Hitzkirchertal

Während die Abwässer aus den aargauischen Gemeinden unterhalb des Hallwilersees gereinigt werden und so rund 5 Tonnen Phosphor pro Jahr vom See ferngehalten werden, leitet die ARA Hitzkirchertal die gereinigten Abwässer bedeutender luzerner Gemeinden via eine Seeleitung in rund 13 Metern Tiefe bei Mosen in den Hallwilersee. Die ARA ist seit Betriebsbeginn 1983 mit einer Phosphorelimination durch chemische Fällung ausgerüstet. Sie weist für dieses Verfahren einen überdurchschnittlichen Wirkungsgrad von rund 90 Prozent auf.

Der Phosphor im gereinigten Abwasser enthält keine leicht absetzbaren Anteile mehr und verbleibt daher lange im Seewasser für Algen verfügbar. Die jährliche Gesamtposphorfracht der ARA Hitzkirchertal betrug seit 1982 durchschnittlich 0,31 Tonnen. In einzelnen Jahren wurde die ARA allerdings übermässig durch industrielle Abwässer belastet. Durch angeordnete Vorbehandlungsanlagen bei den Nahrungsmittel verarbeitenden Betrieben konnte die Reinigungsleistung der ARA jeweils wiederhergestellt werden.

Die Phosphorbelastung aus der Siedlungsentwässerung durch Überlauf bei Regenwetter wird bei den Messungen der Zuflüsse miterfasst. Sie wur-

P-Eintrag durch ARA Hitzkirchertal



Die Phosphorbelastung durch die ARA Hitzkirchertal war in einzelnen Jahren erhöht.

de für die Jahre 1988 bis 1990 auf rund 0,2 Tonnen pro Jahr geschätzt. Regenwasserbehandlungsanlagen reinigen heute diese Entlastungen zusätzlich. Nach entsprechenden Gewässerbegehungen und Sanierungen sind heute keine unzulässigen Abwasserleitungen mehr bekannt.

Trockene und nasse Depositionen von Phosphor direkt auf den See tragen mit rund 0,9 Tonnen Phosphor zur Belastung bei. Über die Herkunft des Phosphors in Staub und Niederschlägen ist wenig bekannt. Vereinzelt Untersuchungen zeigen jedoch, dass sich die Berechnungsfaktoren wenig verändert haben.

Sind die Ziele erreichbar?

Als Grundlage für das Phosphorprojekt Hallwilersee wurde zu Projektbeginn im Jahr 2000 die Herkunft der Phosphorbelastung für ein durchschnittliches hydrologisches Jahr geschätzt. Die Gesamtbelastung mit algenverfügbarem Phosphor betrug 5,5 Tonnen pro Jahr. Davon stammten 2,8 Tonnen (51%) aus dem Baldeggersee, 1,51 Tonnen (28%) gelangten durch Zuflüsse des direkten Einzugsgebietes in den Hallwilersee, die ARA Hitzkirchertal war mit 0,3 Tonnen (5%) und die Deposition auf dem See mit 0,9 Tonnen Phosphor (16%) beteiligt.

Als Zwischenziel für das Jahr 2010 wurde eine Halbierung sämtlicher Teilquellen ins Auge gefasst. Davon ausgenommen ist die nicht beeinflussbare Deposition auf den See. Für den Baldeggersee bedeutet dies einen durchschnittlichen Phosphorgehalt von 50 mg/m³ im See (Zielvorgabe des Phosphorprojektes Baldeggersee). Die Belastung durch die direkten Zuflüsse zum Hallwilersee sollte mit den Massnahmen des Phosphorprojektes innert der Projektdauer von 10 Jahren das langfristig tolerierbare Mass der Belastung durch die Landwirtschaft weitgehend erreichen. Bei der ARA Hitzkirchertal braucht es eine weitere Reduktion des Phosphors im gereinigten Abwasser, denn mit dem Rückgang der Gesamtbelastung wird zukünftig der Abwasseranteil für den Seezustand wieder relevant. Für das Jahr 2010 ergibt die Summe ein Belastungsziel von 3,2 Tonnen algenverfügbaren Phosphors. Zur nachhaltigen Gesundung des Hallwilersees wird aber eine weitere Belastungsreduktion auf weniger als 2,5 Tonnen algenverfügbaren Phosphors notwendig.

Handlungsbedarf besteht beim Baldeggersee

Die gemessene Belastung des Hallwilersees mit algenverfügbarem Phosphor im Jahr 2004 ergab 2,94 Tonnen.

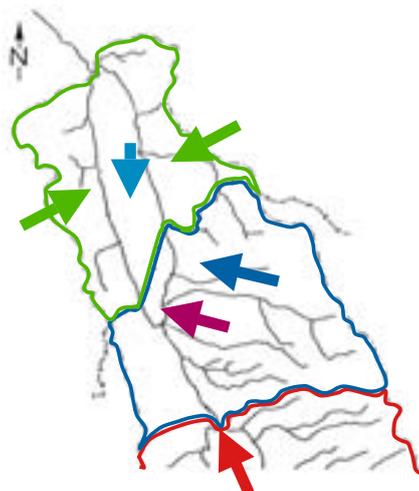
Bereits die Belastung aus dem Baldeggersee erreichte die Vorgabe für das Jahr 2010. Die direkten Zuflüsse zum See übertrafen in diesem Jahr sogar die Vorgaben. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass 2004 ein eher trockenes Jahr war. Die laufende Auswertung der Periode 2004 bis 2006 dürfte etwas höhere, aber repräsentativere Werte ergeben. Das Ziel für 2010 ist jedoch auch hier erreichbar. Um das gesteckte Ziel bezüglich eines Abwasseranteils von 0,1 Tonnen Phosphor zu erreichen, ist in der ARA Hitzkirchertal eine Filtration des gereinigten Abwassers ins Auge zu fassen. Dieser Verfahrenszusatz kann die Phosphorelimination bis auf 95 Prozent verbessern und ist heute in vielen empfindlichen Einzugsgebieten von Seen Standard.

Die Gesundung des Hallwilersees hängt letztlich ab vom Erfolg der Sanierung des Baldeggersees. Dessen Phosphorgehalt, der in den letzten Jahren regelmässig weniger als 50 mg/m³ betrug, stimmt für die langfristige Gesundung des Hallwilersees zuversichtlich. Entscheidend wird aber sein, dass die Ziele nicht nur erreicht, sondern auch gehalten werden können.



Arno Stöckli
Robert Lovas

Herkunft der Phosphorbelastung des Hallwilersees



Algenverfügbarer Phosphor (Tonnen/Jahr)	Stand 2000	Jahr 2004	Ziel 2010	Ziel Sanierung
Abfluss Baldeggersee	2,8	1,42	1,4	0,8
Zuflüsse Hallwilersee LU	1,01	0,22	0,50	0,45
Zuflüsse Hallwilersee AG	0,50	0,12	0,25	0,22
Zuflüsse Einzugsgebiet	1,51	0,34	0,75	0,67
ARA Hitzkirchertal	0,3	0,32	0,15	0,1
Deposition auf See	0,9	0,86	0,9	0,9
P-Belastung Hallwilersee	5,5	2,94	3,2	2,5

Stand der Phosphorbelastung des Hallwilersees im Vergleich zum Zwischenziel für das Phosphorprojekt 2010 und dem Ziel für die nachhaltige Sanierung. Erste Auswertungen der Zuflussuntersuchungen für das Jahr 2004 zeigen, dass die Ziele erreichbar sind.

P-Versorgungsgrad der Böden im direkten Einzugsgebiet des Hallwilersees und aus der Sicht des Gewässerschutzes zu beachtende Düngervorschriften

P-Testzahl	Klasse	P-Versorgung	Kt. AG %	Kt. LU %	Nötige Massnahme zum Schutz der Seen
0–2,5	A	arm	1	2	
3–5,5	B	mässig	21	12	
6–12,5	C	genügend	42	39	P-Entzug durch Pflanzen zu 100 % kompensieren
13–25,5	D	Vorrat	26	30	P-Entzug durch Pflanzen nur zu 20–80 % kompensieren
>26	E	angereichert	10	17	Auf P-Düngung verzichten

se Überschüsse zu 100% in die Gewässer gelangen. Zwar ist es unbestimmt, wann dieser Zustand erreicht sein wird, aber es ist einleuchtend, dass er erreicht werden wird. Um diesem rasanten Anstieg der bodenbürtigen P-Belastung zuvorzukommen, verpflichtet der Art. 14 des Gewässerschutzgesetzes die Kantone, für gefährdete Gebiete verschärfte Vorschriften zu erlassen.

Können finanzielle Anreize verschärfte Vorschriften ersetzen?

Die Regierungen der Kantone Aargau und Luzern verzichteten bis jetzt darauf zu verordnen und versuchten ihr Ziel mit finanziellen Anreizen zu erreichen: Jedes Kilogramm Phosphat, das nicht als Dünger ausgebracht wird, wird mit 15 Franken entschädigt. Im Jahr 2004 wurden dafür im Einzugsgebiet des Hallwilersees 239'130 Franken und in jenem des Baldeggersees 259'500 Franken ausbezahlt. Dank dieser Massnahmen werden in einem Teil der Böden die bereits vorhandenen P-Überschüsse langsam abgebaut. Landwirtschaftsbetriebe, die sich nicht an den Programmen zur Seesäuberung beteiligen, können aber ihre Böden weiterhin legal mit P anreichern.

Langfristig führen diese Massnahmen dazu, dass die Böden jener Betriebe, die sich am Programm beteiligen, der Versorgungsklasse C angehören (das ist erstrebenswert) und die übrigen mit P gesättigt sind (das wird sich, wie unten gezeigt wird, katastrophal

auf die Gewässerqualität des Sees auswirken). Wir können die künftige P-Fracht zum Hallwilersee für die Szenarien, dass (a) die bisher angewendete Düngepaxis mit dem freiwilligen Anreizsystem fortgeführt wird, oder (b) alle ÖLN-Betriebe die P-Überschüsse in ihren Böden abbauen müssen, einfach abschätzen.

Prognostizierte Belastung des Hallwilersees mit algenverfügbarem P (Szenario a)

P-Quelle	Fläche ha	bodenbürtig kg P/ha	Frachten t P/Jahr
Luzerner Böden unter Seevertrag	1890	0,35	0,66
Luzerner Böden von ÖLN-Betrieben	664	1,3	0,86
Luzerner Böden von konventionellen Betrieben	33	5,7	0,19
Aargauer Böden mit reduzierter P-Bedarfs-Deckung	450	0,35	0,16
Aargauer Böden von ÖLN-Betrieben	713	1,3	0,93
Aargauer Böden von konventionellen Betrieben	37	5,7	0,21
Abfluss Baldeggersee*			3,38
Luft**			0,68
Abwasser**			0,23
Total			7,30

* Annahme gleiches Verhältnis von Export/Zufuhr wie im Mittel von 2000 bis 2004 (uwe, 2005)
 ** P-Projekt Hallwilersee (2000)

Langfristig zu erwartender Austrag von algenverfügbarem P aus Böden bei unveränderter Fortführung der landwirtschaftlichen Praxis (Vergleichsjahr 2004) und anhaltender Ausnützung der heute geltenden Hofdüngerkontingente durch ÖLN- und konventionelle Betriebe

Szenario a

In den 1950er- und 1960er-Jahren wurde 0,35 kg algenverfügbarer P/ha Jahr aus landwirtschaftlich genutzten Mittellandböden ausgewaschen. Heute sind es 0,5 bis 5,5 kg P/ha Jahr. Wir nehmen an, dass der Wert von 0,35 kg P/ha Jahr etwa dem P-Verlust von Böden der Versorgungsklasse C entspricht. Bei P-gesättigten Böden werden die jährlichen Gesamt-P-Verluste die jährliche Überdüngung kompensieren. Es sind somit 3 kg P/ha Jahr für ÖLN-Betriebe und 13 kg P/ha Jahr auf Nicht-ÖLN-Betrieben zu erwarten. Geht man davon aus, dass davon im Mittel etwa 44% gelöst sind, so entspricht das einem Gewässereintrag von 1,3 kg algenverfügbarem P/ha Jahr für ÖLN-Betriebe und von 5,7 kg algenverfügbarem P/ha Jahr für konventionelle Betriebe.

Bei unveränderter Art der Bewirtschaftung und unverändertem Beteiligungsgrad am P-Verminderungs-Programm lässt sich also die zukünftige P-Belastung der Seen abschätzen. Die Belas-

Prognostizierte Belastung des Hallwilersees mit algenverfügbarem P (Szenario b)

P-Quelle	Fläche ha	bodenbürtig kg P/ha	Frachten t P/Jahr
Luzerner Böden unter Seevertrag	1890	0,35	0,66
Luzerner Böden von ÖLN-Betrieben	664	0,35	0,23
Luzerner Böden von konventionellen Betrieben	33	5,7	0,19
Aargauer Böden mit reduzierter P-Bedarfs-Deckung	450	0,35	0,16
Aargauer Böden von ÖLN-Betrieben	713	0,35	0,25
Aargauer Böden von konventionellen Betrieben	37	5,7	0,21
Abfluss Baldeggersee*			2,26
Luft**			0,68
Abwasser**			0,23
Total			4,87

* Annahme gleiches Verhältnis von Export/Zufuhr wie im Mittel von 2000 bis 2004 (uwe, 2005)

** P-Projekt Hallwilersee (2000)

Prognostizierte Belastung des Hallwilersees mit algenverfügbarem P unter der Annahme, dass die ÖLN-Richtlinien verschärft und die P-Überschüsse aller Böden, die einem Seevertrag oder ÖLN-Vertrag unterstehen, abgebaut werden

Die Belastung des Baldeggersees wird von aktuell 4,8 t/Jahr auf 5,8 t/Jahr und jene des Hallwilersees von 5,3 t/Jahr auf 7,3 t/Jahr ansteigen. Bei konsequenter Fortführung des gegenwärtigen kostspieligen Anreizsystems wird sich die Wasserqualität der beiden Seen also nicht weiter verbessern, sondern – langfristig – wieder deutlich verschlechtern.

Szenario b

Wenn es den Kantonen Aargau und Luzern gelingt, mit verschärften Vorschriften oder mit anderen Massnahmen die Böden aller ÖLN-Betriebe in die Versorgungsklasse C zurückzuführen, so wird die heutige P-Belastung des Baldeggersees um etwa 20% und jene des Hallwilersees um 10% vermindert. Im Vergleich zur aktuellen Belastung entspricht dies nur einer leichten Verbesserung, im Vergleich zum Szenario a aber einer deutlichen Verbesserung.

Fazit

Wir freuen uns mit allen an der bisher erreichten vorübergehenden Qualitätsverbesserung des Hallwilersees. Wir warnen aber dennoch ausdrücklich davor, wie bis anhin fortzufahren. Die blinde Hoffnung auf eine unendlich grosse Phosphor-Bindungskapazität der Böden ist verlockend, aber falsch. Um nicht später mit viel grösserem Aufwand grössere P-Überschüsse abbauen und länger auf den Sanierungserfolg warten zu müssen, raten wir deshalb den Regierungen der Kantone Aargau und Luzern dringend, nicht weiter zuzuwarten, sondern rasch zu handeln.



René Gächter
Beat Müller

Verdankungen

Wir danken Josef Blum, Arno Stöckli und Christoph Ziltener für das Bereitstellen von Grundlagenmaterial.

Von der Praxis zur Wissenschaft und zurück – Erfahrungen der Eawag

Als Anfang der 1980er-Jahre in den Mittellandseen die ersten Gehversuche mit Belüftung von Tiefenwasser gemacht wurden, war das Verständnis über Seen noch «einfach und klar». Dank einem weltweit einzigartigen «Experiment» war es möglich, unter kontrollierten Bedingungen in realer Umwelt neue seeökologische Erkenntnisse zu gewinnen – ohne die gute Zusammenarbeit mit Partnern aus der Praxis wäre das nie in diesem Umfang möglich gewesen.

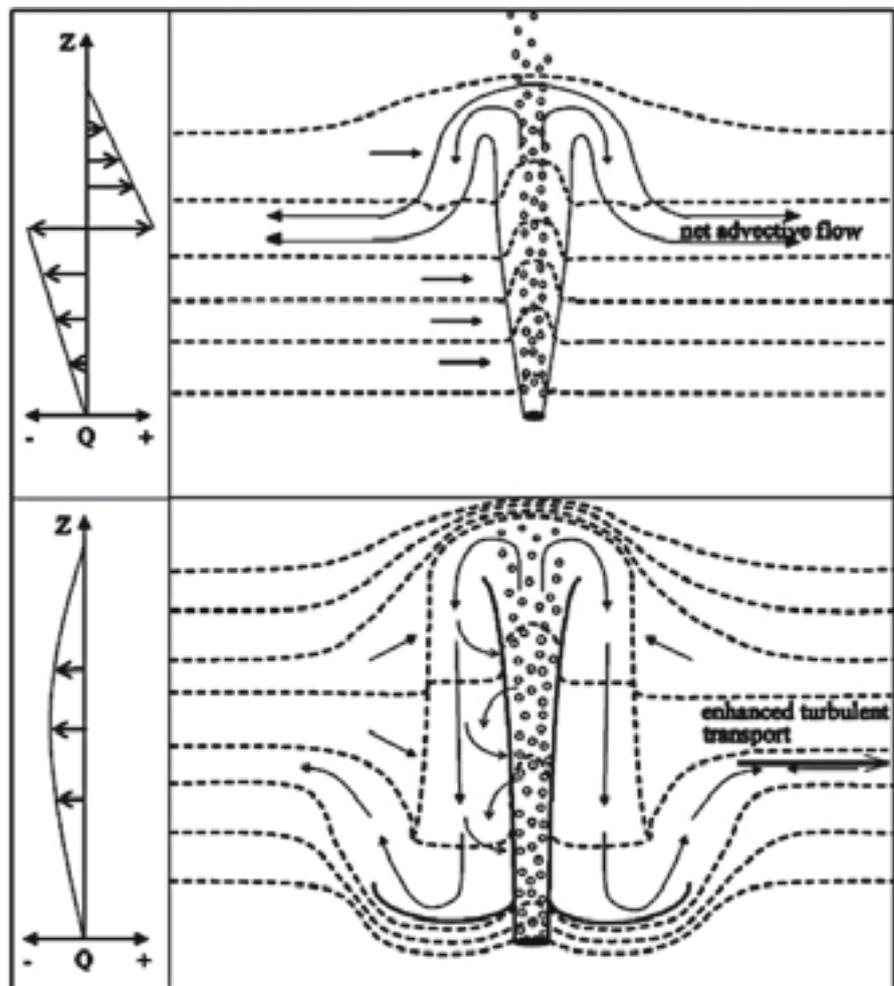
Die Umwelt kann auf sehr unterschiedliche Weise erforscht werden: Während die einen die wohldefinierten Bedingungen des Labors oder des Computers bevorzugen und dabei Einsichten von hohem Detaillierungsgrad gewinnen, bevorzugen andere den realen Einzelfall und versuchen, dem individuellen Charakter eines Ökosystems gerecht zu werden. Die Zusammenarbeit an den drei Mittellandseen Hallwiler-, Baldegger- und Sempachersee entpuppte sich in dieser Hinsicht als echter Glücksfall, denn sie erlaubte, die beiden Arbeitswelten zu kombinieren und Untersuchungen als «kontrollierte Experimente» in der

Umwelt durchzuführen. Als Vorteil erwies sich auch, dass von der Praxis Forschungsfragen gestellt und somit vielen «akademischen» Projekten

klare Ziele gewiesen wurden. Dank der Daueruntersuchungen der beiden Kantone stand eine grosse Datengrundlage zu den Seen und Einzugsgebieten zur Verfügung. Andererseits flossen die Ergebnisse bei den Gewässerfachstellen von Luzern und Aargau laufend in Planung (z.B. Belüftung) und Prioritätensetzung (z.B. Massnahmen im Einzugsgebiet) ein. Die durch diese Zusammenarbeit gewonnenen Forschungsergebnisse sind im Umfang einmalig: Das «Web-of-Science» weist weit über hundert Ein-



Daniel McGinnis beim Absenken einer Multisonde zum Erfassen von Temperatur-, Leitfähigkeits- und Sauerstoffprofilen im See und zur Vermessung des Blasenschleiers.



Die moderne Messtechnik hat unser Verständnis der Wirkungsweise von Blasenschleiers zur Belüftung von Seen verbessert. Beim alten Modell (oben) breitet sich das belüftete Tiefenwasser horizontal im See aus und sinkt grossräumig in die Tiefe ab. Nach heutigem Modellverständnis (unten) finden im Nahbereich des Blasenschleiers hingegen intensive Mischungsprozesse statt und der Sauerstoff wird durch einen gesteigerten turbulenten Transport im See verteilt.

träge zu den inzwischen weltbekannten Mittellandseen auf, und dies zu einer grossen Vielfalt von Themen. Diese reichen von der Analyse langer Sedimentkerne und deren Informationen zu Klima und menschlicher Tätigkeit seit der letzten Eiszeit über geochemische Vorgänge an der Sedimentoberfläche und den darauf abgelegten Felcheneiern bis zur Dynamik der Zuflüsse und hinaus zu den Böden der Einzugsgebiete, wo Nährstoffe ursächlich herkommen.

Mit der Belüftung des Tiefenwassers wurden zwei Ziele verfolgt: Erstens sollte damit den höheren Lebewesen, welche Sauerstoff benötigen (etwa Fische), das Tiefenwasser als Lebensraum wieder zugänglich gemacht werden, und zweitens hoffte man, die Rücklösung des Phosphats aus dem Sediment zu unterbinden, indem die oberste Schicht dank sauerstoffhaltigen Wassers oxidiert würde. Das erste Ziel wurde dank des gewählten Systems von Blasenschleiern gut erreicht. Mit Modellrechnungen konnte einerseits deren Dimensionierung und optimierter Betrieb gewählt werden, und andererseits wurde der Hallwilersee als Freilandlabor benützt, um in internationaler Zusammenarbeit mit

amerikanischen Kollegen aus Virginia die Struktur von Blasenschleiern zu untersuchen (siehe Beitrag von Moosmann und McGinnis in diesem Heft).

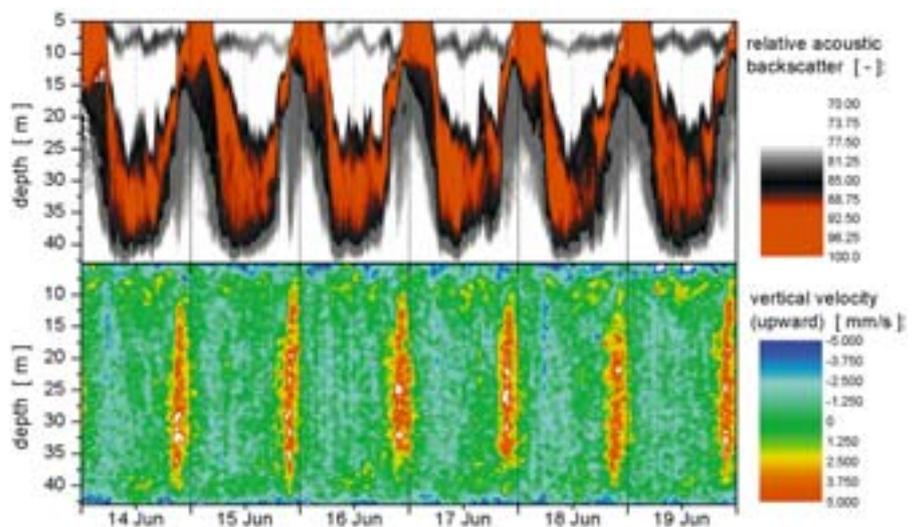
Das zweite Ziel, die Rücklösung von Phosphat aus dem Sediment zu unterbinden, welches sich aus absinkenden Algen und ausgefälltem Kalzit bildet, wurde jedoch nicht erreicht, obwohl das gesamte Seewasser wieder Sauerstoff enthielt. Die Gründe dieser fortgesetzten «Selbstdüngung» wurden erst im Verlauf zusätzlicher Forschungsarbeiten verstanden: Zwar enthielt das Wasser über dem Sediment genügend Sauerstoff – nur war sein Transport ins Sediment hinein so langsam, dass ihn das Sediment so gut wie gar nicht sah. Die Sedimente waren schon in einem Millimeter Tiefe sauerstofffrei, was dazu führte, dass die Oxide von Eisen und Mangan auch weiterhin aufgelöst wurden und somit nur wenig Phosphat binden konnten. Einzig unmittelbar bei den Diffusoranlagen bildeten Mangan- und Eisenoxide eine vom Menschen geschaffene Minilagerstätte. Im Baldeggersee war diese Ablagerung so intensiv, dass die Diffusoren verstopften und häufig gereinigt

werden mussten. Aus diesen Erkenntnissen ergab sich schon bald die Forderung, dass die Seen nur über die Einzugsgebiete gesunden können. Dies wiederum löste eine ganze Palette von Untersuchungen aus zur Abschwemmung von Phosphor aus landwirtschaftlich genutzten Böden, biogeochemische Umwandlungen, Einflüsse des Wetters und der Jahreszeiten, Dynamik von Bächen und manch anderes mehr.

Die Krönung aller Massnahmen wäre, wenn sich die Felchen in den Seen wieder natürlich fortpflanzen könnten. Aber bei der Naturverlächung der Felchen wird das Sediment noch lange nicht mitspielen: Die Felcheneier werden zwar im sauerstoffhaltigen Wasser abgelegt, müssen sich aber auf dem stark Sauerstoff zehrenden Sediment liegend entwickeln. Sie überleben nicht lange, weil sie Bruchteile von Millimetern ins Sediment einsinken, wo sie vom sauerstofffreien Milieu zum Tod verurteilt werden. Dass man in 50 m Tiefe über Bruchteile von Millimetern den Konzentrationsverlauf von Sauerstoff messen kann, bewirkt immer wieder ungläubige Gesichter.



Andreas Lorke (links) und Daniel McGinnis (rechts) vor dem Einsatz eines auf Ultraschall basierenden Strömungsmessgeräts für Profile im See (gleiches Prinzip wie die Radarfalldaten der Polizei). Mit diesem Instrument können gleichzeitig auch die Insektenlarven Chaoborus beobachtet werden.



Die rote Farbe zeigt im Hallwilersee den Aufenthaltsort und die Anzahl von Chaoborus-Larven (je röter, desto mehr). Mit akustischer Ortung können diese auf ihrer täglichen Wanderung beobachtet werden. Am Tag verstecken sie sich vor dem Frass durch Fische in dunkler Tiefe, in der Nacht steigen sie mithilfe von Gasblasen rasch an die Oberfläche, wo sie sich von kleineren Planktonkrebsen ernähren.

Die auf konkrete Probleme ausgerichtete Forschung im Wechselspiel mit der Praxis hat sich als echter Gewinn herausgestellt. Beide profitieren sowohl von den Fragestellungen als auch von den erforschten Antworten. Und last, but not least: Eine nicht zu unterschätzende Begleiterscheinung ist das motivierende Umfeld, welches

durch das gegenseitige Interesse an den Resultaten entsteht. Und bestimmt haben auch das echte Interesse aller Beteiligten an der Sache und die persönliche gegenseitige Achtung zum guten Gelingen beigetragen. 

Alfred Wüest



Im Winter an der Wasseroberfläche aufruhende Burgunderblüten sammeln sich im Schilfgürtel des Sees. Stoff- und Energiehaushalt im Schilf werden in Forschungsprojekten studiert. Die Zersetzungsprozesse werden durch am Ufer angeschwemmte Algenblüten massiv verstärkt.

Publikationen

- Brutschy, A. (1911):** Das Plankton des Hallwilersees. Festschrift der Aarg. Natf. Gesell. 12, 141–148.
- Günthert, A. (1911):** Einige Mitteilungen über die Tiefenfauna des Hallwilersees. Festschrift der Aarg. Natf. Gesell. 12, 75–83.
- Günthert, A. (1920):** Sauerstoff und Schwefelwasserstoff im Hallwilersee und ihre biologische Bedeutung. Festschrift für Zschokke 12, 13 Seiten, Basel.
- Brutschy, A. (1922):** Die Vegetation und das Zooplankton des Hallwilersees. Internat. Rev. d. ges. Hydrobiol. 10, 91–138, 271–298.
- Brutschy, A., Günthert, A. (1923):** Gutachten über den Rückgang des Fischbestandes im Hallwilersee. Arch. Hydrobiol. 14, 523–571.
- Brutschy, A. (1925):** Algen aus den ältesten Seekreiden des Hallwilersees. Mitt. Aarg. Naturf. Gesell. 17, 166–173.
- Steinmann, P. (1936):** Der Fischbestand des Hallwilersees. Schweiz. Fischerei 2, 44–188.
- Jaag, O. (1949):** Die neuere Entwicklung und der heutige Zustand der Schweizer Seen. Verh. Limnol. 10, 192–209.
- Baldinger, F. (1957):** Das Hallwilersee-Projekt als Beispiel einer grosszügigen Seesanieung. Schweiz. Z. Hydrol. 19, 18–36.
- Ambühl, H. (1960):** Die Nährstoffzufuhr zum Hallwilersee. Schweiz. Z. Hydrol. 22, 563–597.
- Gächter, R., Furrer, O. (1972):** Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz. Schweiz. Z. Hydrol. 34, 41–70.
- Uehlinger, U. (1981):** Zur Ökologie der planktischen Blaualge Aphanizomenon flos aquae in Alpenrandseen. Schweiz. Z. Hydrol. 43, 69–88.
- 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.
- Märki, E., Schmid, M. (1983):** Der Zustand des Hallwilersees. «wasser, energie, luft» 75, 105–112.
- Bürgi, H. R., Weber, P., Bachmann, H. (1985):** Seasonal variations in the trophic structure of phyto- and zooplankton communities in lakes in different trophic states. Schweiz. Z. Hydrol. 47, 197–224.
- Bloesch, J., Uehlinger, U. (1986):** Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss lake. Limnol. Oceanogr., 31, 1094–1109.
- Schaffner, U. (1987):** Belüftung des Hallwilersees. Schweizer Ingenieur und Architekt 23, 660–663.
- Stöckli, A., Schmid, M. (1987):** Die Sanierung des Hallwilersees – Erste Erfahrungen mit Zwangszirkulation und Tiefenwasserbelüftung. «wasser, energie, luft» 79/7–8, 143–149.
- Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung für Umwelt (1992):** Sanierung des Hallwilersees – Zuflussuntersuchung zur Nährstoffbelastung 1988/1990 (Schlussbericht). «wasser, energie, luft» 84/3–4, 66–67.

- Scheidegger, A., Stöckli, A., Wüest, A. (1994):** Einfluss der internen Sanierungsmassnahmen auf den Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee. «wasser, energie, luft» 86/5–6, 126–131.
- Gächter, R., Mares, A., Stamm, C., Kunze, U., Blum, J. (1996):** Dünger düngt Sempachersee. *Agrarforschung* 3, 329–332.
- Wehrli, B., Wüest, A. (1996):** Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. Schriftenreihe der EAWAG Nr.9, Dübendorf-Zürich (ISBN: 3-906484-14-9).
- Stadelmann, P., Butscher, E., Bürgi, H.-R. (1997):** Massnahmen zur Seesanieung: Beispiel Baldeggersee. *Gas, Wasser, Abwasser*, 1997/1.
- Sibbesen, E., Sharpley, A. N. (1997):** Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils. In: Tunney, H., Carton, O. T., Brookes, P. C., Johnston, A. J. (Eds.): *Phosphorus Loss from Soil to Water*. CAB International. Oxon (UK) and New York (USA). 151–176.
- Stamm, C., Flühler, H., Gächter, R., Leuenberger, J., Wunderli, H. (1998):** Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27, 515–522.
- Bürgi, H. R., Jolidon, C. (1998):** 10 Jahre Seesanieung Hallwilersee – die Reaktion des Planktons. «wasser, energie, luft» 90/5–6, 109–116.
- Gächter, R., Müller, B. (1999):** Die bodenbürtige P-Belastung des Sempachersees. *Problemanalyse und Lösungsvorschlag*. «gwa» 6, 460–466.
- GRUDAF (2001):** Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* 8/6 (ganzes Heft).
- Enz, C., Müller, R., Bia, M. M., Heeb, J. (2002):** A population dynamics model for evaluating mortality factors in whitefish (*Coregonus suidteri*) larvae in Lake Hallwil. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 57, 343–358.
- Müller, R., Meng, H. J., Enz, C., Bia, M. M., Schäffer, E. (2002):** Forecasting year-class strength and yields of Lake Hallwil whitefish in an eutrophic lake. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 57, 615–625.
- Lorke, A., McGinnis, D., Spaak, P., Wüest, A. (2004):** Acoustic observations of zooplankton in lakes using a Doppler current profiler. *Freshwater Biology*, 2004, 1365–2427.
- Müller, R., Stadelmann, P. (2004):** Fish habitat requirements as the basis for rehabilitation of eutrophic lakes by oxygenation. *Fisheries Management and Ecology* 11, 251–260.
- McGinnis, D., Lorke, A., Wüest, A., Stöckli, A., Little, J. C. (2004):** Interaction between a bubble plume and the near field in a stratified lake. *Water Resources Research* 40, W10206.
- Suter, B. (2004):** Seebelüftung Hallwilersee mit vor Ort erzeugtem Sauerstoff. *Wasser, Boden, Luft, Umwelttechnik* 2004/3, 12–13.
- Moosmann, L., Gächter, R., Müller, B., Wüest, A. (2005):** Is phosphorus retention in autochthonous lake sediments controlled by oxygen or phosphorus? *Limnol. Oceanogr.* 51, 763–771.
- Buesing, N., Gessner, M. (2006):** Benthic bacterial and fungal productivity and carbon turnover in a freshwater marsh. *Applied and Environmental Microbiology* 72/1, 596–605.

Aktuelle Informationen zur Sanierung Hallwilersee

http://www.ag.ch/umwelt/de/pub/themen/wasser/sanieung_hallwilersee.htm