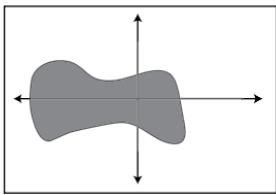


6. Vergessenes Wissen und Überraschungen: Der Sempachersee als Labor



Die Sanierung des Sempachersees ist ein Musterbeispiel für rekursives Lernen unter intensivem Einbezug von Wissenschaftlern und Forschungsergebnissen. Im Gegensatz zu Mkwaja Ranch (Kap. 4) bestand hier bereits zu Beginn der Seesanierung ein umfangreiches Grundlagenwissen, welches sich sowohl auf die natürliche Dynamik von Seen bezog als auch auf technische Sanierungsmöglichkeiten. Daher kann hier auch nicht von einem »Hineinrutschen« in ein Realexperiment gesprochen werden: Der Fall des Sempachersees zeigt, dass das Auftreten von Überraschungen auch dadurch begünstigt werden kann, dass sehr viel Wissen verfügbar ist und dementsprechend detaillierte Erwartungen darüber bestehen, wie sich ein bestimmter Eingriff auf das zu gestaltende System auswirkt.

In einer solchen Situation können umfangreiche Beobachtungen durchgeführt werden, die Aufschluss darüber geben, ob der Eingriff den Erwartungen gerecht wird. Ist dies nicht der Fall, so stehen die beteiligten Experten vor einem Rätsel, das es zu lösen gilt. Dabei können, wie die Sanierung des Sempachersees zeigt, Laborexperimente und kontrollierte Feldexperimente in relativ abgeschlossenen Systemen eine zentrale Rolle spielen. In solchen Situationen können die beiden verschiedenen Traditionen des Experimentierens – das Realexperiment *und* das kontrollierte Experiment – fruchtbar miteinander kombiniert werden. Auf diese Weise kann Wissen entstehen, welches nicht nur für das Gelingen der Gestaltung nützlich ist, sondern das darüber hinaus auch in die internationale Grundlagenforschung einfließen kann.

Der Sempachersee ist ein 16 Quadratkilometer großer See im schweizerischen Kanton Luzern. Das Einzugsgebiet des Sees wird landwirtschaftlich intensiv genutzt. Zugleich ist es recht dicht besiedelt. Während des Zweiten Weltkriegs war die Schweiz darauf angewiesen, sich selbst mit Lebensmitteln zu versorgen. Im Rahmen dieser »Anbauschlacht« wurde die Landwirtschaft auch an Standorten intensiviert, die eigentlich nicht für eine intensive Landwirtschaft geeignet waren. Auch im Einzugsgebiet des Sempachersees wurden damals viele Flächen drainiert. Nach dem Krieg stieg dann die Nachfrage nach Fleisch stark an, und es wurde möglich, Futtermittel in nahezu unbegrenzten Mengen zu transportieren. Zwischen 1951 und 1983 verdreifachten sich daher die Schweinebestände im Einzugsgebiet des Sempachersees (Blum/Felder 1993: 264). Parallel dazu kamen vermehrt phosphathaltige Waschmittel zum Einsatz, sodass die Phosphoreinträge in den Sempachersee massiv zunahmen.

Heute ist nur noch ein kleiner Teil der Bevölkerung in der Landwirtschaft tätig. Der Großteil der Anwohner nutzt den See vor allem als Erholungsraum (Baumann et al. 1993), doch gibt es auch noch einige Fischer. In den 1980er Jahren führte eine starke Eutrophierung im Sommer zu Algenblüten und im Herbst zur Zersetzung der toten Algen; Nasenzeugen berichten, dass der See bisweilen »wie eine Jauchegrube« gestunken habe. Immer wieder kam es zu Fischsterben, und die sauerstoffarmen Verhältnisse im Tiefenwasser verhinderten die natürliche Vermehrung der wichtigsten einheimischen Fischart, der Felchen (Gächter/Stadelmann 1993: 370f.). Der Sempachersee gehörte damals neben den benachbarten Seen Hallwilersee und Baldeggsee⁵¹ zu den eutrophiertesten Schweizer Seen.

Die folgende Darstellung der Seesanierung beginnt mit einem historischen Rückblick über wichtige limnologische⁵² und bodenkundliche Theorien, die für ein Verständnis der getroffenen Maßnahmen wesentlich sind. Anschließend werden kurz die Rahmenbedingungen analysiert, unter denen die Sanierung des Sees erfolgte. Im Mittelpunkt stehen zunächst die limnologischen Untersuchungen, auf deren Grundlage in den 1970er Jahren eine Sanierungsstrategie erarbeitet wurde, die in ihren Grundzügen noch heute verfolgt wird. Anschließend wird die Frage untersucht, wie sich diese Strategie bewährte und wie allmählich ein fundierteres Wissen über die wichtigsten Prozesse im See selbst und in seinem Einzugsgebiet erarbeitet wurde.

51 | Alle drei Seen zeichnen sich durch ähnliche Rahmenbedingungen aus: durch drainierte Böden in einem landwirtschaftlich intensiv genutzten Einzugsgebiet. Alle drei Seen liegen (der Hallwilersee teilweise) im Kanton Luzern.

52 | Die Limnologie ist die Wissenschaft, die sich mit Oberflächengewässern beschäftigt.

6.1 Der Stand des Wissens um 1970

Da um 1970 herum wichtige Weichenstellungen getroffen wurden, soll zunächst das Wissen rekonstruiert werden, welches zu dieser Zeit verfügbar war. Ab Ende der 1960er Jahre wurden im Kanton Luzern erste systematische Untersuchungen über den Zustand der Gewässer durchgeführt, der allmählich als gesellschaftlich relevantes Problem wahrgenommen wurde. Bis 1970 wurde Wissen über drei verschiedene Prozesse erzeugt und gesammelt: über die Eutrophierung, die landwirtschaftlichen Phosphoreinträge und die Dynamik von Phosphor am Seegrund. In den folgenden Abschnitten werden die Prozesse unter diesen drei Wissensaspekten der Reihe nach dargestellt.

Von der Seenalterung zur Eutrophierung

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war der Gewässerschutz noch kein politischbrisantes Thema. Zu dieser Zeit begannen die ersten Limnologen, sich mit dem Nährstoffgehalt von Seen zu beschäftigen – zunächst allerdings aus einer ganz anderen Perspektive. Die frühen Limnologen interessierten sich vor allem dafür, wie sie verschiedene Seen klassifizieren konnten – so wie sie auch einzelne Lebewesen klassifizierten. Der damals führende deutsche Limnologe August Thienemann betrachtete jeden See als einen Organismus höherer Ordnung, und die Seetypen waren für ihn »gewissermaßen die verschiedenen ›Arten‹ der Gattung ›See‹« (Thienemann 1926: 74f.). Vor diesem Hintergrund suchte er nach Mustern, auf deren Grundlage er verschiedene Seen voneinander unterscheiden könnte. Er gelangte schließlich zu dem Schluss, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Seetypen mit dem Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser zusammenhingen (ebd.: 59). Während Thienemann sich vor allem mit den Lebensbedingungen von Organismen beschäftigte, untersuchte Einar Naumann zur selben Zeit die Planktonproduktion in schwedischen Seen. Naumann stellte fest, dass diese eng mit dem Nährstoffgehalt eines Sees zusammenhing. Um diesen Zusammenhang zu beschreiben, wählte er 1919 eine Terminologie, die auf den deutschen Botaniker Carl-August Weber zurückging, der einige Jahre zuvor Pflanzenvereine auf Torfböden charakterisiert hatte, indem er von »eutrophen« (nährstoffreichen), »mesotrophen« (mittelreichen) bzw. »oligotrophen« (nährstoffarmen) Torfschichten sprach (Weber 1907: 25f.).⁵³ Seitdem werden nährstoffreiche Seen als »eutroph«

53 | Thienemann übernahm später Naumanns Terminologie und bezeichnete seinen »baltischen Typus« fortan als »eutrophen Typus« und den »subalpinen Typus« als »oligotrophen Typus« (Thieme 1926: 60).

bezeichnet. Das entscheidende Kriterium für die Zuordnung war zunächst die Algenproduktion eines Sees, da es damals noch nicht möglich war, die Nährstoffkonzentrationen verlässlich zu analysieren (Naumann 1932: 13).

Thienemann ging davon aus, dass Seen einem natürlichen Alterungsprozess unterworfen sind, der dazu führt, dass sie sich auf einen Klimaxzustand hin entwickeln. Am Anfang dieser Entwicklung stand für ihn der oligotrophe Zustand, und er ging davon aus, dass die Seen im Laufe ihrer Alterung immer eutropher würden. Aus dieser Perspektive gab es keine Möglichkeit, etwas gegen die Eutrophierung zu unternehmen.

Bereits wenige Jahre später beobachteten Limnologen, dass in einigen Seen rasante Veränderungen zu verzeichnen waren, die offenkundig mit menschlichen Aktivitäten im Zusammenhang standen:

»Von Hause aus gehört der Zürcher See zweifellos zum oligotrophen Typus. Seit einigen Jahren hat sich aber, Schritt für Schritt verfolgbar, im unteren Teile des Sees der Übergang zum eutrophen Typus vollzogen und heute hat der See [...] vollständig eutrophen Charakter. Als Ursache für diese Veränderung innerhalb weniger Jahrzehnte ist die Verunreinigung des Seewassers und des Seebodens mit organischer Substanz in erheblicher Menge mit leicht faulendem Material, entstammend den Häusern und Industrien der zahlreichen großen Seegemeinden anzusprechen« (Haempel 1930: 68-71).

Damit gab es erste Hinweise auf die Ursachen der Eutrophierung, doch boten sich zunächst noch keine konkreten Handlungsmöglichkeiten, da noch nicht genau bekannt war, auf welche Weise menschliche Eingriffe zur Eutrophierung beitrugen. Während des Zweiten Weltkriegs wurde die Eutrophierung schweizerischer Seen zu einem zunehmend ernsten Problem, welches den Limnologen Eugen Thomas zu systematischen Beobachtungen veranlasste:

»Da nun im Frühjahr die Temperatur, die Belichtung und der Nährstoffgehalt des Oberflächengewässers sehr günstig sind, entwickeln sich die Planktonalgen ins Unermessliche. Etwas später nimmt dank der reichlich vorhandenen Nahrungsalgen auch das Zooplankton stark zu. Bald hat aber die Algenentwicklung ihren Höhepunkt überschritten: gewisse Nährstoffe des Oberflächenwassers sind fast restlos verbraucht, sodass ein großer Teil der Algen gewissermassen den Hungertod erleidet. Die toten Algen sinken in die Tiefe, zersetzen sich und verbrauchen dabei den im Tiefenwasser enthaltenen Sauerstoff. Schon im Juni ist in den drei genannten Seen [Greifensee, Pfäffikersee und Türlersee] das in der Tiefe liegende Wasser für Fische nicht mehr bewohnbar« (Thomas 1944: 162).

Daraus folgerte er, dass nicht einfach diffuse menschliche Aktivitäten als Ursache der anthropogenen Eutrophierung angesehen werden konnten, sondern speziell diejenigen Aktivitäten, die zu einer Erhöhung der Nährstoffbelastung von Oberflächengewässern führten. Thomas konnte daher bereits 1944 eine Reihe von Maßnahmen vorschlagen, zu denen unter anderem die Tiefenwasserableitung⁵⁴ und das Emporsaugen von Tiefenwasser⁵⁵ zählten. Zugleich wies Thomas allerdings auch darauf hin, dass durch diese Maßnahmen nur die Folgen der Eutrophierung bekämpft würden, aber nicht die Ursachen (ebd.: 163f.; 198-200). Zudem war zunächst noch unbekannt, welche Nährstoffe ausschlaggebend waren.

Es lag daher nahe, weitere wissenschaftliche Grundlagen für den Gewässerschutz zu erarbeiten. Thomas tat dies, indem er im Jahre 1953 Wasserproben aus 46 Schweizer Seen entnahm. Er stellte nun fest, dass bei einer Zugabe von Nitrat und Phosphat das Algenwachstum in fast allen Seen deutlich zunahm. Daraus folgte er:

»Aus den dargelegten experimentellen und empirischen Untersuchungen geht hervor, dass in den 46 diskutierten Seen als Minimumstoffe⁵⁶ nur Phosphor und Stickstoff in Betracht kommen. Will man also an einem See die Eutrophierung bekämpfen, so muss man abklären, ob man zweckmäßigerweise die Zufuhr von Phosphor-

54 | Seen sind den größten Teil des Jahres nicht vollkommen durchmischt, sondern geschichtet. Die verschiedenen Wasserschichten weisen daher unterschiedliche Konzentrationen an Sauerstoff und Nährstoffen auf. Das Tiefenwasser weist meist eine deutlich tiefere Sauerstoff- und eine höhere Phosphorkonzentration auf als das Oberflächenwasser. Bei einer Tiefenwasserableitung fließt Wasser nicht länger über den natürlichen Seeabfluss ab (einen Bach oder Fluss), sondern vielmehr durch ein Rohr, das zur tiefsten Stelle des Sees führt. Dieses Rohr mündet am anderen Ende in den Seeabfluss, allerdings unterhalb des Seespiegels. Daher fließt Wasser unter hydrostatischem Druck durch das Rohr, ohne dass Pumpen erforderlich sind. Da das Tiefenwasser mehr Phosphor enthält als das Oberflächenwasser, wird so mehr Phosphor aus dem See exportiert.

55 | Das Emporsaugen von Tiefenwasser hätte dazu geführt, dass sauerstoffhaltiges Oberflächenwasser in die Tiefe des Sees gelangt.

56 | Das Konzept des limitierenden Nährstoffs bzw. Minimumstoffs geht auf Liebig zurück (zu Liebig siehe Kapitel 2.4). Er stellte bereits im 19. Jahrhundert fest, dass das Wachstum von Pflanzen jeweils von der Zugabe desjenigen Nährstoffs abhing, der relativ zu den anderen Nährstoffen am knappsten war. Übertragen auf das Algenwachstum bedeutet dies, dass eine erhöhte Phosphorzufuhr nur dann zu einem vermehrten Algenwachstum führt, wenn Phosphor der limitierende Nährstoff ist. Wenn hingegen das Algenwachstum durch Stickstoff limitiert wird, so bleibt eine weitere Phosphorzufuhr ohne unmittelbare Folgen.

oder von Stickstoffverbindungen verkleinern will. [...] Diese Erkenntnisse erlauben es, das Ziel der Abwasserreinigung inbezug auf die Bekämpfung der Düngerzufuhr für schweizerische Seen maßgebend zu umschreiben. Bei Seen, in denen Phosphat Minimumstoff ist, [...] führt jede vermehrte Phosphatzufuhr zu vermehrter Düngung. Verhindert man diese vermehrte Phosphatzufuhr, so wird man in der Bekämpfung der Eutrophierung sicher Erfolg haben« (Thomas 1953: 77).

Damit war die Grundlage für einen zielgerichteten Gewässerschutz geschaffen: Es ging nun nicht mehr darum, menschliche Aktivitäten pauschal einzuschränken, sondern darum, möglichst wenig Phosphor und Stickstoff in die Gewässer kommen zu lassen. In den 1960er Jahren zeigte sich dann immer deutlicher, dass Phosphor in den meisten Seen der limitierende Nährstoff war. Von besonderer Bedeutung für den praktischen Gewässerschutz war ein Bericht, den der Schweizer Limnologe Richard Vollenweider 1968 im Auftrag der OECD veröffentlichte. Er wertete das damals verfügbare Datenmaterial aus und folgerte, dass Seen mit einem Gesamtphosphorgehalt von mehr als 30 mg/m^3 als eutroph einzustufen seien (Vollenweider 1968).⁵⁷ Auf dieser Grundlage basiert auch die schweizerische Gewässerschutzverordnung von 1975, in der ein Qualitätsziel von 30 mg/m^3 festgehalten wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es den Limnologen innerhalb weniger Jahrzehnte gelang, grundlegendes Wissen zu erarbeiten, welches die theoretische Basis für wirkungsvollen Gewässerschutz lieferte. Dieses Wissen war bereits verfügbar, bevor der Zustand der Gewässer in einer breiten Öffentlichkeit als gravierendes Problem wahrgenommen – und bevor der Zustand des Sempachersees als kritisch angesehen wurde. Das Realexperiment der Seesanierung begann also nicht bei Null, sondern konnte auf gefestigtem Wissen aufbauen. Dazu gehörte, wie im Folgenden gezeigt wird, auch Wissen über Phosphoreinträge.

57 | Vollenweider unterschied zwischen fünf Trophieklassen: ultra-oligotroph (unter 5 mg/m^3), oligo-mesotroph ($5\text{-}10 \text{ mg/m}^3$), meso-eutroph ($10\text{-}30 \text{ mg/m}^3$), eu-polytroph ($30\text{-}100 \text{ mg/m}^3$) und polytroph (über 100 mg/m^3). Diese Klassifikation wird heute meist dahingehend vereinfacht, dass eine Phosphorkonzentration oberhalb von 30 mg/m^3 als »eutroph« und damit als problematisch angesehen wird. Vollenweiders ursprüngliche Klassifikation berücksichtigte neben der Phosphorkonzentration auch die Stickstoffkonzentration (Vollenweider 1968: 18), doch berücksichtigte Vollenweider selbst ab 1976 nur noch die Phosphorkonzentration (Vollenweider 1976: 59).

Phosphoreinträge: Vom Feldboden zu Glaskügelchen und wieder zurück

Will man den Phosphorgehalt in einem See reduzieren, so gilt es, entweder die Phosphoreinträge in den See zu reduzieren oder aber die Austräge von Phosphor zu erhöhen. Während im vorhergehenden Abschnitt »Von der Seenalterung zur Eutrophierung« gezeigt wurde, wie das Wissen über die Wachstumsdynamik von Algen im Laufe der Zeit zunahm, war es beim Wissen über den Phosphortransport in Böden eher umgekehrt: Hier geriet wertvolles Wissen in Vergessenheit.

Im 19. Jahrhundert beschäftigten sich englische Agronomen mit dem Problem der Phosphorauswaschung aus Böden, da Phosphor damals ein wertvoller Dünger war, dessen Verluste möglichst minimiert werden sollten. Lawes, Gilbert und Warington untersuchten vor diesem Hintergrund 1882 die Infiltration von Wasser in Böden und berücksichtigten dabei die Tatsache, dass ein Boden nicht homogen aus kleinen Poren zwischen den Bodenteilchen besteht, sondern auch aus größeren Kanälen, die heute als »Makroporen«⁵⁸ bezeichnet werden. Aus ihrer Beschreibung geht klar hervor, dass Oberflächenwasser nach heftigen Regenfällen über Makroporen in den Boden eindringt (Lawes et al. 1882: 15). Voelcker (1874: 153), auf dessen Resultate sich Lawes und seine Kollegen stützten, hatte beobachtet, dass der Wasserdurchfluss in Drainagerohren nach Regenfällen innerhalb kurzer Zeit stark zunahm. Die dabei beobachteten Phosphorkonzentrationen lagen – umgerechnet in heutige Einheiten – bei etwa 300 mg/m³ (Lawes et al. 1882: 24), also gut zehnmal höher als das Qualitätsziel der schweizerischen Gewässerschutzverordnung von 1975.

Da das Problem der Eutrophierung zu Lawes Lebzeiten noch nicht bekannt war, konnten er und seine Kollegen die Phosphorauswaschung auch nicht aus limnologischer Perspektive beurteilen. Auch zu dieser Frage bestand jedoch spätestens seit den 1950er Jahren fundiertes Wissen, als der deutsche Limnologe Waldemar Ohle sich mit den Ursachen der raschen Eutrophierung holsteinischer Seen beschäftigte. Ohle (1953) stellte fest, dass dabei ein enger zeitlicher Zusammenhang mit der vermehrten Verwendung von Mineraldüngern bestand. Aus bereits damals publizierten Untersuchungen folgerte Ohle, dass die Phosphorkonzentration von Drainagewässern häufig zwischen 200 und 500 mg/m³ lag. Er beurteilte diese Konzentrationen aus landwirtschaftlicher Sicht als unbedeutend, aus limnologischer Sicht hingegen als problematisch. Auch spätere Studien stellten

58 | Makroporen resultieren u.a. aus Regenwurmgängen und Wurzelkanälen. In tonreichen Böden bilden sich zudem Schwundrisse, wenn diese Böden austrocknen.

Phosphorkonzentrationen in Drainagewässern fest, die zwischen 12 und 440 mg/m³ lagen (Ryden et al. 1973: 31). Vor diesem Hintergrund hätte man Anfang der 1970er Jahre – in Verbindung mit den Erkenntnissen von Lawes und seinen Kollegen – davon ausgehen können, dass nach heftigen Regenfällen große Phosphormengen über Drainagerohre in Oberflächenwässer gelangen können.

Das Gegenteil war jedoch der Fall: In der wichtigsten schweizerischen Arbeit zu dieser Thematik hielten Furrer und Gächter (1972: 81) fest:

»Es darf die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Boden eine wirksame Barriere gegen P-Verluste durch Auswaschung darstellt; auch intensive P-Düngung erhöht diese Verluste kaum. Dagegen bleibt die Möglichkeit, dass wesentliche P-Mengen durch oberflächlichen Abfluss (run off, Erosion) in die Gewässer gelangen (Wegschwemmung löslichen Düngers kurz nach dem Ausbringen, Wegschwemmung von Erde von der obersten, mit P angereicherten Bodenschicht).«

Diese rückblickend überraschend anmutende Schlussfolgerung basierte auf scheinbar soliden Grundlagen. Ab etwa 1960 beschäftigten sich Bodenkundler mit der mathematischen Beschreibung von Stofftransportprozessen in Böden. Dabei verwendeten sie Methoden, die aus dem Bereich des Chemie-Ingenieurwesens stammten. Die experimentell gewonnenen Daten, auf deren Grundlage die Modellierung erfolgte, sollten reproduzierbar sein. Daher wurden nicht natürliche Böden verwendet, sondern künstliche »Böden« aus Latexkugelchen oder getrocknetem und gesiebtem Sand eingesetzt. Diese Materialien weisen keine Makroporen auf, sondern nur Poren von relativ einheitlicher Größe. Für solche Böden wurden mathematische Beschreibungen entwickelt, die davon ausgehen, dass Wasser im Boden homogen infiltriert, sich also mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit überall im Boden verteilt. Eine gewisse Streuung der Geschwindigkeiten ergibt sich lediglich dadurch, dass Wasser in der Mitte einer Pore schneller fließt als am Porenrand, und dass Wasser in den etwas größeren Poren schneller fließt als in den etwas kleineren.

Auf dieser Annahme basiert die Konvektions-Dispersions-Gleichung, das gängigste mathematische Modell für Stofftransport in Böden (Nielsen/Biggar 1961), die zunächst für Stoffe entwickelt wurde, die kaum an die Oberflächen von Bodenteilchen gebunden werden und sich somit ähnlich wie Wasser bewegen. Substanzen wie Schwermetalle oder Phosphor werden jedoch an Bodenteilchen gebunden, was dazu führt, dass sich immer nur ein geringer Anteil der Substanz in der wässrigen Lösung befindet. Daher bewegen sich diese Stoffe in einem geschütteten Sandhaufen deutlich langsamer als gut lösliche Stoffe wie z.B. Chlorid-Ionen. In einer abgewandelten Form der Advektions-Dispersions-Gleichung wird dies berücksich-

tigt, indem ein so genannter Retardationskoeffizient eingeführt wird, der beschreibt, um wie viel langsamer sich ein Stoff relativ zu Wasser im Boden bewegt. Für Phosphor liegt der Retardationskoeffizient bei etwa 400 (Stamm 1997: 8). Daraus lässt sich abschätzen, dass Phosphor in 100 Jahren nur etwa 40 cm tief in einen typischen Boden eindringt, während Drainagerohre meist in einer Tiefe von 1 m verlegt werden. Daher ergibt sich die theoretisch fundierte Schlussfolgerung, dass praktisch kein Phosphor in Drainagerohre gelangen kann.

Von solchen Überlegungen ging auch Otto Furrer aus, als er 1972 mit René Gächter das damals für die Schweiz verfügbare Datenmaterial zusammenstellte. Er konnte sich dabei auf verschiedene Datensätze stützen, die im Einklang mit der damals gängigen bodenkundlichen Theorie waren. Beobachtungen an der landwirtschaftlichen Versuchsanstalt im englischen Rothamsted deuteten darauf hin, dass die Phosphorkonzentrationen in 40 cm Tiefe auf einem ungedüngten Standort etwa gleich groß sind wie auf einem seit 100 Jahren gedüngten Standort (Furrer 1978). Untersuchungen über den Verlauf der Phosphorkonzentration mit der Bodentiefe zeigten eindeutig auf, dass die Phosphorkonzentration in der Nähe der Bodenoberfläche am größten ist und anschließend rapide abnimmt (vgl. Schwertmann 1973: 191; Furrer 1978: 39f.). Vor diesem Hintergrund folgerte Furrer (1978: 40f.) schlüssig:

»Dank des starken Adsorptionsvermögens unserer Böden wird das Düngerphosphat 100 Prozentig vor der Auswaschung geschützt. [...] Der Anteil der Landwirtschaft an der P-Belastung der Gewässer wird oft zu hoch eingeschätzt, indem sämtliche natürliche Quellen der Landwirtschaft angelastet werden. [...] Es darf mit Sicherheit angenommen werden, dass der Beitrag der Landwirtschaft an der gesamten P-Belastung der Gewässer unter 10 % liegt.«

Daher empfahl Furrer, alle Aufmerksamkeit darauf zu lenken, Phosphorverluste aufgrund von Erosion und Oberflächenabfluss⁵⁹ zu vermeiden. Er wies allerdings auch darauf hin, dass eine Überdüngung zu unterlassen sei und dass die Tierbestände auf ein vernünftiges Maß beschränkt werden müssten (ebd.: 49). Diese Empfehlungen entsprachen dem Wissen, von dem Schweizer Gewässerschutzexperten in den 1970er Jahren ausgingen. Es basierte auf ›modernen‹ theoretischen Überlegungen und entsprach dem aktuellen Stand des internationalen bodenkundlichen Wissens über

59 | Hydrologen sprechen von Oberflächenabfluss, wenn Wasser entlang der Bodenoberfläche talwärts fließt, ohne in den Boden zu infiltrieren. Dies ist in der Regel nur bei starken Niederschlägen der Fall, wenn die Böden kein Wasser mehr aufnehmen können.

Stofftransporte. Wissen, welches in der Tradition von Lawes und Ohle erarbeitet worden war, wurde dabei nicht berücksichtigt. Dementsprechend ging man in den 1970er Jahren davon aus, dass Phosphor vor allem durch Abwassereinleitungen in Seen gelangte, und dass Phosphor aus der Landwirtschaft nur durch Oberflächenabfluss und Erosion in Oberflächengewässer gelangen konnte. Da Oberflächenabfluss und Erosion kaum vermieden werden können, bestand der nahe liegende Ansatzpunkt darin, den Schwerpunkt auf die Entfernung von Phosphor aus dem Abwasser zu legen und Kläranlagen zu bauen.

Phosphor-Rücklösung im Wasserglas und in der Wahnbachtalsperre

Die Entwicklung des Nährstoffgehalts eines Sees hängt, wie bereits erwähnt, stark von den Einträgen und den Austrägen ab. Da Phosphor stark an Partikel gebunden wird, muss jedoch noch ein weiterer Prozess berücksichtigt werden: die Sedimentation von Phosphor. In einem See sterben kontinuierlich Algen ab. Die toten Algen werden zersetzt und sinken ins Sediment des Sees ab. Auf diese Weise wächst das Sediment kontinuierlich Schicht um Schicht. Phosphor wird dabei an sedimentierende Partikel gebunden und ins Sediment eingelagert. Vielen Seen wird durch die Sedimentation mehr Phosphor entzogen als über den Abfluss, sodass dem Prozess der Sedimentation für die Phosphorbilanz eines Sees eine zentrale Rolle zukommt.

Die Grundlagen für das Verständnis der Phosphor-Sedimentation wurden in den 1930er Jahren erarbeitet, als der deutsche Limnologe Wilhelm Einsele Wasserproben aus dem Schleinsee untersuchte. Er untersuchte Proben aus dem See und wiederholte dann aus nicht bekanntem Grund die Messungen nach einigen Tagen, während derer die Proben in offenen Flaschen im Labor gestanden hatten. Zu seiner großen Überraschung stellte er fest, dass die Phosphorkonzentration innerhalb weniger Tage von 350 mg/m^3 auf weniger als 100 mg/m^3 abgesunken war. Dieser Befund schien zunächst dem Gesetz der Massenerhaltung zu widersprechen.

Dennoch nahm Einsele seine Ergebnisse ernst und begann nach der Ursache zu suchen. Ihn interessierte insbesondere die Frage, ob sich im See ähnliche Schwankungen des Phosphorgehalts beobachten ließen. Darauf beobachtete er die Konzentrationen gelöster Stoffe in verschiedenen Tiefen des Sees. Er stellte fest, dass sowohl die Konzentration von Phosphor als auch die Konzentration von Eisen mit zunehmender Seetiefe sprunghaft zunahm: während noch in 8 m Tiefe mit den damaligen analytischen Techniken kein Phosphor nachweisbar war, fand Einsele in 9 m Tiefe eine Phosphorkonzentration von 60 mg/m^3 und am Seeboden in knapp 11 m ei-

ne Konzentration von 330 mg/m³. Dasselbe Muster ergab sich für Eisen: hier stieg die Konzentration von 500 mg/m³ in 9 m Tiefe auf 1800 mg/m³ in 11 m Tiefe (Einsele 1936: 664, Tab. 1).

Einsele konnte sich den Zusammenhang zwischen Eisen- und Phosphorkonzentration zunächst nicht erklären. Weitere Beobachtungen ergaben, dass sowohl die Eisen- als auch die Phosphorkonzentration schlagartig zurückgingen, als am Ende der so genannten Sommerstagnation der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser abrupt anstieg.⁶⁰ Einsele erklärte sich diesen Befund damit, dass das im Sediment enthaltene Eisen in reduzierter Form vorliegt, solange das Sediment (und damit das Tiefenwasser) keinen Sauerstoff enthalten.⁶¹ Da reduziertes Eisen wasserlöslich ist, reichert es sich im Tiefenwasser an. Sobald jedoch Sauerstoff in die Tiefe gelangt, wird das Eisen oxidiert. Oxidiertes Eisen ist nicht wasserlöslich und sinkt ins Sediment ab. Gleichzeitig kann oxidiertes Eisen sehr viel mehr Phosphor binden als reduziertes Eisen. Phosphor sinkt daher mit dem oxidierten Eisen ins Sediment ab und wird so aus der Wassersäule entfernt (ebd.: 666f.).

Wenige Jahre später erweiterte der britische Limnologe Clifford Mortimer (1941, 1942) das Wissen über die Vorgänge an der Sediment-Wasser-Grenzfläche, indem er Verfahren entwickelte, um die Stoffkonzentrationen nicht nur im Tiefenwasser zu bestimmen, sondern auch im Sediment.⁶² Zudem untersuchte er Sedimentproben im Labor und erfasste mit Hilfe von Elektroden das Redoxpotential⁶³ in verschiedenen Tiefen des Sediments. Er verglich dabei ein luftdicht abgeschlossenes Gefäß mit einem offenen Gefäß und bestimmte die Rate, mit der Eisen und Phosphor aus dem Sediment freigesetzt wurden. Wie aufgrund von Einseles Befunden zu erwarten war, stellte Mortimer fest, dass die Konzentration von Phosphor und Eisen im luftdichten Gefäß rapide anstieg, sobald der Sauerstoff im Sediment aufgebraucht worden war. Im offenen Gefäß blieb die Sedimentoberfläche hingegen oxidiert, und Mortimer beobachtete keine signifikante Freisetzung von Eisen und Phosphor (Mortimer 1941: 322f.). Aus der Einsele-Mortimer-Theorie ging hervor, dass die Phosphor-Rücklösung aus dem

60 | Während der Herbstzirkulation kühlt das Oberflächenwasser stark ab, so dass es zu einer vertikalen Durchmischung kommt. Sauerstoffreiches Oberflächenwasser wird dann mit dem Tiefenwasser durchmischt.

61 | Während des Sommers sinkt die Sauerstoffkonzentration im Sediment ab, da Sauerstoff bei der Zersetzung von Algen aufgebraucht wird. Dies ist der umgekehrte Prozess der Photosynthese, bei der Sauerstoff gebildet wird.

62 | Einsele war noch daran gescheitert, dass Seesediment zu 97 Prozent aus Wasser besteht und daher nicht ›fassbar‹ ist (Einsele 1936: 669).

63 | Das Redoxpotential gibt Aufschluss darüber, inwiefern oxidierende (sauerstoffreiche) oder reduzierende (sauerstofffreie) Verhältnisse vorliegen.

Sediment massiv höher ist, wenn im Sediment sauerstofffreie Bedingungen herrschen. Will man verhindern, dass ein Großteil des ursprünglich sedimentierten Phosphors rückgelöst wird, so liegt der Versuch nahe, im Sediment sauerstoffreiche Verhältnisse sicherzustellen. Auf dieser Grundlage basierte ein Belüftungsexperiment, welches in der Wahnbachtalsperre durchgeführt wurde. Bereits ein Jahr nach der Inbetriebnahme der Talsperre hatte sich gezeigt, dass im Tiefenwasser der Talsperre kaum Sauerstoff enthalten war. Dies führte dazu, dass wasserlösliches reduziertes Mangan aus dem Sediment freigesetzt wurde, was die Trinkwasseraufbereitung massiv erschwerte. Beobachtungen in der Wahnbachtalsperre deuteten wie erwartet darauf hin, dass die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser durch die Belüftung massiv erhöht werden konnte, und dass zeitgleich die Phosphor- und Mangankonzentrationen im Wasser deutlich abnahmen (Bernhardt/Hötter 1967: 411f.; 424f.). Daraus folgerten die Betreiber der Talsperre, dass die Belüftung eine wirkungsvolle Maßnahme zur Bekämpfung der Eutrophierung sei.

6.2 Vom Computermodell zur Seenbelüftung: Die Sanierung des Sempachersees

Fasst man die drei oben beschriebenen Wissensaspekte zusammen, so ergab sich um 1970 die folgende Situation: Es war bekannt, dass die Eutrophierung von Gewässern ein gesellschaftlich relevantes Problem sein kann. Als erstrebenswert wurde eine Phosphorkonzentration von höchstens 30 mg/m³ angesehen. Phosphoreinträge aus landwirtschaftlichen Quellen erschienen vernachlässigbar, sodass der Phosphoreintrag über das Abwasser als wichtigster Eintragsmechanismus angesehen werden musste. Sollte die Phosphorkonzentration trotz Gewässerschutzmaßnahmen massiv zu hoch sein, so erschien eine Belüftung als geeignete Lösung, um den Zustand eines Sees zu verbessern.

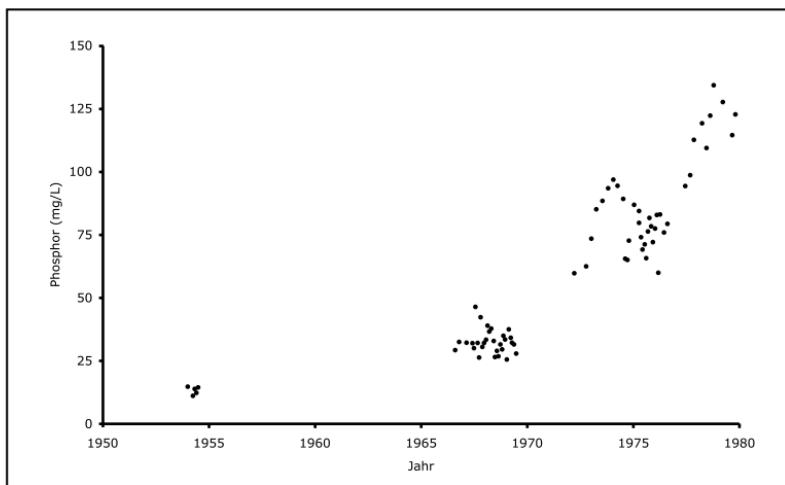
Bereits 1954 wurden der Sempachersee und seine Zuflüsse von Eugen Thomas monatlich untersucht. Die Phosphoreinträge lagen damals in der Größenordnung von vier Tonnen pro Jahr (AfU 1999: 56), und die Phosphorkonzentration⁶⁴ lag unter 15 mg/m³. 1959 wurde im Kanton Luzern das Amt für Gewässerschutz gegründet, das zwischen 1966 und 1967 eine zweite Serie von Zuflussuntersuchungen durchführte (Gächter/Stadelmann 1993: 344). Zu dieser Zeit waren die Phosphoreinträge auf etwa 10 Tonnen

64 | Die im Folgenden genannten Phosphorkonzentrationen basieren auf unveröffentlichten Daten der EAWAG bzw. des Luzerner Amts für Umweltschutz.

pro Jahr angestiegen, und die Konzentration im See lag im Bereich der als kritisch erachteten 30 mg/m^3 .

Damit war klar, dass etwas getan werden musste, um einem weiteren Fortschreiten der Eutrophierung vorzubeugen. Da um dieselbe Zeit in der Schweiz erste Kläranlagen gebaut wurden, lag es nahe, in den Einzugsgebieten eutrophierter Seen zunächst einmal Kläranlagen in Betrieb zu nehmen. Der Bau von Kläranlagen konnte 1975 als weitgehend abgeschlossen angesehen werden (Interview Pius Stadelmann, November 1998).

Abb. 6.1: Verlauf der Phosphorkonzentration des Sempachersees bis 1980



Quelle: unveröffentlichte Daten der EAWAG

Es wäre daher zu erwarten gewesen, dass eine deutliche Reduktion der Phosphoreinträge auch zu einer deutlichen Abnahme der Phosphorkonzentrationen im Sempachersee führt. Beobachtet wurde jedoch das Gegenteil: zwischen 1970 und 1975 nahm die Phosphorkonzentration im Sempachersee massiv zu, auf nahezu 100 mg/m^3 (vgl. Abb. 6.1). Diese Entwicklung war für das Gewässerschutzamt alarmierend, da sie zeigte, dass der zweifelsfrei sinnvolle Bau von Kläranlagen nicht ausreichte, um das Problem der Eutrophierung in den Griff zu bekommen.

Die EAWAG-Gutachten

Wegen des alarmierenden Zustands beauftragte der zuständige Luzerner Regierungsrat Krummenacher im Mai 1976 die »Eidgenössische Anstalt für

Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz» (EAWAG) mit einem Gutachten, um mögliche Maßnahmen zur Sanierung der Seen zu erarbeiten. Zwischen 1976 und 1979 arbeiteten die Experten der EAWAG an parallelen Gutachten über die Sanierung des Baldegggersees, des Hallwilersees und des Sempachersees. Sie stützten sich dabei einerseits auf das bestehende Wissen über landwirtschaftliche Phosphoreinträge, Seebelüftung und Phosphor-Rücklösung, erhoben andererseits aber auch zusätzliche Daten.

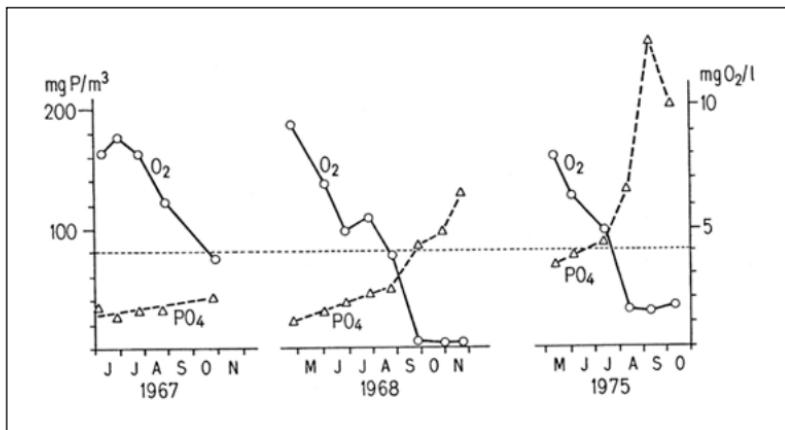
Im Gegensatz zu den Betreibern der Wahnbachtalsperre ging das EAWAG-Team nicht mehr davon aus, dass die Phosphor-Rücklösung ganz unterbunden werden könnte, wenn es gelänge, die Sedimentoberfläche in einem oxidierten Zustand zu erhalten. Verschiedene Studien, die in den 1970er Jahren durchgeführt worden waren, deuteten darauf hin, dass auch unter so genannten aeroben⁶⁵ Bedingungen eine signifikante Rücklösung zu erwarten war (vgl. Lee et al. 1977). Daher konnte nicht mehr damit gerechnet werden, mit Hilfe einer Belüftungsanlage innerhalb kurzer Zeit das angestrebte Qualitätsziel von 30 mg/m³ zu erreichen. Erforderlich war es vielmehr, verschiedene mögliche Strategien auf ihre Wirksamkeit hin zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde ein mathematisches Seemodell entwickelt, welches die Auswirkungen verschiedener Szenarien auf den Sauerstoff- und Phosphorhaushalt des Sees berechnete.

Ähnlich wie Einsele und die Betreiber der Wahnbachtalsperre untersuchte auch das EAWAG-Team den zeitlichen Verlauf der Phosphor- und Sauerstoffkonzentrationen am Seegrund, allerdings aus einer anderen Perspektive: Es ging jetzt nicht mehr um die Frage, *ob* die Rücklösung bei hoherem Sauerstoffgehalt geringer ist, sondern in erster Linie darum festzustellen, *unterhalb welcher* Sauerstoffkonzentration die anaerobe Rücklösung einsetzt. Diese Frage war von zentraler Bedeutung, weil das verwendete Seemodell auf dem Konzept einer kritischen Sauerstoffkonzentration beruhte.

Ausgewertet wurden die Konzentrationsverläufe für die Jahre 1967, 1968 und 1975. Dabei zeigte sich wie bei Einseles klassischen Beobachtungen, dass der Phosphorgehalt mit sinkendem Sauerstoffgehalt anstieg (Abb. 6.2).

65 | *Aerobe* Bedingungen herrschen vor, wenn Sauerstoff vorhanden ist. Im umgekehrten Fall spricht man von *anaeroben* Bedingungen. Unter aeroben Bedingungen liegt Eisen im Sediment in seiner oxidierten Form vor, sodass die Rückhaltekapazität für Phosphor höher ist als unter anaeroben Bedingungen, wenn Eisen in der reduzierten Form vorliegt.

Abb. 6.2: Phosphor- und Sauerstoffkonzentrationen an der tiefsten Stelle des Sempachersees



Quelle: EAWAG 1979: 35

Das EAWAG-Team folgerte aus diesen Daten, »dass die Freisetzung von Orthophosphat⁶⁶ an der Sedimentoberfläche erst dann massiv einsetzt, wenn die Sauerstoffkonzentration in 85 m Tiefe unter 4 mg O₂/l absinkt« (EAWAG 1979: 35).

Ähnlich wie Mortimer (vgl. Kap. 6.1, S. 145) führten die EAWAG-Mitarbeiter zudem Experimente mit Sedimentkernen durch. Mortimers Befunde konnten dabei bestätigt werden: Die Rücklösungsrate war unter aeroben Bedingungen deutlich kleiner als unter anaeroben Bedingungen. Entsprechend wurden die Befunde ebenso wie die Konzentrationsprofile (Abb. 6.2) als Indiz dafür interpretiert, dass eine Belüftung auch im Sempachersee erfolgreich sein würde (Interview René Gächter, Juni 1998).

Auf der Grundlage von Sedimentkerntests konnte allerdings noch nicht der Nachweis erbracht werden, dass die beobachteten Prozesse am gesamten Seegrund so abliefen. Es erschien daher sinnvoll, anhand von Massenbilanzrechnungen⁶⁷ zu untersuchen, wie hoch die Phosphor-Sedimentation im gesamten See sei. Dabei wurden die neuesten Ergebnisse

66 | Orthophosphat ist ein Sammelbegriff für verschiedene Phosphorformen.

67 | Die Phosphormenge im See sowie die Größe der Einträge und Austräge können direkt gemessen werden; die sedimentierte Menge kann dagegen mit Hilfe von Massenbilanzrechnungen indirekt abgeschätzt werden. Bei solchen Massenbilanzrechnungen wird angenommen, dass die Veränderung der Phosphormenge im See aus den drei Prozessen Einträge, Austräge und Sedimentation resultiert.

der Zuflussuntersuchungen verwendet, die im Rahmen der Arbeiten für das Gutachten durchgeführt worden waren und die darauf hindeuteten, dass die Einträge mittlerweile auf etwa 15 Tonnen pro Jahr angestiegen waren (AfU 1999: 56) – also gegenüber der Periode 1966/67 um etwa 50 Prozent zugenommen hatten. Aus den Berechnungen⁶⁸ ging hervor, dass die Phosphorsedimentation in den 1960er Jahren am höchsten war, also zu einem Zeitpunkt, als die Sauerstoffversorgung des Sediments vermutlich noch recht gut war. Auch diese Resultate wurden als Indiz dafür interpretiert, dass die Phosphor-Rücklösung im Sempachersee von den Sauerstoffbedingungen an der Sedimentoberfläche abhängt, da andernfalls zu erwarten gewesen wäre, dass die Sedimentation mit steigendem Phosphorgehalt des Sees zunimmt (EAWAG 1979: 32).

Aus der Sicht des EAWAG-Teams deutete nun alles darauf hin, dass die bestehenden Theorien auch auf den Sempachersee anwendbar wären. Damit erschien es auch möglich, auf der Grundlage eines mathematischen Modells zu prognostizieren, wie sich der Zustand des Sees aufgrund verschiedener Maßnahmen verändern würde. Wie das EAWAG-Team beschrieb, wurde zunächst das Modell an die Messdaten angepasst und für zuverlässig erachtet (ebd.: 42). Anschließend wurde auf der Grundlage des Modells abgeschätzt, auf welchem Niveau sich die Phosphorkonzentration im See eingependeln würde, falls die Einträge gleich hoch blieben. In diesem Fall wäre bei etwa 300 mg/m³ ein Gleichgewicht zu erwarten gewesen (ebd.: 45) – also bei einer Konzentration, die zehnmal höher war als das angestrebte Qualitätsziel. Das EAWAG-Team schloss daraus auf einen dringenden Handlungsbedarf:

»Aufgrund dieser [...] Prognosen [...] muss gefolgert werden, dass sich der Zustand des Sees rasch weiter verschlechtern wird, wenn nicht sofort die Phosphorbelastung reduziert werden kann, und/oder seinterne Massnahmen ergriffen werden, welche den P-Export (z.B. Tiefenwasserableitung) oder den P-Einbau in die Sedimente (z.B. Belüftung) erhöhen« (EAWAG 1979: 46).

Vor diesem Hintergrund wurden Maßnahmen gesucht, auf deren Grundlage es realistisch erschien, innerhalb von zehn Jahren die Phosphorkonzentration auf maximal 20 bis 30 mg/m³ zu reduzieren und gleichzeitig die Sauerstoffkonzentration überall im See ganzjährig auf mindestens 4 mg/l

68 | Die Berechnungen sind insofern problematisch, als die meisten Datenpunkte auf sehr groben Schätzungen basierten. Messdaten lagen nur für die Jahre 1954, 1967, 1970, 1975 und 1976/77 vor. Für die übrigen Jahre wurden interpolierte Daten verwandt.

zu stabilisieren (ebd.: 48f.). Auf der Grundlage des Seemodells wurden daher verschiedene Varianten von Einzelmaßnahmen durchgerechnet:

- Eine Halbierung der Einträge: In diesem Fall wäre die Phosphorkonzentration im See kaum reduziert worden. Selbst bei einer Reduktion der Einträge um drei Viertel wäre das angestrebte Ziel erst nach 20 Jahren erreichbar gewesen. Aus diesem Befund wurde gefolgert, dass der See mit einer Reduktion der Einträge allein nicht saniert werden könnte, dass aber trotzdem mit allen Mitteln versucht werden solle, die Phosphorbelastung so rasch wie möglich zu reduzieren (ebd.: 48f.).
- Eine Tiefenwasserableitung: Selbst unter optimistischen Annahmen hätte eine Tiefenwasserableitung bei gleich bleibenden Einträgen nicht verhindert, dass die Phosphorkonzentration weiter geringfügig ansteigt (ebd.: 49-53).
- Eine Belüftung des Tiefenwassers, wie zum Beispiel bei der Wahnbachtalsperre (vgl. Kap. 6.1, S. 146): Bei dieser Maßnahme wäre bei gleich bleibenden Einträgen mit einer geringfügigen Abnahme der Phosphorkonzentration zu rechnen, doch wäre die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser weiterhin zu stark abgesunken (ebd.: 54f.).

Somit ergab sich als ernüchternde Schlussfolgerung, dass keine der Maßnahmen für sich allein genommen ausgereicht hätte, um die angestrebten Ziele zu erreichen, obwohl die Berechnungen jeweils auf ausgesprochen optimistischen Annahmen basierten (ebd.: 57). Selbst die >see-interne Maximalvariante<, bei der eine Belüftung mit einer Tiefenwasserableitung kombiniert worden wäre, hätte lediglich zu einem Absinken der Phosphorkonzentration auf etwa 60 mg/m³ geführt. Daraus folgerte das EAWAG-Team, »dass mit seeinternen Maßnahmen allein das Sanierungsziel nicht erreicht werden kann, wenn nicht gleichzeitig die externe Phosphorbelastung des Sees entscheidend vermindert wird« (ebd.: 58).

Deutliche Verbesserungen erschienen jedoch realistisch, wenn see-interne Maßnahmen mit einer Halbierung der Einträge verbunden wurden. Im Fall einer Tiefenwasserableitung wäre innerhalb von zehn Jahren mit einem Absinken der Phosphorkonzentration auf 50 mg/m³ zu rechnen gewesen. Wäre stattdessen eine Belüftung verwendet worden, so wäre die Phosphorkonzentration laut Modell sogar noch etwas stärker zurückgegangen (ebd.: 58-60). Daher folgerte das EAWAG-Team, dass see-interne Maßnahmen mit einer deutlichen Reduktion der Phosphoreinträge verbunden werden müssten (ebd.: 42-64).

Gewässerschutz in den 1980er Jahren

Als Reaktion auf das EAWAG-Gutachten schrieben die Kantone Luzern und Aargau am 1. Mai 1980 einen Projektwettbewerb aus, in dem Vorschläge für die Sanierung des Sempachersees, des Hallwilersees und des Baldegggersees erarbeitet werden sollten. Aus elf eingereichten Projekten wurden für den Sempachersee zunächst zwei Projekte ausgewählt: eines auf der Grundlage einer Tiefenwasserableitung, und eines, bei dem eine Belüftung mit einer Zwangszirkulation verbunden wurde (Zimmermann/Knoepfel 1987: 51). Da der Abfluss des Baldegggersees in den Hallwilersee mündet, kam für den besonders stark eutrophierten Baldegggersee eine Tiefenwasserableitung nicht in Frage (Interview Pius Stadelmann, November 1998).⁶⁹ Im Baldegggersee wurde daher bereits 1982 eine Anlage des Typs »Tanytar-sus« installiert. Dieses System verbindet eine Belüftung mit einer Zwangszirkulation: Im Sommer werden vom Seegrund aus feine Blasen reinen Sauerstoffs in den See eingeblasen, die nur bis in eine gewisse Distanz aufsteigen und so dafür sorgen, dass der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers ansteigt. Im Winter werden hingegen große Luftblasen in den See eingeblasen, die bis zur Wasseroberfläche aufsteigen und die so vertikale Durchmischung des Sees unterstützen, sodass sauerstoffreiches Oberflächenwasser in die Tiefe gelangt (Gächter/Wehrli 1998).⁷⁰

Die Erfahrungen mit der Belüftung des Baldegggersees deuteten zunächst darauf hin, dass der Phosphorgehalt des Sees nach Beginn der Belüftung deutlich rascher abnahm als zuvor. Imboden (1985) folgerte, dass dies vermutlich darauf zurückzuführen sei, dass der Phosphor-Rückhalt im Sediment von etwa drei Tonnen jährlich auf etwa neun Tonnen jährlich zugenommen habe. Da der Sempachersee dem Baldegggersee bezüglich Tiefe, Größe des Einzugsgebiets und Windexposition stark ähnelt, bestand kein

69 | In diesem Fall wäre das phosphorhaltige Tiefenwasser des Baldegggersees direkt in den Hallwilersee weitergeleitet worden.

70 | Im Sommer ist eine vertikale Durchmischung des Sees unerwünscht, weil andernfalls Phosphor aus dem Tiefenwasser ins Oberflächenwasser gelangen und dort das Algenwachstum zusätzlich ankurbeln würde. Reiner Sauerstoff ist zwar deutlich teurer als Luft. Wäre jedoch stattdessen Luft verwendet worden, so hätte sehr viel mehr Gas in den See eingeblasen werden müssen, und es hätte die Gefahr einer Gasübersättigung bestanden, die bei Fischen das so genannte »Gasblasensyndrom« hervorrufen kann (EAWAG 1996: 15ff.). Beim Gasblasensyndrom reichert sich das Gewebe von Fischen mit gelöstem Gas an, bis es schließlich zu tödlichen Embolien kommt. Eine Gasübersättigung tritt vor allem im Frühjahr ein, wenn bei starkem Algenwachstum in oberflächennahen Wasserschichten große Mengen an Sauerstoff durch Photosynthese freigesetzt werden.

Grund, an der Wirksamkeit einer Belüftung des Sempachersees zu zweifeln (Telefongespräch mit Heinrich Bührer, April 1999).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl der Sanierungsmaßnahmen hatte eine öffentliche Anhörung, an der auch die Bevölkerung beteiligt wurde (Zimmermann und Knoepfel 1987: 51). Dabei bezog ein Berufsfischer dezidiert Stellung gegen eine Tiefenwasserableitung (Interview René Gächter, Juni 1998; Interview Pius Stadelmann, November 1998).⁷¹ Er argumentierte, der See brauche keinen »künstlichen Darmausgang«, da er viele Jahrhunderte zuvor auch ohne einen solchen in gutem Zustand geblieben sei. Vor allem aber wehrte er sich dagegen, dass das Wasser im Seeabfluss bei einer Tiefenwasserableitung im Sommer 4 Grad kalt gewesen wäre, und argumentierte, dass dann die Pappeln am Ufer des Baches eingehen würden, wenn ihre Wurzeln mit kaltem Wasser umspült werden.

Vor diesem Hintergrund fiel schließlich die Entscheidung für das Belüftungssystem »Tanytarsus«. Im November 1983 wurde der »Gemeindeverband Sempachersee« gegründet, dem die Anliegergemeinden des Sees angehören. Der Verband ist seither Träger der Belüftungsanlage, die im Juli 1984 in Betrieb genommen wurde, und setzt sich zugleich für see-externe Maßnahmen ein (Zimmermann/Knoepfel 1987: 51).

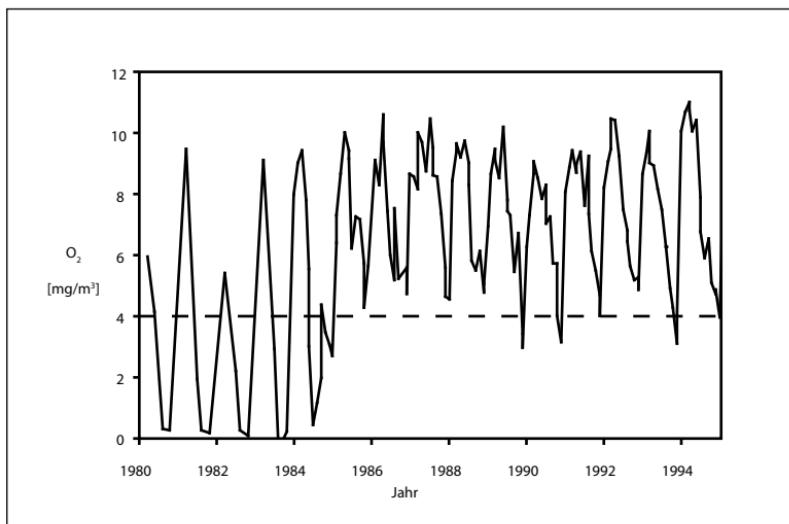
Seit Inbetriebnahme der Belüftungsanlage führt die EAWAG im Auftrag des Luzerner Umweltschutzamtes regelmäßige Beobachtungen der Sauerstoff- und Phosphatkonzentrationen durch. Vor allem in den ersten Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage verfasste die EAWAG zudem ausführliche jährliche Berichte über den Stand der Seesanierung. Damit war sichergestellt, dass mögliche Veränderungen des Seezustands rasch identifiziert werden konnten. In erster Linie sollten damit ein störungsfreier Betrieb sichergestellt und Optimierungen des Belüftungsmodus ermöglicht werden. Am Erfolg der Belüftung wurde nicht gezweifelt, sodass die Datenerhebung nicht in erster Linie darauf ausgerichtet war, die Wirksamkeit zu überprüfen (Gespräch mit Pius Stadelmann, Januar 1998). Zwischen 1979 und 1984 wurden daher keine Zuflussuntersuchungen durchgeführt, die erforderlich gewesen wären, um Massenbilanzrechnungen für den unbelüfteten See zu erstellen.

Ein wichtiges Ziel der Belüftung bestand darin, die Sauerstoffkonzent-

71 | Gächter (Interview, Juni 1998) sieht beim Fischer in erster Linie ein eignen-nütziges Motiv für den Widerstand: Der Fischer betrieb eine Brutanstalt und war daher darauf angewiesen, Plankton zu fangen. Da er sein Haus am Ausfluss des Sees hatte, konnte er sein Netz einfach in den Bach hängen. Bei einer Tiefenwasserableitung wäre dies nicht mehr möglich gewesen. Gleichzeitig gesteht Gächter dem Fischer jedoch auch zu, ein »ehrlicher Umweltbeobachter« gewesen zu sein, der lange vor den EAWAG-Wissenschaftlern ein ausgeprägtes Gefühl für Nachhaltigkeit hatte.

ration im Tiefenwasser zu erhöhen. Angestrebt wurde über das ganze Jahr eine Minimalkonzentration von 4 mg/l. Aus den Messdaten (vgl. Abb. 6.3) geht eindeutig hervor, dass die Belüftung in diesem Sinne wirkungsvoll war: Seit 1985 sank die Sauerstoffkonzentration nur selten unter den angestrebten Wert. Das zweite wichtige Ziel bestand in einer Verminderung der

Abb. 6.3: Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser des Sempachersees (berechnet nach Daten der EAWAG)



Die gestrichelte Linie bezeichnet das Qualitätsziel von 4 mg Sauerstoff pro Liter.

Phosphor-Rücklösung. Vor dem Hintergrund des verfügbaren Wissens war zu erwarten, dass die Rücklösung dank ausreichender Sauerstoffversorgung des Sediments deutlich zurückgehen würde.

Auf Seiten der EAWAG war der Limnologe René Gächter für die Belüftung des Sempachersees zuständig. Er entschied sich für eine einfache Abschätzung, um den Erfolg der Belüftung zu überprüfen. Dabei ging er davon aus, dass die aerobe Phosphor-Rücklösung im Vergleich zur anaeroben Rücklösung vernachlässigbar klein sei (Interview René Gächter, Juni 2000). Zudem nahm er an, dass seit Beginn der Belüftung überall im See jederzeit aerobe Bedingungen herrschten. Unter diesen vereinfachenden Annahmen wäre davon auszugehen gewesen, dass praktisch keine Rücklösung mehr auftritt. Die im Sediment zurückgehaltene Phosphormenge hätte dann der Phosphormenge entsprochen, die ins Sediment absinkt. Die zurückgehaltene Phosphormenge konnte auf der Grundlage von Massenbilanzrech-

nungen, und die sedimentierte Menge mit Hilfe von Sedimentationsfallen abgeschätzt werden konnte. Aus einem Vergleich der beiden Größen ergab sich zu Gächters Erstaunen, dass lediglich 20 Prozent des sedimentierten Phosphors dauerhaft im Sediment gebunden blieben.

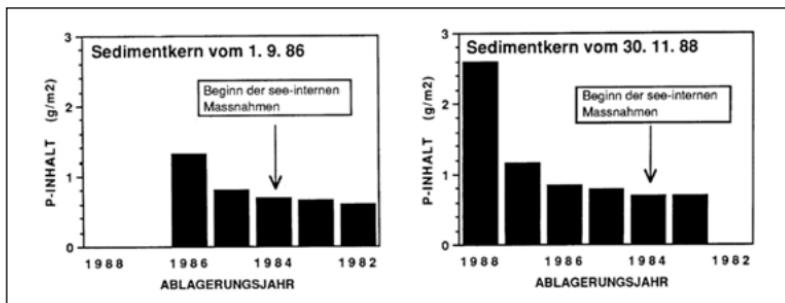
Ein zweiter Abschätzungsansatz bestand darin, die Veränderung des Phosphorgehalts im Tiefenwasser zu berechnen. Da ein See während der Sommerstagnation geschichtet ist, findet kaum ein Austausch zwischen Tiefen- und Oberflächenwasser statt. Eine Zunahme der Phosphormenge im Tiefenwasser zwischen Frühling und Herbst ist in erster Linie auf die Rücklösung zurückzuführen. Zu erwarten war daher, dass die Sommer-Phosphorakkumulation im Tiefenwasser im belüfteten See deutlich geringer ausfällt als im unbelüfteten See. Aus Berechnungen ergab sich für die Sommer zwischen 1979 und 1983 eine Zunahme um $15,8 \pm 2,6$ t, und für die Sommer zwischen 1984 und 1986 eine Zunahme um $13,8 \pm 3,9$ t (Gächter et al. 1989: 337). Dieser Unterschied war nicht signifikant.

Beide Auswertungen stellten den Erfolg der Belüftung bezüglich des Phosphor-Rückhalts fundamental in Frage. Obwohl Gächter Messergebnissen gegenüber grundsätzlich kritisch eingestellt war, hielt er die Daten in diesem Fall für zuverlässig. Das Ergebnis war daher für ihn ein Schock; er verstand zunächst »Gott und die Welt nicht mehr« (Interview Gächter, Juni 1998). Diese Überraschung veranlasste ihn, nach Erklärungen zu suchen.

Das Sedimentstapelkonzept

Für Gächter war es nun nahe liegend, die Frage zu untersuchen, was im Sediment passiert war. Zwei Jahre nach Belüftungsbeginn, 1986, entnahm er an der tiefsten Stelle des Sees einen Sedimentkern, der Schicht für Schicht analysiert wurde (Abb. 6.4).

Abb. 6.4: Sedimentkern-Analysen aus dem Sempachersee



Quelle: Gächter et al. 1989: 338

Bei einem Erfolg der Belüftung wäre zu erwarten gewesen, dass die seit Beginn der Belüftung abgelagerten Sedimentschichten⁷² einen deutlich höheren Phosphorgehalt aufweisen würden als die zuvor abgelagerten Sedimentschichten. Die Daten deuteten jedoch darauf hin, dass nur die jüngste Sedimentschicht aus dem Jahre 1986 einen leicht höheren Phosphorgehalt aufwies, während die Schicht aus dem Vorjahr sich kaum von den älteren Jahresschichten unterschied. Auch dieser Befund deutete darauf hin, dass der Phosphor-Rückhalt durch die Belüftung kaum zugenommen hatte.

Um diese Überraschung erklären zu können, änderte Gächter die Betrachtungsweise. Er stellte sich nun nicht mehr die Frage, *ob* das Sediment als Ganzes aerob oder anaerob sei, sondern er untersuchte, *wie dick* die oberste aerobe Schicht war, und von welchen Faktoren die Schichtdicke abhing. Dabei profitierte er davon, dass in den frühen 1980er Jahren die Vorgänge an der diffusiven Grenzschicht zwischen Sediment und Wasser intensiv untersucht worden waren – wie zum Beispiel bei Jørgensen und Des Marais (1990) oder Santschi et al. (1990). Aus diesen Arbeiten ging hervor, dass die Sauerstoffnachlieferung ins Sediment entscheidend von der Dicke der diffusiven Grenzschicht abhängt, und dass die Sauerstoffzehrung im Sediment vieler eutropher Seen schneller ist als die Sauerstoffnachlieferung. Dementsprechend ist die sauerstoffhaltige Oberflächenschicht häufig nur wenige Millimeter dick (Santschi et al. 1990: 280).

Vor dem Hintergrund dieses Wissens betrachtete Gächter das Sediment daher nicht mehr als statisches System, dessen Zustand lediglich von der Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser abhängt, sondern als dynamisches System, dessen Zustand zeitlichen Veränderungen unterliegt. Er ging dabei von der Überlegung aus, dass die oberste Sedimentschicht im Laufe der Zeit begraben wird. Das frisch sedimentierte Material wird dabei zerstellt, und dabei wird Sauerstoff verbraucht. Ehemals aerobe Schichten werden daher allmählich anaerob. Lediglich an der Sedimentoberfläche bleibt eine aerobe Schicht erhalten, die eine relativ hohe Rückhaltekapazität für Phosphor aufweist. Die tieferen Schichten hingegen, die keinen Sauerstoff mehr enthalten, weisen lediglich die anaerobe Rückhaltekapazität für Phosphor auf.

Untermauert wurde dieses Konzept durch die Resultate eines zweiten Sedimentkerns, der 1988 an der tiefsten Stelle des Sempachersees entnommen wurde (Abb. 6.4 rechts). Lediglich die frischeste Jahresschicht wies einen markant höheren Phosphorgehalt auf. Die 1986 abgelagerte Schicht enthielt hingegen deutlich weniger Phosphor als die entsprechende Schicht in dem Sedimentkern, der 1986 aus der noch frischen Schicht ent-

72 | Sedimentschichten können ähnlich wie Baumringe chronologisch zugeordnet werden.

nommen wurde. Ein weiteres Indiz lieferte die Entwicklung des Phosphorgehalts im Baldeggsee: Während Imboden (1985) beobachtet hatte, dass der Phosphorgehalt vor Beginn der Belüftung 1982 jährlich um drei Tonnen und nach Belüftungsbeginn jährlich um sieben Tonnen abgenommen hatte, konnte Gächter (1987: 183) feststellen, dass der jährliche Rückgang sich seit 1985 erneut bei drei Tonnen pro Jahr eingependelt hatte. Der vorübergehend höhere Rückhalt zwischen 1982 und 1985 passte qualitativ gut zum Sedimentstapelkonzept.

Dennoch blieb zunächst weiterhin unklar, wieso die Sedimentkernversuche der EAWAG in den 1970er Jahren darauf hingedeutet hatten, dass eine Belüftung den Phosphor-Rückhalt erhöhen würde. Vor dem Hintergrund des Sedimentstapelkonzepts lag es nahe, genauer zu untersuchen, wie Sauerstoff ins Sediment eindringt und welchen Einfluss dies auf die Rücklösung hat. Aus Sauerstoffprofilen ging hervor, dass die Sauerstoffkonzentration 10 cm oberhalb des Sediments bei 5,7 mg/l lag. Gleichzeitig konnten jedoch an der Sedimentoberfläche Bakterien festgestellt werden, die auf nahezu anaerobe Bedingungen angewiesen sind. Obwohl also im Tiefenwasser die Sauerstoffkonzentration von 4 mg/l überschritten wurde, herrschten somit im Sediment anaerobe Bedingungen. Die Sauerstoffzehrung im Sediment musste somit größer sein als die Sauerstoffnachlieferung aus dem Tiefenwasser (Gächter et al. 1989: 340f.), die über Diffusion erfolgt. Bei einem konstanten Sauerstoffgehalt ist sie praktisch gleichbleibend. Der Sauerstoffgehalt des Tiefenwassers hängt nur davon ab, wie viel Sauerstoff bei der Zersetzung toter Algen gezehrt wird. Dies wiederum steht in Zusammenhang mit der Sedimentationsrate der Algen. Diese Rate kontrolliert somit letzten Endes den Sauerstoffhaushalt des Sediments – und gleichzeitig die Menge an Phosphor, die ins Sediment gelangt.

Um diese Überlegungen zu überprüfen, modifizierten Gächter und seine Mitarbeiter die ursprünglichen Sedimentkernversuche von Mortimer, indem sie die Sedimentkerne von oben mit frischem Sediment »fütterten«.⁷³ Dabei wurde die Rücklösungsrate nicht nur wie in den 1970er Jahren unter »ungefütterten aeroben« und »ungefütterten anaeroben« Bedingungen untersucht, sondern zusätzlich auch unter »gefütterten aeroben« und »gefütterten anaeroben« Bedingungen (Gächter/Meyer 1990). Unter ungefütter-

73 | Tessenow hatte bereits 1972 dieselbe Idee gehabt. Gächter gibt jedoch an, er habe sich 1989 nicht daran erinnerte und diesen Aspekt von Tessenows Arbeit vergessen (Interview mit René Gächter, Juni 1998). Hier zeigt sich, wie rekursives Lernen im Anwendungskontext zur Erarbeitung von erweitertem Wissen beitragen kann, indem es die Bildung von Hypothesen ermöglicht, die möglicherweise Wissenslücken füllen – unabhängig davon, ob es sich um noch nicht erarbeitetes oder nicht mehr erinnertes Wissen handelt.

ten Bedingungen konnten die Befunde von Mortimer bestätigt werden, denen zufolge die anaerobe Rücklösungsrate deutlich höher war als die aerobe Rücklösungsrate. Allerdings ergab sich bereits hier ein wesentlicher Unterschied: Selbst unter aeroben Bedingungen setzte nach etwa 220 Tagen eine Rücklösung von Phosphor ein. Mortimer hatte diesen Effekt nicht beobachtet können, da seine Experimente nur 152 Tage gedauert hatten. Dieser Befund war bereits ein Indiz dafür, dass im Sediment eine Sauerstoffzehrung erfolgte, die bewirkte, dass im Sediment nach 220 Tagen anaerobe Bedingungen herrschten, selbst wenn Sauerstoff nachgeliefert werden konnte.

Das wichtigste Ergebnis der Fütterungsversuche bestand jedoch darin, dass die Rücklösungsrationen durchgehend höher waren als bei Versuchen ohne Fütterung, und zwar sowohl unter aeroben als auch unter anaeroben Bedingungen. Selbst unter aeroben Bedingungen konnte im Fütterungsversuch ab etwa 250 Tagen eine kontinuierliche Rücklösung beobachtet werden. Unter anaeroben Bedingungen erfolgte die Rücklösung noch schneller. Diese Versuche lieferten daher deutliche Hinweise darauf, dass neben der Sauerstoffkonzentration auch die Nachlieferung frischen Sediments von entscheidender Bedeutung für die Rücklösungs dynamik war.

Vor dem Hintergrund dieser Befunde ergibt sich nun ein ganz anderer Zusammenhang zwischen der Sauerstoff- und der Phosphorkonzentration, als er bei der Planung der Belüftungsanlage zugrunde gelegt wurde. Die Phosphor-Rücklösung wird nicht in erster Linie von der Sauerstoffkonzentration kontrolliert, sondern hängt ebenso wie die Rücklösungsrate von einer dritten Größe ab: von der Sedimentationsrate, die wiederum vom Phosphorgehalt des gesamten Sees abhängt. Damit hängt die Phosphor-Rücklösungsrate letzten Endes von den Phosphoreinträgen ab. Der einzige Weg zu einer nachhaltigen Sanierung des Sempachersees bestand aus dieser Perspektive darin, die Einträge zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund erschien es erstrebenswert, den Schwerpunkt der Bemühungen von der Seebelüftung auf Maßnahmen zur Reduktion der Phosphoreinträge zu verlagern.

6.3 Vom überdüngten See zum überdüngten Boden

Nachdem der Bau von Kläranlagen allein nicht die gewünschten Erfolge gebracht hatte, untersuchte die EAWAG im Juni 1976 die Zuflüsse des Sempachersees. Alle Zuflüsse wurden der Länge nach abgeschnitten, um Proben zu nehmen. Vertiefte Analysen wurden anschließend für diejenigen Zuflüsse durchgeführt, die mehr als 5 Prozent des Phosphoreintrags in den See ausmachten. Diese Zuflüsse wurden in einem 15-tägigen Intervall ein Jahr lang beprobt (EAWAG 1979: 4-10). Zudem wurden die Phosphorein-

träge aus Kläranlagen untersucht (ebd.: 10-13). Die Kläranlagen machten allerdings nur etwa 5 Prozent der gesamten Phosphoreinträge von gut 14 Tonnen pro Jahr aus.

Zunächst war daher die Frage offen, wieso die Phosphorkonzentration in den Zuflüssen mit durchschnittlich etwa 365 mg/m³ ausgesprochen hoch war. Als mögliche Ursachen wurden hohe Phosphorkonzentrationen in Drainage bzw. Sickerwässern ebenso in Betracht gezogen wie die punktförmige Einleitung von Abwasser in die Bäche. Um hier Klarheit zu gewinnen, wurden 1979 die meisten Bäche erneut auf ihrer gesamten Länge abgeschritten. Dabei zeigte sich, dass Phosphorkonzentrationen oberhalb von 100 mg/m³ in der Regel nur in der Nähe von Siedlungen beobachtet wurden. Dies war ein deutliches Indiz dafür, dass es sich um Abwassereinleitungen handelte (ebd.: 16f.). Allerdings wiesen auch einige Einzugsgebiete im Südosten des Sees sehr hohe Phosphorkonzentrationen auf. Dies wurde bereits 1979 als Indiz für eine massive Phosphorauswaschung aus dem Boden angesehen (ebd.: 17).

Zwischen 1981 und 1983 wurden erneut alle Zuflüsse des Sees abgeschritten und auf Abwassereinleitungen und Drainagerohre untersucht. Das Gewässerschutzaamt strebte eine Phosphorkonzentration in den Zuflüssen von maximal 60 mg/m³ an. In einem weiteren Schritt wurden diejenigen Einleitungen näher untersucht, bei denen das erste Messergebnis oberhalb von 160 mg/m³ gelegen hatte. Dabei zeigte sich, dass 61 Prozent der Einleitungen problematisch waren. In den meisten Fällen konnte die Ursache der hohen Konzentrationen gefunden werden, sodass die erforderlichen Sanierungen vorgenommen werden konnten (Gächter/Stadelmann 1993: 352).

In einem zweiten Schritt wurden ab 1987 auch diejenigen Einleitungen überprüft, bei denen die Phosphorkonzentration zwischen 60 und 160 mg/m³ lag. Dabei handelte es sich häufig um Drainagerohre, in denen die Phosphorkonzentration nach dem Ausbringen von Gülle deutlich anstieg (ebd.).

Im Sommer 1984 kam es kurz nach der Inbetriebnahme der Belüftungsanlage, aber vermutlich ohne kausalen Zusammenhang damit, zu einem riesigen Fischsterben im Sempachersee, bei dem etwa 300.000 Fische starben (Zimmermann/Knoepfel 1987: 101).⁷⁴ Der Stadtrat von Sursee er-

74 | Fischsterben sind in eutrophen Seen recht häufig, weil unter nährstofffreien Bedingungen bestimmte Blaualgen-Arten dominieren, die Gifte produzieren. Zudem kann während der Algenblüte im Sommer an der Wasseroberfläche so viel Sauerstoff produziert werden, dass Fische am »Gasblasensyndrom« sterben (vgl. Fn. 70). Maßnahmen, die zu einer Verminderung der Nährstoffzufuhr beitragen, leisten daher einen sinnvollen Beitrag zur Vermeidung von Fischsterben.

ließ daher ein Düngeverbot im Uferbereich des Sempachersees, um zu verhindern, dass Dünger direkt in den See abgeschwemmt wird (ebd.: 114). Zwar legten einige Landwirte dagegen Beschwerde ein, die vom Luzerner Regierungsrat zunächst unterstützt wurde, doch wurde das Düngeverbot später vom schweizerischen Bundesgericht für rechtmäßig erklärt (ebd.: 116, 137). Ab 1985 wurde unter Federführung des Gemeindeverbands Sempachersee ein Uferschutzgürtel um den See geschaffen. Innerhalb dieses Schutzgürtels gelten Düne- und Nutzungsbeschränkungen, die sicherstellen sollen, dass Dünger nicht oberflächlich auf direktem Wege in den See gelangt (ebd.: 138; vgl. auch Gächter/Stadelmann 1993: 354).

Als die EAWAG 1987 die Resultate der Zuflussuntersuchungen für den Zeitraum 1984-1986 veröffentlichte, zeigte sich, dass die Phosphoreinträge in den See gegenüber dem Zeitraum 1976/77 insgesamt nicht abgenommen hatten. Zwar gelangte nun weniger Phosphor aus Abwasser in den See, doch dafür verdoppelten sich die Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft. Gleichzeitig zeigte sich, dass insbesondere das Gebiet des Lippenrütibachs hohe Phosphorverluste aufwies. Daher beauftragte der Gemeindeverband eine Arbeitsgemeinschaft von Ingenieurbüros mit der Erarbeitung eines Konzepts zur Reduktion der Phosphorasträge. Gleichzeitig wurde eine detaillierte Phosphorbilanzierung durchgeführt. Aus den Daten wurde gefolgert, dass ein Großteil des Phosphors über Oberflächenabfluss in die Bäche gelange. Auch vernässungsanfällige drainierte Böden wurden als wichtige Phosphorquelle identifiziert – Böden also, die eigentlich nicht für eine intensive Landwirtschaft geeignet sind (Blum 2004: 22). Ein wesentlicher Bestandteil des Schutzkonzepts für den Lippenrütibach war daher die Ausscheidung von Flächen, auf denen Nutzungs- und Düngebeschränkungen sinnvoll erschienen. In Rücksprache mit den betroffenen Landwirten wurde schließlich wegen des hohen administrativen Aufwands auf diese Maßnahme verzichtet. Stattdessen wurde allen Landwirten eine Dokumentation zur Verfügung gestellt, die Aufschluss darüber gab, in welchen Parzellen welche Bewirtschaftung angemessen war. Zudem sollten Brachflächen im Winter vermieden und standortgerechte Kulturen angebaut werden (ebd.: 25).⁷⁵

Parallel zu diesen rechtlichen Innovationen wurde weiterhin kontinuierlich an den wissenschaftlichen Grundlagen für einen wirkungsvollen Gewässerschutz gearbeitet. Zwischen 1989 und 1991 wurden die besonders belasteten Zuflüsse im Südosten des Einzugsgebiets im Rahmen von Pilotprojekten gründlich untersucht. Dabei zeigte sich, dass ein Großteil der Flächen drainiert war und dass viele Drainagerohre zu nah an der Boden-

75 | Liegt ein Acker im Winter brach, oder werden ungeeignete Kulturen angebaut, kann es zu vermehrter Erosion kommen.

oberfläche verlegt waren. Viele dieser Drainagerohre wiesen hohe Phosphorkonzentrationen auf, ohne dass Abwassereinleitungen festgestellt werden konnten. Christian Stamm fasste 1994 im Auftrag des Umweltschutzamtes das verfügbare Wissen zusammen und stellte dabei fest, dass über die Hälfte der jährlichen Phosphorfracht bei weniger als 25 Hochwassereignissen in den See gelangte, vor allem während des Sommers (Stamm 1994: 1, 13f.). Ursache für die hohen Phosphorkonzentrationen seien in erster Linie die extrem hohen Schweinebestände im Einzugsgebiet des Sees. Vorgeschlagen wurde daher eine Reduktion der Tierbestände auf maximal 2,5 Düngergroßvieh-Einheiten⁷⁶ pro Hektar, eine Beschränkung des Ackerbaus auf geeignete Standorte, eine Reduktion des Phosphorgehalts im Schweinefutter und Anpassungen der Ackerbautechnik (ebd.: 3). Aufgrund der damals verfügbaren Daten schätzte Stamm, dass etwa 6 Prozent der gelösten Phosphoreinträge aus Drainagen stammten (ebd.: 35).

René Gächter führte mit seinen Mitarbeitern zwischen 1993 und 1994 ein Jahr lang hoch aufgelöste Zuflussuntersuchungen⁷⁷ in einem der problematischen Zuflüsse des Sempachersees durch. Dabei ging er zunächst von der Vermutung aus, dass Phosphor oberflächlich abgeschwemmt wird, und erwartete dementsprechend, dass Phosphor nur dann in die Bäche gelangt, wenn aufgrund *hoher* Niederschläge Oberflächenabfluss erfolgte. Die Messdaten deuteten jedoch darauf hin, dass die Phosphorkonzentration im Bach nach *jedem* Niederschlagsereignis deutlich anstieg (Interview René Gächter, Juni 1998). Gächter folgerte daher, dass Oberflächenabfluss nicht den einzigen Eintragsmechanismus darstellt und initiierte gemeinsam mit der Professur für Bodenphysik an der ETH Zürich ein Projekt. Das Ziel dieses Projekts unter der Leitung von Christian Stamm bestand darin, die Mechanismen des Nährstoffeintrags in den Sempachersee zu untersuchen. Dieses Projekt konnte auf neuen Erkenntnissen aufbauen, die in den 1980er Jahren bezüglich des Stofftransports in Böden gesammelt worden waren. Der Boden wurde nun nicht mehr als homogenes poröses Medium angesehen, wie noch in den 1960er und 1970er Jahren (vgl. Abschnitt »Phosphoreinträge«, S. 141ff.). Stattdessen wurde die Bedeutung von Makroporen für den Wasserfluss erkannt. Da in Makroporen relativ hohe Fließgeschwindigkeiten herrschen, konnte nun auch nicht mehr davon ausgegangen werden, dass der gesamte Phosphor an die Oberflächen der

76 | Eine Düngergroßvieh-Einheit entspricht z.B. einer Milchkuh, 4 Kälbern oder 6 Mastschweinen (vgl. <http://www.umwelt-gr.ch/dienste/pdf-daten/Weisungen/www03.pdf>).

77 | Bei hoch aufgelösten Zuflussuntersuchungen findet die Entnahme von Proben im Abstand weniger Minuten statt. Dadurch ist sichergestellt, dass keine Konzentrationsspitzen übersehen werden.

Bodenteilchen gebunden wird; vielmehr war entgegen früherer Annahmen damit zu rechnen, dass erhebliche Phosphormengen über Makroporen in große Tiefen gelangen können. Diese Erkenntnisse hatten gravierende Auswirkungen auf die Beobachtung von Stofftransporten in Feldböden: Während es zuvor hinreichend erschien, an einigen zufällig gewählten Stellen Bodenproben zu entnehmen, musste nun damit gerechnet werden, dass ein Großteil des Stofftransports in einigen wenigen Poren erfolgte. Daher mussten Möglichkeiten gefunden werden, den Stofftransport in diesen Poren zu erfassen.

Bei der Planung seiner Beobachtungen konnte Stamm davon profitieren, dass Gächter im Rahmen seiner eigenen Feldarbeit mehrmals Drainagerohre beobachtet hatte, die »sichtbar und zum Teil riechbar verdünnte Gülle führten«, obwohl kein Oberflächenabfluss stattfand (Gächter et al. 1996: 331). Er vermutete daher, dass phosphorreiches Wasser nach Niederschlägen innerhalb kurzer Zeit in die Drainagerohre gelangte. Vor dem Hintergrund dieses Wissens führte Stamm an zwei Standorten gezielte Untersuchungen durch, indem er im Abstand von 15 Minuten Wasserproben aus den Drainagerohren entnahm.⁷⁸ Er stellte fest, dass die Phosphorkonzentration insbesondere bei den ersten Niederschlägen nach dem Ausbringen von Gülle extrem hoch waren (Stamm 1997: 24f.).

Da diese Beobachtung im Einklang mit einem schnellen Transport durch Makroporen war, führte Stamm anschließend an beiden Versuchstandorten Versuche mit Farbstoffen durch, die er mit Hilfe von Sprühbalken ausbrachte. Nach der Ausbringung wurden Bodenprofile gegraben und fotografiert. Dabei zeigte sich wie erwartet, dass ein Großteil der Farbstoffe entlang einiger weniger Fließwege in den Boden eindrang. Von zentraler Bedeutung waren dabei Regenwurmgänge (ebd.: 28f.). Bodenproben, die unterhalb einer Tiefe von 30 cm entnommen wurden, wiesen jedoch äußerst geringe Phosphorkonzentrationen auf. Dieser Befund zeigte, wie irreführend der Versuch sein kann, den Stofftransport abzuschätzen, indem punktuell entnommene Bodenproben analysiert werden.

In einem weiteren Schritt führte Stamm einen großen Feldversuch unter kontrollierten Bedingungen durch. Oberhalb eines Drainagerohrs wurde ein Zelt aufgebaut, um unkontrollierbare Niederschläge fern zu halten. Mit Hilfe eines Sprühbalkens wurde die Versuchsfläche künstlich beregnet. Zu genau bekannten Zeitpunkten wurden dem Wasser verschiedene Substanzen beigegeben, unter anderem auch Gülle. Das Drainagerohr wurde im

78 | Drainagerohre erfassen das infiltrierende Wasser aus einer relativ großen Fläche unabhängig davon, ob es durch Makroporen oder feinere Bodenporen fließt. Die Beobachtung von Drainagerohren ist daher ein geeigneter Ansatz, um der räumlichen Heterogenität des Stofftransports Rechnung zu tragen.

Abstand von 5 Minuten beprobt, und nach Versuchsende wurden Bodenprofile gegraben, um die räumliche Verteilung der verschiedenen Stoffe zu rekonstruieren. Dabei zeigte sich, dass Gülle innerhalb von weniger als 5 Minuten in ein Drainagerohr in 1 Meter Tiefe gelangen kann und dass das Konzentrationsmaximum im Drainagerohr bereits nach etwa 10 Minuten erreicht wurde. Dieser Befund erklärt, warum frühere Studien nicht auf den schnellen Transport aufmerksam geworden waren: Wenn mit der Probenahme zu lang gewartet wird, ist ein Großteil der >Konzentrationswolke< längst am Beobachtungspunkt vorbei geflossen. Allerdings können auch Monate nach der letzten Gülle-Ausbringung noch hohe Phosphorkonzentrationen im Drainagerohr beobachtet werden, wenn Phosphor nach heftigen Niederschlägen mobilisiert wird (ebd.: 65-74). Diese Befunde sind für den Gewässerschutz von großer Bedeutung, denn sie deuten darauf hin, dass es nicht ausreicht, lediglich die Erosion und den Oberflächenabfluss zu minimieren, also die beiden Prozesse, die Furrer 1978 für einzig relevant gehalten hatte.

Nachdem der Phosphorgehalt des Sees bis Mitte der 1990er Jahre weiter abgenommen hatte, stellte sich die Frage, inwiefern es erforderlich war, die teure Belüftung mit reinem Sauerstoff aufrechtzuerhalten. In einem weiteren Gutachten untersuchte die EAWAG daher 1996, ob es vertretbar sei, in Zukunft auf den Eintrag von reinem Sauerstoff zu verzichten und stattdessen während des Sommers feinblasige Luft einzutragen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Phosphorgehalt im Sempachersee sich bei einer Konzentration von etwa 65 mg/m³ stabilisieren würde. Aus Modellrechnungen ging hervor, dass ein Eintrag von feinblasiger Druckluft geeignet wäre, das gesamte Tiefenwasser mit Sauerstoff zu versorgen, ohne dass Probleme für Fische zu erwarten wären. Gleichzeitig habe eine Reduktion der Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft höchste Priorität. Daher wurde empfohlen, auf den Eintrag reinen Sauerstoffs zu verzichten und die eingesparten Mittel von jährlich 90.000 Franken für Maßnahmen im Einzugsgebiet einzusetzen (EAWAG 1996: 39-50). Der Gemeindeverband beschloss 1996, diese Empfehlungen umzusetzen (Blum 2004: 43). Seit dem Sommer 2004 wird darüber hinaus auch die feinblasige Belüftung nur noch nachts durchgeführt (E-Mail von Peter Herzog, Dezember 2004).

Impulse auf der schweizerischen Bundesebene erweiterten den Handlungsspielraum im Gebiet des Sempachersees. 1998 erarbeiteten das Bundesamt für Landwirtschaft und das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft gemeinsam ein Konzept zur Verminderung der Phosphorbelastung von Oberflächengewässern. Dieses Konzept stützte sich auf den neuen Artikel 62a des Gewässerschutzgesetzes, der Zahlungen an Landwirte vorsah, die besondere Maßnahmen zur Vermeidung von Phosphorverlusten durchführten. Das Luzerner Amt für Landwirtschaft schlug gemeinsam mit

dem Luzerner Amt für Umweltschutz vor, diesbezüglich im Gebiet des Sempachersees, des Baldeggersees und des Hallwilersees ein Pilotprojekt durchzuführen (Blum 2004: 44). Dieses »Phosphorprojekt« wurde 1999 in Angriff genommen. Angestrebt wird seither eine Phosphorkonzentration im See von 20 mg/m^3 , die noch unter dem Qualitätsziel von 30 mg/m^3 liegt, das in der Schweizerischen Gewässerverordnung verankert ist. Dabei wird angenommen, dass die Phosphoreinträge zur Erreichung dieses Ziels auf jährlich 5,5 Tonnen an gelöstem Phosphor bzw. 11 Tonnen Gesamt-Phosphor reduziert werden müssen (ebd.: 43f.). Um dieses eintragsbezogene Ziel zu erreichen, muss insbesondere die Phosphorversorgung der Böden reduziert werden. Noch 1996 waren die Böden um 33 Prozent mit Phosphor überversorgt (ebd.: 47). 45 Prozent der Böden wurden der höchsten Versorgungsklasse »angereichert« zugeordnet. Weitere 39 Prozent gehörten zur Versorgungsklasse »Vorrat«, die ebenfalls einen Phosphorüberschuss aufweist. Angestrebt wird hingegen die mittlere von fünf Versorgungsklassen, die als »genügend« bezeichnet wird (ebd.: 49).

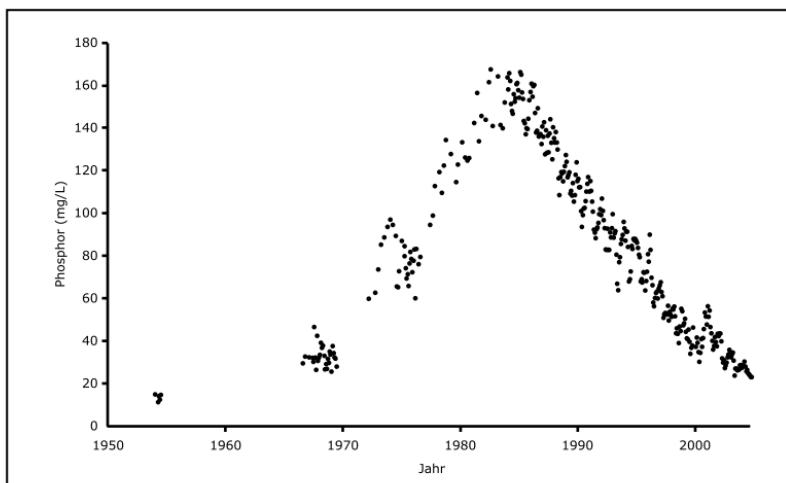
Um dieses Ziel zu erreichen, sollen alle Landwirtschaftsbetriebe im Einzugsgebiet des Sempachersees den so genannten ökologischen Leistungsnachweis erfüllen, also eine ausgeglichene Nährstoffbilanz aufweisen. Angestrebt wird zudem, dass sich zwei Drittel der Betriebe an einem »Seevertrag« beteiligen, welcher sie zur Einhaltung noch strikterer Regeln verpflichtet. Dazu gehören ein 5 Meter breiter Pufferstreifen um Gewässer, eine nicht gedüngte Fläche von mindestens 5 Prozent der Gesamtfläche, eine Nährstoffbilanz von maximal 100 Prozent,⁷⁹ ein Verzicht auf Winterbrache und ein zeitgerechter Düngereinsatz. Zudem darf die Nährstoffbilanz in Böden der Versorgungsklassen »angereichert« und »Vorrat« maximal 80 Prozent betragen, und maximal 20 Prozent der Ackerfläche dürfen mit Mais, Rüben oder Kartoffeln bepflanzt werden (ebd.: 53f.), deren Anbau mit einem hohen Erosionsrisiko verbunden ist.

Gegenwärtig scheint das Phosphorprojekt von Erfolg gekrönt zu sein. Die Beteiligung der Landwirte übertrifft ebenso die Erwartungen wie die Reduktion der ausgebrachten Phosphormengen. Zwischen 1996 und 2003 hat sich der Anteil extensiv genutzten Weidelandes fast verdreifacht, während die Tierbestände leicht rückläufig sind. Für das Jahr 2001 konnte erstmals eine ausgeglichene Nährstoffbilanz erreicht werden, und im Jahr 2003 war die Nährstoffbilanz mit 94 Prozent sogar leicht negativ. Zu diesem Erfolg beigetragen haben Entschädigungen in Höhe von 15 Franken pro Kilogramm nicht ausgebrachten Phosphors. Möglich wurden diese Ein-

79 | Die Nährstoffbilanz ist ausgeglichen, wenn dem Boden durch Düngung genau so viel Nährstoffe zugefügt werden, wie die Pflanzen aufnehmen. Man spricht dann von einer Nährstoffbilanz von 100 Prozent.

sparungen durch den vermehrten Einsatz von stickstoff- und phosphorreduziertem Futter, welches es erlaubt, den Phosphoranfall in der Schweinemast zu halbieren. Die ausgebrachte Phosphormenge konnte daher zwischen 1996 und 2003 von 455 Tonnen auf 330 Tonnen reduziert werden. Auch der Phosphorgehalt im Boden hat signifikant abgenommen (ebd.: 59-64). Zusammengenommen haben all diese Maßnahmen dazu geführt, dass der Zustand des Sempachersees sich deutlich verbessert hat, auch wenn Einigkeit besteht, dass weiterhin große Anstrengungen erforderlich sind. Im Frühjahr 2003 konnte ein wichtiger Erfolg gefeiert werden: Erstmals seit den 1960er Jahren lag die mittlere Phosphorkonzentration des Sempachersees zum maßgeblichen Zeitpunkt der Frühjahrszirkulation unterhalb des angestrebten Qualitätsziels von 30 mg/m^3 . Nach Jahrzehntelangen Anstrengungen wurde somit auch das zweite wichtige Gewässerschutzziel neben einer hinreichenden Sauerstoffkonzentration erreicht. Die Phosphorkonzentration des Sempachersees liegt heute um 50 Prozent tiefer, als es von der EAWAG (1996: 39) noch 1996 erwartet wurde (vgl. dazu auch Abb. 6.5).

Abb. 6.5: Phosphorkonzentration des Sempachersees



Quelle: Unveröffentlichte Daten von Umwelt und Energie Kanton Luzern/EAWAG

6.4 Durch Scheitern zum Erfolg: Seesanierung als rekursiver Lernprozess

Auch wenn es nicht gelang, den Phosphorgehalt des Sempachersees innerhalb der 1979 angepeilten 10 Jahre auf 30 mg/m³ zu reduzieren, so muss die Sanierung des Sempachersees insgesamt doch als großer Erfolg betrachtet werden. Obwohl die wichtigsten Maßnahmen wie der Bau von Kläranlagen oder die Inbetriebnahme der Belüftungsanlage nicht im erhofften Ausmaß wirkungsvoll waren, und die Phosphoreinträge zwischen 1977 und 1997 nur von etwa 15 Tonnen auf etwa 12 Tonnen jährlich zurückgingen (AfU 1999: 56), konnte das angestrebte Ziel knapp 25 Jahre nach Erstellung des EAWAG-Gutachtens erreicht werden.

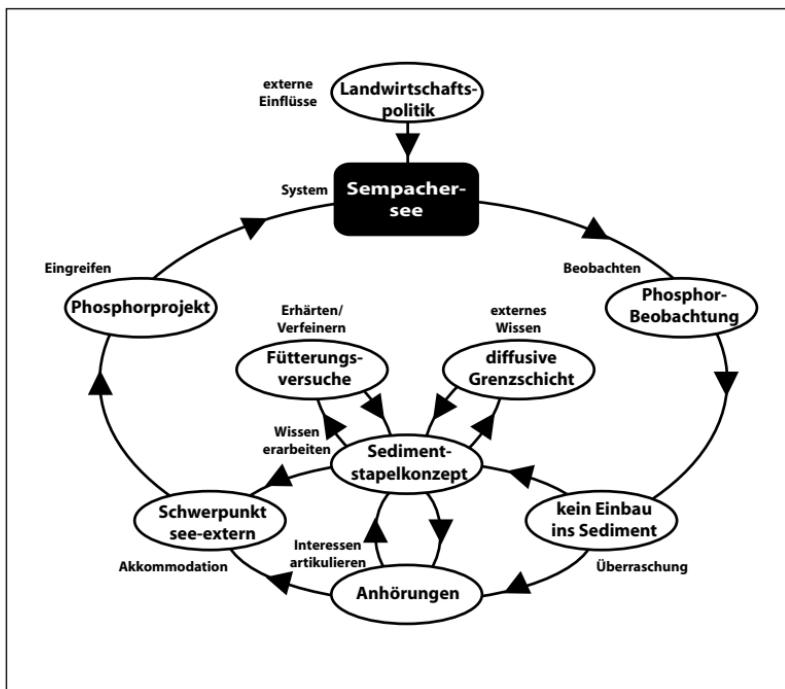
Die Frage stellt sich, wie dies möglich war. Die Analyse des Falls zeigt, dass rekursive Lernprozesse von Anfang an auf ein umfangreiches limnologisches Grundlagenwissen aufgebaut werden konnten. Externes Wissen, das an anderen Seen gewonnenen worden war, spielte ebenfalls eine wichtige Rolle: Ohne die Arbeiten von Einsele, Mortimer und Vollenweider (vgl. S. 144ff., 140f.) wäre die Sanierung des Sempachersees vermutlich anders verlaufen. Ebenso wichtig waren die praktischen Erfahrungen mit der Sanierung der Wahnbachtalsperre und schließlich mit der Belüftung des Baldegggersees (vgl. S. 146, 152). Zudem wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die sich auf den Sempachersee selbst bezogen, und die dazu beitrugen, das bestehende Wissen zu erhärten oder zu verfeinern. Beispiele für eine Erhärtung sind die Sedimentkernversuche der EAWAG in den 1970er Jahren und die Beobachtung der Sauerstoff- und Phosphorkonzentrationen im Sempachersee. Die Beobachtung des Sees nach der Belüftung, die Entnahme von Sedimentkernen und die Fütterungsversuche trugen später dazu bei, dieses Wissen weiter zu verfeinern.

Den Anstoß zur Wissensverfeinerung gab in diesem Fall die überraschende Feststellung, dass der Phosphor-Rückhalt im Sediment durch die Belüftung nicht erhöht worden war. Zur Anpassung des Wissens führten dabei auch Erkenntnisse über die Dynamik der Sediment-Wasser-Grenzfläche, die zur gleichen Zeit an der EAWAG und andernorts durch Beobachtungen anderer Seen erarbeitet worden waren. Auf der Grundlage dieses Wissens musste die Wirksamkeit der Belüftung auch aus theoretischer Sicht angezweifelt werden. Gleichzeitig wurden sowohl im Gebiet des Sempachersees als auch andernorts Arbeiten durchgeführt, die zu der Einsicht führten, dass Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft eine zentrale Rolle spielten. Aus umfangreichen Diskussionen zwischen Ämtern, Wissenschaftlern und Gemeindeverband ergab sich schließlich ein Konsens darüber, dass der Schwerpunkt der Maßnahmen künftig im see-externen Bereich liegen sollte.

Der Handlungsspielraum der lokalen Akteure wurde dabei durch eine Neuausrichtung der schweizerischen Landwirtschaftspolitik erweitert. Stark kondensiert sind diese verschiedenen Elemente in Abbildung 6.6 dargestellt.

Der Fall des Sempachersees illustriert in diesem Sinne die Vielfalt von Aspekten, die bei rekursiven Lernprozessen eine Rolle spielen können. Dabei fand ein breites Spektrum von Aktivitäten statt, die von reiner Grundlagenforschung bis hin zu einer wissensbasierten Umsetzung reichte. Dabei wurden sowohl streng kontrollierte Laborversuche als auch kontrollierte

Abb. 6.6: Rekursives Lernen am Beispiel des Strategiewechsels hin zu vermehrten see-externen Maßnahmen



Feldexperimente, Beobachtungen im Feld und großflächige ökologische Eingriffe durchgeführt, die das gesamte Einzugsgebiet erfassten. Verortet man den Fall des Sempachersees daher in Abbildung 1.5 (S. 26), so erstreckt er sich über das gesamte horizontale und vertikale Spektrum. Im Vergleich zu den Fallstudien in den Kapiteln 4, 5 und 7 kommt hier jedoch der Erzeugung von Grundlagenwissen ein stärkeres Gewicht zu, sodass wir den Sempachersee in Abbildung 1.5 schwerpunktmäig auf der wissenser-

zeugenden Seite eingeordnet haben. Der Bau von Kläranlagen, der am Beginn der Sanierungsbestrebungen stand, verbindet kontrollierte mit situationsspezifischen Randbedingungen: Kläranlagen sind technische Anlagen, die intern unter weitgehend kontrollierten Bedingungen funktionieren, aber deren Wirksamkeit gleichzeitig von der Zusammensetzung und Menge des im Einzugsgebiet anfallenden Abwassers abhängt. Die Inbetriebnahme der Kläranlagen trug dazu bei, dass der Verlauf der Phosphorkonzentration im Sempachersee aufmerksam beobachtet wurde. Aus diesen Beobachtungen resultierte die Erkenntnis, dass weiterreichende Maßnahmen erforderlich waren. Zudem ergaben sich Indizien dafür, dass noch nicht alle für die Dynamik des Sempachersees wichtigen Prozesse verstanden worden waren. Waren die Kläranlagen nicht gebaut worden, so hätte man möglicherweise nicht so rasch herausgefunden, dass es noch eine Vielzahl kleiner Abwassereinleitungen in die Bäche gab. Ohne den Bau der Belüftungsanlage hätte die EAWAG nicht die Möglichkeit gehabt, statt im Labor in einem ganzen See zu untersuchen, wie sich eine Veränderung der Sauerstoffverhältnisse auf die Phosphor-Rücklösung auswirkt. Auf diese Weise trug die Belüftung maßgeblich zur Entstehung des Sedimentstapelkonzepts bei, welches die Erarbeitung kostengünstiger und effizienter Gewässerschutzmaßnahmen ermöglichte. Die sorgfältige Untersuchung der Zuflüsse des Sempachersees regte unter anderem dazu an, unter natürlichen Bedingungen die Bedeutung des schnellen Phosphortransports zu untersuchen. Das bessere Verständnis dieser Mechanismen trug ebenso wie das Sedimentstapelkonzept zur Neuausrichtung der Strategie bei, die mehr Gewicht auf see-externe Maßnahmen legte.

Im Gegensatz zu großflächigen Beobachtungen erwiesen sich Laborexperimente bisweilen als problematisch. Die Annahme, durch eine Belüftung den Phosphor-Rückhalt des Sees erhöhen zu können, basierte wesentlich auf Sedimentkernexperimenten, die unter unnatürlichen Bedingungen durchgeführt worden waren, da keine Sedimentation frischer Algen erfolgte. Auch die Annahme, Phosphor werde nicht aus landwirtschaftlich genutzten Böden ausgewaschen, basierte auf Laborexperimenten mit künstlichen ›Böden‹, die keine Makroporen aufwiesen und daher keine Rückschlüsse auf den schnellen Phosphortransport zuließen.

Das bedeutet allerdings nicht, dass Experimenten unter kontrollierten Bedingungen im Rahmen von Realexperimenten keine Bedeutung zukommt. Der große Vorteil von Realexperimenten besteht darin, dass sie zur Entdeckung von Überraschungen beitragen. Ein Realexperiment selbst hingegen erlaubt in der Regel noch keine unmittelbaren Rückschlüsse über die Ursachen der überraschenden Befunde. Diese können eher unter vereinfachten Bedingungen untersucht werden, welche die Interpretierbarkeit von

Resultaten erleichtern. Auch eine kleinräumige Einengung kann hilfreich sein, wie das Beispiel der Drainagerohre zeigt: Zunächst wurde das gesamte Seegebiet untersucht, dann die wichtigsten Zuflüsse. Anschließend erfolgte in einzelnen Zuflüssen eine zeitlich hoch aufgelöste Beobachtung, die schließlich zu der Erkenntnis führte, dass ein Großteil des Phosphors über Drainagerohre in die Bäche gelangte. Sobald dies bekannt war, konnten einzelne Drainagerohre gezielt untersucht werden. Die Ausbringung von Farbstoffen unterstützte die Lokalisierung der Makroporen, über welche der schnelle Transport erfolgte.

Ähnlich verhielt es sich bei der Entwicklung des Sedimentstapelkonzepts: Am Anfang standen Massenbilanzrechnungen, die sich auf den gesamten See bezogen. Diese Berechnungen ermöglichen Rückschlüsse über großflächig ablaufende Prozesse. Um diese Prozesse genauer zu untersuchen, wurden einzelne Sedimentkerne entnommen, die auf die Bedeutung der obersten Sedimentschicht hinwiesen. Auf der Grundlage dieser Beobachtungen konnten dann die gezielten Fütterungsversuche durchgeführt werden, welche das Sedimentstapelkonzept erhärteten.

Was das Wechselspiel zwischen Wissenserzeugung und Wissensanwendung betrifft, so fällt zunächst einmal auf, dass die Sanierung des Sempachersees von Anfang an unter engem Einbezug von Wissenschaftlern erfolgte. Bereits zu einem Zeitpunkt, als der Phosphorgehalt des Sempachersees noch relativ gering war, war grundlegendes limnologisches Wissen verfügbar, das zur Planung wirkungsvoller Maßnahmen beitrug. Auch das spätere Vorgehen reflektierte den jeweils aktuellen Stand des Wissens. Von Anfang an wurden Maßnahmen getroffen, die für sich genommen sinnvoll waren und deren Wirkung sorgfältig überprüft wurde. Diese Eingriffe wurden zunächst an einzelnen Standorten überprüft: Die Kläranlagen wurden nicht auf einen Schlag gebaut, sondern über viele Jahre weiter verfeinert; und die Belüftungsanlagen wurden zunächst im Baldeggersee erprobt, bevor sie auch im Sempachersee zum Einsatz kamen. Dadurch wurde das Risiko unerwünschter Nebenwirkungen minimiert. Grundsätzlich wäre jede dieser Maßnahmen reversibel gewesen, da alle Anlagen außer Betrieb genommen werden könnten.

Obwohl der Bau von Kläranlagen allein nicht ausreichte, um die Gewässerschutzziele zu erreichen, war diese Maßnahme zweifelsfrei sinnvoll, da durch keine andere Maßnahme eine ähnlich große Wirkung hätte erzielt werden können. Das grundsätzliche Ziel, die Phosphoreinträge so weit wie möglich zu reduzieren, wird auch heute noch als erstrebenswert erachtet. Ähnlich verhält es sich mit den Bemühungen, die landwirtschaftlichen Phosphoreinträge zu minimieren, auch wenn Landwirte bisweilen über Einschränkungen klagen, die sie daran hindern, auf ihrem Land optimale

Erträge zu erwirtschaften. Auch die Seebelüftung kann rückblickend als sinnvoll betrachtet werden, da sie dazu beigetragen hat, den See während seiner kritischen eutrophen Phase mit Sauerstoff zu versorgen.

Betrachtet man die Abfolge einzelner Vorgehensweisen, so fällt auf, dass gerade das Scheitern einzelner Maßnahmen – im Sinne einer Wirksamkeit, die geringer war als die ursprünglichen Erwartungen – wichtige Impulse zur Entwicklung weitergehender Maßnahmen gab: Hätte der Bau der Kläranlagen ausgereicht, so wäre die Seebelüftung nie in Betrieb genommen worden; und hätte die Seebelüftung einen deutlicheren Einfluss auf den Phosphor-Rückhalt gehabt, so wären die Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft seit den 1990er Jahren nicht so energisch vorangetrieben worden.

Bei der Suche nach wirksameren Maßnahmen spielten zudem neue wissenschaftliche Erkenntnisse eine zentrale Rolle. Bereits die frühe Gründung eines Gewässerschutzamtes im Jahr 1959 basierte auf der Erkenntnis, dass der Zustand der Gewässer zu einem ernst zu nehmenden Problem werden könnte, obwohl die Seen im Kanton Luzern sich zu diesem Zeitpunkt noch in einem relativ guten Zustand befanden. Die Wissenschaft nahm hier ihre Rolle als Früherkennerin von Problemen wirkungsvoll wahr.

Auch der Bau von Kläranlagen seit Ende der 1960er Jahre entsprach dem damals neuesten Stand des Wissens. Als sich dies allein als unzulänglich erwies, wurde ein umfangreiches wissenschaftliches Gutachten in Auftrag gegeben, um weitere mögliche Optionen zu eruieren. Dabei zeigte sich, dass das verfügbare wissenschaftliche Wissen nicht immer nur positive Impulse gibt, sondern auch in eine Richtung führen kann, die sich vorübergehend als Umweg entpuppt. Beispiele hierfür sind die Einschätzung, der zufolge Phosphor nicht aus landwirtschaftlichen Böden ausgewaschen wird, und die Annahme, dass sauerstoffhaltige Verhältnisse im Tiefenwasser eines Sees bereits ausreichen, um den Phosphor-Rückhalt im Sediment langfristig zu erhöhen. Ohne diese Einschätzungen wäre die Belüftungsanlage möglicherweise nie gebaut worden, und man hätte vielleicht bereits früher mehr Gewicht auf (see-externe) Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft gelegt. Allerdings ist fraglich, ob dies von Vorteil gewesen wäre: Einerseits hätten dann im Tiefenwasser des Sees häufig sauerstofffreie Bedingungen geherrscht, und andererseits bestand erst seit den späten 1980er Jahren (wieder) das bodenkundliche Wissen, das dabei half, den Mechanismus der Phosphorauswaschung zu rekonstruieren.

Wissenschaftliche Impulse waren dabei mehrmals entscheidend für die Anpassung der gewählten Strategien. Wäre die Theorie von Einsele und Mortimer nicht bereits Mitte der 1970er Jahre verfügbar gewesen, so wäre die Seebelüftung vermutlich nicht in Betrieb genommen worden. Als sich

dann später das Sedimentstapelkonzept an der EAWAG durchsetzte, führte dies umgekehrt dazu, dass die Belüftung in Frage gestellt wurde. Als etwa zeitgleich die Bedeutung des schnellen Phosphortransports erkannt wurde, führten die Erkenntnisse der beiden Studien dazu, dass der Schwerpunkt der Maßnahmen von der Belüftung auf die Landwirtschaft verschoben wurde.

Die Erfahrungen mit der Sanierung des Sempachersees könnten in Zukunft in die Planung von Realexperimenten einfließen. Realexperimente sind dann am wirkungsvollsten, wenn sie auf dem Hintergrund des aktuell verfügbaren Wissens konzipiert werden und wenn dabei von Anfang an Beobachtungen geplant werden, die geeignet sind, Überraschungen zu offenbaren. Hierfür sind insbesondere regelmäßige Beobachtungen unter den realen Umweltbedingungen wertvoll. Resultieren aus diesen Beobachtungen überraschende Erkenntnisse, so kann auf der Grundlage kontrollierter Experimente das Verständnis der Kausalzusammenhänge weiter entwickelt werden. Auf diese Weise kann eine Grundlage dafür geschaffen werden, dass sich sowohl das theoretische Wissen als auch das Wissen um wirksame Maßnahmen weiter entwickeln kann.

Vor diesem Hintergrund lässt sich auch unser letzter Fall im folgenden Kapitel 7 rekonstruieren. Es geht um die experimentelle Entwicklung der Abfallwirtschaft in Deutschland seit der Zeit der ›wilden Müllkippen‹ im frühen 20. Jahrhundert. Bei diesem Fall handelt es sich um ein Hineinschlittern in ein experimentelles Design. Im Laufe der Jahrzehnte wurde dieses Design jedoch immer mehr verfeinert und stellt mittlerweile ein äußerst komplexes und ausgeklügeltes Realexperiment dar.

