

Phosphorabschwemmung von Graslandflächen in der Schweiz - Eintragspfade und Maßnahmen zur Verminderung

Volker Prasuhn^{1*}

Zusammenfassung

Die schweizerischen Mittellandseen weisen seit Jahrzehnten zu hohe Konzentrationen an Phosphor auf. Die Ursache ist eine zu hohe Phosphorfracht über die Zuflüsse. Vor allem die Landwirtschaft mit intensiver Tierhaltung und hohem Phosphoranfall wird für die Phosphorzufuhr in drei Luzerner Seen verantwortlich gemacht. Phosphoreinträge durch Abschwemmung und aus Drainagen von Graslandflächen sind dabei die wichtigsten Eintragspfade. Mit nationalen und regionalen Maßnahmenprogrammen sollen diese Seen langfristig saniert werden. Umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen haben die Grundlagen dafür geschaffen. Die Phosphorkonzentrationen in den Seen sind erfreulicherweise stark zurückgegangen und das Sanierungsziel von $<30 \text{ mg P/m}^3$ wurde teilweise erreicht. Die gemessenen Phosphorfrachten in den Zuflüssen sind zunächst ebenfalls gesunken, allerdings sind sie immer noch zu hoch und in den letzten Jahren sogar - bisher unerklärlich - wieder angestiegen.

Schlagwörter: Phosphorverluste, Gewässerbelastung, Seesanie rung, Landwirtschaft

Einleitung

Phosphor (P) ist der limitierende Faktor für das Wachstum von Algen in den Seen. Ein erhöhter Eintrag von P führt zur Eutrophierung der Seen. Der Eintrag von P erfolgt über zwei Eintragspfade: punktuelle Quellen aus dem Siedlungsgebiet (kommunale und industrielle Kläranlagen, Regenwasserentlastungen) oder diffuse Quellen (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung etc.) aus Landwirtschaft, Wald etc. sowie atmosphärische Deposition. Aufgrund der großen Erfolge bei der Reduktion der P-Einträge aus punktuellen Quellen hat der relative Anteil der Landwirtschaft an den Einträgen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen. Vor allem in intensiv genutzten Landwirtschaftsgebieten besteht noch Handlungsbedarf. Maßnahmen zur Verminderung der P-Einträge in die Gewässer aus der Landwirtschaft müssen dringend entwickelt, getestet und umgesetzt werden. Die seit 2006 laufende internationale COST869-Aktion: „Mitigation options for nutrient reduction in surface water and groundwaters“ hat sich dieser Thematik angenommen. Hier ist auch ein umfangreicher Katalog von Maßnahmen zur Verminderung diffuser Phosphor- und Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Gewässer zu finden. Neben den bekannten Erosionsproblemen in Ackerbauregionen kann

auch die P-Abschwemmung von Grasland in Regionen mit hoher Viehdichte zu Gewässerbelastungen mit P führen.

Die Phosphor-Problematik der drei Mittellandseen

Die drei Schweizer Mittellandseen Sempacher-, Baldegger- und Hallwilersee entstanden nach der letzten Eiszeit aus Toteislöchern. Die Landschaft in den Einzugsgebieten ist geprägt von intensiver Landwirtschaft mit Grünlandbewirtschaftung und Tierhaltung (*Tabelle 1*). Die Jahresniederschläge liegen bei rund $1'100 \text{ mm}$. Die Böden sind häufig schlecht durchlässige Lehme; viele Böden sind drainiert. Das Relief ist stark bewegt.

Seit den 1960er Jahren sind die P-Konzentrationen in den Seen bis in die 1980er Jahre stark angestiegen (*Abbildung 1*). Als Folge der starken Überdüngung traten ab den 1960er Jahren verschiedentlich Probleme (z.B. Sauerstoffmangel, Fischsterben, Algenblüten, Beeinträchtigung der Badequalität) in den Seen auf. Zunächst wurden Maßnahmen bei der Siedlungsentwässerung eingeleitet. Die zunehmende Intensivierung in der Landwirtschaft mit Erhöhung der Tierbestände - vor allem Schweine - verschärfte jedoch die P-Problematik zunehmend. Die P-Gehalte stiegen kontinuierlich und erreichten Maximalwerte im Sempachersee 1983 mit 164 mg P/m^3 , im Baldeggersee 1974 mit 517 mg P/m^3 und im Hallwilersee 1977 mit 260 mg P/m^3 (*Abbildung 1*). Rund 30 mg P/m^3 gelten für die drei Seen als

Tabelle 1: Kenndaten der drei Seen (Stand 2000), (Quelle: STADELMANN et al. 2005, verändert)

	Sempachersee	Baldeggersee	Hallwilersee
Seefläche (km ²)	14.4	5.2	10.2
Volumen (km ³)	0.640	0.173	0.285
Maximale Tiefe (m)	87	66	47
Mittlere Aufenthaltszeit des Wassers (Jahre)	14.9	4.2	3.9
Höhe über Meer (m)	505	463	449
Einzugsgebietsfläche (ha)	6'190	6'780	5'510*
davon landwirtschaftliche Nutzfläche (ha)	4'800	5'400	3'800
Anzahl Betriebe	350	381	289
offene Ackerfläche (% von LN)	20	25	37
Tierbestand in Düngergroßvieheinheiten	11'500	11'300	6'200
Tierbestand DGVE/ha Nutzfläche	2.6	2.2	1.7
Einwohner im Einzugsgebiet	13'000	15'000	15'000

*unterhalb Baldeggersee

¹ Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstraße 191, CH-8046 ZÜRICH

* Ansprechpartner: volker.prasuhn@art.admin.ch

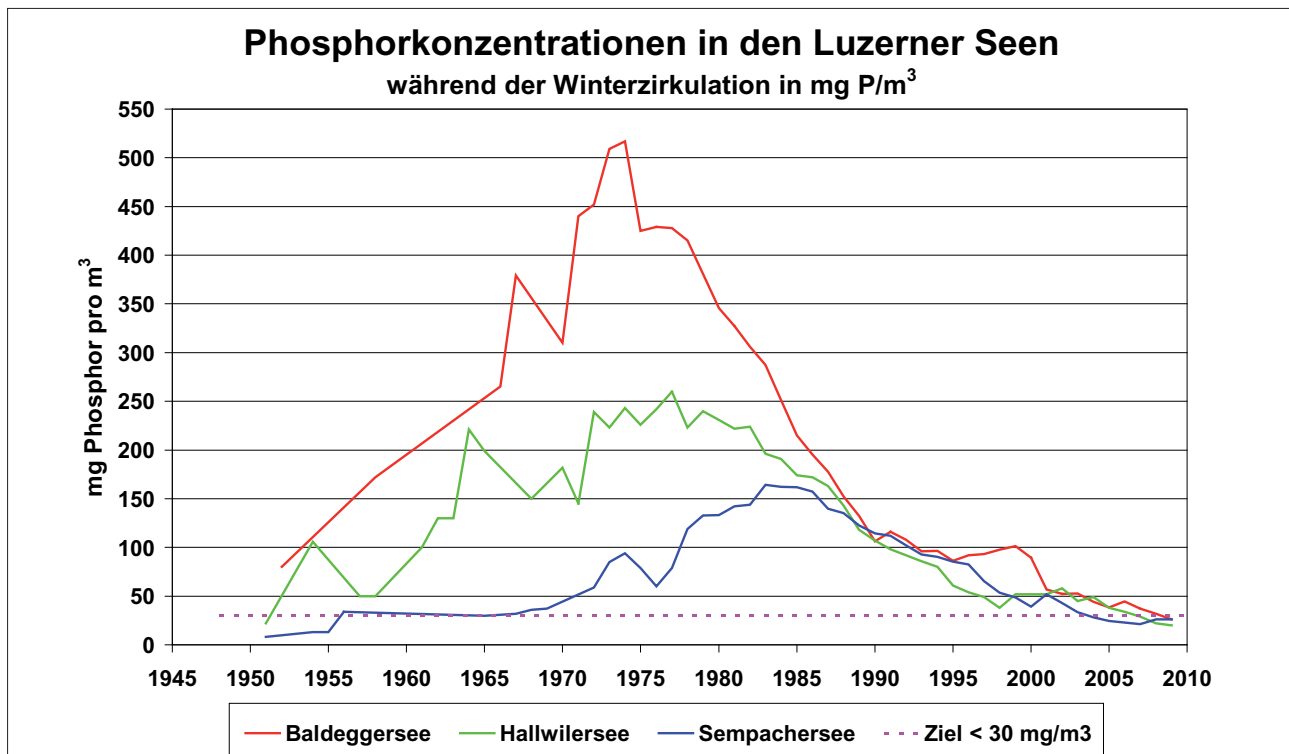


Abbildung 1: Entwicklung der P-Konzentrationen in den drei Seen von 1950 bis 2009. (Quelle: Amt für Umwelt und Energie Luzern UWE, 2009)

kritischer Wert, der nicht überschritten werden sollte. Der Baldeggersee wurde 1982 als erster der drei Seen künstlich belüftet. Eine Tiefenwasserbelüftung im Sommer mit Zufuhr von Rein-Sauerstoff und eine Zwangszirkulation im Winter mit Druckluft sollten die Sauerstoffsituation am Seegrund verbessern. Die gleichen Belüftungsanlagen wurden 1984 im Sempachersee und 1985 im Hallwilersee eingebaut. Alle drei Belüftungsanlagen sind bis heute in Betrieb, statt Rein-Sauerstoff wird im Sempachersee aber nur noch Luft im Sommer zugeführt. 1984 führte das Massenwachstum von Blaualgen zu einem katastrophalen Fischsterben im Sempachersee. Dadurch gelangte die P-Problematik schlagartig in die öffentliche Wahrnehmung. Daraufhin wurde ein Sanierungskonzept beschlossen. Neben den see-internen Maßnahmen (Belüftung) sollten nun vor allem auch see-externe Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft umgesetzt werden.

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt die zeitliche Entwicklung wichtiger nationaler, kantonaler oder regionaler Maßnahmen:

- Ende 1960er bis Ende der 1970er Jahre: Maßnahmen bei der Siedlungsentwässerung (Anschluss an Kläranlagen, technischer Ausbau der Kläranlagen).
- 1982: Ausbringungsverbot von Klärschlamm in der Landwirtschaft.
- 1982-84: künstliche Belüftung der Seen mit Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser im Sommer und durch Zwangszirkulation mit Druckluft im Winter.
- 1986: nationales Phosphor-Verbot in Textilwaschmitteln.

- 1986: Schaffung einer „Fachstelle für Ökologie“ im Landwirtschaftsamt des Kt. Luzern zur Beratung und Information der Landwirte.
- 1988: Ausscheidung eines Ufergürtels an den Seen mit Düngeverbot und Überführung in Naturschutzzonen.
- 1991: nationales Verbot von Gülleausbringung im Winter auf schneebedeckten, wassergesättigten oder gefrorenen Boden.
- 1993: Einführung von ökologischen Direktzahlungen (Anreiz für besondere ökologische Leistungen).
- 1996: Einführung des Ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN).
- 1999 - 2001: Start der P-Projekte Sempacher-, Baldegger- und Hallwilersee.
- 2002: Verordnung des Kt. Luzern über die Verminderung der Phosphorbelastung der Mittellandseen durch die Landwirtschaft.

Entwicklung der wissenschaftlichen Forschung an den drei Seen

Die P-Problematik der Seen stieß bei der Forschung verschiedenster Fachrichtungen und Institutionen auf reges wissenschaftliches Interesse. Im Zusammenhang mit der Belastung und Sanierung der drei Seen wurden über 200 wissenschaftliche Arbeiten publiziert (STADELMANN et al. 2002). Damit gehören die Seen, Zuflüsse und See-einzugsgebiete zu den weltweit am besten untersuchten und dokumentierten Gebieten. Im Laufe der Zeit nahmen Wissensstand und Erkenntnisgewinn stetig zu. Dies führte

aber auch zu unterschiedlichen Interpretationen bestehender Messdaten, was HOFFMANN-RIEM (2003) als ökologische Lernprozesse bezeichnet.

Neben zahlreichen Untersuchungen zur Gewässerqualität der Seen und see-internen Prozessen starteten seit den 1990er Jahren mehrere Projekte zur Erfassung der Eintragspfade von Phosphor aus der Landwirtschaft in die Zuflüsse. Nachdem BRAUN (1990) die Zusammenhänge zwischen Schneedecke, gefrorenem Boden und Gülleabschwemmung aufgezeigt hatte, begannen erste P-Abschwemmversuche mit Gülleausbringung auf Grasland-Testparzellen am Sempachersee (BRAUN et al. 1993). Von natürlichen Niederschlägen flossen durchschnittlich 1,5 bis 3% oberflächlich ab, die mittleren P-Konzentrationen im Oberflächenabfluss betragen 2,9 bzw. 3,5 mg P/l an zwei Standorten über zwei Jahre, mit einer Spitzenkonzentration von 26 mg P/l nach Gülleausbringung. Weiterhin zeigten die Versuche den Einfluss der Zeitdauer zwischen Gülleausbringung und Niederschlagsereignis sowie die Bedeutung von Extremereignissen auf die Jahresfracht. Als Folge wurde ein Merkblatt zur zeitgerechten Düngung publiziert (BLW & BUWAL 2004). STAMM (1997) und STAMM et al. (1998) konnten aufzeigen, dass neben Oberflächenabschwemmung auch Drainagewasser einen wesentlichen Beitrag zur P-Fracht leisten kann. Durch schnellen Transport von der Bodenoberfläche zur Drainage über präferentielle Fließwege wie Makroporen konnten sie gelöste P-Austräge von bis zu 1,29 kg P/ha pro Vegetationsperiode messen. GÄCHTER et al. (1996) und GÄCHTER und MÜLLER (1999) sahen den hohen P-Versorgungsgrad der Böden als Hauptursache für die P-Belastung des Sempachersees. Untersuchungen zur P-Verfügbarkeit der Böden (FROSSARD et al. 2005, KELLER und VAN DER ZEE 2004) und zu Maßnahmen zur Reduktion der P-Verfügbarkeit (SCHÄRER 2003) waren die Folge.

Evaluation der Ökomaßnahmen: Fallstudie Lippenrütibach

1993 wurden in der Schweiz ökologische Direktzahlungen eingeführt und damit Anreize zur integrierten Produktion (IP) und zum Bio-Landbau geschaffen. 1996 wurde der ökologische Leistungsnachweis (ÖLN), der die IP ablöste, in der Bundesverfassung verankert. Der ÖLN soll u.a. dazu beitragen, die Gewässerbelastung mit Phosphor zu reduzieren. Verschiedene agrarökologische Maßnahmen sind Bestandteil des ÖLN: ausgeglichene P-Bilanz des Betriebes, geeigneter Bodenschutz, geregelte Fruchtfolge, angemessener Anteil an ökologischen Ausgleichsflächen.

Um die Wirkung der Ökomaßnahmen auf die Verlustpfade beurteilen zu können, wurde als Fallbeispiel ein Zufluss zum Sempachersee, der Lippenrütibach, ausgewählt. Das Einzugsgebiet umfasst 334 ha; davon sind 255 ha landwirtschaftliche Nutzfläche (LN). 90% der LN sind Grasland, 10% sind offenes Ackerland. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 1'100 mm, der mittlere Jahresabfluss bei rund 600 mm. Bei den Böden dominieren mehrheitlich Braunerden und Gleye. 42% der Fläche haben gut durchlässige, 40% schlecht durchlässige Böden. 30 bis 40% der LN sind drainiert. Nach Abschätzungen von BRAUN et al. (2001)

stammten im Jahr 1998 rund 81% der P-Fracht im Lippenrütibach aus der Landwirtschaft und 7% aus Wald- und Siedlungsflächen; 12% waren natürliche Hintergrundlast.

P-Verluste durch Abschwemmung und Drainage sind gemäß Modellberechnungen in verschiedenen Regionen der Schweiz einer der wichtigsten P-Eintragspfade in die Gewässer. Vor allem in Grasland dominierten Gebieten mit hohem Viehbesatz kann es zu hohen P-Verlusten durch Abschwemmung kommen (PRASUHN und LAZZAROTTO 2005). Dabei können zum einen direkte Abschwemmungen von Hofdüngern (Gülle, Mist) nach Starkregenereignissen auftreten, zum anderen kann aber der Oberflächenabfluss auf Oberböden, die durch starke Gölledüngung in den vergangenen Jahrzehnten stark mit Phosphor angereichert worden sind, auch unabhängig von der momentanen Düngung zu hohen P-Verlusten führen (LAZZAROTTO 2004).

Um Maßnahmen zur Verringerung der P-Austräge möglichst gezielt und effizient einsetzen zu können, ist es nötig, die beitragenden Flächen zu identifizieren. Das von LAZZAROTTO (2004) entwickelte Niederschlag-Abfluss-Modell auf Einzugsgebietsebene hat gezeigt, dass im Lippenrütibach neben Niederschlagsmenge und -intensität die Durchlässigkeit der Böden und die Topografie die entscheidenden Faktoren für die Abflussprozesse sind (schneller Abfluss aus Oberflächenabfluss oder oberflächennaher Abfluss, langsamer Abfluss aus Sickerwasser); diese beiden Standortfaktoren ermöglichen somit die Ausscheidung der hauptsächlich zum Abfluss beitragenden Flächen. Der schnelle Abfluss ist für hohe P-Konzentrationen in Abflusswellen verantwortlich. Während bei kleinen Niederschlagsereignissen überwiegend die schlecht durchlässigen Böden zum schnellen Abfluss beitragen, leisten bei nassen Bodenverhältnissen oder Starkregen auch die gut durchlässigen Böden einen Beitrag (Abbildung 2). Das Niederschlag-Abfluss-Modell wurde mit einem P-Modell verknüpft (LAZZAROTTO 2004). Dabei wurden mit aus Feldversuchen abgeleiteten Parametern die P-Verluste durch die direkte Gülleabschwemmung und aus dem Bodenvorrat für die Vegetationsperiode des Jahres 1999 modelliert. Es zeigte sich, dass im Mittel nur rund 10% der P-Fracht unmittelbar aus der Gölledüngung stammten (Gülleabschwemmung mit Oberflächenabfluss); bei Einzelereignissen betrug der Anteil allerdings bis zu 30%. Rund 90% der P-Verluste waren im Durchschnitt bodenbürtig,

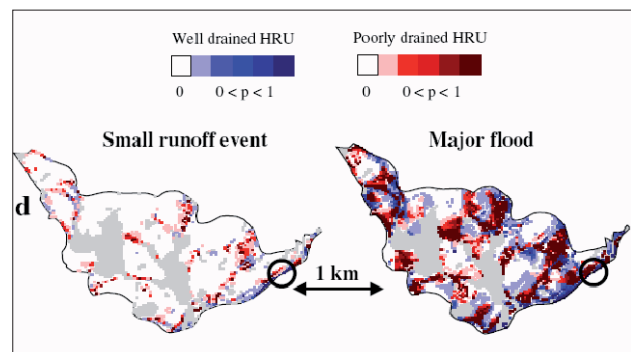


Abbildung 2: Wahrscheinlichkeit, ob eine Fläche zu Oberflächenabfluss führt, für zwei verschiedene Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet des Lippenrütibaches (Quelle: LAZZAROTTO 2004)

das heißt Phosphor ging bei Oberflächenabfluss aus dem Oberboden in Lösung und wurde direkt oder über Drainagen in den Lippenrütibach transportiert. Zusammenfassend lassen sich folgende Schlüsse aus den Modellierungen von LAZZAROTTO (2004) und LAZZAROTTO et al. (2006) ziehen:

- Die Unterscheidung von gut und schlecht durchlässigen Böden ist ausreichend, um mittlere und hohe Abflussereignisse gut zu simulieren.
- Das gewählte Modell kommt mit nur 10 Modellparametern aus.
- Die gleichzeitige Kalibrierung in 4 Einzugsgebieten ergibt eine robuste Parameterabschätzung.
- Neben den schlecht durchlässigen Böden tragen bei größeren Ereignissen auch die gut durchlässigen Böden maßgeblich zum Abfluss bei.
- Bei der räumlichen Verteilung der abflussbeitragenden Flächen konnte nur wenigen Flächen ein eindeutiges Risiko nachgewiesen werden.
- Die Dynamik der gelösten P-Verluste wird gut reproduziert, obwohl nur experimentelle Daten ohne weitere Kalibrierung verwendet wurden.
- Die P-Verluste aus der Bodenmobilisierung überwiegen gegenüber den P-Verlusten aus direkter Gülleabschwemmung deutlich.

Bezüglich der Evaluation des Einflusses der Ökomaßnahmen auf die P-Austräge im Einzugsgebiet Lippenrütibach ziehen PRASUHN und LAZZAROTTO (2005) folgendes Fazit:

- Der Deckungsgrad der P-Bilanz aller Betriebe im Lippenrütibach hat sich im Mittel von 150% (1992) auf 93% (2003) massiv reduziert. Da keine parzellenscharfe Düngungsplanung verlangt wird, kann aber auf einzelnen Parzellen immer noch eine P-Anreicherung stattfinden.
- Die P-Gehalte der Böden weisen zu einem großen Teil hohe Werte auf (über 50% in den P-Versorgungsklassen D und E). Viele Böden sind durch die jahrzehntelange intensive Düngung mit Phosphor überversorgt worden und werden es teilweise immer noch.
- Witterungsbedingte Einflüsse überlagern eventuelle Wirkungen von Maßnahmen.
- Ungenauigkeiten bei der Frachtberechnung von P im Bach erlauben auch bei abflussbereinigten Jahresfrachten erst über einen Zeitraum von 6 bis 10 Jahren zuverlässige Aussagen.
- Ereignisbezogene P-Verluste, die in direktem Zusammenhang mit der Düngerausbringung stehen, haben nur einen relativ kleinen Anteil an der Jahresfracht. Dies ist ein Indiz dafür, dass heute überwiegend die «gute landwirtschaftliche Praxis» im Bereich der Düngung (z.B. Richtlinien zur Düngung zur richtigen Zeit) befolgt wird.
- Der überwiegende Teil der Jahresfracht ist bodenbürtig und stammt vor allem aus den mit Phosphor überversorgten Böden.
- Auch wenn die P-Düngung reduziert wird, nehmen die P-Gehalte der Böden nur langsam ab. Daher kann auch die bodenbürtige P-Fracht nur sehr langsam abnehmen.

- Die große Reduktion des P-Inputs aus der Landwirtschaft (Abbau der Überschüsse) führt also nicht unmittelbar zu einer Reduktion des P-Outputs (Fracht im Bach). Eine deutliche Abnahme kann erst dann erfolgen, wenn die hohen wasserlöslichen P-Gehalte des Oberbodens abgebaut sind. Eine Reduktion der Düngung ist der richtige Weg dorthin, sie muss aber parzellenspezifisch erfolgen, das heißt die Parzellen, die hohe wasserlösliche Boden-P-Gehalte und somit ein hohes Verlustrisiko aufweisen (abflussbeitragende Flächen), sind «hot spots», auf denen eine deutlich reduzierte Düngung dringend notwendig ist.
- Das Ziel einer Reduktion der P-Belastung aus der Landwirtschaft um 50% zwischen 1990/92 und 2005 wurde nicht erreicht. Der P-Input konnte im Lippenrütibach-Einzugsgebiet zwar um rund 30% vermindert werden, und die massiven P-Überschüsse der Betriebsbilanzen wurden in ein Defizit umgewandelt. Im Bach selbst hat sich dies aber noch nicht messbar niedergeschlagen. Die Einführung der Ökomaßnahmen ist zwar über 10 Jahre her, der Zeitraum ist aber trotzdem zu kurz, um gesicherte Aussagen machen zu können.

Phosphorprojekte an den drei Mittellandseen

Da die Maßnahmen des ÖLN in besonders stark belasteten Regionen nicht – oder viel zu langsam – zum gewünschten Sanierungsziel führen dürften, wurde 1999 im Gewässerschutzgesetz ein Artikel eingeführt, durch den über die im ÖLN vorgeschriebenen Maßnahmen hinaus gehende Maßnahmen zusätzlich entschädigt werden können. In den Jahren 1999, 2000 und 2001 wurden im Sempacher-, Baldegger- und Hallwilersee solche sogenannten „Phosphorprojekte“, gestützt auf das Gewässerschutzgesetz Art. 62a, lanciert. Es werden verschiedene Maßnahmen – als Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenpakete – angeboten und mit Beiträgen entschädigt. Die Vertragsdauer beträgt 1 - 6 Jahre, die Finanzierung erfolgt über das Bundesamt für Landwirtschaft (rund 80%) und den Kanton (rund 20%). Folgende Verträge und Entschädigungen werden angeboten: Seevertrag, verminderter Phosphoreinsatz, Direkt- und Frässaat, Puffer-, Grünland- und Erosionsschutzstreifen, Vereinbarung über die Extensivierung nicht belastbarer Flächen, Stallstilllegungen. Nachfolgend sind die Maßnahmen des Seevertrags (Stand 2009) gemäß KANTON LUZERN (2009) aufgelistet, genauere Beschreibungen und die Entschädigungsansätze sind Merkblättern des Kantons zu entnehmen.

- Die Erfüllung des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) ist Voraussetzung für die Teilnahme am P-Projekt.
- An allen Gewässern besteht ein Pufferstreifen (mindestens 5 m breit).
- Mindestens 5% der LN sind als nicht düngbare Fläche beim ökologischen Ausgleich ausgeschieden.
- Die Nährstoffbilanz beim Phosphor ist kleiner oder gleich 100%. Für die Berechnung der Nährstoffbilanz wird der Phosphorgehalt der Böden berücksichtigt: Böden der Versorgungsklasse A, B, C: maximal 100% des Phosphorbedarfs; Böden der Versorgungsklasse D, E: maximal 80% des Phosphorbedarfs.

- Maximaler Phosphoraustrag pro ha LN: 87.5 kg/Jahr.
- Alle 5 Jahre Bodenanalysen.
- Zeitgerechter Hofdüngereinsatz: Ackerbau: kein Gülleinsatz 1. Oktober bis 15. Februar; Wiesland: kein Gülleinsatz 15. November bis 15. Februar.
- Keine Winterbrache. Sämtliche Ackerflächen müssen am 15. November des laufenden Jahres mit einer Kultur angesät sein. Ein Umbruch darf erst nach dem 15. Februar erfolgen.
- Alle Ackerkulturen müssen ab einer Hangneigung von 18% mit Streifenfräsaat oder Direktsaat angebaut werden.
- Anteil Futterrüben, Zuckerrüben, Kartoffeln, Silomais und Körnermais maximal 20% an der Ackerfläche (= Offene Ackerfläche und Kunstwiesen). Flächen, die mit Streifenfräsaat, Direktsaat oder Untersaat bestellt werden, zählen nur zur Hälfte.
- Bauliche Anforderungen: Waschplatz für Maschinen, Hofplatzentwässerung nicht direkt in Vorfluter, keine Schächte im Hofbereich mit direkter Einleitung in Vorfluter, keine offenen Schächte im Kulturland, doppelte Abschiebung von Verbindungsleitungen bei Güllegruben mit unterschiedlichem Niveau, dichte Hofdüngerlagerbehälter und keine Güllezapfstellen in der Nähe von Gewässern.
- Technische Strassenentwässerungen: entweder schließen, 3m breiter düngerfreier Grünlandstreifen oder 6m Radius keine Düngung.

- Jährliche Teilnahme an einer Weiterbildungsveranstaltung zum P-Projekt.

Im Antrag für „Phosphorprojekte“ muss aufgezeigt werden, welche dieser Maßnahmen in welchem Umfang nötig sind, um das Ziel zu erreichen. Modellrechnungen zur Frachtreduktion müssen zeigen, dass durch die vorgeschlagenen Maßnahmen und geschätzte Beteiligungen der Landwirtschaftsbetriebe die Sanierung innerhalb von 10 Jahren möglich ist. Dazu wurden der Maßnahmenkatalog und Reduktionspotenziale der Maßnahmen von PRASUHN et al. (1997) als Grundlage verwendet.

Die Beteiligung der Landwirte an den Projekten ist hoch, über 75% der LN ist in den Einzugsgebieten der Seen mit einer oder mehreren Maßnahmen unter Vertrag (KANTON AARGAU 2007). Die Wirkung der Maßnahmen soll durch umfangreiche Messungen in den Seen und den Zuflüssen sichtbar werden. Monatlich werden im Sempacher- und Baldeggersee an der tiefsten Stelle von der Oberfläche bis zum Grund Wasserproben entnommen (Tiefenprofil) und analysiert. Mittels Modell kann die P-Konzentration im See errechnet werden. Von 1984 bis 2000 ist die P-Konzentration im Sempachersee, von 1980 bis 1990 im Baldeggersee stark zurück gegangen, sank danach jeweils nur noch langsam ab und liegt heute im Bereich des Zielwertes (Abbildung 3).

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der gelösten P-Jahresfrachten sowie der Gesamt-P-Jahresfrachten verschiedener Zuflüsse ist kein Trend zu erkennen. Eventuelle Wirkungen von Maßnahmen werden durch witterungsbedingte Streuungen überlagert. Der direkte Einfluss des hydrologischen Regimes kann dadurch eliminiert werden, dass die jeweils über drei Jahre gleitenden Konzentrations-Abfluss-Beziehungen mit einer Abflussverteilung eines bestimmten Jahres kombiniert werden. Deshalb wurde die zeitliche Veränderung unter der Annahme eines unveränderten Abflusses (Standardabflussjahr 1990) bestimmt (Abbildung 4). Von 1986 bis 2003 ist eine signifikante Abnahme der gelösten P-Jahresfrachten der Zuflüsse des Sempachersees erkennbar. Der Wiederanstieg seit 2004 konnte bisher nicht geklärt werden.

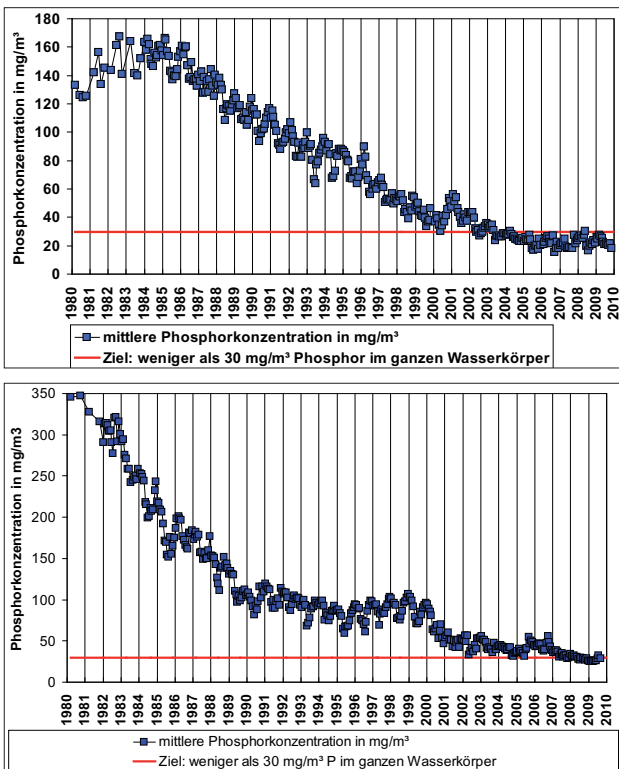


Abbildung 3: Entwicklung der monatlich gemessenen P-Konzentrationen im Sempachersee (oben) und Baldeggersee (unten). (Quelle: Amt für Umwelt und Energie Luzern, UWE 2009)

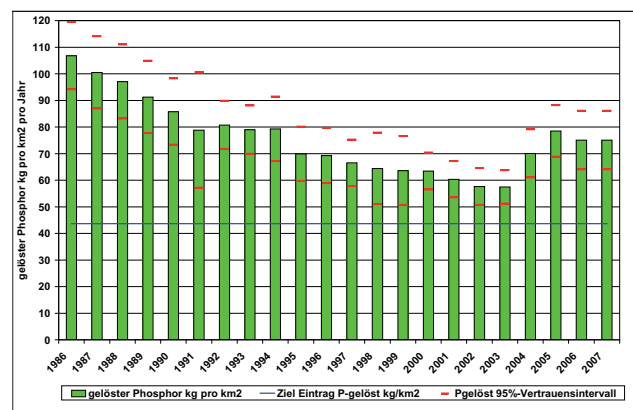


Abbildung 4: Klima unabhängige Modellrechnung der bodenbürtigen Einträge von gelöstem Phosphor in den Sempachersee aus dem gesamten Seeinzugsgebiet 1986 bis 2007. Median der Jahresflüsse = Standardabflussjahr = 1990 (Quelle: Amt für Umwelt und Energie Luzern, UWE 2009)

Fazit und Ausblick

Umfangreiche Forschungsaktivitäten haben das nötige Grundlagenwissen für die Seensanierung der Luzerner Mittellandseen geschaffen. Die Wirkungsmechanismen werden heute besser verstanden, allerdings tauchen auch immer wieder unvorhersehbare Entwicklungen und Überraschungen auf. Durch ein auf einem Anreizsystem basiertes Maßnahmenprojekt wurde ein neues Verständnis der Landwirte für die P-Problematik geschaffen, weiterhin wurde eine Sensibilisierung der Bevölkerung erreicht. Dies ist für den langfristigen Erfolg unabdingbar, denn die Seensanierung ist zeitaufwändig, braucht eine intensive Beratung und kostet viel Geld (BLUM 2005). Der bisherige Verlauf der P-Konzentrationen in den drei Seen scheint die Effizienz der „Phosphorprojekte“ zu bestätigen. Die immer noch zu hohen Frachten der Zuflüsse und der erneute Anstieg der P-Frachten in den letzten Jahren wirft aber auch Fragen auf. See-interne Prozesse – die Seen werden ja immer noch künstlich belüftet – scheinen unabhängig oder zeitlich verzögert auf die P-Zufuhr durch die Zuflüsse zu reagieren.

Die Forschungsaktivitäten in den Seen und Seeneinzugsgebieten gehen weiter. Beregnungsexperimente mit und ohne Gülleapplikation sollen zum Beispiel die Datengrundlagen für die Modellierung verbessern und das bestehende Modell von LAZZAROTTO (2004) auch für andere Einzugsgebiete einsetzbar machen (HAHN et al. 2009). Die Erkenntnis, dass nur wenige Flächen maßgeblich zur Gewässerbelastung mit Phosphor beitragen, soll im Projekt „Kartierung der beitragenden Flächen“ weiterentwickelt werden (KONZ et al. 2009).

Literatur

- BLUM, J., 2005: Maßnahmen in der Landwirtschaft für die Gesundheit des Sempachersees. In: 20 Jahre Einsatz für einen gesunden Sempachersee. Umwelt und Energie (uwe) und Landwirtschaft und Wald (lawa) Kanton Luzern, S. 89-154.
- BLW und BUWAL (Hrsg.), 2004: Merkblatt: Düngen zur richtigen Zeit, 2. unveränderte Auflage.
- BRAUN, M., 1990: Zusammenhänge zwischen Schneedecke, gefrorenem Boden und Gülleabschwemmung. Diss ETH Nr. 9170, Zürich, 220 S.
- BRAUN, M., P. HURNI und N. VONALBERTINI, 1993: Abschwemmung von Phosphor auf Grasland an zwei verschiedenen Standorten im Einzugsgebiet des Sempachersees. Landwirtschaft Schweiz 6(10), 615-620.
- BRAUN, M., C. WÜTHRICH-STEINER, N. ASCHWANDEN und F. DENOTH, 2001: Wirkungskontrolle der Öko-Maßnahmen in der Landwirtschaft. Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Abschwemmung. Bundesamt für Statistik, Statistik der Schweiz, Fachbereich 7 Land- und Forstwirtschaft, Neuchâtel, 132 S.
- FROSSARD, E., S. BOLOMEY, T. FLURA und S. SINAJ, 2005: Phosphor im Boden und Düngestrategie – Der Fall Baldeggersee. Umwelt- Materialien 206, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BAFU), Bern, 65 S.
- GÄCHTER, R., A. MARES, C. STAMM, U. KUNZE und J. BLUM, 1996: Dünger düngt Sempachersee. Agrarforschung 3(7), 329-332.
- GÄCHTER, R. und B. MÜLLER, 1999: Die bodenbürtige P-Belastung des Sempachersees. Gas Wasser Abwasser 6, 460-466.
- HAHN, C., V. PRASUHN, C. STAMM und R. SCHULIN, 2009: Assessing phosphorus losses from soil and manure to enhance predictions of critical source areas. Abstract International Conference on Land and Water Degradation, Magdeburg, 64.
- HOFFMANN-RIEM, H., 2003: Die Sanierung des Sempachersees. Eine Fallstudie über ökologische Lernprozesse. Ökonom-Verlag München, 252 S.
- KANTON AARGAU, 2007 (Hrsg.): Sanierung Hallwilersee – 20 Jahre Seebelüftung. Umwelt Aargau, Sondernummer 24, 54 S.
- KANTON LUZERN, 2009: Phosphorprojekt: <http://www.lawa.lu.ch/index/landwirtschaft/phosphorprojekt-2.htm>
- KELLER, A. und S. VAN DER ZEE, 2004: Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Graslandflächen. Agrarforschung 11(9), 396-401.
- KONZ, N., M. FREY, V. PRASUHN und C. STAMM, 2009: Mapping of contributing areas for diffuse water pollution - a study of feasibility. Abstract COST869 Workshop Nottwil, 37.
- LAZZAROTTO, P., 2004: Modeling phosphorus runoff at the catchment scale. Diss ETH Nr. 15857, Zürich, 166 S.
- LAZZAROTTO, P., C. STAMM, V. PRASUHN und H. FLÜHLER, 2006: A parsimonious soil-type based rainfall-runoff model simultaneously tested in four small agricultural catchments. Journal of Hydrology, 321, 21-38.
- PRASUHN, V. und P. LAZZAROTTO, 2005: Abschwemmung von Phosphor aus Grasland im Einzugsgebiet des Sempachersees. Schriftenreihe der FAL 57, Zürich, 95-107.
- PRASUHN, V., M. BRAUN und D. KOPSE ROLLI, 1997: Maßnahmen zur Verminderung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Gewässer, dargestellt am Beispiel von 20 hydrologischen Einzugsgebieten im Kt. Bern. Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft Bern, 216 S.
- SCHÄRER, M., 2003: The influence of processes controlling phosphorus availability on phosphorus losses in grassland soils. Diss ETH Nr. 15312, Zürich, 140 S.
- STADELMANN, P., R. LOVAS und E. BUTSCHER, 2002: 20 Jahre Sanierung und Überwachung des Baldeggersees. Mitt. Naturforsch. Gesell. Luzern, 37, 115-164.
- STADELMANN, P., P. HERZOG und R. LOVAS, 2005: 20 Jahre Sempachersee-Sanierung. Zustandsentwicklung des Sempachersees und getroffene Gewässerschutzmaßnahmen. In: 20 Jahre Einsatz für einen gesunden Sempachersee. Umwelt und Energie (uwe) und Landwirtschaft und Wald (lawa) Kanton Luzern, S. 1-87.
- STAMM, C., 1997: Rapid transport of phosphorus in drained grassland soils. Diss ETH Nr. 12486, Zürich.
- STAMM, C., H. FLÜHLER, R. GÄCHTER, J. LEUENBERGER und H. WUNDERLI, 1998: Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. J. Environ. Quality 27(3), 515-522.