

Abschätzung der tolerierbaren Phosphorfracht zum Hallwilersee



Beat Müller und Alfred Wüest

Eawag – Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs

Kastanienbaum, Oktober 2018

Einleitung und Fragestellung

Die drei Mittellandseen Baldeggersee, Sempachersee und Hallwilersee werden seit Beginn der 1980er Jahre mit Reinsauerstoff bzw. Luft belüftet, um über das ganze Jahr sauerstoffhaltiges Tiefenwasser zu gewährleisten. Die Sanierungsziele von einer Gesamt-Phosphor-Konzentration (TP) von $30 \mu\text{gP L}^{-1}$, welche für eine mittlere Produktion angenommen wurde, sowie einer Sauerstoffkonzentration (O_2) von 4 mg L^{-1} an jedem Ort und zu jeder Zeit, sind nach dem damaligen Wissensstand definiert worden und bedürfen nach bald 40 Jahren einer Revision.

Der Zusammenhang von Phosphorkonzentration und O_2 -Zehrung ist komplex und immer noch Thema aktueller Forschung. Obwohl die TP-Konzentration markant abnahm – in Baldegger- und Hallwilersee um ungefähr das 20-fache – veränderte sich die O_2 -Zehrungsrate im Tiefenwasser nicht signifikant (Müller et al., 2012a). Es zeigte sich, dass die Primärproduktion der Seen auch im TP-Konzentrationsbereich von $20 - 30 \mu\text{gP L}^{-1}$ immer noch unverändert hoch ist. Daher hat die Deposition von organischem Kohlenstoff auf dem Seegrund, der Eintrag von reduzierten Substanzen aus dem Sediment ins Tiefenwasser und damit die O_2 -Zehrung noch nicht merklich abgenommen.

Der bisherige Sauerstoffeintrag hat (ausser der Gewährleistung eines Lebensraums für höhere Organismen im Tiefenwasser) vor allem dazu beigetragen, das sedimentierte organische Material besser abzubauen und war (ist) eine gute Investition in die zukünftige Genesung der Seen.

Heute sind im Hallwilersee Werte zwischen $10 - 20 \mu\text{gP L}^{-1}$ erreicht. Die O_2 -Zehrung ist gesunken und auf eine Belüftung mit Reinsauerstoff kann verzichtet werden. Trotzdem treten im Tiefenwasser jeden Herbst O_2 -Konzentrationen von deutlich unter $4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ auf.

Dieser Bericht stellt den Zusammenhang von O_2 -Zehrung und TP-Konzentration im Hallwilersee dar und wir berechnen den anzustrebenden maximalen Eintrag von algenverfügbarem Phosphor, damit die gesetzlich geforderte O_2 -Konzentration von 4 mg L^{-1} im Tiefenwasser erreicht werden kann.

Die folgenden Fragen werden in diesem Bericht beantwortet:

- Kap. 1: Wie hat sich die O_2 -Zehrung mit abnehmender P-Konzentration entwickelt?
- Kap. 2: Was sind die Auswirkungen einer Senkung des P-Eintrags in den Hallwilersee auf die Rücklösung von reduzierten Substanzen aus dem Sediment?
- Kap. 3: Wie gross darf die TP-Konzentration sein, damit am Ende der Sommerstagnation im Mittel noch $4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ im Hypolimnion vorhanden sind? Welchem maximalen (kritischen) Eintrag von algenverfügbarem P entspricht dies? Wie gross ist die kritische P-Fracht bei Abschätzung mittels eines konzeptuellen Modells?
- Kap. 4: Wie setzt sich das P-Budget des Hallwilersees zusammen? Wie gross ist der Anteil des Baldeggersees am gesamten Eintrag?
- Kap. 5: Wie gross wäre der P-Austrag aus dem Baldeggersee, wenn dieser die Zielvorgaben eines maximalen Eintrags von 2.2 t a^{-1} erfüllte?

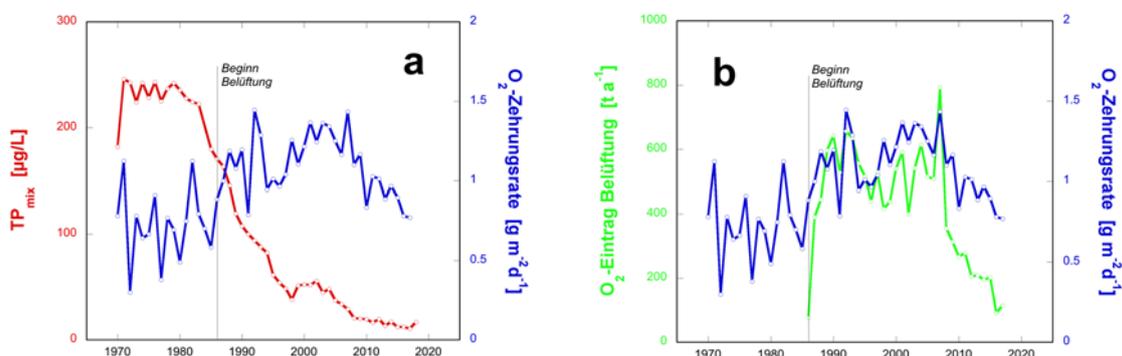
Tabelle 1: Charakteristik des Hallwilersees:

Oberfläche	9.95 km ²
Seefläche in 15 m Tiefe	8.02 km ²
Volumen ganzer See	0.285 km ³
Volumen Hypolimnion (> 15 m Tiefe)	0.151 km ³
Volumen Epilimnion (< 15 m Tiefe)	0.134 km ³
Maximale / mittlere Tiefe	46 m / 28.8 m
Mittl. Abfluss (2007-2017) Aabach, Seengen	76.7 Mio m ³ a ⁻¹
Hydraulische Aufenthaltszeit τ	3.72 a
Stratifikationsfaktor β (Messungen 2007-2017)	1.00

1. Entwicklung der Sauerstoffzehrung mit abnehmender Phosphor-Konzentration

Die O₂-Zehrungsrate lag in den Jahren 1970 bis 1985 im Durchschnitt bei 0.71 g m⁻² d⁻¹ und stieg durch die Belüftung auf 1.09 g m⁻² d⁻¹ an (Mittel der Jahre 1986 - 2017; Figur 1a). Dies ist vor allem dem verbesserten O₂-Gehalt im Hypolimnion geschuldet, der sich durch die Zirkulationshilfe im Winter erhöhte. Während die durchschnittliche Konzentration bei Vollzirkulation im März in den Jahren vor Betrieb der Zirkulationshilfe 6.6 ± 1.6 mgO₂ L⁻¹ betrug, lag sie nach den folgenden Wintern (1986 - 2018) recht zuverlässig bei 10.5 ± 0.5 mgO₂ L⁻¹.

Zusätzlich trug auch der durch die Belüftung während der produktiven Jahreszeit ins Hypolimnion eingetragene O₂ zur erhöhten O₂-Zehrungsrate bei, wie in Figur 1b qualitativ zu erkennen ist. Der Zusammenhang zwischen dem O₂-Angebot und der O₂-Zehrungsrate rührt daher, dass bei höherem Angebot auch mehr gezehrt werden kann, wie dies in Müller et al. (2012a) fundiert dargestellt wurde.



Figur 1: a) Verlauf der O₂-Zehrungsrate (blau) mit abnehmender Phosphor-Konzentration im Hallwilersee (rot). b) Die O₂-Zehrungsrate (blau) variiert leicht mit der Menge von künstlich zugeführtem Sauerstoff (grün).

1.1 Wohin verschwindet der durch die Belüftung zusätzlich eingebrachte Sauerstoff?

Durch ein knappes O₂-Angebot im Tiefenwasser des Sees wurde im Sediment ein Depot von reduziertem Material akkumuliert, welches bis heute nachwirkt. Der durch die Belüftung eingebrachte O₂ dient nicht nur der Aufrechterhaltung eines oxischen Tiefenwassers, sondern wird hauptsächlich zur Mineralisierung des sedimentierenden organischen Algenmaterials verbraucht. Dadurch werden im Sediment weniger reduzierte Substanzen eingelagert, welche innerhalb der jeweils nächsten 10 bis 15 Jahren v.a. als Methan (CH₄) und Ammonium (NH₄⁺) aus dem Sediment wieder ins Tiefenwasser zurückdiffundieren und dort zusätzliche O₂-Zehrung verursachen würden. Genügend O₂ im Tiefenwasser ist nicht nur eine Investition in die Zukunft indem die weitere Ablagerung reduzierten organischen Materials verhindert wird, sondern auch eine Vergangenheitsbewältigung, indem nachdiffundierende Substanzen aus dem Sediment oxidiert werden.

1.2 Warum nimmt die O₂-Zehrungsrate trotz sinkendem Phosphor nicht ab?

Die O₂-Zehrungsrate zwischen 1987 bis 2009 war zwar jährlichen Schwankungen unterworfen, zeigte sich jedoch von der Abnahme der P-Konzentration im See um den Faktor 8 während dieser Zeit unbeeinflusst. Offensichtlich war die Primärproduktion bzw. die Nettoproduktion (= Export von organischem Kohlenstoff aus der produktiven Zone ins Tiefenwasser) immer noch maximal, d.h. der See produzierte mit TP = 20 µgP L⁻¹ ähnlich viel organischen Kohlenstoff wie mit 170 µgP L⁻¹ vor dreissig Jahren.

Derselbe Effekt zeigt sich markant auch im Baldeggersee, wo Sedimentfallendaten aus den Jahren 1994 bis 1996 sowie 2013 bis 2014 zur Verfügung stehen. Die entsprechenden Kohlenstoff-Depositionsraten (Nettoproduktion) sind in beiden Zeitperioden gleich gross (~90 gC m⁻² a⁻¹), obwohl die mittlere TP-Konzentrationen im See (während vollständiger Durchmischung im März) in den 1990er Jahren 90 µg L⁻¹ und in den 2010er Jahren ~24 µg L⁻¹ betragen. Verändert hat sich jedoch das C : P Verhältnis des organischen Materials (in Sedimentfallen gemessen), das sich in dieser Zeit von 72 auf 204 fast verdreifachte. Dies deutet an, dass durch eine Veränderung der Phytoplankton-Gemeinschaft und Anpassung an die geringeren P-Konzentrationen auch mit viel weniger Nährstoff dieselbe Menge organisches Material erzeugt werden kann. Um die Primärproduktion zu senken muss die TP-Konzentration also wesentlich tiefer angesetzt werden als früher angenommen werden konnte. Es stellt sich daher die Frage, ab welcher TP-Konzentration die Primärproduktion bzw. die für die O₂-Zehrung relevante Nettoproduktion abzunehmen beginnt. Wir nennen dies im Folgenden die kritische TP-Konzentration, TP_{krit}.

2. Beitrag des alten Sediments zur Sauerstoffzehrung

Abgelagertes organisches Material im reduzierenden Sediment – wenige Millimeter unterhalb der Sediment-Wasser Grenze – setzt durch die anaerobe Mineralisation O₂-zehrende reduzierte Verbindungen frei, hauptsächlich CH₄ und NH₄⁺. In stark eutrophen Seen bzw. Seen mit eutropher

Vergangenheit ist der Fluss dieser Substanzen aus dem Sediment grösser als in meso- oder oligotrophen Seen, wo dieser Fluss Null werden kann und O₂ bis in die obersten Sedimentschichten eindringt (Steinsberger et al., 2017).

Für voll produktive Seen haben wir eine mittlere O₂-Zehrung durch reduzierte Substanzen aus dem Sediment von 0.4 gO₂ m⁻² d⁻¹ abgeschätzt (Müller et al., 2012a). Detaillierte Sedimentmessungen im Hallwilersee von Steinsberger et al. (2017) ergaben einen Bereich von 0.18 – 0.25 gO₂ m⁻² d⁻¹, und damit bloss etwa halb so viel wie z.B. im Baldeggersee. Damit ist im Hallwilersee das Sediment für nur noch ~20% der gesamten O₂-Zehrung verantwortlich. Dieser Anteil wird sich mit zunehmender Oligotrophierung weiter verringern (in einem oligotrophen See sedimentiert nur wenig organisches Material, welches zum grössten Teil direkt mit O₂ mineralisiert wird).

3. Abschätzung der kritischen TP-Fracht zum Hallwilersee

3.1 Annahme einer Proportionalität von O₂-Zehrung und P-Eintrag

Im Hallwilersee zeigte sich in den letzten Jahren (seit 2010) ein deutlicher Rückgang der O₂-Zehrungsrate (Figur 1). Die TP-Konzentration sank zu dieser Zeit unter 20 µgP L⁻¹. Die mit Sedimentfallen gemessene Nettoproduktion betrug in den Jahren 2013 bis 2015 noch 52 gC m⁻² a⁻¹. Blösch und Uehlinger (1986) publizierten für die Jahre 1982/1983 noch 113 gC m⁻² a⁻¹ und ein C : P-Verhältnis von 112, also sehr nahe dem klassischen Redfield-Verhältnis. Der für die O₂-Zehrung verantwortliche Fluss von organischem Kohlenstoff hat sich demnach seither etwa halbiert.

Wenn wir davon ausgehen, dass das aktuelle C : P-Verhältnis von 180 ± 62 durch die Oligotrophierung in Zukunft noch auf etwa 260 ansteigen wird (Kap. 3.2, Figur 2) und die Produktion proportional zur P-Fracht abnimmt, können wir auch die entsprechende O₂-Zehrung abschätzen:

- Der mittlere O₂-Inhalt des Tiefenwassers (> 15 m) nach der Wintermischung im Hallwilersee (2007 - 2017) beträgt 1578 ± 82 t.
- Am Ende der Stagnationsperiode von durchschnittlich 200 Tagen bleibt noch eine Menge von 243 ± 138 tO₂ im Tiefenwasser übrig.
- Dabei ist zu berücksichtigen, dass die künstlich zugeführte Menge O₂ (195 ± 65 t) ebenfalls zum Verbrauch zu rechnen ist.

Die O₂-Zehrung während der Stagnationszeit von 200 Tagen, welche verursacht wird durch die jährliche P-Fracht, berechnet sich daher als

$$\text{O}_2\text{-Zehrung [t]} = (\text{O}_2 \text{ max} + \text{O}_2 \text{ Belüftung} - \text{O}_2 \text{ Rest}). \quad \text{Gl. 1}$$

Der aktuelle mittlere Eintrag von 3.23 ± 0.55 tP a⁻¹ (2007 - 2017) verursacht also während der Stagnationszeit eine mittlere O₂-Zehrung von (1578 + 195 – 243) = 1530 ± 285 tO₂. Das entspricht einer Flächenzehrung im Hypolimnion von 0.95 ± 0.18 gO₂ m⁻² d⁻¹. Mit einbegriffen ist der

‚Sockelbeitrag‘ von $0.2 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (321 tO_2) aus der Oxidation von reduzierten Substanzen aus dem Sediment.

Eine mittlere Konzentration von $4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ im Tiefenwasser entspricht einem Gehalt von 604 t . Wenn auf die künstliche Belüftung verzichtet werden soll, darf die mittlere O_2 -Zehrung deshalb bloss $(1578 - 604) = 974 \text{ tO}_2$ betragen. Das entspricht einer Flächenzehrung im Hypolimnion von $0.61 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, davon wird ca. ein Drittel durch reduzierte Substanzen aus dem Sediment verursacht. Bleibt mittelfristig dieser Fluss gleich und ebenso das Verhältnis von C : P von 180 ± 65 resultiert ein **tolerierbarer Eintrag von bioverfügbarem P von** $(3.23 \pm 0.55) / (1578+195-243-321) \times (1578-604-321) = 1.74 \pm 0.30 \text{ tP}$. Es ist mit zunehmender Oligotrophierung jedoch anzunehmen, dass sich das C : P-Verhältnis wie bei anderen oligotrophen Seen auf bis zu 260 zunehmen wird. Dafür wird mit anhaltender Oligotrophie des Sees der Fluss reduzierter Substanzen aus dem Sediment vernachlässigbar. **Langfristig** kann daher mit einem **tolerierbaren Eintrag von** $(3.23 \pm 0.55 / (1578+195-243-321) \times (1578-604) \times (180/260) = 1.80 \pm 0.31 \text{ tP}$ gerechnet werden.

3.2 Genereller Zusammenhang der Sauerstoffzehrung mit der P-Belastung von Seen

Die O_2 -Zehrungsrate im Hypolimnion eines Sees nimmt mit abnehmender P-Belastung ab, da weniger autochthones organisches Material produziert wird. Unbekannt war bisher jedoch die kritische P-Belastung, bei der die maximale Produktion - welche nicht mehr von P limitiert wird und daher konstant maximal ist - in einen Zustand übergeht, in dem P direkt limitierend auf das Algenwachstum wirkt.

Wir verwenden hier die P-Belastung mit algenverfügbarem P als Kriterium. Das ist die Summe der Menge TP in der produktiven Oberflächenschicht (Epilimnion von 15 m Mächtigkeit) und der Eintragsfracht in diesem Jahr. Diese kann für die Produktion wesentlich sein, wenn die Zuflüsse während der Stagnationszeit einen wesentlichen Teil des zur Produktion beitragenden P liefern.

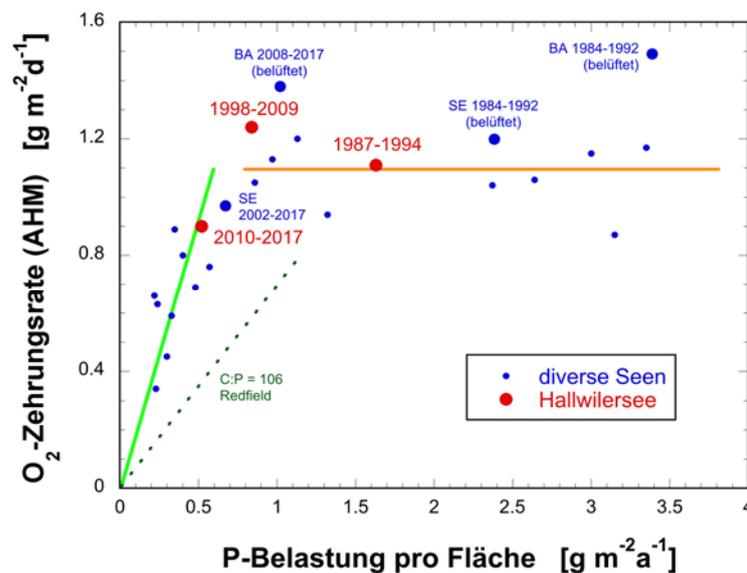
Figur 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der flächenbezogenen O_2 -Zehrungsrate im Hypolimnion (AHM, in $\text{gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) und der flächenbezogenen P-Belastung verschiedener Schweizer Seen. Es zeigt sich ein Bereich maximaler O_2 -Zehrung von $\sim 1.1 \pm 0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (oranges Plateau in der Grafik). Die künstlich belüfteten Seen zeigen wegen des höheren O_2 -Angebots auch deutlich höhere O_2 -Zehrungsraten, wie wir schon früher dokumentiert haben (Müller et al., 2012b). Über eine Stagnationsperiode von ~ 200 Tagen können mit dieser O_2 -Menge 63 gC m^{-2} mineralisiert werden. Dieser Wert liegt etwas unterhalb den mit Sedimentfallen gemessenen Netto-Exporten von 70 bis $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (Müller et al., 2012b). Die Differenz von ~ 10 bis $40 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ entspricht ungefähr den in den Sedimenten gemessenen Kohlenstoff-Nettosedimentationsraten.

Die kritische Grenze der P-Belastung, unterhalb der die O_2 -Zehrung abnimmt, liegt bei $\sim 0.6 \text{ gP m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (Schnittpunkt der Geraden in Figur 2). Sinkt die P-Belastung weiter, nimmt die O_2 -Zehrung markant ab (grüne Linie). Die grüne Linie zeigt ein Verhältnis von O_2 : P an, welches etwa dem Zweieinhalbfachen des klassischen Redfield-Verhältnisses entspricht. Das heisst, dass das C : P-

Verhältnis des Phytoplanktons in oligotrophen Seen nicht 106 sondern ~ 260 beträgt. Bisherige Sedimentfallenmessungen bestätigen dieses Verhältnis. Es zeigt sich daher, dass die kritische P-Belastung deutlich tiefer liegt als zur Zeit der Hocheutrophie (Ende 1970er Jahre) berechnet. Der damals meist zitierte Wert von $30 \mu\text{gP L}^{-1}$ als kritische Konzentration, unterhalb der die Produktion abnimmt, muss deshalb als zu hoch eingestuft werden.

Die O_2 -Zehrung in den beobachteten Seen (Figur 2) beginnt unterhalb einer Zirkulationskonzentration TP_{krit} von $\sim 20 \mu\text{gP L}^{-1}$ abzunehmen. Die tolerierbare TP-Konzentration, welche die Primärproduktion auf eine Menge begrenzt, die am Ende der Stagnationsperiode noch eine mittlere O_2 -Konzentration von 4 mg L^{-1} ermöglicht, ist für jeden See individuell unterschiedlich. Sie hängt ab von der tolerierbaren O_2 -Zehrung, also der Differenz zwischen O_2 -Inhalt bei Vollzirkulation und Inhalt bei $4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$. Die P-Belastung pro Fläche (Summe von TP in der produktiven Zone und jährlichem Eintrag von bioverfügbarem P) kann dann anhand der Beziehung mit der AHM (hellgrüne Linie) in Figur 2 abgeschätzt werden.

Bei einer TP-Konzentration von $10 \mu\text{g L}^{-1}$ würde die P-Belastung noch 0.33 (HA), 0.45 (BA), 0.35 (SE) $\text{gP m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ betragen. Damit wären gemäss Figur 2 alle drei Seen im mesotrophen Bereich. Der Hallwilersee ist heute nahe an diesem Ziel (roter Punkt), der Sempachersee etwa bei der kritischen Konzentration, und der Baldeggersee noch deutlich darüber.



Figur 2:

O_2 -Zehrung (AHM) in verschiedenen Schweizer Seen in Abhängigkeit der P-Belastung. Der Hallwilersee ist für verschiedene Zeitperioden mit roten Punkten eingetragen. Steigung der dunkelgrün-punktierten Linie entspricht einem C : P-Verhältnis von 106 (Redfield) und der hellgrünen Linie einem C : P-Verhältnis von 260.

$$P\text{-Belastung (gP m}^{-2} \text{ a}^{-1}) = \text{AHM (gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}) / 1.75$$

Anhand dieser Beziehung ergibt sich für die tolerierbare P-Belastung des Hallwilersees bei einer tolerierbaren O_2 -Zehrung von $0.61 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Kap. 3.1) ein Wert von $0.35 \text{ gP m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Diese

Belastung entspricht einer gesamten **Eintragsfracht von 2.1 tP a⁻¹** und einer Zirkulationskonzentration von 10.5 µgP L⁻¹. Die Ungenauigkeit dieser Abschätzung ist relativ gross, da die grüne Linie einer Korrelation aus empirischen Daten mit grosser Streuung entstammt und daher nur als ungefährender Wert gelten kann. Jedenfalls wird auch mit dieser Abschätzung der Toleranzwert von ~10 µgP L⁻¹ bestätigt.

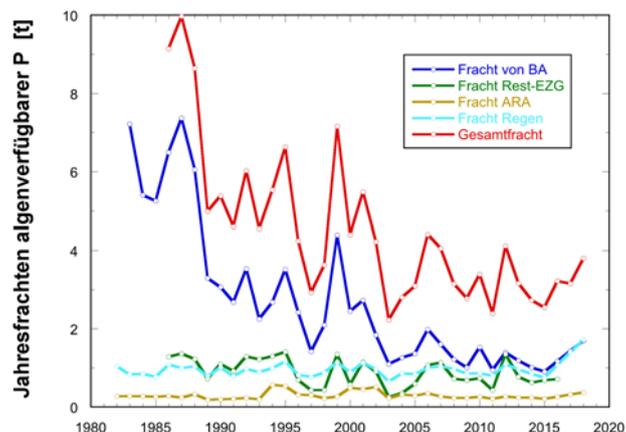
4. Das Phosphor-Budget des Hallwilersees

Die Abschätzung der Frachten von algenverfügbarem Phosphor zum Hallwilersee wurde schon im Bericht Müller und Wüest (2013) detailliert erklärt und hergeleitet. Wir erweitern hier diese Datenreihe um die letzten fünf Jahre und ergänzen sie mit den Frachten des Baldeggersees.

Für das Budget von bioverfügbarem P sind zu berücksichtigen:

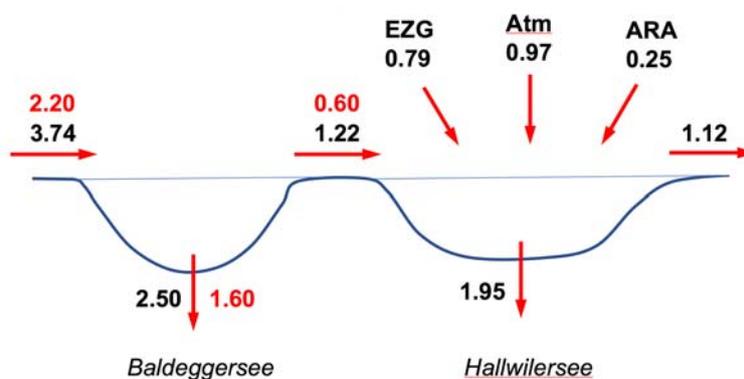
P _{in}	Eintrag über die Zuflüsse
P _{atm}	Eintrag über die Atmosphäre
P _{ARA}	Eintrag aus der Kläranlage Hitzkirchertal
P _{Überlauf}	Eintrag durch Regenüberläufe
P _{BA}	Eintrag über den Aabach aus dem Baldeggersee
P _{out}	Austrag aus dem Hallwilersee über den Aabach Seengen
P _{NS}	Nettosedimentation.

Der P-Eintrag aus dem Baldeggersee besteht ausschliesslich aus Algenmaterial, das im Hallwilersee vollständig bioverfügbar wird. Wir verwenden daher die Konzentration von Gesamt-P (TP) für die Berechnung der P-Fracht aus dem Baldeggersee. Für den Eintrag aus der Kläranlage, der aus Mikrozooplankton und Bakterien besteht, die im See wieder vollständig mineralisieren können, verwenden wir ebenfalls TP zur Berechnung der Fracht. Bei der atmosphärischen Deposition sowie bei Regenüberläufen ist unklar, welcher Teil effektiv bioverfügbar wird. Wir verwenden deshalb das TP für die Budgetberechnung. Einträge über die Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet bringen, gerade bei Hochwasserereignissen, einen grossen Anteil von partikulär gebundenem P, welches nur zu einem kleinen Teil bioverfügbar wird (Abschätzungen lassen einen Anteil von ~5-10% vermuten). Dieses mit Bodenmaterial assoziierte P sedimentiert meist im Bereich des Deltas und gelangt selten in die Tiefe. Wir verwenden deshalb nur die Messungen von gesamt-gelöstem P (Probe filtriert und aufgeschlossen) für die Budgetberechnungen des bioverfügbaren P.



Figur 3: Jährliche Frachten von algenverfügbarem P zum Hallwilersee.

Möglicherweise ist die Fracht aus atmosphärischer Deposition zu hoch angesetzt. Sie bewegt sich im selben Bereich wie die Fracht aus dem Baldeggersee. Hürdler et al. (2015: Tabelle 18, S. 64) schätzen die Konzentrationen im Regen mit $36 \mu\text{gP L}^{-1}$ wesentlich geringer ein, was eine deutlich kleinere Fracht aus atmosphärischer Deposition ergäbe. Wir schlagen deshalb vor, den Eintrag aus der Atmosphäre gelegentlich neu zu evaluieren.



Figur 4:

Bilanz der Frachten von algenverfügbarem P zum Hallwilersee inkl. Baldeggersee (linkes Becken) in $[\text{t a}^{-1}]$. Die schwarzen Zahlen sind die mittleren Frachten im Durchschnitt der Jahre 2007-2017. Die Frachten in rot würden sich durch eine angenommene Verringerung der P-Fracht zum Baldeggersee auf 2.2 tP a^{-1} , wie im Gutachten Müller et al. (2012b) vorgeschlagen worden war, einstellen.

Die Frachten im Mittel der letzten zehn Jahre (Figur 4) sind jeweils unabhängig voneinander gemessen worden (ausser der Nettosedimentation, welche mit einem einfachen Bilanzmodell berechnet wurde). **Der gesamte Eintrag in den Hallwilersee beträgt demzufolge 3.23 tP a^{-1} , der Austrag 3.07 tP a^{-1} (Abfluss Aabach und Nettosedimentation).** Es ergibt sich rechnerisch ein

kleiner Überschuss von 0.16 tP a^{-1} , welcher angesichts der jährlichen Variationen und der Fehler jedes einzelnen Beitrags (siehe Tabelle 2) erstaunlich gering ausfällt. Das unterstreicht die gute Qualität der einzelnen Messungen. Der Beitrag des Baldeggersees zur gesamten Fracht beträgt 38% und ist in den letzten 15 Jahren etwa unverändert geblieben.

Aus den beiden Abschätzungen für eine maximal tolerierbare Fracht anhand der O_2 -Zehrung in Kap. 3.1 (1.8 tP a^{-1}) sowie der Beziehung zwischen P-Belastung und AHM (Figur 2, 2.1 tP a^{-1}) ergibt sich ein **Orientierungswert für die maximale P-Fracht in den Hallwilersee von 2.0 tP a^{-1}** . Im Vergleich zur aktuellen Fracht von 3.2 tP a^{-1} müsste der Eintrag deshalb um 1.2 tP a^{-1} gesenkt werden.

Tabelle 2:

Frachten von algenverfügbarem P zum und vom Hallwilersee (2007 bis 2017) in tP a^{-1} (Daten AfU AG).

Jahr	Baldeggersee	Rest-EZG	ARA	Atm. Depos.	Export
2007	1.60	1.14	0.27	1.04	2.11
2008	1.22	0.72	0.23	0.98	1.55
2009	1.01	0.69	0.23	0.86	1.19
2010	1.53	0.74	0.26	0.87	1.15
2011	0.94	0.44	0.21	0.80	0.74
2012	1.40	1.35	0.27	1.10	1.35
2013	1.19	0.77	0.24	0.96	1.31
2014	1.01	0.63	0.24	0.85	0.91
2015	0.91	0.69	0.21	0.75	0.64
2016	1.17	0.71	0.26	1.08	0.82
2017	1.44	-	0.32	1.40	0.55
Mittel	1.22 ± 0.24	0.79 ± 0.26	0.25 ± 0.03	0.97 ± 0.18	1.12 ± 0.46

5. Beitrag des Baldeggersees zur Verbesserung der P-Fracht zum Hallwilersee

Die Hälfte dieser Reduktion könnte eine Verbesserung der Situation des Baldeggersees leisten. Hier haben wir vorgeschlagen, dass die gesamte P-Fracht zum Baldeggersee maximal 2.2 tP a^{-1} betragen dürfe damit im Hypolimnion eine mittlere O_2 -Konzentration von 4 mg L^{-1} aufrechterhalten werden könnte (Müller et al., 2012b). Für diese Bedingung berechnen wir mit dem Einbox-Modell von Gächter und Imboden (1985) eine Abflussfracht von 0.60 tP a^{-1} , Nettosedimentation von 1.60 tP a^{-1} und eine TP-Konzentration im Frühling von $13.5 \mu\text{gP L}^{-1}$ (rote Zahlen in Figur 4).

Die P-Fracht in den Hallwilersee insgesamt könnte damit bloss um $\sim 0.6 \text{ tP a}^{-1}$ oder $\sim 20\%$ gesenkt werden, falls alle anderen Einträge gleichbleiben.

Dies würde bedeuten, dass auch andere Einträge gesenkt werden müssten um die angestrebte maximale P-Fracht in den Hallwilersee von 2.0 tP a^{-1} zu erreichen. Insgesamt müsste die P-Fracht im Vergleich zur heutigen Situation um 1.2 tP a^{-1} gesenkt werden. Eine Aufhebung der ARA Hitzkirchertal, wie sie von den betreibenden Gemeinden bereits angedacht ist, würde eine weitere

Reduktion der P-Fracht von 0.25 tP a^{-1} bringen. Somit wäre nach diesen groben Abschätzungen noch eine Reduktion der P-Fracht aus dem direkten Einzugsgebiet des Hallwilersees von ca. 0.35 tP a^{-1} notwendig.

6. Zusammenfassung

Zwei Abschätzungen der kritischen Fracht von algenverfügbarem Phosphor zum Hallwilersee, die eine O_2 -Konzentration von 4 mg L^{-1} im Tiefenwasser gewährleistet, ergeben $\sim 2 \text{ tP a}^{-1}$. Das entspricht einer Mischungskonzentration von $\sim 10 \text{ } \mu\text{gP L}^{-1}$. Die aktuelle Fracht müsste daher um 1.2 tP a^{-1} , oder 37 % im Vergleich zum heutigen Zustand (d.h. Mittel aus den Jahren 2007-2017) gesenkt werden. Eine geforderte Verbesserung der P-Bilanz des Baldeggersees könnte die Hälfte zu dieser Senkung beitragen.

Literatur

Müller B., Bryant L.D., Matzinger A. and Wüest A.: Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9964-9971 (2012a). doi:10.1021/es301422r.

Müller B., Och L. und Wüest A.: Entwicklung des Phosphorhaushalts und der Sauerstoffzehrung im Sempacher- und Baldeggersee. Gutachten zHd. Uwe Luzern, Juli 2012b.

Müller B., Gächter R., and Wüest A.: Accelerated water quality improvement during oligotrophication in peri-alpine lakes. *Environ. Sci. Technol.* 48, 6671-6677 (2014). Doi: 10.1021/es4040304.

Gächter R. and Imboden D.: Lake Restoration. In: Stumm, W (ed.) *Chemical Processes in Lakes*. Wiley Intersci. 1985, p. 363-388.

Steinsberger T., Schmid M., Wüest A., Schwefel R., Wehrli B., and Müller B. (2017). Organic carbon mass accumulation rate regulates the flux of reduced substances from the sediments of deep lakes. *Biogeosci.* 14, 3275-3285. Doi: 10.5194/bg-2017-26.

Hürdler, J., Prasuhn, V., and Spiess, E. Abschätzung diffuser Stickstoff- und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz MODIFFU 3.0. Bericht zHd. des BAfU. Agroscope, July 2015.

https://www.agroscope.admin.ch/dam/agroscope/de/dokumente/themen/umwelt-ressourcen/gewaesserschutz/huerdler-prasuhn-spiess-endbericht-modiffus.pdf.download.pdf/Hürdler_Prasuhn_Spiess_2015_Endbericht_MODIFFUS.pdf