

Retentionsweiher

Ein Beitrag zur Sanierung der Mittellandseen

Miriam Reinhardt



Zones humides artificielles

Dans le cadre d'un «projet phosphore», plusieurs zones humides ont été construites en Suisse Centrale afin de retenir l'eau de drainage agricole et de réduire ses teneurs en phosphore et en azote. Pour évaluer et optimiser l'efficacité de ces zones humides, les flux de nutriments de deux étangs ont été analysés pendant plusieurs années. Ces deux zones humides renaient 1.1 g P/m² par an avec des efficacités de 7% et 23%. La quantité d'azote retenu était de 45 à 50 g/m² par an, ce qui représente 28% de l'apport annuel. L'efficacité de rétention à court terme était limitée par le temps de résidence de l'eau lors des crues et par la quantité de plancton présent dans la zone humide. Sur le long terme, l'apport de particules du sol fixatrices de phosphore et la concentration en oxygène de l'eau déterminaient la capacité de rétention du phosphore et de l'azote.

Small constructed wetlands

Several small wetlands have been constructed in the watershed of the Central Swiss Lakes in order to collect the drainage water from the grassland and to retain or eliminate phosphorus (P) and nitrogen (N). For evaluating and improving their retention efficiency, nutrient fluxes were studied during several years in two of these wetlands. Both wetlands retained an average of 1.1 g P m⁻² yr⁻¹ at a retention efficiency of 23% and 7%. N retention was 45 to 50 g m⁻² yr⁻¹ corresponding to a retention efficiency of 28%. The minimum water residence time during high discharge events and the plankton concentration were the key factors limiting short-term nutrient retention. In the long-term, oxygen concentration in the water column and the input of P sorbing soil particles determined retention efficiency.

Im Einzugsgebiet der Schweizer Mittellandseen werden im Rahmen eines Phosphor-Projekts Retentionsweiher angelegt, um das Drainagewasser der Grünlandflächen aufzufangen und seine hohen Nährstoff-Frachten zu verringern. Um die Retentionseffizienz dieser Weiher beurteilen und optimieren zu können, wurden die Phosphor (P)- und Stickstoff (N)-Flüsse an zwei ausgewählten Weihern mehrere Jahre lang untersucht. Beide Retentionsweiher hielten bezogen auf ihre Oberfläche 1,1 g P/m² Jahr mit einer Retentionseffizienz von 23 % bzw. 7 % zurück. Der Stickstoffrückhalt lag mit 45 bis 50 g N/m² Jahr bei etwa 28 % des jährlichen Eintrags. Die kurzfristige Retentionseffizienz war v. a. durch die Wasseraufenthaltszeit bei Hochwasser und durch die Plankton-Menge im Weiher limitiert. Langfristig bestimmte der Eintrag an P bindenden Bodenpartikeln den P-Rückhalt und die Sauerstoffkonzentration im Wasser die N-Elimination.

1. Einleitung

Anthropogene Phosphor (P)- und Stickstoff (N)-Emissionen haben weltweit zu einer *Eutrophierung* aquatischer Ökosysteme geführt. Sauerstoffschwund im Tiefenwasser der Schweizer Mittellandseen, Algenblüten in den Küstengewässern des Mittelmeers oder des Golfs von Mexiko sowie die Überschreitung der Nitrat (NO₃⁻)-Grenzwerte im Grund- und damit Trinkwasser sind die Folge. Im Rahmen der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins [1] sowie des Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks [2] hat sich die Schweiz zum Ziel ge-

setzt, den P- und N-Eintrag in den Rhein um 50 % gegenüber dem Jahr 1984 zu reduzieren [3]. Ausserdem soll gemäss Gewässerschutzverordnung [4] der Nährstoffeintrag in die stehenden Gewässer soweit gesenkt werden, dass eine «mittlere Produktion an Biomasse» nicht überschritten wird und die Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser nie unter 4 mg/l fällt. Die NO_3^- -Konzentration im Grundwasser soll einen Schwellenwert von 25 mg/l nicht überschreiten.

In die Gewässer gelangen P und N v. a. durch Bodenerosion und Auswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie durch kommunale und gewerblich-industrielle Abwässer. Die abwasserbürtigen P- und N-Emissionen sind durch die Verbesserung der Abwasserreinigung und den Ausbau des Kanalisationsnetzes deutlich zurückgegangen, wie das Beispiel Sempachersee zeigt. Ihr Anteil am P- und N-Eintrag in den Sempachersee ist von 73 % bzw. 27 % in den 50er-Jahren auf etwa 7 % bzw. 10 % gesunken.

Gleichzeitig haben jedoch die P- und N-Emissionen aus dem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet bedingt durch die Überdüngung des Bodens zugenommen und machen heute 88 % bzw. 80 % des Eintrags in den Sempachersee aus. Pro Hektar Einzugsgebiet werden bis zu 1,3 kg gelöster P (DP)/Jahr und etwa 30 kg N/Jahr aus dem Boden ausgewaschen und in den Sempachersee transportiert [5, 6] (Abkürzungen s. Tab. 1).

Obwohl die P-Konzentration im Sempachersee in den letzten Jahren abgenommen hat, wird im See immer noch so viel Biomasse produziert, dass der natürlich vorhandene Sauerstoff im Tiefenwasser bei der Zersetzung der Biomasse vollständig aufgezehrt wird. Künstlicher Sauerstoffeintrag und Belüftung gewährleisten zwar die geforderte Mindestsauerstoffkonzentration im Tiefenwasser, erhöhen aber die P-Bindungs Kapazität des Sediments langfristig nicht [7]. Um die Biomasseproduktion einzuschränken, muss gemäss Modellrechnungen der Ein-



Abb. 1 Retentionsweiher Sonnhof.

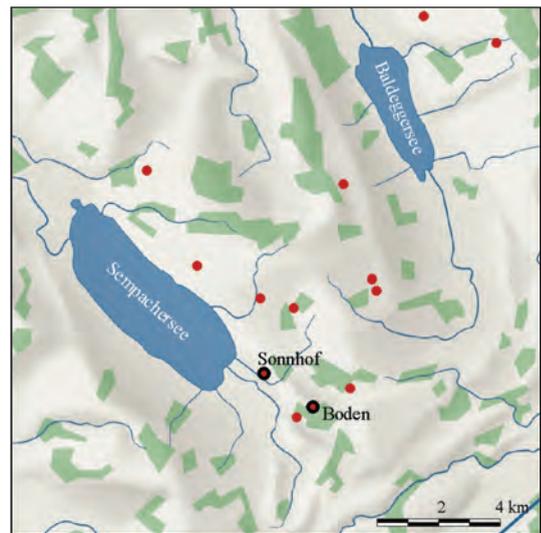


Abb. 2 Retentionsweiher im Einzugsgebiet von Sempacher- und Baldeggersee.

| Spezies | | Abkürzung | Analytik |
|----------------------------|----------------------|-----------------|--|
| Phosphor | | | |
| Gesamt-P | Total P | TP | Aufschluss [30] |
| Gelöster P | Dissolved P | DP | Filtration (0,45 µm), Aufschluss [30] |
| Gelöster reaktiver P | Dissolved Reactive P | DRP | Photometrie |
| Gelöster nicht-reaktiver P | Dissolved Organic P | DOP | DOP = DP - DRP |
| Partikulärer P | Particulate P | PP | PP = TP - DP |
| Stickstoff | | | |
| Gesamt-N | Total N | TN | Aufschluss [30] |
| Gelöster N | Dissolved N | DN | Filtration (0,45 µm), Aufschluss [30] |
| Nitrat | | NO_3^- | Photometrie |
| Ammonium | | NH_4^+ | Photometrie |
| Gelöster nicht-reaktiver N | Dissolved Organic N | DON | DON = DN - NO_3^- - NH_4^+ |
| Partikulärer N | Particulate N | PN | PN = TN - DN |

Tab. 1 Phosphor- und Stickstoffanalytik.

trag an bodenbürtigem Gesamt-P (TP) auf 8,6 t/Jahr und der Eintrag an DP auf 4,3 t/Jahr reduziert werden. Der Export aus dem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet darf demnach 1,4 kg TP/ha Jahr bzw. 0,7 kg DP/ha Jahr nicht überschreiten [8].

Im Jahr 1999 wurde deshalb das «Projekt Sempachersee» zur «Verminderung der P-Belastung von oberirdischen Gewässern aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung» gestartet [8]. Im Rahmen dieses Programms werden v. a. Massnahmen gefördert, die die P-Übersättigung des Bodens und die Bodenerosion reduzieren, wie z. B. ein bedarfs- und zeitgerechter Gülleeinsatz, erosionsmindernde Anbauverfahren oder die Anlage von ökologischen Ausgleichsflächen und Pufferstreifen entlang der Gewässer. Ausserdem werden Retentionsweiher angelegt, um das Drainagewasser der Grünlandflächen aufzufangen und zu reini-

gen, bevor es in die Oberflächengewässer gelangt. In diesen kleinen Feuchtgebieten (*constructed wetlands*) sollen Bodenpartikel sedimentieren und die gelösten Nährstoffe von Pflanzen (Algen, Wasserlinsen, Rohrkolben) assimiliert werden. Mikroorganismen sollen NO_3^- denitrifizieren, d. h. in Luftstickstoff umwandeln, und an die Atmosphäre abgeben. Während früher viele Feuchtgebiete zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität drainiert und trockengelegt wurden, hat man mittlerweile ihr *Nährstoffretentionspotenzial* wiederentdeckt. Vor allem in Skandinavien, den USA und Australien werden Feuchtgebiete renaturiert oder neu angelegt, um die Wasserqualität von Drainagewasser, Fluss- und Hochwasser zu verbessern. Im Einzugsgebiet von Sempacher-, Baldegger- und Hallwilersee wurden seit 1999 insgesamt 14 Retentionsweiher mit Volumen von 300 bis 1700 m³ angelegt (Abb. 1 und 2). Die Weiherfläche wird mit einer Richtgrösse von etwa 1% des Weihereinzugsgebiets bemessen [9].

Dass Feuchtgebiete P und N zurückhalten können, ist unumstritten. Ihre Effizienz wird allerdings kontrovers diskutiert [10, 11]. Ziel der vorliegenden Studie war, Prozesse und Einflussfaktoren zu untersuchen, welche die kurz- und langfristige Retention der Feuchtgebiete steuern, um ihre Effizienz durch gezielte Massnahmen zu erhöhen.

2. Messkonzept

Zwei morphologisch unterschiedliche Retentionsweiher im Einzugsgebiet des Sempachersees wurden für die Studie ausgewählt und während mehrerer Jahre mit hoher Zeitauflösung untersucht.

Der als Pilotprojekt im Jahr 1999 angelegte *Sonnhof-Weiher* wurde von Januar 2001 bis De-

zember 2002 beprobt. Er ist maximal 0,6 m tief (Tab. 2) und besteht aus zwei durch eine Sandbank getrennte Becken. Neben echtem Drainagewasser fliesst auch der Überlauf der Trinkwasserfassung des angrenzenden Landwirtschaftsbetriebs zu. Im Jahr 2001 vermehrten sich im Weiher v. a. planktische Algen und fädige Makroalgen (*Hydrodictyon reticulatum*). Im Jahr 2002 breiteten sich Rohrkolben (*Typha latifolia*) und Schilf (*Phragmites australis*) vom Ufer her über etwa die Hälfte des Weihers aus. Um die Effizienz des Retentions Weihers bei einer höheren P-Belastung zu testen, wurden dem Zulauf seit Juni 2001 künstlich 8,6 g DP/Tag zudosiert.

Der im Jahr 2001 angelegte und 2,5 Jahre lang (Mai 2002 bis Oktober 2004) beprobte *Boden-Weiher* besteht aus zwei kleinen, flachen Sedimentationsbecken (20 m³, 80 m³) und einem maximal drei Meter tiefen Hauptweiher (600 m³). Die beiden Sedimentationsbecken werden von je einer Drainage gespeist und leiten das Wasser nach kurzer Aufenthaltszeit in den Hauptweiher weiter. Eine Drainage führt ausschliesslich Bodenwasser (13 % des Weiherzuflusses), die andere Drainage entwässert auch den Hofplatz eines Landwirtschaftsbetriebs (87 %). Während der Sommermonate 2003 und 2004 war die Weiheroberfläche von einer dichten Matte aus Wasserlinsen (*Lemna minor*) bedeckt.

Mit Hilfe von induktiven Durchflussmessern, V-Profilen und Pegelmessern wurden in beiden Retentionsweihern im Zeitabstand von zehn Minuten Zufluss, Abfluss und Weiherpegel gemessen und elektronisch aufgezeichnet. Am Boden-Weiher wurden ausserdem Wassertemperatur, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und -feuchtigkeit gemessen, um die Verdunstung von der

Weiheroberfläche abschätzen zu können. Niederschlagsdaten wurden an der ARA Sempach erhoben [12]. Das zu- und abfliessende Wasser wurde manuell oder mit Hilfe von automatischen Samplern abfluss- oder zeitproportional (2-tägig) beprobt [13, 14]. Speziierung und Analytik erfolgten gemäss *Tabelle 1*. Am Zulauf des Sonnhof-Weihers wurde 2001 eine Messzelle mit ionenselektiven Elektroden installiert, die den pH-Wert, die NO_3^- - und Ammonium(NH_4^+)-Konzentration alle zehn Minuten aufzeichnete [15]. Am Boden-Weiher wurde mit Hilfe einer an der tiefsten Stelle des Weihers verankerten Sedimentfalle die Sedimentation erfasst. Im Jahr 2004 wurde ausserdem einmal pro Monat die Wassersäule in 50 cm Schritten beprobt und die Biomasse, der P- und N-Gehalt der Wasserlinsen und Rohrkolben bestimmt. Am Ende der Untersuchungsperiode wurden Sedimentkerne beider Weiher entnommen.

3. Einzugsgebiet als Nährstoffquelle

Die Drainagen im Einzugsgebiet des Sonnhof-Weihers transportierten im Schnitt 0,4 kg P/ha Jahr und 20 kg N/ha Jahr. Im Einzugsgebiet des Boden-Weihers wurden im Jahr 2002 2,7 kg P/ha Jahr und 25 kg N/ha Jahr mobilisiert. In den beiden aussergewöhnlich trockenen Jahren 2003 und 2004 waren es nur 1,0 bzw. 0,6 kg P/ha Jahr und 9 bzw. 12 kg N/ha Jahr (Messwerte jeweils auf ein Jahr hochgerechnet). Der im Vergleich zum Einzugsgebiet des Sonnhof-Weihers höhere P-Export im Einzugsgebiet des Boden-Weihers lässt sich anhand von Bodenanalysen erklären: Im Einzugsgebiet des Boden-Weihers waren 100 % der landwirtschaftlich genutzten Böden, im Einzugsgebiet des Sonnhof-

| | | Retentionsweiher | |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| | | Sonnhof | Boden |
| Koordinaten | | 657 950/ 219 300 | 659 640/ 217 990 |
| Höhe | mNN | 512 | 545 |
| Einzugsgebiet | ha | 20,4 | 8,4 |
| Weiher-Fläche | m ² | 2350 | 720 |
| | % EZG | 1,2 | 0,9 |
| Tiefe, | mittlere | m | 0,5 |
| | maximale | m | 0,6 |
| Volumen | m ³ | 1200 | 700 |
| Wasseraufenthaltszeit | | | |
| | Median (1. Quartil, 3. Quartil) | Tage | 5 (3, 12) |
| Hydraulische Belastung, mittl. | mm/Tag | | 93 |
| | | | 76 |

Tab. 2 Charakteristik der Retentionsweiher.

Weihers lediglich 37 % der Böden mit P übersorgt (Versorgungsklassen D und E [16]).

P und N wurden v. a. in gelöster Form, d. h. als gelöster reaktiver P (DRP) und NO_3^- , in die Weiher transportiert. Die DRP-Konzentration im Zulauf zum Sonnhof-Weiher war deutlich niedriger als im Boden-Weiher (Abb. 3). Die NO_3^- -Konzentration war in den Zuläufen beider Weiher ähnlich. Während das partikuläre Material, das in den Sonnhof-Weiher geschwemmt wurde, vor allem aus Bodenpartikeln bestand, setzte sich der partikuläre P (PP) und partikuläre N (PN) in der Mischwasserdrainage des Boden-Weiher hauptsächlich aus organischen Molke- und Gülleclonen zusammen, die vom Hofplatz des Landwirtschaftsbetriebs abgeschwemmt wurden.

Mit dem Online-Monitoring von pH-Wert, NO_3^- - und NH_4^+ -Konzentration konnten am Sonnhof-Weiher so genannte *Güllenereignisse* [17] nachgewiesen werden, bei denen Gülle direkt in die Drainagen und damit in die Weiher gelangte. Ohne dass die Wasserführung der Drainagen wesentlich zunahm, stieg während solcher Ereignisse – bei gleichzeitig abnehmender NO_3^- -Konzentration und sinkendem pH-Wert – die NH_4^+ -Konzentration sprunghaft an. Güllenereignisse wurden fünf- bis sechsmal pro Jahr beobachtet. Sie trugen aber lediglich 1 % zur NH_4^+ -Jahresfracht bei [15].

4. Nährstoffschwall bei Starkregen

Der Nährstoffeintrag in beide Retentionsweiher war durch ein wechselhaftes hydrologisches Regime geprägt. Im Sonnhof-Weiher unterschritt die tägliche hydraulische Belastung während 40 % des Jahres, im Boden-Weiher während 65 % des Jahres einen Wert von 50

mm/Tag (Abb. 4a). An etwa 40 Tagen pro Jahr überstieg die hydraulische Belastung während Starkniederschlägen jedoch 200 mm/Tag deutlich.

Bei Regen stieg mit der Wasserführung auch die DRP- und NH_4^+ -Konzentration der Drainagen an, während die NO_3^- -Konzentration abnahm (Abb. 5). Die tiefen DRP-Konzentrationen bei Niedrigwasser deuten darauf hin, dass P bei langsamer Versickerung des Regenwassers an Bodenpartikel gebunden wird. Bei Starkregen wird der im Oberboden akkumulierte P jedoch mobilisiert und über präferentielle Fließwege wie z. B. Regenwurmgänge, Trockenrisse und Wurzelkanäle ohne weiteren Kontakt mit der P-bindenden Unterbodenmatrix in die Drainagen verlagert und lateral abgeführt [18, 19]. NO_3^- wird aufgrund seiner niedrigen Affinität gegenüber Bodenpartikeln relativ kontinuierlich aus der Bodenmatrix ausgewaschen, sodass die NO_3^- -Kon-

zentration im Sickerwasser gleichmäßig hoch ist und bei Starkregen aufgrund des limitierten N Reservoirs im Boden kurzfristig abnimmt [20]. Die Nährstoffzufuhr in die Retentionsweiher war deshalb bei niedriger hydraulischer Belastung gering, stieg jedoch bei Hochwasser kurzfristig um ein Vielfaches an. Obwohl Starkniederschläge, die zu einer hydraulischen Belastung der Weiher mit mehr als 200 mm/Tag führten, selten waren, transportierten sie 39 bzw. 59 % der jährlichen P-Fracht und 33 bzw. 56 % der jährlichen N-Fracht in den Sonnhof- und Boden-Weiher (Abb. 4).

5. Strategien zur Nährstoffretention

Da P und N hauptsächlich in gelöster Form in die Retentionsweiher gelangte, war die Nährstoffassimilation durch aquatische Pflanzen Voraussetzung für den kurzfristigen P- und N-Rückhalt.

Makrophyten, wie z. B. Rohrkolben, Igelkolben und Schilf, nehmen die Nährstoffe über ihre Wurzeln aus dem Sediment auf (Abb. 6) und speichern sie über mehrere Vegetationszyklen in den unterirdischen Pflanzenorganen [21, 22]. Sie beeinflussen die P- und N-Konzentrationen des umgebenden Wassers nur geringfügig und sind nicht in der Lage, auf kurzfristige Nährstoffschübe bei Regen zu reagieren. Sie verändern allerdings die Rahmenbedingungen für die P- und N-Retention in den Wei-

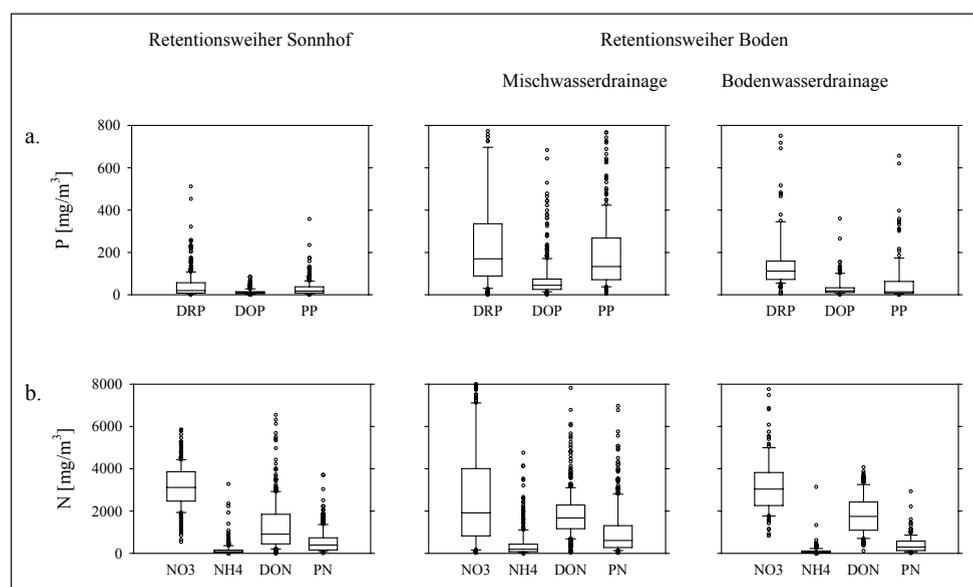


Abb. 3 Konzentration der P- (a) und N-Verbindungen (b) im Zulauf des Sonnhof-Weiher, der Misch- und Bodenwasserdrainage des Boden-Weiher. Konzentrationsangaben in mg P bzw. N m^{-3} . Boxplots mit Median, 10 %, 25 %, 75 % und 90 % Quantil und Ausreißern (Punkte).

hern, indem sie z. B. die Fließgeschwindigkeit des Wassers reduzieren, Aufwuchsflächen für Mikroorganismen bieten und über ihre Wurzeln Sauerstoff an die Sedimente abgeben [23]. Die Ausbreitung der Rohrkolben im Sonnhof-

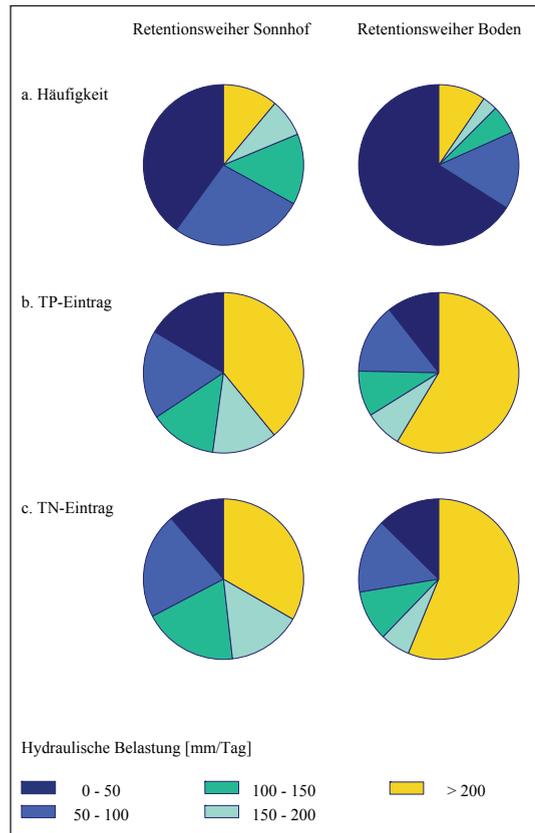


Abb. 4 Hydraulische Belastung der Retentionsweiher (mm/Tag): Häufigkeitsklassen (Tage) (a) und der damit verbundene TP- (b) und TN-Eintrag (c) (kg).

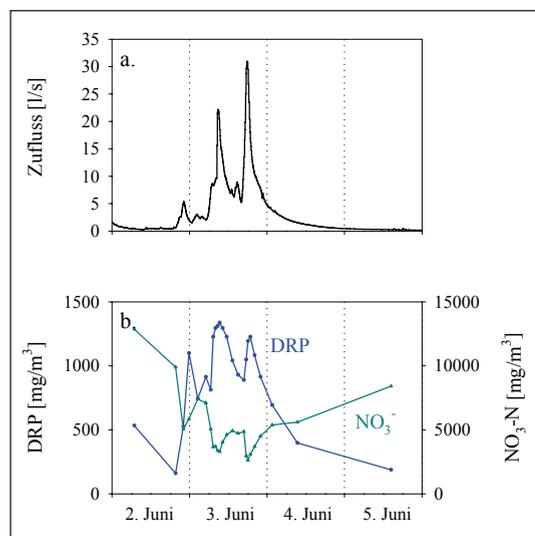


Abb. 5 Zufluss (a), DRP- und NO_3^- -Konzentration (b) im Zulauf des Boden-Weiher während eines Regenereignisses 2004.

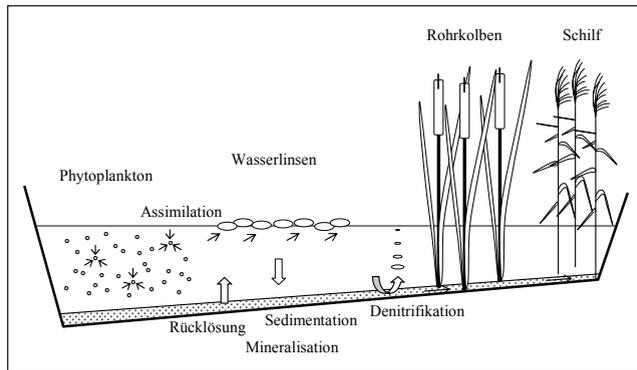


Abb. 6 Nährstofftransformation in den Retentionsweiher.

Weicher hatte keine messbare Auswirkung auf die Nährstoffretention. *Wasserlinsen* nehmen P und N über ihre Wurzeln und ihre gesamte Blattfläche direkt aus dem Wasser auf. Als Schwimmblattpflanzen entziehen sie dem Wasserkörper allerdings nur in einer oberflächennahen Schicht Nährstoffe und werden zur Abwasserreinigung deshalb hauptsächlich in flachen, durchströmten Becken eingesetzt [24, 25]. Im Boden-Weiher bedeckten sie die Wasseroberfläche im Sommer 2003 und 2004. Durch Beschattung schränkten sie das Wachstum anderer photoautotropher Organismen in den darunter liegenden Wasserschichten ein und behinderten die Durchmischung und Belüftung des gesamten Wasserkörpers.

Phytoplankton ist aufgrund seiner grossen Oberfläche, hohen Reproduktionsrate und Verteilung über das gesamte Weihervolumen am besten in der Lage, auf wechselnde P- und N-Konzentrationen zu reagieren und die Nährstoffe innerhalb kurzer Zeit zu assimilieren. Aufgrund seiner geringen Sedimentationsgeschwindigkeit wurde allerdings ein Teil des Planktons bei Regenereignissen aus den Retentionsweiher ausgeschwemmt. Besonders hoch waren die Planktonverluste während der Planktonblüte im Frühjahr.

Abgestorbene Biomasse sinkt zum Weihergrund und wird von Mikroorganismen abgebaut. Durch die Mineralisation stiegen die DRP und NH_4^+ -Konzentrationen über dem Sediment des Boden-Weiher auf bis zu 2600 und 9640 mg m^{-3} . Nur ein kleiner Teil des organisch gebundenen P und N akkumuliert langfristig im Sediment. Plankton und Wasserlinsen zersetzen sich schneller als Makrophyten, da sie einen geringeren Anteil an Festigungsgewebe besitzen. Untersuchungen am Sempachersee haben gezeigt, dass 70 bis 90 % des sedimentierten v. a. planktisch organischen Materials mineralisiert und als DRP und NH_4^+ an das Wasser abgegeben wurden [6, 26, 27].

Während der langfristige P-Rückhalt ausschliesslich auf der Akkumulation von P im Sediment beruht, kann N zusätzlich denitrifiziert und als N_2 an die Atmosphäre abgegeben werden. Die Bedeutung der beiden Eliminationswege lässt sich aus dem im Sediment gemessenen N:P-Verhältnis und dem absoluten N- und P-Rückhalt abschätzen. Im Sonnhof- und Boden-Weiher wurden 89 % bzw. 94 % des eliminierten N denitrifiziert und 11 % bzw. 6 % im Sediment gespeichert.

6. Steuergrosse Wasseraufenthaltszeit

Die Wasseraufenthaltszeit steuert die kurzfristige Nährstoffretention in den Weihern. Da ein Grossteil des jährlichen Nährstoffeintrags während Regenereignissen erfolgte (Abb. 4), war die Mindestwasseraufenthaltszeit während dieser Zeit, d.h. die Retentionskapazität für Hochwasser, entscheidend für die Effizienz der Weihern [13]. Um die P-Retention zu analysieren, wurde ein Plankton-Modell entwickelt, das den P-Rückhalt in einem vollständig durchmischten Reaktor mit der Assimilation von DRP, der Sedimentation und einer konstanten Mineralisation von Plankton-PP beschreibt [13]. Gemäss Modellprognose nehmen die DRP- und PP-Konzentration des Systems im

Stationärzustand mit zunehmender Wasseraufenthaltszeit ab und konvergieren gegen Minimalkonzentrationen, die unabhängig von der Zulaufkonzentration sind. Die Retentionseffizienz steigt deshalb mit zunehmender Wasseraufenthaltszeit und zunehmender Zulaufkonzentration. In Übereinstimmung mit der Modellprognose stieg im Sonnhof-Weiher die für zwei Tagesabschnitte berechnete TP- und TN-Retentionseffizienz mit zunehmender Wasseraufenthaltszeit an (Abb. 7a). Lag die Wasseraufenthaltszeit bei mehr als sieben Tagen, wurde im Schnitt mehr als 50 % des eingetragenen P zurückgehalten. Die TP-Retention wurde jedoch rapide kleiner, wenn die Wasseraufenthaltszeit unter fünf Tage fiel, da zeitweise sogar mehr P ausgeschwemmt als eingetragen wurde.

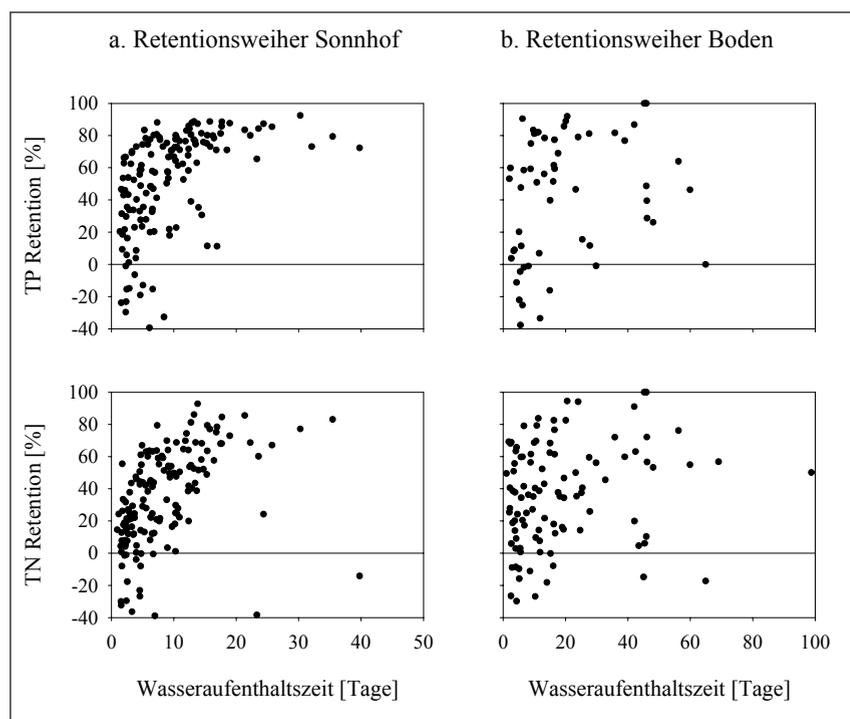


Abb. 7 TP- und TN-Retention (%) in Abhängigkeit der Wasseraufenthaltszeit im Sonnhof- (a) und im Boden-Weiher (b) berechnet für Zweitagesintervalle.

| | | Retentionsweiher | | | | | |
|--------------------|-----------------------|------------------------------------|---------|-----------|---------------------------------|---------|-----------|
| | | Sonnhof (Jan. 2001 – Dez. 2002) | | | Boden (Mai 2002 – Okt. 2004) | | |
| | | Eintrag | Austrag | Retention | Eintrag | Austrag | Retention |
| TP | g/m ² Jahr | 4,7 | 3,6 | 1,1 | 15,5 | 14,4 | 1,1 |
| DRP | % | 62 | 39 | | 54 | 65 | |
| DOP | % | 14 | 20 | | 12 | 13 | |
| PP | % | 24 | 41 | | 34 | 22 | |
| TN | g/m ² Jahr | 175 | 126 | 49 | 167 | 122 | 45 |
| NO ₃ -N | % | 61 | 52 | | 48 | 47 | |
| NH ₄ -N | % | 3 | 4 | | 5 | 7 | |
| DON | % | 26 | 33 | | 33 | 35 | |
| PN | % | 10 | 11 | | 14 | 11 | |

Tab. 3 Phosphor- und Stickstoffrückhalt in den Retentionsweihern.

Auch im Boden-Weiher stieg die 2-Tages-Effizienz mit zunehmender Wasseraufenthaltszeit (Abb. 7b). Bei gleicher Wasseraufenthaltszeit wurde jedoch im Boden-Weiher prozentual weniger P und N zurückgehalten als im Sonnhof-Weiher. Während im Sonnhof-Weiher Phytoplankton und Makroalgen die gelösten Nährstoffe im gesamten gut beleuchteten und durchmischten Wasserkörper assimilierten, war dieser Prozess im Boden-Weiher im Sommer 2003 und 2004 auf die unmittelbare Wasseroberfläche beschränkt. Der darunterliegende Wasserkörper wurde von den Wasserlinsen abgedunkelt.

7. Langfristiger Nährstoffrückhalt

In den Sonnhof-Weiher wurden durchschnittlich 4,7 g P/m² Jahr und in den Boden-Weiher 15,5 g P/m² Jahr eingetragen (Tab. 3). Der P-Rückhalt lag in beiden Weihern bei 1,1 g P/m² Jahr. Obwohl die durchschnittliche Wasseraufenthaltszeit im Boden-Weiher (Tab. 2) und die Nährstoffkonzentration in seinem Zulauf jene des Sonnhof-Weiher übertrafen (Abb. 3), wurde im Boden-Weiher prozentual weniger TP zurückgehalten (7 %) als im Sonnhof-Weiher (23 %). Ausserdem war die Retention der einzelnen P- und N-Verbindungen unterschiedlich: Der Sonnhof-Weiher verminderte die DRP-Fracht um 51 %, der Boden-Weiher erhöhte sie dagegen um 13 % (Abb. 8a). Dafür wurde die PP-Fracht im Boden-Weiher um 41 % verringert, während im Sonnhof-Weiher 25 % mehr PP aus- als eingetragen wurde. Der allochthone, aus den Einzugsgebieten stammende PP (PP_{allo}) sedimentierte nahezu vollständig in beiden Weihern (Abb. 8a). Im Sonnhof-Weiher bestand er hauptsächlich aus Bodenpartikeln und wurde deshalb langfristig im Sediment gespeichert. Im Boden-Weiher war der allochthone PP dagegen zum grossen

Teil mit Gülle- und Molkeflocken assoziiert, die mikrobiell abgebaut wurden und dabei DRP freisetzen.

Der aus den Weihern ausgeschwemmte PP bestand hauptsächlich aus autochthonem PP (PP_{auto}), das als Plankton in den Weihern produziert wurde. Im Sonnhof-Weiher entsprach der Export von autochthonem PP etwa der DRP-Menge, die im Weiher zurückgehalten wurde. Im Boden-Weiher war der DRP-Austrag grösser als der DRP-Eintrag, d. h. der aus dem Sediment freigesetzte DRP muss wesentlich zur Produktion von autochthonem PP beigetragen haben.

Die in *Abbildung 8* dargestellten Stoffflüsse wurden aus der P-Massenbilanz berechnet und sind deshalb als Mindestflüsse zu betrachten. Zusätzliche Informationen lieferten Sedimentfallen-Messungen und Diffusionsberechnungen am Boden-Weiher: Im Schnitt sedimentierten dort $7,9 \text{ g } PP_{\text{auto}}/\text{m}^2 \text{ Jahr}$. Die DRP-Rücklösung aus dem Sediment, die aus den während des Sommers beobachteten DRP-Konzentrationsgradienten berechnet wurde, lag bei $13,1 \text{ g/m}^2 \text{ Jahr}$. Da mindestens $4,2 \text{ g/m}^2 \text{ Jahr}$ allochthoner PP mineralisiert wurden, lag die Mineralisation von autochthonem PP bei

etwa $8,9 \text{ g/m}^2 \text{ Jahr}$. Demnach wurden zusätzlich zu den Stoffflüssen, die aus der P-Massenbilanz abgeleitet wurden, 8 bis $9 \text{ g P/m}^2 \text{ Jahr}$ im Weiher recycelt, d. h. assimiliert, sedimentiert, mineralisiert und wieder ins Wasser freigesetzt.

Der hohe P-Eintrag in den Boden-Weiher steigerte zwar die Produktion von autochthonem PP, die P-Akkumulation im Sediment erhöhte sich aber nicht. Dies deutet darauf hin, dass der in den Weihersedimenten langfristig gespeicherte P hauptsächlich an anorganische Partikel gebunden ist, deren Menge durch die Zufuhr aus dem Einzugsgebiet bestimmt wird.

Der N-Rückhalt lag bei $49 \text{ g/m}^2 \text{ Jahr}$ (28 %) im Sonnhof-Weiher und $45 \text{ g/m}^2 \text{ Jahr}$ (27 %) im Boden-Weiher. Die Stickstoffflüsse waren in beiden Weihern ähnlich (*Abb. 8b*). Im Sediment wurden lediglich $5 \text{ g N/m}^2 \text{ Jahr}$ (Sonnhof-Weiher) und $3 \text{ g N/m}^2 \text{ Jahr}$ (Boden-Weiher) akkumuliert. Der grösste Teil des sedimentierten PN wurde mineralisiert und als NH_4^+ freigesetzt. Der N-Rückhalt ging zu 89 % im Sonnhof-Weiher und zu 94 % im Boden-Weiher auf die Denitrifikation zurück und hing hauptsächlich von der NO_3^- -Zufuhr ab. Wenn Temperatur und Sauerstoffkonzentration im Wasser gewährleistet sind, dass das bei der Mineralisation freigesetzte NH_4^+ vollständig nitrifiziert und anschliessend denitrifiziert wird, ist bei steigendem N-Eintrag und ausreichender Wasseraufenthaltszeit mit einer zunehmenden N-Retention zu rechnen [14].

8. Perspektiven

Retentionsweiher halten erodierete Bodenpartikel effizient zurück und können die Bodenverluste aus dem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet erheblich reduzieren. Besitzen sie ein ausreichendes

Speichervolumen, das die für die Assimilation und Denitrifikation notwendige minimale Wasseraufenthaltszeit jederzeit gewährleistet, sind sie auch in der Lage, dem Drainagewasser gelöste Nährstoffe zu entziehen. Um beispielsweise bei konstantem Weihervolumen und einem Abfluss von 6 mm/Tag aus dem Einzugsgebiet eine Mindestwasseraufenthaltszeit von sieben Tagen im Weiher zu gewährleisten, muss das Retentionsvolumen mindestens $420 \text{ m}^3/\text{ha}$ Einzugsgebiet betragen. Bei einer Tiefe von einem Meter, die eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit und Mischung bis zum Grund gewährleisten soll, entspricht dies einer Weiherfläche von mindestens 4 % seines Einzugsgebiets. Modellrechnungen für die 2001 und 2002 real gemessenen Zuflüsse zu den beiden Retentions Weihern haben gezeigt, dass die notwendige Einstauffläche (Weihertiefe: 1 m) nur noch etwa 2,3 % des Einzugsgebiets beträgt, wenn Abfluss und Wehertiefe so an die zufließende Wassermenge angepasst werden, dass die Wasseraufenthaltszeit im Weiher stets sieben Tage beträgt. Bei Trockenwetter reduziert sich dadurch die eingestaute Wassermenge und für Hochwässer steht zusätzliches Retentionsvolumen zur Verfügung.

Da Plankton am besten in der Lage ist, auf kurzfristige Nährstoffschübe zu reagieren, sollten in den Retentions Weihern permanente, offene Wasserflächen erhalten und vor dem Überwachsen mit Rohrkolben, Schilf und Wasserlinsen geschützt werden. Um die langfristige Retentionskapazität eines Feuchtgebiets bzw. Weihers zu erhalten, muss ausserdem das Pflanzenmaterial und das Sediment in regelmässigen Abständen ausgeräumt werden. Dies verhindert, dass die Bio-

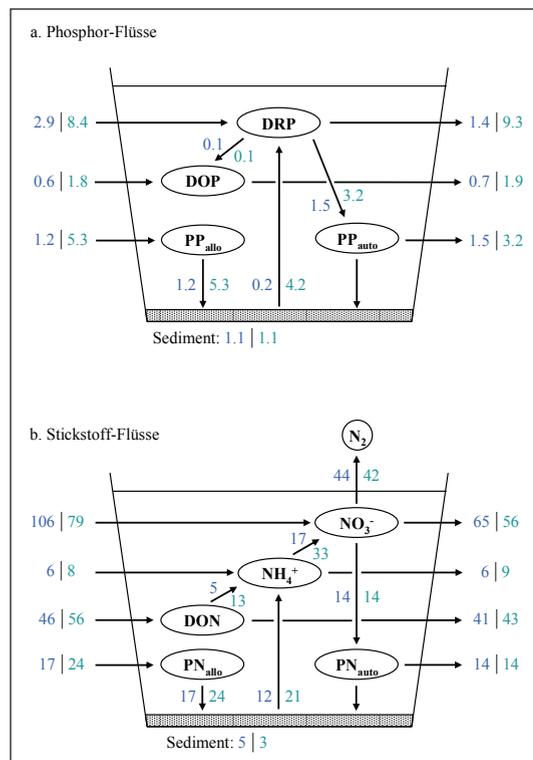


Abb. 8 P- (a)- und N-Flüsse (b) ($\text{g/m}^2 \text{ Jahr}$) im Sonnhof-Weiher (blau) und im Boden-Weiher (grün).

masse mineralisiert wird und die freigesetzten Nährstoffe ausgespült werden.

Feuchtgebiete sind ein natürlicher Bestandteil des Schweizer Mittellands. Da sie das Drainagewasser bei Starkregen speichern und nach Abklingen der Niederschläge verzögert wieder abgeben, können sie auch zur Entschärfung der lokalen Hochwassersituation beitragen. Ihre Flachufer fördern als wechselfeuchte Standorte die Artenvielfalt und sind Refugien für die lokale Pflanzen- und Tierwelt [28]. Als naturnahe Biotope in einer intensiv genutzten Kulturlandschaft eröffnen sie der Bevölkerung einen attraktiven Naherholungs- und Erlebnisraum und sensibilisieren Landwirte und Anwohner für die Belange des Gewässerschutzes [29].

Dass sich der Sempachersee mit Retentionsweihern alleine nicht sanieren lässt, war und ist unumstritten. Bei einer durchschnittlichen Retentionsleistung von 1,1 g P/m² Jahr würden Retentionsweiher mit einer Gesamtfläche von 1,8 km² benötigt, um den P-Eintrag in den Sempachersee um zwei Tonnen zu senken. Dies entspräche etwa 3 % des Einzugsgebiets des Sempachersees. Setzt man die Baukosten mit 15 CHF/m² an, so würde sich das gesamte Investitionsvolumen auf etwa 27 Mio. Franken belaufen. Bei einer durchschnittlichen Verzinsung von 4 % entspricht dies einem jährlichen Kostenaufwand von 500 Franken pro Kilo Phosphor. Der Bau von Retentionsweihern kann nicht als Ersatz für Massnahmen dienen, welche die P-Übersorgung des Bodens mindern. Im Rahmen des P-Projekts Sempachersee können Retentionsweiher als naturnahe Pflanzenkläranlagen dennoch einen Beitrag dazu leisten, den landwirtschaftlichen P-Eintrag in den See zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [1] IKSAR. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (1999): Übereinkommen zum Schutz des Rheins. 12. April 1999.
- [2] OSPAR. Oslo Paris Kommission (1992): Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks. 22. September 1992.
- [3] BUWAL. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1996): Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen.
- [4] GSchV. (1998): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998.
- [5] AfU. Amt für Umweltschutz, Kanton Luzern (1999): Zufluss-Untersuchungen Sempachersee 1992/97.
- [6] Höhener, P. (1990): Der Stickstoffhaushalt von Seen, illustriert am Beispiel des Sempachersees. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich.
- [7] Gächter, R. and Wehrli, B. (1998): Ten years of artificial mixing and oxygenation: No effect on the internal phosphorus loading of two eutrophic lakes. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3659–3665.
- [8] Kanton Luzern (1999): Projekt Sempachersee.
- [9] Heinisch, R., i.A. Landwirtschaft und Wald (LAWA), Kanton Luzern (2005): Retentionsweiher – dezentrale Nährstoffsinken zur Phosphorfixierung im ländlichen Raum.
- [10] Kovacic, D. A.; David, M. B.; Gentry, L. E.; Starks, K. M. and Cooke, R. A. (2000): Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agricultural tile drainage. *J. Environ. Qual.* 29, 1262–1274.
- [11] Jordan, T. E.; Whigham, D. F.; Hofnackel, K. H. and Pittek, M. A. (2003): Nutrient and sediment removal by a restored wetland receiving agricultural runoff. *J. Environ. Qual.* 32, 1534–1547.
- [12] UWE Luzern. Umwelt und Energie, Kanton Luzern. Messstation ARA Sempach-Neuenkirch.
- [13] Reinhardt, M.; Gächter, R.; Wehrli, B. and Müller, B. (2005): Phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural drainage water. *J. Environ. Qual.* 34, 1251–1259.
- [14] Reinhardt, M.; Müller, B.; Gächter, R. and Wehrli, B. (2006): Nitrogen retention in a small constructed wetland – an isotope mass balance approach. *Environ. Sci. Technol.* 40, 3313–3319.
- [15] Müller, B.; Reinhardt, M. and Gächter, R. (2003): High temporal resolution monitoring of inorganic nitrogen load in drainage waters. *J. Environ. Monit.* 5, 808–812.
- [16] LAWA Luzern. Landwirtschaft und Wald, Kanton Luzern. Daten.
- [17] Gächter, R.; Mares, A.; Stamm, C.; Kunze, U. and Blum, J. (1996): Dünger düngt Sempachersee. *Agrarforschung* 3, 329–332.
- [18] Gächter, R.; Ngatiah, J. M. and Stamm, C. (1998): Transport of phosphate from soil to surface waters by preferential flow. *Environ. Sci. Technol.* 32, 1865–1869.
- [19] Stamm, C.; Flühler, H.; Gächter, R.; Leuenberger, J. and Wunderli, H. (1998): Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27, 515–522.
- [20] Gächter, R.; Steingruber, S. M.; Reinhardt, M. and Wehrli, B. (2004): Nutrient transfer from soil to surface water: Differences between nitrate and phosphate. *Aquat. Sci.* 66, 1–6.
- [21] Hoagland, C. R.; Gentry, L. E.; David, M. B. and Kovacic, D. A. (2001): Plant nutrient uptake and biomass accumulation in a constructed wetland. *J. Freshw. Ecol.* 16, 527–540.
- [22] Johnston, C. A. (1991): Sediment and nutrient retention by fresh-water wetlands – effects on surface-water quality. *Crit. Rev. Environ. Control* 21, 491–565.
- [23] Reddy, K. R.; Kadlec, R. H.; Flaig, E. and Gale, P. M. (1999): Phosphorus retention in streams and wetlands: A review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 29, 83–146.
- [24] Korner, S. and Vermaat, J. E. (1998): The relative importance of Lemna gibba L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater. *Wat. Res.* 32, 3651–3661.
- [25] Zimmo, O. R.; van der Steen, N. P. and Gijzen, H. J. (2004): Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilisation ponds. *Wat. Res.* 38, 913–920.
- [26] Hupfer, M.; Gächter, R. and Giovanoli, R. (1995): Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquat. Sci.* 57, 305–324.
- [27] Wehrli, B. and Wüest, A. (1996): Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen. Schriftenreihe der EAWAG 9.
- [28] Gassner, A. (2004): Retentionsweiher zum Schutz der Gewässer vor intensiver Landwirtschaft? – Untersuchungen über Nährstoffaufnahmekapazität und ökologische Bedeutung des Retentionsweihers «Boden» im Einzugsgebiet des Sempachersees (Schweiz). Diplomarbeit, Departement Naturschutzbiologie, Universität Basel.
- [29] Staehelin, P. (2003): Umweltwahrnehmung von Landwirten. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Freiburg.
- [30] Ebina, J.; Tsutsui, T. and Shirai, T. (1983): Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation. *Wat. Res.* 17, 1721–1726.

Keywords

Retentionsweiher – Phosphor – Stickstoff – Drainagewasser

Adresse der Autoren

Miriam Reinhardt, Dr. sc. nat.
miriam.reinhardt@eawag.ch

Beat Müller, Dr. sc. nat. ETH
beat.mueller@eawag.ch

René Gächter, Dr. sc. nat. ETH
rene.gaechter@eawag.ch

Eawag
Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz
Seestrasse 79
CH-6047 Kastanienbaum
Tel. +41 (0)41 349 21 53
Fax +41 (0)41 349 21 68