

Stoffflüsse

Stoffflüsse im Greifenseegebiet: Phosphor und Stickstoff

Volker Prasuhn und Felix Herzog, Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, CH-8046 Zürich
Michael Schärer und Emmanuel Frossard, Institut für Pflanzenwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), CH-8315 Lindau

Hannes Flüeler, Institut für terrestrische Ökologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), CH-8952 Schlieren

Christian Flury und Kurt Zraggen, Institut für Agrarwirtschaft, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), CH-8092 Zürich

Auskünfte: Volker Prasuhn: E-Mail: volker.prasuhn@fal.admin.ch, Tel. +41 (0)1 377 71 45

Zusammenfassung

Die Phosphorkonzentration im Greifensee übersteigt auf Grund zu hoher Phosphoreinträge nach wie vor den Zielwert. Beim Stickstoff liegen derzeit keine relevanten Gewässerbelastungen vor. Mit dem Stoffflussmodell «Modiffus» wurden die Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen abgeschätzt. Hohe Phosphoreinträge erfolgen vor allem aus drainierten Ackerflächen, durch Erosion und aus Graslandflächen durch Abschwemmung. Hohe Stickstoffeinträge resultieren aus der Auswaschung und aus Drainageverlusten unter Ackerland. Weitere Modellrechnungen zeigen das Potenzial auf, um die Phosphorbelastung zu senken. Mit Massnahmen in der Landwirtschaft werden die Phosphoreinträge mittelfristig nicht so weit vermindert werden können, dass der Zielwert im Greifensee erreicht werden kann.

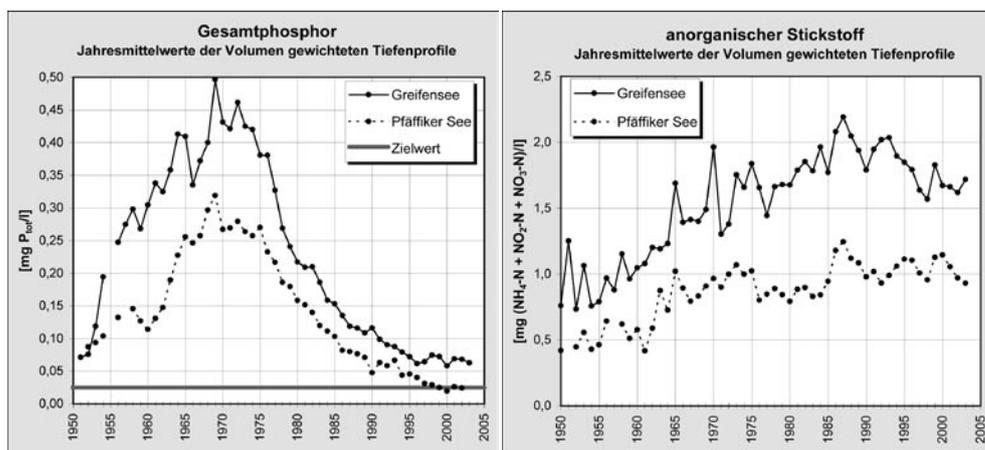
Der Greifensee ist ein Flachsee mit einer maximalen Tiefe von 32 m und einer mittleren Aufenthaltszeit des Wassers von rund 420 Tagen. Die wichtigsten Zuflüsse sind die Aa und der Aabach. Mit seiner geringen Tiefe und einem tiefen Sauerstoffvorrat ist der Greifensee während der Schichtungsperiode im Sommer von Natur aus nur wenig mit Phosphor (P) belastbar. Hohe P-Konzentrationen fördern in Seen das Algenwachstum, das heisst die Eutrophierung. Die Folge ist Sauerstoffmangel, der zu einer Abnahme der Biodiversität und letztlich zum Fischsterben führen kann.

Mitte der 1950er Jahre erfolgte ein starker Anstieg der P-Konzentration im Greifensee durch die Einleitung ungereinigter Abwässer einer wachsenden Bevölkerung in der Region sowie durch Nährstoffe aus der Landwirtschaft. Der Höhepunkt dieser Belastung war 1969 mit einer mittleren Konzentration von 0,5 mg P/l erreicht. Der Bau von Abwasserreinigungsanlagen und der Ausbau der Kanalisationssysteme, die Ausrüstung der Abwasserreinigungsanlagen mit einer P-Elimination, das P-Verbot in Waschmitteln sowie Massnahmen in der Landwirtschaft haben in den vergangenen 30 Jahren zu

einer massiven Abnahme der P-Konzentration im Greifensee geführt (Abb. 1). Seit 1969 sank die P-Konzentration kontinuierlich bis auf rund 0,06 mg P/l im Jahr 1996. Seitdem konnte keine weitere Abnahme mehr registriert werden. Die P-Konzentration beträgt aber noch knapp das Dreifache des Zielwertes von 0,025 mg P/l. Der See befindet sich heute somit in einem Gleichgewichtszustand auf zu hohem Niveau und gilt weiterhin als überdüngt. Im Gegensatz dazu liegt die P-Konzentration im Pfäffiker See seit Ende der 1990er Jahre im Bereich des Zielwertes.

Die Konzentration des Stickstoffs (N) im Greifensee stieg ebenfalls in den 1950er Jahren von Werten unter 1 mg N/l kontinuierlich an und erreichte ihren Höhepunkt 1987 mit 2,2 mg N/l. Seither ist eine leichte Abnahme zu verzeichnen (Abb.1). Dieselbe Entwicklung zeigt sich auch im Pfäffiker See. Im Gegensatz zum Phosphor sind hohe N-Konzentrationen in Seen meist unproblematisch. Im Grundwasser dagegen, welches in vielen Regionen der Schweiz die bedeutendste Trinkwasserressource darstellt, sind hohe Nitratkonzentrationen aus gesundheitlichen Überlegungen unerwünscht. Die Nitratbelastung des Grundwassers ist in der Region Greifensee derzeit aber kein grosses Problem.

Abb. 1. Entwicklung der P- und N-Konzentrationen im Greifensee und Pfäffiker See (AWEL 2004).



wie der Landwirtschaft und natürlicher Hintergrundlast, sowie aus punktuellen Quellen wie Kläranlagen, Regenwasserentlastungen und Meteorwasser. Die bedeutendsten diffusen Eintragspfade für Stickstoff und Phosphor aus der Landwirtschaft sind Abschwemmung, Erosion, Auswaschung und Drainageabfluss. Von untergeordneter Bedeutung sind Einträge vom Hofareal, Direkteinleitungen über Düngerausstrag oder weidendes Vieh und atmosphärische Deposition auf Gewässerflächen. Die genannten Einträge hängen von unterschiedlichen Faktoren ab:

■ Die Abschwemmung erfolgt über den Oberflächenabfluss und hängt von Niederschlag, Landnutzung, Hofdüngermanagement, Hangneigung und Bodendurchlässigkeit ab. Die Abschwemmung ist beim Phosphor ein wichtiger Eintragspfad und erfolgt über direkte Gülleabschwemmung im Grünland oder von Böden, die mit Phosphor stark angereichert sind.

■ Die Erosion und damit die Menge des abgetragenen partikulären Phosphors wird primär durch die Grössen Bodenverhältnisse, Niederschlag, Hangneigung, Landnutzung und Bewirtschaftung bestimmt. P-Einträge durch Erosion treten vor allem aus Ackerflächen auf.

■ Die Auswaschung über das Sickerwasser ist beim Stickstoff ein wichtiger Eintragspfad. Sie wird durch die Faktoren Klima, Bodeneigenschaften und -bearbeitung, Kulturwahl und Anbauverfahren sowie Düngungsmanagement beeinflusst und kann vor allem im Ackerbau zu Problemen führen.

■ Drainageverluste sind bei Phosphor und Stickstoff ein wichtiger Eintragspfad. Sie werden durch die Faktoren Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung massgeblich beeinflusst

und können unter Acker- und Grasland problematisch sein.

Im Hinblick auf eine Verringerung der Stoffeinträge in die Gewässer ist deren Quantifizierung von entscheidender Bedeutung. Bei lokalen Quellen ist eine messtechnische Überwachung der Nährstoffbelastung des Gewässers durchführbar. Eine flächendeckende Überwachung diffuser Quellen ist aber weder finanziell noch messtechnisch machbar. Um die Höhe der Einträge aus diffusen Quellen abschätzen und die Herkunft der Stoffeinträge lokalisieren zu können, sind deshalb Modellrechnungen notwendig. Diese ermöglichen es, die landwirtschaftlichen Stoffeinträge direkt mit der Flächennutzung und indirekt mit der Tierhaltung zu verbinden.

Modellberechnungen mit Modiffus

Mit dem Stoffflussmodell «Modiffus», dem Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in Gewässer, wurden die P- und N-Einträge aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Greifensees abgeschätzt (Prasuhn 2003, Prasuhn und Spiess 2004). Für die Abschätzung wurden umfangreiche Naturraum- und Nutzungsinformationen digital aufbereitet und verknüpft (Tab. 1). Auf der Grundlage von Resultaten aus Feldversu-

chen, Literaturrecherchen und Expertenwissen wurden die Wasser- und Stoffflüsse quantifiziert. Zunächst wurde für jeden Rasterpunkt von 25 mal 25 Meter der Abfluss ermittelt, das heisst der Niederschlag minus die nutzungsspezifische Verdunstung. Darauf aufbauend wurden Oberflächenabfluss, Drainage- und Grundwasserabfluss für die einzelnen Landnutzungskategorien berechnet. Die Berechnung der Stofffrachten erfolgte anschliessend durch Multiplikation der Wasserflüsse mit den entsprechenden nutzungs- und gebietsspezifischen Stoffkonzentrationen für die verschiedenen Eintragspfade. Mit demselben Modellansatz wurde auch die natürliche Hintergrundlast, das heisst die Fracht bei natürlicher Vegetation ohne menschliche Beeinflussung, berechnet.

Während Modiffus die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus der Landnutzungskarte und den Daten der Betriebszählung bezieht, ist die Landnutzung im Modell des Kernprojektes das Ergebnis von Modellrechnungen unter vorgegebenen Rahmenbedingungen (Zraggen *et al.* 2004). Zur Abschätzung der Stoffflüsse im Kernprojekt wurde daher eine an die Struktur des ökonomischen Modells angepasste Version von Modiffus verwen-

Tab. 1. Überblick über die verwendeten Grundlagendaten

Daten	Typ	Auflösung/Massstab
Landnutzung (13 ausgewählte Kategorien)	digital	Rasterdaten, auf 25 x 25 m generalisiert
Topographie (Höhe, Neigung, Exposition)	digital	Rasterdaten, auf 25 x 25 m generalisiert
Boden	digital	Polygone, 1:5'000 auf 25 x 25 m gerastert
Einzugsgebietsgrenzen	digital	Vektor
Gemeindegrenzen	digital	Vektor
Gewässernetz	digital	Vektor
Niederschlag	digital	Raster 4 km ²
Landwirtschaftliche Kulturen	Statistik	Betrieb
Tierzahlen	Statistik	Betrieb
Drainageflächen	digital	Polygone, auf 25 x 25 m gerastert



Abb. 2. Feldversuch im Wassereinzugsgebiet des Greifensees: Monitoring von P-Verlusten im Oberflächenabfluss auf der Versuchsfläche bei Grüningen (Foto: Michael Schärer, ETHZ).

det. Die Anpassungen betrafen einerseits die Risikoklassierung der Böden. Andererseits wurden die Stoffverluste der standortspezifischen Flächennutzung zugewiesen und nicht über den Wasserabfluss und die Stoffkonzentrationen berechnet. Im Gegensatz zu Modiffus wurde für die Berechnung der Stoffeinträge der Anschluss der Flächen an die Gewässer berücksichtigt, welcher gleichzeitig für die Klassierung der Risikoflächen für die Pflanzenbehandlungsmittelverluste verwendet wurde (Stamm *et al.* 2004).

Modellgrenzen von Modiffus

Modelle stützen sich auf Annahmen und Daten, welche mit Unsicherheiten behaftet sind. Modelle sind zudem Vereinfachungen, welche die dominanten Prozesse und Systemeigenschaften beschreiben sowie die weniger wichtigen Prozesse gezielt vernachlässigen. Bei jeder Modellanwendung stellt sich grundsätzlich die Frage, ob die im Modell erfassten Konzepte und die verwendeten, modellspezifischen Input-Parameter die Realität tatsächlich erfassen (Beven 2002, Hoffmann-Riem 2003). Folgende Punkte schränken die Aussagekraft des verwendeten Stoffflussmodells ein:

- Statische Modelle wie Modiffus können dynamische Prozesse nicht erfassen. Dies lässt

sich anhand einer Feldstudie verdeutlichen (Abb. 2), welche im Rahmen des Greifenseeprojektes das Systemverhalten von Phosphor auf einer stark mit Phosphor versorgten Dauerwiese der P-Versorgungsklasse C bis E untersucht (Schärer 2003, Vollmer 2004). Die Studie zeigt auf, dass auch ohne P-Düngung die P-Gehalte im Boden und die P-Verluste in die Gewässer mittelfristig nicht signifikant sinken. Biotische und abiotische Prozesse sorgen für eine ständige Nachlieferung von leicht verfügbarem, mobilem Phosphor aus den P-Vorräten des Bodens, die sich über Jahrzehnte durch Düngung angereichert haben. Daraus kann man schliessen, dass über eine Reduktion der P-Düngung nur langfristig eine Abnahme der P-Verluste erreicht werden kann.

- Die Distanzen der Nährstoffquellen zu den nächsten Gewässern oder Nährstoffsinken beeinflussen den Eintrag von Phosphor und Stickstoff in die Gewässer stark (McDowell *et al.* 2001). Dieser Faktor ist in Modiffus nicht berücksichtigt, weil vereinfachend die Mobilisierung von Phosphor und Stickstoff auf jedem Raster unabhängig von Nachbarschaftsbeziehungen berechnet und über das ganze Einzugsgebiet aufsummiert wird.

- Die Input-Parameter werden für Modiffus auf einer bestimmten Rasterskala gemittelt. Im Fall des Niederschlags aber beeinflussen Extremereignisse wie Starkregen von kurzer Dauer oder sehr niederschlagsreiche Jahre die Stoffeinträge in die Oberflächengewässer massgeblich (Herzog 2001). Korrelieren zum Beispiel bei Extremereignissen hohe Abflüsse mit hohen Nährstoffkonzentrationen, werden bei der Verwendung langjähriger Mittelwerte die Nährstofffrachten unterschätzt. Auch bei den landwirtschaftlichen Input-Daten werden nur Mittel- oder Normwerte ver-

wendet. Unterschiedliche Düngungs- und Ertragsniveaus sowie Bodenbearbeitungsverfahren und Hofdüngermanagement können aber einen starken Einfluss auf die Stoffverluste haben.

Die aufgeführten Punkte führen unvermeidlich zu einer Unsicherheit der Aussage, der nur mit dynamischen Simulationsmodellen Rechnung getragen werden kann. Solche Modelle sind jedoch bezüglich der Input-Parameter anspruchsvoller. Insbesondere müssen parzellenscharfe Bewirtschaftungsdaten erhoben und eine hohe zeitliche Auflösung angestrebt werden. Daher eignen sich solche Modelle nur für kleinere Einzugsgebiete. Entsprechende Fallstudien sind zurzeit in Bearbeitung für Stickstoff in der Region Fehraltorf (Decrem 2004) und für Phosphor in der Region Sempachersee (Lazzarotto 2004). Mit dem konzeptionellen Modell Modiffus lassen sich nur auf einer regionalen Skala Gebiete mit einem hohen oder tiefen Risiko für N- und P-Verluste identifizieren, wobei die Begriffe «hoch» und «tief» relativ bleiben und Unschärfen aufweisen. Dementsprechend sind Aussagen nur als eine erste Annäherung anzusehen.

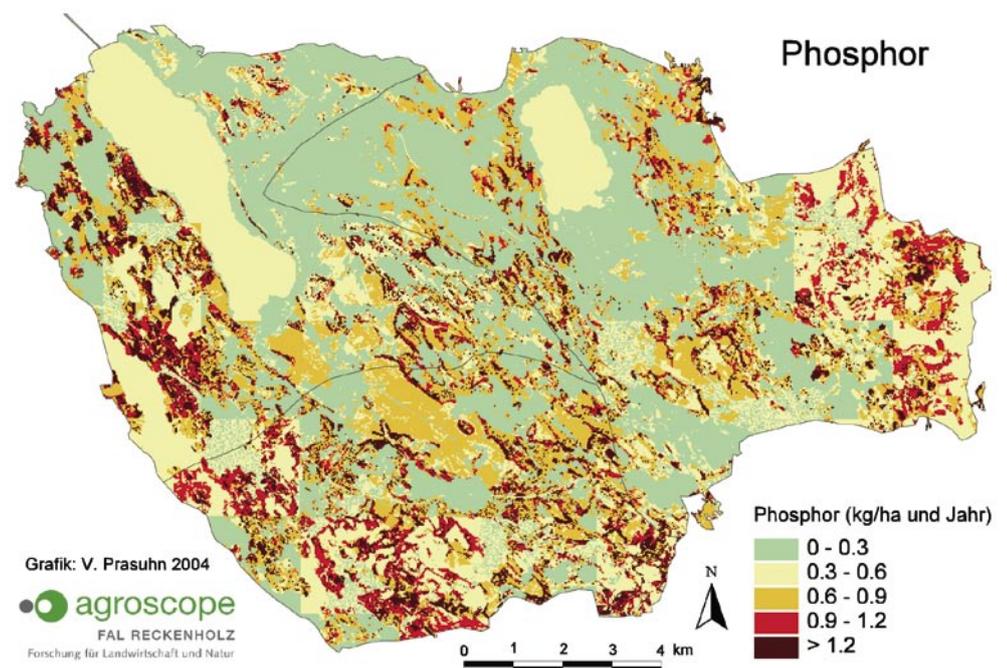
Stoffflussbezogene Gebietscharakterisierung

Die Gesamteinzugsgebietsfläche des Greifensees und des Pfäffiker Sees beträgt 16'432 ha inklusive der Seeflächen (845 ha Greifensee, 303 ha Pfäffiker See). Insgesamt haben 26 Gemeinden Flächenanteile und 525 Landwirtschaftsbetriebe Parzellen im Einzugsgebiet. Mit über 11'000 Einwohnern, die an sieben Kläranlagen angeschlossen sind, ist das Gebiet dicht besiedelt. 54 % der Gesamtfläche sind landwirtschaftliche Nutzflächen (LN), 20 % Wald, 10 % unproduktive Flächen inklusive der beiden grossen Seen und 16 % Siedlungsflächen mit

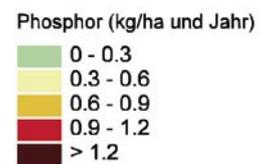
über der Hälfte davon Siedlungsgrünflächen. 63 % der LN ist Grasland und 37 % Ackerland. 74 % des Graslands sind intensiv genutzte Dauerwiesen, 17 % wenig intensiv genutzte Wiesen, 6 % Weiden, 2 % extensiv genutzte Wiesen und 1 % Niederstamm-Obstbau. Vom Ackerland sind 28 % Kunstwiesen, 37 % Getreide, 26 % Mais, 4 % Raps und 2 % Hackfrüchte. Mit 27 % der LN sind im Einzugsgebiet Greifensee / Pfäffiker See grosse Flächenanteile drainiert. Der Viehbesatz liegt bei durchschnittlich 1,2 Grossvieheinheiten pro Hektare düngbarer landwirtschaftlicher Nutzfläche und ist damit deutlich niedriger als in den Einzugsgebieten der Luzerner Mittellandseen. Der mittlere Gebietsniederschlag liegt bei 1'335 mm. Im nördlichen Teil werden mit 1'100 mm die niedrigsten, im östlichen Teil mit 1'600 mm die höchsten Werte erreicht. Der mittlere Gebietsabfluss liegt bei 765 mm beziehungsweise 4'080 l/s.

Berechnete N- und P-Verluste

Insgesamt gelangen im Einzugsgebiet des Greifensees nach Moddiffus rund 9 t P und 333 t N pro Jahr aus diffusen Quellen in die Gewässer. Während beim Phosphor mit 42 % ein hoher Anteil der diffusen Gesamteinträge partikulärer Phosphor ist, dominieren beim Stickstoff mit 96 % die gelösten Einträge eindeutig. 60 % der gesamten diffusen P-Einträge stammen aus diffus anthropogenen Quellen, das heisst überwiegend aus der Landwirtschaft, 40 % sind natürliche Hintergrundlast. Die Einträge aus der natürlichen Hintergrundlast sind allerdings überwiegend partikulärer, schwer verfügbarer Phosphor und beeinflussen daher die Eutrophierung des Sees kaum. Beim Stickstoff ist der diffus anthropogene Anteil mit rund 80 % bedeutend höher. Die flächenspezifischen diffusen Stoffverluste liegen durchschnittlich



Phosphor



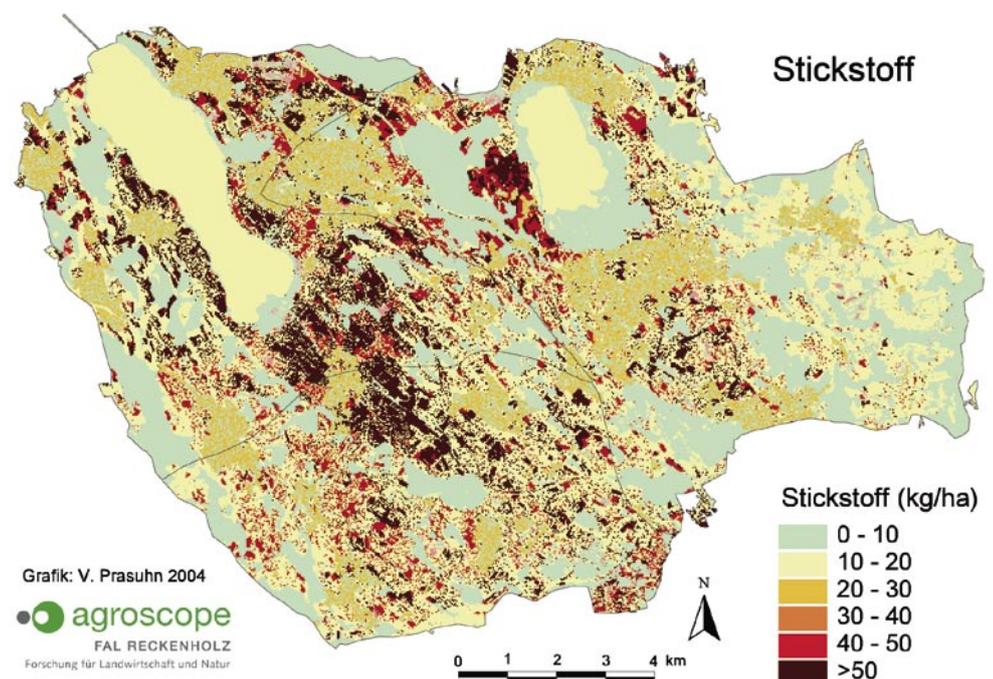
bei 548 g P/ha und Jahr und bei 20 kg N/ha und Jahr. Dabei gibt es jedoch in Abhängigkeit von der Nutzung und naturräumlichen Ausstattung grosse regionale Unterschiede. Die räumlich differenzierte Verteilung auf Rasterebene zeigt Bereiche mit erhöhten P-Verlusten vor allem in den Hanglagen der Drumlinlandschaft im südlichen Gebietsteil, in den Hanglagen des Pfannenstiels und im Molassebergland im östlichen Gebiets-

teil (Abb. 3). Hohe N-Verluste treten vor allem im Talboden, im Schwemmkegel westlich des Greifensees und in der Eiserfallslandschaft westlich des Pfäffiker Sees auf (Abb. 4).

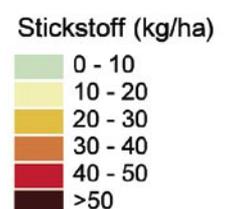
Hohe P-Verluste entstehen vor allem durch Drainagen unter Ackerland mit durchschnittlich 462 g P/ha und Jahr und unter intensiv genutztem Grasland mit durchschnittlich 408 g P/ha und Jahr. Die Verluste durch Ab-

Abb. 3. Phosphorverluste aus diffusen Quellen im Wassereinzugsgebiet des Greifensees.

Abb. 4. Stickstoffverluste aus diffusen Quellen im Wassereinzugsgebiet des Greifensees.



Stickstoff



schwemmung von Graslandflächen betragen durchschnittlich 317 g P/ha und Jahr. Die Verluste durch Auswaschung sind vergleichsweise niedrig und betragen unter Ackerland und Grasland jeweils im Mittel um 65 g P/ha und Jahr und unter Wald im Mittel 50 g P/ha und Jahr. Die mittleren Verluste durch Boden-erosion von Ackerland liegen bei 263 g P/ha und Jahr.

Die höchsten N-Verluste werden durch Drainagen unter Ackerland mit durchschnittlich 46 kg N/ha und Jahr erreicht. Die Auswaschungsverluste betragen unter Ackerland durchschnittlich 35 kg N/ha und Jahr, unter Siedlungsgrünflächen 22 kg N/ha und Jahr, unter Grasland 9 kg N/ha und Jahr und unter Wald 8 kg N/ha und Jahr. Die N-Deposition auf die Gewässerflächen beträgt im Mittel 17 kg N/ha und Jahr. Die aufsummierten N-Verluste aller Eintragspfade betragen unter Ackerland im Mittel 52 kg/ha und Jahr. Die höchsten Verluste

treten im Talboden mit Werten von über 70 kg N/ha und Jahr auf. Hohe Werte treten ebenfalls im Schwemmkegel beidseits des Greifensees sowie in Muldenlagen der Drumlinlandschaft und der Eiszerfallslandschaft auf. Niedrige Werte unter 40 kg N/ha und Jahr gibt es vor allem im Molassebergland.

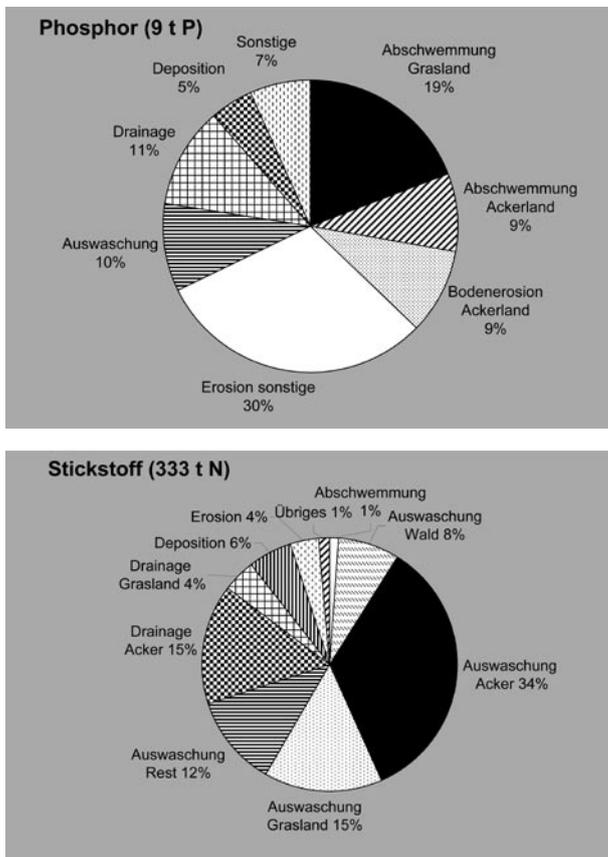
Bei den P-Einträgen ist die Erosion mit einem Anteil von 39 % der wichtigste Eintragspfad, gefolgt von Abschwemmung mit 28 %, Drainagenverlusten mit 11 % und Auswaschung mit 10 % (Abb. 5). Beim Stickstoff gelangt mit 69 % der überwiegende Teil der Verluste aus der Auswaschung in die Gewässer (Abb. 5). Dabei stammt mit 34 % der grösste Teil aus der Auswaschung unter Ackerland. Über Drainagen gelangen mit 19 % ebenfalls noch grosse Mengen Stickstoff in die Gewässer. Knapp 50 % aller N-Verluste stammen aus dem Ackerland, obwohl nur 20 % der Einzugsgebietsfläche Ackerland sind.

wässerschutzgesetz Art. 62a analog zu Projekten im Sempacher-, Baldegger-, und Hallwilersee realisiert werden könnte (Peter *et al.* 2003). Das Massnahmenpaket sieht Folgendes vor: Reduktion der Nährstoffbilanz auf 100 % beziehungsweise unter 100 % auf Flächen mit P-Bodengehalten in den Versorgungsklassen D und E; zusätzliche ökologische Ausgleichsflächen, Pufferstreifen und Rückhalteweiler; konservierende Bodenbearbeitungsverfahren im Ackerbau; Extensivierung besonders gefährdeter Flächen; Düngung zur richtigen Zeit, sowie bauliche Anpassungen wie Gülleleitungen, Güllegruben oder Hofentwässerung. Durch dieses Massnahmenpaket liessen sich die Gesamt-P-Einträge aus der Landwirtschaft in den Greifensee/Pfäffiker See um rund 1,8t P/Jahr beziehungsweise 33 % reduzieren.

■ **Landnutzungsmodell:** Unter den erwarteten Rahmenbedingungen ist in Zukunft mit einer extensiveren landwirtschaftlichen Bewirtschaftung in der Greifenseeregion zu rechnen (Zraggen *et al.* 2004): Die Tierbestände werden reduziert, die Ackerflächen verkleinert und die ökologischen Ausgleichsflächen ausgedehnt. Diese Anpassungen senken die P-Verluste je nach unterstellten Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft um 20 bis 25 % gegenüber der Referenzlösung. Ein grösserer Rückgang ist im Szenario «Öffnung 2011» zu erwarten. In diesem Szenario kompensieren die stärkere Einschränkung der Ackerflächen und die stärkere Extensivierung der Futterbauflächen den im Vergleich zum Szenario «Alleingang 2011» höheren Tierbestand.

Trotz dieser beachtlichen Reduktionspotenziale kann der Greifensee nicht genügend entlastet werden, weil neben den Einträgen aus diffusen Quellen massgebliche Einträge aus der

Abb. 5. Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer im Wassereinzugsgebiet des Greifensees, aufgeschlüsselt nach den wichtigsten Eintragspfaden.



P-Reduktion: kurzfristig – langfristig?

Die P-Konzentration im Greifensee übersteigt auf Grund zu hoher P-Einträge nach wie vor den Zielwert. Zusätzliche Modellrechnungen zeigen auf, in welchem Ausmass die P-Belastung aus der Landwirtschaft gesenkt werden kann: Mit Modiffus werden die Auswirkungen von Massnahmen innerhalb der bestehenden Agrarstrukturen getestet. Mit dem ökonomischen Landnutzungsmodell des Kernprojekts wird dagegen abgeschätzt, welche Belastung auf Grund der strukturellen Anpassungen ohne zusätzliche Massnahmen zu erwarten ist:

■ **Modiffus:** Ausgehend vom ermittelten Ist-Zustand wird der Effekt eines Massnahmenkatalogs abgeschätzt, der im Rahmen eines Phosphor-Projektes nach Ge-

Siedlungsentwässerung stammen: Rund 15 % der P-Einträge in den Greifensee stammen aus Kläranlagen, 12 % aus Entlastungen der Mischsystemkanalisation und 12 % aus Meteorwasserleitungen (AWEL 2003). Zudem beträgt die natürliche Hintergrundlast 22 % und der Eintrag aus dem Pfäffiker See 4 %. Somit macht der Anteil der Landwirtschaft an der P-Gesamtbelastung nur 35 % aus. Die berechneten Eintragsreduktionen aus der Landwirtschaft können die P-Belastung des Greifensees somit nicht soweit reduzieren, dass der Zielwert der P-Konzentration im Greifensee von 0,025 mg/l erreicht wird.

Als Konsequenz der Modiffus-Berechnungen wird für das Greifenseegebiet beim Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) die Erstellung einer Seewasserbelüftungsanlage geprüft. Die künstliche Belüftung soll während der heissen Sommermonate den Sauerstoffgehalt in den tieferen Wasserschichten erhöhen und somit ein mögliches Fischsterben verhindern.

Literatur

■ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), 2003. Phosphor-

belastung des Greifensees. Aktuelle Belastungen, Reduktionspotenziale und deren Kosten, Auswirkungen von Sanierungsmassnahmen auf den Seezustand. Baudirektion Zürich, AWEL, unveröffentlichter Bericht, Zürich. 14 S.

■ Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), 2004. P- und N-Konzentrationen im Greifensee und Pfäffiker See, Zugang: <http://www.gewaesserschutz.zh.ch/> [27.07.2004].

■ Beven K., 2002. Towards a coherent philosophy for environmental modelling. *Proceedings of the Royal Society London* (458), 2465 - 2484.

■ Decrem M., 2004. Simulating nitrogen leaching at different scales. Diss. ETH Zürich und Agroscope FAL Reckenholz (in Vorbereitung).

■ Herzog P., 2001. Baldeggersee – Auswertung der Zuflussuntersuchungen 1995 bis 1999. Amt für Umweltschutz Luzern, 41 S.

■ Hoffmann-Riem H., 2003. Die Sanierung des Sempachersees. Eine Fallstudie über ökologische Lernprozesse. Ökom Verlag, München, 250 S.

■ Lazzarotto P., 2004. Modelling P runoff at the catchment level (Lake Sempach). Diss. ETH-Zürich und Agroscope FAL Reckenholz (in Vorbereitung).

■ McDowell R., Sharpley A. and Folmar G., 2001. Phosphorus export from an agricultural watershed: Linking source and transport mechanisms. *Journal of Environmental Quality* **30**, 1587-1595.

■ Peter K., Blum J., Gerber S. und Prasuhn V., 2001. Vorabklärungen für ein Projekt zur Verminderung der Phosphorbelastung des Greifensees aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung. Unveröffentlichter Bericht z. H. des AWEL, Zürich.

■ Prasuhn V., 2003. Abschätzung der Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in den Greifensee. Interner Bericht FAL, Zürich 54 S., Zugang: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html> [15.09.2004].

■ Prasuhn V. und Spiess E., 2004. Abschätzung der Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in den Greifensee. Interner Bericht FAL, Zürich. 27 S., Zugang: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/umwelt/wasser/wasser.html> [15.09.2004].

■ Schärer M., 2003. The influence of processes controlling phosphorus availability on phosphorus losses in grassland soils. Diss. ETH Zürich Nr. 15312.

■ Stamm C., Singer H., Szerencsits E., Zraggen K. und Flury C., 2004. Standort und Herbizideinsatz aus Sicht des Gewässerschutzes, *Agrarforschung* **11**(10), 446-451.

■ Vollmer T., 2004. Processes controlling phosphorus losses from grassland soils. Diss. ETH, in preparation.

■ Zraggen K., Flury C., Gotsch N. und Rieder P., 2004. Entwicklung der Landwirtschaft in der Region Greifensee, *Agrarforschung* **11**(10), 434-439.

RÉSUMÉ

Flux de matières dans la région du lac de Greifensee: phosphore et azote

Suite à des apports en phosphore trop élevés, la concentration de phosphore dans le lac de Greifensee continue à dépasser le seuil défini comme objectif. En ce qui concerne les concentrations d'azote dans les eaux, les valeurs ne sont pour l'instant pas significatives. Le modèle de flux de matières «Modiffus» a permis d'estimer les apports de phosphore et d'azote émanant de sources diffuses. Les apports élevés en phosphore proviennent essentiellement du drainage des terres assolées, de l'érosion et du ruissellement sur les surfaces herbagères. Les apports d'azote, eux, viennent du lessivage et des pertes de drainage sous les terres assolées. D'autres simulations montrent quelles sont les possibilités de réduire les charges en phosphore. Les mesures prises dans l'agriculture ne permettront pas à moyen terme de réduire les apports en phosphore au point d'atteindre le seuil défini comme objectif dans le lac de Greifensee.

SUMMARY

Inputs from diffuse sources in the Greifensee area: phosphorus and nitrogen

The phosphorus concentration in the Greifensee continues to exceed the target value, due to excessive phosphorus inputs. No relevant water pollution by nitrogen is currently evident. Phosphorus and nitrogen inputs from diffuse sources have been estimated with the aid of the Modiffus model. High phosphorus inputs are principally due to leaching of drained arable land, soil erosion from arable land and run off from grassland. High nitrogen inputs are the result of leaching and drainage losses from arable land. Further model calculations show the potential for reducing phosphorus pollution. Measures by farmers will not reduce phosphorus inputs sufficiently in the medium term to reach the target value for the Greifensee.

Key words: phosphorus, nitrogen, diffuse pollution, water protection