

Diss ETH Nr. 16456

**PHOSPHORUS AND NITROGEN RETENTION
IN SMALL CONSTRUCTED WETLANDS
TREATING NON-POINT SOURCE POLLUTION**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

MIRIAM REINHARDT
Dipl.-Geoökol., University of Karlsruhe
born 15 April 1975
citizen of Germany

accepted on recommendation of
Prof. Dr. Bernhard Wehrli, examiner
Prof. Dr. Emmanuel Frossard, co-examiner
Dr. Beat Müller, co-examiner

2006

ABSTRACT

Natural and artificial wetlands are increasingly used to reduce non-point source pollution and to contribute to the restoration of eutrophicated inland and coastal waters. In the Central Swiss Plateau, several small wetlands have been constructed at the interface between cultivated grassland and receiving waters in order to retain dissolved and particulate nutrients of agricultural drainage water. For designing efficient wetland structures detailed knowledge of wetland loading and functioning is required. The central issue of this thesis was to investigate the hydrological and biogeochemical key processes and factors governing wetland phosphorus (P) and nitrogen (N) retention in the short and long-term.

For assessing P and N transformations, two morphologically different wetlands in the watershed of Lake Sempach were selected: the shallow, 2350 m² large Wetland Sonnhof (maximum depth 0.6 m), and the deeper, 720 m² large Wetland Boden (maximum depth 3 m). Measuring the input and output fluxes of the dissolved and particulate P and N species for 2 and 2.5 years at a high temporal resolution and sampling the wetlands' water columns, vegetation, and sediments allowed for establishing total nutrient balances as well as assessing wetland internal processes such as assimilation, settling, and mineralisation. In addition, nitrification and denitrification were estimated from a N isotope mass balance integrating the isotope signature of nitrate (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) and particulate N (PN).

High water discharge events determined nutrient loading and retention efficiency of the wetlands. Up to 60% of the annual P and N load entered the wetlands during only 60 d yr⁻¹ when hydraulic loading rates exceeded 200 mm d⁻¹. Isolated manure spills contributed less than 1% to the overall N input. Short-term P and N retention efficiency increased with increasing water residence time, but declined significantly during high discharge events. Minimum water residence time during high flow was identified as the key parameter governing wetland retention efficiency. In accordance with a plankton model a minimum water residence time of 7 days is suggested in order to retain approximately 50% of the P load.

Phytoplankton was the wetland compartment most efficient in assimilating the crucial short-term nutrient loadings. Duckweed, which covered the water surface of Wetland Boden, significantly reduced retention efficiency.

On the long-term, both wetlands retained $1.1 \text{ g P m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ corresponding to a retention efficiency of 23% in Wetland Sonnhof and 7% in Wetland Boden. Higher surface specific P loading only fuelled the wetland internal recycling, i.e. assimilation, settling, mineralisation and release, but did not increase benthic P accumulation.

Long-term N retention amounted to $49 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (28%) in Wetland Sonnhof and $45 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (27%) in Wetland Boden. Only $5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ and $3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ accumulated in the sediments. To the total N retention, denitrification contributed 90% in Wetland Sonnhof and 94% in Wetland Boden. Denitrification was most efficient when oxic water was overlying anoxic sediments because the NH_4^+ released during mineralisation of sediment organic matter was completely nitrified and subsequently denitrified at the sediment-water interface.

The $\text{NO}_3\text{-N}$ isotope signature in the wetland mainly reflected mineralisation of sediment organic matter and the subsequent nitrification of the released NH_4^+ . Benthic denitrification did not discriminate between ^{14}N and ^{15}N .

Constructed wetlands are capable to efficiently retain P and N from non-point source pollution on the short and long-term, if (i) they are provided with sufficient storage capacities for high discharge events, (ii) they allow for intense plankton growth and oxygen supply to the sediments, and (iii) their biomass and sediments are regularly removed.

ZUSAMMENFASSUNG

Feuchtgebiete besitzen als semiaquatische Ökosysteme mit hoher Produktivität und kleinräumiger biogeochemischer Strukturierung ein grosses Potential, Phosphor (P) und Stickstoff (N) zurückzuhalten bzw. zu eliminieren. Sie werden deshalb weltweit immer häufiger renaturiert oder neu angelegt, um die diffuse Nährstoffbelastung von Oberflächengewässern zu verringern. Im Einzugsgebiet der Schweizer Mittellandseen wurden an der Nahtstelle zwischen Grünlandflächen und Vorflutern mehrere Retentionsweiher gebaut, die das Drainagewasser auffangen und seine Nährstofffrachten verringern sollen. Ziel der vorliegenden Arbeit war, Prozesse und Einflussfaktoren zu untersuchen, welche die kurz- und langfristige P- und N-Retention der Weiher steuern, um ihre Effizienz durch gezielte Massnahmen erhöhen zu können.

Zwei morphologisch unterschiedliche Retentionsweiher im Einzugsgebiet des Sempachersees wurden für die Studie ausgewählt: Der 2350 m² grosse und mit maximal 0.6 m flache „Sonnhof-Weiher“ und der 720 m² grosse und mit maximal 3 m tiefere „Boden-Weiher“ wurden 2 bzw. 2.5 Jahre lang mit hoher zeitlicher Auflösung untersucht. Die detaillierte Analyse der verschiedenen P- und N-Spezies im zu- und abfliessenden Wasser und die Beprobung einzelner Weiherkompartimente, wie z.B. der Vegetation und der Sedimente, ermöglichte es, Nährstoffbilanzen zu erstellen und die wesentlichen weiherinternen Prozesse wie Assimilation, Sedimentation und Mineralisation zu quantifizieren. Nitrifikation und Denitrifikation wurden mit Hilfe einer Massenbilanz der N-Isotope berechnet, welche die Isotopensignatur von Nitrat (NO₃⁻), Ammonium (NH₄⁺) und partikulärem N (PN) berücksichtigte.

Hochwasserereignisse bestimmten den Nährstoffeintrag und die Retentionseffizienz der Weiher. Bis zu 60% der jährlichen P- und N- Fracht wurde an etwa 60 Tagen im Jahr während Starkniederschlägen transportiert, die zu einer hydraulischen Belastung der Retentionsweiher mit mehr als 200 mm d⁻¹ führten. Der direkte Eintrag von Gülle machte weniger als 1% der N-Jahresfracht aus. Der kurzfristige P- und N-Rückhalt stieg mit zunehmender Wasseraufenthaltszeit, fiel jedoch bei Hochwasser rapide ab. Für die Retentionseffizienz der Weiher war deshalb die Mindestwasseraufenthaltszeit während Starkniederschlägen entscheidend, die in Übereinstimmung

mit Modellprognosen mindestens 7 Tage betragen sollte, um etwa 50% der P-Fracht zurückzuhalten.

Phytoplankton assimilierte die eingetragenen Nährstoffe am schnellsten. Wasserlinsen verringerten dagegen die Retentionsleistung der Weiher, da sie eine dichte Matte an der Wasseroberfläche bildeten und den darunterliegenden Wasserkörper abdunkelten.

Langfristig hielten beide Retentionsweiher $1.1 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ zurück. Dies entspricht einer Retentionseffizienz von 23% im Sonnhof-Weiher und 7% im Boden-Weiher. Bei ausreichender Wasseraufenthaltszeit wurden im Boden-Weiher zwar zusätzlich 8 bis $9 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ assimiliert und sedimentiert, der sedimentierte P wurde jedoch wieder mineralisiert und aus dem Weiher ausgespült.

Der N-Rückhalt lag bei $49 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (28%) im Sonnhof-Weiher und $45 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (27%) im Boden-Weiher. In den Sedimenten akkumulierten lediglich $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bzw. $3 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Etwa 90% bzw. 94% des zurückgehaltenen N wurde durch die Denitrifikation eliminiert. Die Denitrifikationsraten waren am höchsten, wenn das bei der Mineralisation freigesetzte NH_4^+ im Wasser nitrifiziert und anschliessend in den anoxischen Sedimenten denitrifiziert wurde.

Die $\text{NO}_3\text{-N}$ Isotopensignatur im Weiher wurde hauptsächlich durch die Mineralisation von organischem Material und die anschliessende Nitrifikation des freigesetzten NH_4^+ bestimmt. Die benthische Denitrifikation führte nicht zu einer Isotopenfraktionierung.

Um P und N effizient zurückhalten zu können, müssen Retentionsweiher (i) eine ausreichende Speicherkapazität für Hochwasser besitzen, (ii) über offene Wasseroberflächen verfügen, die das Planktonwachstum und die Sauerstoffversorgung der Sedimente gewährleisten und (iii) regelmässig ausgeräumt werden.