

DISS. ETH NO. 20057

**Spatial and temporal variability in the transport and transformation of
organic matter and nitrogen in a restored riparian aquifer**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Simone Peter
Master of Science in Biology, University of Zurich

Born 07 June 1980
Citizen of Zurich

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bernhard Wehrli, examiner
Dr. Edith Durisch-Kaiser, co-examiner
Prof. Dr. Klement Tockner, co-examiner
Prof. Dr. Stuart Findlay, co-examiner

2011

Summary

Rivers represent an important link between terrestrial and aquatic ecosystems. They can thereby act, as a pipe, transporting material downstream or as a reactor where intense biogeochemical processes take place and material is chemically reworked or removed. Valuable ecosystem services go along with the mineralization of organic matter (OM), like the removal of nitrate (NO_3^-) through denitrification. The ecological functioning of river systems is strongly shaped by the environmental heterogeneity and hydrological connectivity. Human modification of river corridors has dramatically altered hydrological variation and suppressed natural environmental heterogeneity. Efforts to restore streams and rivers aim at reconstituting these traits, thereby potentially accelerating biogeochemical transformation processes.

The aim of this thesis was to understand how river restoration measures and the increased heterogeneity and hydrological connectivity affect the transport and transformation of OM and nitrogen (N) in the riparian groundwater. I hypothesized that (i) the composition of different riparian zones and the hydrological connectivity will control the OM and N transformations and that (ii) the source and the chemical composition of the OM defines its bioavailability and therefore ultimately limits the OM and N transformations. To this end, I investigated the quantity, quality, and distribution of reactants relevant to the microbial OM and N cycling in the groundwater below different riparian vegetation strips during contrasting discharge conditions. Instrumented study sites for an interdisciplinary research project on river restoration, with the overall aim to improve the understanding of the functioning of coupled hydrological and ecological processes in near-river corridors, were located in a restored and a channelized corridor of the River Thur, Switzerland. The river originates in the Mount Säntis region in northeastern Switzerland and exhibits the dynamic flow regime of an Alpine river because reservoirs and natural lakes are absent in the catchment. After being channelized in the 1890s, several river sections were recently restored and as a consequence habitat diversity and hydrologic connectivity increased.

This study showed that river water represented the main source of OM for the riparian groundwater. However, during flood events large amounts of OM were additionally supplied to the groundwater in a zone densely populated by willow bushes.

Compositional analysis of the OM by size exclusion chromatography revealed a soil and root origin, indicated by an increase in humic and low molecular weight amphiphilic substances. Monitoring the carbon dioxide production with a field membrane-inlet mass spectrometer revealed that this supplementary OM was almost instantaneously respired. This was in agreement with high bacterial secondary production and microbial extracellular enzymatic activity identified at this hot spot location during floods. A freshwater DOM index was constructed based on the amino acid composition of various dissolved OM (DOM) sources and end members that contrasted in diagenetic state and bioavailability. The degradation index was useful in tracking that the OM introduced through the flood-mediated vegetation-soil-groundwater coupling was bioavailable and triggered the formation of a hot spot of microbial activity.

With the help of a groundwater flow model and N-fluxes from the soil to the groundwater, N budgets for the different riparian zones were established and were used to assess the importance of different zones for the whole aquifer NO_3^- removal. Results showed that transport was faster within the restored section than outside and highest NO_3^- removal rates were located below the zone densely populated with willow plants. Furthermore, we found that in this willow bush zone, high microbial activity caused low O_2 concentrations, which ultimately favored denitrification activity, as indicated by N_2 production. The enrichment of ^{15}N and ^{18}O in the residual NO_3^- pool provided additional evidence that denitrification is the main pathway for NO_3^- removal. The abundance of functional genes involved in denitrification further indicated an increased potential for denitrification in groundwater of the willow bush and the forest zones compared to the other riparian zones. In fact, we found that in the aquifer below the alluvial forest, NO_3^- removal takes place, although at low rates. However, if removal was scaled to the areal extent of each zone within the riparian regime, the mass of N removed was highest in the forest zone. This gives rise to the assumption that the forest represents a 'cold denitrification matrix' throughout the year. Generally, compared to the channelized part, NO_3^- removal was enhanced in the restored section, mainly in the hot spot of the willow bush zone and in the cold matrix of the alluvial forest zone.

Overall, this study demonstrated that restoration measures can increase OM and N transformations in a riparian aquifer by configuring different riparian structures and

increasing hydrological connectivity. Pioneer plant dominated zones, like the willow bush zone, and flood-induced water level changes are important ecosystem features with respect to recharge of the soil and groundwater OM inventory with bioavailable substrates and the formation of a hot spot for OM and N transformation.

Zusammenfassung

Flüsse stellen wichtige Verbindungen von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen dar. Durch sie wird Material entweder stromabwärts transportiert oder in intensiven Umbauprozessen in der chemischen Struktur verändert oder aus dem System entfernt. An die Mineralisierung von organischem Material (OM) sind wertvolle Ökosystemleistungen gekoppelt, wie etwa der Abbau von Nitrat (NO_3^-) anhand von Denitrifizierung. Die ökologische Funktionsweise eines Flusssystems wird stark durch die Heterogenität des Systems und durch die hydrologische Konnektivität geprägt. Flusssysteme sind vielerorts durch den Menschen stark verändert worden, wobei die hydrologische Konnektivität stark reduziert und die Heterogenität unterdrückt wurde. Die heutigen Bemühungen Flüsse wieder zu renaturieren zielen darauf ab diese Eigenschaften wieder herzustellen, wodurch möglicherweise auch biogeochemische Umbauprozesse intensiviert werden.

Das Ziel dieser Doktorarbeit war es zu verstehen, wie Flussrenaturierungen und die dadurch erhöhte Heterogenität und hydrologische Konnektivität den Transport und den Umbau von OM und Stickstoff (N) im flussnahen Grundwasser beeinflusst. Ich nahm an, dass (i) verschiedene flussnahe Habitate und die hydrologische Konnektivität wichtige Kontrollfaktoren für den Umbau von OM und N sind, und dass (ii) die Herkunft und die chemische Zusammensetzung des OM seine biologische Verfügbarkeit und folglich auch seinen Abbau definieren. Zu diesem Zweck untersuchte ich die Quantität, die Qualität und die Verteilung der für die OM und N Stoffkreisläufe relevanten Komponenten im Grundwasser während unterschiedlichen Abflussbedingungen. Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts wurden Probenahmestellen in einem aufgeweiteten und einem kanalisierten Abschnitt des Flusses Thur installiert. Das Gesamtziel des Projektes war es das Verständnis über Flussrenaturierungen zu verbessern, indem das Zusammenspiel der hydrologischen und ökologischen Prozesse im flussnahen Grundwasser im Detail aufgeschlüsselt wird. Der Fluss Thur entspringt im Gebiet des Säntismassivs in der Nordost-Schweiz. Das dynamische Abflussregime ist typisch für einen alpinen Fluss, weil Staubecken und natürliche Seen fehlen. Nachdem die Thur in den 90er Jahren des 18. Jahrhunderts kanalisiert worden war,

sind nun in den letzten 10 Jahren einige Flussabschnitte renaturiert und folglich auch die Habitat Vielfalt und ihre hydrologische Konnektivität verbessert worden.

Diese Studie zeigt, dass das Flusswasser die Hauptquelle für das OM im Grundwasser darstellt. Während Hochwasserereignissen werden jedoch in einer Zone mit dichter Weidenpopulation grosse Mengen von OM in das Grundwasser eingetragen. Die chemische Analyse der Grössenfraktionen des OM zeigte einen erhöhten Anteil an Huminstoffen und niedermolekularen amphiphilen Substanzen, was einen Ursprung im Boden- und Wurzelbereich vermuten lässt. Das Monitoring der CO₂ Produktion mit einem Feld Massenspektrometer in dieser Zone zeigte, dass dieses Substrat sehr schnell veratmet wird. Übereinstimmend mit diesen Ergebnissen wurden dort auch erhöhte mikrobielle extrazelluläre enzymatische Aktivität und Bakteriensekundärproduktion während Hochwasserereignissen gefunden. Die Komposition der Aminosäuren von OM verschiedener Herkunft und diagenetischer „Frische“ wurde verwendet um einen Degradationsindex für das OM zu generieren. Der Degradationsindex bestätigte, dass Hochwasser bioverfügbares OM in das Grundwasser verfrachtete und zur Bildung eines mikrobiellen „Hot Spots“ führte.

Mit Hilfe eines Grundwasserflussmodells und der N Fluxe vom Boden in das Grundwasser, wurden N Bilanzen für das Grundwasser in den verschiedenen Habitaten erstellt. Damit konnte die Bedeutung der einzelnen Zonen für den NO₃⁻ Abbau des gesamten renaturierten Aquifers evaluiert werden. Die Resultate zeigten schnellere Transportprozesse innerhalb des aufgeweiteten Abschnitts im Vergleich zum kanalisierten Bereich, und dass im Grundwasser unterhalb der Weiden im renaturierten Abschnitt der höchste NO₃⁻ Abbau stattfand. Durch die starke mikrobielle Zehrung von Sauerstoff wurde dort die Denitrifizierung begünstigt und in einer erhöhten N₂ Produktion erkennbar. Die Anreicherung von ¹⁵N und ¹⁸O im restlichen NO₃⁻ zeigte zudem, dass die Denitrifizierung, nebst der Aufnahme durch die Pflanzen, am meisten NO₃⁻ aus dem System eliminierte. Ein erhöhter Anteil an funktionellen Denitrifizierungsgenen im Grundwasser der Weiden- und Waldzonen lässt auf ein gesteigertes Denitrifizierungspotenzial im Vergleich zu den übrigen Uferzonen schliessen. Tatsächlich fanden wir, dass auch im Grundwasserleiter unter dem Auenwald NO₃⁻ Abbau stattfand, wenn auch mit niedrigen Raten. Wenn jedoch der

Abbau auf die Fläche der Zonen im gesamten renaturierten Uferabschnitt skaliert wird, zeigt sich der meiste NO_3^- Abbau in der Waldzone. Wir nehmen deshalb an, dass der Wald eine so genannte ‚kalte Denitrifizierungsmatrix‘ darstellt. Im Vergleich mit dem kanalisierten Abschnitt, war die Aufweitung effizienter im Abbau von NO_3^- , hauptsächlich bedingt durch den „Hot Spot“ in der Weidenzone und der ‚kalten Denitrifizierungsmatrix‘ im Auenwald.

Zusammenfassend zeigte diese Studie, dass Renaturierungsmassnahmen OM und N Transformationsprozesse erhöhen können, indem verschiedene Uferstrukturen eingeführt und die hydrologische Konnektivität verbessert werden. Zonen, die von Pionierpflanzen wie Weiden dominiert werden, als auch regelmässige Schwankungen des Grundwasserspiegels sind wichtige Ökosystemeigenschaften die die Substratheterogenität und die Kopplung von Umbauprozessen im Boden und Grundwasser erhöhen.