



Doctoral Thesis

Pathways of atmospherically deposited nitrogen in two mountain ecosystems in central Switzerland An experimental and model-based study using the ^{15}N isotope

Author(s):

Providoli, Isabelle A.

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004947301> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH NO. 15887

**Pathways of atmospherically deposited nitrogen in two
mountain ecosystems in central Switzerland:
An experimental and model-based study using the ^{15}N isotope**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by
Isabelle Anita Providoli
Dipl. Geography, University of Bern
born 25th August 1975
citizen of Steg (VS)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner
Prof. Dr. Nina Buchmann, co-examiner
Dr. Patrick Schleppi, co-examiner
Dr. R. Siegwolf, co-examiner

2005

Summary

During the last few decades, human activities have increased the production of biologically reactive nitrogen (N) through intensive agriculture and fossil fuel combustion. Given the N-limited nature of most temperate forests and natural grasslands, there is a large potential for reactive nitrogen accumulation in those ecosystems with an N residence time of years to centuries, thus causing a slow eutrophication. Therefore, the overall aim of this thesis was to investigate how mountain ecosystems are affected by elevated N deposition. The main goals were (1) to understand the mechanisms regulating N retention by the identification of single ecosystem pools to which deposited N is incorporated, (2) the quantification of the N pathways through the ecosystem and (3) the dynamics of N in the short and in the longer-term. The pathways of deposited N were followed by means of the ^{15}N isotope ($^{15}\text{NO}_3^-$ and $^{15}\text{NH}_4^+$). The experiments were conducted at the Alptal valley research site, at the northern edge of the Alps of central Switzerland, at 1200 m a.s.l. in a landscape dominated by Norway spruce (*Picea abies*) forest and (nowadays often abandoned) litter meadows. We studied the N pathways at different spatial and temporal scales, ranging from the plot scale of 2.25 m² up to the catchment scale of 1600 m² and from short term (hours, days or weeks) to longer-term intervals (one year), respectively. A special focus was set on the soil pool by measuring the partitioning of ^{15}N into different biochemical soil fractions. In addition, the uptake of deposited N by moss species was assessed. To gain insight into the role of ^{15}N retention of a forest ecosystem in the longer-term, we used a model of the N, C and water cycles, TRACE. This model was adapted, calibrated and validated for the Alptal site. We used the model for assessing some implications of future deposition scenarios at the Alptal site over the coming 45 years.

At the plot scale (Chapter 2), pulses of $^{15}\text{NH}_4^+$ and NO_3^- were applied separately as a single pulse to a mountain forest or a nearby meadow ecosystem, and several ecosystem pools were sampled at short to longer-term intervals (from a few hours to one year). Shortly after the tracer application, both ecosystems had the largest recovery in total extractable N and microbial N. Later on, most of the tracer was retained in the soil pool as immobilised soil N, and was no longer available for plant N. While the extractable and microbial pools lost ^{15}N over time, a long-term increase in ^{15}N was measured in the roots.

At the catchment scale (Chapter 3), the flow of deposited inorganic N was traced in two Gleysol-dominated mountain catchments, in a mountain forest and a nearby meadow (each 1600 m²) with ¹⁵NO₃⁻ and ¹⁵NH₄⁺. Both ecosystems had a high capacity to retain more than 50% of the added tracers. More NO₃⁻ than NH₄⁺ tracer was retained, especially in the forest. Similar to the plot scale, the highest recovery was in the soil, particularly as immobilised soil N. Event-based runoff analyses showed an immediate response of ¹⁵N in the runoff of both ecosystems, with sharp ¹⁵NO₃⁻ concentration peaks corresponding to discharge peaks. After the cessation of the tracer application, the ¹⁵NO₃⁻ leaching stopped, indicating that the tracer was either leached out of the system or immobilised in the soil or the biomass within a few weeks or month. However, the total NO₃⁻ leaching was still going on and showed a clear seasonality, with highest fluxes in late winter and in the spring, i.e. at snowmelt events.

At the plot scale and in the catchment experiment, the above-ground vegetation had a strong ¹⁵N uptake, and especially the mosses played an important role. Therefore, a further experiment was conducted to investigate the N uptake of three moss species (*Sphagnum quinquefarium*, *Dicranum scoparium*, *Hylocomium splendens*) under different N deposition scenarios in a combined N and ¹⁵N addition experiment (Chapter 4). The N addition resulted in a higher N concentration in the mosses and accordingly in a lower C:N ratio. The nitrogen uptake efficiency, especially the nitrate reductase, was reduced with increasing N deposition. Thus, with higher N deposition, nitrate reductase activity and tracer uptake were reduced. We conclude that with increasing N deposition, mosses reach an assimilation limit where the deposited N is increasingly leached through the moss layer into the soil rather than being taken up.

The ¹⁵N experiments showed a high N retention over at least one year in both ecosystems. This leads to the conclusion that the increasing N concentration in the soil is likely to lead to a lower C:N ratio in the longer-term. To understand the interactions of different N retention pools in the longer-term, the model TRACE was used (Chapter 5). The attempt to use the model at the Alptal site showed how complex and difficult the adaptation of such models to other sites can be. Although the model application requires further improvements, it already contributed to a better understanding of the N cycling processes in the Alptal forest. It was especially possible to show that the increasing N deposition has an influence on the internal N status, as the N mineralization and the NO₃⁻ leaching increased and the C:N ratio decreased.

To conclude, the application of ^{15}N isotopes is a powerful tool for gaining insight into the N fluxes and transformations in a forest and in a meadow ecosystem. The combined approach of field experiments and modelling proved to be valuable to assess how mountain ecosystems might retain increasing N deposition. The results of this thesis help to improve our understanding about the N retention of mountain ecosystems with hindered soil permeability in the temperate climate zone.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten ist die Produktion von biologisch reaktivem Stickstoff (N) durch menschliche Aktivitäten wie intensiver Landwirtschaft und Verbrennung fossiler Brennstoffe stark angestiegen. Der reaktive Stickstoff besitzt ein grosses Potential sich in N-limitierten temperaten Wäldern und Wiesen zu akkumulieren und weist eine Residenzzeit von Jahren bis Jahrhunderten auf. Diese Akkumulation führt zu einer langsamen Eutrophierung der Ökosysteme. Das Ziel dieser Dissertation war es zu untersuchen, ob Gebirgs-Ökosysteme durch erhöhte Stickstoff-Deposition beeinträchtigt werden. Die Themenschwerpunkte waren (1) die Retention des abgelagerten Stickstoffes in einzelnen Ökosystem-Kompartimenten zu bestimmen, (2) die Fliesswege des Stickstoffes im Ökosystem zu quantifizieren und (3) die kurzzeitige und längerfristige Dynamik des Stickstoffes zu erfassen.

Mittels dem ^{15}N Isotop ($^{15}\text{NO}_3^-$ und $^{15}\text{NH}_4^+$) wurden die Verlagerungswege des eingetragenen Stickstoffes verfolgt. Der Versuch wurde im Untersuchungsgebiet Alptal, in den Voralpen der Zentralschweiz, auf 1200 m.ü.M., in einem Fichtenwald (*Picea abies*) und einer nicht mehr genutzten Streuwiese durchgeführt. Die Stickstoffflüsse wurden auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen untersucht, kurzzeitig (während Stunden, Tagen oder Wochen) in kleinen Flächen von 2.25 m² und längerfristig (ein Jahr) in kleinen Einzugsgebieten von 1600 m². Ein spezieller Schwerpunkt wurde auf das Boden-Kompartiment gelegt, welches in verschiedene biochemische Bodenfraktionen unterteilt wurde. Im Weiteren wurde die Retention von eingetragenen Stickstoff anhand von Moosen untersucht. Um Einblick in die längerfristige ^{15}N Aufnahme von Waldökosystemen zu erhalten, wurde das Modell TRACE, welches die N, C und die Wasserkreisläufe modelliert, angewendet. Das Modell wurde für das Untersuchungsgebiet angepasst, kalibriert und validiert. Ferner wurden mit dem Modell einige zukünftige Depositions-Szenarien im Alptal für die kommenden 45 Jahre durchgespielt.

In einem Fichtenwald und einer Streuwiese wurden auf kleinen Flächen (Kapitel 2) einzelne Gaben von $^{15}\text{NH}_4^+$ und NO_3^- getrennt ausgebracht und mehrere Ökosystem-Kompartimente in kurz- bis längerfristigen Zeitintervallen (von wenigen Stunden bis zu einem Jahr) beprobt. Kurz nach der Tracer-Anwendung hatten beide Ökosysteme die grösste Wiederfindung im

total extrahierbaren und im mikrobiellen N. Zu einem späteren Zeitpunkt war die grösste Wiederfindung im Boden-Kompartiment, der Stickstoff war im Boden immobilisiert. Während die extrahierbaren und mikrobiellen Kompartimente mit der Zeit eine Abnahme aufwiesen, war in den Wurzeln eine längerfristige Zunahme von ^{15}N zu verzeichnen.

Auf der Einzugsgebiets-Skala (Kapitel 3) wurde der Fluss vom abgelagerten inorganischem N in zwei Gleyboden dominierten Einzugsgebieten (je 1600 m^2), in einem Gebirgs-Fichtenwald und in einer Streuwiese mit $^{15}\text{NO}_3^-$ und $^{15}\text{NH}_4^+$ verfolgt. Beide Ökosysteme hatten die Kapazität mehr als 50% des zugegebenen Tracers aufzunehmen, wobei speziell im Wald mehr NO_3^- als NH_4^+ Tracer zurückgehalten wurde. Die höchste Wiederfindung war, wie auf den kleinen Flächen, im Boden, der Stickstoff war speziell im Boden immobilisiert. Die ereignisbezogenen Abfluss-Messungen zeigten eine sofortige Reaktion in den ^{15}N Messungen durch ausgeprägte $^{15}\text{NO}_3^-$ Konzentrations-Spitzen in beiden Ökosystemen, die den Abfluss-Spitzen entsprachen. Nach der Einstellung der Tracer-Anwendung stoppte die $^{15}\text{NO}_3^-$ Auswaschung. Diese Tatsache wies darauf hin, dass der Tracer entweder direkt ausgewaschen oder innerhalb weniger Wochen oder Monaten direkt im Boden oder in der Biomasse immobilisiert wurde. Im Gegensatz dazu war die totale NO_3^- Auswaschung durchgehend messbar und wies eine klare Saisonalität auf, mit den höchsten Spitzen bei der Schneeschmelze, d.h. im Spätwinter und im Frühling.

Im Experiment auf den kleinen Flächen und in den Einzugsgebieten hatte die oberflächliche Bodenvegetation eine starke ^{15}N Aufnahme, vor allem die Moose spielten eine wichtige Rolle. Deshalb wurde ein weiterer Versuch, eine kombiniertes N und ^{15}N Zugabe durchgeführt, um die N-Aufnahme von drei Moosarten (*Sphagnum quinquefarium*, *Dicranum scoparium*, *Hylocomium splendens*) bei unterschiedlicher N-Deposition zu untersuchen (Kapitel 4). Die N-Zugabe führte zu einer höheren N-Konzentration in den Moosen und entsprechend zu einem tieferen C:N Verhältnis. Die Stickstoff-Aufnahmefähigkeit, vor allem die Funktion der Nitrat-Reduktase, wurde mit steigender N-Deposition reduziert. Deshalb war auch die Nitrat-Reduktase-Aktivität und die Tracer-Aufnahme bei höherer N-Deposition reduziert. Wir schliessen daraus, dass die Moose bei steigender N-Deposition eine Assimilations-Grenze erreichen, bei welcher der eingetragene Stickstoff nicht mehr aufgenommen wird, sondern aus der Mooschicht in den Boden ausgewaschen wird.

Die ^{15}N Experimente zeigten für beide Ökosysteme während mindestens einem Jahr eine hohe N-Retention. Es lässt sich folgern, dass die steigende N-Konzentration im Boden längerfristig zu einem tieferen C:N Verhältnis führt. Um die Interaktion zwischen den verschiedenen N-Retentions-Kompartimenten über längere Zeitintervalle zu verstehen, wurde das Modell TRACE angewandt. Der Versuch dieses Modell im Untersuchungsgebiet Alptal anzuwenden hat gezeigt, wie komplex und problematisch die Implementierung von solchen Modellen aus anderen Gebieten sein kann. Obwohl der Einsatz des Modells noch weiter verbessert werden muss, hat die Anwendung bereits zu einem besseren Verständnis des N-Kreislaufes im Wald im Alptal beigetragen. Es konnte u.a. gezeigt werden, dass die steigende Stickstoff-Deposition einen Einfluss auf den N-Status des Ökosystems haben kann. Die N Mineralisierung und die NO_3^- Auswaschung waren zunehmend und das C:N Verhältnis wies sinkende Werte auf.

Abschliessend lässt sich feststellen, dass die Anwendung von ^{15}N Isotope methodisch geeignet ist, um einen vertieften Einblick in die N-Flüsse und Transformationen in einem Wald- und einem Wiesen-Ökosystem zu gewinnen. Der Ansatz von Feldversuchen in Kombination mit Modellierung hat sich als sehr wertvoll erwiesen um das Rückhaltevermögen von Stickstoff unter steigender N-Deposition von Gebirgs-Ökosystemen abzuschätzen. Die Ergebnisse dieser Dissertation tragen zum Verständnis von Stickstoff-Retention in Gebirgs-Ökosystemen temperater Zonen mit schlechter Bodendurchlässigkeit bei.