

Influence of elevated atmospheric CO₂ concentration on symbiotic N₂ fixation and availability of nitrogen in grassland ecosystems

Doctoral Thesis

Author(s):

Richter, Michael

Publication date:

2003

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004619438>

Rights / license:

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

Diss. ETH No. 15185

**Influence of elevated atmospheric CO₂ concentration on
symbiotic N₂ fixation and availability of nitrogen in
grassland ecosystems**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

Michael Richter

Dipl. Biol. Universität Leipzig

born 2 October 1970
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Emmanuel Frossard
examiner

Prof. Dr. Josef Nösberger (em.) & PD Dr. Ueli A. Hartwig
co-examiners

2003

Summary

The objective of this thesis was to investigate processes determining the response of grassland ecosystems to elevated atmospheric partial pressure ($p\text{CO}_2$). During the past two centuries, the atmospheric CO_2 partial pressure ($p\text{CO}_2$) has increased by 31 %, mainly due to the burning of fossil fuel and changes in land use. Due to the stimulatory effect of increased carbon (C) assimilation on plant growth, terrestrial ecosystems may potentially act as a sink for C and, thus, partly counterbalance the increase in $p\text{CO}_2$. Grasslands are of special interest as they cover large areas and store large amounts of organic matter in the soil. However, the plant-mediated input of C into the ecosystem may be limited by other growth resources, most often by nitrogen (N) supply. Mineralisation, immobilisation, losses of N as well as symbiotic N_2 fixation are the most important processes determining N availability for plant growth and subsequently the $p\text{CO}_2$ response of the ecosystem. Therefore, the specific objectives of this work were to investigate: i) gross N mineralisation and immobilisation rates after seven years of CO_2 fumigation in pure grass and legume swards, ii) the response of N yield and symbiotic N_2 fixation during ten years of elevated $p\text{CO}_2$, iii) the ten-year N budget of a grassland ecosystem in order to estimate the effect of elevated $p\text{CO}_2$ on losses and sequestration of N.

Lolium perenne and *Trifolium repens* were grown for ten years in monocultures and bi-species mixtures in a fertile soil. Elevated $p\text{CO}_2$ (60 Pa) was achieved by means of *Free Air Carbon Dioxide Enrichment* (FACE) technology. The swards were exposed to two levels of N fertilisation (14 and $56 \text{ g m}^{-1} \text{ a}^{-1}$) and harvested frequently.

In the eighth year, gross N transformation rates in the soil were measured in intact soil cores, taken from the low-N fertilised *L. perenne* and *T. repens* swards during two days of incubation by means of the ^{15}N pool dilution method. Rates of gross N mineralisation and immobilisation and the amount of microbial N in the soil did not change significantly under elevated $p\text{CO}_2$. This suggests that the changes in soil organic matter or in microbial activity, which may have occurred during the seven-year exposure

to elevated pCO₂, had no major effect on gross N transformation in these soils.

The effects of 10 years of elevated pCO₂ on the N yield and the symbiotic N₂ fixation were studied in the *T. repens* and the *T. repens*/*L. perenne* mixtures by the ¹⁵N-isotopic dilution method. At high N fertilisation the pCO₂ response of the symbiotically fixed N₂ decreased during the 10 years of the experiment from 5 g N m⁻² in 1993 to -1 g N m⁻² in 2002. The additional N yield under elevated pCO₂ was exclusively derived from the N₂ fixation in the first three years only. Thereafter, the change in the N yield under elevated pCO₂ was a result of both N derived from soil and fixation. This was attributed to an insufficient availability of soil N to meet the greater N demand of the plant under elevated pCO₂ after the step increase of pCO₂. Due to the increased N₂ fixation in the first years of the experiment, more N may have been temporarily immobilised under elevated pCO₂ leading to an apparent input of N into the system. With the increased availability of soil N, due to the re-mineralisation of this pool in combination with the high fertiliser N input, the plant may have tended to acquire mineral N, which requires less energy. The low N treatments were continuously N-limited, leading to a higher (16%) portion of symbiotically fixed N in the plant material under elevated pCO₂.

The calculation of the N budgets of the ecosystems suggests that there was no net sequestration of N at low N supply, while at high N supply a net N sequestration of N may have occurred. There were no significant differences in the N balance of the CO₂ treatments. Isotopic analysis of harvested plant material and soil N revealed that losses of fertiliser N from the systems were highest in the high-N clover swards (up to 58% of N applied) with no significant differences between the pCO₂ treatments. A larger N input by symbiotic N₂ fixation in these swards counterbalanced the greater loss of fertiliser N.

Our data showed that the long-term response of fertile grassland ecosystems to elevated pCO₂ is governed by the availability of N. In grasslands receiving high amounts of N, the initially observed limitation of N derived from the soil is lessened with time and the system approaches equilibrium again after several years. This may be due to a consistent net input of N into the system. Under less favourable conditions, it may take much more longer to reach steady-state, because the net input of N into the system and, thus, the availability of N remain low.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Prozesse untersucht, welche die Reaktion von Graslandökosystemen auf eine erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration (pCO₂) bestimmen. Der Verbrauch fossiler Brennstoffe sowie Veränderungen in der Landnutzung haben in den letzten 200 Jahren zu einem Anstieg von pCO₂ in der Atmosphäre um 31 % geführt. Durch den stimulierenden Effekt auf die Kohlenstoffassimilation und das Pflanzenwachstum könnten terrestrische Ökosysteme möglicherweise als Kohlenstoffsinken fungieren und so dem weiteren Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration entgegenwirken. Graslandökosysteme sind hier von besonderem Interesse, da sie große Gebiete bedecken und bedeutende Mengen an organischer Substanz im Boden speichern können. Der Eintrag von C durch die Vegetation kann jedoch durch die Limitierung anderer für das Pflanzenwachstum essentieller Ressourcen, wie zum Beispiel Stickstoff (N), begrenzt sein. Mineralisierung, Immobilisierung, symbiotische N₂ Fixierung sowie N-Verluste sind die wichtigsten Prozesse, welche die Verfügbarkeit von N für das Pflanzenwachstum und folglich die CO₂-Antwort eines Ökosystems bestimmen. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb folgende Aspekte eingehender untersucht: 1) die Raten der Brutto-N-Mineralisierung und Immobilisierung in reinen Gras- und Leguminosenbeständen nach sieben Jahren CO₂ Begasung, 2) der Einfluss von erhöhter atmosphärischer CO₂ Konzentration auf den N-Ertrag und die symbiotische N₂ Fixierung im Grasland während 10 Jahren, 3) der Einfluss von 10 Jahren erhöhter CO₂ Konzentration auf den N-Haushalt, N-Verluste sowie die mögliche Einlagerung von Stickstoff in den Boden.

Auf einem nährstoffreichen Boden wurden Rein- und Mischbestände von *Lolium perenne* und *Trifolium repens* angelegt und unter Verwendung der FACE-Technik (*Free Air Carbon Dioxide Enrichment*) mit CO₂ angereicherter Luft begast. Die Bestände wurden mit zwei unterschiedlichen Mengen an mineralischem N-Dünger (14 und 56 g m⁻¹a⁻¹) gedüngt und regelmäßig geschnitten.

Die Messung der Bruttoreaten der N-Flüsse im Boden erfolgte im achten

Jahr des Versuches unter Verwendung der ^{15}N -Pool-Verdünnungsmethode in intakten Bodenproben von den niedrig gedüngten *L. perenne*- und *T. repens*-Beständen. Die Bruttoreaten der N-Mineralisierung und -Immobilisierung sowie die Menge des mikrobiellen N zeigten keine signifikanten Veränderungen unter erhöhtem pCO_2 . Dies deutet darauf hin, dass die Veränderungen der bodenorganischen Substanz und der Aktivität der Mikroorganismen, welche durch die siebenjährige CO_2 Begasung möglicherweise stattgefunden haben, keinen wesentlichen Einfluss auf die Umsetzung des N im Boden hatte.

Der Effekt von zehnjähriger CO_2 -Begasung auf den N-Ertrag und die symbiotische N_2 -Fixierung wurde in den *T. repens*- und den *T. repens*/*L. perenne*-Beständen unter Verwendung der ^{15}N -Isotopen-Verdünnungsmethode untersucht. Bei hoher N-Düngung verminderte sich die CO_2 Antwort der symbiotischen N_2 -Fixierung während der 10 Jahre des Experiments von 5 g N m^{-2} in 1993 zu -1 g N m^{-2} im Jahr 2002. Der zusätzliche N-Ertrag unter erhöhtem pCO_2 kam nur in den ersten drei Jahren ausschließlich von der symbiotischen N_2 Fixierung. Danach war der veränderte N-Ertrag unter erhöhtem pCO_2 das Ergebnis der Assimilation von N aus dem Boden und der symbiotischen N_2 -Fixierung. Dies wurde einer unzureichenden Verfügbarkeit von N aus dem Boden zugeschrieben, welche den größeren N-Bedarf der Pflanze nach der Erhöhung von pCO_2 nicht decken konnte. In den ersten Jahren kam es durch die gesteigerte N_2 -Fixierung unter erhöhtem pCO_2 wahrscheinlich zu einer vermehrten Immobilisation von N, was zu einem scheinbaren Netto-Eintrag von N in das System führte. Durch die spätere Re-Mineralisierung dieses Pools in Kombination mit hoher N-Düngung erhöhte sich die Verfügbarkeit von N im Boden. Dadurch favorisierte die Pflanze die weniger energieintensive Aufnahme von mineralischem N und der Anteil an symbiotisch fixiertem N im Pflanzenmaterial sank ab. Bei niedriger N-Düngung blieb das System in Bezug auf mineralischem N stärker limitiert, was in einer fortgesetzt hohen symbiotischen N_2 -Fixierung (+16 %) resultierte.

Die N-Bilanzen der Ökosysteme lassen vermuten, dass es bei niedriger N-Düngung zu keiner Netto-Festlegung von N in das System kam, während eine solche bei hoher N-Düngung möglicherweise stattfand. Zwischen den beiden CO_2 -Verfahren wurden keine signifikanten Unterschiede der N-Bilanzen festgestellt. Die Analyse mittels stabiler Isotope des geernteten Pflanzenmaterials sowie des Boden-N zeigten, dass die Verluste an Dünger-N in den hoch gedüngten *T. repens*-Beständen mit bis zu bis zu 58 % der applizierten

Menge am höchsten ausfielen. Signifikante Unterschiede zwischen den CO₂-Verfahren wurden nicht festgestellt. Ein grösserer N-Input durch die symbiotische N₂-Fixierung in diesen Beständen glich die höheren Verluste an Dünger-N aus.

Unsere Daten zeigten, dass die CO₂-Antwort in nährstoffreichen bewirtschafteten Graslandsystemen maßgeblich von der Verfügbarkeit von N für das Pflanzenwachstum bestimmt wird. In Systemen, welche hohe Gaben an Dünger-N erhalten, geht die anfängliche Limitierung bezüglich Boden-N zurück und das System erreicht nach einigen Jahren ein neues Gleichgewicht. Dies wurde auf steten Netto-Input von N in das System zurückgeführt. Unter weniger produktiven Bedingungen könnte die Angleichung an ein neues Gleichgewicht viel länger dauern, da der Netto-Input an N sowie die N-Verfügbarkeit niedrig bleibt.