

Originalarbeiten

Passives Monitoring von Stickstoffeinträgen in Kiefernforsten mit dem Rotstengelmoos (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.)

Karsten Mohr

Korrespondenzadresse: Dipl.-Biol. Karsten Mohr, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt, Jägerstraße 23-27, D-26121 Oldenburg

Zusammenfassung

In 23 Kiefernforsten Norddeutschlands wurden in den Jahren 1996 bis 1998 Untersuchungen durchgeführt, um Stickstoffkonzentrationen im Rotstengelmoos (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) mit N-Gehalten in Kiefernadeln, Stickstoffeinträgen und -konzentrationen im Bestandsniederschlag zu vergleichen.

Nach den Ergebnissen der im Jahr vor der Pflanzenprobenahme durchgeführten Depositionsmessungen lagen die N-Einträge ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) zwischen 10 und 32 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Die mittleren N-Konzentrationen im Niederschlagswasser betragen zwischen 2,8 und 6,9 mg/l. Die Proben von *P. schreberi* und Kiefernadeln aus diesen Forsten wiesen Gesamt-N-Konzentrationen zwischen 1,3 und 2,3% i.T. auf.

Ein statistisch signifikanter Zusammenhang besteht sowohl zwischen den N-Konzentrationen parallel beprobter Moos- und Nadelproben ($r^2=0,75$; $p<0,001$) als auch zwischen den N-Konzentrationen im Moos und den mittleren N-Konzentrationen im Niederschlagswasser im Jahr vor der Probenahme ($r^2=0,81$; $p<0,001$). Eine statistische Beziehung zwischen den N-Konzentrationen in den Moosproben und jährlichen N-Depositionsraten ist nur innerhalb eines Bezugszeitraumes von einem Jahr (1998) signifikant ($r^2=0,86$; $p<0,01$). Besonders bei der Berücksichtigung jährlicher Niederschlagsmengen kann *P. schreberi* für ein Biomonitoring von Stickstoffeinträgen in Kiefernforsten herangezogen werden.

Schlagwörter: Ammoniakimmission; Ammonium; Bioindikation; Biomonitoring, passives, Stickstoff; Eutrophierung; Nitrat; passives Biomonitoring; *Pleurozium schreberi*, Biomonitoring; Rotstengelmoos; Stickstoff; Waldschäden, Stickstoff

Abstract

Biomonitoring of Nitrogen Deposition in Pine Stands with *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.

Investigations in 23 pine stands, a widespread type of forest on sandy soils in Northern Germany, were made to compare the concentration of the total N in pine needles, the overall rates and concentrations of nitrogen in precipitation water ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) to concentrations of total N in shoots of *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., a common bryophyte in these forests.

Within the investigation period from 1996 to 1998, a total deposition of nitrogen in a range from 10 to 32 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ and mean values of nitrogen concentrations in the precipitation water between 2.8 and 6.9 ppm were observed. N concentrations in both bryophytes and pine needles also varied in a large scale from 1.3 to 2.3% d.wt. High correlations between concentrations of total N in moss tissue and total N concentrations in pine needles ($r^2=0.75$, $p<0.001$) as well as N concentrations in the precipitation water ($r^2=0.81$, $p<0.001$) were found.

Lower correlations of N concentrations in *Pleurozium* with overall rates of nitrogen calculated for the year before moss sampling in 1997 until 1999 can be attributed to temporary variations of N concentrations in precipitation due to different amounts of rainfall. Comparing the results of only one year (1998), the correlation was higher ($r^2=0.86$). The role of other effects, e.g. growth rate and dry deposition, is discussed as well. Aside from the monitoring of heavy metals and organic compounds, *Pleurozium schreberi* is seen to be a useful indicator for estimating the amount of N deposition.

Keywords: Ammonia immissions; ammonium; bioindication; biomonitoring, passive, nitrogen; eutrophication; forest decline, nitrogen; nitrate; nitrogen; *Pleurozium schreberi*, biomonitoring; Rotstengelmoos

1 Einleitung

Stickstoff ist in verschiedenen Verbindungen für sämtliche Organismen ein unentbehrlicher Nährstoff, in höheren Dosen führt er jedoch zu physiologischen Störungen und nimmt dann die Rolle eines Schadstoffes ein. N-Einträge, wie sie vor allem durch die anorganischen Verbindungen Nitrat und Ammonium auftreten, stellen besonders für natürlicherweise schwach versorgte Ökosysteme (z.B. Heiden, Hochmoore und Wälder) ein Gefährdungspotential dar. Insbesondere in Wäldern bzw.

Forsten sind Ausmaß und Wirkung von Stickstoffdepositionen methodisch – auch mittels physikalisch-chemischer Messungen – schwer zu ermitteln. Zur Überwachung mitteleuropäischer Waldökosysteme werden umfassende Messungen sowie ein auf verschiedenen biologischen Ebenen integriertes Biomonitoring durchgeführt (SCHWEIZER, 1997; BMELF, 1998); eine Unterscheidung der extrem variablen Stickstoffflüsse von anthropogenen N-Einträgen wird dennoch durch Akkumulation, Verlagerung, Um- und Freisetzung erheblich erschwert.

Die Bioindikation hat sich als Nachweismethode für Schadstoffe in nahezu allen Lebensräumen als praktikables und oft auch kostengünstiges, vor allem aber als wirkungsbezogenes Verfahren bewährt. Das Biomonitoring anthropogener Stickstoffeinträge v.a. von Nitrat und Ammonium, ist aufgrund ihrer relativ spät erkannten Umweltproblematik und der Schwierigkeiten, die sich bei ihrem Nachweis ergeben, noch wenig fortgeschritten. Hauptgründe sind die schon von Natur aus hohen Gehalte sowie die hohe Dynamik, welcher der Makronährstoff Stickstoff im Einzelorganismus und im Ökosystem unterliegt.

Im Biomonitoring gelten die Stickstoffkonzentrationen und -relationen in Blättern bzw. Nadeln sowie die C/N-Verhältnisse und Elementvorräte im Boden und Humusaufgabe als geläufige Kriterien zur Beurteilung von N-Belastungen von Forstökosystemen (HEINSDORF, 1995; HOFMANN et al., 1990; BMELF, 1997). In populationsbiologischen und vegetationskundlichen Untersuchungen konnten ebenfalls Auswirkungen langfristiger Stickstoffeinträge anhand von Veränderungen der Bodenvegetation von Waldbeständen nachgewiesen werden. (BÜRGER-ARNDT, 1994; ELLENBERG, 1991; HEINSDORF & KRAUSS, 1991). Differenzierte räumliche Verteilungsmuster und kurzfristige Unterschiede der N-Depositionen in Kiefernbeständen zeigten Schulz et al. (1997) mit Hilfe von Stickstoffkonzentrationen in Kiefernborke auf.

Auf einen Zusammenhang zwischen N-Depositionen und N-Konzentrationen in Moospflanzen wurde in der Literatur verschiedentlich hingewiesen (BADDELEY et al., 1994; BAKKEN, 1994; LEE et al., 1998). Der Schwerpunkt im Biomonitoring mit Moosen lag allerdings bisher beim Nachweis von Schwermetallen und organischen Verbindungen (ARNDT et al., 1987; TRITSCHLER & FAUSS-KESSLER, 1997). Über die Analyse von Moosproben auf diverse Schwermetallverbindungen konnten in europaweiten Meßprogrammen mit bis dahin nicht zu leistender Auflösung Belastungsgebiete dokumentiert werden (HERPIN, 1995).

In den weit verbreiteten, moosreichen Kiefernforsten Norddeutschlands ist ein mit verhältnismäßig geringem Aufwand durchzuführendes passives Biomonitoring mit Moosen naheliegend. Die in einem Forschungsprojekt angesiedelte Untersuchung sollte daher zu der Frage des Aussagewertes von Stickstoffgehalten in Moospflanzen für den Nachweis von Stickstoffeinträgen in Forstökosysteme Aufschluß geben. Daneben sollte durch eine zeitgleiche Parallelbeprobung überprüft werden, ob ein Zusammenhang der N-Konzentrationen in Moosen mit den für eine Beurteilung atmosphärischer N-Belastungen häufiger herangezogenen Nadelspiegelwerten von Kiefernadeln besteht.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfaßt das Norddeutsche Tiefland zwischen dem Niederrhein im Westen und dem nordöstlichen Brandenburg. In den ausgedehnten pleistozänen Sandgebieten sind großflächige Kiefernforsten anzutreffen. Für die Untersuchungen wurden 24 Probenahmeplätze (→ *Tabelle 1*) an 21 Probenahmestellen innerhalb von Kiefernreinbeständen herangezogen (→ *Abb. 1*). Drei in der Kartenskizze nicht separat dargestellte Flächen (3,1; 8,1; 11,1) lagen in geringer Entfer-

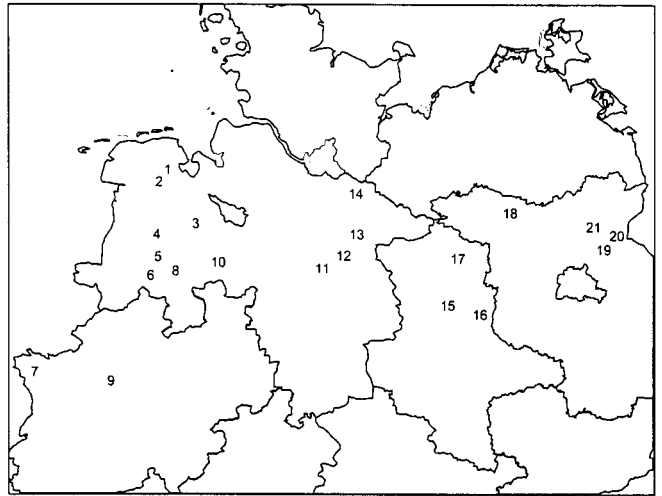


Abb. 1: Lage der Probenahmeorte im Untersuchungsgebiet

Tabelle 1: Standorteigenschaften der Probenahmeplätze

Probenahmeort	Forsttyp	Bestandesdeposition [N kg ha ⁻¹ a ⁻¹]
1	Pfeifengras-Kiefernforst	
2	Lerchensporn-Kiefernforst	
3	Lerchensporn-Kiefernforst	30 ¹⁾
3,1	Himbeer-Kiefernforst	31 ¹⁾
4	Lerchensporn-Kiefernforst	30 ²⁾
5	Lerchensporn-Kiefernforst	
6	Lerchensporn-Kiefernforst	
7	Adlerfarn-Kiefernforst	32 ³⁾
8	Lerchensporn-Kiefernforst	31 ¹⁾
8,1	Himbeer-Kiefernforst	31 ¹⁾
9	Adlerfarn-Kiefernforst	30 ³⁾
10	Lerchensporn-Kiefernforst	
11	Heidelbeer-Kiefernforst	15 ¹⁾
11,1	Himbeer-Kiefernforst	20 ¹⁾
12	Heidelbeer-Kiefernforst	
13	Heidelbeer-Kiefernforst	
14	Heidelbeer-Kiefernforst	
15	Heidelbeer-Kiefernforst	10 ⁴⁾
16	Landreitgras-Kiefernforst	
17	Heidelbeer-Kiefernforst	
18	Heidelbeer-Kiefernforst	
19	Landreitgras-Kiefernforst	16 ⁵⁾
20	Himbeer-Kiefernforst	17 ⁵⁾
21	Heidelbeer-Kiefernforst	15 ⁵⁾

¹⁾ Mittelwerte aus Messungen von 1996 bis 1997

²⁾ Meßergebnisse von 1995 nach Angaben von BMELF (1998)

³⁾ Meßergebnisse von 1997 nach Angaben der LÖLBF, Nordrhein-Westfalen

⁴⁾ Meßergebnisse von 1997 nach Angaben des UFZ, Halle-Leipzig

⁵⁾ Meßergebnisse von 1996 nach Angaben der BFH, Eberswalde

nung von Bestandesmeßstellen an den Probenahmestellen 3, 8 und 11 zur Ermittlung von Waldrandeffekten.

Das Ausgangssubstrat für die nach jahrhundertelanger Übernutzung durch Streunutzung, Niederwald- und Heidewirtschaft stark degradierten Böden stellen hier eiszeitliche Tal-

sande und Geschiebesande, teilweise mit Flugsandüberwehungen dar. In den letzten 150 Jahren wurden diese Standorte bevorzugt mit der anspruchslosen Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) aufgeforstet. Heute ist die Kiefer mit einem Anteil von über 60% die Hauptbaumart in den Forsten Norddeutschlands. Das Klima der Gebiete unterscheidet sich im äußersten Nordwesten mit euatlantischem Charakter im wesentlichen durch mildere Winter und höhere Jahresniederschläge von den subkontinental geprägten Gebieten Ostdeutschlands. Dem Kontinentalitätsgradient folgend nehmen die jährlichen Niederschlagsmengen vom westlichen Niedersachsen von etwa 800 mm auf 550 mm im östlichen Brandenburg ab (WENDLAND, 1993).

Die aktuelle Vegetation unter den forstwirtschaftlich genutzten Baumbeständen setzt sich in aller Regel aus einigen Moos- und Kleinstraucharten in einer mehr oder minder dichten Grasdecke aus der Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*) zusammen. In der Mehrzahl der untersuchten Kiefernbestände erreichen Heidel- oder Preiselbeere (*Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idea*) größere Deckungsanteile. Sie sind in Anlehnung an die von Hofmann (1997) aufgestellte Vegetationstypologie überwiegend dem Heidelbeer-Kiefernforst (→ Tabelle 1) zuzuordnen. In offenkundig stärker eutrophierten Forsten treten die Kleinsträucher zugunsten der Gräser zurück. In den Forsten des östlichen Untersuchungsgebietes tritt das Landreitgras (*Calamagrostis epigeios*) im Landreitgras-Kiefernwald hinzu, während unter vergleichbaren Immissionsbedingungen im Westen der Rankende Lerchensporn (*Ceratocarpus claviculata*) hohe Deckungsanteile besitzt. Auch der Himbeer-Kiefernforst weist mit den anspruchsvolleren Arten wie der Himbeere (*Rubus idaeus*) und dem Dornfarn (*Dryopteris dilatata*) auf höhere N-Einträge hin. Wechsel-feuchte bis hohe Wasserversorgung der Böden zeigte sich indessen durch die Dominanz des Adlerfarnes (*Ptilidium aquilinum*) und des Pfeifengrases (*Molinia coerulea*) im Adlerfarn- bzw. Pfeifengras-Kiefernforst.

3 Methodik

Die Untersuchungen wurden zwischen 1996 und Anfang 1999 mit Schwerpunkt im Jahr 1998 durchgeführt. Sie lagen in einem Zeitraum, der mit einem warm-trockenen (1996) und einem kühl-feuchten Jahr (1998) ein breites Witterungsspektrum aufwies.

Die Pflanzenprobenahme erfolgte in Kiefernforsten der Altersklassen 3 und 4. Bereits über das Stangenholzstadium hinaus verfügten die Bestände über eine ausreichend ausgebildete Moosschicht. Ein Teil der Probenahmeflächen lag in der Nachbarschaft zu Meßstellen, die von verschiedenen Instituten zur Ermittlung der Schadstoffflüsse in Forstökosystemen betrieben werden.

Die Bandbreite der gemessenen Stickstoffeinträge lag aufgrund ihrer Exposition in oder außerhalb von Belastungsgebieten oder an Waldrändern zwischen ca. 10 und 32 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Hierbei handelt es sich um Mittelwerte von Ergebnissen, die durch Depositionsmessungen in der Kronentraufe der beprobten Forstbestände mittels offener Niederschlags-sammler (Bulk-Sammler) in den Jahren 1996 bis 1998 durchgeführt wurden.

An drei unterschiedlich hoch belasteten Dauerbeobachtungsstellen (3, 8 und 11) wurden zusätzlich kontinuierliche Messungen der Ammoniakkonzentrationen oberhalb des Kronenraumes durchgeführt. Die Verfahrensweise richtete sich nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 2461 (VDI, 1978) und berücksichtigt die Summe (NH_x) des gasförmigen Ammoniaks (NH₃) und des aerosolgebundenen Ammoniums (NH₄) in der Atmosphäre.

Neben den Probenahmeorten, aus denen Immissions- und Depositionsergebnisse vorlagen, wurden zur Klärung des statistischen Zusammenhangs der Elementkonzentrationen zwischen den Bioindikatoren Kiefernadeln und Moos zusätzlich in 11 weiteren Kiefernbeständen Pflanzenproben entnommen.

Die Nadelprobenahme erfolgte an zuvor gefällten Bäumen oder mit Hilfe einer fahrbaren Hebebühne. An einigen Probenahmeorten (4, 7, 9, 19, 20, 21) lagen die Ergebnisse vorausgegangener Nadeluntersuchungen jüngerer Datums vor, so daß hier auf Nadelprobenahmen verzichtet werden konnte. An Punkt 14 und 15 wurden lediglich Moosproben genommen. Methodisch wurde bei der Nadelprobenahme nach den Vorgaben des BMELF (1994) vorgegangen, d.h. es wurden aus der Lichtkrone der Kiefern mehrere Triebe entnommen, von denen die Nadeln des jüngsten Jahrganges untersucht wurden. Die Probenahme fand im Februar 1998 zu einem Zeitpunkt statt, bei dem auch bei immergrünen Pflanzen von weitgehender Vegetationsruhe auszugehen ist.

Parallel zur Nadelprobenahme wurden Aufwuchsproben des Rotstengelmooses (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) genommen. Diese leicht zu erkennende Moosart (FRAHM & FREY, 1983) ist auf leichten Böden in Kiefern- und anderen lichten Nadelforsten weit verbreitet und häufig, so daß ausreichende Substanzmengen für Elementanalysen genommen werden können.

Die Probenahme der Moospflanzen (vollständige Pflanzen, einschließlich festsitzender, abgestorbener Thallusfragmente) erfolgte ausschließlich unter dem Schirm der beprobten Baumkronen oder vergleichbarer benachbarter Bäume in einer Mindestentfernung von 50 cm zum Stammfuß. Die innerhalb dieses Areals vorkommenden Moose sind den Stoffflüssen über die Kronentraufe weitestgehend ausgesetzt, so daß sich hier die Auswirkungen atmogener Einträge am deutlichsten zeigen.

Zur Ermittlung der Standortvariabilität wurden Mischprobenkollektive mit einem Frischsubstanzvolumen von etwa 2 l in 4-facher Wiederholung genommen. Zur Analyse wurden die Moosproben von anhaftenden Humus- und Streupartikeln gründlich gereinigt und ebenso wie die Nadelproben 12 h bei 80°C getrocknet. Die gemahlene Proben wurden nach einschlägigen Analyseverfahren (NAUMANN & BASSLER, 1976) auf die Nährelemente N (Methode nach KJELDAHL), P, K, Mg, Ca, Mn (trockene Veraschung, Messung mit ICP-OES) und S (Druckaufschluß in der Mikrowelle, Messung mit ICP-OES) analysiert. Die angegebenen Elementgehalte in den Nadel- und Moosproben beziehen sich auf den Gesamtgehalt des jeweiligen Elementes in der Trocken-substanz (% i.T.).

Zur Klärung des Zusammenhangs der Elementkonzentrationen in den Moosproben mit den Nadelspiegelwerten wur-

den die Mittelwerte zeitgleicher Beprobungen aus dem Jahr 1998 statistisch ausgewertet. Der Gegenüberstellung der Ergebnisse von Niederschlagsuntersuchungen mit den N-Konzentrationen in den Moosproben liegen die Daten (Depositionsraten, Elementkonzentrationen) der jeweils im Kalenderjahr vor der im Februar 1997 bis 1999 erfolgten Moosprobenahme zugrunde.

Die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen wurden grafisch in Streudiagrammen und zusammen mit den nach den Kleinst-Quadraten geschätzten Regressionsgeraden dargestellt. Die Prüfung des linearen Korrelationskoeffizienten auf Verschiedenheit von Null erfolgte mittels T-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1%.

4 Ergebnisse

4.1 Stickstoffkonzentrationen in Moosproben und Kiefernnadeln

Die an den 23 Probenahmeorten des Untersuchungsgebietes im Jahr 1998 festgestellten Stickstoffkonzentrationen in den Proben von *Pleurozium schreberi* decken ein breites Spektrum ab. Die Mittelwerte von jeweils 4 beprobten Moospolstern an einem Standort lagen zwischen 1,3 und 2,3% N i.T. (→ Abb. 2).

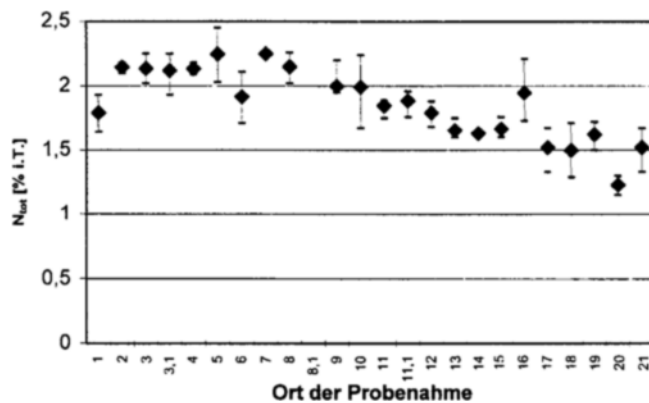


Abb. 2: N-Konzentrationen in Moosproben. Mittelwerte und Bandbreite der Ergebnisse von 4 Einzelbeprobungen

Auffällige Streuungen bei einigen Probenkollektiven (Probenahmeorte 5, 6, 10, 16, 18) ergaben sich durch Abweichungen vom Probenahmestandard (Probenahme im Randbereich der Kronentraufe, reduzierte Substanzmenge). Diese waren erforderlich, weil bei Auswahl der Standorte für die Parallelbeprobung der Moospolster und Kiefernnadeln den Auswahlkriterien der Nadelbeprobung Vorrang gegeben wurde.

Erwartungsgemäß spiegelten sich die im Untersuchungsgebiet ermittelten Depositionsraten in den Stickstoffkonzentrationen der Moosproben wider. In Beständen mit deutlich erhöhten N-Einträgen (>25 kg ha⁻¹ a⁻¹) lagen die Werte bei 2% und höher. N-Konzentrationen unter 1,6% wurden in Beständen festgestellt, in denen unter 17 kg N ha⁻¹ a⁻¹ eingetragen wurde.

Die Unterschiede der N-Konzentrationen an einigen Waldändern in Regionen mit hohen N-Einträgen (3,1; 11,1) waren im Jahr 1998 gegenüber den aus dem Bestandesinneren

genommenen Proben (3; 11) gering. Diese Ergebnisse bestätigen die geringen Differenzen zwischen den ermittelten Depositionsraten. Sie nahmen vom Bestandesinneren zum Rand um nur 10 bis 20% zu.

Die räumliche Verteilung der N-Konzentrationen zeigt sich in der kartographischen Darstellung der Untersuchungsergebnisse. Auch die Nadelspiegelwerte der an den meisten Standorten gleichzeitig beprobten Kiefernnadeln weisen ein vergleichbares Verteilungsmuster in einer nahezu identischen Bandbreite zwischen 1,3% und 2,3% N i.T. auf (→ Abb. 3).



Abb. 3: N-Konzentrationen in Moosproben und Kiefernnadeln (Werte in Klammern) aus Kiefernwäldern Norddeutschlands (Angaben in % N i.T.)

Wenn auch die Probenahme nicht flächenrepräsentativ erfolgte, so wird ein Ost-West-Gradient mit maximalen Stickstoffgehalten im westlichen Untersuchungsgebiet (Probenahmeorte 1-14) deutlich. Hier lagen mit durchschnittlich 2% die N-Konzentrationen im Rotstengelmoss spürbar über den im Osten (Probenahmeorte 15-21) festgestellten Elementgehalten von 1,6% N i.T. Die höchsten N-Gehalte wurden mit 2,3% i.T. in Gebieten mit einer hohen Dichte von Tierhaltungsbetrieben (Probenahmeorte 5 und 7) ermittelt. Auch die Nadelspiegelwerte waren hier auf hohem Niveau. Häufig sind in diesen Forsten kennzeichnende nitrophytische Blütenpflanzen wie Himbeere (*Rubus idaeus*) oder Rankender Lerchensporn (*Ceratocarpus claviculata*) anzutreffen.

In den walddreieckigen Regionen der Lüneburger Heide und der östlichen Bundesländer sind die N-Konzentrationen spürbar niedriger. An einem Probenahmeort in einem nitrophytischen Landreitgras-Kiefernwald in der nördlichen Magdeburger Börde zeigen sich an den N-Konzentrationen im Moos von 2% ebenfalls die Auswirkungen erhöhter Stickstoffeinträge in dieser vornehmlich landwirtschaftlich genutzten Region. Dagegen waren die N-Konzentrationen im Moos in der Nähe einer ehemaligen Schweinemastanlage mit 1,5% N relativ gering (Probenahmeort 19, → Tabelle 1). Hier kommen die im Gebiet moderaten Einträge von ca. 17 kg ha⁻¹ a⁻¹ (zuvor ca. 40 kg ha⁻¹ a⁻¹, vgl. HOFMANN et al., 1990) bereits zur Geltung. Stickstoffzeigende Gefäßpflanzen (Nitrophyten) wie das Landreitgras, Brombeere und Himbeere sind immer noch floristische Zeugnisse der vormaligen hohen N-Einträge.

4.2 Konzentrationen anderer Nährelemente in Kiefernadeln und Moosproben

Auch die Konzentrationen anderer wichtiger Nährelemente bewegten sich in einem den Nadelspiegelwerten vergleichbaren Spektrum (\rightarrow Abb. 5). Deutlich höhere Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen in den Moosen an einigen Standorten waren die Folge von anhaftenden Kalkresten aus Bodenschutzkalkungen.

Die Nadelspiegelwerte von K, Ca, P und Mn deuten bei der Mehrzahl der Kiefernbestände auf eine gute bis ausreichende Versorgung mit diesen Nährelementen hin. Bei Kalzium ist nur bei den Beständen auf den Flugsanden im Westen des Untersuchungsgebietes von Ernährungsgespässen auszugehen (Konzentrationen unter 0,2% i.T.). Dagegen befanden sich die festgestellten Magnesium-Konzentrationen nahezu ausnahmslos im Mangelbereich ($\leq 0,1\%$ i.T.). Die Schwefelgehalte wiesen mit nahezu konstanten Werten um 0,12% ($\pm 0,02\%$ i.T.) auf geringe S-Belastungen auch im östlichen Untersuchungsgebiet hin.

4.3 Zeitliche Variabilität der N-Konzentrationen in den Moosproben

Im zeitlichen Verlauf der N-Konzentrationen im Rotstengelmoos zeigte sich an einigen wiederholt beprobten Dauerbeobachtungsflächen (3 und 11) zwischen 1997 und 1999 eine Abnahme der N-Konzentrationen in den Moosproben (\rightarrow Abb. 4). Dagegen war bei den Nadelspiegelwerten zeitgleich beprobter Kiefernadeln keine signifikante Veränderung der N-Konzentrationen feststellbar.

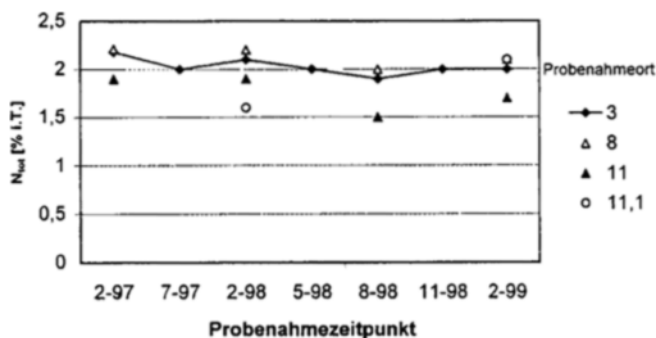


Abb. 4: N-Konzentrationen in *Pleurozium schreberi* an Dauerbeobachtungsstellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

In Moosen, die im Bestandesinneren zu unterschiedlichen Jahreszeiten genommen wurden, lagen die N-Konzentrationen im Sommer etwa 10 bis 20% unter den im Winter ermittelten Gehalten. Die auffälligste Veränderung war eine deutliche Zunahme von 1,6% auf 2,1% N i.T. in Moosproben eines Probenahmeortes am Waldrand (11,1). Die N-Konzentrationen in den Nadeln blieben hingegen mit 1,9% wie auch an den übrigen Dauerbeobachtungsstellen konstant auf dem Wert des Vorjahres. Zwar wurden an diesem Ort keine Immissionsmessungen durchgeführt, doch ist durch ein in ca. 100 m Entfernung vom Waldrand neu eingerichtetes Mistlager von einer erheblichen Zusatzbelastung auszugehen. Der während des dreijährigen Beobachtungszeitraumes in den Dauerbeobachtungsgebieten festgestellten Zunahme der

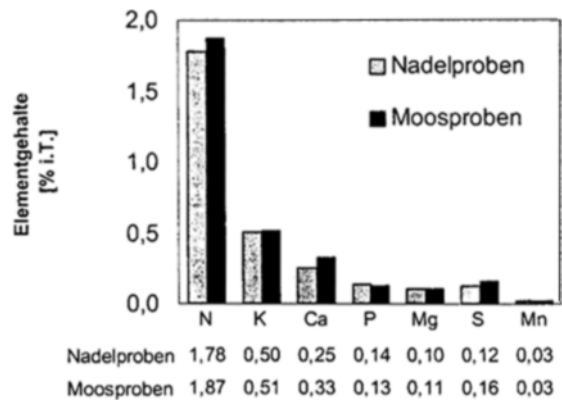


Abb. 5: Mittlere Elementkonzentrationen (Gesamtgehalte) in den beprobten Kiefernadeln und Moosen (n=66)

N-Deposition folgte kein Anstieg der N-Konzentrationen in den Moosen, sondern stellenweise ein tendenzieller Rückgang (\rightarrow Tabelle 2). Die Hauptursache des Depositionsanstiegs war eine in diesem Zeitraum deutliche Zunahme der Niederschlagsmengen um 50 bis 60%. Durch das verstärkte rain-out der Luftinhaltsstoffe vor allem in dem niederschlagsreichen Jahr 1998 sanken die NH_x -Gehalte der Luft und die NH_4^- und NO_3^- -Konzentrationen im Niederschlagswasser erheblich. Hierdurch erklären sich vermutlich auch die abnehmenden N-Konzentrationen in den Moosproben.

4.4 Beziehung der N-Konzentrationen in Moosproben zu den Nadelspiegelwerten und Stickstoffdepositionen

In Abb. 6 wird deutlich, daß die Stickstoffanreicherung in den Moosproben ursächlich im Zusammenhang mit den im Kalenderjahr vor der Probenahme ermittelten Stickstoffeinträgen im Kiefernbestand steht. Der statistische Zusammenhang ($r^2=0,49$) zwischen den im gesamten Untersuchungs-

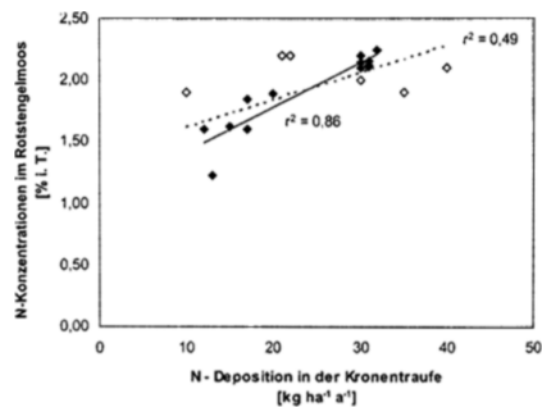


Abb. 6: Zusammenhang zwischen den N-Konzentrationen in Proben von *Pleurozium schreberi* mit Stickstoffeinträgen (NH_4^- -N + NO_3^- -N) des Vorjahres in Kiefernforsten (sämtliche Rauten: Vergleichszeitraum 1996 bis 1998, gefüllte Rauten: Vergleichszeitraum 1998)

Tabelle 2: Entwicklung der Gesamt-N-Konzentrationen in Moosproben, der im Kalenderjahr vor der Moosprobenahme über den Kiefernbeständen gemessenen mittleren NH_x -Konzentrationen der Luft, der N-Depositionen und der mittleren Konzentrationen anorganischer N-Verbindungen im Bestandesniederschlag in unterschiedlich immissionsbelasteten Dauerbeobachtungsflächen

Probenahmeort	3			8			11		
	2-97	2-98	2-99	2-97	2-98	2-99	2-97	2-98	2-99
Zeitpunkt der Moosprobenahme	2-97	2-98	2-99	2-97	2-98	2-99	2-97	2-98	2-99
mittl. NH_x -Gehalt der Luft [$\mu\text{g m}^{-3}$]	4,6	4,5	2,8	8,5	7,0	4,5	2,7	2,4	2,0
Stickstoffdepositionen [$\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	24	30	32	25	31	34	12	15	16
mittl. N-Konzentrationen im Niederschlagswasser [mg/l]	6	6,5	4,5	6	6,1	5	3,2	4,0	2,8
N-Konzentrationen im Moos [% i.T.]	2,2	2,1	2,0	2,2	2,2	2,1	1,9	1,9	1,6

zeitraum erhobenen Daten ist allerdings lose und auf die witterungsbedingt gegenläufige Entwicklung der N-Depositionen und N-Konzentrationen besonders im niederschlagsreichen Jahr 1998 zurückzuführen. Bei einer Gegenüberstellung der Vergleichsdaten von dem Jahr 1998 zeigt sich eine straffere Beziehung ($r^2=0,86$, $p<0,001$).

Einen größeren Einfluß auf die N-Gehalte in den Moosproben als die jährlichen Depositionsraten hatten offensichtlich die im Bestandesniederschlag als Summe der Ammonium- und Nitratkonzentrationen ermittelten N-Konzentrationen (\rightarrow Abb. 7). Das über den gesamten Untersuchungszeitraum (1996 - 1998) gewogene jährliche Mittel der N-Konzentrationen war signifikant mit den N-Konzentrationen in den Moosproben korreliert ($r^2=0,81$, $p<0,01$).

Zur Klärung des Zusammenhanges der Elementkonzentrationen in den Moosproben mit den Nadelspiegelwerten wurden die Mittelwerte von Parallelbeprobungen im Jahr 1998 statistisch ausgewertet. Abb. 8 veranschaulicht die Beziehung der N-Konzentrationen in den Moosproben mit den Nadelspiegelwerten. Bei Stickstoff besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Moos- und Nadelproben ($p < 0,001$). 75% (r^2) der N-Gehalte in den Nadeln sind über die N-Konzentrationen der Moose vorhersagbar. Ebenfalls hohe Korrelationen anderer Nährelemente wie Mangan ($r^2=0,92$) und Phosphat ($r^2=0,4$) auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, verdeutlichen den eng miteinander verbundenen Stoffhaushalt beider Pflanzenarten. Gegenüber den Moosgehalten überproportional hohe N-Konzentrationen in den Kiefernadeln traten in den Forsten Ostdeutschlands auf (\rightarrow Abb. 3). Sie stehen möglicherweise im Zusammenhang mit einem höheren N-Angebot im Boden, das aus den geringen Sickerwasserausträgen dieser Gebiete resultiert.

5 Diskussion

Das insgesamt hohe atmogene N-Angebot im Untersuchungsgebiet führt zu einer regional unterschiedlichen Anreicherung von Stickstoff in der Pflanzensubstanz von *Pleurozium schreberi*. Trotz der Einbeziehung der generell nährstoffärmeren Substanz abgestorbener Pflanzenteile in die chemische Analyse waren die mittleren N-Konzentrationen der untersuchten Moosproben mit 1,9% gegenüber den Proben grüner Pflanzen aus borealen Gebieten Nordamerikas und Großbritanniens deutlich erhöht (\rightarrow Tabelle 3).

Bei Parallelbeprobungen wiesen die N-Konzentrationen der Moos- und Nadelproben ein ähnliches Verbreitungsmuster auf. In den vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Regio-

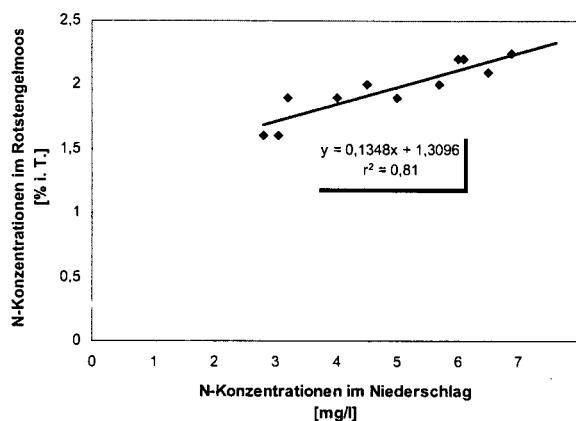


Abb. 7: Zusammenhang zwischen den N-Konzentrationen in Proben von *Pleurozium schreberi* mit den mittleren Stickstoffgehalten ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) im Bestandesniederschlag des Vorjahres (Vergleichszeitraum 1996 bis 1998)

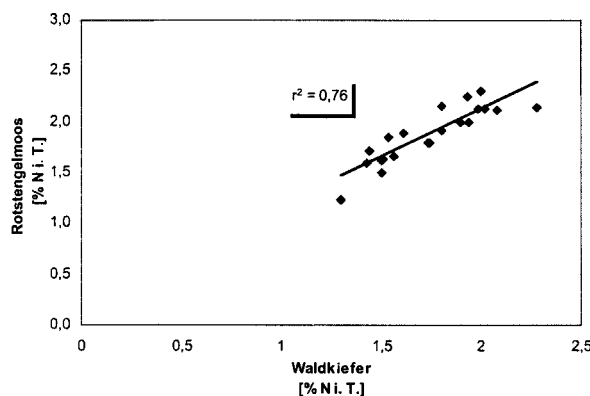


Abb. 8: Regression der N-Konzentrationen in Kiefernadeln und Moosproben gleicher Probenahmeorte

Tabelle 3: Mittlere Stickstoffkonzentrationen in den Moosproben von *Pleurozium schreberi* im Vergleich (1: Eigene Untersuchungen, 2: RAEYMAEKERS (1987), 3: WEETMANN & TIMMER (in: 2), 4: SKRE & OECHEL (1979), 5: PITCAIRN & FOWLER (1995))

	1	2	3	4	5
N [% i.T.]	1,9	1,0	1,2	1,3	0,6

nen wurden durch beide Verfahren überdurchschnittliche Werte festgestellt.

Saisonale Schwankungen der Elementgehalte, die bei Kiefernadeln einen Rückgang der Nadelspiegelwerte im Sommer von 20 bis 40% hervorrufen können (HELJA-SISKO, 1990; HIPPEL & BRANSE, 1992; STROHBACH, 1998) waren bei der untersuchten Moospezies weniger deutlich ausgeprägt. Eine zunehmende N-Belastung an einem Waldrandstandort war allerdings innerhalb eines Jahres lediglich an den N-Konzentrationen im Moos feststellbar.

Der statistische Zusammenhang zwischen den N-Konzentrationen in den Moospolstern von *Pleurozium schreberi* und ökologischen Belastungskenngrößen wie den Nadelspiegelwerten sowie N-Depositionsraten und Konzentrationen von Stickstoff im Bestandesniederschlag beruht nach den Ergebnissen von Düngungsexperimenten auf dem Akkumulationsvermögen dieser Spezies der im Bestandesniederschlag dominierenden Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat (RAEYMAEKERS, 1987; SKRE & OECHEL, 1979). Ausschlaggebend für die Höhe der N-Konzentrationen in *Pleurozium* ist nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen offensichtlich weniger das Ausmaß jährlicher Depositionsraten als die Höhe der Elementkonzentrationen anorganischer N-Verbindungen im Niederschlag. So erklären sich trotz gesteigener N-Depositionen in dem niederschlagsreichen Jahr 1998 die gesunkenen N-Konzentrationen in den Moosproben. Auch ein witterungsbedingter Verdünnungseffekt infolge eines überproportionalen Biomassezuwachses ist nicht auszuschließen. Aufgrund lokal ansteigender Stickstoffkonzentrationen in Moosproben an einem klimatisch vergleichbaren Probenahmeort (11,1) spielt er vermutlich jedoch keine maßgebliche Rolle.

Moospflanzen decken ihren Nährstoffbedarf, bedingt durch ein fehlendes Wurzelsystem, zum überwiegenden Teil aus der Atmosphäre. Auch ein pedogener Einfluß auf die Nährelementversorgung ist evident (BATES, 1992). Abgeschildert von einer mehrere Zentimeter mächtigen Rohhumusaufgabe ist er jedoch für den oberirdischen Stickstoffkreislauf von untergeordneter Bedeutung.

Wie in zahlreichen Experimenten (BADDELEY et al., 1994; BATES, 1992; JAUHAINEN et al., 1994; PRESS et al., 1986; RAYEMAEEKERS, 1987; SKRE & OECHEL, 1979) nachgewiesen wurde, ist Stickstoff – zumindest unter den herrschenden Klima- und Depositionsbedingungen im norddeutschen Tiefland – nicht wachstumslimitierend. Der leicht pflanzenverfügbare Ammonium- und Nitratstickstoff wird auf biosynthetischem Wege akkumuliert und ist somit in einer dem atmogenen N-Angebot entsprechenden Konzentration als organisch gebundener Stickstoff chemisch nachweisbar.

Insbesondere für die Forsten schwach versorgter Standorte bedeuten höhere N-Einträge eine Gefährdung durch ihre bodenversauernde Wirkung und eine weitere Verschiebung der Nährstoffverhältnisse insbesondere zuungunsten von Magnesium, Kalzium und Phosphor. Zudem ist durch höhere Stickstoffeinträge in von Natur aus nährstoffarmen Ökosystemen ein Vegetationswandel die Folge (ELLENBERG, 1991). Entsprechende Beobachtungen wurden in nahezu allen untersuchten Kiefernforsten gemacht. Auch die Vorkommen von *Pleurozium schreberi* sind unter den aktuellen Depositi-

onsbedingungen zahlreicher Standorte längerfristig als gefährdet zu betrachten (v. DOBBEN, 1994).

Die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, daß sich die Nadelspiegelwerte mit 1,3 bis 2,5% N i.T. in die von Bartens & Büttner (1997) sowie BMELF (1997) zusammengestellten Ergebnisse für norddeutsche Kiefernforsten einreihen. N-Gehalte in Kiefernadeln, die in Norddeutschland vielerorts über 1,7% lagen, deuten nach Heinsdorf (1995) bereits auf eine Überversorgung mit Stickstoff hin. "Normalwerte" unter 1,7% N in den Nadeln bzw. 1,8% in den Moosen wurden nur in Gebieten mit N-Depositionsraten in der Kronentraufe unter 20 kg ha⁻¹ a⁻¹ festgestellt. In einem Spektrum zwischen etwa 10 bis 20 kg ha⁻¹ a⁻¹ liegt nach Nagel & Gregor (1998) das Ausmaß der N-Einträge, die langfristig für forstwirtschaftlich genutzte Kiefernforsten noch verträglich sind ("critical loads"). Auch in den geringer belasteten Forsten Ostdeutschlands lagen die N-Einträge überwiegend über den europäischen Mittelwerten von 5 - 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (ASMAN & VAN JAARVELD, 1990).

Zweifellos kann das Moosmonitoring keine apparativen Messungen ersetzen, doch sind die Vorteile dieser wirkungsbezogenen Untersuchungsmethode nicht zu unterschätzen. Möglicherweise schlägt sich in den relativ hohen N-Konzentrationen im Moos während niederschlagsärmerer Perioden der obligatorisch zunehmende Anteil der bei Depositionsmessungen in der Kronentraufe unzureichend erfaßten trockenen Deposition nieder. Anhand weiterer vergleichender Untersuchungen ist zu prüfen, inwieweit die Ergebnisse der Regressionsanalysen, ggf. in Verbindung mit klimatischen Wasserbilanzen, zuverlässige Aussagen über die Höhe der N-Einträge in Kiefernforsten gestatten.

Im Routineeinsatz kann das Moosmonitoring zur Früherkennung von Schadwirkungen mittel- bis langfristig überhöhter N-Einträge in Kiefernforsten aber auch als Baustein in einem synökologischen Monitoring (ARNDT, 1996) gegenüber aufwendigeren Verfahren einige Vorteile bieten. Ob das Spektrum der Bioindikation sich auch mit anderen Moosarten und Bestandstypen oder auf andere Elemente (S, P, K und Mn) ausweiten läßt, bleibt in weiteren Studien zu überprüfen.

Danksagung

Für die freundliche Übermittlung von Depositionsmeßergebnissen danke ich den beteiligten unter der Tabelle 1 aufgeführten Instituten. Herrn Dr. REEPMEYER, LUFA Oldenburg und Herrn Prof. ZIMMERMANN, FH Bingen sei an dieser Stelle für die kritische Durchsicht des Manuskriptes herzlich gedankt.

Die Untersuchungen wurden durchgeführt im Rahmen eines von der EU und des Landes Niedersachsen geförderten Forschungsvorhabens.

6 Literatur

- ARNDT, U. (1996): Erster Hohenheimer Workshop zur Bioindikation in Altbach-Deizisau – Eine Einführung. In: Arndt, U.; Fomin, A.; Lorenz, S. (Hrsg.): Bioindikation, neue Entwicklungen, Nomenklatur, synökologische Aspekte. 15-29, Stuttgart
- ARNDT, U.; NOBEL, W.; SCHWEIZER, B. (1987): Bioindikatoren. Stuttgart, 388 S.
- ASMAN, W.A.H.; VAN JAARVELD, H.A. (1990): A Variable-Resolution Statistical Transport Model Applied for Ammonia and Ammonium. RIVM, Bilthoven, The Netherlands, 1-144

- BADDELEY, J.A.; THOMPSON, D.B.A.; LEE, J.A. (1994): Regional and Historical Variation in the Nitrogen Content of *Racomitrium lanuginosum* in Britain in Relation to Atmospheric Nitrogen Deposition. *Environmental pollution* 84, 189-196
- BAKKEN, S. (1994): Growth and Nitrogen Dynamics of *Dicranum majus* under two Contrasting Nitrogen Deposition Regimes. *Lindbergia* 19, 63-72
- BARTENS, H.; BÜTTNER, G. (1997): Bodenzustandserhebung in Niedersachsen 1990/91 – Datendokumentation. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe C, 5, Universität Göttingen
- BATES, J.W. (1992): Mineral Nutrient Acquisition and Retention by Bryophytes. *J. Bryol.* 17, 223-240
- BMELF – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (1997): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald. Bonn, 158 S.
- BMELF – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Bd. 1 und 2, Bonn
- BMELF – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (1998): Dauerbeobachtungsflächen zur Umweltkontrolle im Wald. LEVEL II. Erste Ergebnisse, 148, S. 56
- BÜRGER-ARNDT, R. (1994): Zur Bedeutung von Stickstoffeinträgen für naturnahe Vegetationseinheiten in Mitteleuropa. *Dissertationes Botanicae* 220, 226 S.
- BOLTE, A. (1996): Die Bodenvegetation in Kiefernökosystemen – eine Steuergröße für den Wasser- und Stoffhaushalt. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Heft 185, 97-111
- V. DOBBEN, H.F. (1994): Vegetation as Monitor for Deposition of Nitrogen and Acidity. Wageningen, NL
- ELLENBERG, H. (1991): Ökologische Veränderungen in Biozönosen durch Stickstoffeintrag. Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Hrsg.). Berichte aus der ökolog. Forschung Jülich, 4 S.
- FRAHM, J.-P.; FREY, W. (1983): Moosflora. Stuttgart
- HEINSDORF, D. (1993): The Role of Nitrogen in Declining Scots Pine Forests (*Pinus sylvestris*) in the Lowland of East Germany. *Water Air and Soil Pollution* 69, 21-35
- HEINSDORF, D. (1995): Forstliche Strategien in Waldgebieten am Beispiel des nordostdeutschen Tieflandes. Umweltbundesamt (Hrsg.): Wirkungskomplex Stickstoff und Wald. UBA-Texte 28, 183-191
- HEINSDORF, D.; KRAUSS, H.-H. (1991): Massentierhaltung und Waldschäden auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. *Forst und Holz* 13, 356-361
- HEINSDORF, M. (1997): Boden- und ernährungskundliche Untersuchungen in Kiefern- und Kiefern-Buchen-Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Brandenburgs. Beiträge für Forstwirtschaft. u. Landsch.ökol. 31, 119-124
- HELJA-SISKO, H. (1990): Temporal Variation in Nutrient Concentration of *Pinus sylvestris* Needles. *Scand. J. Res.* 5, 177-193
- HERPIN, U. (1995): Monitoring der Schwermetallbelastung in der Bundesrepublik Deutschland mit Hilfe von Moosanalysen. UBA-Texte 31/95, 161 S.
- HIPPELI, P.; BRANSE, C. (1992): Veränderungen der Nährelementkonzentrationen in den Nadeln mittelalter Kiefernbestände auf pleistozänen Sandstandorten Brandenburgs in den Jahren 1964 bis 1988. *Forstwiss. Cbl.* 111, 44-60
- HOFMANN, G.; HEINSDORF, D.; KRAUSS, H.H. (1990): Wirkung atmosphärischer Stickstoffeinträge auf Produktivität und Stabilität von Forstkiefernökosystemen. *Beitr. f. d. Forstwirtschaft.* 24, 59-73
- HOFMANN, G. (1997): Mitteleuropäische Wald- und Forstökosystemtypen. *AFZ/Der Wald. Sonderheft*, 91 S.
- JAUHAINEN, J. VASANDER, H.; SILVOLA J. (1994): Response of *Sphagnum fuscum* to N Deposition Increased and CO₂. *J. Bryol.* 18, 83-95
- LEE, J.A.; CAPORN, S.J.M.; CARROLL, J.; FOOT, J.P.; JOHNSON, D.; POTTER, L.; TAYLOR, A.F.S. (1998): Effects of Ozone and Atmospheric Nitrogen Deposition on Bryophytes. In: Bates, J.W.; Ashton, N.W.; Duckett, J.G. (Hrsg.): *Bryology for the 21st Century.* 331-341
- NAUMANN, C.; BASSLER, R. (1976): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA (Hrsg.) III. 1.-4. Ergänzungslieferung (1997), Darmstadt
- PITCAIRN, C.E.R.; FOWLER, D. (1995): Deposition of Fixed Atmospheric Nitrogen and Foliar Nitrogen Content of Bryophytes and *Calluna vulgaris* (L.) HULL. *Environmental Pollution* 88, 193-205
- RAEYMAEKERS, G. (1987): Effects of Simulated Acid Rain and Lead on the Biomass, Nutrient Status, and Heavy Metal Content of *Pleurozium schreberi* (BRID.) MITT. *Journ. Hattori Bot. Lab.* 63, 219-230
- SCHULZ, H.; HUHN, G.; SCHULZ, U. (1997): Bestimmung der Deposition von Fremd- und Schadstoffen in Kiefernforste mit Hilfe von Baumborken. *UFZ-Bericht* 21, Leipzig-Halle, 136 S.
- SCHWEIZER, B. (1997): Bioindikation mit synökologischen Aspekten. Umweltbundesamt (Hrsg.): Auswertung der Waldschadensforschungsergebnisse (1982-1992) zur Aufklärung komplexer Ursache-Wirkungsbeziehungen mit Hilfe systemanalytischer Methoden. UBA-Berichte 6/97, 293-282
- SKRE, O.; OECHEL, W.C. (1979): Moss Production in Black Spruce *Picea mariana* Forests with Permafrost near Fairbanks, Alaska, as Compared with two Permafrost-free Stands. *Holarctic Ecology* 2, 249-254
- STROHBACH, B. (1998): Auswirkungen Auswirkungen von Bodenmeliorationsmaßnahmen auf die Ernährung und Stabilität von Kiefern im Bereich der Rieselfelder Berlin-Buch. *Beitr. Forstwirtschaft. u. Landsch.ökol.* 32 H. 2, 88-93
- TRITSCHLER, J.; FAUSS-KESSLER, TH. (1997): Der Zusammenhang zwischen zwei Meßnetzen zum Biomonitoring: Metalle in Moosen und Schwefel in Fichtennadeln. *Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit* (Hrsg.), GSF-Bericht 2/97, Neuherberg, 159 S.
- VAN TOOREN, B.F.; VAN DAM, H.; DURING, H.J. (1990): The Relative Importance of Precipitation and Soil as Sources of Nutrients for *Calligonella cuspidata* in a Chalk Grasland. *Func. Ecol.* 4, 101-107
- VDI (1978): Messen gasförmiger Immissionen. Messen der Ammoniak-Konzentration. Indophenol-Verfahren. VDI-Richtlinie 2461, Blatt 1. 8 S.
- WENDLAND, F.; ALBERT, H.; BACH, M.; SCHMIDT, R. (1993): Atlas zum Nitratstrom in der Bundesrepublik Deutschland, Springer-Verlag, Heidelberg, S. 8-11
- WERNER, B.; HENZE, C.-H.; NAGEL, N.-D. (1998): Critical loads für den Säureeintrag. Nagel, H.-D.; GREGOR, H.-D. (Hrsg.): *Ökologische Belastungsgrenzen – Critical loads and levels.* Berlin, S. 80-109

Eingegangen am: 02.12.1998
Akzeptiert am: 15.03.1999