

## Auswirkungen experimenteller Stickstoffgaben auf die Epiphytenflora in Dauerbeobachtungsflächen (Rheinland-Pfalz, Deutschland)

Isabelle FRANZEN-REUTER & Jan-Peter FRAHM

**Zusammenfassung:** FRANZEN-REUTER, I. & FRAHM, J.-P. 2007. Auswirkungen experimenteller Stickstoffgaben auf die Epiphytenflora in Dauerbeobachtungsflächen (Rheinland-Pfalz, Deutschland). – *Herzogia* 20: 61–75.

In Dauerbeobachtungsflächen (DBF) an verschiedenen Trägerbaumarten in der Eifel (Rheinland-Pfalz) wurden die Auswirkungen erhöhten Stickstoffeintrags auf die Epiphytenvegetation untersucht. Die DBF wurden in vierzehntägigen Intervallen über einen Zeitraum von 21 Monaten mit unterschiedlich konzentrierten  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -,  $\text{KNO}_3$ - und  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Lösungen besprüht. Veränderungen der epiphytischen Moos- und Flechtenvegetation wurden mittels planimetrischer Verfahren (nach VDI 3957 Blatt 8) detailliert erfasst. Vor allem häufige Arten mit weiter Standortamplitude wie *Hypnum cupressiforme* und *Parmelia sulcata* haben sich im Verlauf des Experiments innerhalb der DBF ausgebreitet. Die Bedeckungsgrade der acidophytischen Flechtenarten *Hypogymnia physodes* und *Lepraria incana* s.l. sind zurückgegangen. Da visuell keine Schädigungen der Flechtenthalli festgestellt wurden, könnte auch das Herabfallen einiger Thalli durch Wind oder Regen als Ursache für den Rückgang in Betracht kommen. Einige Moosarten (*Metzgeria furcata*, *Radula complanata*, *Ulota crispa*, *Brachythecium rutabulum*) entwickelten im Verlauf der Düngung Nekrosen.

**Abstract:** FRANZEN-REUTER, I. & FRAHM, J.-P. 2007. Effects of nitrogen additions on epiphytic lichen and bryophyte cover on permanent observation plots (Rhineland-Palatinate, Germany). – *Herzogia* 20: 61–75.

The effects of nitrogen on epiphytic lichens and bryophytes were investigated at permanent observation plots (DBF) on different tree species in the Eifel region (Rhineland-Palatinate, Germany). Every 14 days the plots were sprayed with solutions of  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -,  $\text{KNO}_3$ - and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  extended over a period of 21 months. Changes of the magnitude of cover and the composition of the bryophyte and lichen species were monitored planimetrically according to VDI-guideline 3957/8. Mainly wide-spread lichens and bryophytes with indifferent ecological behaviour e. g. *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia sulcata* have spread within the permanent observation plots during the course of the study. At the same time, extend of cover of the acidophytes *Hypogymnia physodes* and *Lepraria incana* s.l. diminished. They did, however, not reveal any visible deteriorations and probably fell down due to wind or rain. Conversely, some bryophyte species (*Metzgeria furcata*, *Radula complanata*, *Ulota crispa*, *Brachythecium rutabulum*) exhibited necrotic effects as a result of fertilisation.

**Key words:** Lichens, bryophytes, fertilisation, ammonium, nitrate, VDI-Guideline 3957.

### Einleitung

Die Wirkungen erhöhter Stickstoffeinträge auf terrestrische Ökosysteme sind sehr verschiedenartig (z. B. FANGMEIER et al. 1994, VAN DER EERDEN et al. 2001). In erster Linie ist Stickstoff in verschiedenen Verbindungen für sämtliche Organismen ein unentbehrlicher Nährstoff. Als Bestandteil sämtlicher Amino- und Nukleinsäuren und damit der Eiweißstoffe und genetischen Informationsträger sowie anderer Grundstoffe sind Lebensformen ohne ihn gar nicht denkbar. In höheren Dosen können Stickstoffverbindungen jedoch zu physiologischen Störungen

führen und als Schadstoff wirken. So zeigen beispielsweise experimentelle Untersuchungen, dass Stickstoffgaben in Form von Ammonium die Photosynthese von *Parmelia sulcata* hemmen (BROWN & TOMLINSON 1993, BROWN et al. 1995). Begasungsexperimente mit  $\text{NH}_3$  an Heidemoosarten führten zu direkten Schädigungen wie Chlorosen und Nekrosen (VAN DER EERDEN et al. 1991, GREVEN 1992). Untersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter N-Depositionen wurden in der Vergangenheit insbesondere an *Sphagnum*-Arten durchgeführt. Die Folgen sind beispielsweise Abnahmen in der Biomasseproduktion (KOOIJMAN & KANNE 1993, JAUHAINEN et al. 1994), Hemmung der Photosynthese (RUDOLPH & VOIGT 1986), Akkumulation von bestimmten Aminosäuren (BAXTER et al. 1992, NORDIN & GUNNARSSON 2000) und Abnahme der Nitratreduktase-Aktivität (RUDOLPH & VOIGT 1986). Einige Experimente an Flechten zeigen aber auch eine Wachstumsförderung infolge von Stickstoffdüngung (HAKULINEN 1966, ARMSTRONG 1984). Über die vielfältigen Auswirkungen verschiedenster N-Verbindungen auf Moose und Flechten berichten auch BROWN (1992) und CRITTENDEN et al. (1994).

Die offensichtlichsten Auswirkungen eutrophierender Luftverunreinigungen zeigten sich in den letzten Jahren in einem Wandel der Moos- und Flechtenvegetation mit dem Rückgang acidophytischer Arten und Zunahme von Neutrophyten und Eutrophierungszeigern. Dies betrifft sowohl bodenbewohnende Gesellschaften (DURING & WILLEMS 1986, BERG & VERHOEF 1998, LEE et al. 1998) als auch insbesondere die epiphytische Vegetation (z. B. VAN DOBBEN 1996, VAN DOBBEN & DE BAKKER 1996, VAN HERK 1999, STAPPER et al. 2000, ZIMMER 2000, FRANZEN 2001). Als Ursache für die extreme Zunahme der Nitrophyten werden verschiedene Gründe angeführt: Anstieg der  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen in den letzten Jahren als Folge der intensiven Viehhaltung (DE BAKKER 1989); Erhöhung des Borken-pH's als Folge des Rückgangs der  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen; nitrophytische Arten reagieren empfindlicher gegenüber  $\text{SO}_2$  als andere Arten; nitrophytische Arten sind in der Lage neue Standorte schneller zu besiedeln als andere Arten (VAN DOBBEN & TER BRAAK 1996). Die Zunahme der Nitrophyten scheint somit ein vieldiskutiertes Phänomen zu sein und bedarf in jedem Fall weiteren Untersuchungen.

In der vorliegenden Studie soll ein 21-monatiges Düngungsexperiment klären, welche Effekte lösliche Nitrat- und Ammoniumverbindungen auf die Epiphytenflora ausüben. Hierbei finden unterschiedliche Borkensubstrate sowie ein breites Artenspektrum Berücksichtigung.

## Methoden

### Untersuchungsgebiete

Die Anlage der Dauerbeobachtungsflächen (DBF) erfolgte an epiphytenreichen Baumstandorten in der südlichen Eifel (Rheinland-Pfalz) mit überwiegend acidophytischer Epiphytenvegetation. Es wurden drei Untersuchungsgebiete ausgewählt, die folgende Kriterien zu erfüllen hatten: geringe Verkehrsbelastung, kaum landwirtschaftliche Einflüsse, ausreichende Anzahl an freistehenden Bäumen mit vielfältigem Epiphytenbewuchs, vergleichbare Standortbedingungen. Die Beschreibung der Untersuchungsgebiete mit Angabe der verwendeten Trägerbaumart ist Tab. 1 zu entnehmen. In der Auswahl der Trägerbäume wurden drei verschiedene Baumarten herangezogen, um zu untersuchen, inwiefern das Substrat einen zusätzlichen Einfluss auf die Entwicklung der Epiphytenvegetation im Verlauf des Experiments ausübt. Daten zur Hintergrundbelastung mit Stickstoffverbindungen an den Untersuchungsstandorten liegen nicht vor, diese ist aber aufgrund der engen räumlichen Lage der Standorte und der ähnlichen Epiphytenvegetation als vergleichbar einzuschätzen.

**Tab. 1:** Angaben zu den Dauerbeobachtungsflächen.

Station	Geogr. Länge	Geogr. Breite	Höhe ü. M.[m]	Trägerbaum	Anzahl der DBF
Kelberg	6°57'42.1"E	50°17'25.4"N	640	<i>Fraxinus excelsior</i>	14
Retterath	7°01'16.9"E	50°16'20.2"N	400	<i>Populus × canadensis</i>	14
Hohe Acht	7°02'41.2"E	50°23'57.7"N	550	<i>Acer platanoides</i>	14

### Anlage und Behandlung der DBF

An jeder Station wurden sieben aufrechte Baumstämme ausgewählt, an denen jeweils in Nord- und Südexposition eine 20 cm × 20 cm große DBF in mindestens 1 m Höhe über dem Boden mit Nägeln markiert wurde. Somit ergeben sich 14 DBF pro Untersuchungsstation (Tab. 1).

Die DBF wurden ab Dezember 2001 in zweiwöchentlichem Abstand über den Gesamtzeitraum von 21 Monaten mit KNO<sub>3</sub>-, NH<sub>4</sub>Cl- und NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-Lösungen besprüht, die mit 10 %iger NaOH- bzw. HCl-Lösung auf einen pH-Wert von 5,5 eingestellt wurden, was in etwa dem Wert von Regenwasser entspricht. Bei jedem Sprühereignis wurden 30 ml pro DBF appliziert, wobei eine Gesamtdosition von 30 und 60 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> simuliert wurde. Dies entspricht für KNO<sub>3</sub> und NH<sub>4</sub>Cl einer reinen Stickstoffkonzentration von 11 bzw. 22 mM, für NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> einer Konzentration von 5,5 bzw. 11 mM. Mit destilliertem Wasser behandelte Flächen dienten als Kontrolle. Somit ergeben sich inklusive der Kontrolle sieben Düngevarianten. Jede Düngevariante wurde in Duplikaten ausgeführt.

Um eine unmittelbare Auswaschung durch Regen zu verhindern, erfolgte die Besprühung an trockenen Tagen, sowie in den frühen Morgenstunden zur Vermeidung von Verbrennungsschäden durch hohe Sonneneinstrahlung.

### Aufnahme der DBF

Die Veränderungen der epiphytischen Moos- und Flechtenvegetation wurden sowohl mittels Frequenzbestimmung als auch durch exakte Flächenbestimmung mit Hilfe von Folien (nach VDI 3957 Blatt 8) erfasst (KIRSCHBAUM et al. 2002).

Bei der Frequenzanalyse wurde ein 20 cm × 20 cm großes Gitter, welches in 100 Quadrate mit einer Kantenlänge von 2 cm unterteilt ist, auf der Untersuchungsfläche angebracht und für jede Art die Präsenz in den Kleinquadraten ermittelt. Der zeitliche Abstand zwischen den Frequenzaufnahmen betrug sieben Monate, die erste Kartierung wurde im Dezember 2001, die abschließende im September 2003 durchgeführt.

Zur genauen Überprüfung der Zuwachsraten einzelner Arten wurden zu Beginn und am Ende des Experiments die Umriss der Moos- und Flechtenthalli innerhalb der DBF (400 cm<sup>2</sup>) auf eine Klarsichtfolie nachgezeichnet. Die Folie wurde durch Scannen digitalisiert, und die Flächenanteile einzelner Arten mit Hilfe einer Software, die inklusive Bedienungsanleitung über das Internet frei verfügbar ist (<http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/fgkf/krdl/richtlinien/03247>), bestimmt. Veränderungen im Moos- und Flechtenbewuchs lassen sich dabei mit hoher Genauigkeit feststellen.

Weiterhin wurden im Verlauf des Experiments auftretende chlorotische und nekrotische Verfärbungen vermerkt.

Die Pappeln der Station Retterath mussten im April 2003 gefällt werden, somit konnte hier zum letzten Kartierungstermin (September 2003) keine Frequenzbestimmung mehr durchgeführt werden, und die abschließende Flächenbestimmung (VDI 3957/8) erfolgte bereits im März 2003.

In der Nomenklatur der Moose wird KOPERSKI et al. (2000), der Flechten SCHOLZ (2000) gefolgt. *Lepraria incana* s.l. fasst die im Gelände habituell schwer zu trennenden Arten *L. incana* und *L. lobificans* zusammen.

## Ergebnisse

Tab. 2 gibt einen Überblick über das Vorkommen der epiphytischen Arten an den drei untersuchten Stationen. Innerhalb der insgesamt 42 DBF wurden 21 Flechten- und 10 Moosarten festgestellt, von denen die meisten saure, nährstoffarme Standorte bevorzugen.

Die Auswertung der frequenzanalytischen Erhebung hat ergeben, dass in den meisten Fällen zwischen den einzelnen Aufnahmezeitpunkten (sieben Monate) nur geringfügige Veränderungen stattgefunden haben. Daher erscheint ein Vergleich zwischen den Terminen zu Beginn und Ende des Experiments sinnvoller. Somit werden im Folgenden die Ergebnisse der Flächenbestimmung detailliert vorgestellt, die aufgrund der exakten Flächenberechnung der einzelnen Arten genauer ist als die Frequenzanalyse. Fälle, in denen starke Veränderungen während des 7-Monats-Turnus stattgefunden haben, werden für einzelne Arten exemplarisch dargestellt.

**Tab. 2:** Arteninventar der 42 Dauerbeobachtungsflächen an den Stationen Retterath (R), Hohe Acht (H) und Kelberg (K) mit Angaben zum ökologischen Verhalten der Flechten nach VAN HERK (1999), n=Nitrophyt, a=Acidophyt.

Flechten	Code	Ök.	Vorkommen	Moose	Code	Vorkommen
<i>Amandinea punctata</i>	Amapun		R	<i>Brachythecium rutabulum</i>	Brarut	H
<i>Candelariella reflexa</i>	Canref	n	K	<i>Brachythecium velutinum</i>	Bravel	H
<i>Candelariella xanthostigma</i>	Canxan	n	R	<i>Dicranoweisia cirrata</i>	Diccir	R, H, K
<i>Cladonia coniocraea</i>	Clacon	a	R, H	<i>Frullania dilatata</i>	Frudil	R, H, K
<i>Evernia prunastri</i>	Evepru	a	R, H, K	<i>Hypnum cupressiforme</i>	Hypcup	R, H, K
<i>Hypogymnia physodes</i>	Hypphy	a	R, H, K	<i>Metzgeria furcata</i>	Metfur	H, K
<i>Lecanora hagenii</i>	Lechag	n	R, H, K	<i>Orthotrichum affine</i>	Ortaff	R, H, K
<i>Lepraria incana</i> s.l.	Lepinc	a	R, H, K	<i>Orthotrichum diaphanum</i>	Ortdia	R, K
<i>Melanelia glabrata</i>	Pargla		R, H, K	<i>Radula complanata</i>	Radcom	R, H
<i>Melanelia laciniatula</i>	Parlac		H	<i>Ulota crispa</i>	Ulocri	H, K
<i>Parmelia saxatilis</i>	Parsax	a	H, K			
<i>Parmelia sulcata</i>	Parsul		R, H, K			
<i>Parmelina tiliacea</i>	Partil		R			
<i>Parmotrema chinense</i>	Parchi		H			
<i>Physcia tenella</i>	Phyten	n	R, H, K			
<i>Physconia grisea</i>	Phygri		R			
<i>Platismatia glauca</i>	Plagla	a	H, K			
<i>Pleurosticta acetabulum</i>	Parace		R			
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	Psefur	a	R, H, K			
<i>Ramalina farinacea</i>	Ramfar		R			
<i>Xanthoria candelaria</i>	Xancan	n	K			

### Kelberg (Landkreis Daun)

Die Gesamtbedeckungen der DBF an der Station Kelberg sind mit über 50 % vergleichsweise hoch (Tab. 3). Im Wesentlichen trägt die Blattflechte *Parmelia sulcata* zu den hohen Bedeckungsgraden bei. Während in den  $\text{KNO}_3$ - und  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Varianten eine Abnahme der Gesamtbedeckung zu beobachten war, ist sie in den  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -gedüngten DBF sowie in den Kontrollflächen angestiegen. Die Abnahme wurde im Wesentlichen durch den starken Rückgang von *Lepraria incana* s.l. und *Hypogymnia physodes* verursacht, letztere war auf einer DBF (22 mM  $\text{KNO}_3$ ) am abschließendem Aufnahmeterrain sogar völlig verschwunden. Die Ursache für die Abnahme der Bedeckungsgrade von *H. physodes* lag im Herabfallen einzelner Thalli. In den  $\text{KNO}_3$ -gedüngten Flächen verschwanden weiterhin im Verlauf des Experiments *Dicranoweisia cirrata* und *Parmeliopsis ambigua*.

Auf sämtlichen Düngungsflächen mit Vorkommen von *Hypnum cupressiforme* sind die Bedeckungsgrade dieser Moosart angestiegen. Den größten Zuwachs weisen hierbei die Flächen auf, die mit Ammoniumnitrat-Lösungen behandelt wurden. Auf diesen Flächen hat sich auch

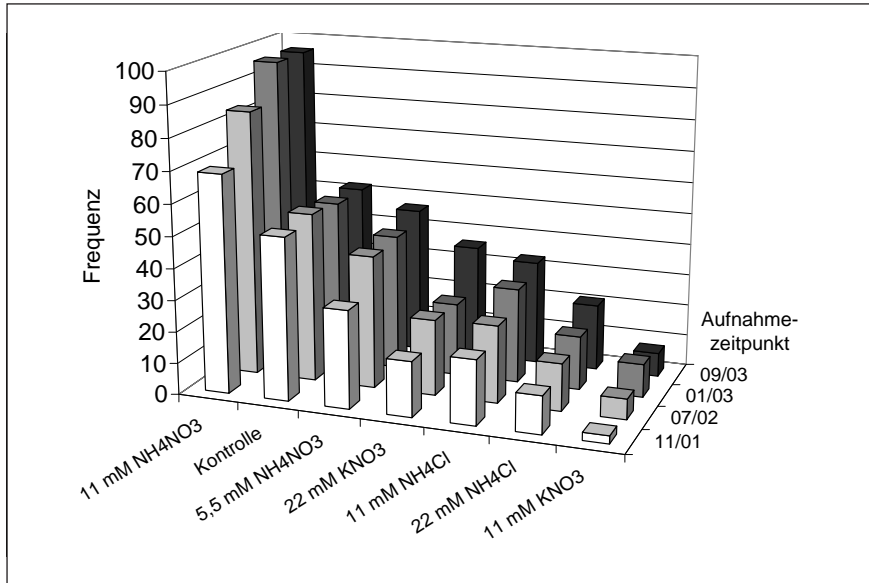
**Tab. 3:** Veränderungen der mittleren Bedeckung (in %) in den Kontroll- und Düngungsflächen an der Station **Kelberg** (*Fraxinus excelsior*) zwischen Dezember 2001 und September 2003; Daten stellen Mittelwerte aus jeweils zwei DBF dar; im Text erwähnte auffällige Veränderungen sind fett gedruckt.

Art	$\text{KNO}_3$				$\text{NH}_4\text{Cl}$				$\text{NH}_4\text{NO}_3$				Kontrolle	
	11 mM		22 mM		11 mM		22 mM		5,5 mM		11 mM		2001	2003
	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003		
Canref	-	-	-	-	0,56	0,33	-	-	-	-	0,14	0,18	-	-
Diccir	-	-	<b>0,02</b>	-	0,12	0,35	0,33	0,81	-	-	0,30	0,28	-	-
Evepru	6,54	7,97	4,69	3,08	0,03	0,08	0,63	0,15	-	-	-	-	1,47	2,52
Frudil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>0,16</b>
<b>Hypcup</b>	-	-	-	-	<b>0,53</b>	<b>1,18</b>	<b>1,68</b>	<b>3,76</b>	<b>5,10</b>	<b>7,94</b>	<b>15,7</b>	<b>22,8</b>	-	-
<b>Hypphy</b>	-	-	<b>5,83</b>	-	<b>11,1</b>	<b>1,51</b>	<b>15,7</b>	<b>4,12</b>	<b>0,46</b>	<b>0,26</b>	<b>1,63</b>	<b>1,09</b>	<b>7,03</b>	<b>4,13</b>
Lechag	-	-	0,04	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84	0,35
<b>Lepinc</b>	<b>17,6</b>	<b>2,14</b>	<b>6,11</b>	<b>3,73</b>	-	-	-	-	<b>2,00</b>	<b>1,16</b>	<b>3,37</b>	<b>0,79</b>	-	-
Metfur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,28	1,70	-	-
Ortaff	-	-	0,51	0,58	0,08	0,12	0,30	0,29	<b>1,41</b>	<b>2,81</b>	<b>0,72</b>	<b>1,90</b>	-	-
Ortdia	-	-	0,28	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Paramb	<b>0,03</b>	-	-	-	-	-	2,14	1,48	-	-	-	-	0,21	0,21
Pargla	4,37	4,53	0,78	0,88	0,08	0,44	1,47	0,23	-	0,32	-	-	3,65	4,04
Parsax	-	-	-	-	1,71	2,41	1,68	1,85	-	-	-	-	1,54	1,60
<b>Parsul</b>	<b>56,9</b>	<b>58,1</b>	<b>29,9</b>	<b>31,4</b>	<b>34,5</b>	<b>37,7</b>	<b>26,1</b>	<b>34,2</b>	<b>52,3</b>	<b>57,5</b>	<b>31,6</b>	<b>35,5</b>	<b>40,8</b>	<b>52,5</b>
Phyten	-	<b>0,09</b>	24,5	16,1	2,73	2,57	0,17	0,32	6,37	7,85	0,79	0,85	0,15	0,15
Plagla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	0,24
Psefur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,20	0,29
Ulocri	0,54	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Xancan	-	-	0,96	0,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Gesamtbedeckung</b>	<b>86,0</b>	<b>73,1</b>	<b>73,7</b>	<b>56,8</b>	<b>51,5</b>	<b>46,7</b>	<b>50,2</b>	<b>47,2</b>	<b>67,6</b>	<b>77,9</b>	<b>55,5</b>	<b>65,0</b>	<b>57,3</b>	<b>66,2</b>

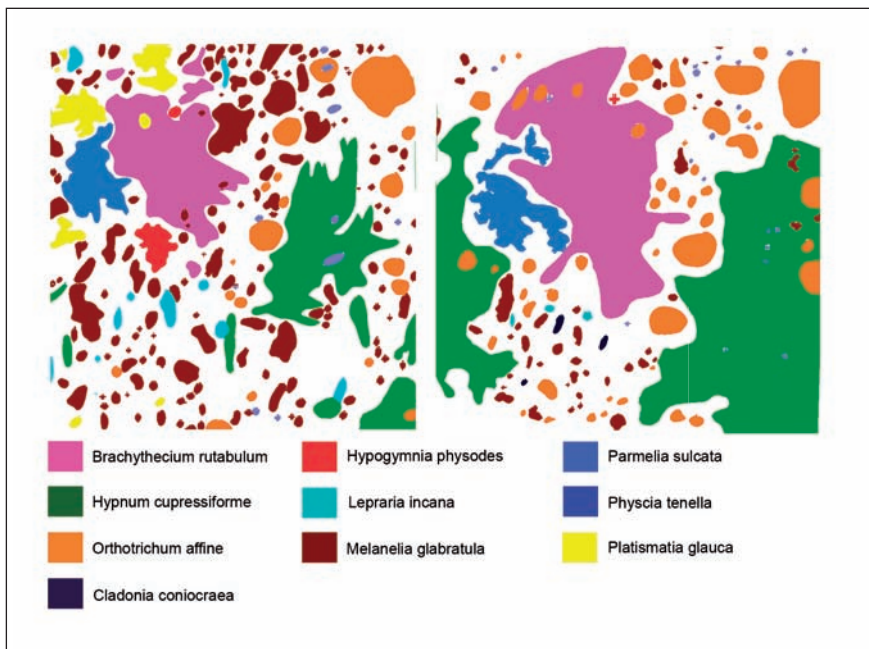


**Abb. 1:** **a** – Nekrosen bei *Metzgeria furcata*, Station Kelberg, 5,5 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante. **b** – *Hypnum cupressiforme* überwächst *Metzgeria furcata*, Station Hohe Acht,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante. **c** – Nekrosen bei *Ulota crispa*, Station Hohe Acht, 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante. **d** – Nekrosen bei *Radula complanata*, Station Hohe Acht, 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante. **e** – Nekrosen bei *Brachythecium rutabulum*, Station Hohe Acht, 11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante. **f** – Nekrosen bei *Radula complanata*, Station Retterath, 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante.

*Orthotrichum affine* sichtbar ausgebreitet, wohingegen die anderen N-Verbindungen keine Auswirkungen auf das Wachstum von *O. affine* zeigten. Die Blatflechte *Parmelia sulcata*, als einzige Art in allen DBF vertreten, verzeichnet überall einen Flächenzuwachs, am stärksten in den Kontrollflächen. Bei *Metzgeria furcata* wurden in der 5,5 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante nach etwa 12 Monaten Schädigungen (Braunverfärbungen) festgestellt, die sich zum Ende des Versuchs verstärkten (Abb.1a).



**Abb. 2:** Veränderungen der mittleren Frequenzen ( $n=2$ ) von *Hypnum cupressiforme* in den DBF der Station Hohe Acht über 21 Monate Beobachtungsdauer.



**Abb. 3:** Veränderungen der Bedeckungsgrade der mit 11 mM NH<sub>4</sub>Cl behandelten DBF an der Station Hohe Acht von Dez. 2001 (links) bis Sept. 2003 (rechts).

### Hohe Acht (Landkreis Ahrweiler)

Während die Gesamtbedeckung in der  $\text{KNO}_3$ -Variante abnahm, stieg sie in den übrigen Düngungsflächen leicht an. Bedeutsame Zunahmen sind in den gedüngten DBF für *Hypnum cupressiforme* zu verzeichnen, wobei die höchsten Zuwachsraten die 5,5 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante aufweist (Tab. 4). Die kontinuierliche Zunahme von *H. cupressiforme* auf den Düngungsflächen ist in Abb. 2 anhand der Frequenzen dargestellt, die im Abstand von sieben Monaten ermittelt wurden. Im Gegensatz hierzu haben die Bedeckungsgrade von *Hypogymnia physodes* auf sämtlichen Düngungsflächen deutlich abgenommen, jedoch nicht in den Kontrollflächen. Die starke Abnahme von *Melanelia glabratula* in der 11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante ist in erster Linie durch die starke Ausbreitung der pleurokarpen Moosarten *Hypnum cupressiforme* und *Brachythecium rutabulum* zu erklären (Abb. 3). Ebenso sichtbar ausgebreitet hat sich auf dieser Fläche *Orthotrichum affine*. Die Konkurrenzstärke von *H. cupressiforme* zeigt sich auch in der 5,5 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante, in der *Melanelia glabratula* und *Metzgeria furcata* überwachsen wird (Abb. 1b). Weiterhin wurde in den mit  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Lösungen behandelten Flächen eine deutliche Abnahme von *Lepraria incana* s.l. festgestellt.

Vereinzelte Exemplare von *Ulota crispa* haben sich bereits wenige Monate nach der  $\text{KNO}_3$ -Düngung deutlich braun verfärbt (Abb. 1c). Ebenso zeigten *Radula complanata* (22 mM  $\text{KNO}_3$ ) im Verlauf des Experiments Erscheinungen des Absterbens (Abb. 1d). Als weitere Lebermoosart ist auf dieser DBF *Frullania dilatata* vorhanden, die trotz geringfügiger Abnahme keine Schädigungen aufweist. Nach anfänglich verstärktem Wachstum von *Brachythecium rutabulum* in der 11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante wurden gegen Ende des Experiments starke Schädigungen festgestellt (Abb. 1 e). Solche Erscheinungen des Absterbens bei *B. rutabulum* wurden in den  $\text{KNO}_3$ -gedüngten DBF nicht beobachtet.

Sowohl in der 11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante als auch in der 5,5 mM  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Variante siedelte sich nach etwa 14 Monaten die Flechte *Cladonia coniocraea* neu an. Die acidophytischen Arten *Platismatia glauca* (22 mM  $\text{KNO}_3$ ) und *Pseudevernia furfuracea* (11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) hingegen verschwanden gegen Ende des Experiments völlig.

### Retterath (Landkreis Daun)

Mit Ausnahme der 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante erfolgte auf allen Düngungsflächen eine Zunahme der Gesamtbedeckung (Tab. 5). Auf den Kontrollflächen blieb die Gesamtbedeckung weitestgehend unverändert. Insgesamt betrachtet haben auf den untersuchten DBF der Station Retterath keine bemerkenswerten großen Ab- oder Zunahmen stattgefunden. Zu den Arten, deren Bedeckungsgrade im Verlauf des Experiments angestiegen sind, zählen *Hypnum cupressiforme*, *Physcia tenella* und *Parmelia sulcata*. Als Neuansiedlung trat *Physcia tenella* sowohl in der 22 mM  $\text{KNO}_3$ - als auch in der  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante auf. Ebenfalls neu erschienen ist *Ramalina farinacea* in der 11 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante. Geringfügige Abnahmen in der Bedeckung war bei *Hypogymnia physodes* (Ausnahme: 11 mM  $\text{KNO}_3$ ) zu beobachten. *Evernia prunastri*, die v. a. in der 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante sichtbar zurückgegangen ist, verschwand in der 22 mM  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Variante völlig. Die Entwicklung von *Parmelia sulcata* ist mit leichten Zuwachsraten innerhalb der 21 Monate auf allen Flächen vergleichbar.

Bereits nach wenigen Monaten war an *Radula complanata* in der 22 mM  $\text{KNO}_3$ -Variante starke Schädigungen (Braunverfärbungen) zu beobachten, die zu einem Rückgang der Art innerhalb der DBF führten (Abb. 1 f).



**Tab. 4:** Veränderungen der mittleren Bedeckung (in %) in den Kontroll- und Düngungsflächen an der Station **Hohe Acht** (*Acer platanoides*) zwischen Dezember 2001 und September 2003; Daten stellen Mittelwerte aus jeweils zwei DBF dar; im Text erwähnte auffällige Veränderungen sind fett gedruckt.

Art	KNO <sub>3</sub>				NH <sub>4</sub> Cl				NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				Kontrolle	
	11 mM		22 mM		11 mM		22 mM		5,5 mM		11 mM		2001	2003
	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003		
Brarut	0,44	0,97	-	1,48	<b>9,07</b>	<b>16,7</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
Bravel	-	-	-	-	-	-	-	-	0,29	0,21	-	-	-	-
Clacon	-	-	0,30	0,07	-	<b>0,16</b>	-	-	0,09	0,22	-	<b>0,24</b>	-	-
Diccir	3,15	3,25	1,80	1,24	-	-	-	-	0,06	0,06	0,68	0,09	0,29	0,27
Evepru	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,54	1,13
Frudil	-	-	0,12	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Hypcup</b>	<b>0,18</b>	<b>1,23</b>	<b>2,85</b>	<b>8,95</b>	<b>5,83</b>	<b>15,2</b>	<b>1,62</b>	<b>2,28</b>	<b>2,00</b>	<b>3,88</b>	<b>13,7</b>	<b>36,3</b>	<b>19,4</b>	<b>20,8</b>
<b>Hypphy</b>	<b>20,9</b>	<b>7,33</b>	<b>10,1</b>	<b>1,21</b>	<b>2,15</b>	<b>0,03</b>	<b>1,21</b>	-	<b>16,3</b>	<b>2,44</b>	<b>2,18</b>	<b>0,14</b>	<b>10,5</b>	<b>9,12</b>
Lechag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-
<b>Lepinc</b>	<b>2,12</b>	<b>1,34</b>	<b>1,56</b>	<b>0,46</b>	<b>1,31</b>	<b>0,31</b>	-	-	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>	<b>7,64</b>	<b>1,12</b>	<b>2,17</b>	<b>1,05</b>
Metfur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,71	0,25	-	-
Ortaff	0,24	0,34	1,51	2,32	<b>2,68</b>	<b>4,96</b>	0,23	0,36	1,15	1,49	0,09	0,65	0,10	0,18
Parchi	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,43	-	-	-	-
Pargla	10,9	14,0	5,55	10,7	<b>7,49</b>	<b>1,46</b>	16,6	18,9	11,5	16,7	15,2	10,6	9,29	9,57
Parlac	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,97	-	-	-
Parsax	-	-	-	-	-	-	-	-	6,34	15,7	1,90	3,77	-	-
Parsul	4,81	6,48	5,97	7,04	32,1	31,9	23,2	24,9	7,41	6,39	2,92	2,57	5,49	6,31
Phyten	0,04	0,12	3,02	4,04	0,29	0,20	0,71	0,63	0,04	0,13	1,41	3,09	-	-
Plagla	-	-	0,28	0,30	<b>2,78</b>	-	-	-	-	-	-	-	2,80	0,25
Psefur	-	-	<b>1,13</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Radcom	-	-	0,56	1,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ulocri	-	-	0,39	0,21	-	-	-	-	-	-	<b>1,96</b>	<b>0,60</b>	-	-
<b>Gesamt- bedeckung</b>	<b>42,7</b>	<b>35,1</b>	<b>35,1</b>	<b>39,3</b>	<b>63,7</b>	<b>70,8</b>	<b>43,6</b>	<b>47,1</b>	<b>45,7</b>	<b>47,7</b>	<b>49,3</b>	<b>59,4</b>	<b>50,5</b>	<b>48,7</b>

### Zusammenfassende Betrachtung

Bei sämtlichen Flechtenarten wurden visuell keine Schädigungen als Folge der Düngung festgestellt. Unter den Moosen zeigten folgende Arten Nekrosen:

- *Metzgeria furcata* durch 5,5 mM NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (Station Kelberg und Hohe Acht)
- *Ulota crispa* durch 22 mM KNO<sub>3</sub> (Station Hohe Acht)
- *Brachythecium rutabulum* durch 11 mM NH<sub>4</sub>Cl (Station Hohe Acht)
- *Radula complanata* durch 22 mM KNO<sub>3</sub> (Station Hohe Acht und Retterath)

Da weder *M. furcata* noch *R. complanata* in weiteren DBF vorhanden sind, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob auch die anderen Düngungsvarianten schädigende Wirkungen

**Tab. 5:** Veränderungen der mittleren Bedeckung (in %) in den Kontroll- und Düngungsflächen an der Station **Retterath** (*Populus × canadensis*) zwischen Dezember 2001 und März 2003; Daten stellen Mittelwerte aus jeweils zwei DBF dar; im Text erwähnte auffällige Veränderungen sind fett gedruckt.

Art	KNO <sub>3</sub>				NH <sub>4</sub> Cl				NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>				Kontrolle		
	11 mM		22 mM		11 mM		22 mM		5,5 mM		11 mM				
	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	2001	2003	
Amapun	0,23	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67	0,43
Canxan	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,27
Clacon	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,09	-	-	-	0,42	0,52
Diccir	-	-	-	-	1,64	3,31	0,22	0,51	-	-	-	-	-	-	-
Evepru	-	-	<b>4,95</b>	<b>2,17</b>	-	-	<b>0,21</b>	-	6,43	9,44	4,02	3,70	1,18	0,49	
<b>Hypcup</b>	<b>1,99</b>	<b>3,85</b>	<b>0,27</b>	<b>0,42</b>	<b>0,63</b>	<b>0,96</b>	<b>0,91</b>	<b>1,59</b>	<b>1,40</b>	<b>1,58</b>	-	-	-	-	
<b>Hypphy</b>	<b>4,50</b>	<b>5,17</b>	<b>2,46</b>	<b>0,75</b>	<b>1,68</b>	<b>0,16</b>	<b>3,05</b>	<b>0,78</b>	<b>0,21</b>	<b>0,11</b>	-	-	-	-	
Lechag	1,36	1,53	-	-	-	-	-	-	0,64	0,70	-	-	-	-	
Lepinc	7,85	7,77	2,59	0,09	-	-	0,84	0,49	-	-	-	-	-	0,30	0,25
Ortaff	4,22	8,65	-	-	0,34	0,09	0,06	0,03	-	-	-	-	-	1,73	1,39
Ortdia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,21
Parace	-	-	4,61	6,41	-	-	-	-	0,82	1,25	16,9	19,1	-	-	
Pargla	0,97	0,92	0,16	0,10	0,86	1,11	0,49	0,25	1,45	1,20	0,12	0,56	-	-	
Parsax	-	-	4,32	4,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Parsul</b>	<b>8,16</b>	<b>9,39</b>	<b>26,5</b>	<b>27,9</b>	<b>31,3</b>	<b>31,2</b>	<b>33,2</b>	<b>37,0</b>	<b>43,8</b>	<b>44,2</b>	<b>25,2</b>	<b>27,8</b>	<b>3,85</b>	<b>3,97</b>	
Partil	2,60	4,06	0,81	1,19	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70	1,41	
Phygri	0,06	0,20	1,93	1,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Phyten</b>	<b>1,10</b>	<b>2,56</b>	-	<b>0,08</b>	-	-	-	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,07</b>	-	-	
Psefur	-	-	0,70	0,32	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	
Radcom	-	-	<b>7,32</b>	<b>3,62</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ramfar	4,72	5,45	3,91	5,16	3,18	4,80	2,24	2,65	-	0,03	0,54	0,47	0,05	0,12	
<b>Gesamtdeckung</b>	<b>37,8</b>	<b>49,7</b>	<b>60,5</b>	<b>54,9</b>	<b>39,7</b>	<b>41,6</b>	<b>42,6</b>	<b>43,5</b>	<b>54,9</b>	<b>58,7</b>	<b>46,7</b>	<b>51,7</b>	<b>9,26</b>	<b>9,06</b>	

auf diese Lebermoosarten hätten. *Ulota crispa* hingegen, deren Blättchen sich bereits nach wenigen Monaten in der 22 mM KNO<sub>3</sub>-Variante an der Station Hohe Acht braun verfärbten, zeigte in der 11 mM KNO<sub>3</sub>-Variante an der Station Kelberg keine Nekrosen. Bei *B. rutabulum* waren Erscheinungen des Absterbens nur in der 11 mM NH<sub>4</sub>Cl-Variante zu beobachten jedoch nicht in den KNO<sub>3</sub>-gedüngten Flächen (Station Hohe Acht). Dies deutet darauf hin, dass zumindest bei diesen beiden Moosarten sowohl die Darbietungsform des Stickstoffs als auch die Konzentration für die Schädigungen von Bedeutung sind.

Tab. 6 gibt einen Überblick wie sich die Bedeckungsgrade häufiger Arten im Verlauf des Experiments verändert haben. Die Moosarten *Hypnum cupressiforme* und *Orthotrichum affine* verzeichnen in den Düngungsflächen z. T. deutliche Zunahmen. Bei den Flechtenarten *Hypogymnia physodes* und *Lepraria incana* s.l. wurde überwiegend eine Abnahme der

**Tab. 6:** Veränderungen der Bedeckungsgrade ausgewählter Moos- und Flechtenarten während des Untersuchungszeitraums von 21 Monaten in den gedüngten DBF (N) und den Kontrollflächen (K). +: Zunahme; =: kaum Veränderungen; -: Abnahme; o: Art nicht vorhanden.

Art	Kelberg		Hohe Acht		Retterath	
	N	K	N	K	N	K
<i>Hypnum cupressiforme</i>	+	o	+	=	+	o
<i>Orthotrichum affine</i>	+	o	+	=	=/+	=
<i>Hypogymnia physodes</i>	-	o	-	-	-	o
<i>Lepraria incana</i> s.l.	-	o	-	-	=/-	=
<i>Parmelia sulcata</i>	+	+	=/+	+	=	=
<i>Physcia tenella</i>	=	=	=	o	+	o

Bedeckungsgrade festgestellt. Die Entwicklung der Bedeckungsgrade von *Parmelia sulcata*, die in sämtlichen DBF vorhanden war, ist in den Düngungsflächen oft ähnlich verlaufen wie in den Kontrollflächen. Eine Ausbreitung von *Physcia tenella* in den gedüngten DBF konnte nur an der Station Retterath festgestellt werden.

## Diskussion

Die starke Ausbreitung von *Hypnum cupressiforme* auf den Düngungsflächen deutet auf eine Förderung der Art durch erhöhten N-Eintrag hin. Ähnliche Beobachtungen machte auch SOLGA (2003) in Düngungsexperimenten an nährstoffarmen Standorten. Auf die hohe Ausbreitungsfähigkeit von *Hypnum cupressiforme* in Abhängigkeit der Verfügbarkeit an Nährstoffen weisen bereits GRUBB et al. (1969) hin. Pionierpflanzen wie *Ulotia crispa* werden so von später eindringenden und sich schnell ausbreitenden Arten wie *H. cupressiforme* verdrängt. Die Autoren konnten außerdem in *H. cupressiforme* signifikant höhere N-Konzentrationen feststellen als in *Ulotia crispa*. Auf die Fähigkeit von *H. cupressiforme*, konkurrenzschwächere Moose durch Überwachsen zu verdrängen, weist auch DÜLL (1997) hin. Die Zunahmen der Bedeckungsgrade von *Orthotrichum affine* auf den Düngungsflächen lassen ebenfalls vermuten, dass *O. affine* einen erhöhten N-Eintrag nicht nur toleriert, sondern darauf mit verstärktem Wachstum reagiert. Untersuchungen zur epiphytischen Moosflora in Duisburg zeigten eine bemerkenswerte Zunahme von *O. affine* innerhalb nur eines Jahres, wobei als Ursache sowohl der Rückgang der SO<sub>2</sub>-Immissionen als auch die zunehmende Eutrophierung angenommen wird (FRANZEN 2001). DIERSSEN (2001) stuft diese Art allerdings als indifferent gegenüber Eutrophierung ein.

Während somit einige Moosarten mit einem Anstieg in der Bedeckung reagierten oder zumindest den erhöhten N-Eintrag tolerierten, führte die Düngung bei einigen Moosen zu Schädigungen. Diese waren besonders bei gegenüber Luftverschmutzung empfindlich eingestuften Moosarten (FRAHM 1998), wie *Metzgeria furcata*, *Radula complanata* und *Ulotia crispa*, zu beobachten.

Das Absterben von *Brachythecium rutabulum* in der 11 mM NH<sub>4</sub>Cl-Variante am Standort Hohe Acht erstaunt, da diese Art normalerweise für nährstoffreiche Standorte charakteristisch ist (NEBEL et al. 2001) und selbst in der Umgebung von Massentierhaltungsbetrieben vor-

kommt (PITCAIRN et al. 2002). Untersuchungen von RINCON (1990) zeigen, dass *B. rutabulum* bei erhöhtem Nährstoffangebot mit deutlichen Wachstumszunahmen reagiert. Als mögliche Ursachen für die beobachteten Schädigungen als Folge der Düngung können auch pH-Wert-Veränderungen (CARROLL et al. 2000) oder direkte negative Wirkungen des Chlorid-Ions („salt effect“) in Betracht gezogen werden (KAUPPI 1980, BROWN & TOMLINSON 1993).

Im Gegensatz zu den Moosen konnten bei den Flechten keinerlei Schädigungen festgestellt werden. Bisherige experimentelle Düngungsversuche lieferten je nach untersuchter Art und Nährstoffkonzentration unterschiedlichste Ergebnisse (z. B. BROWN 1992, CRITTENDEN et al. 1994). Experimente an *Parmelia sulcata* von BROWN et al. (1995) führten erst bei stark erhöhten Konzentrationen von 1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$  zu Schädigungen (Rotfärbung).

Ob für den deutlichen Rückgang der acidophytischen Flechtenart *Hypogymnia physodes* innerhalb sämtlicher DBF die Nitrat- und Ammoniumdüngung verantwortlich ist, bleibt fraglich. Zwar zeigen mittlerweile zahlreiche Studien eine drastische Abnahme von *H. physodes* in landwirtschaftlich geprägten Regionen (z. B. DE BAKKER 1989, VAN DOBBEN & TER BRAAK 1996, VAN HERK 1999, ZIMMER 2000), in der vorliegenden Untersuchung konnten jedoch visuell keine Schädigungen infolge der Düngung festgestellt werden. Die Ursache für den Rückgang von *H. physodes* kann auch im Herabfallen einzelner Thalli, ausgelöst durch Windschur, Schneehaftung oder starkes Quellen, liegen (WIRTH et al. 1999). Zur Einschätzung von *H. physodes* gegenüber erhöhten N-Einträgen bedarf es weiterer experimenteller Untersuchungen, die die Auswirkungen verschiedenster Stickstoffverbindungen auf physiologische Stoffwechselprozesse erfassen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass auch der Borken-pH hierbei eine Rolle spielt (VAN HERK 1999).

Während *H. physodes* aufgrund ihrer Wuchsform relativ leicht vom Substrat herabfallen kann, trifft dies für die Krustenflechte *Lepraria incana* s.l. wohl nicht zu. Laut WIRTH et al. (1999) weisen epiphytische Krustenflechtenbestände eine sehr geringe Dynamik auf. Daher ist der deutliche Rückgang von *L. incana* s.l. in den Düngungsflächen wohl auf die applizierten N-Verbindungen zurückzuführen. *L. incana* s.l. gilt allgemein als Besiedler nährstoffarmer Habitats (WIRTH 1995).

Die als nitrophytisch eingestufte Art *Physcia tenella* (VAN HERK 1999) zeigte keine wesentlichen Veränderungen in der Bedeckung als Folge der Düngung. Einzige Ausnahme bilden hier die  $\text{KNO}_3$ - und  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -gedüngten Pappeln der Station Retterath, an denen Neuansiedlungen bzw. Zunahmen der Bedeckungsgrade zu beobachten waren.

Nach DEGELIUS (1964) handelt es sich bei *P. tenella* um eine Pionierflechte, die im Vergleich zu anderen Species früh Sorale bildet (BESCHEL 1958) und sich somit rasch ausbreiten kann. Somit ist möglicherweise, neben der hohen Toleranz gegenüber Luftschadstoffen, die schnelle Ausbreitungsfähigkeit für die weite Verbreitung und Zunahme von *P. tenella* in den letzten Jahren ausschlaggebend und weniger die Verfügbarkeit an Nährstoffen. Eine Abnahme der Abundanz von *P. tenella* an stark eutrophierten Standorten, bedingt durch hohe Verkehrsbelastung (VORBECK & WINDISCH 2002, FRANZEN-REUTER & STAPPER 2003, STAPPER & KRICKE 2004) sowie die geringen Zuwachsraten der vorliegenden Untersuchung, unterstützen die Hypothese, dass ein besonders hohes Angebot an Nährstoffen bei dieser Art nicht unbedingt wachstumsfördernd wirkt.

Insgesamt betrachtet lassen die Ergebnisse keine Rückschlüsse zu, ob eher die  $\text{NH}_4^+$ - oder die  $\text{NO}_3^-$ -haltigen Düngelösungen größere Auswirkungen auf das Wachstum oder die Vitalität der untersuchten Arten hatte. Bei den N-Verbindungen, die zu nekrotischen Erscheinungen führ-

ten, handelte es sich allerdings jeweils immer um die höher konzentrierte Variante, die eine N-Deposition von  $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  simulierte. Inwiefern die unterschiedlichen Borkensubstrate eine zusätzliche Rolle spielten konnte nicht geklärt werden.

Für den Rückgang der Acidophyten bzw. die Zunahme der Nitrophyten in den letzten Jahren scheint den Ergebnissen zur Folge nicht nur der N-Eintrag in Form von Ammonium und Nitrat entscheidend zu sein, sondern es sind auch weitere Umwelteinflüsse von Bedeutung.

## Schlussfolgerung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Reaktion auf eine simulierte Erhöhung der Stickstoffdeposition artspezifisch ist. Wachstumsförderung, Bedeckungsrückgang sowie Nekrosen kommen je nach Art als mögliche Folgen der Düngung in Betracht. Da überwiegend nur Tendenzen aufgezeigt werden konnten, werden für zukünftige Düngungsexperimente längere Zeitspannen als notwendig erachtet. Es wird vermutet, dass neben Ammonium und Nitrat auch gasförmige N-Verbindungen für Veränderungen von Epiphytenbeständen verantwortlich sind. Begasungsversuche mit  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  würden Aufschluss über eventuelle Wachstumsförderung oder Schädigung auf epiphytische Moose und Flechten geben.

## Dank

Die Untersuchung ist Bestandteil einer Arbeit zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Moose und Flechten, welche durch das Stipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Osnabrück) gefördert wurde.

## Literatur

- ARMSTRONG, R. A. 1984. The influence of bird droppings and uric acid on the radial growth of five species of saxicolous lichens. – *Environmental and Experimental Botany* **24**: 95–99.
- DE BAKKER, A. J. 1989. Effects of ammonia emission on epiphytic lichen vegetation. – *Acta Botanica Neerlandica* **38**: 337–342.
- BAXTER, R., EMES, M. J. & LEE, J. 1992. Effects of an experimentally applied increase in ammonium on growth and amino-acid metabolism of *Sphagnum cuspidatum* Ehrh. ex. Hoffm. from differently polluted areas. – *New Phytologist* **120**: 265–274.
- BERG, M. P. & VERHOEF, H. A. 1998. Ecological characteristics of a nitrogen-saturated coniferous forest in The Netherlands. – *Biology and Fertility of Soils* **26**: 258–267.
- BESCHEL, R. 1958. Flechtenvereine der Städte, Stadtflechten und ihr Wachstum. – *Berichte des Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereins Innsbruck* **52**: 1–158.
- BROWN, D. H. 1992. Impact of agriculture on bryophytes and lichens. – In: BATES, J. W. & FARMER, A. M. (eds.). *Bryophytes and lichens in a changing environment*, p. 259–283. – Oxford: Clarendon Press.
- BROWN, D. H. & TOMLINSON, H. 1993. Effects of nitrogen salts on lichen physiology. – *Bibliotheca Lichenologica* **53**: 27–34.
- BROWN, D. H., STANDELL, C. J. & MILLER, J. E. 1995. Effects of agricultural chemicals on lichens. – *Cryptogamic Botany* **5**: 220–223.
- CARROLL, J. A., JOHNSON, D., MORECROFT, M., TAYLOR, S. J. M., CAPORN, S. J. M. & LEE, J. A. 2000. The effect of long-term nitrogen additions on the bryophyte cover of upland acidic grasslands. – *Journal of Bryology* **22**: 83–90.
- CRITTENDEN, P. D., KALUCKA, I. & OLIVER, E. 1994. Does nitrogen supply limit the growth of lichens? – *Cryptogamic Botany* **4**: 143–155.
- DEGELIUS, G. 1964. Biological studies of the epiphytic vegetation on twigs of *Fraxinus excelsior*. – *Acta Horti Gotoburgensis* **24**: 11–55.
- DIERSSEN, K. 2001. Distribution, ecological amplitude and phytosociological characterization of European bryophytes. – *Bryophytorum Bibliotheca* **56**: 1–289.
- VAN DOBBEN, H. F. 1996. Decline and recovery of epiphytic lichens in an agricultural area in The Netherlands (1900–1988). – *Nova Hedwigia* **62**: 477–485.

- VAN DOBBEN, H. F. & DE BAKKER, A. J. 1996. Re-mapping epiphytic lichen biodiversity in The Netherlands: effects of decreasing SO<sub>2</sub> and increasing NH<sub>3</sub>. – *Acta Botanica Neerlandica* **45**: 55–71.
- VAN DOBBEN, H. F. & TER BRAAK, C. J. F. 1996. Monitoring of epiphytic lichens in The Netherlands (1977-1990). – *IBN Research* **96/7**: 1–60.
- DÜLL, R. 1997. Exkursionstaschenbuch der Moose. – Bad Münstereifel: IDH-Verlag.
- DURING, H. J. & WILLEMS, J. H. 1986. The impoverishment of the bryophyte and lichen flora of the Dutch chalk grasslands in the thirty years 1953-1983. – *Biological Conservation* **36**: 143–158.
- VAN DER EERDEN, L. J. M., DUECK, T. A., BERDOWSKI, J. J. M., GREVEN, H. & VAN DOBBEN, H. F. 1991. Influence of NH<sub>3</sub> and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on heathland vegetation. – *Acta Botanica Neerlandica* **40**: 281–296.
- VAN DER EERDEN, L. J. M., JÄGER, H.-J. & FANGMEIER, A. 2001. Wirkungen von Stickstoffdepositionen auf terrestrische Ökosysteme. – In: GUDERIAN, R. (ed.). *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*, Band 2: 40–62. – Berlin: Springer.
- FANGMEIER, A., HADWIGER-FANGMEIER, A., VAN DER EERDEN, L. & JÄGER, H.-J. 1994. Effects of atmospheric ammonia on vegetation – a review. – *Environmental Pollution* **86**: 43–82.
- FRAHM, J.-P. 1998. Moose als Bioindikatoren. – *Biologische Arbeitsbücher* **57**: 1–187.
- FRANZEN, I. 2001. Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren der Luftgüte am Westrand des Ruhrgebietes. – *Limprichtia* **16**: 1–85.
- FRANZEN-REUTER, I. & STAPPER, N. J. 2003. Nachweis eutrophierender Luftverunreinigungen in NRW – Landesweite Kartierung epiphytischer Flechten und Moose. – *LÖBF-Mitteilungen* **1/03**: 76–78.
- GREVEN, H. 1992. Changes in the Dutch bryophyte flora and air pollution. – Berlin, Stuttgart: J. Cramer.
- GRUBB, P. J., FLINT, O. P. & GREGORY, S. C. 1969. Preliminary observations on the mineral nutrition of epiphytic mosses. – *Transactions of the British Bryological Society* **5**: 802–817.
- HAKULINEN, R. 1966. Über die Wachstumsgeschwindigkeit einiger Laubflechten. – *Annales Botanici Fennici* **3**: 167–179.
- VAN HERK, C. M. 1999. Mapping of ammonia pollution with epiphytic lichens in The Netherlands. – *Lichenologist* **31**: 9–20.
- JAUHIAINEN, J., VASANDER, H. & SILVOLA, J. 1994. Response of *Sphagnum fuscum* to N deposition and increased CO<sub>2</sub>. – *Journal of Bryology* **18**: 83–95.
- KAUPPI, M. 1980. The influence of nitrogen-rich pollution components on lichens. – *Acta Universitatis Ouluensis, Ser. A*, **101**: 1–25.
- KIRSCHBAUM, U., SIEGMUND, M. & WIRTH, V. 2002. Flächenbestimmung von Flechten zur ökologischen Langzeitbeobachtung. – *Herzogia* **15**: 159–178.
- KOOIJMAN, A. M. & KANNE, D. M. 1993. Effects on water chemistry, nutrient supply and interspecific interactions on the replacement of *Sphagnum subnitens* by *S. fallax* in fens. – *Journal of Bryology* **17**: 431–438.
- KOPERSKI, M., SAUER, M., BRAUN, W. & GRADSTEIN, S. R. 2000. Referenzliste der Moose Deutschlands. – *Schriftenreihe für Vegetationskunde* **34**: 1–520.
- 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. (eds.). *Bryology for the twenty-first century*, p. 331–341. – Leeds: Maney Publishing and the British Bryological Society.
- NEBEL, M., SAUER, M. & SCHOEPE, G. 2001. Brachytheciaceae, Kurzbüchsenmoose. – In: NEBEL, M. & PHILIPPI, G. (eds.). *Die Moose Baden-Württembergs*, Band 2: 355–428. – Stuttgart: Ulmer.
- NORDIN, A. & GUNNARSSON, U. 2000. Amino acid accumulation and growth of *Sphagnum* under different levels of N deposition. – *Ecoscience* **7**: 474–480.
- PITCAIRN, C. E. R., SKIBA, U. M., SUTTON, M. A., FOWLER, D., MUNRO, R. & KENNEDY, V. H. 2002. Defining the spatial impacts of a poultry farm ammonia emissions on species composition of adjacent woodland groundflora using Ellenberg Nitrogen Index, nitrous oxide and nitric oxide emissions and foliar nitrogen as marker variables. – *Environmental Pollution* **119**: 9–21.
- RINCON, E. 1990. Growth responses of *Brachythecium rutabulum* to different litter arrangements. – *Journal of Bryology* **16**: 120–122.
- RUDOLPH, H. & VOIGT, J. U. 1986. Effects of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N on growth and metabolism of *Sphagnum magellanicum*. – *Physiologia Plantarum* **66**: 339–343.
- SCHOLZ, P. 2000. Katalog der Flechten und flechtenbewohnenden Pilze Deutschlands. – *Schriftenreihe für Vegetationskunde* **31**: 1–298.
- SOLGA, A. 2003. Untersuchungen zur Eignung von Moosen als Bioindikatoren atmosphärischer Stickstoffeinträge. – Dissertation, Universität Bonn.
- STAPPER, N. J., FRANZEN, I., GOHRBANDT, S. & FRAHM, J.-P. 2000. Moose und Flechten kehren ins Ruhrgebiet zurück. – *LÖBF-Mitteilungen* **2/2000**: 12–21.
- STAPPER, N. J. & KRICKE, R. 2004. Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen. – *Limprichtia* **24**: 187–208.

- 
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) 2003. VDI-Richtlinie 3957 Blatt 8: Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur immissionsökologischen Langzeitbeobachtung. – Berlin: Beuth Verlag.
- VORBECK, A. & WINDISCH, U. 2002. Flechtenkartierung München – Eignung von Flechten als Bioindikatoren für verkehrsbedingte Immissionen. – Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) (ed.). Materialien Umwelt und Entwicklung **173**: 1–142.
- WIRTH, V. 1995. Die Flechten Baden-Württembergs. – Stuttgart: Ulmer.
- WIRTH, V., CEZANNE, R. & EICHLER, M. 1999. Beitrag zur Kenntnis der Dynamik epiphytischer Flechtenbestände. – Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie A (Biologie) **595**: 1–17.
- ZIMMER, D. 2000. Dauerbeobachtung der epiphytischen Flechtenvegetation unter immissionsökologischen Aspekten an Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Schleswig-Holstein. – Bibliotheca Lichenologica **75**: 231–251.

Manuskript angenommen: 13. November 2006.

### **Anschrift der Verfasser**

Isabelle Franzen-Reuter & Jan-Peter Frahm, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität, Meckenheimer Allee 170, D-53115 Bonn, Deutschland. E-mails: [franzen-reuter@web.de](mailto:franzen-reuter@web.de), [frahm@uni-bonn.de](mailto:frahm@uni-bonn.de)

