

Ist der Anstieg nitrophiler Flechten an Bäumen auf eine Erhöhung des Borken-pHs zurückzuführen?

JAN-PETER FRAHM, DANIELA THÖNNES, STEPHANIE HENSEL

Zusammenfassung: FRAHM, J.-P., THÖNNES, D., HENSEL, S. 2009. Ist der Anstieg nitrophiler Flechten an Bäumen auf eine Erhöhung des Borken-pHs zurückzuführen? – Archive for Lichenology 01: 1-10

Der Anstieg nitrophiler Flechten an Bäumen in den letzten zehn Jahren wirft die Frage nach den dafür verantwortlichen Ursachen auf. Einer Hypothese zur Folge soll dieser Anstieg auf eine Erhöhung des Borken-pH beruhen, hervorgerufen durch die gesunkenen SO₂-Emissionen, gestiegene Ammoniakemissionen oder auch Verkehrstäube. Um diese Hypothese zu testen, wurden im Rheinland pH-Messungen unterschiedlicher Trägerbaumarten durchgeführt und mit Faktoren wie der Frequenz bzw. Diversität nitrophytischer Flechten oder der Verkehrsdichte korreliert. Dabei zeigte sich, dass der stärkere Verkehr den pH von Eichen mit pufferarmer Borke anhebt. Bei Linden lässt sich ein geringer, bei Ahornen kein Zusammenhang zum Verkehr finden. Ein Zusammenhang zwischen Frequenz oder Diversität von nitrophytischen Flechtenarten mit dem Borken-pH konnte nicht gefunden werden. Deswegen kann ein Anstieg der nitrophytischen Flechten generell nicht auf die Änderung des Borken-pHs zurückgeführt werden. Im Vergleich mit pH-Werten von Borken aus den Fünfziger Jahren ist ein deutlicher Anstieg der Werte zu verzeichnen, der dann aber auf den Rückgang der Säurewirkung von SO₂ und nicht auf die basische Wirkung von eutrophierenden Emissionen zurückzuführen ist. Als mögliche Ursache für den Anstieg nitrophytischer Flechten wird die Salzwirkung von trockenen Stickstoffdepositionen erwogen.

Abstract: FRAHM, J.-P., THÖNNES, D., HENSEL, S. 2009. Depends the increase of nitrophilous lichens on trees on an increase of the bark-pH? – Archive for Lichenology 01: 1-10

The increase of nitrophilous lichens on trees during the past ten years raises the question for the reasons. According to one hypothesis, this increase depends on an increase of the pH of the bark, caused by reduced SO₂ emissions, raised ammonia emissions or dust from traffic. To test this hypothesis, pH measurements of bark from different host trees were performed in the Rhineland (Germany) and correlated with the frequency or diversity of nitrophytic lichens and intensity of traffic. The correlation revealed that traffic raises the pH of oak trees with low buffer capacity of the bark but not that of maple and linden trees. There is no correlation between the frequency or diversity of nitrophytic lichens and a higher pH of the bark. The increase of nitrophytic lichens is thus no result of an increase of the bark pH. Compared with pH measurements of bark from the Fifties, there is a distinct increase of the values. This can be explained by the reduced SO₂ emissions but not by an effect of eutrophic emissions. The salt effect of dry nitrogen depositions is discussed as a potential explanation for the increase of nitrophytic lichens.

Key words: nitrophilous lichens, bark pH, ammonia emissions.

Einleitung

Emissionen von Stickstoffverbindungen sind die gegenwärtig größten Ursachen von Umweltveränderungen. Man geht in Deutschland von Stickstoffdepositionen von 20-30 kg/ha/Jahr aus, und Maximalwerten von 60 kg/ha/Jahr. Das ist weit mehr, als die Düngeverordnung ohne Bedarfsanalyse zulässt (BEISMANN 2006). Der Stickstoffeinfluss betrifft gesamte Ökosysteme, Böden, Blütenpflanzen, in Abhängigkeit davon Tiere, und - aufgrund ihrer besonderen Wasser- und Nährstoffaufnahme – besonders Moose und Flechten.

Seit zehn Jahren haben wir einen starken Anstieg nitrophytischer Flechtenarten an Bäumen zu verzeichnen, sowohl im ländlichen als auch städtischen Raum, der durch Nachkartierungen (KIRSCHBAUM et al. 2006, FRANZEN-REUTER et al. 2006, JANBEN et al. 2007) belegt ist. Dieser Wandel hat als Konsequenz die Neufassung der 1994 erschienen VDI-Richtlinie zur Verwendung von epiphytischen Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung erforderlich gemacht (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2004). Damit stellt sich die Frage nach den Gründen dieser Entwicklung. Zunächst wurden in Städten höhere Staubbelastungen (VORBECK & WINDISCH 2002) dafür verantwortlich gemacht. Hingegen ließen sich in Düsseldorf Zusammenhänge zwischen der Verkehrsbelastung, Ammoniakemissionen und dem Stickstoffgehalt der Flechte *Parmelia sulcata* feststellen (FRAHM 2006).

Bislang war ungeklärt, wie Ammoniak auf nitrophytische Flechten wirkt. Eine Hypothese ist, dass in Regenwasser gelöstes Ammoniak (NH_4OH) eine Steigerung des Borken-pHs bewirkt, nitrophytische Flechten Basiphyten sind, und diese durch einen Anstieg des Borken-pH in den letzten Jahren gefördert werden (VAN HERK 1999). „An increased bark pH appears to be the primary cause of the enormous increase in nitrophytic species“ (VAN HERK 2001). In der Tat haben sich die pH-Werte von Borken in den letzten Jahrzehnten erheblich erhöht. Unter Einfluss des Sauren Regens lagen die pH-Werte von Bäumen (mit von Natur aus basischer Borke) wie *Tilia*, *Acer* und *Fraxinus* im Jahre 1972 im Stadtgebiet von Frankfurt zwischen 2,7 und 4,5 (LÖTSCHERT & KÖHM 1973); heute liegen sie im allgemeinen 2-3 Werte höher. Schließlich besteht noch die Möglichkeit, dass Emissionen aus dem Verkehr den Borken-pH erhöhen und dadurch zum Anstieg des Anteils von nitrophytischen Flechten führt.

Methoden

Um zu überprüfen, ob Artenzahl und Bedeckung nitrophytischer Flechtenarten mit einem hohen pH-Wert der Borke zusammenhängt, wurden im Sommer 2006 im Rheinland pH-Messungen an Bäumen unterschiedlicher Trägerarten durchgeführt und mit der Verkehrsdichte des Standortes korreliert. Zur Messung der pH-Werte der Borke wurde ein pH-Meter mit Flachkopfelektrode verwendet. Am Baum wurde eine Stelle mit möglichst glatter Borke ausgewählt. Dort wurde die Borke mit einer Sprühflasche mit destilliertem Wasser befeuchtet und die Elektrode aufgesetzt, sodass die Flachkopfelektrode mit ihrer gesamten Fläche auf der Borke aufsaß und ein Flüssigkeitsfilm zwischen Borke und Elektrode vorhanden war. Insgesamt wurden 108 Messungen durchgeführt, an *Quercus robur* ($n = 50$), *Acer* spp. (*A. platanoides* und *pseudoplatanus*, $n = 34$), *Tilia* spp. ($n = 21$) und *Fraxinus excelsior* ($n=3$).

Die Verkehrsdichte (V) wurde nach einer dreistufigen Skala geschätzt (1 = kein Verkehr z.B. in Parks oder Wäldern, 2 = geringe Verkehrsdichte z.B. in städtischen Wohnlagen, 3 = hohes Verkehrsaufkommen z.B. an Hauptverkehrsstraßen in Städten).

Die pH-Messungen an Eichen fanden an folgenden Orten statt: Kurpark Hennef (V = 1), Großenbuschstraße in Hangelar (V = 2), Hermann-Wandersleb Ring in Bonn-Endenich (V =3). Die Bestimmung der pH-Werte der anderen Trägerbäume sowie des Anteils nitrophytischer Arten an der Flechtenvegetation eines Baumes erfolgte nach der VDI-Richtlinie 3957, Blatt 13 (VDI 2004) in verschiedenen Stadtteilen von Düsseldorf, Bonn und Bendorf. Als Trägerbäume wurden *Acer spec.* und *Tilia spec.* ausgewählt, in Einzelfällen *Fraxinus spec.* Da besonders für V = 1 nur

sehr wenige im Rahmen der Kartierung gewonnene Daten vorlagen, wurden diese durch zusätzliche Werte von acht *Acer spec.* und fünf *Tilia spec.* aus dem Naturschutzgebiet Siebengebirge ergänzt.

Ergebnisse

Zusammenhang von Verkehrsdichte und Borken-pH

Die pH-Werte von Eichenborken lagen zwischen 3,2 und 6,7. Sie ergaben einen Zusammenhang mit der Verkehrsdichte ($r = 0,77626$) dergestalt, dass steigender Verkehr einen höheren pH-Wert ergab (Abb. 1). Während der Borken pH in einem Park zwischen 3,2 und 5,1 lag, lag dieser an einer Hauptverkehrsstraße zwischen 5,3 und 6,7.

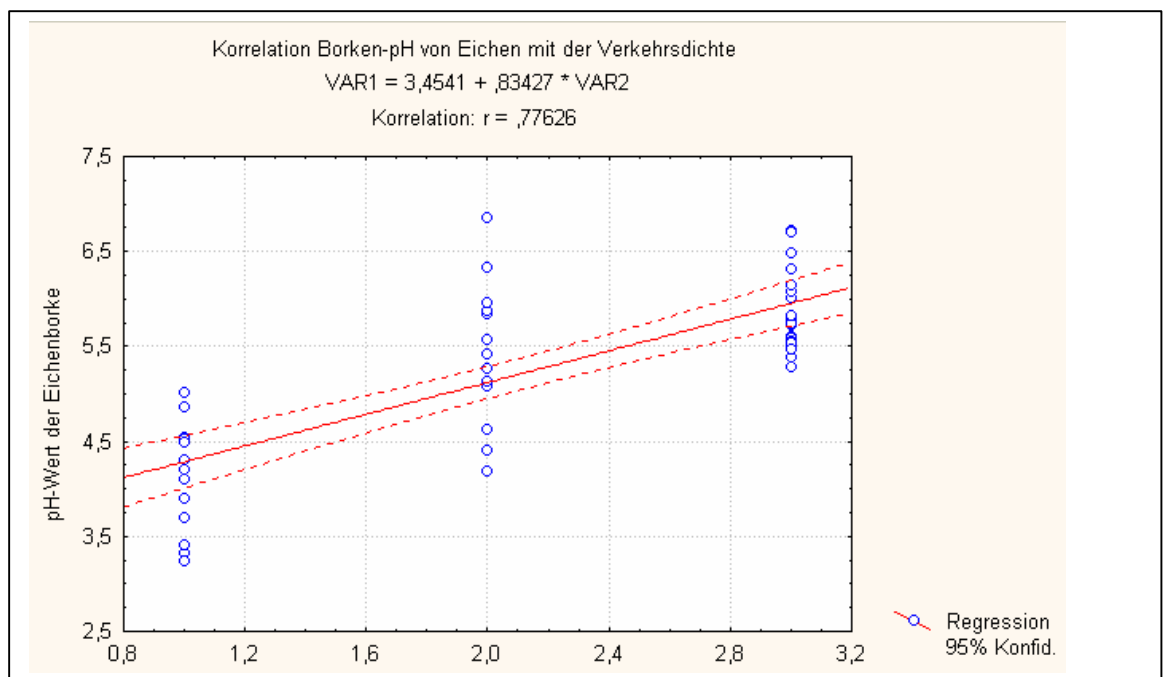


Abb. 1: Korrelation des Borken-pH von Eichen mit der Verkehrsdichte.

Die Borke von Eichen, die in einem Park mit Feldweg und Verkehrsdichte 1 standen, hat einen pH-Wert von durchschnittlich 4,16. Diese Eichen waren z.T. ohne Epiphytenbewuchs oder nur mit Krustenflechten bewachsen. Auf 4 Eichen wuchsen coccale Grünalgen, auf 3 Eichen Moos, auf einer Eiche *Cladonia*.

Bei Eichen an Asphaltstraßen mit Verkehrsdichte 2 wurde ein deutlich höherer pH-Wert von durchschnittlich 5,41 festgestellt. Diese Eichen wiesen die höchste Epiphytendiversität auf. *Physcia adscendens* und *P. tenella* fanden sich auf je drei Bäumen, fünf Eichen waren mit verschiedenen *Parmelia*-Arten wie *Parmelia subrudecta*, *P. exasperatula* oder *P. saxatilis* besiedelt. Auf zwei Bäumen mit den pH-Werten 5,85 und 5,88 fanden sich *Evernia prunastri*, *Candelariella xanthostigma*, *Buellia punctata* sowie eine unbestimmte Krustenflechte. Coccale Grünalgen waren häufig.

Für Eichen an einer Hauptstraße mit Verkehrsdichte 3 wurde ein durchschnittlicher pH-Wert von 5,86 gemessen. Auf diesen Bäumen stellten sich dann ein größerer Anteil von Nitrophyten ein. 10 von 21 Bäumen waren nicht oder nur spärlich mit Flechten bewachsen, auf den übrigen Bäumen fand sich immer *Phaeophyscia orbicularis*. Zusätzlich wurde auf 6 Bäumen *Physcia tenella* gefunden, die dort z.T. dominierte. An 4 Bäumen wuchs *Physcia adscendens*, seltener waren *Xanthoria parietina* (Pferdehaltung an der Straße), *Phaeophyscia nigricans*, *Parmelia sulcata* und *P. exasperatula*. *Physconia grisea* war ein Einzelfund.

Der Borken-pH von *Tilia spec.* bewegte sich zwischen 4,5 und 7 bei einer geringen Verkehrsdichte und 5,0 – 8,3 bei mittlerer Verkehrsdichte, zeigt also tendenziell einen geringen Anstieg (Abb. 2), der jedoch statistisch nicht signifikant ist ($r = 0,34810$).

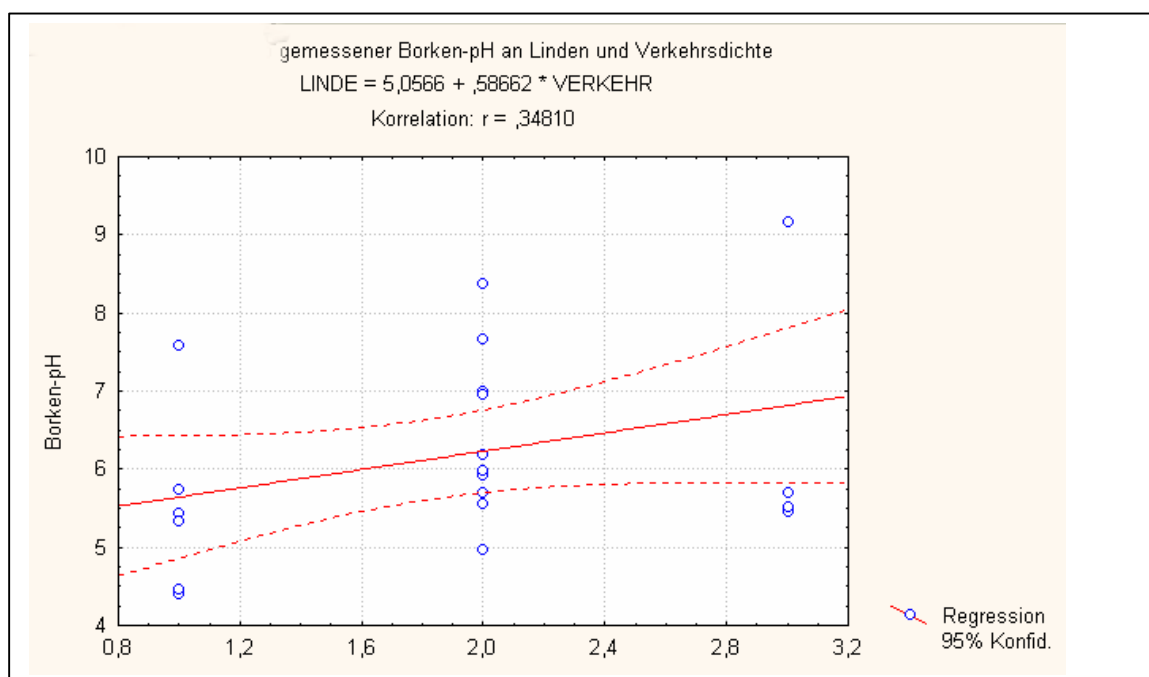


Abb. 2: Korrelation Borken-pH von Linden mit der Verkehrsdichte

Bei der Korrelation des Borken-pHs von *Acer spec.* mit der Verkehrsdichte ergibt sich selbst unter Ausschluss eines Ausreißers keinen Zusammenhang ($r = 0,17959$).

Verwendet man alle gemessenen pH-Werte, unabhängig von der Baumart, in der Korrelationsanalyse, so erhält man keine Signifikanz ($r = 0,25$).

Es stellt sich nun die Frage, warum sich für Eichen eine mit $r = 0,77626$ recht hohe Korrelation zwischen dem pH-Wert der Borke und dem Verkehr ergibt, für Linden und Ahorn jedoch nur eine geringe, bzw. keine Korrelation angezeigt wird. Ein Grund könnte sein, dass Eichen eine schwächere Pufferkapazität haben als Linde und Ahorn. Tatsächlich gibt BARKMAN (1958) für *Acer* eine höhere Pufferkapazität (*Acer platanoides* 4,8 - 3,7, *Acer pseudoplatanus* 3,1) an, als für *Quercus robur* (2,2).

Zusammenhang zwischen nitrophilen Flechtenarten und Verkehrsdichte

Trotz fehlender Zusammenhänge von Borken-pH und Verkehrsdichte bei Ahornen und Linden ergibt sich jedoch aus der Beobachtung der Abstufung der Flechtenarten in Hinblick auf die Verkehrsdichte ein Zusammenhang:

Starker Verkehr (V3): *Phaeophyscia orbicularis*, *P. nigricans*

Mittlerer Verkehr (V2): *Physcia tenella*, *Physcia adscendens*, *Xanthoria parietinam*, *Xanthoria candelaria*, *Xanthoria polycarpa*

Diese Abstufung deckt sich mit weitgehend mit den N-Werten (WIRTH 2001) der Arten:

Phaeophyscia orbicularis, *P. nigricans* N = 7

Physcia tenella, *Physcia adscendens* N = 6, *Xanthoria parietina* N = 5

Xanthoria candelaria N = 7, *Xanthoria polycarpa* N = 5

Das wirft die Frage auf, ob die Phaeophysciiden (*Phaeophyscia orbicularis* und *Phaeophyscia nigricans*) auf basischeren Borken steht als die Physciiden (*Physcia adscendens* und *Physcia tenella*). Nach WIRTH (2001) hat *Phaeophyscia nigricans* einen R-Wert von 8, *P. orbicularis* von 7, *Physcia adscendens* und *tenella* 6. Dies scheint die Abstufung zu stützen. Der Vergleich der Häufigkeiten beider Artengruppen mit den pH-Werten (Abb. 3) zeigt jedoch keinen Zusammenhang.

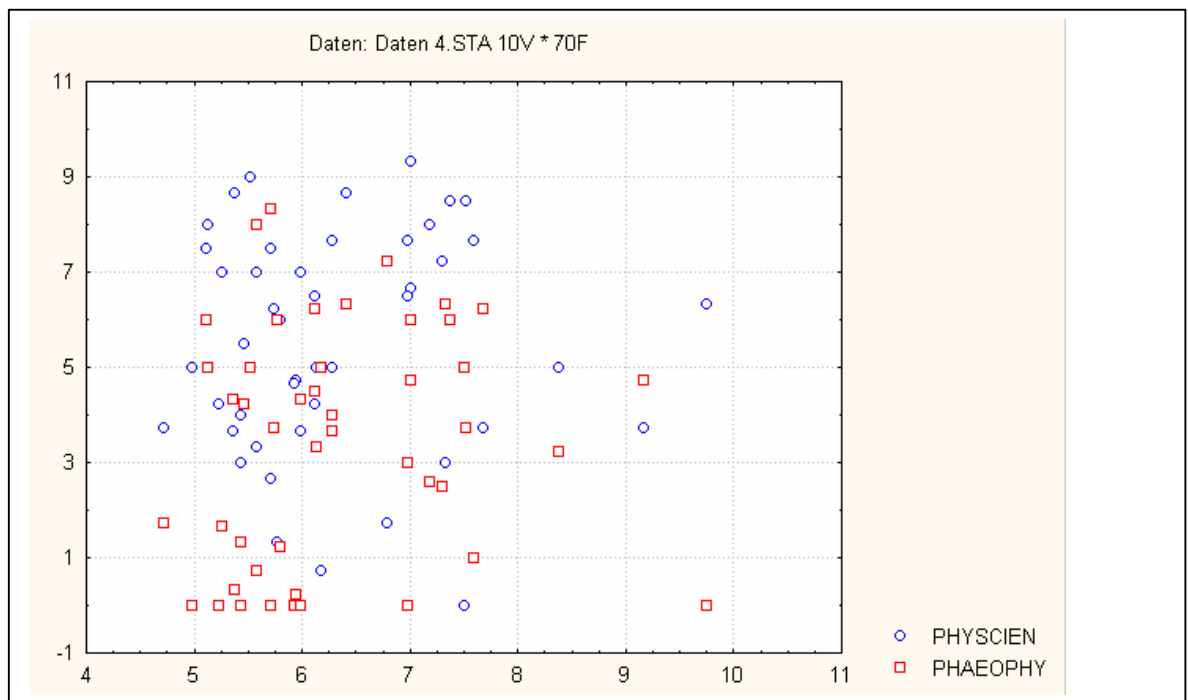


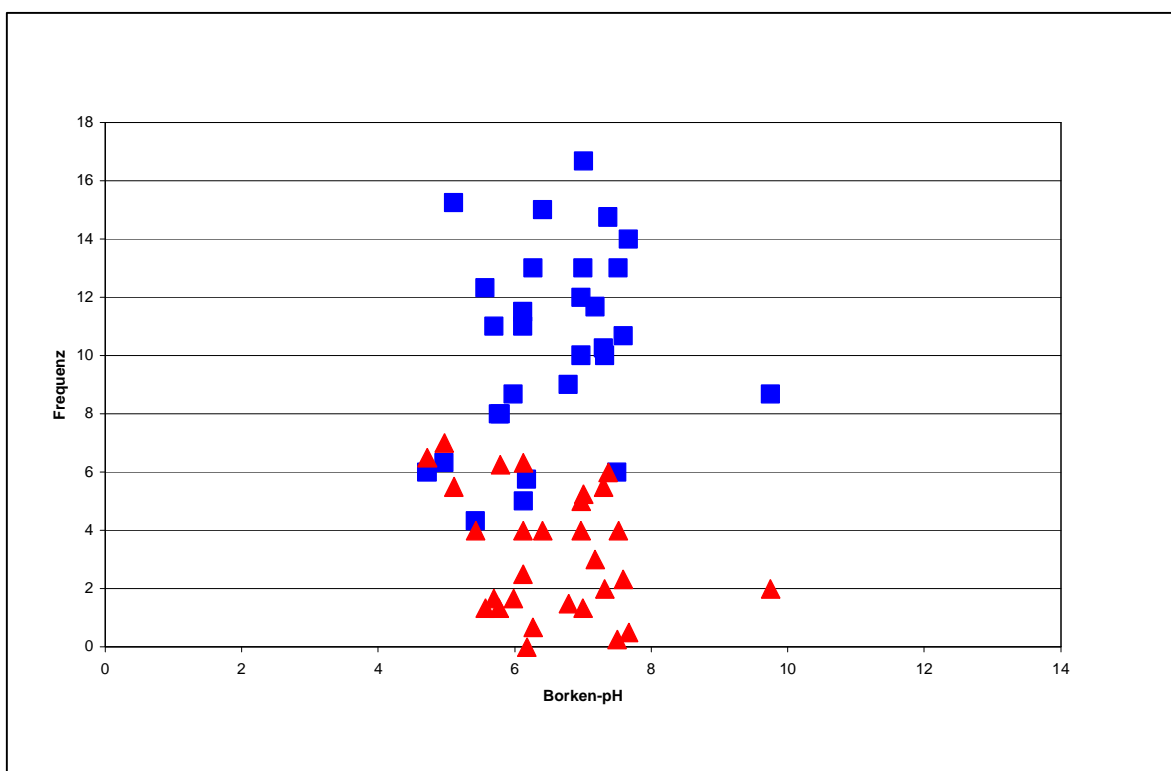
Abb. 3: Vergleich der mittleren Frequenzen von *Physcia* (*P. adscendens* und *P. tenella* - blau) und *Phaeophyscia* (*P. orbicularis* und *P. nigricans* rot) (Y-Achse) in Abhängigkeit vom Borken-pH (X-Achse)

Der Grund für das Vorkommen von *Phaeophyscia* an verkehrsreicheren Straßen dürfte an der unterschiedlichen Depositionsform liegen. Wie JANBEN et al. (2007) belegen konnten, zeigt *Phaeophyscia orbicularis* im Gegensatz zu den *Physcia*-Arten eine Präferenz für trockene Stickstoffdepositionen. Diese bestehen in Städten aus Ammoniumsalzen (vorzugsweise Ammoniumnitrat (KIRCHNER 2000)).

Zusammenhang zwischen Nitrophyten und pH-Wert der Borke

Weder für die Frequenz von nitrophytischen sowie übrigen Flechtenarten und dem Borken-pH noch für die Artenzahl von nitrophytischen sowie übrigen Flechtenarten und dem Borken-pH konnte ein Zusammenhang festgestellt werden (Abb. 4,5). Beide Gruppen liegen in demselben pH-Bereich. Würden nitrophytische Arten höhere pH-Werte bevorzugen, würden sich die Punktschwärme separieren oder nur leicht überlappen. Es ist daher nicht nur so, dass nitrophytische Flechtenarten einen höheren pH-Wert als die übrigen Arten (sog. Acidophyten) bevorzugen würden, also basiphytisch wären, sie besiedeln auch denselben pH-Bereich (4,2-7,8) wie diese.

In London stellten Larsen et al. (2006) einen mit 0,3 pH-Werten geringfügig höheren pH Wert von Eichenborke mit nitrophytischen Flechten im Vergleich zu Bäumen ohne nitrophytische Flechten fest. Diese Unterschiede sind zum einen minimal und beziehen sich auf Eichenborke mit niedriger Pufferkapazität. Bei den Untersuchungen an *Acer* und *Tilia* ergeben sich keine Unterschiede in den pH-Präferenzen von Nitrophyten und übrigen Arten.



Ist der Anstieg nitrophiler Flechten an Bäumen auf eine Erhöhung des Borken-pHs zurückzuführen? 7

Abb. 4: Zusammenhang zwischen dem Borken-pH und der Frequenz von nitrophytischen (Quadrate) und übrigen Flechtenarten (Dreiecke). Die Nitrophyten haben zwar eine höhere Frequenz, besiedeln aber denselben pH-Bereich.

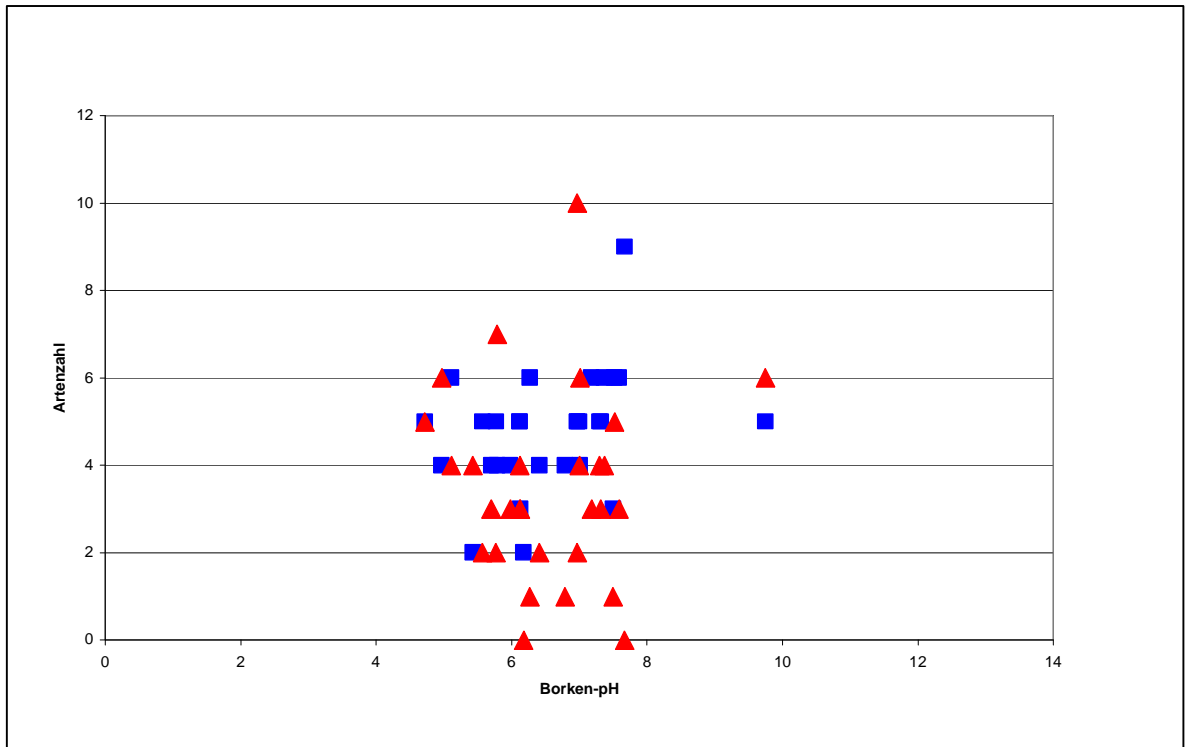


Abb. 5: Zusammenhang zwischen Artenzahl von nitrophytischen (Quadrate) sowie übrigen Flechtenarten (Dreiecke) und Borken-pH.

Historischer Vergleich

Eine Erhöhung der Borken-pH-Werte durch Stickstoffeinfluss würde sich auch aus einem Vergleich der heutigen pH-Werte mit denen früherer Autoren ergeben. BARKMAN (1958) führte durchschnittliche Werte des Borken-pHs für verschiedene Baumarten auf. Solch ein Vergleich ist nur mit Vorsicht anzustellen, da die Messmethoden als auch die Messungen an einem einzelnen Stamm unterschiedliche Werte ergeben. Der in dieser Arbeit ermittelte durchschnittliche pH-Wert von Eichenborke liegt bei 5,14. Er ist damit höher als der von BARKMAN (1958) angegebene Durchschnittswert von 4,5 mit einer Spanne von 3,7 – 5,0 (2,9 – 6,4). Die hier gemessenen Werte erstrecken sich über eine Spanne von 3,24 – 6,86.

Für *Acer pseudoplatanus* findet sich bei BARKMAN (1958) eine pH-Angabe von 6,1-6,9 (5,1-7,7), bei den vorliegenden Messungen ergab sich für *Acer spec.* ein diesen Angaben entsprechender durchschnittlicher pH-Wert von 6,36 bei einer Spanne von 5,13 – 7,52 (Extremwerte: 4,72 - 9,75). *Tilia spec.* besaß laut BARKMAN (1958) einen Borken-pH von durchschnittlich 5,6, die Spanne betrug 4,8 – 6,2 (3,8 – 6,5). Bei den vorliegenden Messungen hatten die untersuchten Linden einen durchschnittlichen pH-Wert von 6,13 bzw. 5,95 unter Ausschluss des „Ausreißers“ pH 9,17. Im Vergleich zu Barkmans Werten ist also eine leichte Erhöhung festzustellen.

Für *Fraxinus excelsior* ermittelte BARKMAN (1958) einen durchschnittlichen Borken-pH von 5,5 mit einer Spanne von 5,2 – 5,8. Die (wenigen) hier ermittelten Daten für Eschen-Borke ergeben einen Durchschnitts-pH von 5,3 (5,11 - 5,58) und liegen damit innerhalb des von Barkman angegebenen Bereiches.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass der Verkehr den pH-Wert von Trägerbäumen offenbar nur bei Eichen mit pufferschwacher Borke erhöht, nicht oder kaum den anderer Bäume. Das bedeutet, dass ein Verkehrseinfluss auf die Trägerbäume vorhanden ist, dieser sich aber nur bei Bäumen mit pufferschwacher Borke auswirkt.

Wenn VAN HERK (2001) behauptet, dass der Anstieg der nitrophytischen Flechten auf den Anstieg des pH-Wertes der Baumborken beruht, so hat er im Falle der Eichen (an denen er seine Untersuchungen gemacht hat) recht. Die Durchschnittswerte der pH-Werte von Eichenborken an den einzelnen Untersuchungsstationen lagen bei VAN HERK (2001) zwischen 4,05 und 5,79, in unserer Untersuchung zwischen 4,16 und 5,86, also in vergleichbarem Bereich.

Der von Natur aus niedrige pH-Wert von Eichenborke hätte früher eine Besiedlung von nitrophytischen Flechten nicht erlaubt, die in einem pH-Bereich vorkommen, der oberhalb des natürlichen pH-Wertes von Eichenborke liegt. Auf andere Bäume trifft das jedoch nicht zu. Die unterste Grenze des pHs von Borken mit *Phaeophyscia orbicularis* liegt bei etwa 5, das ist deutlich niedriger als der von WIRTH (2001) für diese Art angegebene Bereich (6,6-7,5), weswegen diese Nitrophyten generell auch nicht als Basiphyten bezeichnet werden können. Ihre pH-Präferenz ist auch nicht höher als die der übrigen Arten (Azidophyten und Neutrophyten).

Der historische Anstieg der pH-Werte der Baumborken in Städten hat unseren Ergebnissen zu Folge nichts mit den Wirkungen von eutrophierenden Emissionen aus dem Verkehr zu tun, da (außer bei Eichen) kein Anstieg des Borken-pHs unter Verkehrseinfluss zu verzeichnen war, sondern ist wohl im wesentlichen auf die Reduzierung der Säurewirkung von SO₂ zurückzuführen. Wenn der Anstieg der Nitrophyten unter den epiphytischen Flechten jedoch nicht durch eine Erhöhung des Borken-pHs erklärt werden kann, muss man andere Ursachen ins Auge fassen. Man könnte ausschließen, dass der größte Teil der Stickstoffdepositionen nicht nass erfolgt, weil es nur zeitweise regnet, Nitrate in Düngeversuchen keine besondere Wirkung zeigen (FRANZEN-REUTER & FRAHM 2007) und die Höhe der Stickoxidemissionen keine Bezüge um Auftreten von nitrophytischen Flechten zeigen (SCHUMACHER et al. 2006). Statt dessen muss man Stickstoffgaben in Form von trockenen Depositionen in Form von Ammoniumsalzen stärker berücksichtigen. Diese zeigen deutliche Bezüge zu dem vermehrten Auftreten von *Phaeophyscia orbicularis* (JANSSEN et al. 2007). Je stärker die trockenen Depositionen sind, um so mehr bekommen die Flechten osmotischen Stress. Diesem sind nur Halophyten am besten angepasst. Daher wäre die Beeinflussung der Flechten durch Stickstoffverbindungen nach den Ergebnissen dieser Untersuchung nicht durch den pH-Wert, verursacht. Wesentlich wäre auch nicht der Stickstoff selbst, weil zusätzliche Stickstoffgaben nicht verstoffwechselt werden sondern, sondern im Thallus gespeichert werden (STAPPER et al. 2005), vorwiegend in Form von N-reichen Aminosäuren wie Prolin (FRANZEN-REUTER 2004). Daher könnte die Salzwirkung trockener Stickstoffdepositionen eine Erklärung für den Anstieg nitrophytischer Arten abgeben.

Literatur

- BARKMAN, J.J. 1958. Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. – Assen: Van Gorcum.
- BEISMANN, H. 2006. Stickstoff – oft zuviel des Guten. - Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 6: 233.

- DÜLL, R. 2001. Zeigerwerte von Laub- und Lebermoosen. - S. 175-220 in: Ellenberg, H. et al., Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, 3. Aufl. Scripta Geobotanica XVII, 261 S.
- FRAHM, J.-P. 2006. Der Einfluss von Ammoniak auf Stickstoff liebende Flechten in verkehrsbelasteten Gebieten. - Immissionsschutz **4**/2006: 164-167.
- Franzen-Reuter, I. 2004. Untersuchungen zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation, Dissertation Univ. Bonn.
- FRANZEN-REUTER, I., FRAHM, J.-P. 2007. Auswirkungen experimenteller Stickstoffgaben auf die Epiphytenflora in Dauerbeobachtungsflächen (Rheinland-Pfalz, Deutschland). *Herzogia* **20**.
- FRANZEN-REUTER, I., GEHRMANN, J., FRAHM, J.-P. 2006. Veränderungen des Epiphytenbewuchses zwischen 2002 und 2004 auf Dauerbeobachtungsflächen in Nordrhein-Westfalen. *LÖBF-Mitteilungen* **2**/2006: 2-7.
- JANBEN, A.-M., FRAHM, J.-P., HEIDELBACH, B. 2007. Die Entwicklung der Flechtenvegetation in Bonn 2003-2006. - *Decheniana* im Druck.
- JANBEN, A.-M., FRAHM, J.-P., GEHRMANN, J. 2007. Die Auswirkungen unterschiedlicher Stickstoffdepositionsformen auf epiphytische Flechten. - Immissionsschutz im Druck.
- KIRSCHBAUM, U., WINDISCH, U., VORBECK, A., HANEWALD, K. 2006. Mapping lichen diversity in Wetzlar and Giessen as an indicator of air quality. - Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft **66**: 272-280.
- KIRCHNER, M. (2000): Ammoniakimmissionen aus dem Verkehrsbereich, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft **60** (10): 383-388.
- LARSEN, R.S., BELL, J.N.B., JAMES, P.W., CHIMONIDES, P.J., RUMSEY, F.J., TREMPER, A., PURVIS, O.W. 2006. Lichen and bryophyte distribution on oak in London in relation to air pollution and bark acidity. - *Environmental pollution* **110**:1-9.
- LÖTSCHERT, W., KOHM, H.-J. 1973. PH-Wert und S-Gehalt der Baumborke in Immissionsgebieten. - *Öcol. Plant.* **8**:199-209.
- SCHUMACHER, J., JANSSEN, A.-M., FRAHM, J.-P. 2006. Spiegelt der VDI-Luftgüteindex die Schadstoff-Belastung durch NO₂ und SO₂ wider?. *Herzogia* **19**: 205-213.
- STAPPER, N.J., FRANZEN-REUTER, I., FRAHM, J.-P.: 2005. Stickstoffgehalte in *Parmelia sulcata* als Indikator atmosphärischer Stickstoffeinträge in einer Großstadt am Beispiel Düsseldorf. *Immissionsschutz* **10**,3: 84-89.
- VAN HERK, C.M. 1999. Mapping of Ammonia pollution with epiphytic lichens in the Netherlands, - *Lichenologist* **31** (1): 9-20.
- VAN HERK, C.M. 2001. Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. - *Lichenologist* **33** (5): 419-441.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.) (2004): VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation) - Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. - 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) (Hrsg.). Materialien Umwelt und Entwicklung **173**. München.
- WIRTH, V. (2001) Zeigerwerte von Flechten. - S. 221-243 in: Ellenberg, H. et al., Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, 3. Aufl. Scripta Geobotanica XVII, 261 S.

Anschrift der Verfasser

Jan-Peter Frahm, Daniela Thönnies, Stephanie Hensel, Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen,
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Meckenheimer Allee 170, 53115 Bonn, Deutschland.
E-mail: frahm@uni-bonn.de