

## **Luftbürtige Stickstoffeinträge in Waldökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland (West) sowie in West- und Mitteleuropa**

H. M. BRECHTEL

Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Forsthydrologie, Hann. Münden

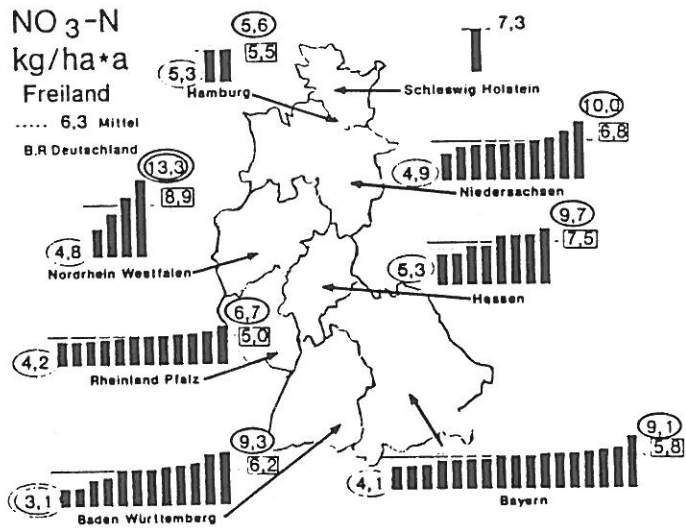
### **Einleitung**

Einem langjährig konzipierten Monitoring der Niederschlagsdeposition (BRECHTEL, 1989a) von Säurebildnern und der damit verbundenen luftbürtigen Stickstoffeinträge in Waldökosysteme muß im Zusammenhang einer kausal-analytischen Quantifizierung der durch Luftverschmutzung verursachten Schäden in Waldgebieten eine hohe Bedeutung zugemessen werden. Neben den biologischen Schäden an den oberirdischen Sproßorganen und Wurzeln (durch Säure, toxische Metalle, Nährstoffdishermonien, N-Überernährung, Ammoniumtoxizität und Beeinträchtigung des Bodenlebens) betrifft dies insbesondere auch den langanhaltenden Standortschaden im Boden und dessen Auswirkungen auf die chemische Wasserqualität bewaldeter Wassereinzugsgebiete (BRECHTEL, 1988, 1989b).

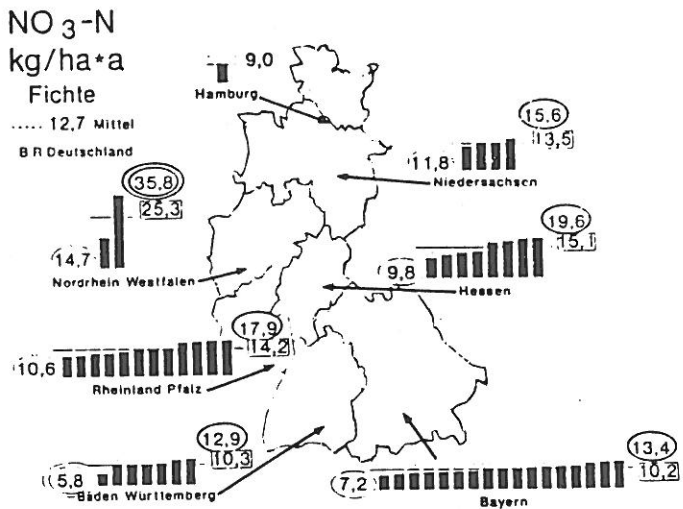
Nachfolgend soll durch eine vergleichende Auswertung der von der Bundesrepublik Deutschland (West) sowie von einigen Ländern in West- und Mitteleuropa vorliegenden Meßergebnisse der Niederschlagsdeposition von Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff im Freiland und in Waldbeständen das Ausmaß der damit verbundenen aktuellen Belastungszustände und Risiken verdeutlicht werden.

### **Stickstoffeinträge in Deutschland, West**

Es liegen von 96 Freiland-Meßstationen und von 68 Fichten-Meßflächen von mehreren Jahren Depositionsmeßergebnisse vor (FÜHRER et al., 1988; BRECHTEL, 1989c; BRECHTEL & POHLMANN, 1990). Durch Vergleich der Freiland-Niederschlagsdeposition mit den Einträgen in Fichtenaltbeständen wird deutlich,



Land: Rheinl.-Pfalz < Hamburg < Bayern < Baden-Württemb. < Niedersachsen < Nordrh.-Westf.  
kg/ha: 5,0 < 5,5 < 5,8 < 6,2 < 6,8 < 7,5 < 8,9

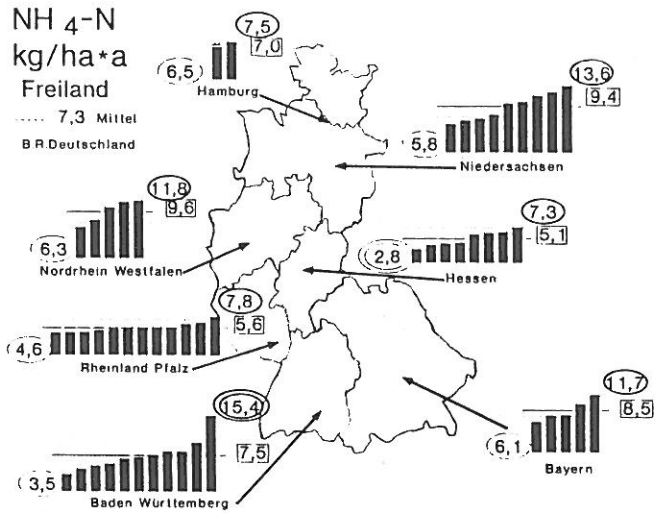


Land: Hamburg < Bayern < Baden-Württemb. < Niedersachsen < Rheinl.-Pfalz < Hessen < Nordrh.-Westf.  
kg/ha: 9,0 < 10,2 < 10,3 < 13,5 < 14,2 < 15,1 < 25,3

**Abbildung 1**

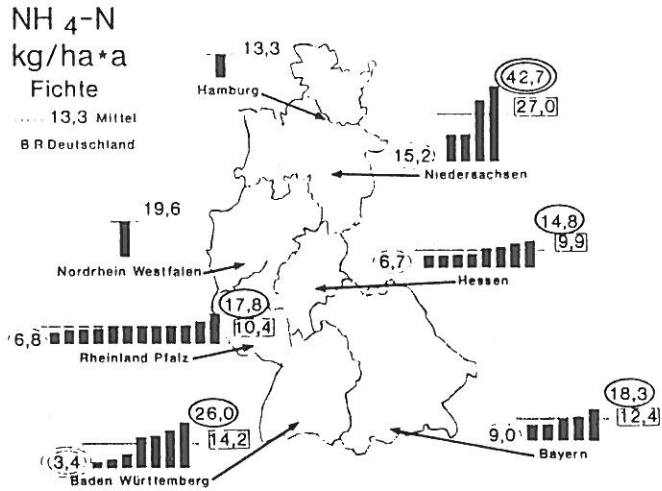
Jahressummen der Nitrat-Stickstoff-Deposition (kg/ha.a) mit dem Niederschlag im Freiland und Bestandsniederschlag von Fichtenaltbeständen (vgl. Abb. 2)

---: Mittel der Gesamtstichprobe ("B.R. Deutschland"); □: Mittel der Teilstichprobe des jeweiligen Bundeslandes



Land: Hessen < Rheinl.-Pfalz < Hamburg < Baden-Württemb. < Bayern < Niedersachsen < Nordrh.-Westfalen

kg/ha: 5,1 < 5,6 < 7,0 < 7,5 < 8,5 < 9,4 < 9,6



Land: Hessen < Rheinl.-Pfalz < Bayern < Hamburg < Baden-Württemb. < Nordrh.-Westf. < Niedersachsen

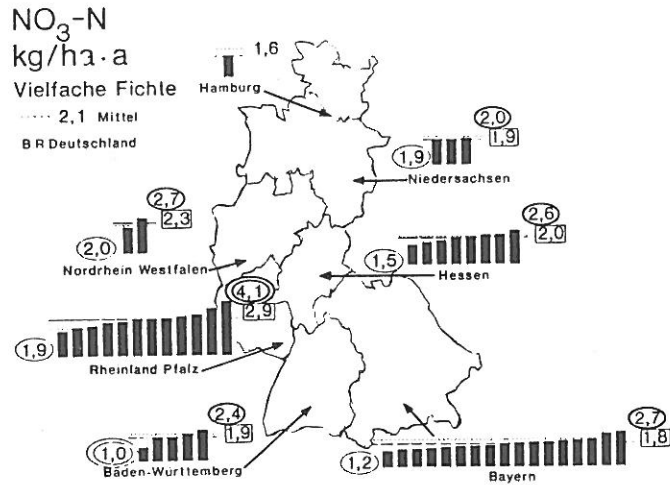
kg/ha: 9,9 < 10,4 < 12,4 < (13,3) < 14,2 < (19,6) < 27,0

Abbildung 2

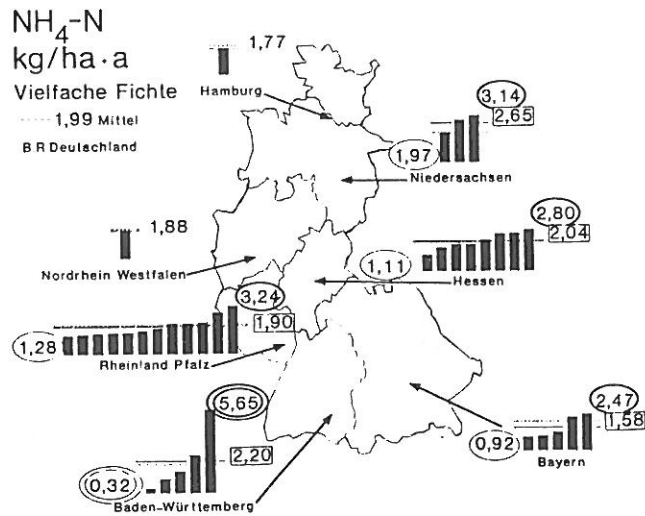
Jahressummen Ammonium-Stickstoff-Deposition (kg/ha.a) mit dem Niederschlag im Freiland und Bestandsniederschlag von Fichtenaltbeständen (vgl. Abb. 1).

○ ○ : Minimum und Maximum der Gesamtstichprobe ("B.R. Deutschland");

⊖ ⊖ : Minimum und Maximum der Teilstichprobe des jeweiligen Bundeslandes



Land: Hamburg < Bayern < Baden-Württemb. < Niedersachsen < Hessen < Nordrh.-Westf. < Rheinl.-Pfalz  
↓ Vielfaches: (1,61) < 1,8 < 1,85 < 1,93 < 2,04 < 2,34 < 2,85



Land: Bayern < Hamburg < Nordrh.-Westf. < Rheinl.-Pfalz < Hessen < Baden-Württemb. < Niedersachsen  
↓ Vielfaches: 1,58 < (1,77) < (1,88) < 1,90 < 2,04 < 2,20 < 2,65

*Abbildung 3*

Jahressummen der Nitrat-Stickstoff- und Ammonium-Stickstoff-Deposition im Bestandsniederschlag von Fichtenaltbeständen, dargestellt als Vielfaches der Deposition mit dem Freilandniederschlag (vgl. Abb. 1 und 2)

in welch beträchtlichem Ausmaße durch die insbesondere im wintergrünen Wald zusätzlich zur Auswirkung kommende akzeptorabhängige Interzeptionsdeposition die Einträge von anorganischem Stickstoff erhöht werden. Die Meßdaten vom Freiland und vom Fichtenwald kennzeichnen gewissermaßen die Spanne der in einem Betrachtungsgebiet je nach Bewaldungsprozent und Baumartenverteilung vorkommenden und zur Auswirkung kommenden Niederschlagsdeposition. Unter vergleichbaren Immissionsverhältnissen liegen die Eintragswerte von Waldbeständen der Baumarten Buche<Eiche>Kiefer in ihrer Größenordnung innerhalb dieser Jahreswerte (BRECHTEL et al., 1986).

In den Abb. 1 und 2 sind jeweils für die Teilstichproben der einzelnen Bundesländer die mittleren Jahressummen der Nitrat-Stickstoff- und der Ammonium-Stickstoff-Deposition mit dem Niederschlag im Freiland und Bestandsniederschlag von Fichtenaltbeständen von den verschiedenen Untersuchungsstandorten in Form von Säulen in aufsteigender Reihenfolge angeordnet. Bei jeder Säulereihe sind das betreffende Minimum, Maximum und arithmetische Mittel als Zahlenwerte angegeben sowie die jeweiligen Mittelwerte der Bundesländer als durchgezogene Linie dem Mittel der Gesamtstichprobe "B. R. Deutschland" (gepunktete Linie) gegenübergestellt. In gleicher Weise sind in Abb. 3 die Jahresdepositionen der Fichtenbestände für Nitrat-Stickstoff und für Ammonium-Stickstoff als Vielfaches der Freiland-Niederschlagsdeposition dargestellt.

Bei allen Darstellungen fällt in erster Linie die hohe räumliche Variabilität innerhalb der einzelnen Länder-Kollektive auf. Die Unterschiede zwischen den Einzelergebnissen der verschiedenen Untersuchungsstandorte innerhalb der Länder-Kollektive sind sowohl im Freiland als auch in den Fichtenbeständen im allgemeinen wesentlich größer als diejenigen zwischen den Länder-Mittelwerten. Dies zeigt, daß die Niederschlagsdeposition bereits im Freiland und zumeist noch verstärkt im Fichtenwald in hohem Maße von kleinräumig variablen Einflußfaktoren der Immission bestimmt wird. Eine gebietsbezogene flächenrepräsentative Quantifizierung setzt daher eine relativ hohe Anzahl von Meßstationen bzw. Meßflächen voraus (BRECHTEL, 1990).

Bei der Nitrat-Stickstoff-Deposition (Abb. 1) variieren die Ländermittel im Freiland von 5,0 kg/ha.a (Rheinland-Pfalz) und 8,9 kg/ha.a (Nordrhein-Westfalen) sowie in den Fichtenbeständen von 9,0 kg/ha.a (Hamburg) und 25,3 kg/ha.a (Nordrhein-Westfalen). Sowohl im Freiland als auch im Fichtenwald sind die Meßergebnisse von Hamburg, Bayern und Baden-Württemberg deutlich niedriger als in Niedersachsen, Hessen und Nordrhein-Westfalen. In Rheinland-Pfalz sind die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Depositionen einerseits im Freiland am niedrigsten, andererseits aber in den Fichtenbeständen mit 14,2 kg/ha.a relativ hoch. Daraus resultieren die in Rheinland-Pfalz von allen Bundesländern höchsten Nitrat-Stickstoff-Vielfachwerte der Fichte (vgl. Abb. 3).

Beim Ammonium-Stickstoff (Abb. 2) sind die Meßergebnisse sowohl im Freiland als auch bei der Fichte im Gegensatz zu  $\text{NO}_3\text{-N}$  nicht nur in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen sondern auch in den süddeutschen Ländern Baden-Württemberg und Bayern relativ hoch, während sie in Hessen und Rheinland-Pfalz

teilweise beträchtlich niedriger sind. Die Depositionsraten variieren als Ländermittel im Freiland von 5,1 kg/ha (Hessen) und 9,6 kg/ha (Nordrhein-Westfalen) sowie in den Fichtenbeständen von 9,9 kg/ha (Hessen) und 27,0 kg/ha (Niedersachsen).

Als Summe von Nitrat- und Ammonium-Stickstoff resultiert für die Jahresdeposition nachfolgende Reihung der Ländermittel.

**Freiland** ( $\emptyset$  Gesamtstichprobe = 13,6 kg/ha)

Land, kg/ha: Rheinl.-Pfalz: 10,6 < Hamburg: 12,5 < Hessen: 12,6 < Baden-Württemb.: 13,7 < Bayern: 14,3 < Niedersachsen: 16,2 < Nordrh.-Westfalen: 18,5

**Fichte** ( $\emptyset$  Gesamtstichprobe = 26,0 kg/ha)

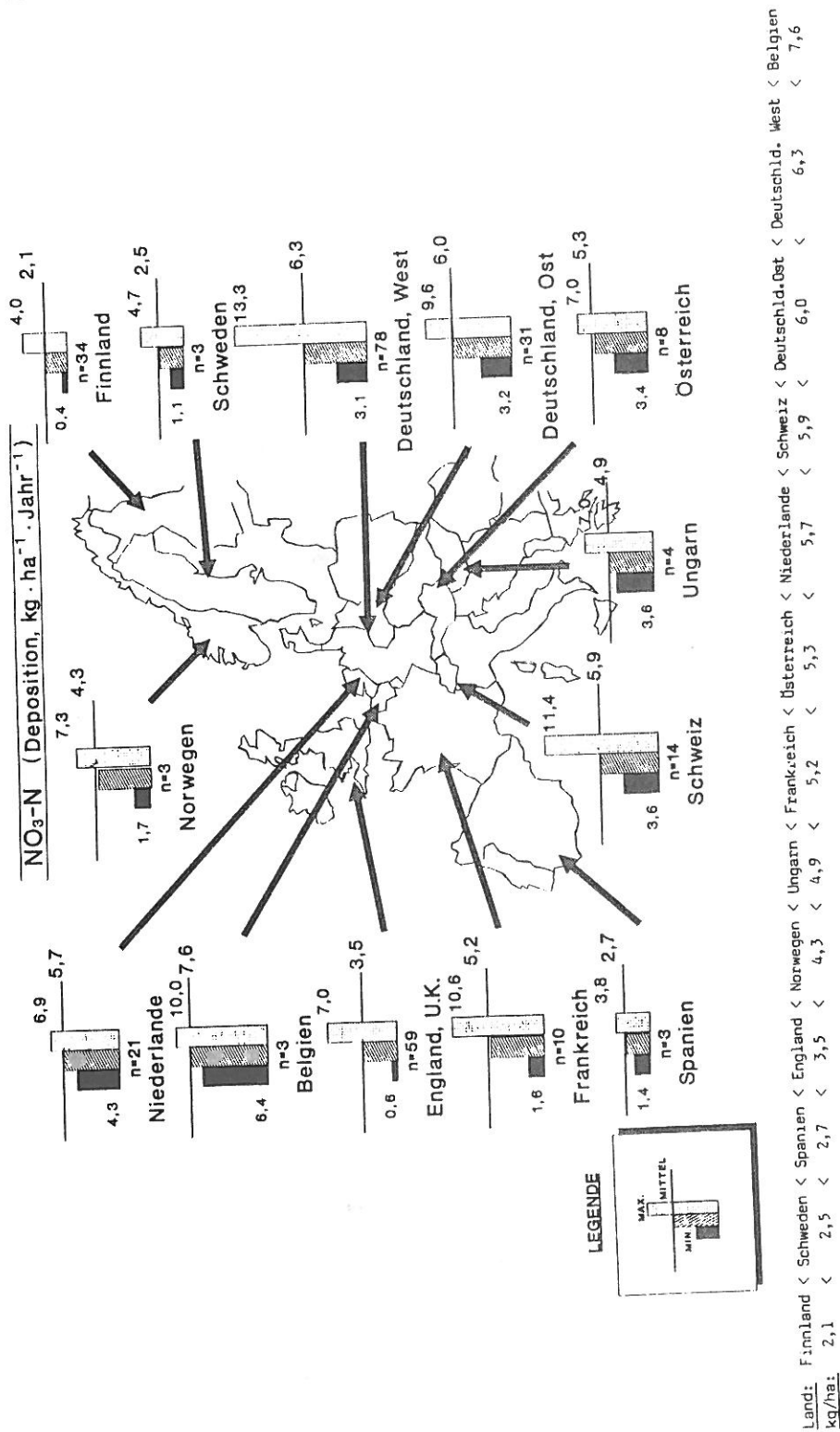
Land, kg/ha: Hamburg: (22,5) < Bayern: 22,6 < Baden-Württemb.: 24,5 < Rheinl.-Pfalz: 24,6 < Hessen: 25,0 < Niedersachsen: 40,5 < Nordrh.-Westfalen: (44,9)

In Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen liegen die Jahreseinträge von anorganischem Stickstoff bereits im Freiland und in verstärktem Ausmaße im Fichtenwald somit deutlich über dem Mittel der Gesamtstichprobe Deutschland-West. Im Freiland sind die anorganischen Stickstoffeinträge mit überdurchschnittlichem Ammoniumanteil auch in den süddeutschen Ländern Baden-Württemberg und Bayern relativ hoch.

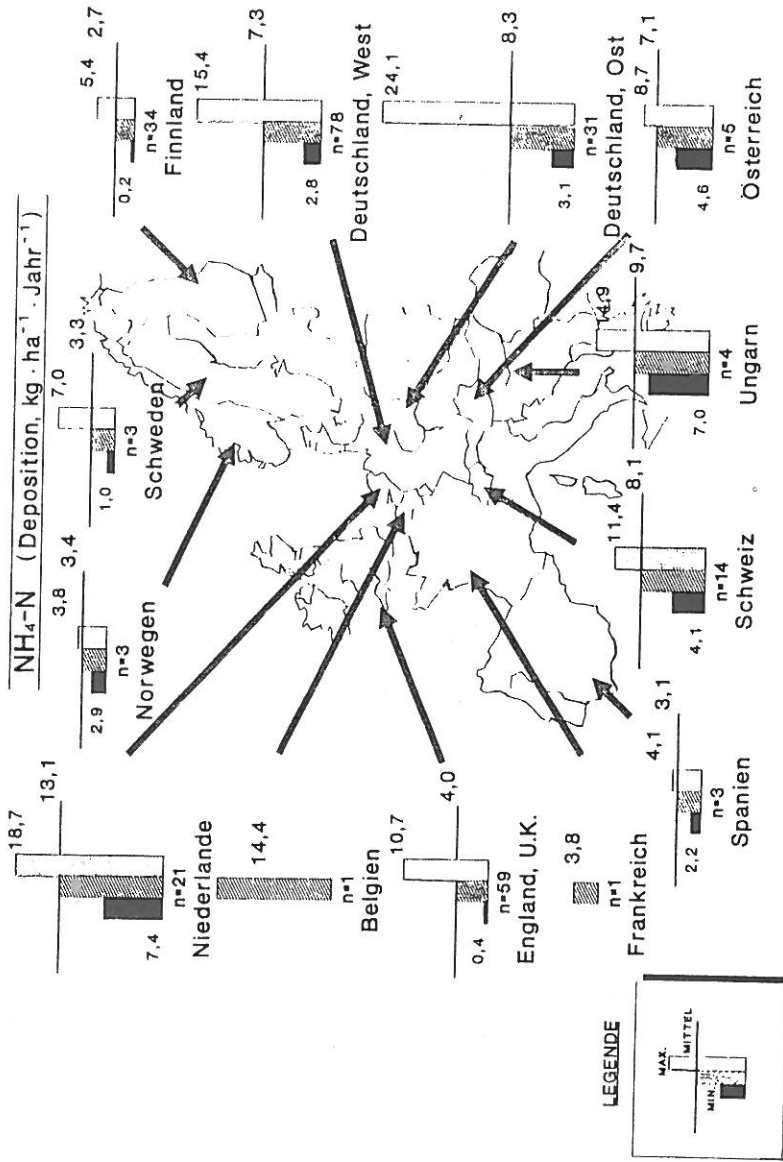
Die in Abb. 3 dargestellten hohen Vielfach-Werte von Nitrat-N ( $\emptyset$  2,1; Maximum 4,1) und Ammonium-N ( $\emptyset$  1,99; Maximum 5,65) stellen die im Vergleich zum Freiland insbesondere in Fichtenaltbeständen weit höheren luftbürtigen Stickstoffeinträge unter Beweis. Ausschließlich im Freiland durchgeführte Depositionsmessungen können somit nicht das tatsächliche Ausmaß der in Waldgebieten zur Auswirkung kommenden Stickstoffeinträge feststellen. Wie durch die große räumliche Variation der "Vielfache Fichte" deutlich wird, kann auch eine diesbezügliche Abschätzung der Bestandsdeposition aufgrund örtlicher Freilandmeßergebnisse, unter Verwendung von anderen Standorten übernommener Vielfachwerten, mit großen Fehlern behaftet sein. Für eine gebietsbezogene flächen- und zeitrepräsentative Quantifizierung der Stoffdeposition in Waldgebieten sind daher Langzeitmessungen in den Waldbeständen selbst erforderlich (BRECHTEL, 1989a).

### Stickstoffeinträge in West- und Mitteleuropa

Eine Zusammenstellung der von 12 europäischen Ländern verfügbaren Meßergebnisse von Jahresraten der Freiland-Niederschlagsdeposition kennzeichnet die Mindesthöhe der anorganischen Stickstoffeinträge in West- und Mitteleuropa. Mitgeteilt werden arithmetische Mittelwerte sowie Minimum- und Maximumwerte für Nitrat-Stickstoff (Abb. 4) und für Ammonium-Stickstoff (Abb.



**Abbildung 4**  
**Jahressummen der Nitrat-Stickstoff-Deposition mit dem Freilandniederschlag in**  
**Ländern von West- und Mitteleuropa**



land < Spanien < Schweden < Norwegen < Frankreich < England < Österreich < Deutschland.West < Schweiz < Deutschland.Ost < Ungarn < Niederlande < Belgien  
 ,7 < 3,1 < 3,3 < 3,4 < (3,8) < 4,0 < 4,0 < 4,0 < 7,1 < 7,3 < 8,1 < 8,3 < 8,3 < 9,7 < 13,1 < (14,4)

*Abbildung 5*  
 Jahressummen der Ammonium-Stickstoff-Deposition mit dem Freilandnieder-  
 schlag in Ländern von West- und Mitteleuropa



5) von den Ländern Deutschland-West (FÜHRER et al., 1988; BRECHTEL, 1989c; BRECHTEL & POHLMANN, 1990); Deutschland-Ost (STÜBNER, 1989; SIMON & WESTENDORFF, 1991); England U. K. (CAMPBELL et al., 1988); Niederlande (KNMJ/RIVM, 1985); Österreich (GLATZEL et al., 1986); Spanien, Schweiz, Frankreich, Belgien, Norwegen und Schweden (HORNUNG et al., 1990) sowie Ungarn (FÜHRER, 1990).

Bezüglich Nitrat-Stickstoff-Eintrag mit dem Freilandniederschlag zeichnet sich bei den länderbezogenen Mittelwerten ein großer Unterschied zwischen einerseits Finnland, Schweden, Spanien und England (2,1-3,5 kg/ha.a) und andererseits Norwegen, Ungarn, Frankreich, Österreich, Niederlande, Schweiz, Deutschland und Belgien (4,3-7,6 kg/ha.a) ab.

Beim Ammonium-Stickstoff fallen insbesondere die hohen Depositionswerte von den Niederlanden (maximales Mittel 13,1 kg/ha.a) und der Einzelwert von Belgien 14,4 kg/ha.a auf. Relativ hohe länderbezogene Mittelwerte von 7,1-9,7 kg/ha.a sind aber auch in Österreich, Schweiz, Deutschland und Ungarn nachgewiesen, während diejenigen von Finnland, Spanien, Schweden, Norwegen, Frankreich und England (2,7-4,0 kg/ha.a) deutlich niedriger sind.

Insgesamt zeigt sich, daß die Freiland-Deposition von anorganischem Stickstoff in Europa im allgemeinen von Westen nach Osten zunimmt. In Ländern, die in Westeuropa wie auch in Nordeuropa mehr oder weniger unbelastet ihren Niederschlag direkt vom Atlantik beziehen, sind die Depositionsraten deutlich niedriger als bei denjenigen im zentralen Teil von Europa, wo auch zumeist die Emissionsraten wesentlich höher sind. Leider sind diesbezüglich Informationen von den meisten ehemaligen Ostblockstaaten noch nicht verfügbar.

Hauptsächlich von Deutschland, aber auch von einigen Untersuchungsstandorten der Länder Schweiz, Österreich, Niederlande, Belgien, Ungarn und Finnland, liegen auch Meßergebnisse von Jahresraten der Stickstoffeinträge unter Waldbeständen vor. Die Befunde machen deutlich, in welcher Größenordnung die Stickstoffdeposition in Waldbeständen verschiedener Baumarten aufgrund der akzeptorabhängigen Interzeptionsdeposition höher sein kann als im Freiland. Die von Fichtenaltbeständen mitgeteilten Meßwerte repräsentieren offensichtlich dabei gewissermaßen die Maximalhöhe der Depositionsraten in Waldgebieten. Es folgen dann mit größerem Abstand die Waldbestände der Baumarten Kiefer, Eiche und Buche, die jedoch ebenfalls noch im Vergleich zum Freiland durch einen wesentlich höheren luftbürtigen Stickstoffeintrag belastet werden.

### Literatur

- BRECHTEL, H. M., 1988. Gefährdung des Bodens und der Gewässer durch Eintrag von Luftschadstoffen. Forst und Holz. Nr. 12. 298-302.
- BRECHTEL, H. M., 1989a. Monitoring wet deposition in forest; quantitative and qualitative aspects. Air Pollution Report Series. No. 21. CEC, Brussels 39-63.
- BRECHTEL, H. M., 1989b. Immissionsbelastung des Waldes, Auswirkungen auf den Gebietswasserhaushalt und Folgen für die Böden und Gewässer. Reihe: Kas-

- seler Hochschulwoche. 14. Hrsg.: Kasseler Hochschulbund, Bärenreiter Verlag. Kassel. 33-52.
- BRECHTEL, H. M., 1989c. Stoffeinträge in Waldökosysteme. Niederschlagsdeposition im Freiland und in Waldbeständen. DVWK Mitteilungen. 17. 27-52.
- BRECHTEL, H. M., 1990. Quantifizierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Niederschlagsdeposition im Freiland und in Waldbeständen. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch. 67. Jg., Sonderheft 1. 113-121.
- BRECHTEL, H. M. & POHLMANN, H., 1990. Regionale Unterschiede der jährlichen Niederschlagsdeposition von Säurebildnern im Freiland und unter Fichtenaltbeständen in der Bundesrepublik Deutschland. VDI-Berichte Nr. 837. 343-372.
- BRECHTEL, H. M., LEHNARDT, F. & SONNEBORN, M., 1986. Niederschlagsdeposition anorganischer Stoffe in Waldbeständen verschiedener Baumarten. Agrarspectrum. Schriftenreihe des Dachverbandes. Band 11. 57-80.
- CAMPBELL, G. W. et al., 1988. Acid rain in the United Kingdom. - Spatial distribution in 1987. Lab. Rep. LR 735 (SP)M. Warren Spring Laboratory, Hertfortshire.
- FÜHRER, E., 1990. Ergebnisse von Depositionsmessungen im Freiland und in Waldbeständen. Ungarisches Forstwissenschaftliches Institut, Versuchsstation Sopron (Unveröffentlicht).
- FÜHRER, E. et al., 1988. Ergebnisse von neuen Depositionsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland und im benachbarten Ausland. DVWK Mitteilungen. 14. 122 S.
- GLATZEL, G., KAZDA, M. & LINDEBNER, L., 1986. Die Belastung von Buchenwaldökosystemen durch Schadstoffdeposition im Nahbereich städtischer Ballungsgebiete: Untersuchungen im Wienerwald. Düsseldorfer Geobotanische Kolloquien. 3. 15-32.
- HORNUNG, M., RODA, F. & LANGAN, S. J. (eds.), 1990. A review of small catchment studies in Western Europe producing hydrochemical budgets. Air Pollution Research Report. 28. Commission of the European Communities. Brussels.
- KNMJ/RIVM Project, 1985. Chemical composition of precipitation over the Netherlands. Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt and National Institute for Public Health and Environment Hygiene, Annual Report. Bilthoven.
- SIMON, K. H. & WESTENDORFF, K., 1991. Stoffeinträge mit dem Niederschlag in Kiefernbeständen des norddeutschen Tieflandes in den Jahren 1985-1989. Der Wald, Berlin (in Vorbereitung).
- STÜBNER, K., 1989. Methodische Untersuchungen zur Erfassung des atmosphärischen Stoffeintrages in Gewässereinzugsgebieten des Mittelgebirges. Diplomarbeit, TU Dresden, Sektion Wasserwesen, Bereich Hydrologie und Meteorologie (unveröffentlicht).