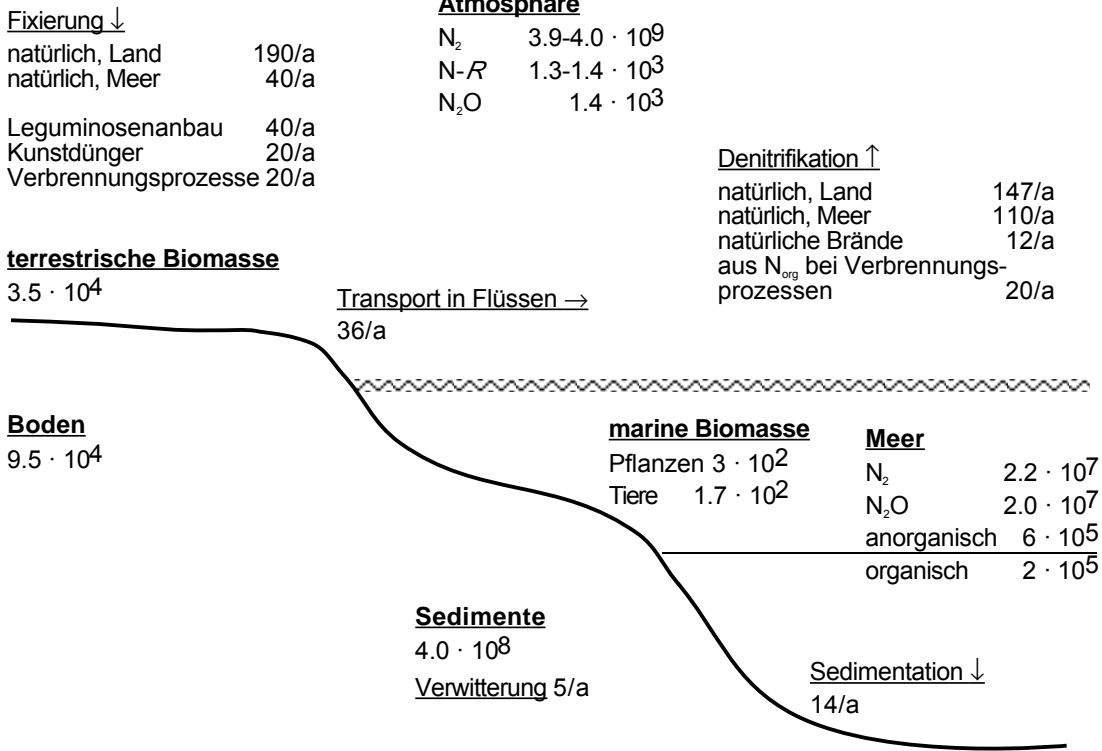
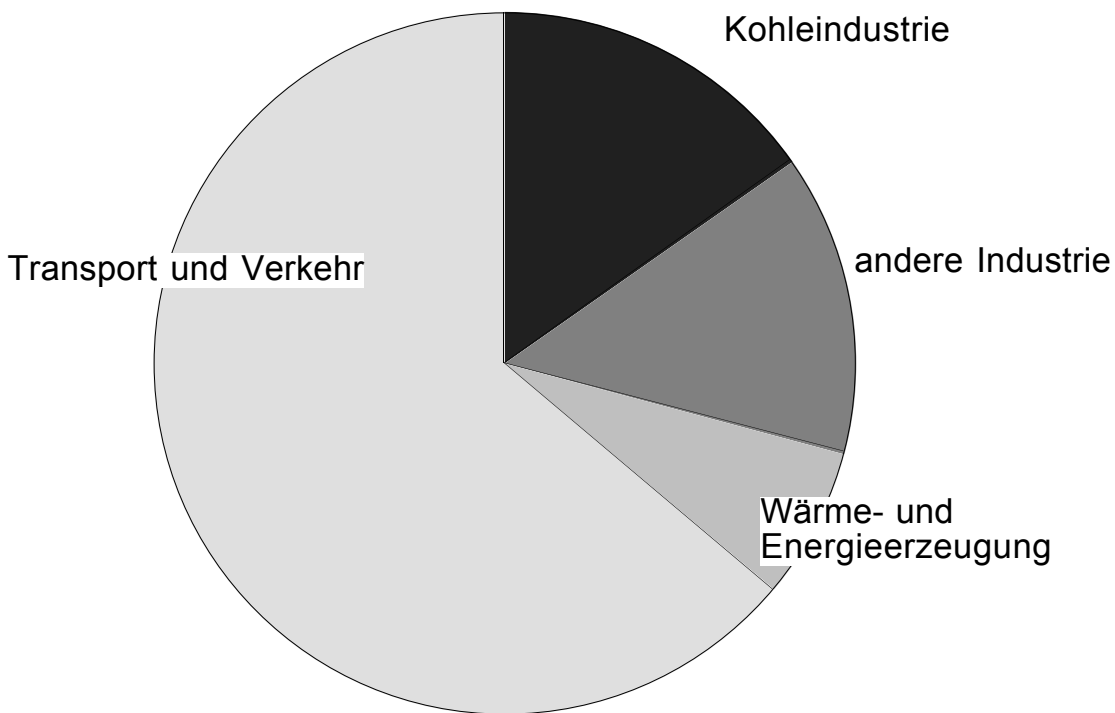


Globale Stickstoff-Ressourcen (in Tg N = 10^{12} g, = 10^6 t) und -flüsse (Tg N/a)



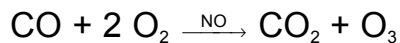
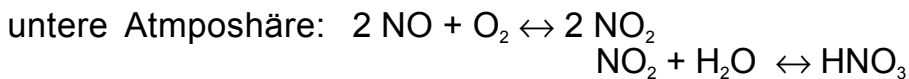
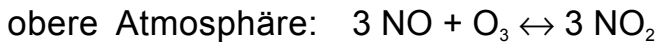
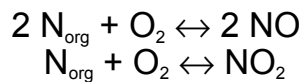
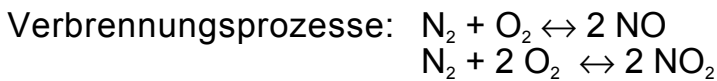
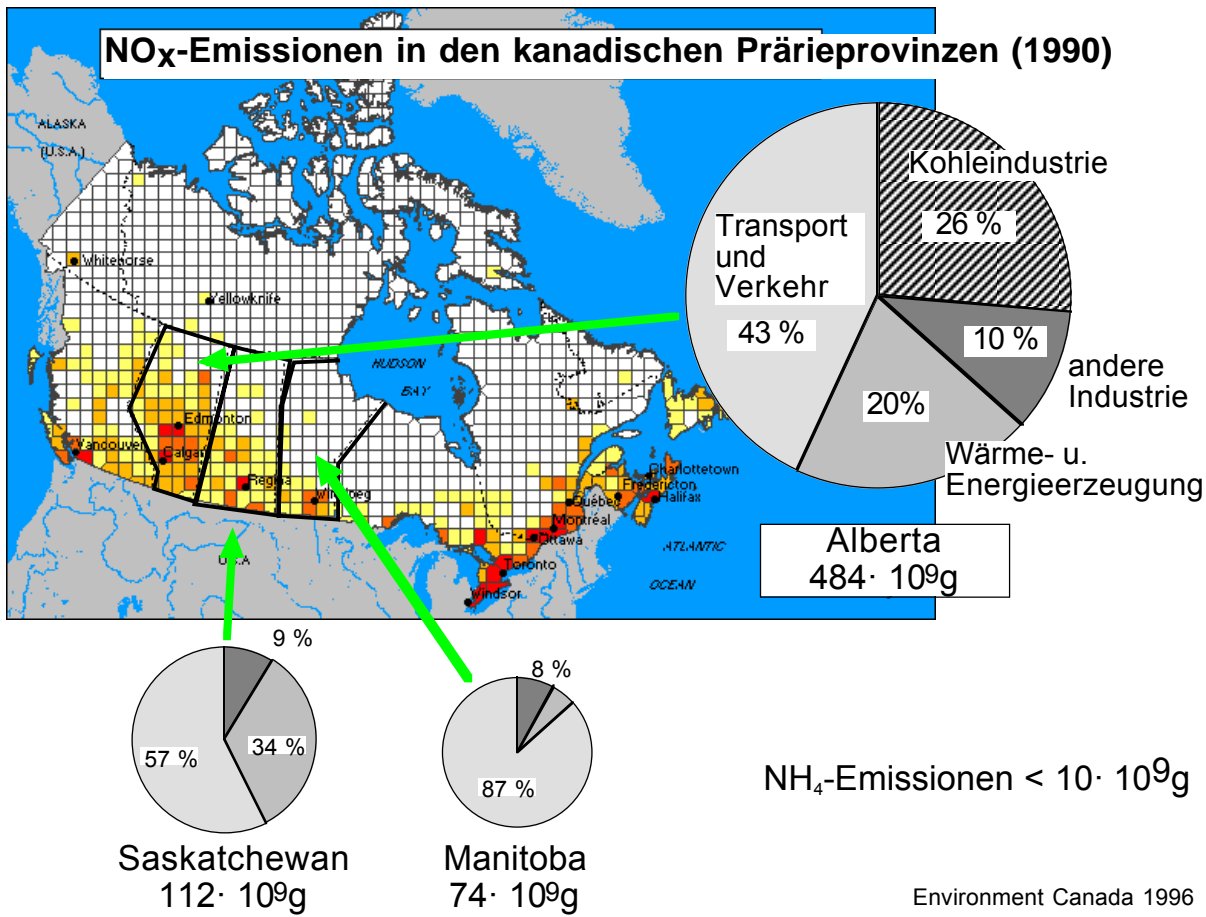
Reeburgh (1997) Bull.Ecol.Soc.Am. 78:260-267 und <http://ess1.ps.uci.edu/~reeburgh/figures.html>, verändert

NO₂-Emissionen in Deutschland 1999: $1.5 \cdot 10^{12}$ g



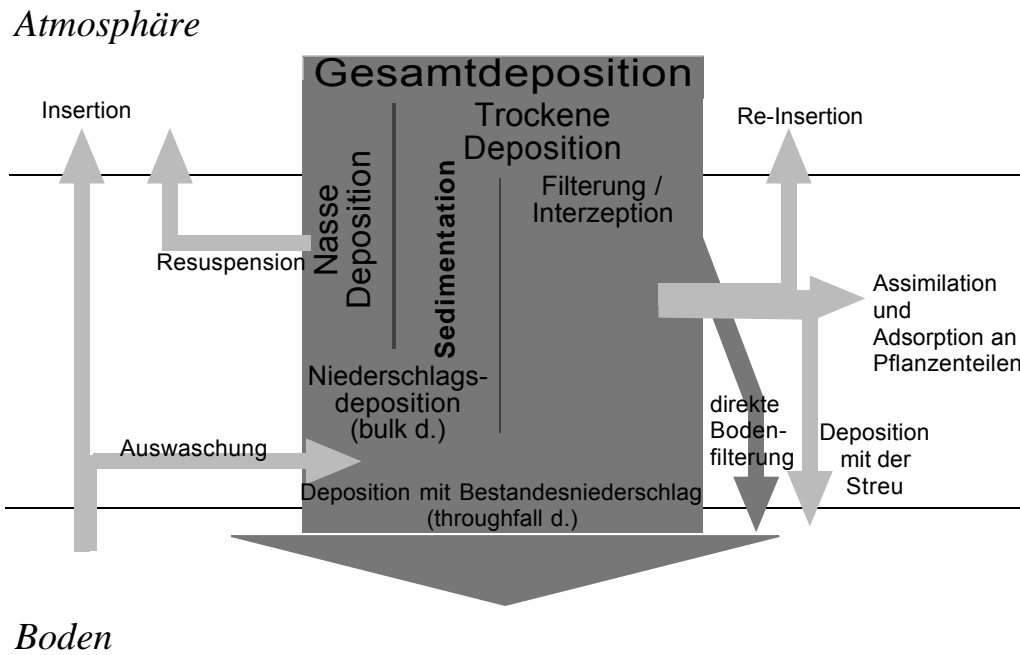
NH₄⁺-Emissionen in Deutschland 1999: $0.6 \cdot 10^{12}$ g (Landwirtschaft)

NO_x-Emissionen in den kanadischen Prärieprovinzen (1990)



NO₂: Stickstoffdioxid, nitrous oxide
 NO: Stickstoffmonoxid, nitric oxide

Depositionsprozesse



nach Ulrich 1990

Messung der Deposition

Trockene Deposition

Petrischalen

Nasse Deposition

Regensammler mit Deckel

Niederschlagsdeposition

offene Regensammler

Gesamtdeposition

Ionenaustauscher

künstliche Bäume

Deposition mit dem Bestandesniederschlag

Regensammler unter Kronendach

Auskämmung (Nebel, Luft)

Nebelsammler, Nebelharfe



Schwierigkeiten: Algenwuchs, Besiedlung durch Bakterien, Einfluss der Apparateoberfläche auf die Depositionsraten, organischer Stickstoff und größere Partikel werden oft nicht erfasst

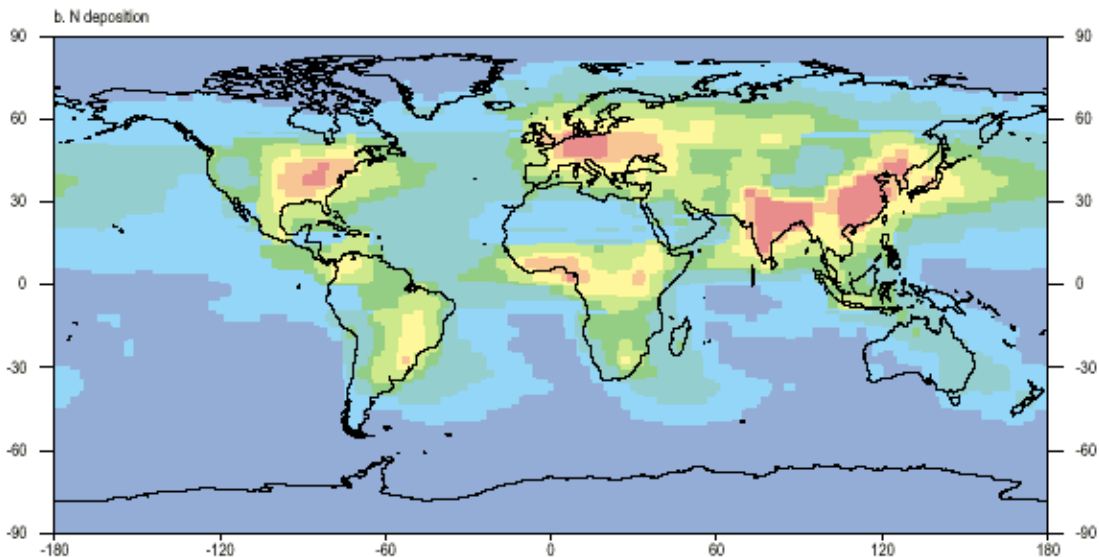
Bilder: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA
 URL: <http://water.usgs.gov/nrp/proj.bib/hawaii>

Auswirkung von Messmethoden der Deposition (nass + trocken, Niederschlag) auf berechnete Kenngrößen einer *Picea rubens*-Fläche in den Smoky Mountains.

	Nährstoffflüsse ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$)				
	N	S	Ca	Mg	
Deposition					
nass + trocken	27	35	16	2.3	
Niederschlag	5	24	10	1.7	
Bedarf	19	2.5	7.3	0.9	Bedarf = Nährstoffe in Blättern + Holzzuwachs + Wurzelzuwachs
Kronenauswaschung					Kronenauswaschung = Kronendurchlass + Stammabfluss - Gesamtdeposition
nass + trocken	-3	5	2	1.2	
Niederschlag	6	12	11	1.9	
Aufnahme					Aufnahme = Nährstoff in Streu + Kronenauswaschung + Wurzelumsatz + Holzzuwachs + Wurzelzuwachs
nass + trocken	7	6.2	8.3	1.7	
Niederschlag	13	13.2	17.3	2.4	
Verlagerung					Verlagerung = Bedarf - Aufnahme
nass + trocken	11	-3.7	-1.0	-0.8	
Niederschlag	6	-10.7	-10.0	-1.3	

Taylor et al. 1994

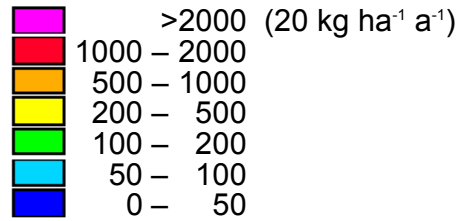
Gesamt-N-Deposition (1992)



RIVM/UNEP (1999)

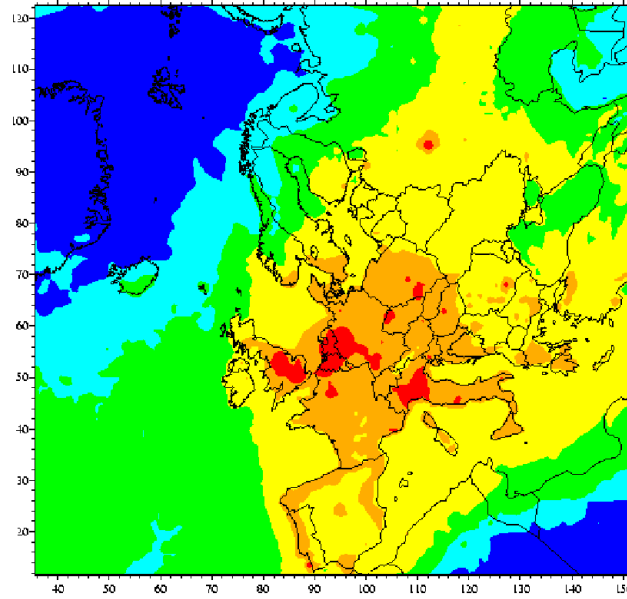
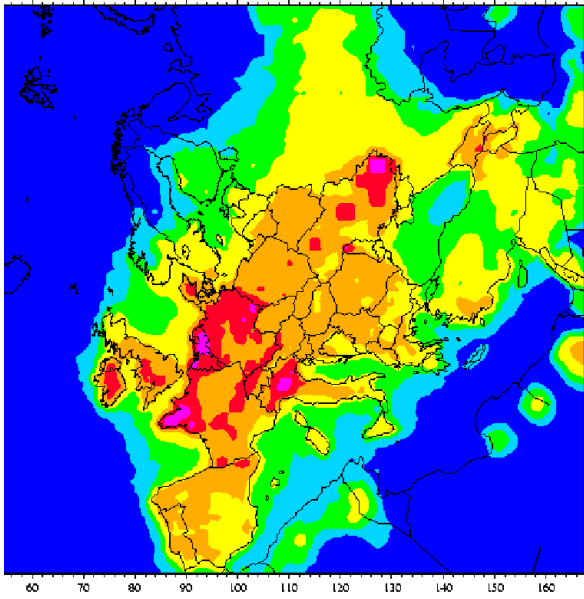
N-Deposition in Europa 1999 (mg N m⁻² a⁻¹)

<http://www.emep.int/>



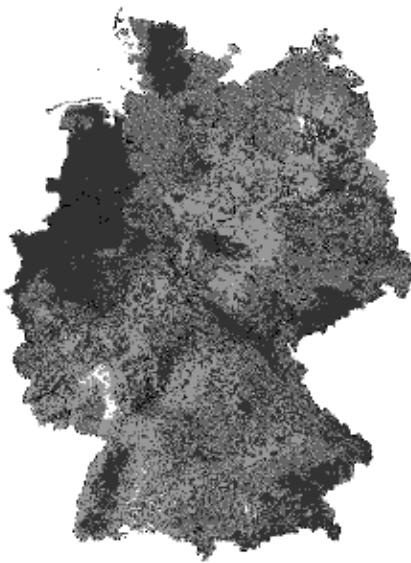
NH₄⁺

NO₃⁻



Mittel 1987 – 1989

Mittel 1993 – 1995



0 100 200 300 Kilometer

Gesamtdeposition* Stickstoff (N=NH_x-N + NO_y-N)

Mittelwerte
1987 bis 1989
und
1993 bis 1995

Interpolierte Meßwerte und
EDACS- und EUTREND-
Modellberechnungen

*nasse + trockene Deposition

in eq/ha*a	in kg/ha*a
482 - 900	6.8 - 12.6
900 - 1300	12.6 - 18.2
1300 - 1700	18.2 - 23.8
1700 - 6279	23.8 - 88.0

Datenquellen:
INS, Universität Stuttgart
RIVM, Bilthoven
Umweltbundesamt
Deutscher Wetterdienst
Umweltbehörden und Forstliche
Forschungsanstalten der Länder
Corine Land Cover
und andere

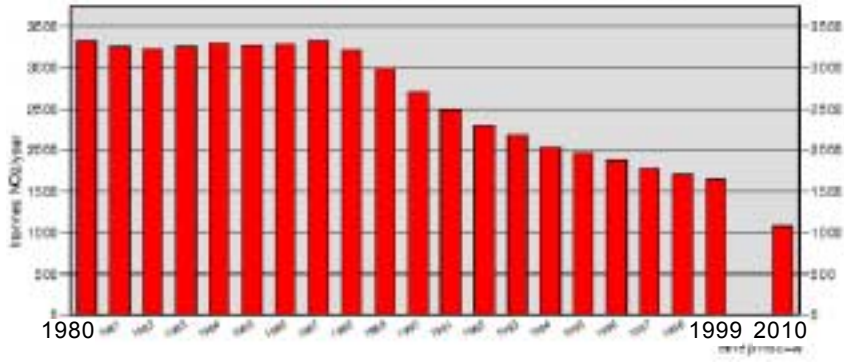
National Focal Center
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart
National Institute of Public
Health and the Environment, RIVM
Bilthoven, Niederlande

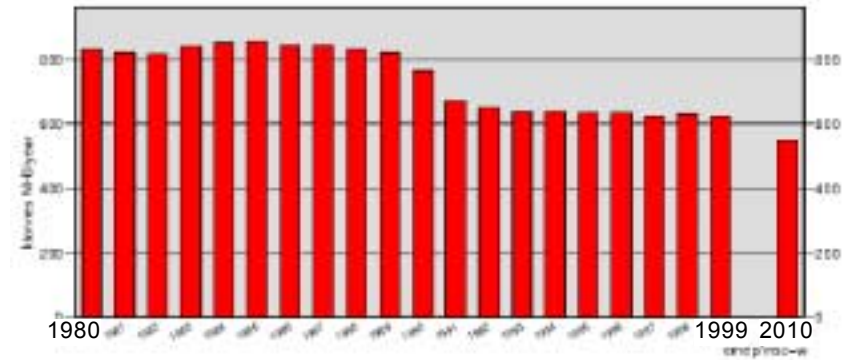
Bearbeitung (MAB):
Th. Geiger, R. Köhls, F. Anshelm

Quelle: Umweltbundesamt

Emission von Stickoxiden in Deutschland

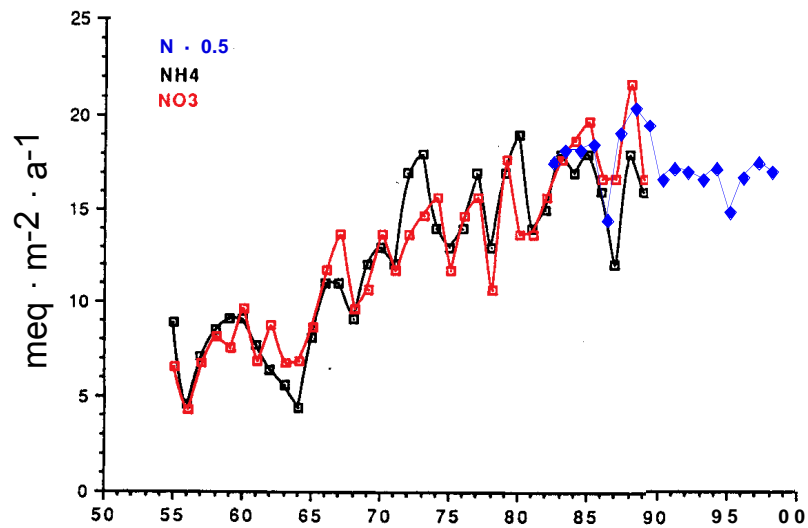


Emission von Ammonium in Deutschland

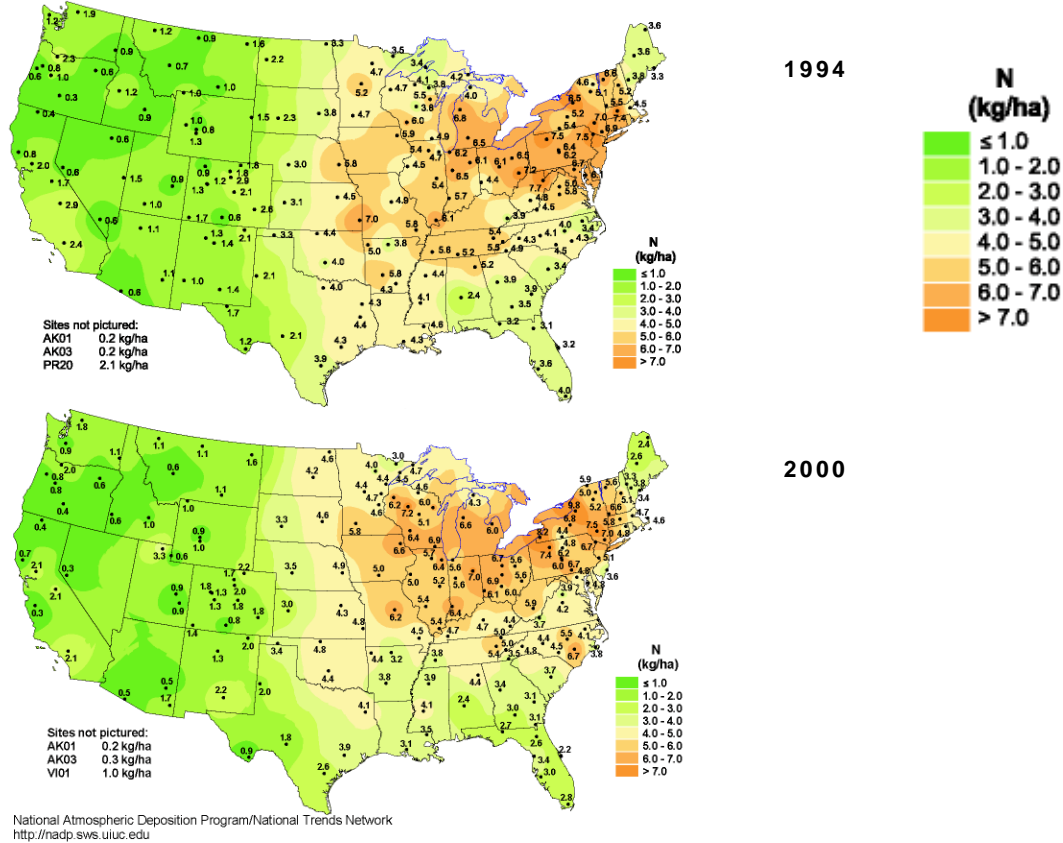


<http://www.emep.int/>

Nasse Stickstoffdeposition in Süd-Mittelschweden



Nasse Deposition (Nitrat + Ammonium)



Auswirkungen der N-Deposition

Physiologische Schäden

- unbedeutend, außer bei hohen Konzentrationen, d.h. nahe den Quellen
- Ammonium wird von Blättern aufgenommen, andere Kationen ausgewaschen
- bislang vor allem an Bäumen und Kulturpflanzen untersucht

Bodenversauerung

- pH-Absenkung
- Verlust der Pufferkapazität
- Auswaschung von basischen Kationen, Freiwerden von toxischen Al^{+++} -Ionen, Verlagerung des Ammonium-Nitrat-Gleichgewichts
 ⇒ säureresistente Arten werden dominant

Wachstumsbeschleunigung

- Änderung der Wettbewerbsverhältnisse
 - sparsame, langsam wachsende Arten werden von hohen, schnellwüchsigen verdrängt
 - Artenreichtum kann zu oder abnehmen
- höhere Streuproduktion
 - mehr Brandmaterial
 - weniger Keimplätze, ...

sekundärer Stress

- höhere Anfälligkeit für Pathogene, stärkere Herbivorie
- höhere Empfindlichkeit für Frost und Dürre

Verlust von Mykorrhiza

- Änderung der Konkurrenzverhältnisse
 - Änderung des Artenreichtums?
 - C4 \Rightarrow C3
 - Gras \Rightarrow Bäume
 - weniger Leguminosen
 - Invasion
 - Symbiosen?
- andere Nährstoffe werden begrenzend
 - Nährstoff-Ungleichgewicht, Baumsterben?
 - Landwirtschaft: Düngung mit Schwefel, Überflüssige N-Düngung
- Auswaschung in Boden, Grundwasser, Flüsse
- Wechselwirkung mit höherem CO₂-Gehalt, T, Vegetationsdauer, ...

Schadwirkungen in ausgewählten westeuropäischen Ökosystemen

Küstengewässer

- direkte Deposition und Eintrag über Flüsse
- Algenblüte, O₂-Knappheit, Fischsterben

Süßgewässer

- Versauerung (geringe Pufferkapazität)
 - dadurch Anstieg der Konzentration von SO₄²⁻, Al⁺⁺⁺ (NO₃⁻, NH₄⁺)
 - oft keine direkte Eutrophierung, da P-limitiert
 - mögliche direkte Schäden in N-armen alpinen Seen
 - Zunahme von *Juncus bulbosus*, *Lemna gibba*, *Sphagnum cuspidatum*, *Depranocladis fluitans*, Verdrängung von seltenen Wasser- und Uferpflanzen (*Lobelia*, *Littorella*, *Isoëtes*)

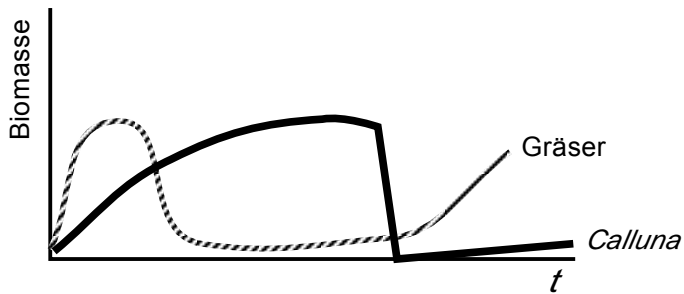
- Graslande (Grasfluren)
 - oft nährstoffarm durch Entzug mit Heuentnahme
 - Vegetation oft niedrig als Anpassung an Beweidung und Mahd
- Kalkmagerrasen
 - Arten sind oft selten, da an hohen pH angepasst
 - Zunahme von *Brachypodium pinnatum* (speichert N im Wurzelstock) in NL aber nicht in GB
 - Abnahme von charakteristischen Flechten und Moosen
 - Versauerung
 - Alvar auf Öland reagiert nicht auf N da zu trocken (400-500 mm)
- mäßig-saure Magerrasen
 - limitierender Faktor N oder P
 - hohe, produktive Gräser verdrängen niedrige Arten
 - Wechselwirkung mit Beweidung
- saure Graslande
 - Artenreichtum durch kleinräumige Unterschiede der Böden
 - Unterschiede werden durch N-Zufuhr überdeckt
 - oft Verdrängung durch Gräser und Zwergsträucher

Moore

- Hochmoore (sauer, aber N-arm)
 - Zunahme von N-bedürftigen Arten (*Molinia caerulea*, *Deschampsia flexuosa*, *Betula pubescens*)
 - Torfmoose werden von anderen Moosen verdrängt
 - aus Wettbewerb
 - N-Versorgung ist supra-optimal für Bulten-Torfmoose
 - auf Bulten Zunahme von hohen Grasartigen und Ericaceen, Verdrängung von *Drosera* und anderen niedrigen Arten
 - Torfzersetzung wird erhöht, weil das C:N-Verhältnis niedriger ist
- Niedermoore, Marschen
 - Eintrag durch Oberflächenwasser oder oberflächennahes Wasser ist oft größer als durch Deposition
 - hohe Denitrifikationsraten
 - meist P-limitiert
 - Folgen der N-Deposition oft individuell

Heiden

- trockene Heiden (*Calluna*)
 - *Calluna* assimiliert 65% der Deposition durch Filterung
 - zunächst höheres Wachstum
 - Schäden durch höhere Empfindlichkeit für Dürre, Frost, Insekten
 - Verdrängung durch Gräser, wenn Lücken im Bestand auftreten



- feuchte Heiden (*Erica*)
 - Verdrängung von *Erica* durch höheres *Molinia*

Waldboden

- Veränderungen im Zusammenhang mit N erst in den den 90er Jahren untersucht
- meist qualitative Untersuchungen oder korrelative Beobachtungen
- Düngungsexperimente mit hohen Einmal-Gaben
- Ausbringung des (festen) Düngers auf den Waldboden
- keine Berücksichtigung der natürlichen Sukzession, Standortsunterschiede, Management
- quantitative Untersuchungen vor allem in Südschweden
 - Zunahme von N-Indikatoren, die aber auch meist R-Indikatoren sind

Beurteilung der Gefährdung

• Ökosystem

- N-Sättigung des Bodens (Ågren & Bosatta 1988, Aber et al. 1989)
 - Anzeichen: Nitrat- oder Ammoniumauswaschung
 - Zusammenhang Depositionsmenge – Nitratauswaschung nicht stark
 - nicht sicher, ob Ursache oder Wirkung für Waldschäden
- Kritische Belastung (Critical Load)
 - Schwelle, ab der Auswirkungen in Ökosystemfunktion- und Struktur beobachtbar werden
 - bei etwa $10 - 30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Düngungsexp., Simulationen)
 - berücksichtigt nicht P-Limitierung, Standort, Management

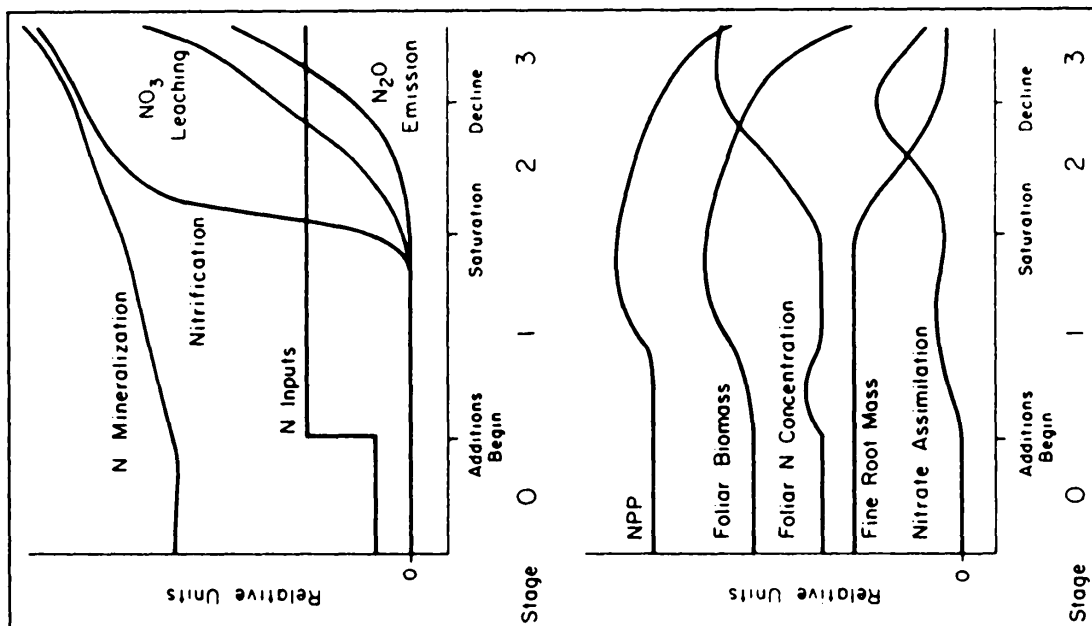
• Zeigerarten

• Physiologisch

• Konzentrationsverhältnisse

- C:N, N:Kationen, N:P, Mg:N, Arginin-Konzentration

◊ oft fehlen historische Vergleichsmöglichkeiten und es gibt alternative Erklärungen



Gegenmaßnahmen

- Wald in produktiver Phase halten
- Entzug von Biomasse (Heuernte, komplette Bäume)
- Düngung mit P oder Mg damit das Wachstum angeregt und mehr N fixiert wird
- Feuer

Offene Fragen

- Beschreibung der N-Flüsse und Umsätze, besonders der unterirdischen (Wurzelstreumineralisation, Auswaschung, Denitrifikation, Symbionten)
- Auswirkungen auf Steppen, mediterrane, arktische und alpine Vegetation
- unterschiedliche Wirkung von Nitrat- und Ammoniumdeposition
- großskalige Auswirkungen (Ökosysteme, Landschaften)
- Auswirkungen auf Tiere
- Auswirkungen auf Symbiosen mit Mykorrhizen
- Auswirkung auf mikrobielle Bodenkruste in ariden und semiariden Geieten, indirekte Folgen für Bodenerosion
- indirekte Wirkung auf höhere Streuproduktion und damit Brandhäufigkeit in ariden und semiariden Gebieten
- Wechselwirkungen mit CO₂, Erwärmung (Stoffwechsel, Verlängerung der Vegetationsdauer)
- Management
- Langzeitstudien mit realistischen Depositionswerten

Table 1 Summary of the risks of the different impacts of atmospheric nitrogen deposition in semi-natural and natural ecosystems (+, high; ±, intermediate; -, low; ?, unknown)

	Direct toxicity	(Soil) acidification	Changes in competitive relations	Secondary stresses (pests, frosts)
Fresh waters				
Lakes and streams	-	+	-?	-
Shallow soft-water lakes	-	+	+	?
Wetlands				
Ombrogenous (raised) bogs	±	-	+	?
Mesotrophic fens	-	±	+	?
Marshes	-	-	-?	-
Species-rich grasslands				
Calcareous grasslands	-	-	+	?
Neutral-acidic grasslands	-	±	+	?
Species-rich heaths/acid grasslands	-	+	+	?
Montane-subalpine grasslands	-	±?	+?	?
Heathlands				
Lowland dry heathlands	-	±	+	+
Lowland wet heathlands	-	-	+	?
Upland <i>Calluna</i> heaths	±?	±	+	±?
Arctic and alpine heaths	±?	±?	+?	±?
Diversity in forests				
Lichens	+	±	±	-
Field layer of				
acidic coniferous forests	-	+	+	?
acidic deciduous forests	-	+	+	?
calcareous forests	-	-	+	?

Bobbink et al. 1998

Literatur zum Thema:

- Bobbink, R., Hornung, M. and Roelofs, J.G.M. 1998. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. – *Journal of Ecology* 86: 717-738.
- Fenn, M.E., Poth, M.A., Aber, J.D., Brown, J.S., Bormann, B.T., Johnson, D.W. and Lemly, A.D. 1998. Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. – *Ecological Applications* 8: 706-733.
- Freer-Smith, P.H. 1998. Do pollutant-related forest declines threaten the sustainability of forests? – *Ambio* 27: 123-131.
- Lee, J.A. 1998. Unintentional experiments with terrestrial ecosystems: ecological effects of sulphur and nitrogen pollutants. – *Journal of Ecology* 86: 1-12.
- Lee, J.A. and Caporn, S.J.M. 1998. Ecological effects of atmospheric reactive nitrogen deposition on semi-natural terrestrial ecosystems. – *New Phytologist* 139: 127-134.
- Jefferies, R.L. and Maron, J.L. 1997. The embarrassment of riches: atmospheric deposition of nitrogen and community and ecosystem processes. – *Trends in Ecology and Evolution* 12: 74-78.
- Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W. and Schlesinger, W.H. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. – *Ecological Applications* 7: 737-750.
- Taylor jr, G.E., Johnson, D.W. and Andersen, Ch.P. 1994. Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. – *Ecological Applications* 4: 662-689.
- Hofmann, G., Heinsdorf, D. and Krauß, H. 1990. Wirkung atmogener Stickstoffeinträge auf Produktivität und Stabilität von Kiefern-Forstökosystemen. – *Beiträge für die Forstwirtschaft* 24: 59-73.