# Stickstoffdeposition

Wissenschaftliche Grundlagen des Naturschutzes

SS 2008 (korrigiert 2010)

Martin Köchy

Universität Potsdam

http://sci.martinkoechy.de/lectures

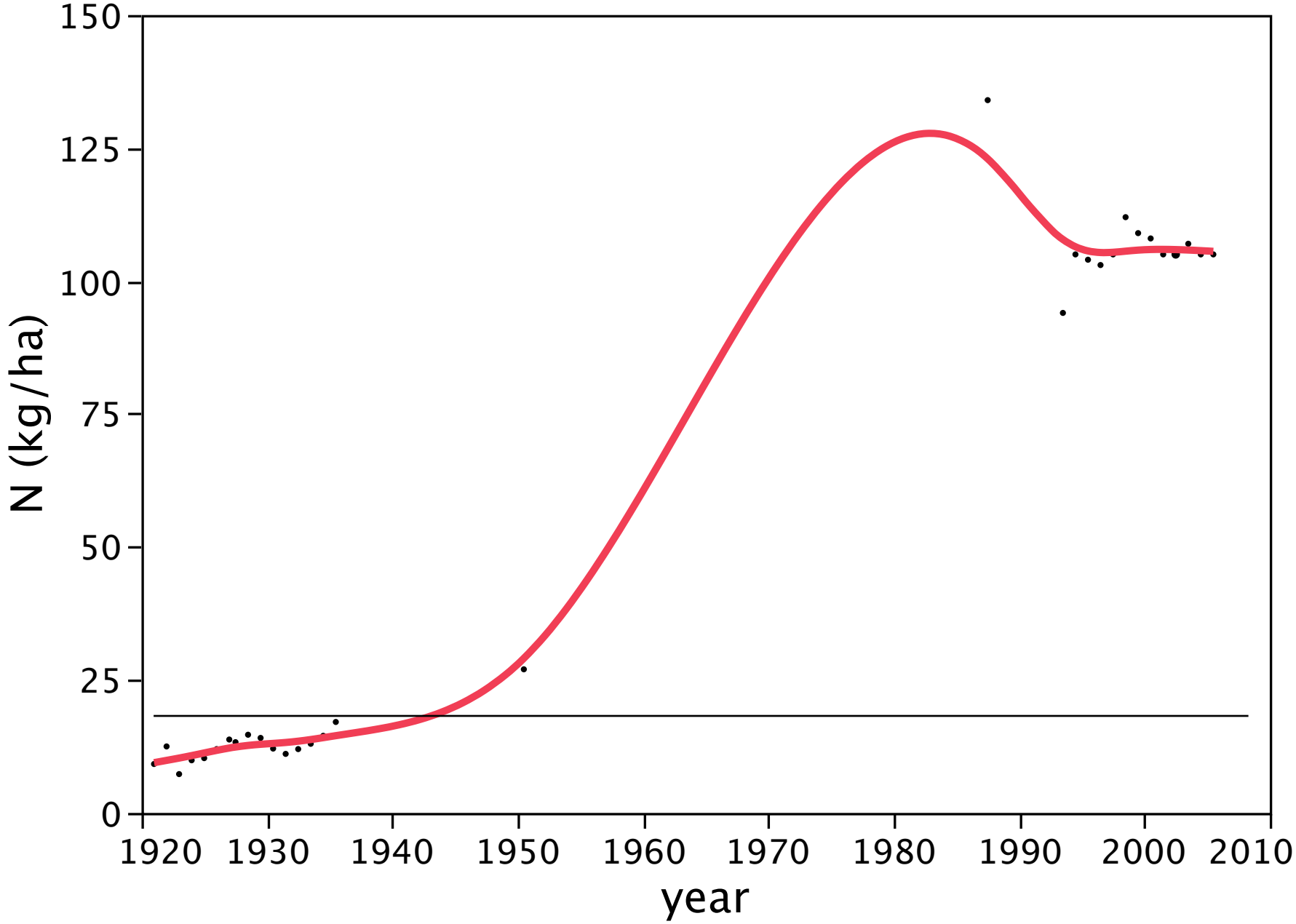
# Atmosphärische Deposition

ist der Übergang von Stoffen aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche

= der Austrag und die Ablagerung von gelösten, partikelgebundenen oder gasförmigen Luftinhaltsstoffen auf Oberflächen biotischer oder abiotischer Systeme.

Biotische Akzeptoren sind die oberirdischen Sprossteile von Pflanzen, insbesondere die Blätter und Nadeln.

# Düngemitteleinsatz in Deutschland

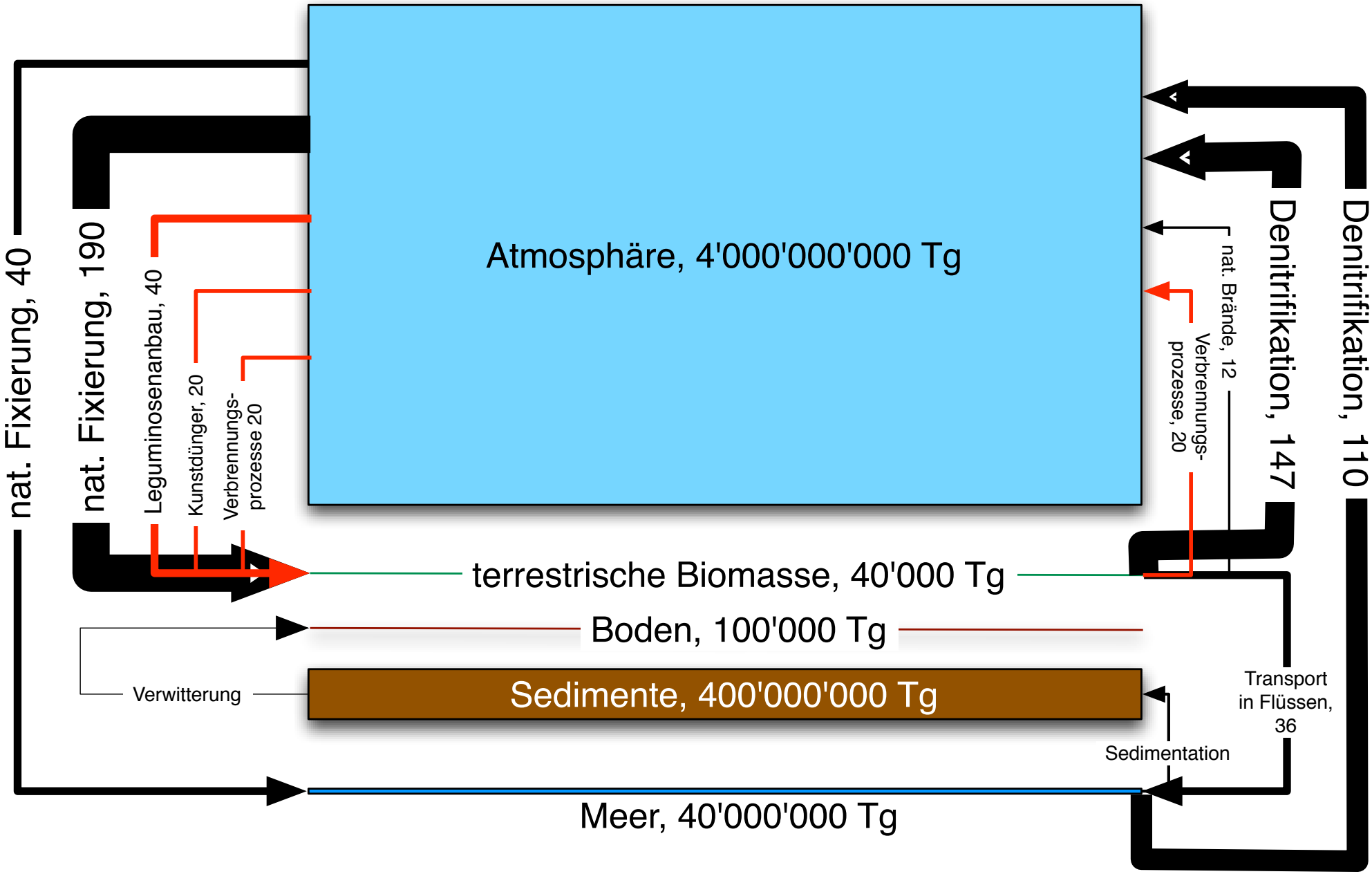



Lebendiges virtuelles Museum Online,
Statistisches Bundesamt. Umweltbundesamt

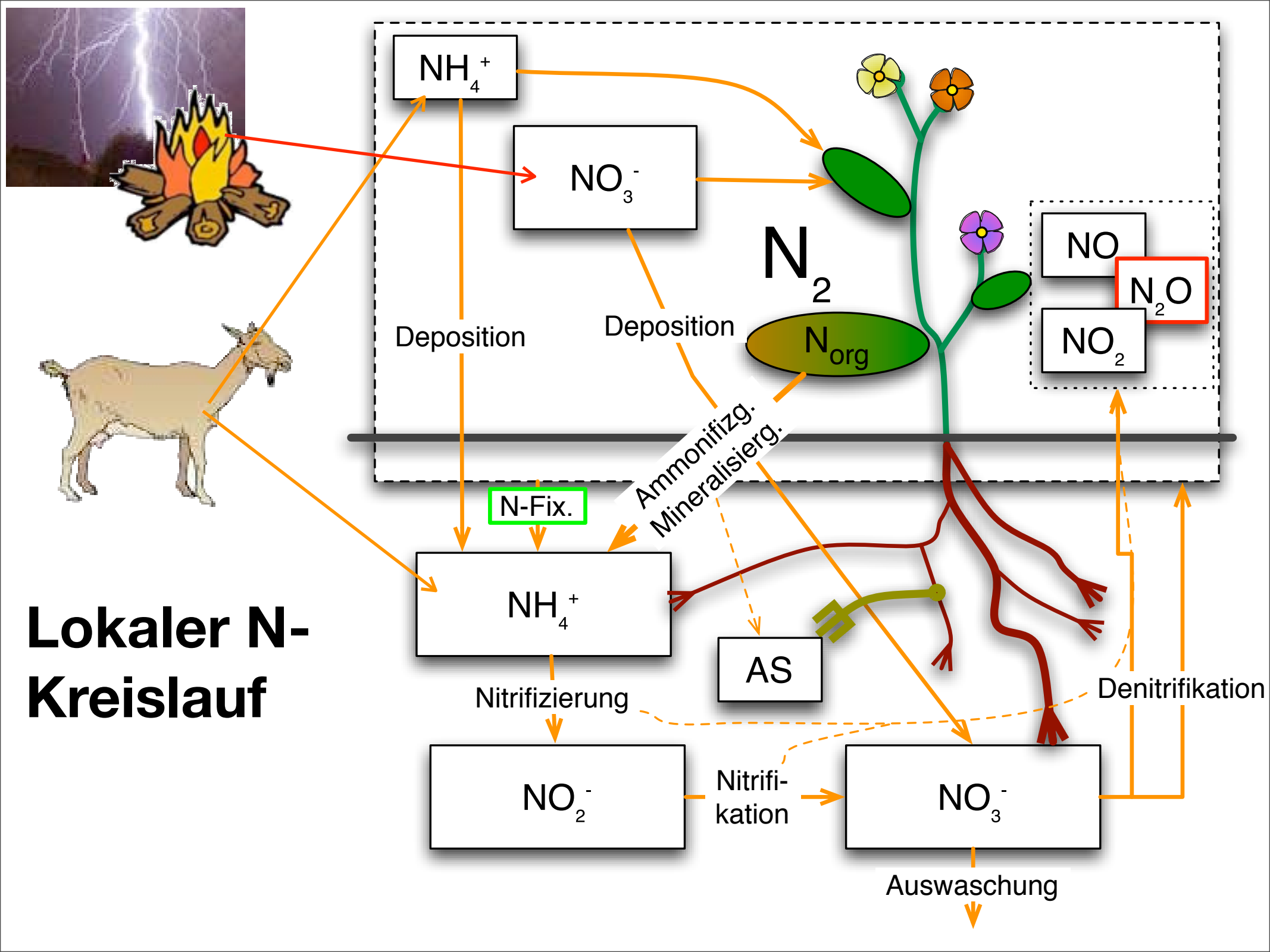
# Stickstoffkreislauf

Dimensionen
beteiligte Prozesse
Beitrag des Menschen

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




Daten: Reeburgh (1997) Bull.Ecol.Soc.Am. 78:260-267


Lokaler N-Kreislauf
$NH_4^+$
$NO_3^-$
$N_2$
$N_{org}$
NO
$N_2O$
$NO_2$
Deposition
Deposition
Ammonifizg.
Mineralisierg.
N-Fix.
$NH_4^+$
AS
Nitrifizierung
Denitrifikation
$NO_2^-$
Nitrifi-
kation
$NO_3^-$
Auswaschung

# Quellen von oxidiertem N

Verbrennungsprozesse:

$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2\ NO$$

$$N_2 + 2\ O_2 \leftrightarrow 2\ NO_2$$

Oxidation des **Luft**-Stickstoffs

$$2\ N_{org} + O_2 \leftrightarrow 2\ NO$$

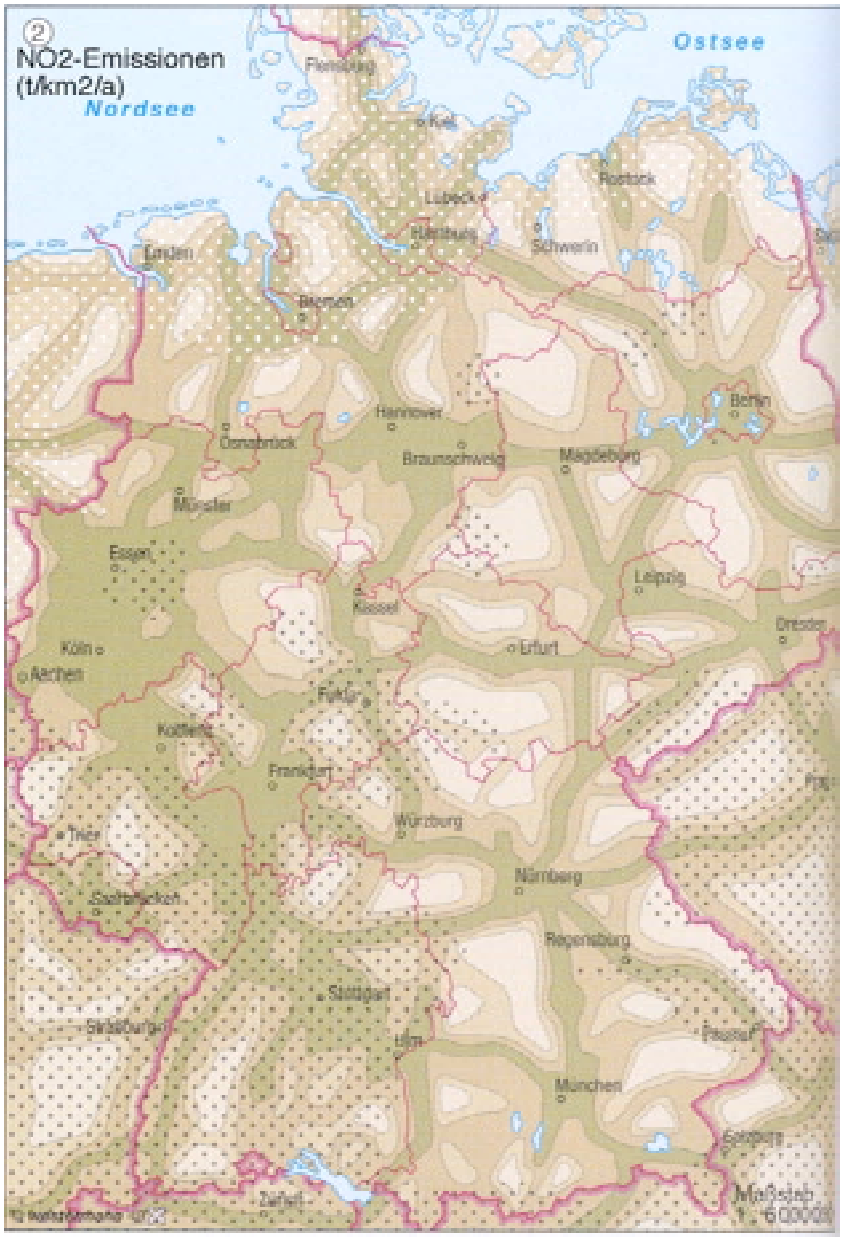
$$N_{org} + O_2 \leftrightarrow NO_2$$

Oxidation des **gebundenen** Stickstoffs

$NO_2$: Stickstoffdioxid, nitrous oxide
NO: Stickstoffmonoxid, nitric oxide
$N_2O$: Distickstoffoxid, „Lachgas“

# Emissionen

Verursacher
Anteile
räumliche Verteilung
zeitliche Entwicklung

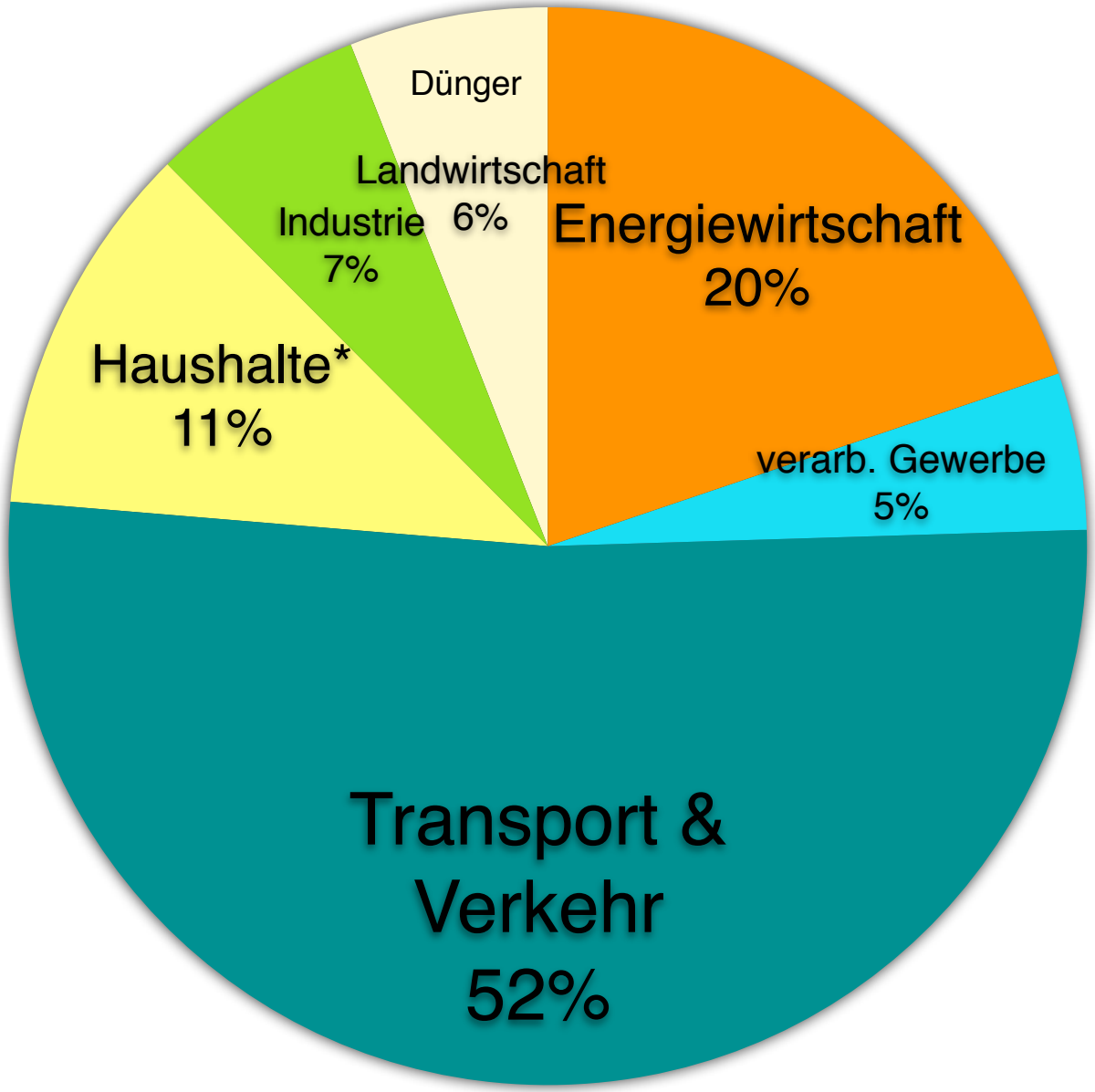


$NO_2$-Emissionen

Verkehrsdichte

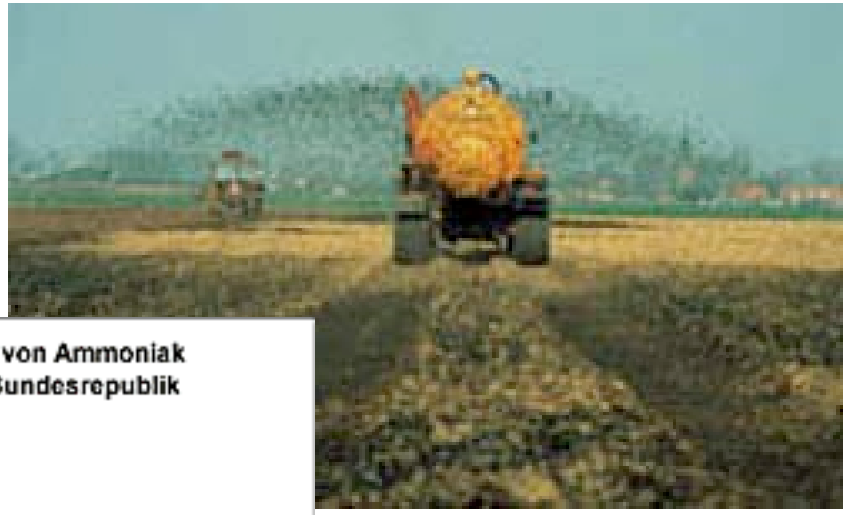
Quelle: Diercke Weltatlas

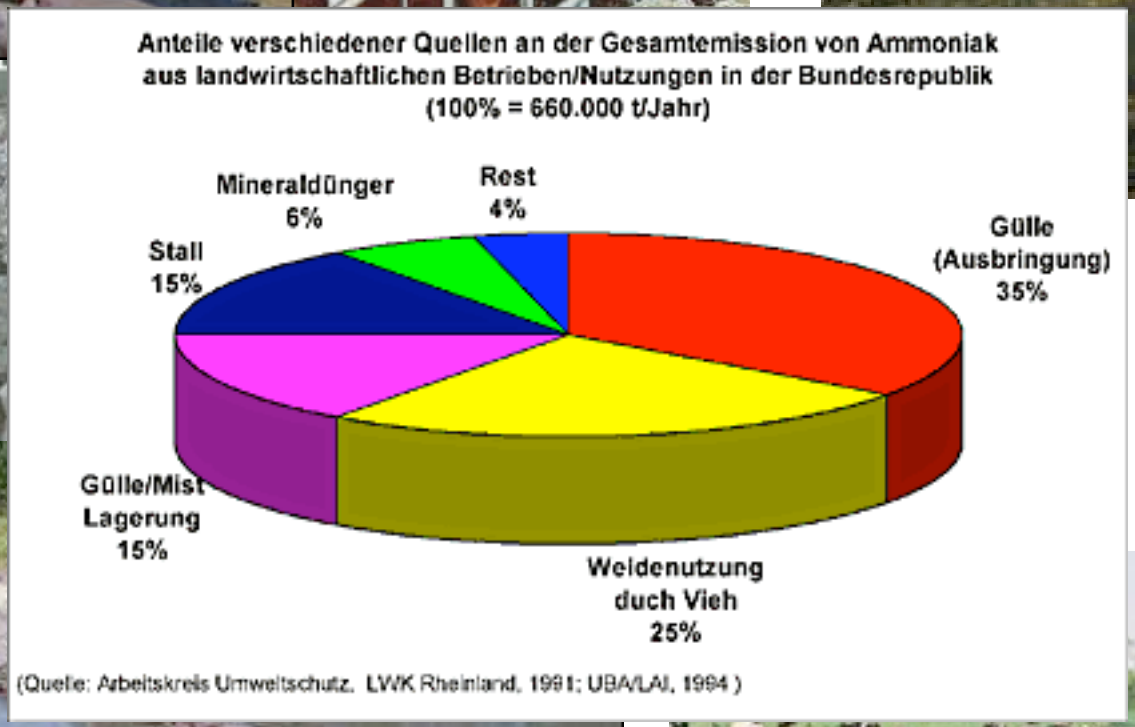
$NO_x$-Emissionen in Deutschland 2005: $1.4 \cdot 10^{12}$ g $NO_2$

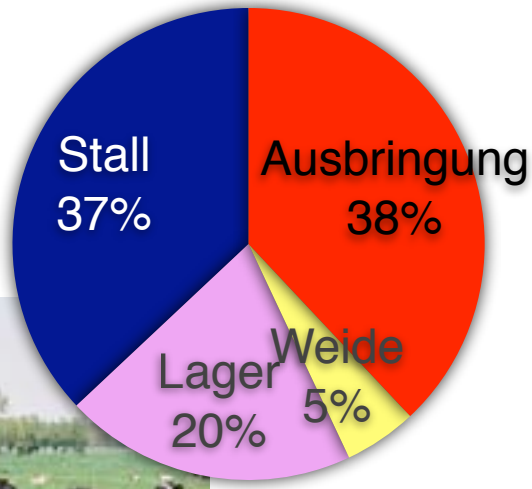



$NH_4^+$-Emissionen in Deutschland 2005: $0.6 \cdot 10^{12}$ g (95% aus Landwirtschaft)

# Ammoniak-Emissionen aus Tierhaltung

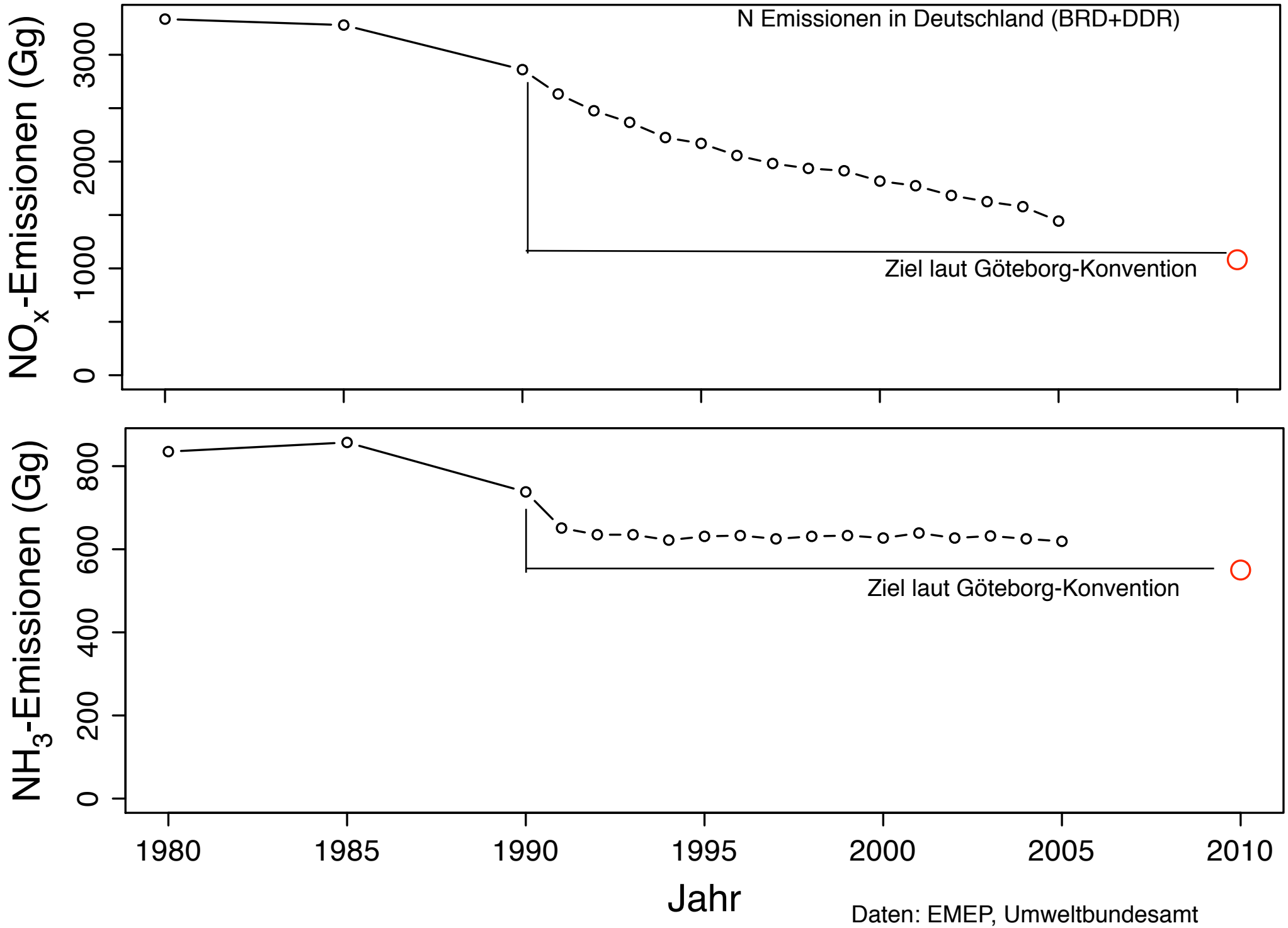




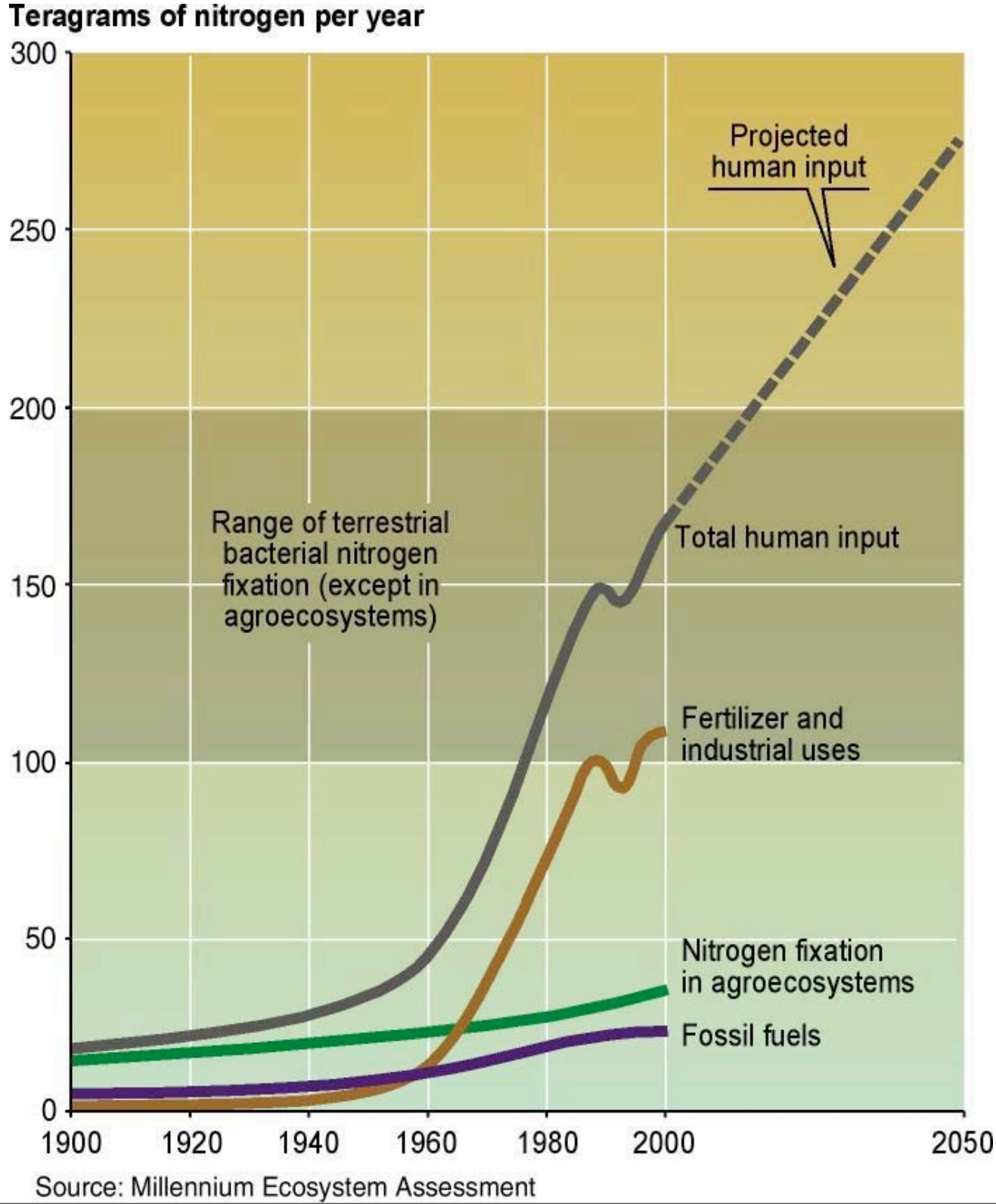



C. Pflug
2005

# Zeitreihen

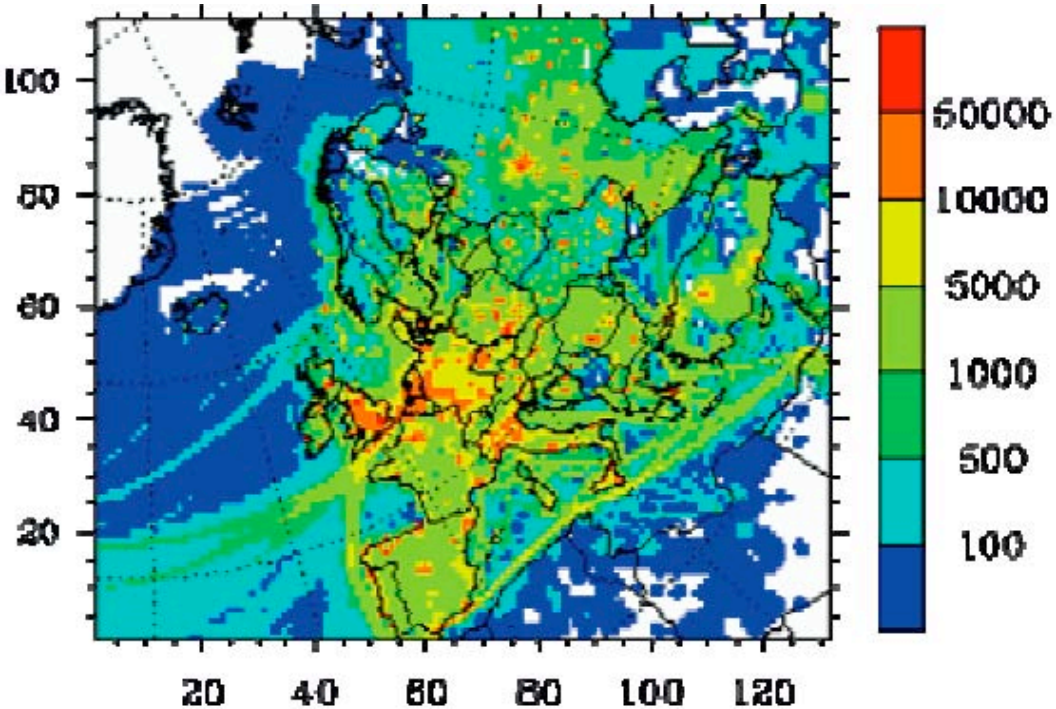

N Emissionen in Deutschland (BRD+DDR)
Ziel laut Göteborg-Konvention
$NO_x$-Emissionen (Gg)
0
1000
2000
3000
Ziel laut Göteborg-Konvention
$NH_3$-Emissionen (Gg)
0
200
400
600
800
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
Jahr
Daten: EMEP, Umweltbundesamt

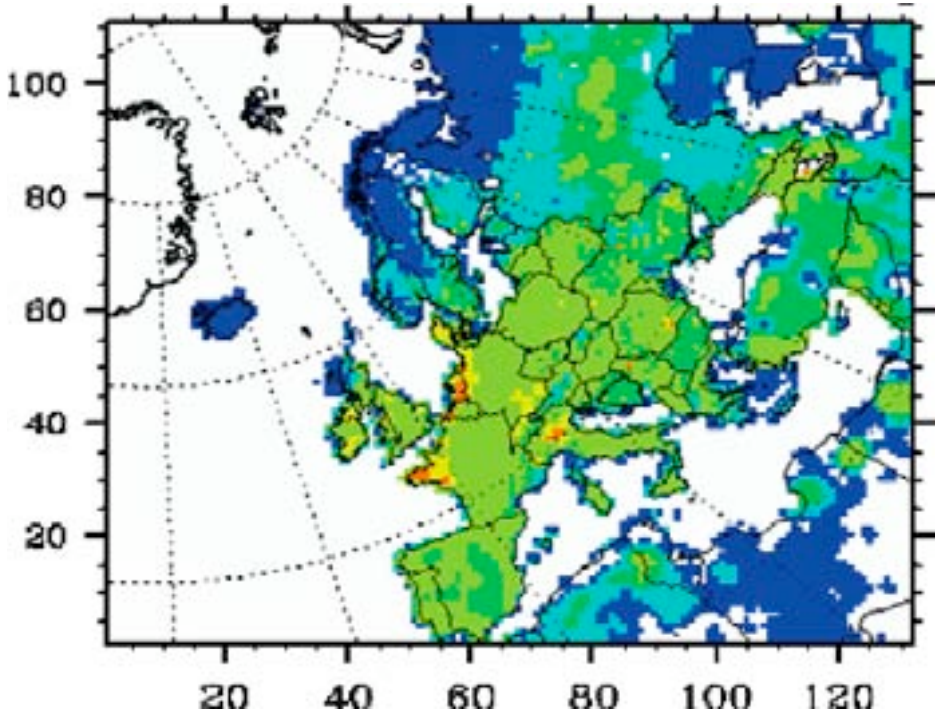
# Zeitreihen: weltweit




http://maps.grida.no/go/graphic/reactive-nitrogen-on-earth-by-human-activity-with-projection-to-2050

# Räumliche Verteilung der N-Emissionen



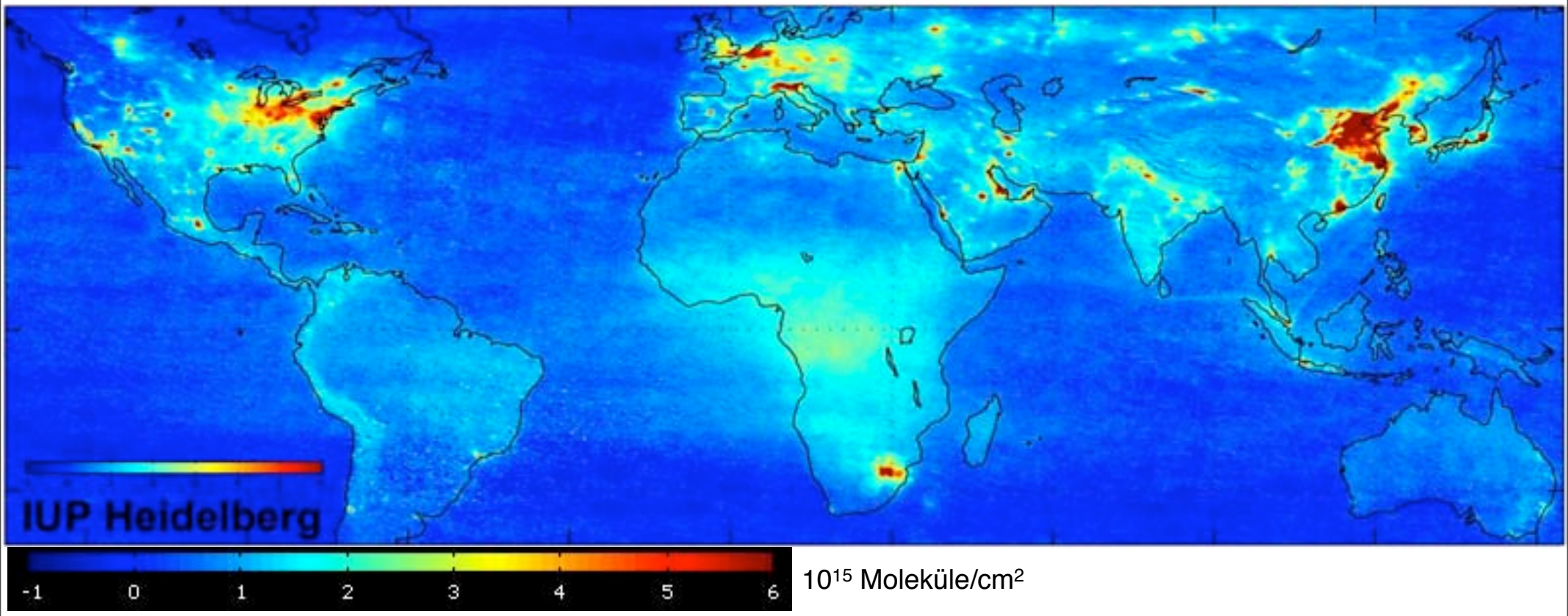

$NO_X$-Emissionen

$NH_3$-Emissionen

(Mg $NO_2$/a pro Gitterzelle) 2001

aus: EMEP Report 2005

# globale Verteilung der $NO_2$-Konzentration




$10^{15}$ Moleküle/cm$^2$

## $NO_2$-Konzentration der Luft <10 km

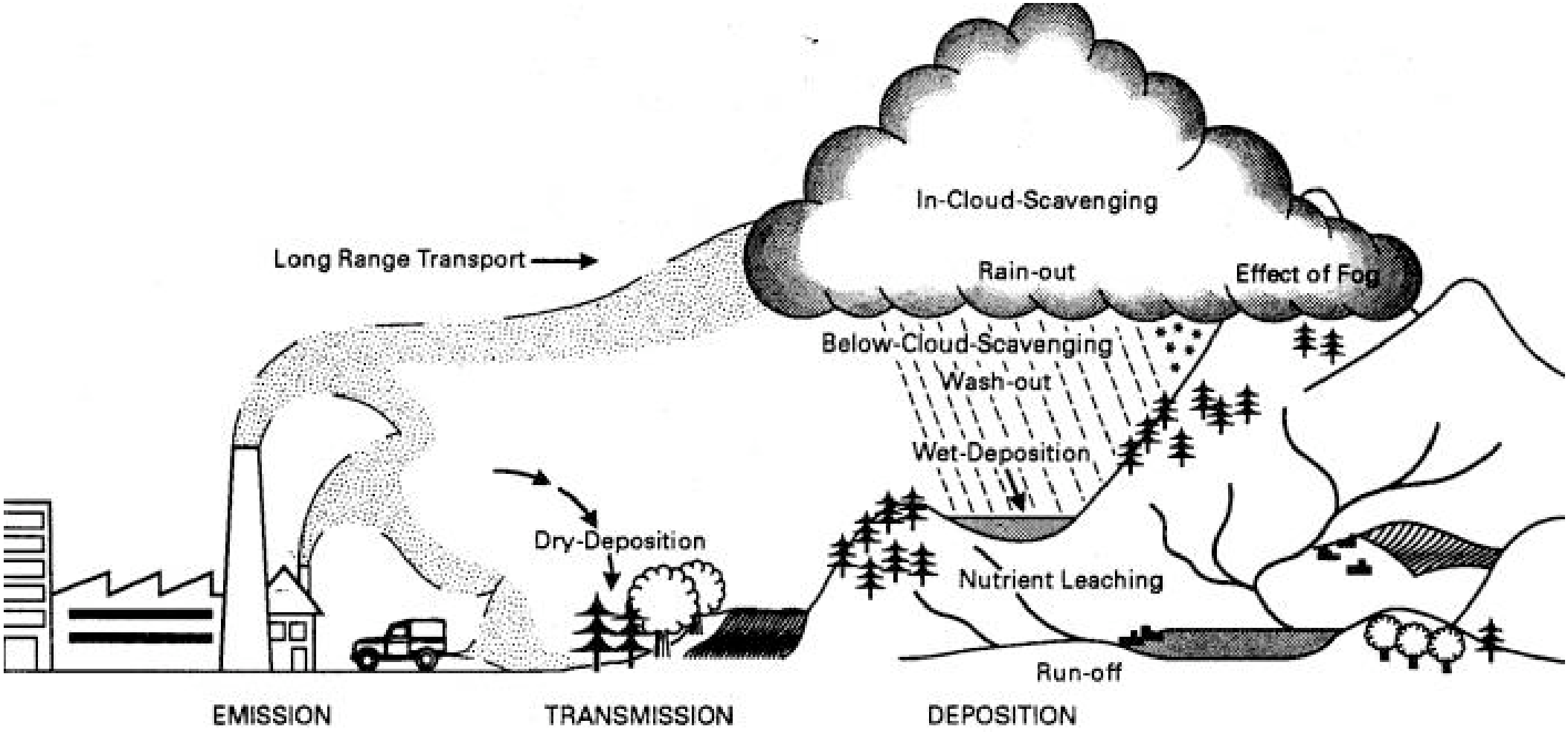
Januar 2003–Juni 2004, gemessen von Envisat

http://www.esa.int/esaEO/SEM340NKPZD_index_0.html

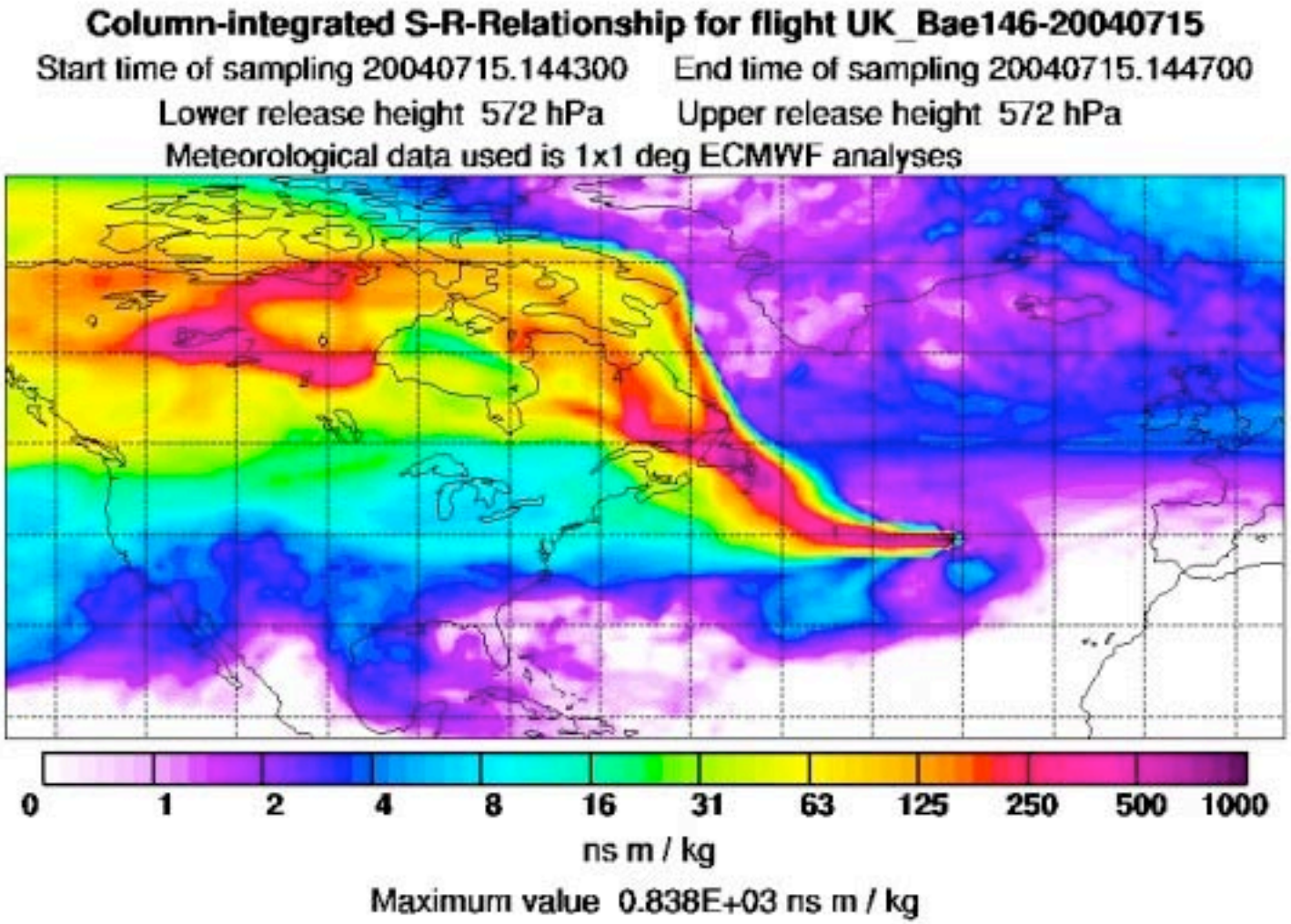
# Deposition

Ferntransport
Depositionsprozesse
Messmethoden, Unsicherheiten

# Verlagerung in der Atmosphäre

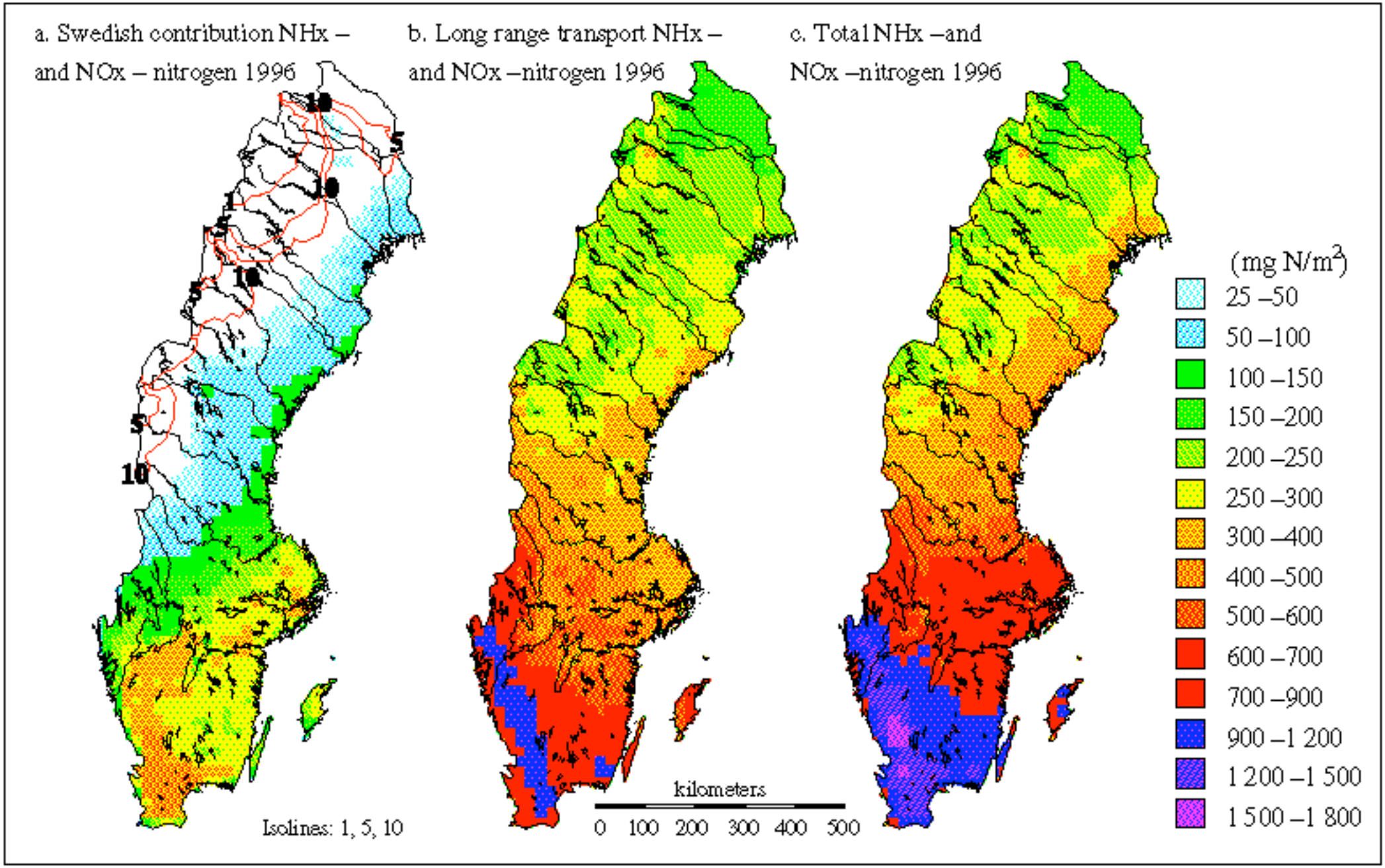


# Ferntransport



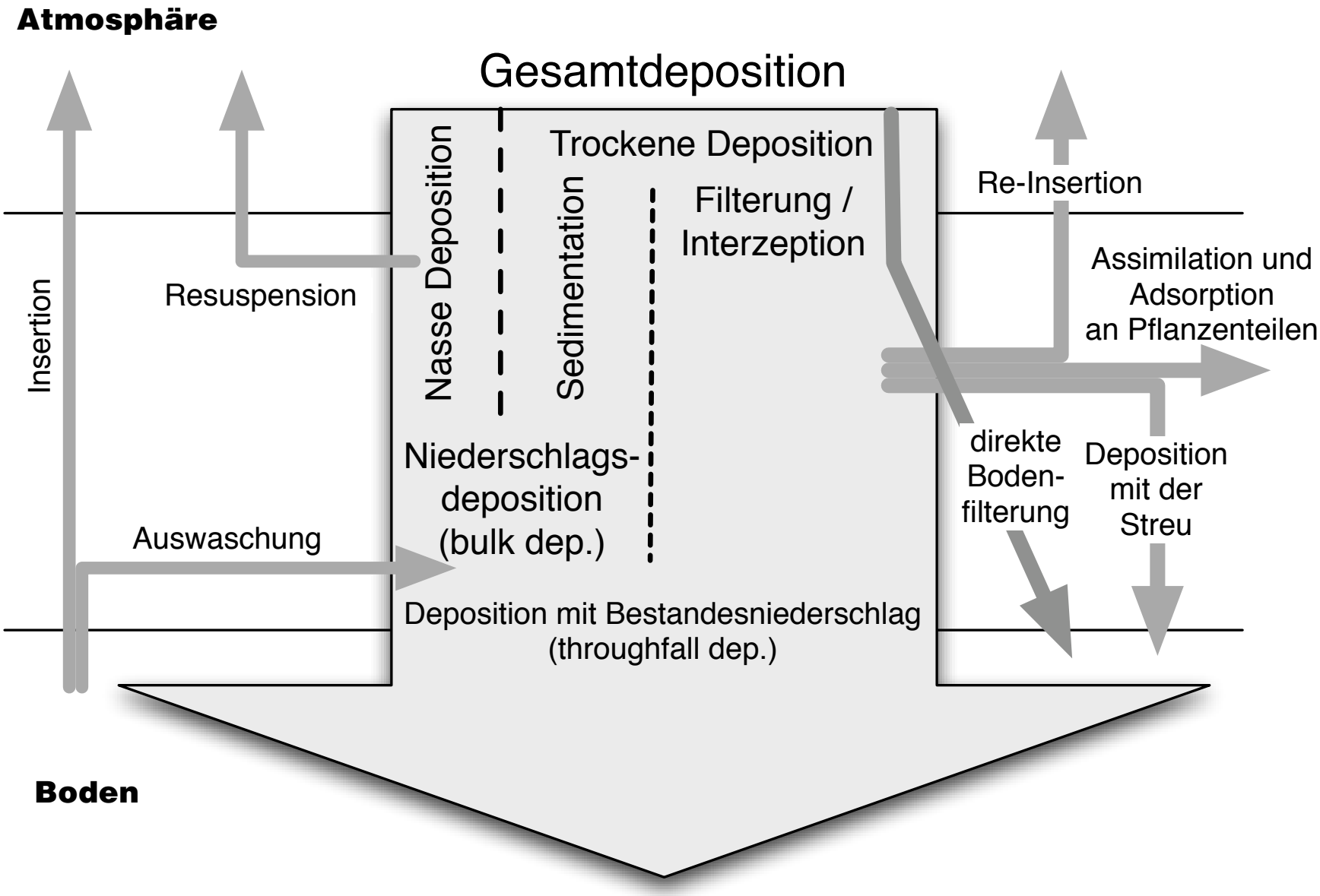

Luftbewegungen führen Schadstoffe aus Waldbränden in Alaska nach Europa

# Ferntransport: Schweden




aus Schweden importiert gesamt

# Depositionsprozesse




nach Ulrich 1990

# Messung der Deposition

## Nasse Deposition

Regensammler mit Deckel

## Trockene Deposition

Petrischalen, Filter

TD = Durchlass – nasse Deposition
(+ Absorption – Auswaschung)

## Niederschlagsdeposition

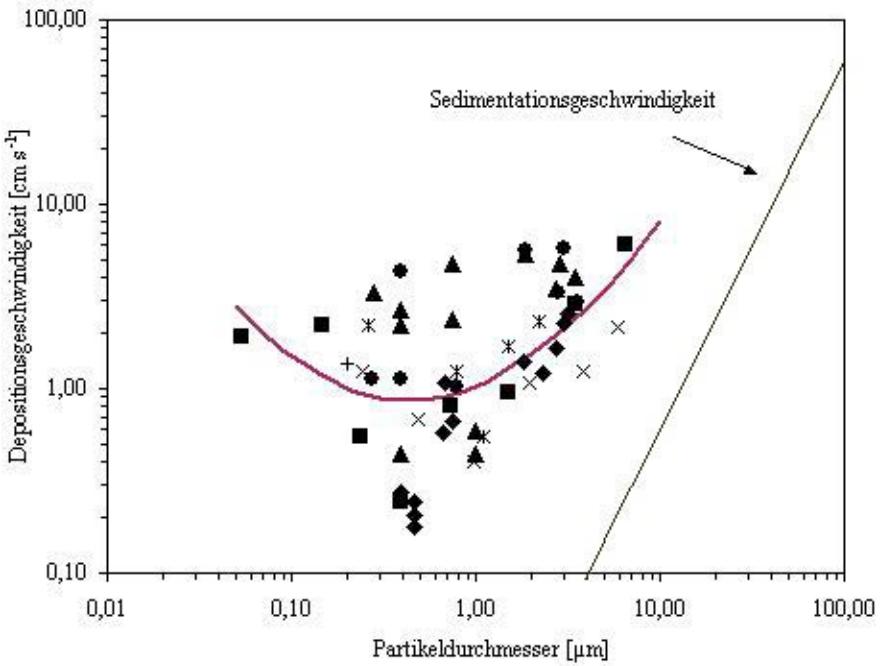
offene Regensammler

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
U.S. Forest Service; http://www.fs.fed.us/psw/topics/air_quality/resin_collectors

# Trockene Deposition

Schwerkraft
Kollision mit Objekten
Diffusion




Bleyl 2002, Diss.

Depositionsgeschwindigkeit, v

= Flussdichte/Konzentration [cm/s]
abhängig von Partikelgröße (nicht linear)
und Struktur- und Chemie der
Oberfläche

# Messung der Deposition: Gesamtdeposition

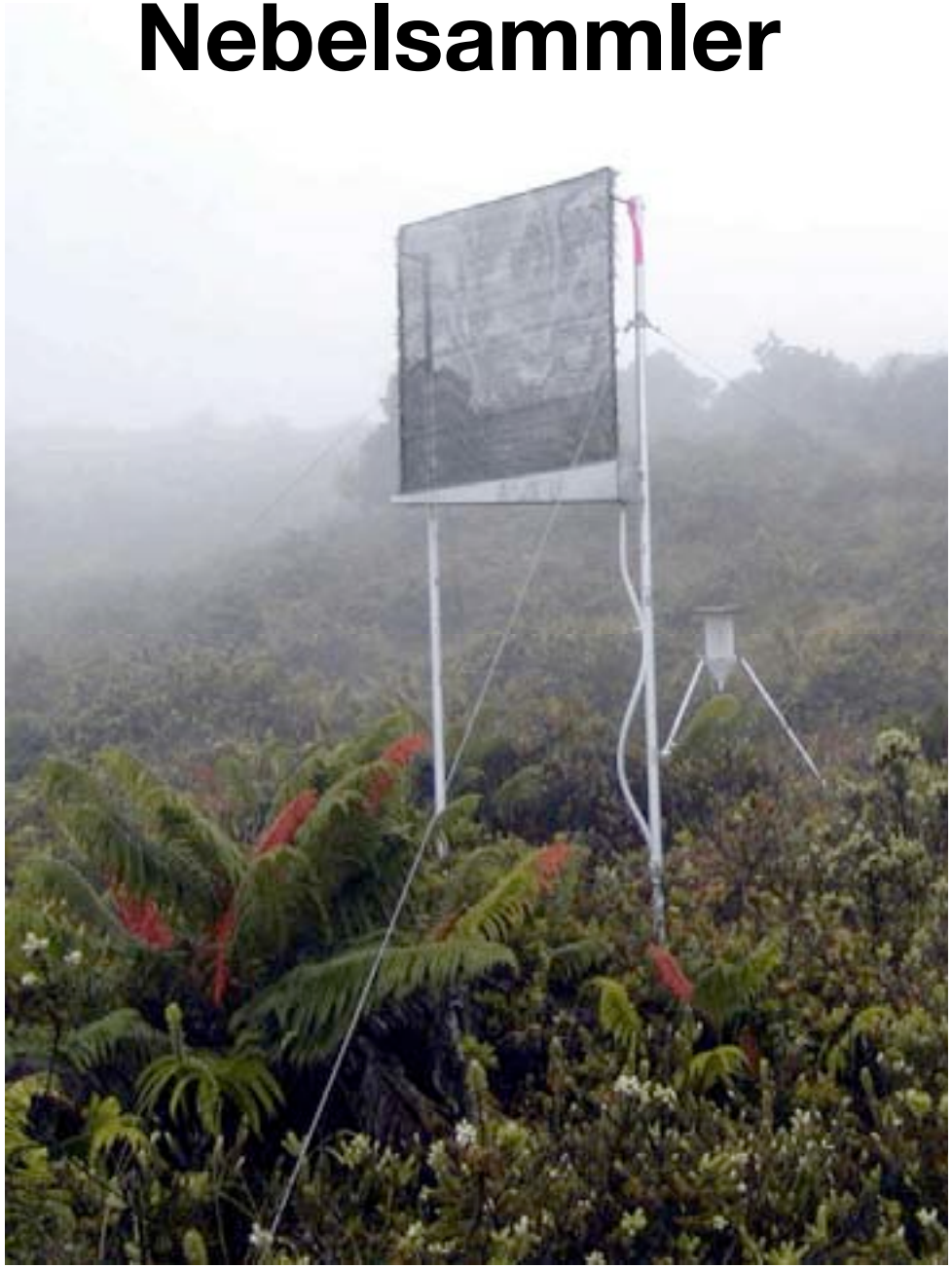
## Ionenaustauscher-Harze

- messen $NO_x$, $NH_y$, organ. N, Partikel-N
- geringe Kosten/Sammler: größere Anzahl, größere Flächenabdeckung
- akkumulieren Einträge über längere Zeit

- aber: unbekannt, welche N-Verbindungen wie stark adsorbiert werden
- nicht-ionische N-Verbindungen werden nicht adsorbiert

# Messung der Deposition: Auskämmung

## Nebelsammler



## Nebelharfe

# Messung der Deposition: Bestandesniederschlag

Regensammler unter Kronendach

Röhren, gefüllt mit Ionen-austauschern

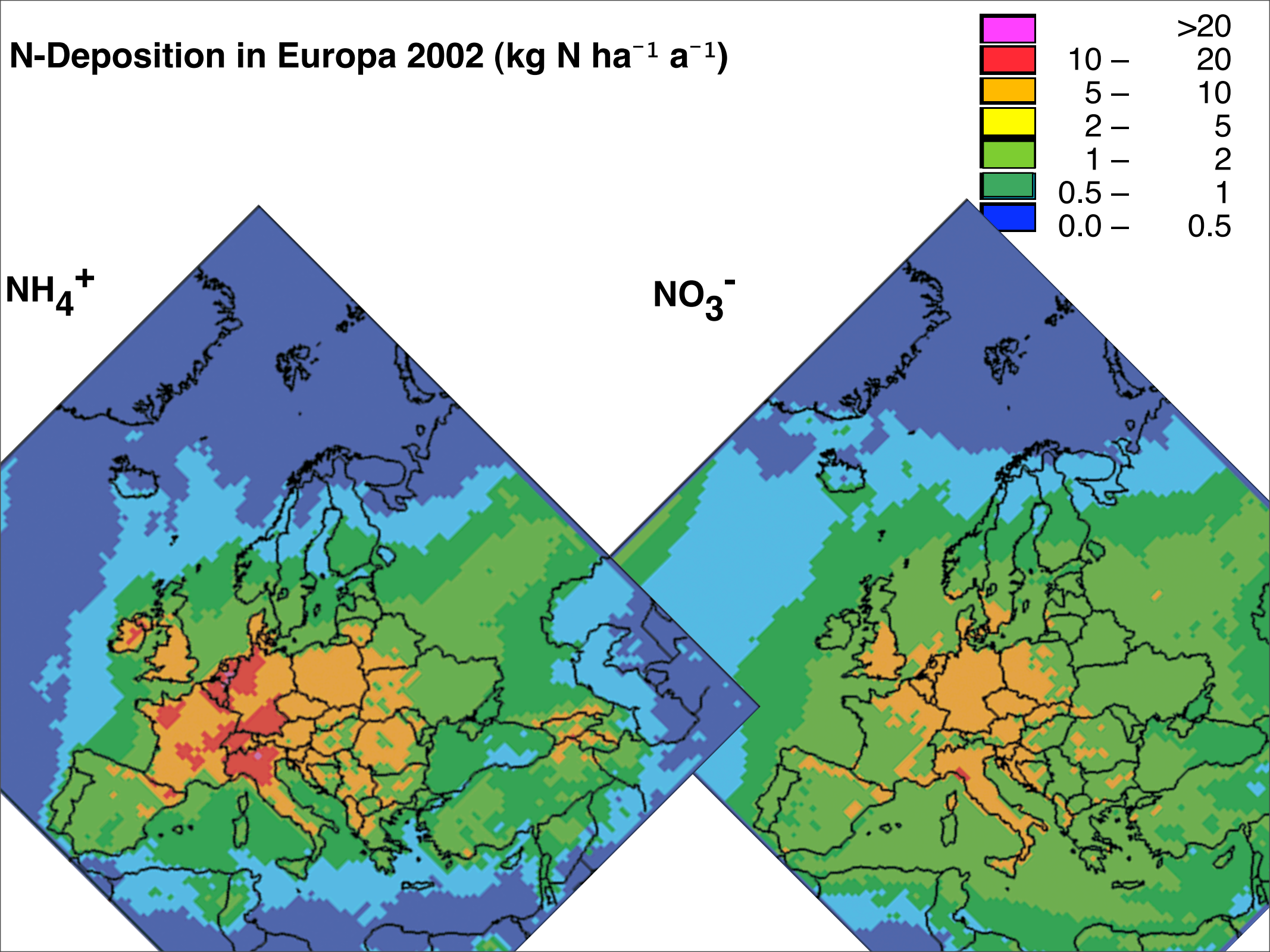
offene Regensammler

US Forest Service
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- . Naturschutz

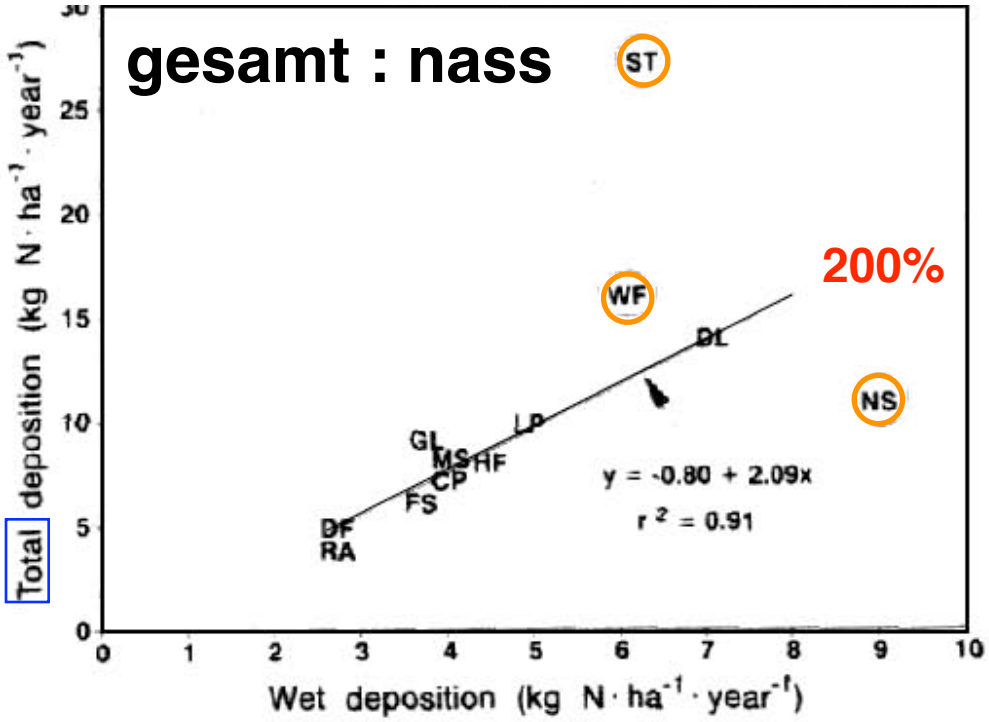
# Deposition

Größenordnungen
räumliche Verteilung
zeitliche Entwicklung

# N-Deposition in Europa 2002 (kg N $ha^{-1}$ $a^{-1}$)



# Verhältnisse verschiedener Depositionsformen




2 px

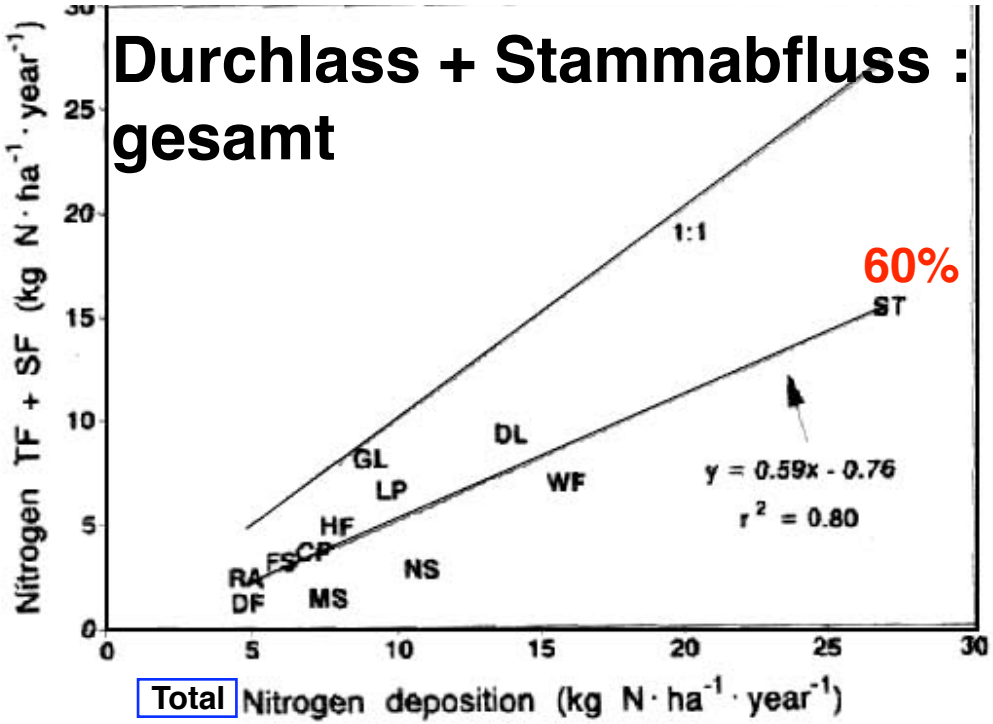



FIG. 7. Wet deposition versus total deposition of N. The regression line pertains only to the low-elevation sites in the U.S. and, therefore, excludes the circled points (see text).

FIG. 8. Total deposition versus TF + SF deposition of inorganic N.

* „Total“ N Deposition hier ohne organischen N

Lovett & Lindberg 1993

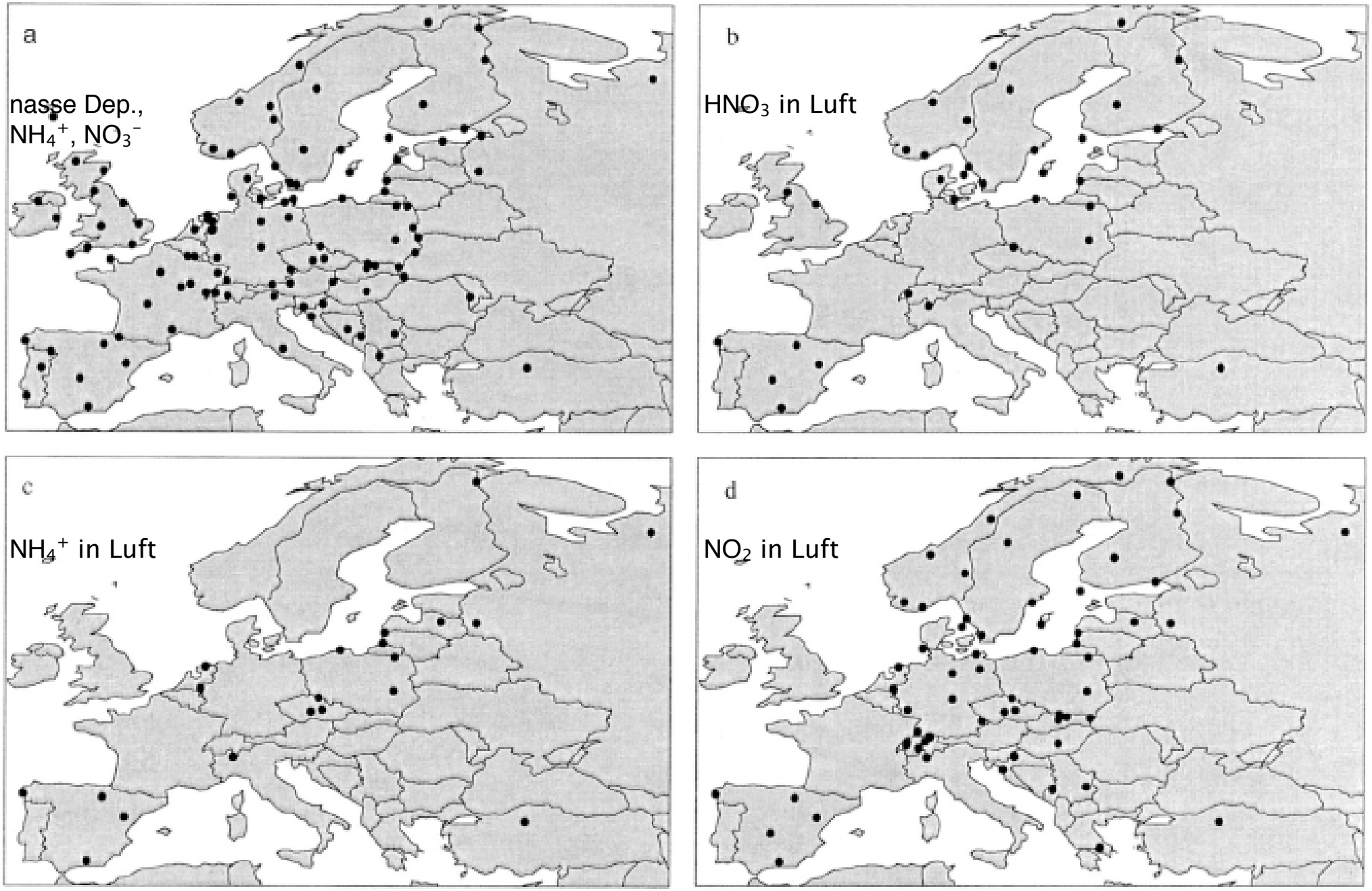
# N Budget Europa 1985 – 1994

| Emissions | $NO_x$ | $NH_3$ | $NO_x + NH_3$ |
|---|---|---|---|
| Estimated emissions† | 6.1‡ | 4.1–5.2§ | 10.2–11.3 |
| **Deposition** | **$NO_y$‖** | **$NH_x$¶** | **$NO_y + NH_x$** |
| Deposition fluxes | | | |
| Wet deposition fluxes | 2.34 | 3.96 | 6.30 |
| Dry deposition fluxes# | | | |
| $HNO_3$ + particulate $NO_3^-$ | 0.55–2.27 | | 0.55–2.27 |
| $NO_2$ | 1.24 | | 1.24 |
| Particulate $NH_4^+$ | | 0.33–1.34 | 0.33–1.34 |
| Σ Dry deposition fluxes | 1.79–3.52 | 0.33–1.34 | 2.12–4.85 |
| Total wet + dry | 4.13–5.85 | 4.29–5.30 | 8.42–11.15 |
| Imbalance | 1.97 to 0.25 | −0.10 to 1.20 | −0.15 to 2.88 |

Einheiten: Teragramm/Jahr, Quelle: Holland et al. 2005

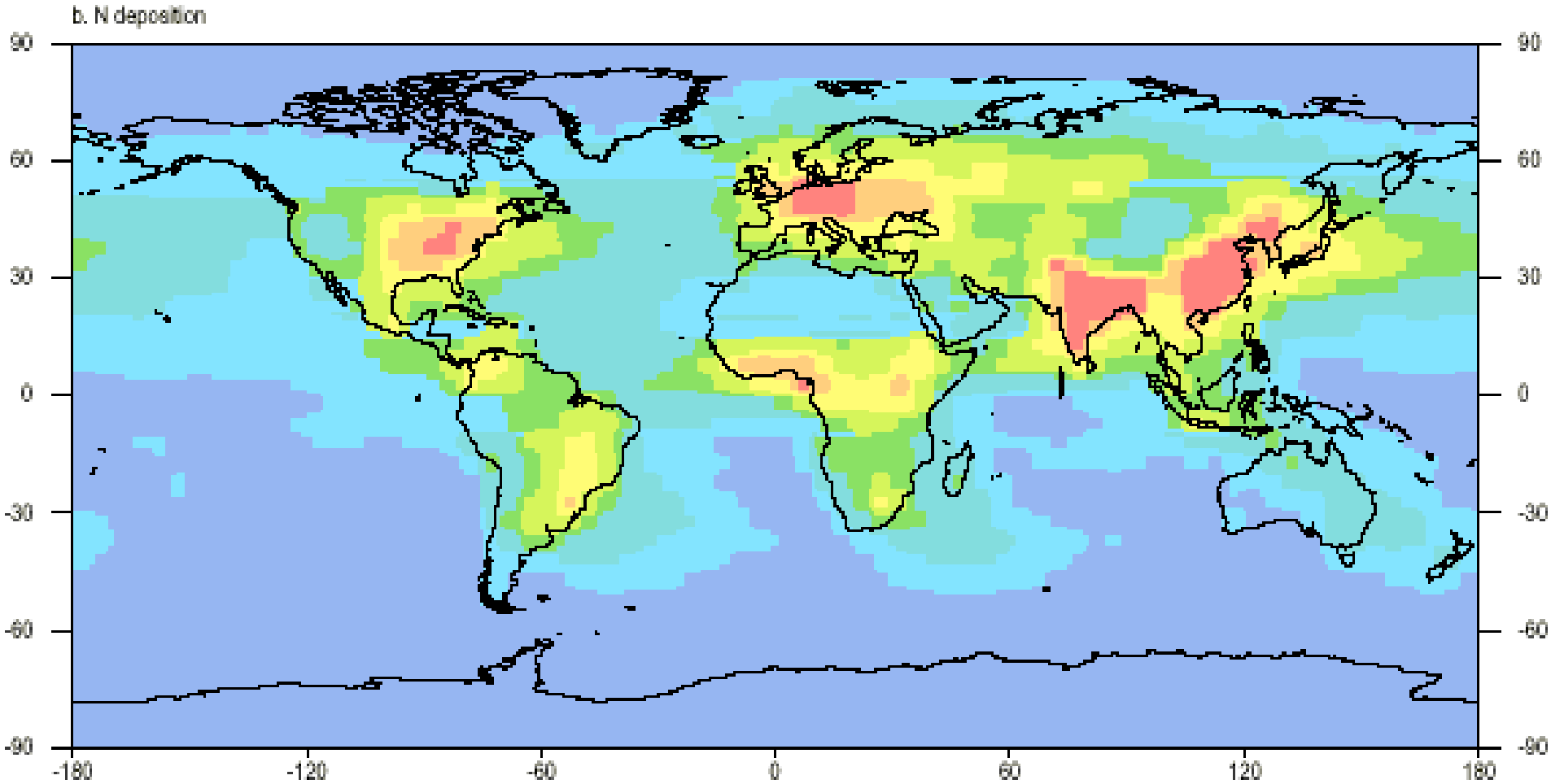
- hohe Unsicherheit bei trockener Deposition
- organischer Stickstoff nicht berücksichtigt
- Rechnung unausgeglichen wegen Schätzverfahren und Verfrachtung

# Messstationsnetz für N-Deposition in Europa




organische Nitrate werden nicht erfasst!, Nitrat an größeren Partikeln wird kaum erfasst! Holland et al. 2005

# Globale Verteilung: Gesamtdeposition



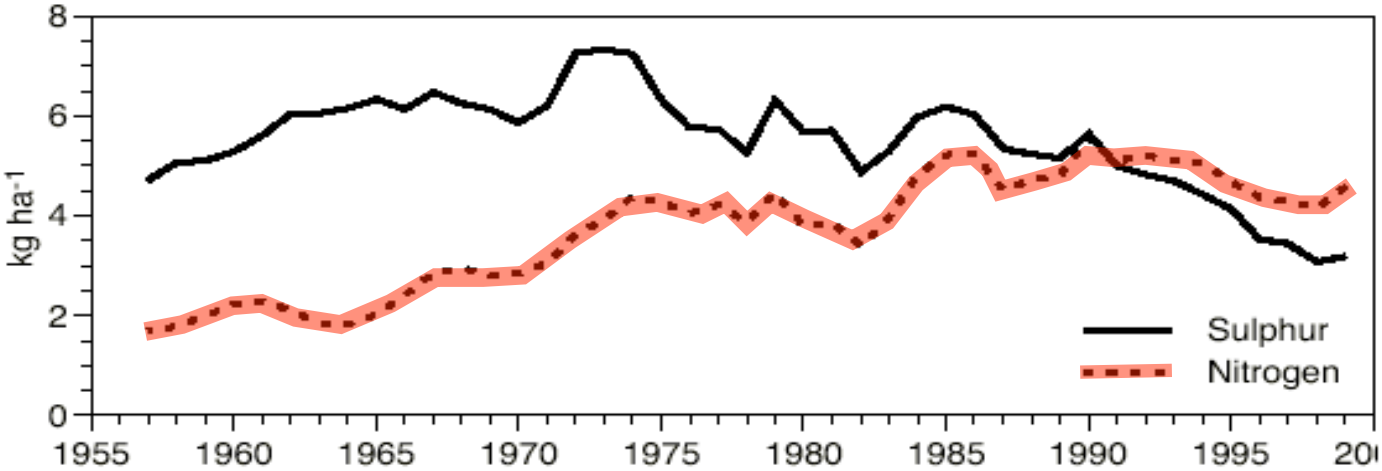

1992

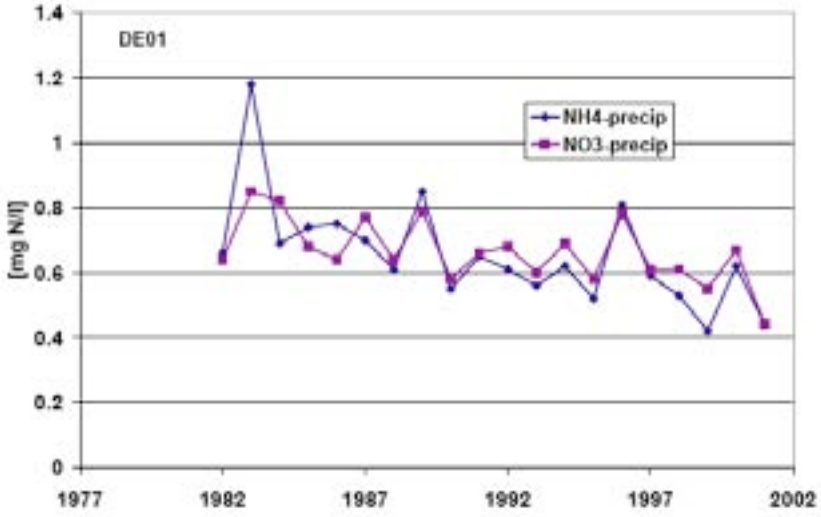
RIVM/UNEP (1999)

# Langfristige Veränderungen

**Nasse** Stickstoffdeposition in Süd-Mittelschweden

J. Fölster nach Daten von MISU und IVL, Schweden

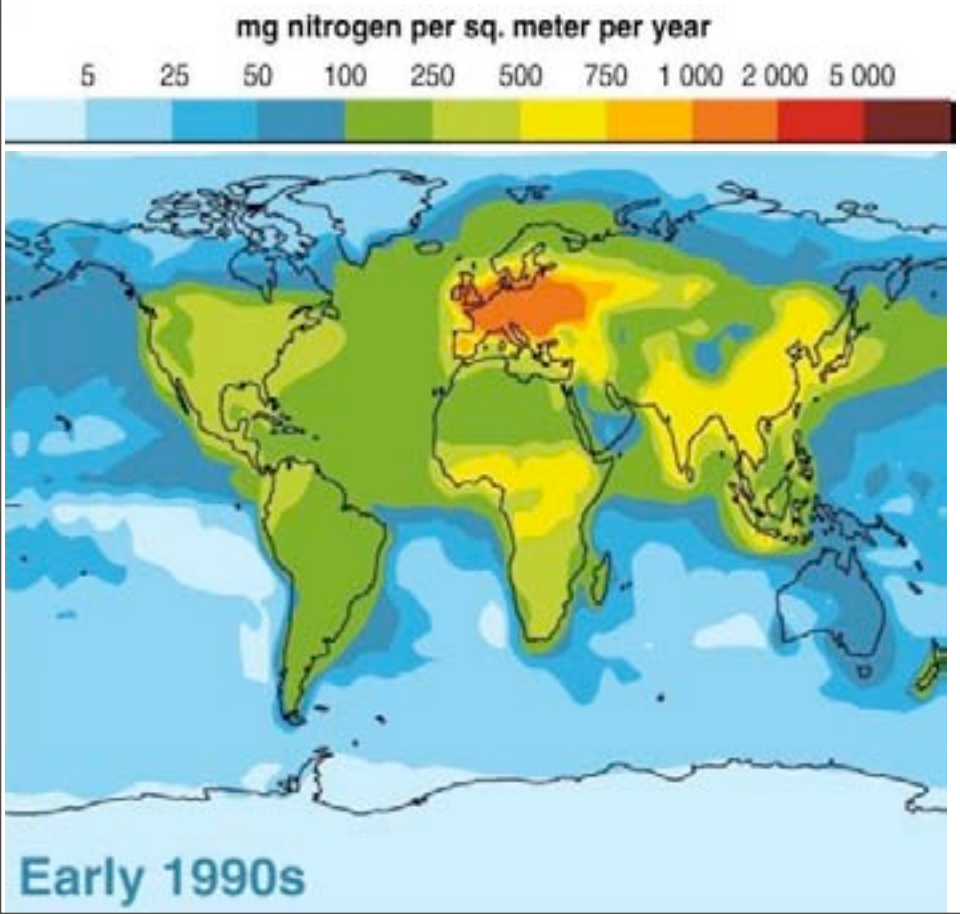


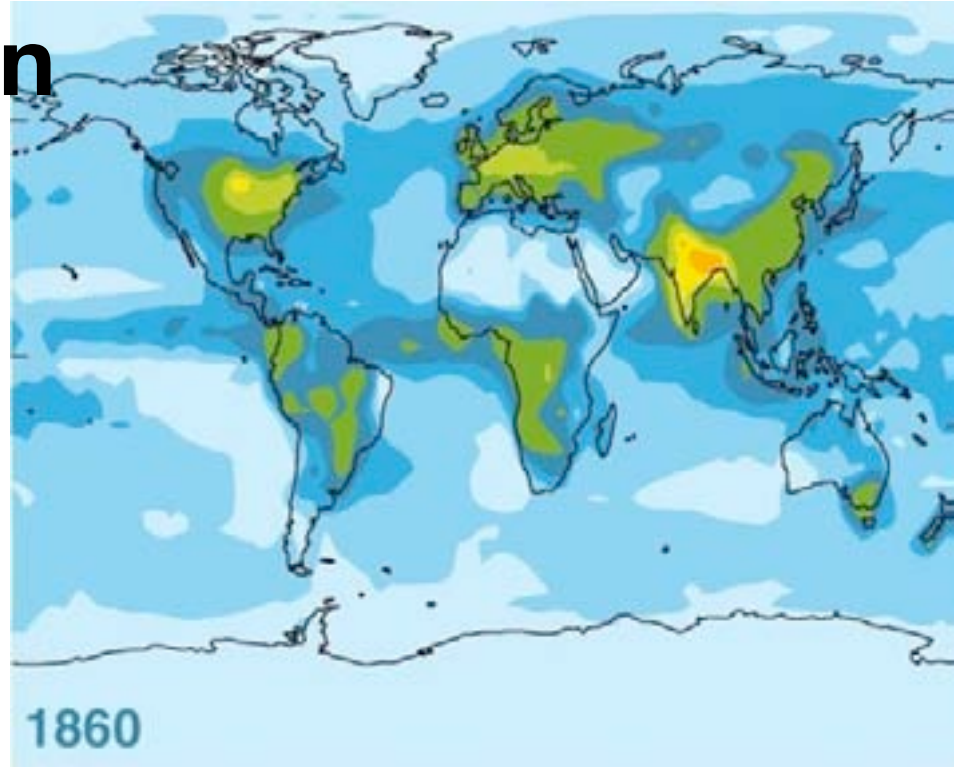



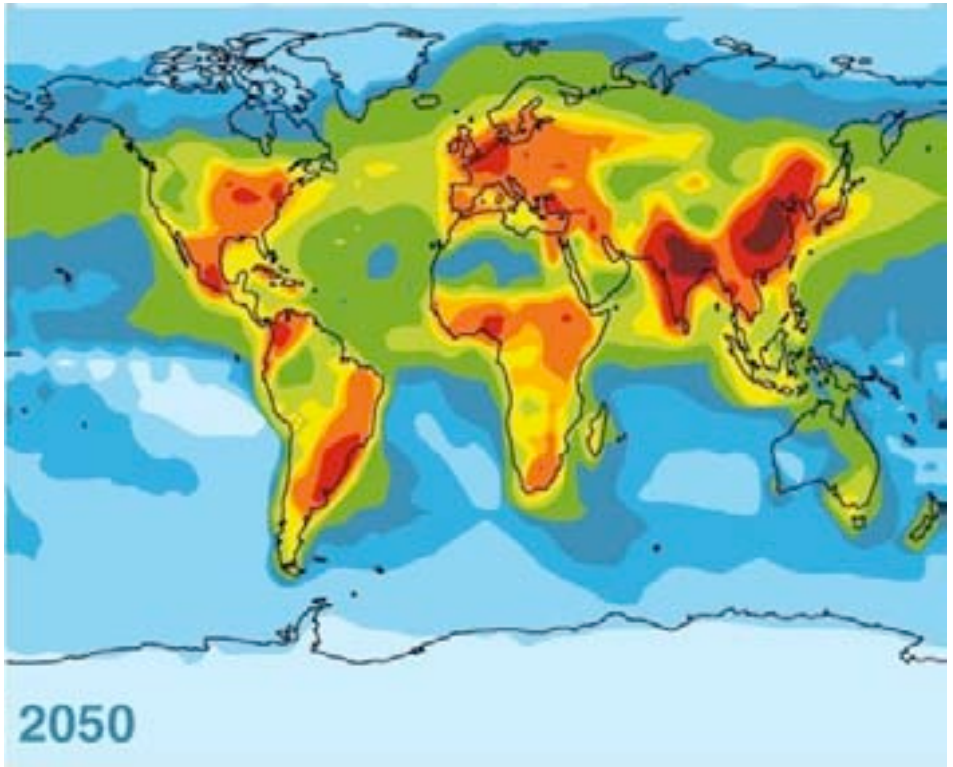

**Nasse** Stickstoffdeposition in Deutschland (Westerland, Sylt)

# Zeitreihen: Deposition

Die Deposition wird global zunehmen, Fernverfrachtung wird zunehmen

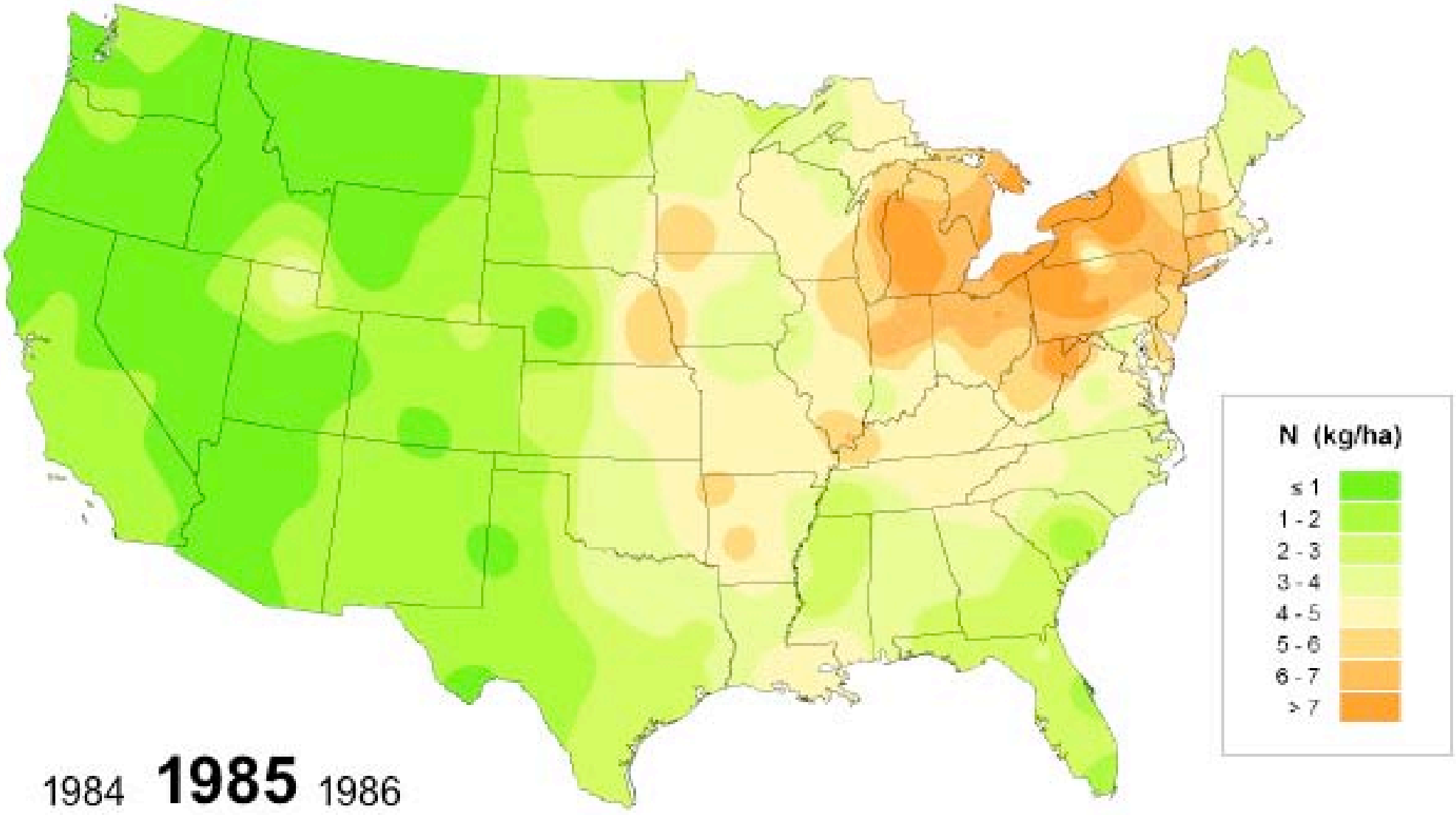



http://maps.grida.no/go/graphic/estimated-total-reactive-nitrogen-deposition-from-the-atmosphere-wet-and-dry-in-1860-early-1990s-and

# Schwankungen der jährlichen Deposition



# Auswirkungen erhöhter N-Deposition

physiologische Schäden

ökologische Veränderungen

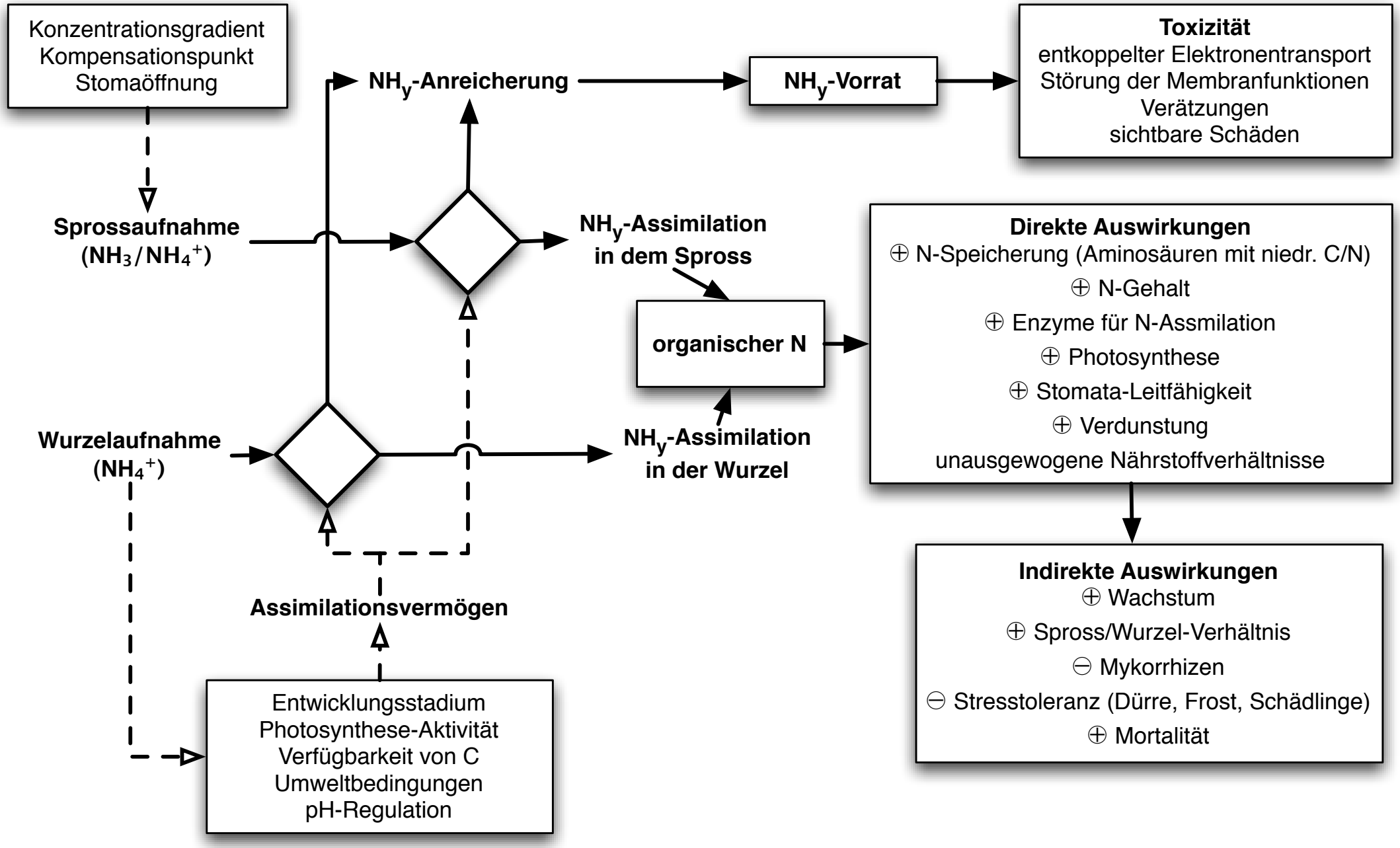
Veränderungen in ausgewählten westeuropäischen Ökosystemen

# Auswirkungen der N-Deposition

## Physiologische Schäden

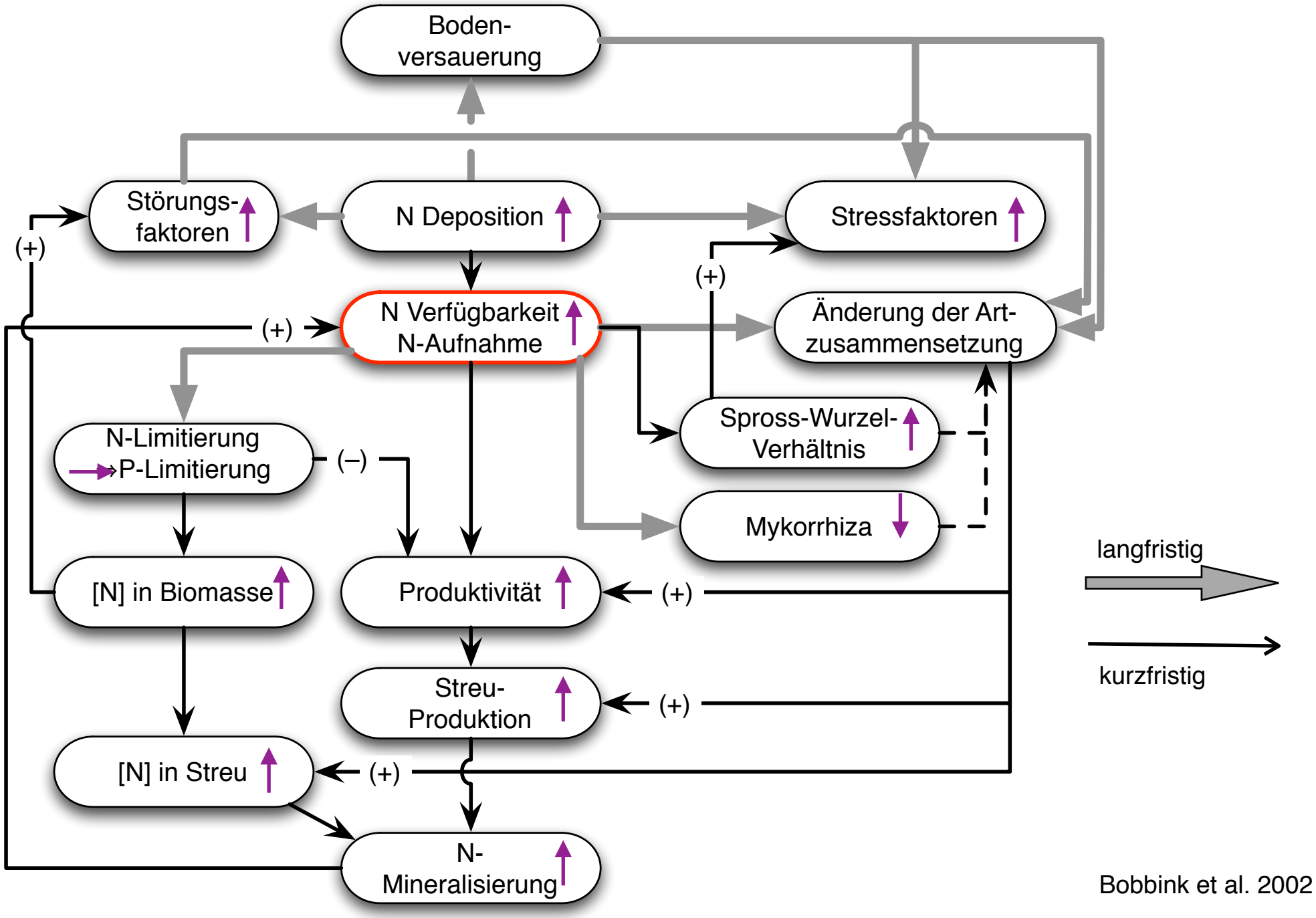
- unbedeutend, außer bei hohen Konzentrationen, d.h. nahe der Quellen
- Ammonium wird von Blättern aufgenommen, andere Kationen ausgewaschen
- bislang vor allem an Bäumen und Kulturpflanzen untersucht

# Physiologische Schäden durch Ammonium

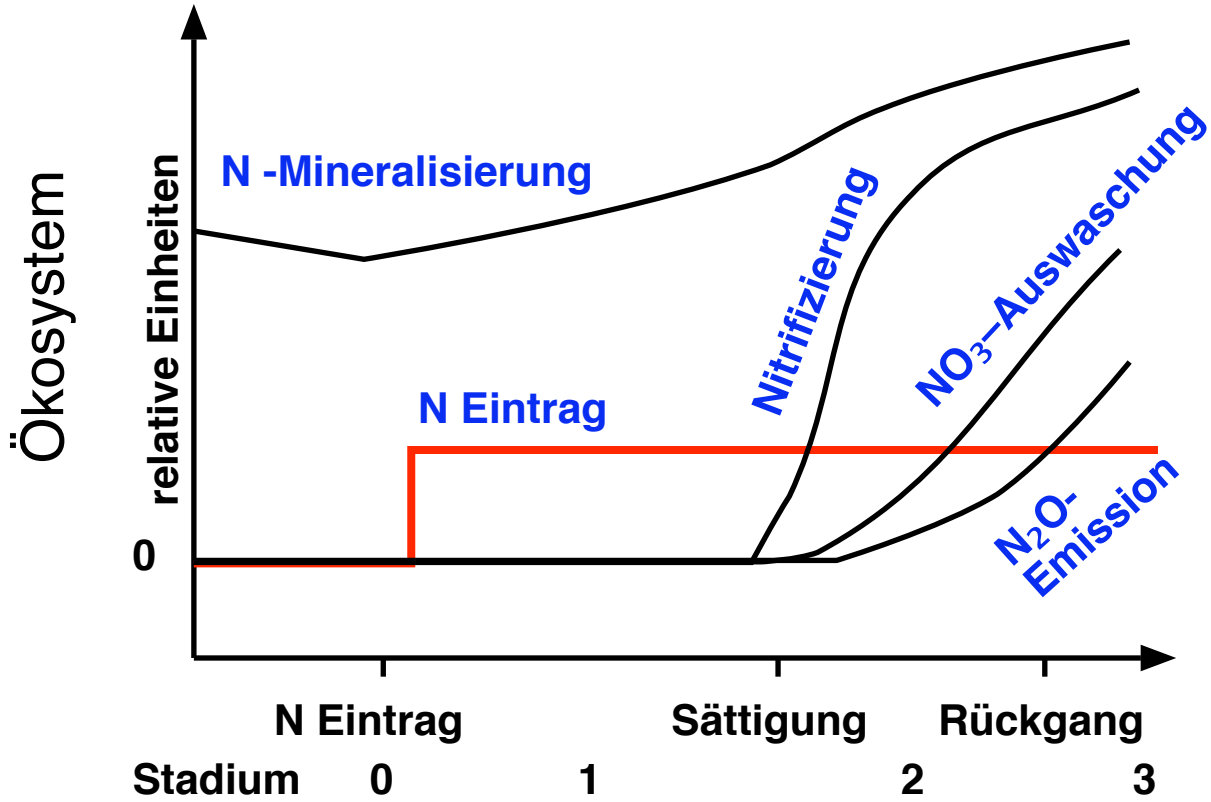


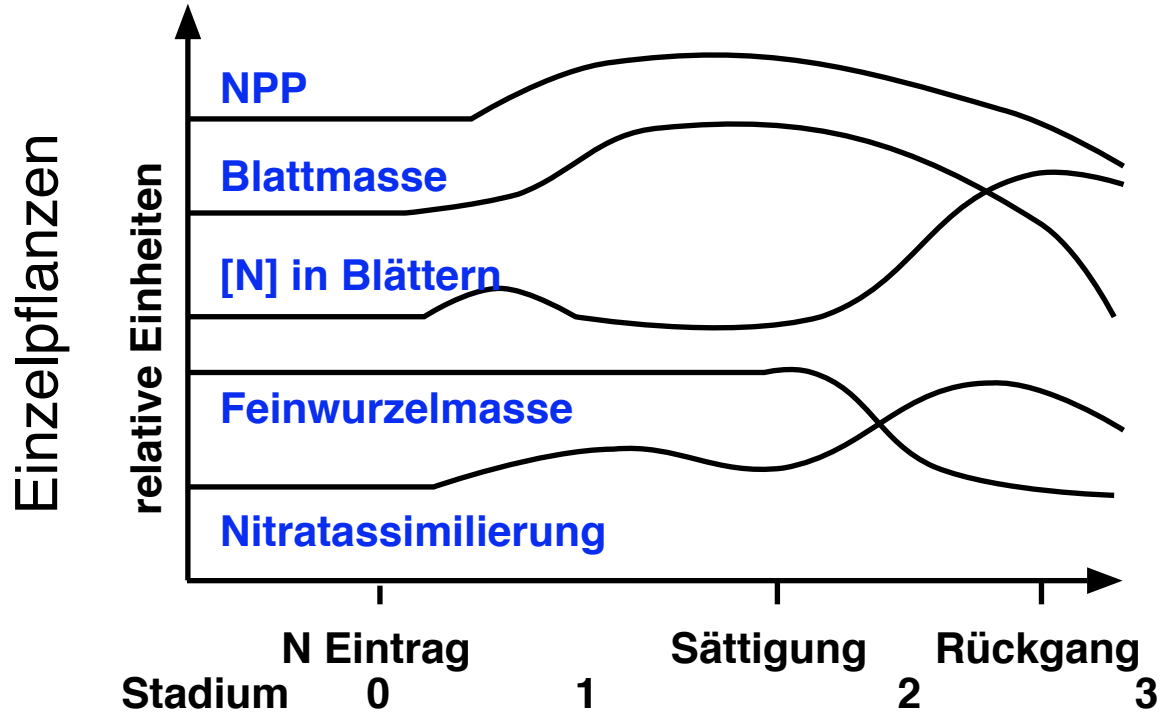

nach Fangmeier et al. 1994

# Ökosystemare Wirkung erhöhter N-Deposition




Bobbink et al. 2002




Aber et al. 1989

# Auswirkungen der N-Deposition

## Bodenversauerung

- pH-Absenkung
- Verlust der Pufferkapazität des Bodens
- Auswaschung von basischen Kationen
- Freiwerden von toxischen $Al^{+++}$-Ionen
- Verlagerung des Ammonium-Nitrat-Gleichgewichts
- bei einigen Arten: niedrigere Keimungsrate

$\Rightarrow$ säureresistente Arten werden wettbewerbsstärker

# Auswirkungen der N-Deposition

- andere Nährstoffe werden begrenzend
  - Nährstoff-Ungleichgewicht, Baumsterben?
  - Landwirtschaft: Düngung mit Schwefel
  - Wald: Düngung mit P, K, Mg
  - Auswaschung in Boden, Grundwasser, Flüsse

# Wachstumsbeschleunigung

## Änderung der Wettbewerbsverhältnisse

sparsame, langsam wachsende Arten werden von hohen, schnellwüchsigen verdrängt

- Änderung der Artzusammensetzung
  - weniger Leguminosen
  - dominierender Photosynthesetyp: $C_4 \Rightarrow C_3$
  - Grasland $\Rightarrow$ Wald
  - Invasion
  - Symbiosen?

## Artenreichtum kann zu- oder abnehmen

# Auswirkungen der N-Deposition

## Wachtsumsbeschleunigung

### höhere Streuproduktion

- mehr Brandmaterial
- weniger Keimplätze,…

### kleineres C/N-Verhältnis

- schnellere Streuzersetzung
- schmackhafter für Herbivore

## Veränderungen in ausgewählten westeuropäischen Ökosystemen

taz, 26.7.2007

- Küstengewässer
  - direkte Deposition und Eintrag über Flüsse
  - Algenblüte, $O_2$-Knappheit, Fischsterben
- Süßgewässer
  - Versauerung (geringe Pufferkapazität)
    - dadurch Anstieg der Konzentration von $SO_4^{2-}$, $Al^{3+}$ ($NO_3^-$, $NH^+$)
    - 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 [nicht in GB!]

    ➡ Abnahme von charakterist. Flechten u. Moosen

    ➡ Versauerung
    - Alvar auf Öland reagiert nicht auf N, da zu trocken (400-500 mm)

www.region-braunschweig.de

- 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

Hochmoore (sauer, aber N-arm)

- Zunahme von N-bedürftigen Arten (*Molinia caerulea*, *Deschampsia flexuosa*, *Betula pubescens*)
- Torfmoose werde von anderen Moosen verdrängt
  - aus Wettbewerb
  - N-Versorgung is supra-optimal für Bulten-Torfmoose
- auf Bulten Zunahme von hohen Grasartigen, Ericaceen u. Birken, Verdrängung von *Drosera* und anderen niedrigen Arten
- Torfzersetzung wird erhöht, weil das C:N-Verhältnis niedriger ist

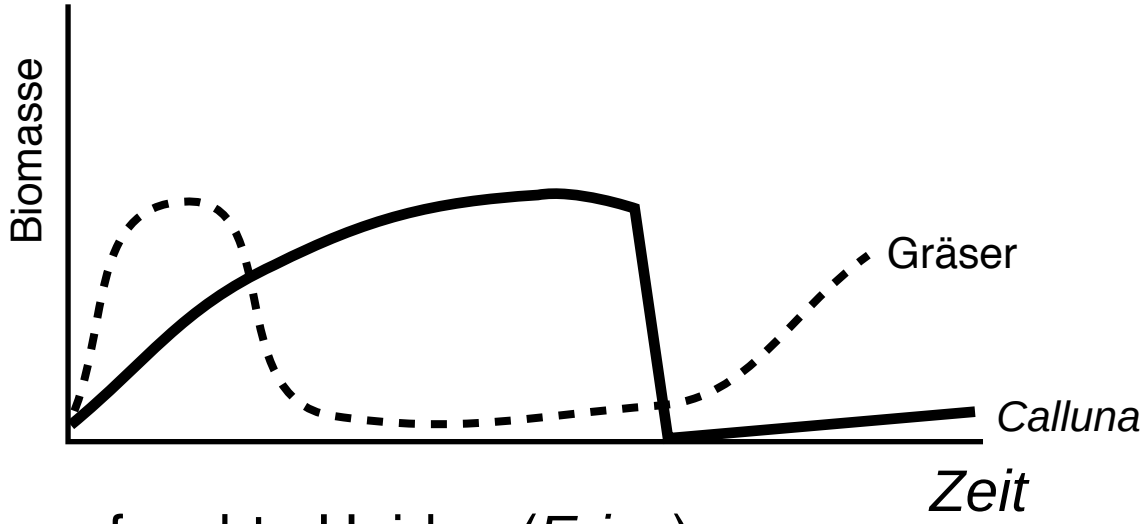
Tomassen,
http://www.eco.science.ru.nl/mibiol

# Moore: Niedermoore, Marschen

- Niedermoore, Marschen
  - Eintrag druch 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* (Pfeifengras)

## Waldboden

- Veränderungen im Zusammenhang mit N erst in 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

www.ncl.ac.uk/ gane/page9.htm

# Düngungsversuch in Kiefernwald in M-Schweden

- NPK+ Düngung mit 150 kg N/ha und Bewässerung Juni-August 5 d/Woche

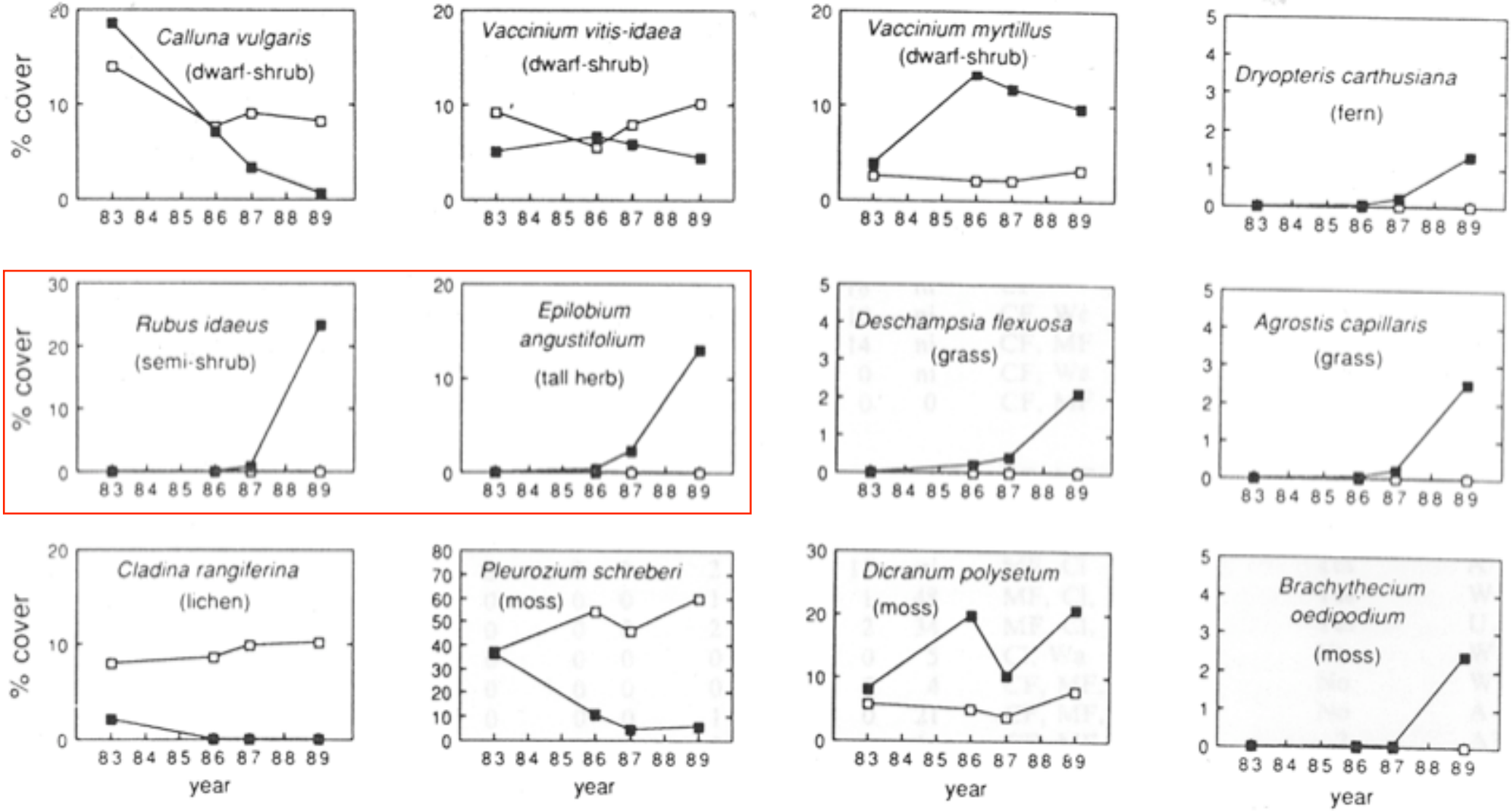


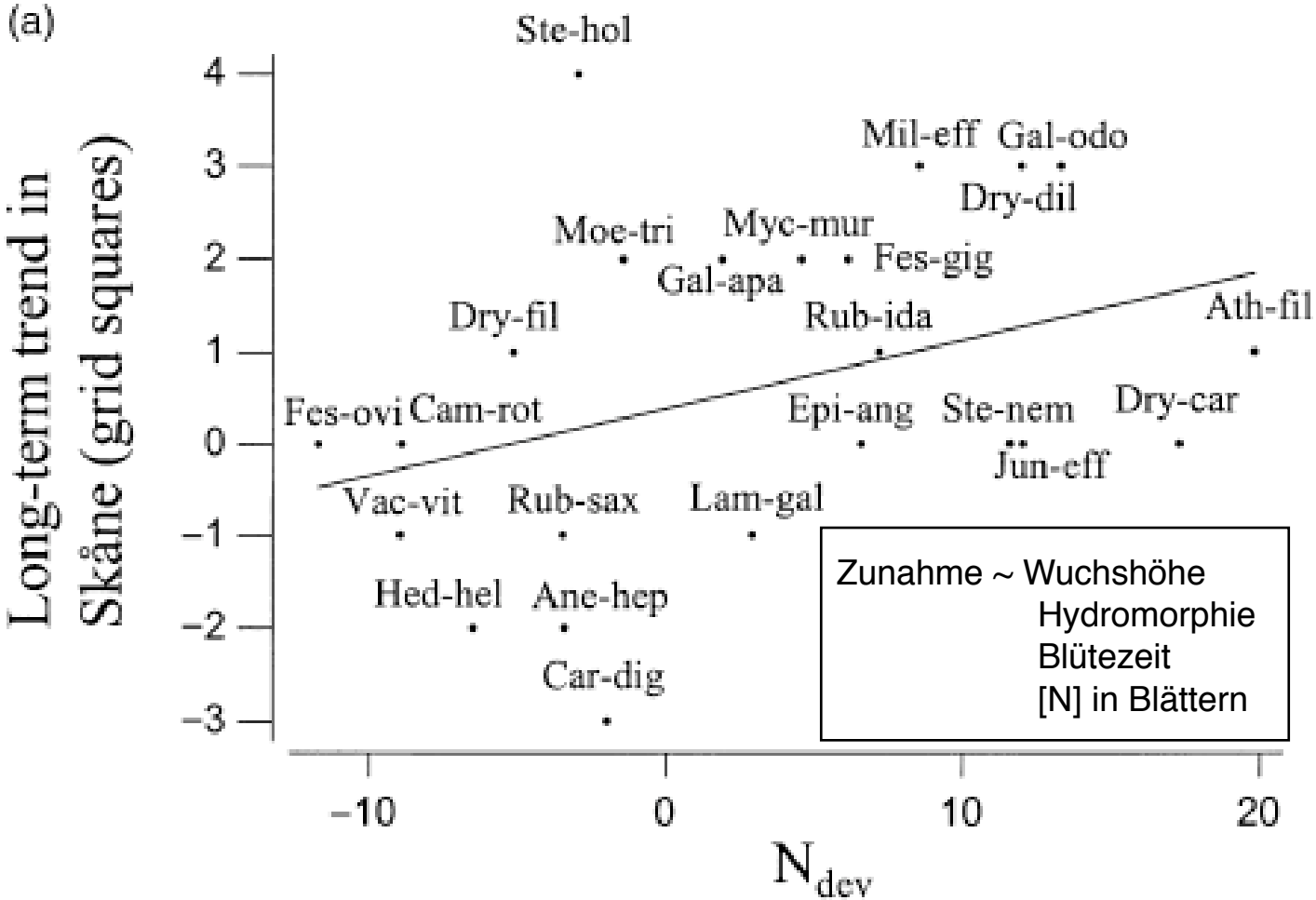

FIG. 1. Mean percent ground cover of the dominant species. ■, irrigated – liquid fertilized plot; □, control plot. Note that the scale on the *y*-axis differs among species.

Kellner & Mårshagen 1991

# Waldboden

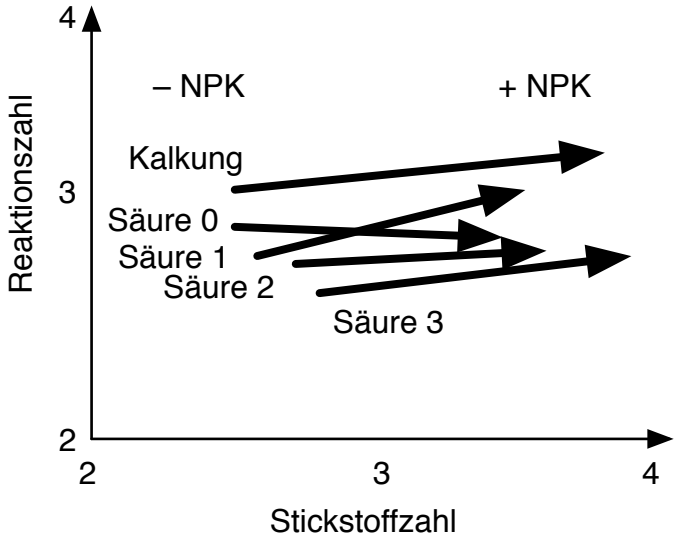
## Vergleich mit historischen Kartierungen

Diekmann & Falkengren-Grerup 2002



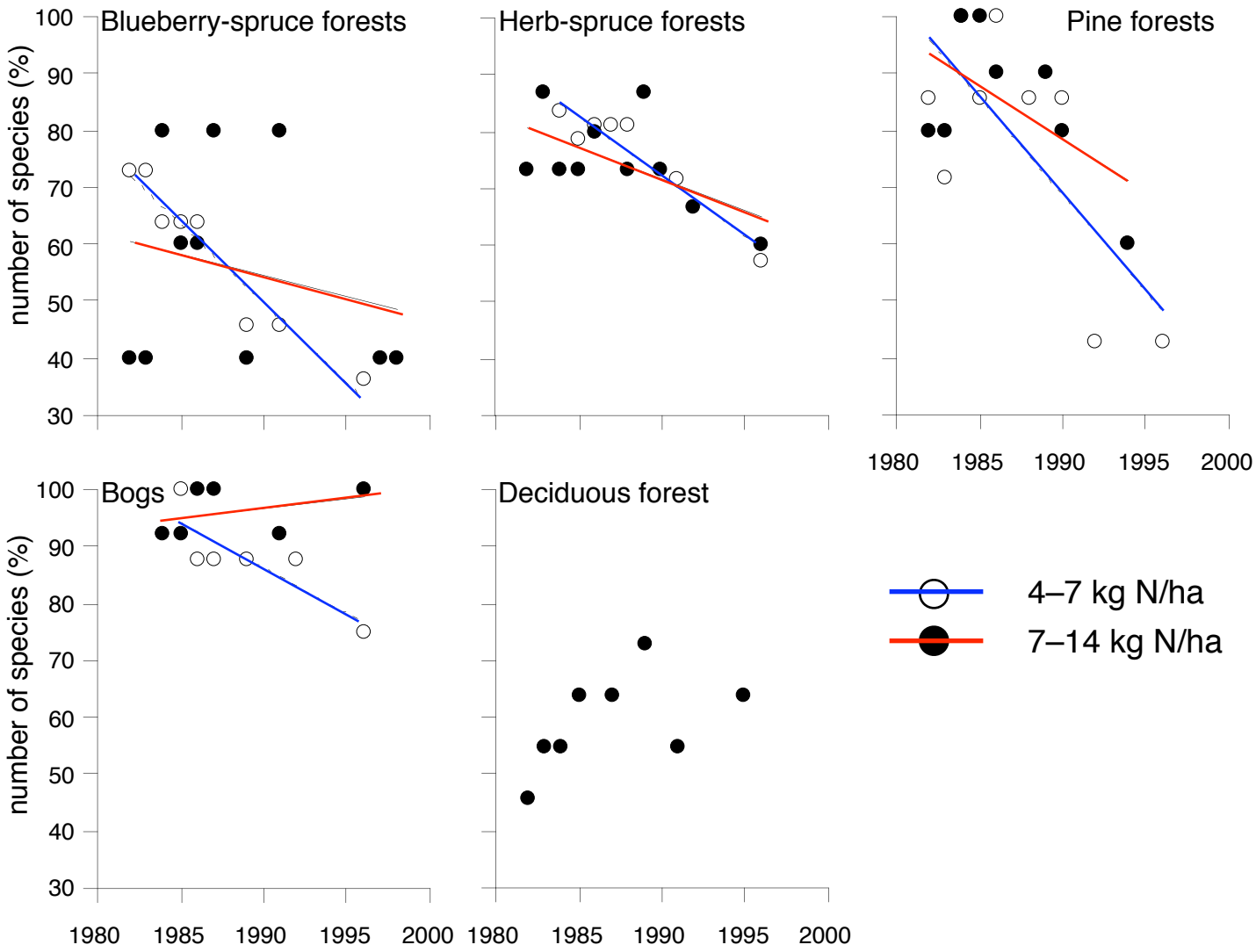

(Nitrifizierungs-pH-Index des Standorts)

Düngungs/pH-Versuch in Kiefernwald, N-Schweden
van Dobben et al. 1999



# Waldboden: Veränderung des Artenreichtums

Gefäßpflanzen des Waldbodens, Südschweden



Köchy & Bråkenhielm 2008

# Wald: Stickstoffaufnahme

N-Bilanz eines Fichtenbestandes im Solling (Horn et al. 1989)

| Netto-Bedarf (mmol $m^{-2}$ $a^{-1}$) | | Versorgung (mmol $m^{-2}$ $a^{-1}$) | |
|---|---|---|---|
| Nadeln | 257 | Aufnahme über den Spross | |
| Zweige | 84 | $NH_3 + NO_x$ | 137 |
| Stamm | 177 | | |
| | | Aufnahme über die Wurzel | |
| Wurzeln | 609 | $NH_y + NO_x$ | 990 |
| Gesamt | 1127 | | 1127 |

12%

Ähnlich: Wälder in Ost-USA: 5-10% (Lindberg et al. 1986)

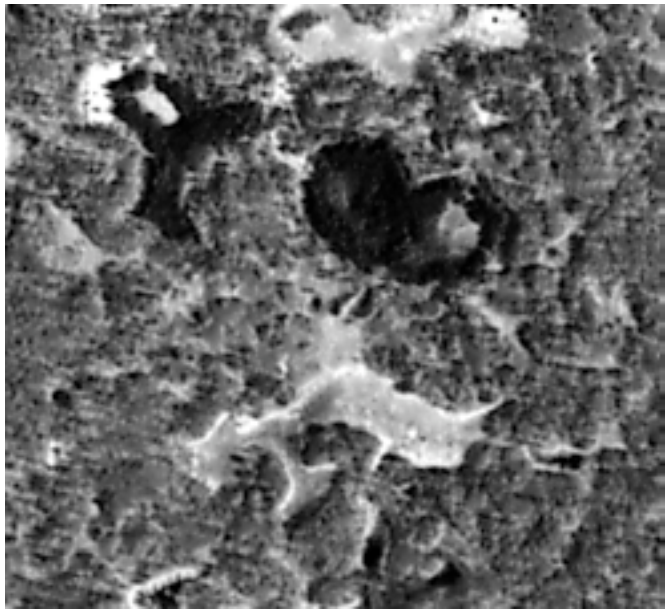
der größte Teil der Deposition wird von den Blättern aufgenommen

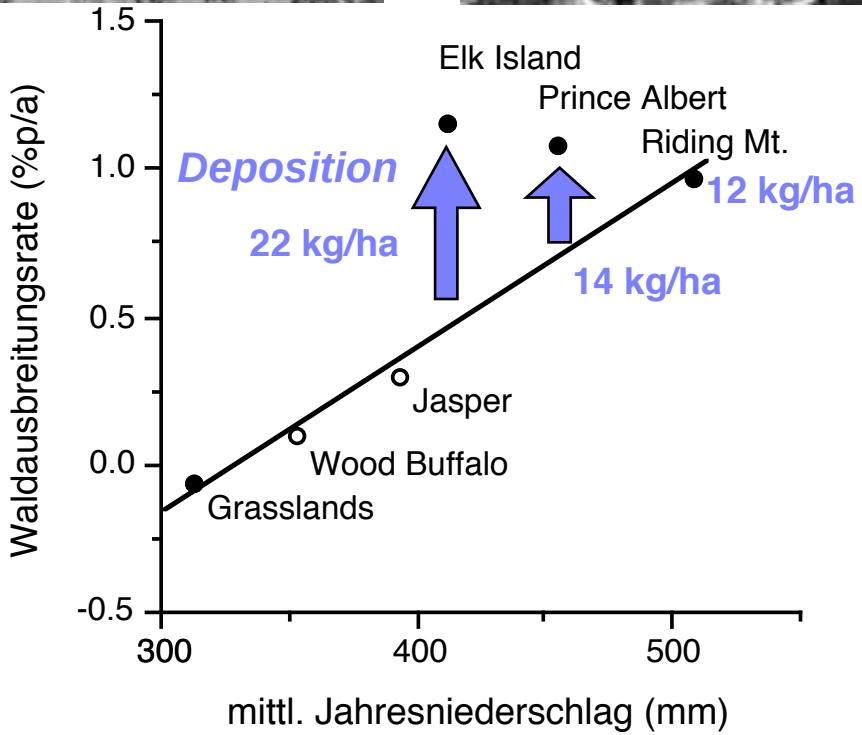
# Wälder: Flächenzunahme

Elk Island National Park, West-Kanada

1947

1995



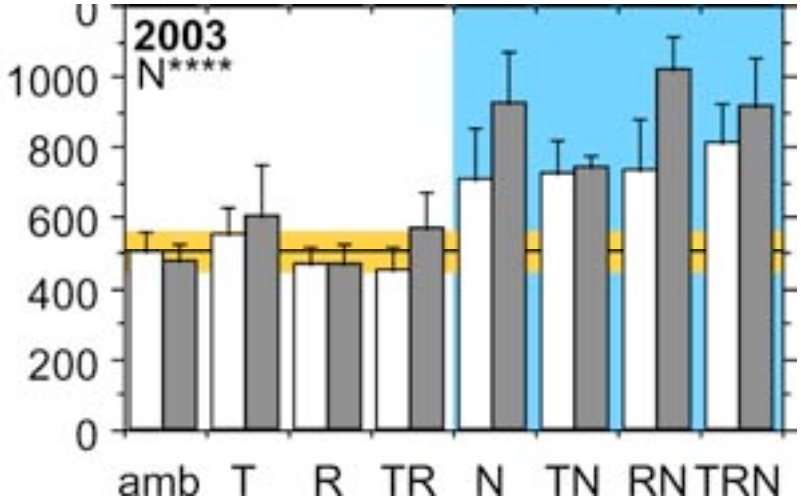



Köchy & Wilson 2001

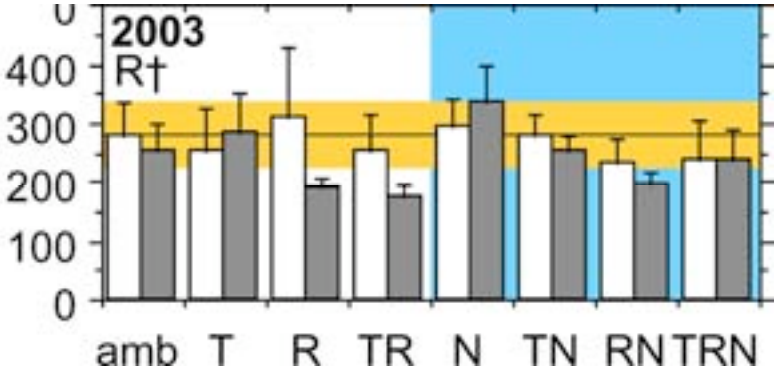
# Grasland: Wechselwirkungen mit Klimawandel

Experiment mit 4 Faktoren: +Temperatur, +$CO_2$, +Wasser, +Stickstoff
in allen Kombinationen über 3 Jahre, Kalifornien

Spross-Biomasse (g/m2)




Wurzel-Biomasse (g/m2)



Diversität
Krautige: **$CO_2$↓, W↑, N↓**
Gräser: $CO_2$↑, **W↑**
Gesamt: $CO_2$↓, **N↓**

Zavaleta et al. 2003
Dukes et al. 2005

nach drei Jahren: stärkste Reaktion auf N-Erhöhung

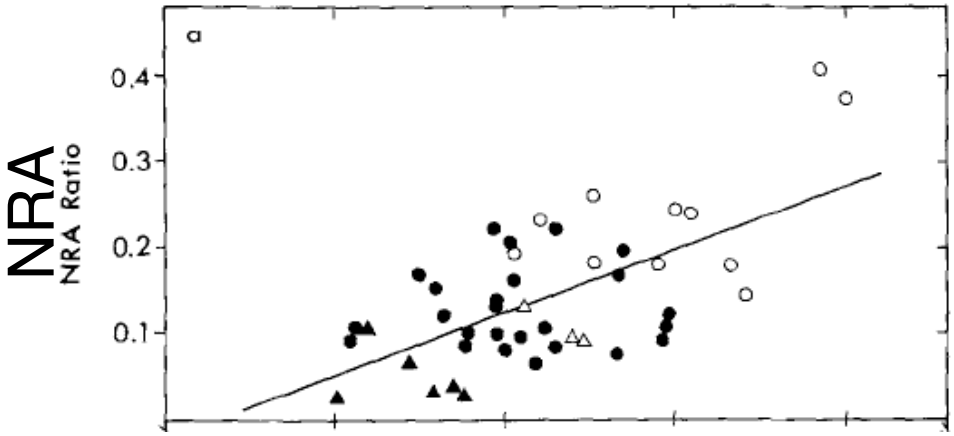
# Beurteilung der Gefährdung

Methoden
Grenzwerte
räumliche Verteilung
zeitliche Entwicklung

# Beurteilung der Gefährdung

- **Ökosystem**
  - N-Sättigung des Bodens (Ågren & Bosatta 1988, Aber et al. 1989)
  - Zeigerarten

- **Einzelpflanzen**
  - Konzentrationsverhältnisse
    - C:N, N:Kationen, N:P, Mg:N, Arginin-Konzentration, Nitratreduktase-Aktivität in Blättern, $\delta^{15}N$ in Blättern




Stickstoffkonzentration, % der Trockenmasse

Högbom & Högberg 1991

Verkehrsdichte auf Autobahnen

Pearson et al. 2000

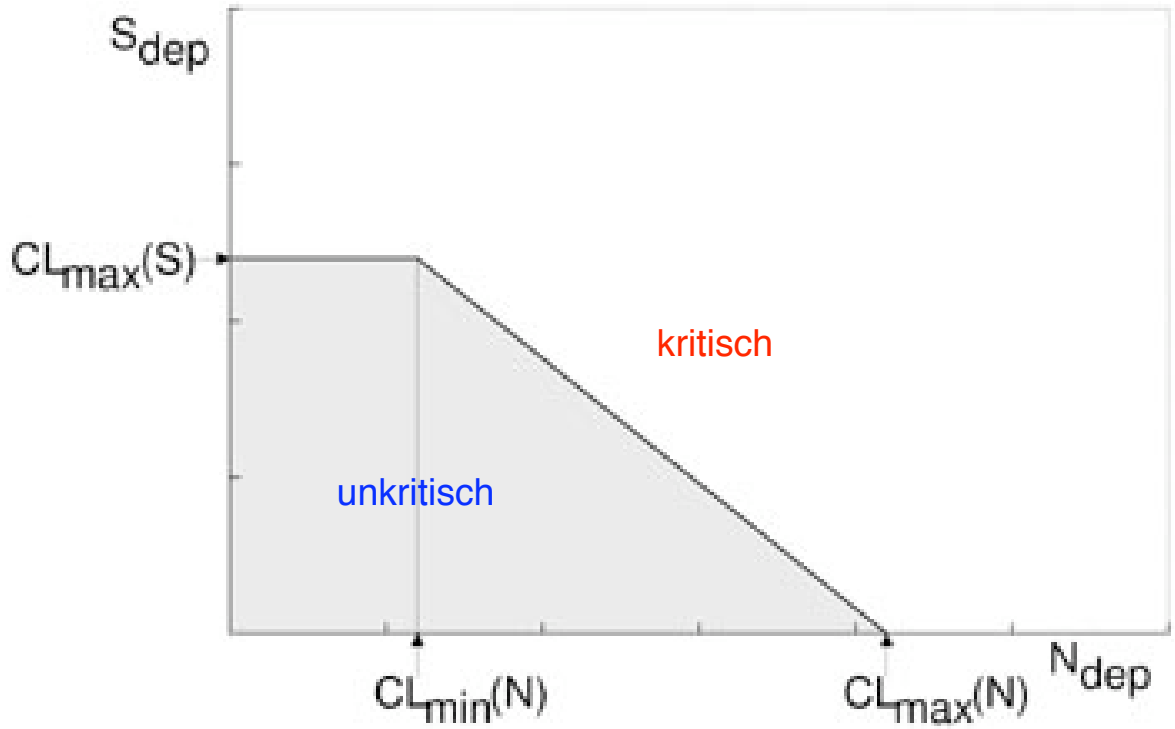
◇ *<u>oft fehlen historische Vergleichsmöglichkeiten oder es gibt andere Erklärungen</u>* (Sukzession, Veränderung des Lichteinfalls)

# Wann ist ein Ökosystem gefährdet?

- Depositionsrate (10 – 20 kg $ha^{-1}$ $a^{-1}$)
  - Ökosysteme haben unterschiedliche Empfindlichkeit
- N-Sättigung des Bodens (Ågren & Bosatta 1988, Aber et al. 1989)
  - Nitratauswaschung
  - Ammoniumauswaschung
    - Zusammenhang mit Depositionsrate unklar
    - bei Waldschäden unsicher, was Ursache und Wirkung
- **Kritische Belastung** (EMEP)
  - Depositionsschwelle, bis zu der N-Auswaschung akzeptabel ist
  - Schwelle, ab der Auswirkungen in Ökosystemfunktion- und Struktur beobachtbar werden
  - Düngungsexp., Simulationen, Schätzungen, Stickstoffhaushalt
  - berücksichtigt kaum P-Limitierung, Standort, Management

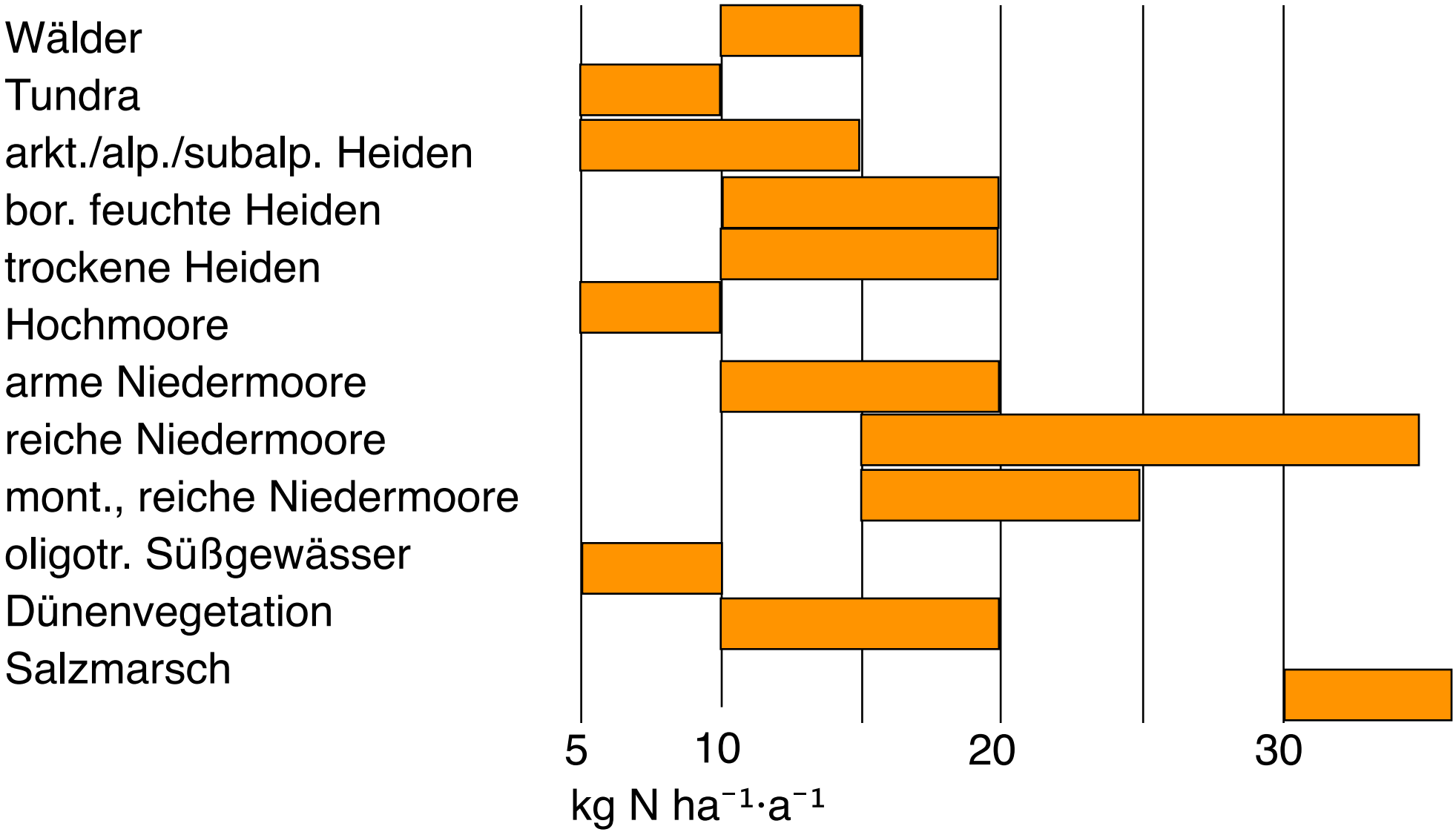
# Wann ist ein Ökosystem gefährdet?

- Kritische Belastung
  - Berechnung über (geschätzten) N-Haushalt
    - Überdüngung
    - Versauerung



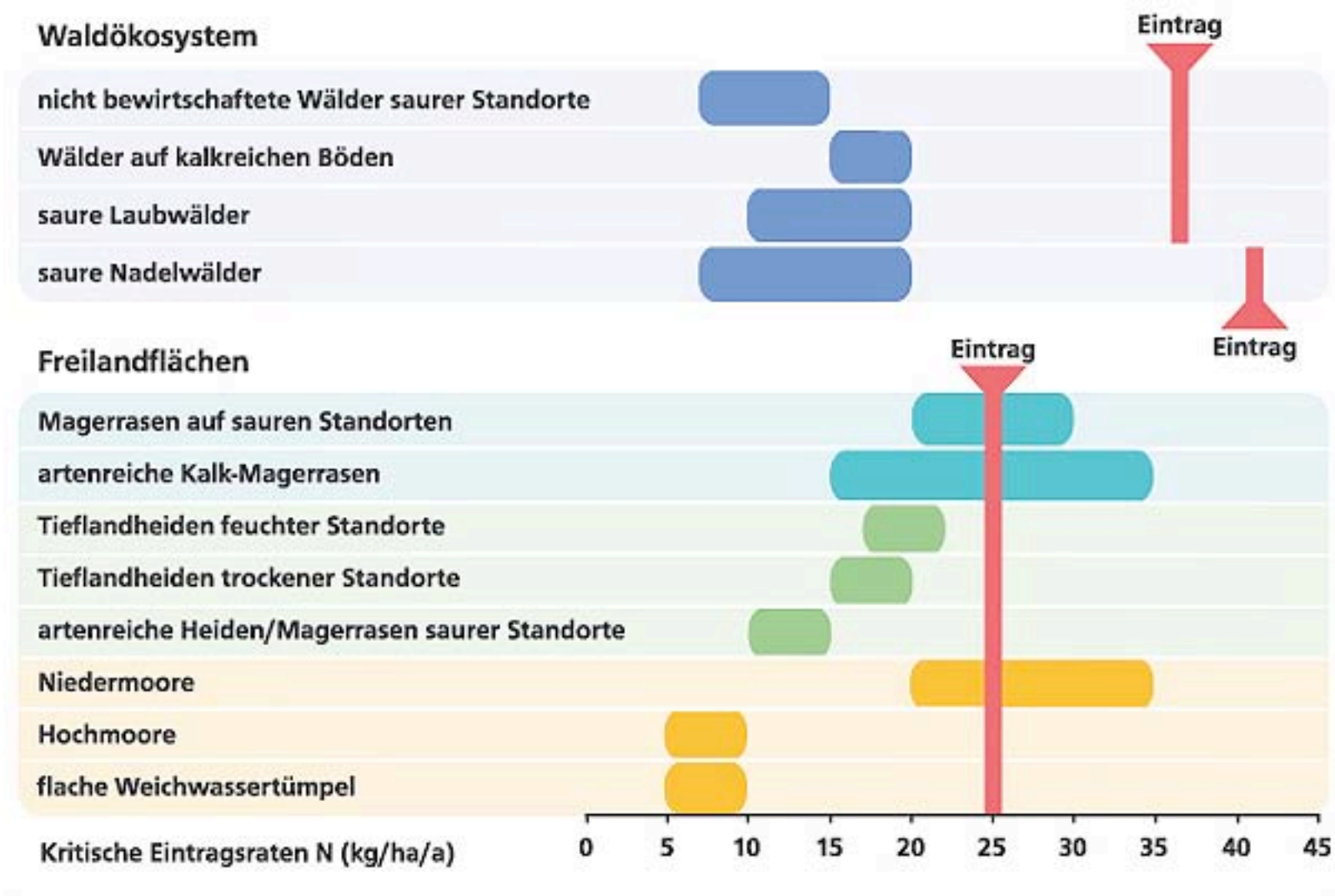

Posch et al. 2005, UN/ECE

# Kritische Belastung, empirisch



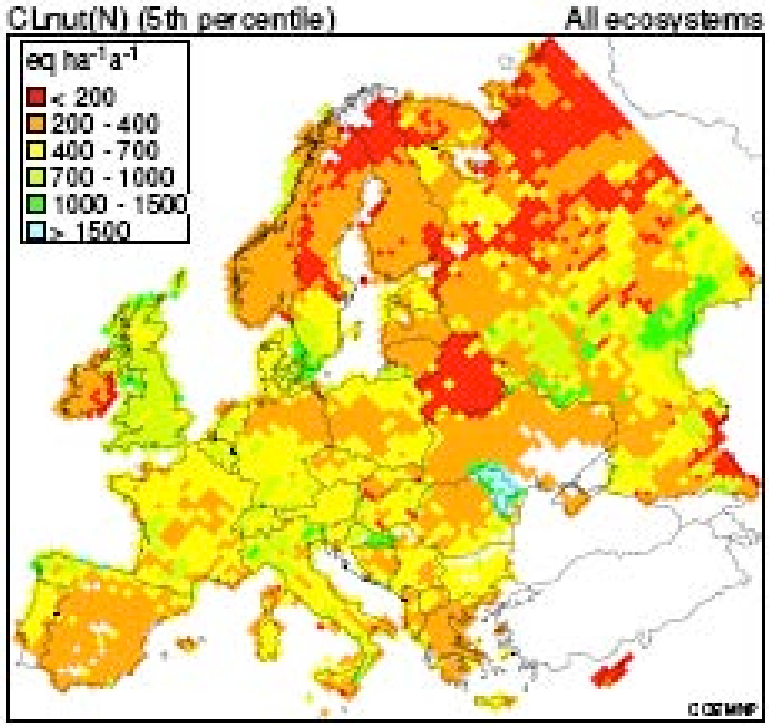

nach Bobbink et al. 2002

# Kritische Belastung: Niedersachsen

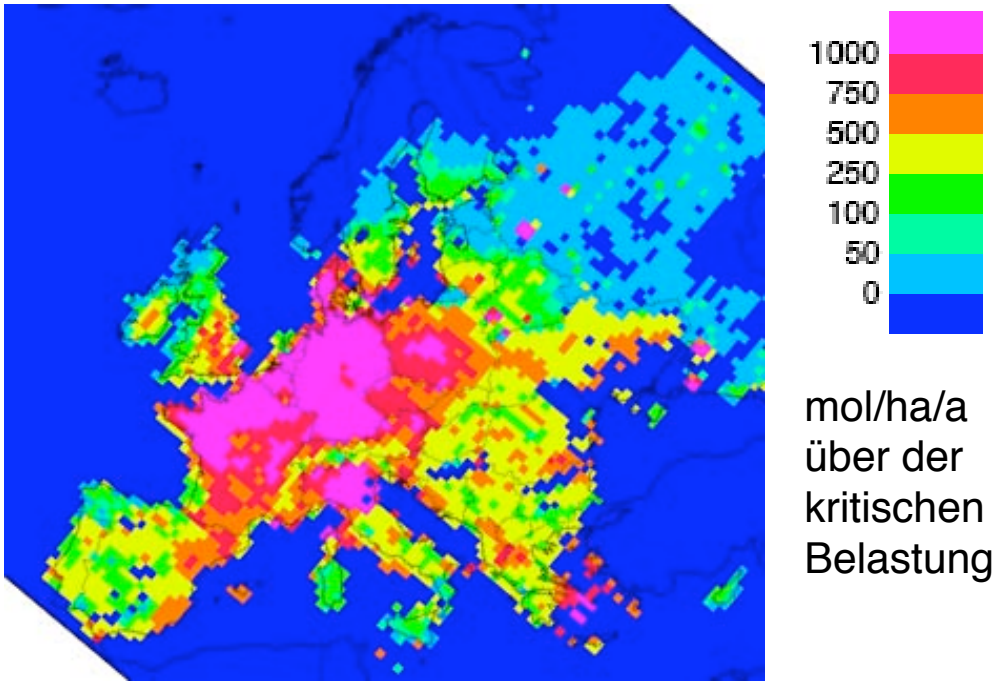



Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz 2006

# Kritische Belastung



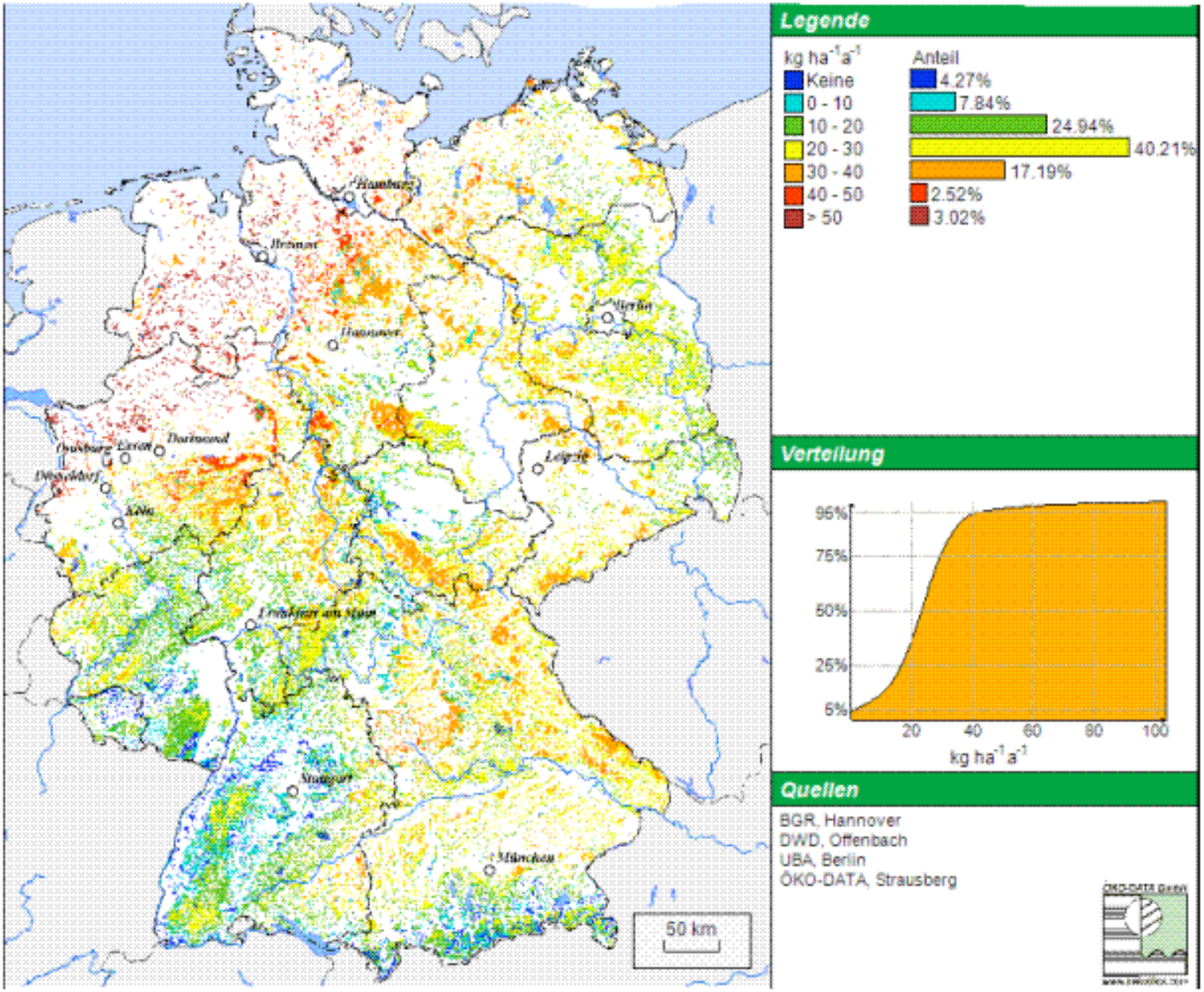

Kritische Belastungsgrenze für 95% der Fläche




Überschreitung der Kritischen Belastung (2002)

EMEP (2004)

## Überschreitung der Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff 2004

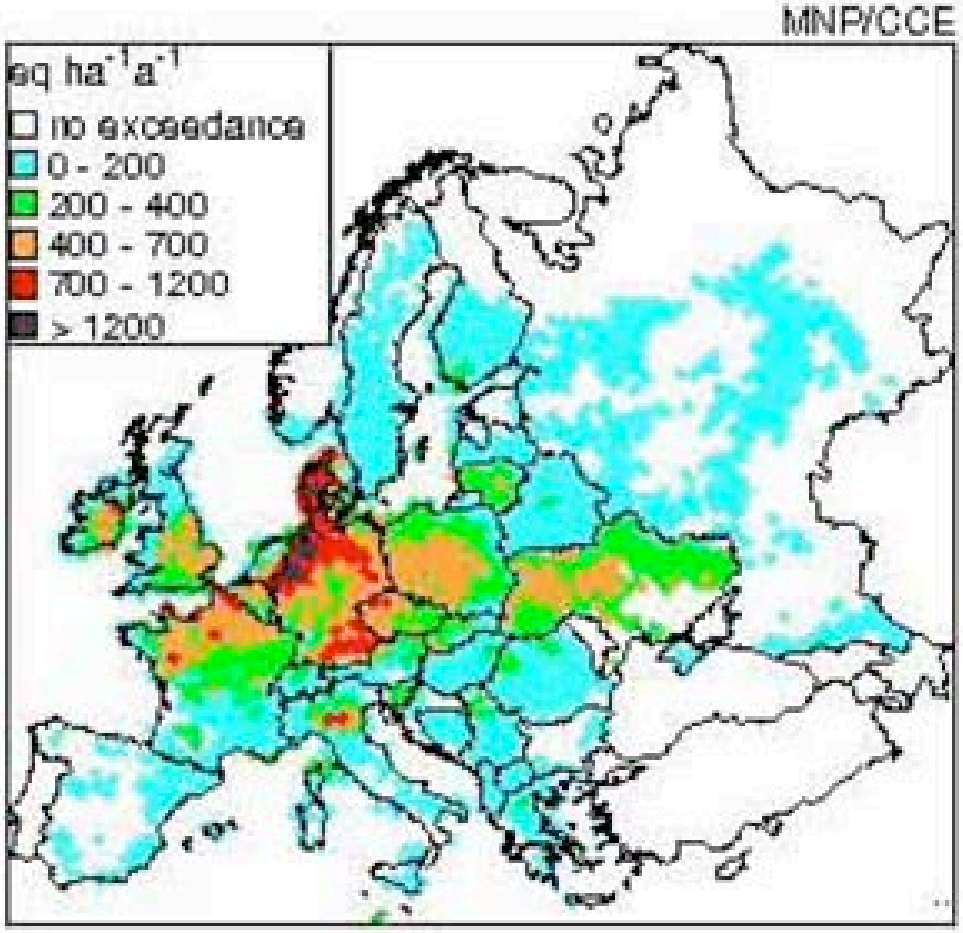



Überschreitung noch auf 95% der Fläche

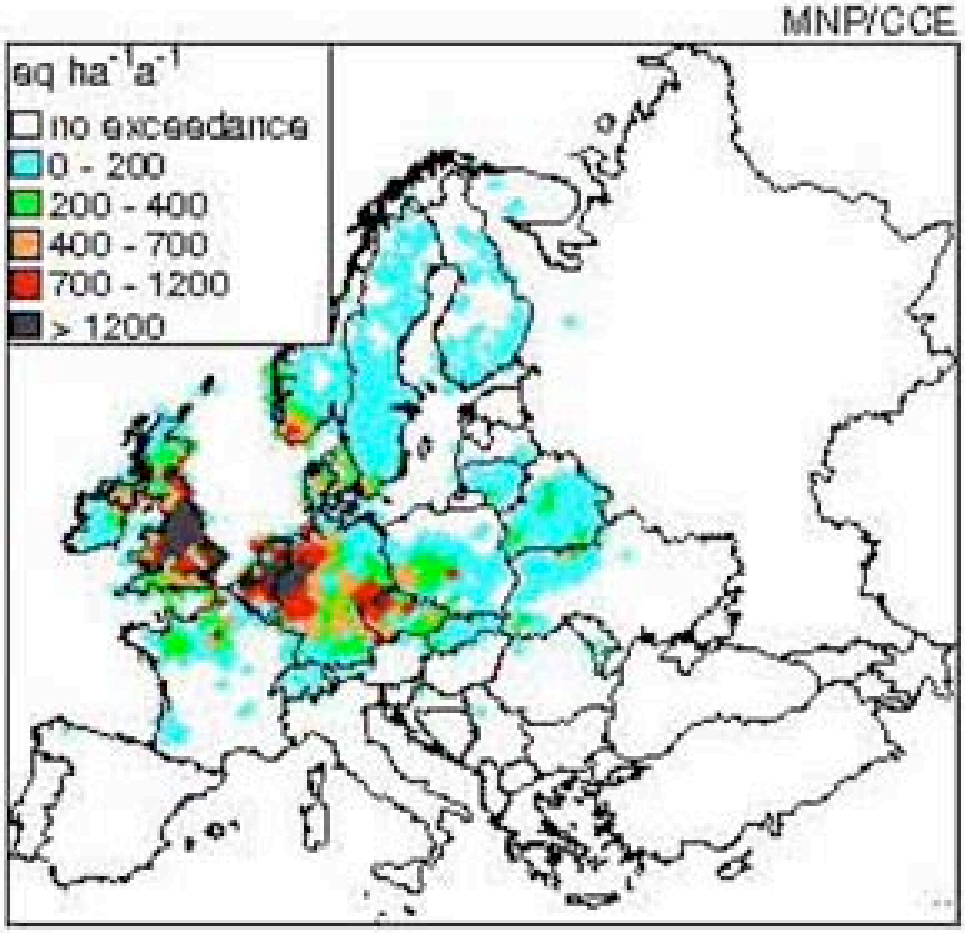
**Quelle:** Umweltbundesamt 2007. UBA Vorhaben 204 63 252: Projekt "Nationale Umsetzung EU-NEC-Richtlinie/CAFE-Strategie", Abschlußbericht 2007.

# 1945

## Exceedance nut. nitrogen




## Exceedance acidity



# Was tun?

## Gegenmaßnahmen

- Wald in produktiver Phase halten
  - Verjüngung, Baumschlag
- Düngung mit P, K, Mg damit das Wachstum angeregt und mehr N fixiert wird
- Entzug von Biomasse
  - Heuernte, komplette Bäume, Plaggen/Schoppern, Feuer
    - Problem: andere Nährstoffe werden auch entfernt

# Düngung mit K+Mg+Ca+P

Boxman et al. 1994

Rot-Eichenforst in Niederlanden
ca. 200 kg N/(ha · a) Deposition
Düngung jeweils im Dezember 1988–1990

verbesserte Nährstoffverhältnisse, Abnahme der [N] in Blättern
leicht erhöhter pH, geringere Ammonium und Nitratwerte im Boden
höhere Blattvitalität

**Table 1. Estimation of percentage of vital leaves[a]**

| | Plot | 1987 | 1990 |
|---|---|---|---|
| 1250 kg | F1 | 25–35 | 80–90 |
| Kontrolle | C1 | 10–20 | 10–20 |
| 2500 kg | F2 | 50 | 80–90 |
| Kontrolle | C2 | 5–10 | 10–20 |
| 3750 kg | F3 | 20 | 80–90 |
| Kontrolle | C3 | 5–10 | 5–10 |

[a] Estimations of two independent observers. The lowest and the highest estimations are given.

# Kosten für N-Entfernung (Plaggen) in Heidelandschaften

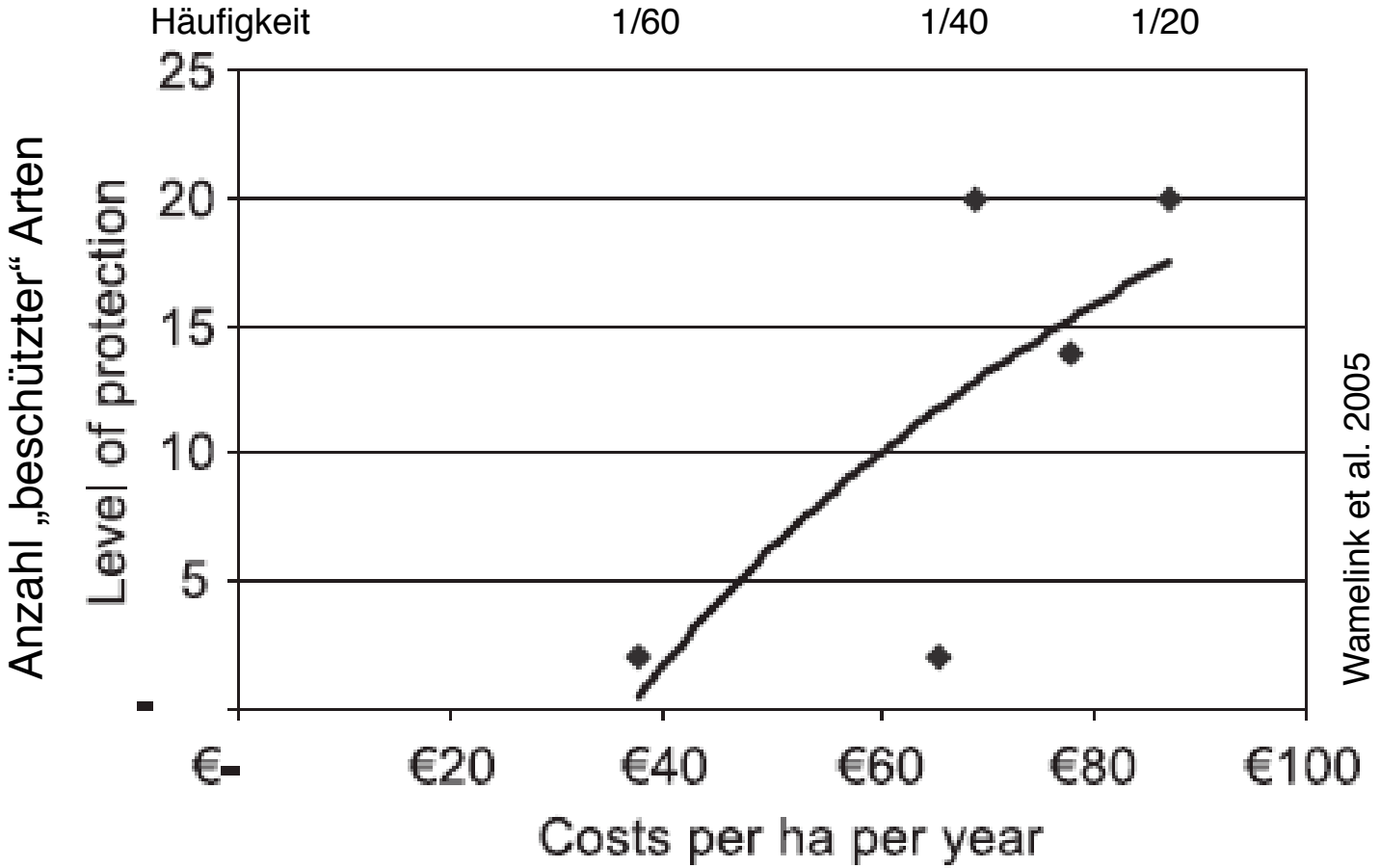



Fig. 5. Relation between nature management costs and level of protection for ‘dry inland heath’ (Hz 3.9).

Plaggen kostet etwa 3100 €/ha (Verband Deutscher Naturparke)

# Kosten für Pflegemaßnahmen Lüneburger Heide

- Kontrolliertes Brennen: 300 - 380 €/ha,
  Beweidung: 138 - 171 €/ha,
  Mahd: 50 - 500 €/ha,
  Schoppern: 1.500 - 2.000 €/ha,
  Plaggen: 2.800 - 3.500 €/ha

- jährliche Gesamtkosten: 676.000 €

- Touristen würden 1,50 bis 2,00 € täglich für den Erhalt der Landschaft bezahlen: 4.700.000 € Einnahmen

- möglicher Gewinn: ≈ 4 Millionen €

http://www.verein-naturschutzpark.de/offenlandpflege.htm

# Nährstoffentzug durch Pflegemaßnahmen

Theoretisch wirksame Dauer (a)

| | N | Ca | K | Mg | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Mahd | 5 | | 37 | | 74 |
| Brand Herbst | 5 | 4 | 15 | 3 | 19 |
| Brand Winter | 5 | 2 | 32 | 1 | 19 |
| Plaggen | 90 | | 177 | | 764 |

Niemeyer et al. 2005, Härdtle et al. MS

## Senkung der Ammoniak-Emissionen in der Landwirtschaft

- **Verminderung des Düngeeinsatzes**
- **Reduzierung des Viehbestandes**
- **Optimierung des N-Gehalts im Futter**
- **Verbesserung der Lagerung von Mineraldünger und Gülle**

http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3141

# Verminderung von Ammoniak-Emissionen aus Gülle

- **Abdeckung des Lagers**
  - **nur vorübergehende Minderung**

- **Anderes**
  - **Fütterung**
  - **Bindung**
  - **pH-Änderung**

| Minderungsmaßnahmen | Kosten | Minderung |
|---|---|---|
| Strohhäcksel | 1,00 €/(m² a) | |
| Granulatschüttung | 1,60 €/(m² a) | |
| Einsatz von BKS (Schwimmschicht ca. 5 cm stark) | 1,77 €/(m² a) | |
| Schwimmfolie | 1,90 €/(m² a) | |
| Zeltdach | 2,70 €/(m² a) | |
| befahrbare Betondecke | 3,30 €/(m² a) | |
| proteinangepasste Fütterung | 1,20 €/(m³ a) | –20% |
| Einsatz von Braunkohlenstaub (Einmischung von 3 Ma.-% BKS) | 2,20 €/(m³ a) | –95% |
| Einsatz von Säuren | 5,00 €/(m³ a) | –20% |

http://www.ve.fh-lausitz.de/organisation/mitarb/straub/diplom/lw_guelle/

# 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 $CO_2$, Erwärmung (Stoffwechsel, Verlängerung der Vegetationsdauer)
- Management
- Langzeitstudien mit realistischen Depositionswerten

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.

Gilliam, F. S. 2006. Response of the herbaceous layer of forest ecosystems to excess nitrogen deposition. Journal of Ecology 94:1176-1191.

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.

Holland, E. A., Braswell, B.H., Sulzman, J.U. and J.-F. Lamarque, J.-F. 2005. Nitrogen deposition onto the United States and western Europe: synthesis of observations and models. – Ecological Applications 15:38-57.

Johnson, D. W. 2006. Progressive N limitation in forests: Review and implications for long-term responses to elevated $CO_2$. Ecology 87:64-75.

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 embarassment of riches: atmospheric deposition of nitrogen and community and ecosystem processes. – Trends in Ecology and Evolution 12: 74-78.

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.

Townsend, A. R., R. W. Howarth, F. A. Bazzaz, M. S. Booth, C. C. Cleveland, and S. K. Collinge. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. Frontiers in Ecology and the Environment 2003:240-246.

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.

# Web-Links

http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Service/Home_ic.html **Klima**
http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Service/Home_4p7.html **Global Change**
http://www.**umweltbundesamt**.de/
http://www.**umwelt.niedersachsen**.de/master/C23332458_N23066128_L20_D0_I598.html
http://nadp.sws.uiuc.edu/ **Depositionsprogramm der USA**
http://www.grida.no/ **UNEP**
http://www.**emep**.int
http://www.**unece**.org/env/europe/monitoring/index.html

**Vorlesung**
http://sci.martinkoechy.de/lectures/