

TEXTE

15/2013

Erstellung einer methodenkonsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland

Teil 2

Abschlussbericht

Forschungskennzeichen 35101081
UBA-FB 001507

Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE:

Erstellung einer methoden- konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und Ihren Wirkungen in Deutschland Teil 2 Abschlussbericht

Projektteile:

**(1) Kartierung von Deposition Loads für das Prognose-Jahr 2020:
Modellierungs- und Kartierungsergebnisse, Kartenabbildungen,
Grafiken und regionale Statistik**

von

Thomas Gauger

Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)

**(2) Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren
Überschreitungen für eine prognostizierte Deposition im Jahr 2020**

von

Hans-Dieter Nagel, Angela Schlutow, Thomas Scheuschner

ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und
Umweltdatenmanagement mbH, Strausberg

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4444.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie:

Projektteil 1:
Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)
Breidscheidtstraße 2, 70174 Stuttgart

Projektteil 2:
ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und
Umweltdatenmanagement mbH, Strausberg
Hergermühlenstraße 58, 15344 Strausberg

Abschlussdatum:

Juni 2011

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3
Luftverunreinigungen und terrestrische Ökosysteme
Markus Geupel, Jakob Frommer

Dessau-Roßlau, Januar 2013

„Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer methodenkonsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Teil 2“

Erratum: Kapitel 3.1 - 3.4, Karten 9 – 12

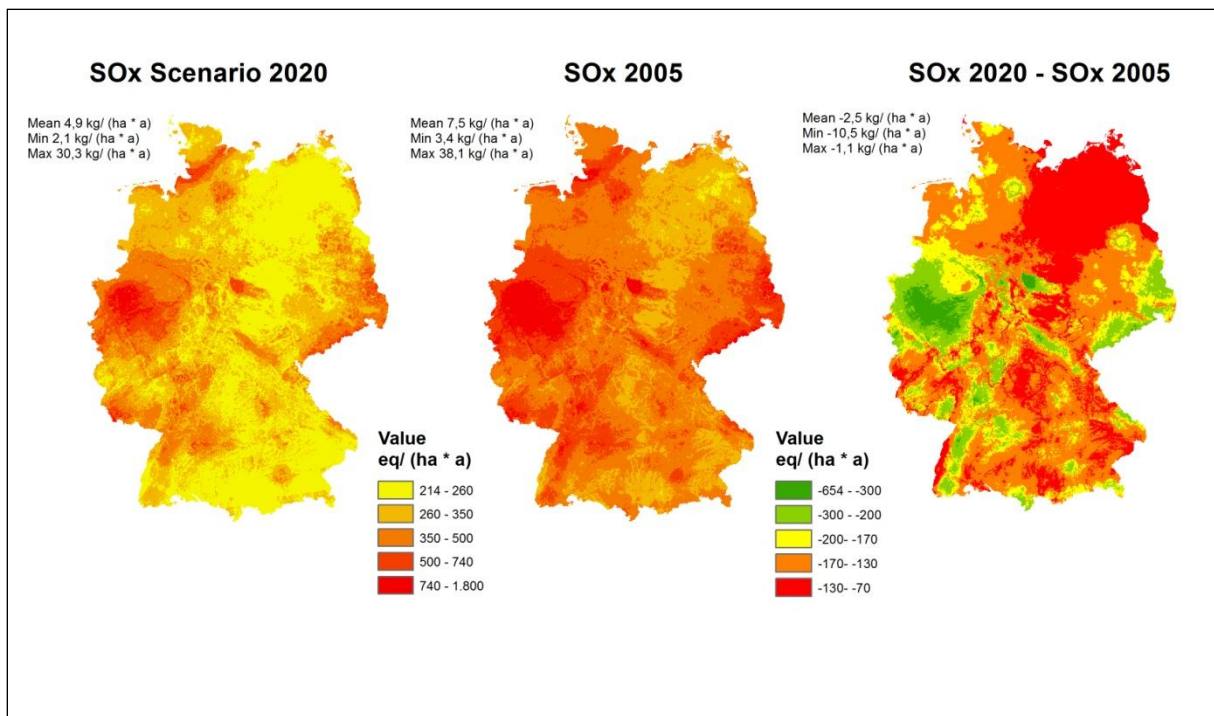
Verantwortlich: UBA

Erratum:

Vor Veröffentlichung des Abschlussberichts wurde festgestellt, dass die Karten 9, 10, 11 und 12 im Teil 1 (Teilaufgabe INS) des hier abgedruckten Berichts teilweise fehlerhaft waren. Dies hat Auswirkungen auf die Diskussion der Ergebnisse in den Kapiteln 3.1 bis 3.4. Auf alle weiteren Schlussfolgerungen hat dies keine Auswirkungen. Im Folgenden ist eine durch das UBA berichtigte Fassung der genannten Kapitel abgedruckt:

3.1 Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_x-S_{nss}) 2005 und 2020

Die Kartierungsergebnisse der Schwefel-Gesamtdeposition (SO_x-S_{nss}) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 9 abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen flächendeckend in Minderungen des Schwefel-Gesamteintrags (grün-rot in Karte 9, rechts). Gebiete mit deutlicher Minderung (bis zu $-10,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sind solche, die sich in 2005 durch hohe Schwefel-Deposition auszeichneten (grün in Karte 9, rechts). In denjenigen Gebieten, die im Jahr 2005 relativ geringe Einträge erhielten ist nur ein geringer Rückgang der Schwefel-Gesamtdeposition (max. $-1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) zu beobachten (rot in Karte 9, rechts). Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei $-2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (ca. -35%) und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen zwischen $-10,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $-1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Schwefel (S). Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 6 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der Schwefel-Gesamteinträge um im Mittel für Deutschland ca. -35% ist bei jeder Landnutzungs-kategorie deutlich sichtbar.



Karte 9: Vergleich der SO_x-S_{nss} Deposition 2005 und 2020¹

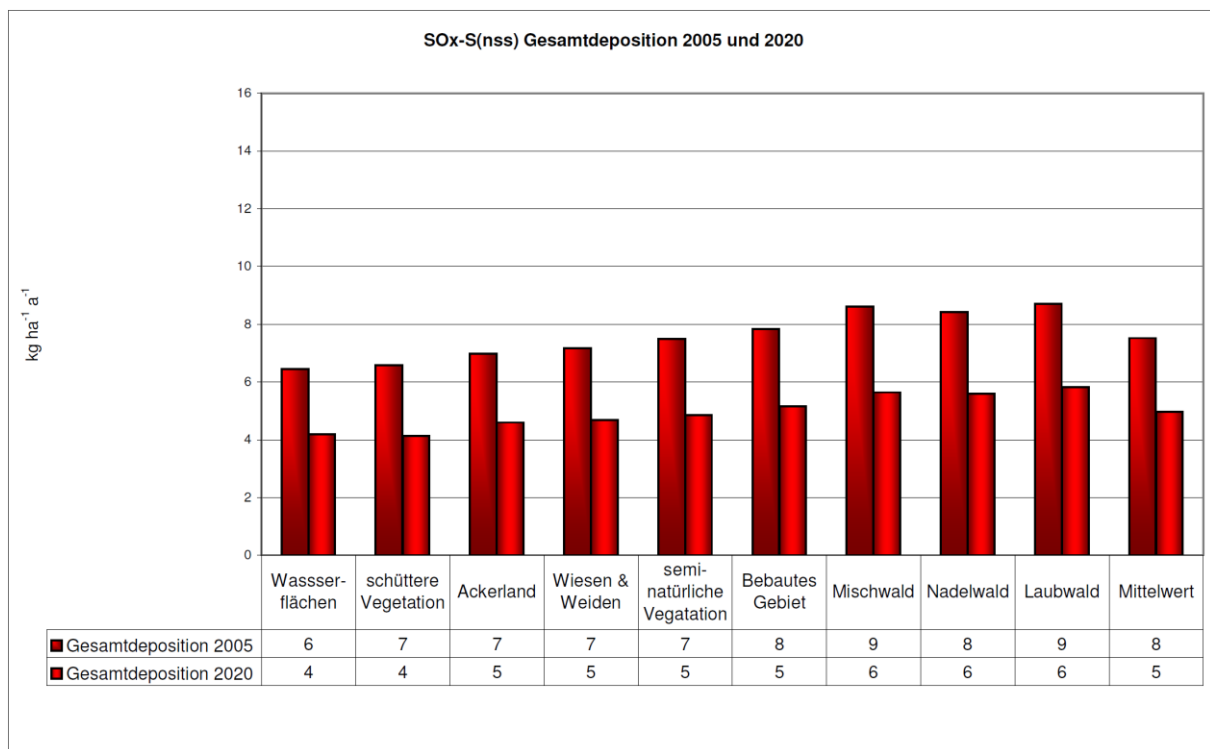


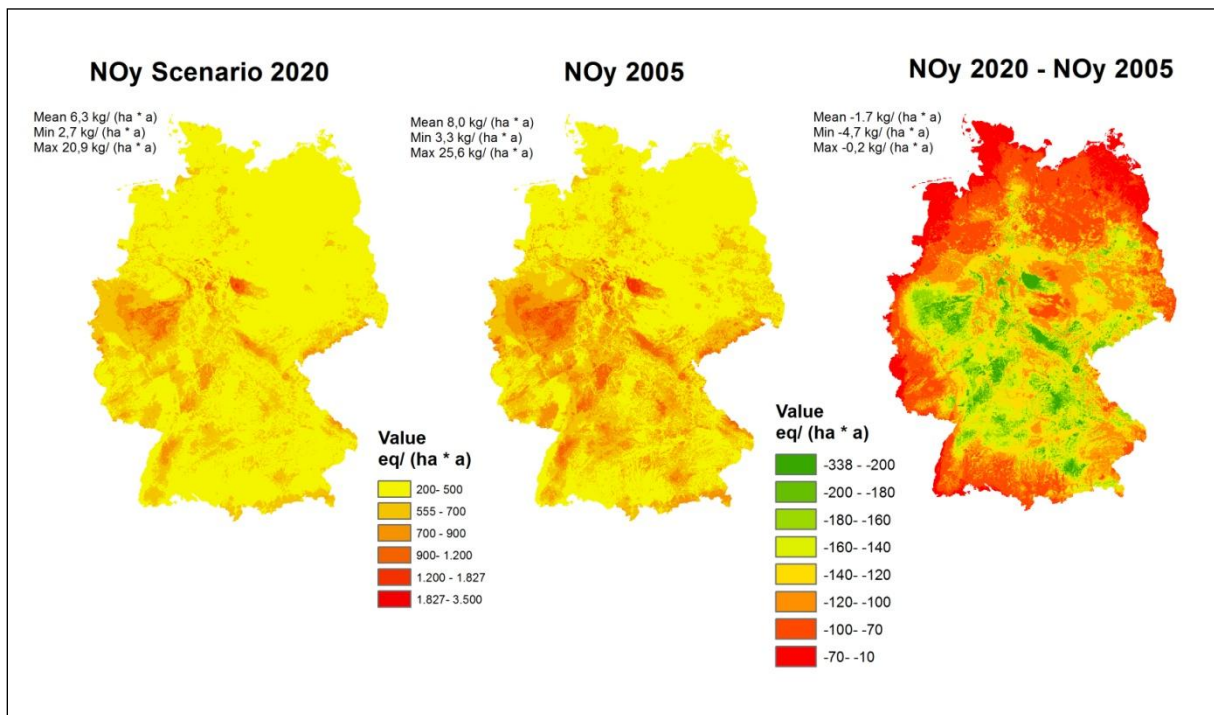
Abbildung 6: Gegenüberstellung der SO_x-S_{nss} Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

¹ Umrechnung von eq in kg:

	Stöchiometrische Wertigkeit	Molare Masse [g]	Equivalent Masse [g]	Faktor eq → kg
NH _x -N	1 ⁺	14,01	14,01	0,014
NO _y -N	1 ⁺	14,01	14,01	0,014
SO _x -S	2 ⁺	32,06	16,03	0,016

3.2 Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) 2005 und 2020

Die Kartierungsergebnisse der Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 10 von links nach rechts abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen in einer flächendeckenden Minderungen des Gesamteintrags von oxidiertem Stickstoff. Die quantitativ größten Abnahmen entfallen im Wesentlichen auf diejenigen Gebiete, die in 2005 relativ hohe NO_Y-N Einträge erhalten. Die geringeren Abnahmen entlang der westlichen Grenze Deutschlands sind auf die konservative Grundannahme bei der Szenarienbildung zurückzuführen, der zufolge die Emissionen des Auslands konstant auf dem Niveau des Jahres 2005 blieben. Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei etwa $-1,7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (ca. -20 %) und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen zwischen $-4,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $-0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N). Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 7 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der NO_Y-N -Gesamteinträge um im Mittel für Deutschland ca. -20% ist bei jeder Landnutzungsklasse deutlich sichtbar.



Karte 10: Vergleich der NO_y-N Gesamt-Deposition 2005 und 2020¹

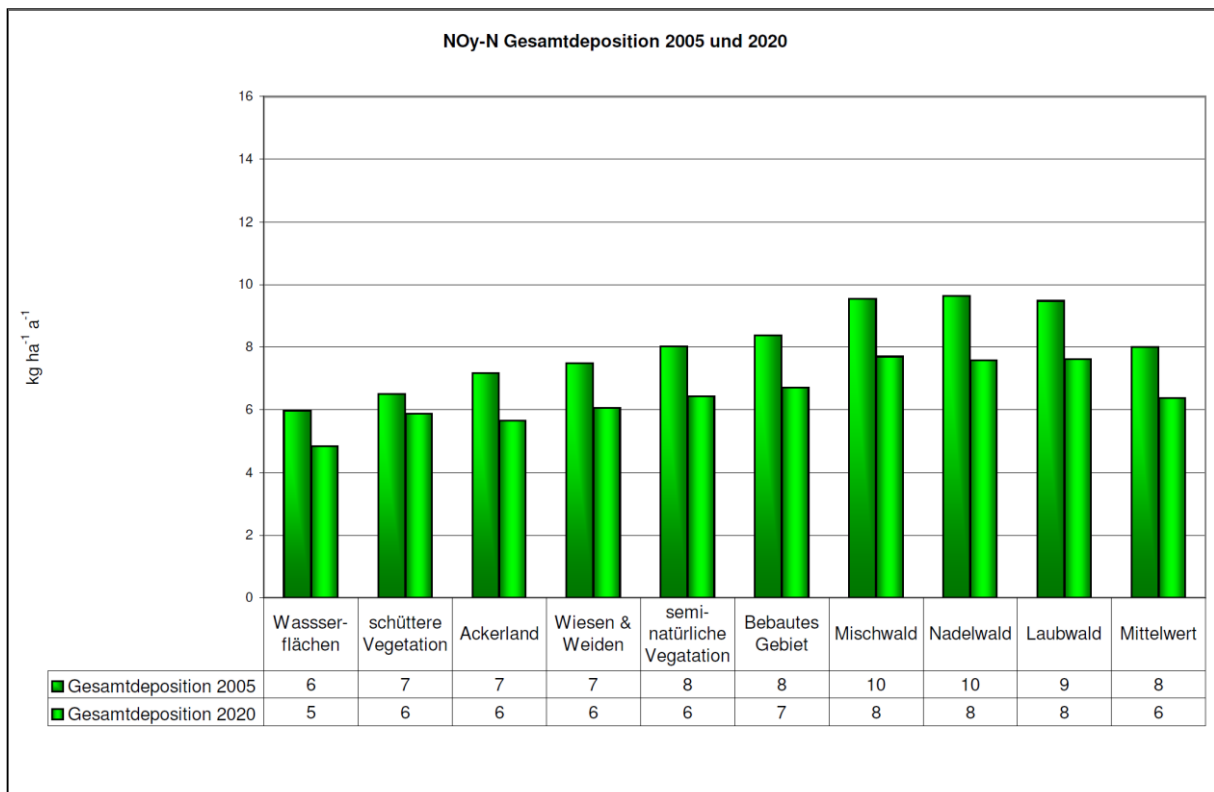
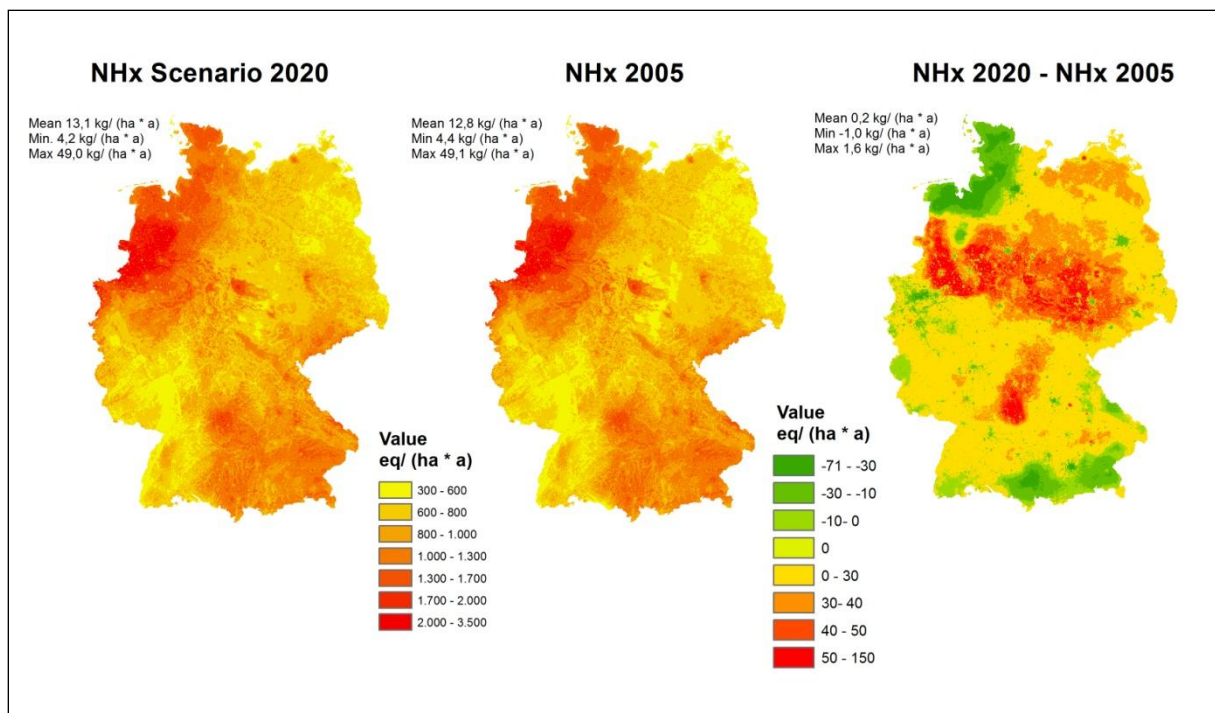


Abbildung 7: Gegenüberstellung der NO_y-N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

3.3 Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) 2005 und 2020

Die Kartierungsergebnisse der Gesamtd deposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 11 von links nach rechts abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen überwiegend in einer geringen Erhöhung des Gesamteintrags von reduziertem Stickstoff über großen Gebieten. Nur wenige kleinere Gebiete erhalten nach der Prognose-Berechnung für 2020 geringere NH_x-N Einträge als im Jahr 2005.

Insgesamt sind die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 sehr gering (und deutlich kleiner als die Unsicherheiten der Modellierung); sie liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer Zunahme um etwa $+0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NH_x-N$ (etwa 2 %) und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu $-1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu $1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ reduziertem Stickstoff (NH_x-N). Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtd deposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 8 dargestellt. Der prognostizierte Anstieg der NH_x-N -Gesamteinträge um rund +2% im Mittel für Deutschland ist sehr gering, wodurch sich die Änderungen der Mittelwerte je Landnutzungsklasse nur im Nachkommastellenbereich der dargestellten $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bewegen und die Säulen im Prognose-Jahr 2020 gleich hoch oder nur geringfügig größer sind als die der Berechnung für das Jahr 2005.



Karte 11: Vergleich der NH_x-N Gesamt-Deposition 2005 und 2020¹

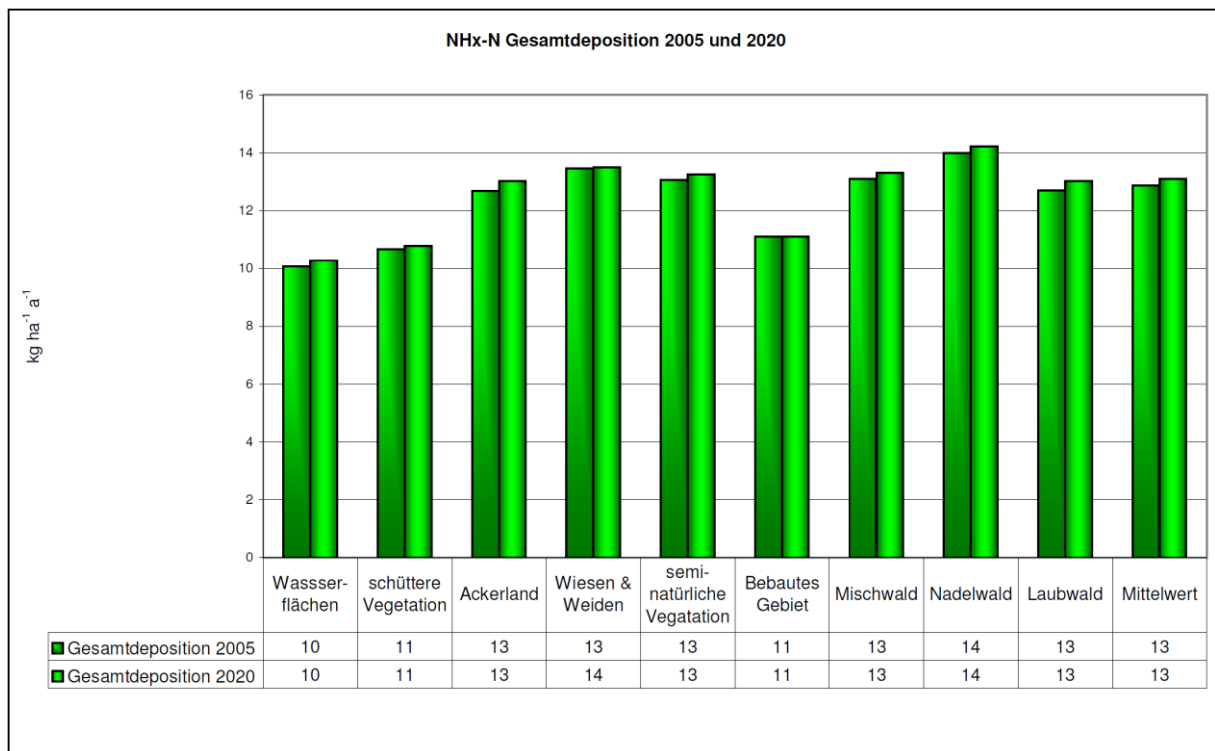


Abbildung 8: Gegenüberstellung der NH_x-N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

3.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N) 2005 und 2020

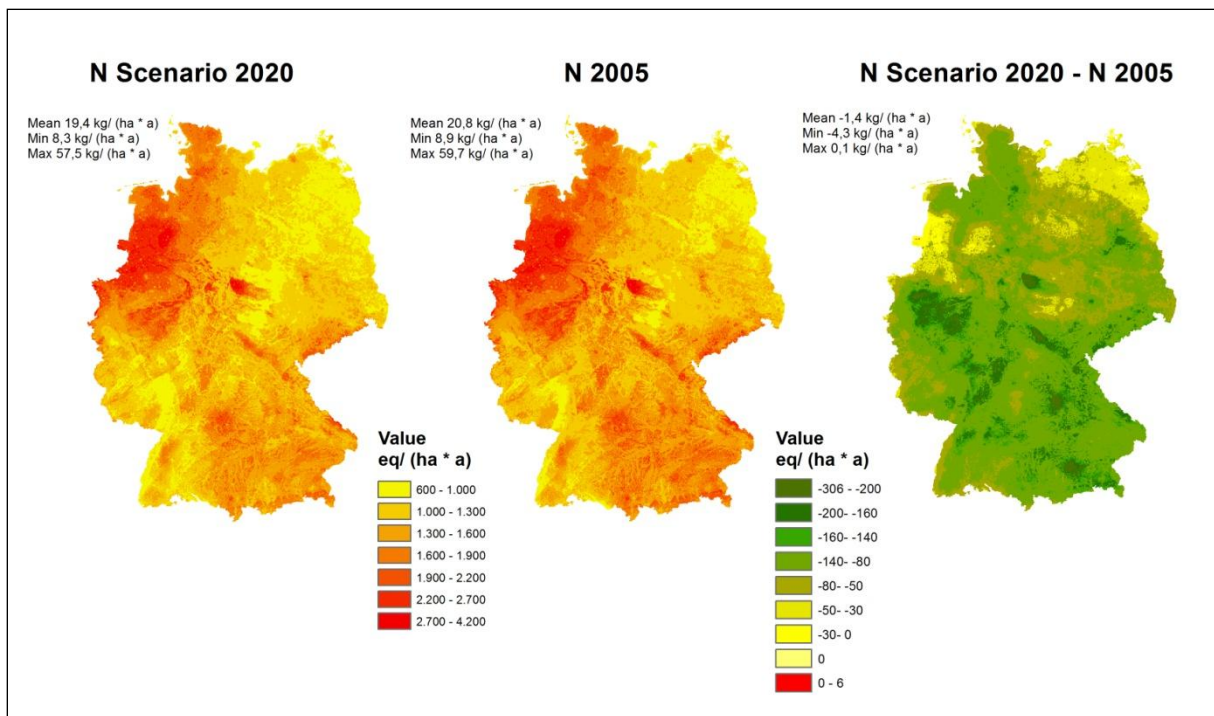
Die Kartierungsergebnisse der Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff ($N = NH_x-N + NO_y-N$) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 12 von links nach rechts abgebildet.

Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen fast ausschließlich in einer Minderung des Gesamteintrags von Gesamt-Stickstoff. Nur auf deutlich weniger als 0,01% der Fläche kommt es zu einer geringen Zunahme. Hierbei überlagern sich die prognostizierten Entwicklungen für NO_y-N und NH_x-N .

Die quantitativ größten Abnahmen entfallen (wie beim oxidierten Stickstoff) im Wesentlichen auf diejenigen Gebiete, die in 2005 relativ hohe NO_y-N Einträge erhalten. Ansonsten kommt es nahezu flächendeckend zu Abnahmen zwischen 0,5 und 1,5 kg N ha⁻¹ a⁻¹.

Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer leichten Abnahme um -1,4 kg ha⁻¹ a⁻¹ N (etwa -7 %) und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu -4,3 kg ha⁻¹ a⁻¹ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu 0,1 kg ha⁻¹ a⁻¹ Stickstoff (N).

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 9 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der N-Gesamteinträge um knapp -7% im Mittel für Deutschland ist bei jeder Landnutzungs-kategorie deutlich sichtbar.



Karte 12: Vergleich der N Gesamt-Deposition 2005 und 2020¹

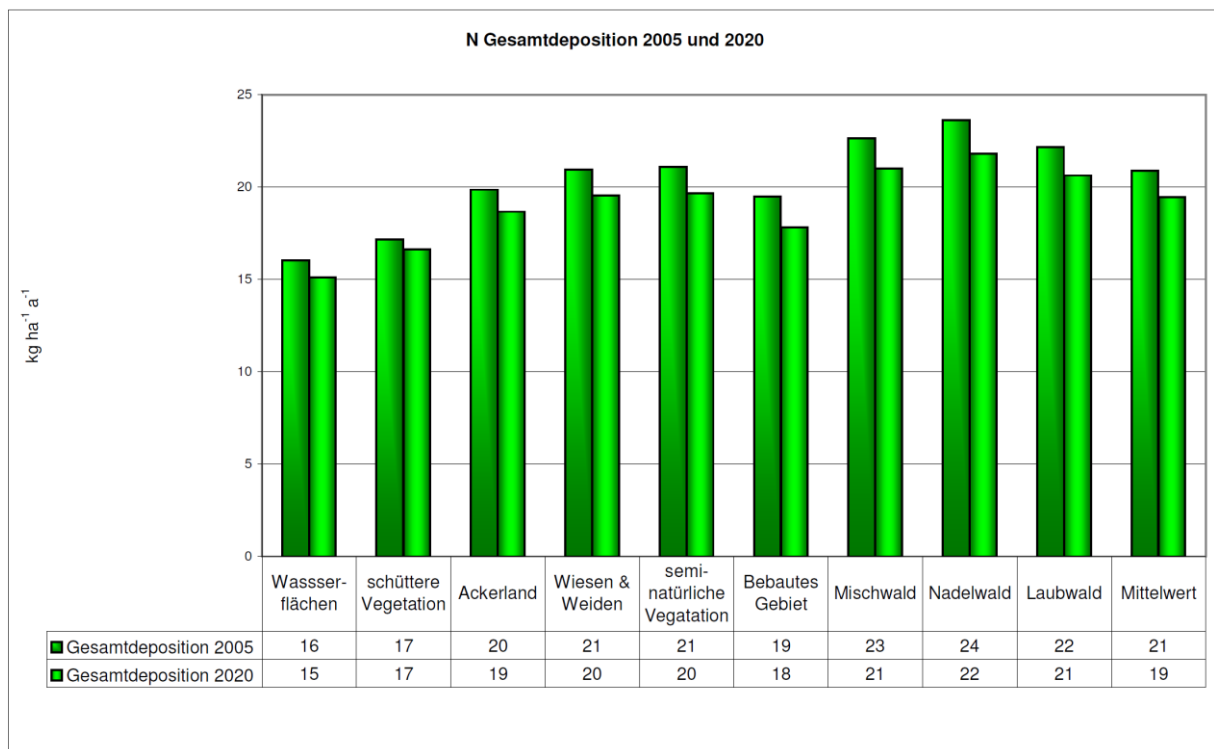


Abbildung 9: Gegenüberstellung der N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wird die Gesamt-Deposition der anthropogen emittierten oxidierten Schwefelverbindungen (SO_x-S_{nss}), oxidierten Stickstoffverbindungen (NO_x-N) und reduzierten Stickstoffverbindungen (NH_x-N) auf der Datenbasis der Emissionsprognose des BMU/UBA Projektes „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (PArtikel REduktions STRategien, PAREST, BMU/UBA FE-Nr. 206 43 200/01) für das Prognose-Jahr 2020 ermittelt. Diese Emissionsprognosen, im PAREST-Projekt als Referenzszenario 2020 bezeichnet, sind Grundlage der Berechnungen mit dem LOTOS-EUROS Modell, das auf der Basis von Meteorologie-Daten des Jahres 2005 Ergebnisse für Trocken- und Nass-Depositionsflüsse im Prognose-Jahr 2020 liefert.

Die Datenaufbereitung und Bereitstellung der Gesamt-Deposition für das Prognose-Jahr 2020 erfolgt in methodischer Analogie zum abgeschlossenen BMU/UBA Forschungsvorhaben FE-Nr 3707 64 200 „Erfassung, Prognose und Bewertung von Schadstoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland“ („Modelling of Air Polluants and Ecosystem Impact – MAPESI“). Dazu sind umfangreiche Bearbeitungsschritte nötig zur geometrisch einheitlichen, hoch aufgelösten Berechnung der Flüsse von Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition im $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster, die zur Gesamt-Deposition addiert werden.

Die flächenhafte GIS basierte Modellierung der Nass-Deposition beruht im methodischen Standard-Ansatz der Depositionskartierung in Deutschland (vgl. Gauger et al. 2008, Gauger 2011a) auf Messungen in den Routine-Messnetzen des Depositionsmonitoring der Länder und des Bundes. Auf dieser Datengrundlage kann jedoch ohne weiteres keine Zukunfts-Prognose erfolgen.

Parallel zur Trocken-Deposition berechnet das LOTOS-EUROS Modell in einer vereinfachten Prozess-Simulation der Auswaschung aus der Atmosphäre auch eine Nass-Deposition auf der Basis von Emissionsdaten, Ausbreitungsberechnungen und Daten von Niederschlagsraten. Die Nassdepositionsfrachten dieser Modellberechnung stimmen im Ergebnis jedoch nicht gut mit den vorliegenden Messungen der Nass-Deposition überein, sondern diese unterschätzen i.d.R. deutlich. Die LOTOS-EUROS Prognose der Nass-Deposition in 2020 wird deshalb in einem GIS basierten Verfahren mit dem Ziel einer Anpassung an die aus Monitoring-Daten erzeugten Nass-Depositionsfrachten nachbearbeitet.

Dazu werden die Änderungen zwischen 2005 und 2020 nach den Ergebnissen der LOTOS-EUROS Berechnung auf die flächenhaften Karten der Nass-Depositionsfrachten im $1 \times 1 \text{ km}^2$ des Basis-Jahres 2005 als Verhältnisse übertragen (s. Kapitel 1.1 „Zeitliche Skalierung für Datensätze der Nass-Deposition 2020“).

Die Berechnung der Feucht-Deposition basiert auf dem Methodischen Ansatz von BLEEKER ET AL. (2000). Dazu werden die im GIS räumlich hoch aufgelösten und zeitlich skalierten Daten der Nass-Deposition für das Prognose-Jahr 2020 und die DWD-Niederschlagsdaten des Jahres 2005 verwendet (s. Kapitel 1.2 „Berechnung der Datensätze der zeitlich skalierten Feucht-Deposition 2020“).

Mit dem angewandten Verfahren werden Datensätze für das Prognose-Jahr 2020 erzeugt, die mit den vorhandenen Depositions-Datensätzen vorangegangener Jahre geometrisch übereinstimmen und in erforderlicher hoher räumlicher, auf Ökosystemebene gültiger Auflösung verfügbar sind, um beispielsweise für eine Wirkungsanalyse auch Critical Loads Überschreitungen zu berechnen (siehe NAGEL ET AL. 2011).

Die Änderungen der Gesamtdeposition für Schwefel- und Stickstoffverbindungen zwischen dem Basis-Jahr 2005 und dem Prognose-Jahr 2020 sind nicht groß.

Betrachtet man die Mittelwerte, so weisen die Daten bei der Gesamt-Deposition von **oxidiertem Schwefel aus anthropogenen Quellen (SO_x-S_{nss})** im Jahr 2020 gegenüber dem

Jahr 2005 eine mittlere Minderung um ca. 35% aus, was absolut jedoch nur ca. $-2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ entspricht. Die gesamte Spanne aller Änderungen zwischen 2005 und 2020 besteht örtlich in Minderungen des Jahreseintrags zwischen $-10,5$ und $-1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ SO}_x\text{-S}_{\text{nss}}$.

Bei der Gesamt-Deposition von Stickstoff ist bei **oxidiertem Stickstoff ($\text{NO}_y\text{-N}$)** für das Jahr 2020 eine mittlere Minderung um etwa 21% gegenüber dem Jahreseintrag in 2005 festzustellen. Die absoluten Änderungen zwischen 2005 und der Prognose für 2020 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer Minderung um nur ca. $-1,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, wobei die Abnahmen in den einzelnen Zellen zwischen $-4,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $-0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen.

Bei der Gesamt-Deposition von **reduziertem Stickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$)** ist nach der Prognoseberechnung eine Zunahmen in einer Größenordnung von im Mittel etwa $0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwischen 2005 und 2020 zu erwarten, die örtlich in der Spanne von Minderungen der Jahresfracht um bis zu $-1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis zu Erhöhungen um bis zu $1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auftreten. Im Mittel über Deutschland ist eine Erhöhung des Gesamteintrags von $\text{NH}_x\text{-N}$ um ca. 2% festzustellen.

Die modellierten Jahresfrachten der Gesamt-Deposition von **Gesamt-Stickstoff (N)** weisen im Mittel über Deutschland eine leichte Abnahme von ca. $-1,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwischen 2005 und 2020 aus. Im Einzelnen setzt sich dieser Mittelwert aus Daten in der Spanne zwischen Minderungen von bis zu $-4,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ einerseits und um bis zu $0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ höheren Jahresfrachten zusammen. Damit mindert sich die Gesamtfracht in der N-Gesamt-Deposition im Vergleich des Jahres 2005 zum Prognose-Jahr 2020 im Mittel um nur etwa 7%.

Bei der gemeinsamen Betrachtung der für 2020 Prognostizierten Schwefel- und Stickstoff-Gesamtdeposition im Vergleich zur Belastungssituation im Basis-Jahr 2005 ist festzustellen, dass der relative Anteil reduzierter Stickstoffverbindungen ($\text{NH}_x\text{-N}$) bedeutender wird, hinsichtlich der Wirksamkeit sowohl als eutrophierender Eintrag, als auch hinsichtlich des Eintrags potentieller Säure (Abbildung 10), während Emissions-Minderungen bei Schwefel und oxidiertem Stickstoff fortschreiten.

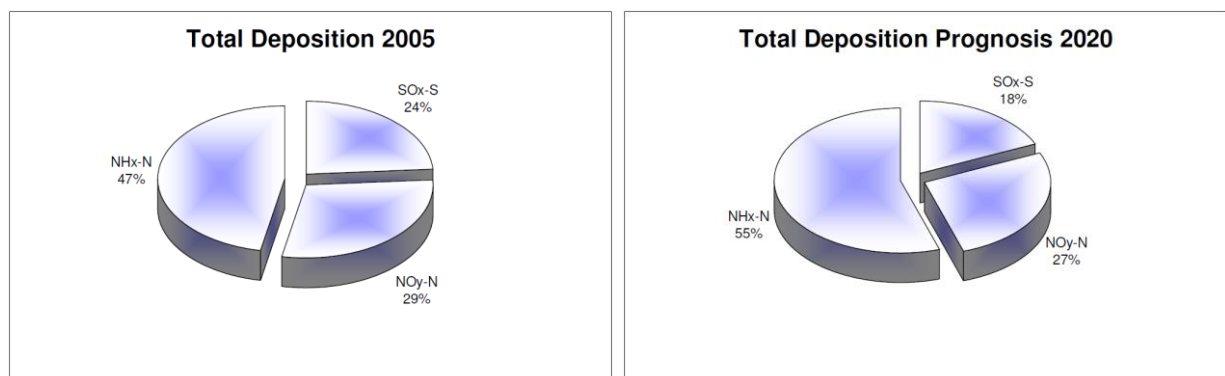


Abbildung 10: Gegenüberstellung der mittleren $\text{NH}_x\text{-N}$, $\text{NO}_y\text{-N}$ und $\text{SO}_x\text{-S}$ Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020 auf Grundlage von (Säure-)Äquivalenten [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Luftreinhaltung

Förderkennzeichen BMU/UBA 351 01 081

„Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer methoden-konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Teil 2.“

Abschlussbericht,
Projektteile:

(1) Kartierung von Deposition Loads für das Prognose-Jahr 2020:
Modellierungs- und Kartierungsergebnisse, Kartenabbildungen, Grafiken und
regionale Statistik

von Thomas Gauger
thomas.gauger@nav.uni-stuttgart.de

Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. A. Kleusberg

(2) Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren Überschreitungen
für eine prognostizierte Deposition im Jahr 2020

von Hans-Dieter Nagel, Angela Schlutow, Thomas Scheuschner
information@oekodata.com

ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH, Strausberg

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

2011

1.	Berichtsnummer UBA-FB 001507	2.	Abschlussbericht	3.	Teil 2
4.	Titel des Berichts Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer Methoden-Konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland, Teil 2				
5.	Autor(en), Name(n), Vorname(n) Gauger, Thomas ⁽¹⁾ Nagel, Hans-Dieter ⁽²⁾ Schlutow, Angela ⁽²⁾ Scheuschner, Thomas ⁽²⁾	8.	Abschlussdatum 28. Februar 2011		
6.	Durchführende Institution (Name, Anschrift) ⁽¹⁾ Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS) Breitscheidstraße 2 70174 Stuttgart	9.	Veröffentlichungsdatum Juni 2011		
7.	Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau	10.	UFOPLAN-Nr. BMU/UBA FKZ 351 010 81		
		11.	Seitenzahl 45 Seiten & 11 Seiten		
		12.	Literaturangaben 11 Literaturangaben		
		13.	Tabellen und Diagramme 11 Tabellen		
		14.	Abbildungen 10 Abb. + 10 Karten & 8 Abb.		
15.	Zusätzliche Angaben ⁽²⁾ ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltmanagement mbH Hegermühlenstraße 58 15344 Strausberg				
16.	Zusammenfassung Der Abschlussbericht stellt die Methoden und wesentlichen Arbeitsergebnisse des Forschungsprojektes dar: - Aufbauend auf den Ergebnissen der LOTOS-EUROS Berechnungen der trockenen Deposition von Schwefel (S) und Stickstoffverbindungen (N) für das Prognose-Jahr 2020 werden mittels GIS-Modellierung hoch auflösende, auf ökosystemebene gültige Datensätze der Trockendeposition für Deutschland erzeugt. - Es erfolgt eine zeitliche Skalierung der messnetzbasierten Modellierung der Nass-Depositionsfracht des Jahres 2005 auf das Prognose-Jahr 2020 unter Nutzung von Ergebnissen der LOTOS-EUROS Schätzungen der Nassdeposition in 2005 und 2020. - Ebenso wird die Feuchte Deposition für das Prognose-Jahr 2020 GIS basiert berechnet. - Die Gesamt-Deposition des Jahres 2020 für Schwefel- und Stickstoffverbindungen wird aus den hoch auflösenden, ökosystemspezifischen GIS-Datensätzen der Nass-, Trocken- und Feucht- Deposition für S und N erzeugt. - Es werden die Arbeiten zur Modellierung und Kartierung der Critical Loads für Schwefel- und Stickstoffeinträge in hoher räumlicher Auflösung für Ökosysteme in Deutschland für das Jahr 2020 berechnet und dargestellt sowie die sich daraus ableitenden Critical Load Überschreitungen. - Es erfolgt eine Darstellung der Zeitreihe der Critical Loads Überschreitungen für die Jahre 1990 bis zum Prognose-Jahr 2020 - Stickstoffeinträge sind aktuell hauptsächliche Ursache für die Überschreitung von Critical Loads in Deutschland. Die Prognose 2020 lässt darauf schließen, dass die Zielstellung zum Schutz von Ökosystemen und der Biodiversität verfehlt werden, wenn N-Emissionen und folglich N-Einträge nicht weiter vermindert werden.				
17.	Schlagwörter Modellierung – Kartierung – Atmosphärische Deposition – Schwefel – Stickstoff – Eutrophierung – Versauerung – Critical Loads für Säureeinträge – Critical Loads für Stickstoffeinträge – Critical Load Überschreitungen				
18.	Preis	19.		20.	

1. Report No. UBA-FB 001507	2. Final Report	3.
4. Report Title UNECE convention on long-range transboundary air pollution: compilation of a methodology consistent time series of atmospheric deposition and air pollution effects in Germany. <i>In German</i>		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Gauger, Thomas ⁽¹⁾ Nagel, Hans-Dieter ⁽²⁾ Schlutow, Angela ⁽²⁾ Scheuschner, Thomas ⁽²⁾		8. Report Date 28. February 2011
6. Performing Organisation (Name, Address) ⁽¹⁾ Institute of Navigation University Stuttgart (INS) Brettscheidstraße 2 D-70174 Stuttgart		9. Publication Date June 2011
7. Funding Agency (Name, Address) Federal Environmental Agency (UBA) Postfach 14 06 D-06813 Dessau-Roßlau		10. UFOPLAN-Ref. No. FKZ BMU/UBA 351 01 081
		11. No. of Pages 45 & 11
		12. No. of Reference 11
		13. No. of Tables, Diagrams 11
		14. No. of Figures 10 Figures & 10 Maps and 8 Figures
15. Supplementary Notes ⁽²⁾ ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltmanagement mbH Hegermühlenstraße 58 D-15344 Strausberg		
16. Abstract The final report summarises methods and main results of the research project: - Results of LOTOS-EUROS calculations of sulphur (S) and nitrogen (N) dry deposition for the prediction year 2020 are recalculated into ecosystem specific high resolution dry deposition data sets for Germany using GIS modeling. - Wet deposition loads of the year 2005 based on measurements are scale to the prediction year 2020 using the ratio of changes from LOTOS-EUROS estimates of wet deposition for 2005 and 2020. - Cloud & fog (occult) deposition for the prediction year 2020 is calculated using GIS modeling. - Total deposition of sulphur (S) and nitrogen (N) for the prediction year 2020 is calculated using ecosystem specific high resolution wet, dry and cloud & fog deposition GIS data sets. - Modelling and mapping of Critical Loads exceedances for sulphur and nitrogen deposition is carried out for the prediction year 2020 in high spatial resolution for the ecosystems in Germany. - A time series of critical loads exceedances is generated covering the years from 1990 up to the prediction year 2020. - Atmospheric nitrogen input at present is the main cause for critical loads exceedances in Germany. The prediction for the year 2020 leads to the conclusion, that the objectives for the protection of ecosystems and biodiversity will not be met, if no further mitigation of N emission and hence N deposition will be implemented.		
17. Keywords modelling – mapping – deposition loads – sulphur – nitrogen – eutrophication – acidity – critical loads – critical loads exceedance		
18. Price	19.	20.

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Luftreinhaltung

Förderkennzeichen BMU/UBA 351 01 081

„Genfer Luftreinhaltkonvention der UNECE: Erstellung einer methoden-konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Teil 2.“

Abschlussbericht,
Projektteil:

Kartierung von Deposition Loads
für das Prognose-Jahr 2020

Modellierungs- und Kartierungsergebnisse,
Kartenabbildungen, Grafiken und regionale Statistik

von

Thomas Gauger

thomas.gauger@nav.uni-stuttgart.de

Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. A. Kleusberg

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	II
Kartenverzeichnis.....	III
1 Aufgabenstellung und Lösungsweg zur Berechnung der Gesamt-Deposition für das	
Prognose-Jahr 2020.....	1
1.1 Zeitliche Skalierung für Datensätze der Nass-Deposition 2020	3
1.2 Berechnung der Datensätze der zeitlich skalierten Feucht-Deposition 2020.....	4
2 Ergebnisse der Modellierung und Kartierung von Nass-, Trocken-, Feucht- und	
Gesamtdeposition in Deutschland für das Szenario 2020.....	6
2.1. Statistik der Modellierungsergebnisse für S und N Spezies	7
2.1.1 Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_X-S_{nss})	7
2.1.2 Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_X-N).....	8
2.1.3 Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N)	9
2.1.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N)	9
2.2. Kartierungsergebnisse für S und N Spezies der Prognose für 2020	11
2.2.1 Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_X-S_{nss})	11
2.2.2 Deposition von oxidierten Stickstoff (NO_Y-N).....	17
2.2.3 Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_X-N).....	23
2.2.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N)	29
3 Vergleich zwischen der Modellierung und Kartierung für 2005 und dem Szenario 2020	35
3.1 Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_X-S_{nss}) 2005 und 2020	35
3.2 Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) 2005 und 2020.....	37
3.3 Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_X-N) 2005 und 2020.....	39
3.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N) 2005 und 2020	41
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	43

Literatur	45
------------------------	-----------

Abschluss-Bericht der Teilaufgabe ÖKO-DATA:

Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren Überschreitungen für eine prognostizierte Deposition im Jahr 2020

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Best-fit-Parameter a und b nach BLEEKER ET AL. 2000:	5
- Tabelle 2: Mittlere jährliche Gesamtdosition von $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{NSS}}$, $\text{NH}_x\text{-N}$, $\text{NO}_y\text{-N}$ und N 2005-2007 und nach dem Szenario 2020.....	7
- Tabelle 3: Anteile der $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{NSS}}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdosition 2005-2007 und 2020	8
- Tabelle 4: Anteile der $\text{NH}_x\text{-N}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdosition 2005-2007 und 2020	8
- Tabelle 5: Anteile der $\text{NO}_y\text{-N}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdosition 2005-2007 und 2020	9
- Tabelle 6: Anteile von $\text{NH}_x\text{-N}$ und $\text{NO}_y\text{-N}$ an der N Gesamtdosition 2005-2007 und 2020.....	10
- Tabelle 7: Anteile der N Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdosition 2005-2007 und 2020.....	10
- Tabelle 8: Regionale Statistik der $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{NSS}}$ Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdosition 2020.....	16
- Tabelle 9: Regionale Statistik der $\text{NO}_y\text{-N}$ Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdosition 2020.....	22
- Tabelle 10: Regionale Statistik der $\text{NH}_x\text{-N}$ Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdosition 2020.....	28
- Tabelle 11: Regionale Statistik der N Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdosition 2020	34

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Modellierung und Kartierung der rezeptorspezifischen, räumlich hoch aufgelösten Gesamt-Deposition in Deutschland	1
- Abbildung 2: Mittlere Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdosition an der $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{NSS}}$ Gesamtdosition 2020	14
- Abbildung 3: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdosition an der $\text{NO}_y\text{-N}$ Gesamtdosition 2020.....	20
- Abbildung 4: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdosition an der $\text{NH}_x\text{-N}$ Gesamtdosition 2020.....	26
- Abbildung 5: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdosition an der N Gesamtdosition 2020	32
- Abbildung 6: Gegenüberstellung der $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{NSS}}$ Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020.....	36
- Abbildung 7: Gegenüberstellung der $\text{NO}_y\text{-N}$ Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020.....	38

- Abbildung 8: Gegenüberstellung der $\text{NH}_x\text{-N}$ Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020..... 40
- Abbildung 9: Gegenüberstellung der N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020..... 42
- Abbildung 10: Gegenüberstellung der mittleren $\text{NH}_x\text{-N}$, $\text{NO}_y\text{-N}$ und $\text{SO}_x\text{-S}$ Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020 auf Grundlage von Säure-Äquivalenten [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] 44

Kartenverzeichnis

- Karte 1: Nass-, Trocken-, Feuchtdeposition von oxidiertem Schwefel ($\text{SO}_x\text{-S}_{\text{nss}}$) 2020	14
- Karte 2: Gesamtdeposition von oxidiertem Schwefel ($\text{SO}_x\text{-S}_{\text{nss}}$) 2020	15
- Karte 3: Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition von oxidiertem Stickstoff ($\text{NO}_y\text{-N}$) 2020.....	20
- Karte 4: Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff ($\text{NO}_y\text{-N}$) 2020.....	21
- Karte 5: Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition von reduziertem Stickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$) 2020	26
- Karte 6: Gesamtdeposition von reduziertem Stickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$) 2020	27
- Karte 7: Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition von Gesamtstickstoff (N) 2020	32
- Karte 8: Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) 2020	33
- Karte 11: Vergleich der $\text{NH}_x\text{-N}$ Gesamt-Deposition 2005 und 2020	40
- Karte 12: Vergleich der N Gesamt-Deposition 2005 und 2020	42

1 Aufgabenstellung und Lösungsweg zur Berechnung der Gesamt-Deposition für das Prognose-Jahr 2020

Thomas Gauger

Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS), Breitscheidstraße 2, 70174 Stuttgart thomas.gauger@nav.uni-stuttgart.de

Grundsätzlich soll in dieser Projekt-Studie die vorhandene Zeitreihe der Modellierung und Kartierung der Gesamt-Deposition der Jahre 2004 bis 2007 um das Prognose-Jahr 2020 erweitert werden. Bedingung ist eine möglichst einheitliche Vorgehensweise (Methodenkonsistenz), um eine möglichst direkte Vergleichbarkeit aller Jahre zu gewährleisten. Die Berechnung und Kartierung der Deposition Loads für das Prognose-Jahr 2020 stützt sich deshalb auf die Methoden, die im Laufe verschiedener Projekte im Auftrag des Umweltbundesamtes weiterentwickelt und in den entsprechenden Abschlussberichten dokumentiert wurden (GAUGER ET AL. 1997, 2000, 2002, 2005, 2008, 2011a,b). Im Projekt „Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland“ (BMU/UBA FE-Nr. 3707 64 200) wurde diese Methodik bei der Berechnung und Kartierung der rezeptorspezifischen, räumlich hoch aufgelösten Gesamt-Deposition (vgl. Abb. 1) für die Jahre 2004 bis 2007 angewendet.

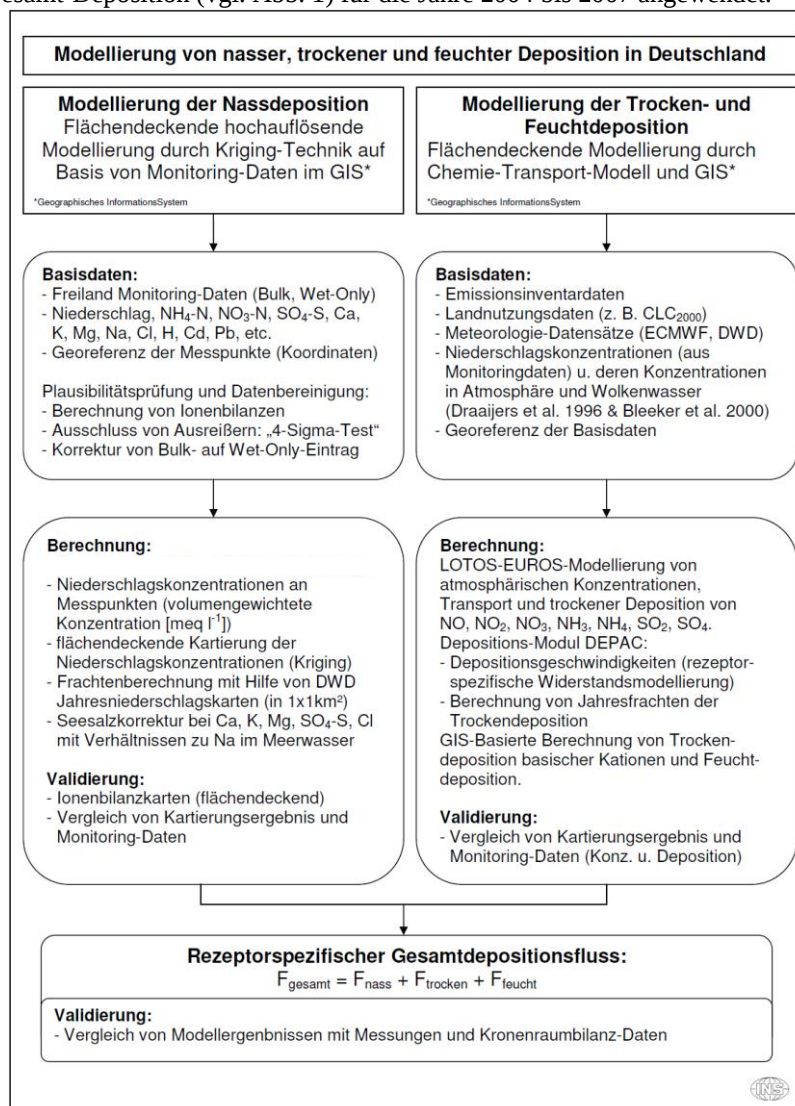


Abbildung 1: Modellierung und Kartierung der rezeptorspezifischen, räumlich hoch aufgelösten Gesamt-Deposition in Deutschland

Die Aufgabenstellung erfordert eine Modellierung der Gesamtdosition von Stickstoff- und Schwefelkomponenten in enger Anlehnung an die im FE 3707 64 200 verwendeten Methodik für die prognostizierten Daten des Jahres 2020.

Die Gesamtdosition wird als Summe der Teil-Flüsse der Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition berechnet. Die Modellierung der Trocken-Deposition für Stickstoff- und Schwefel-Spezies für das Jahr 2020 erfolgt in einem gesondert vergebenen Projektteil mit dem LOTOS-EUROS Modell bei TNO in Utrecht, Niederlande. Hierbei wird die Trockendeposition auf der Grundlage einer prognostizierten Emissionsminderung berechnet, die im BMU/UBA Projekt „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (PARTikel REDuktions STRategien, PAREST, BMU/UBA FE-Nr. 206 43 200/01) ermittelt worden ist. Dies erfolgt auf Basis der Emissionsdaten des Jahres 2005. Für die Minderungen bis 2020 wird die Umsetzung der Vorgaben gegenwärtiger rechtlich verbindlicher Vorschriften (engl.: under current legislation, „CLE“) angesetzt. Die Modellierungsergebnisse des LOTOS-EUROS Modells bestehen in Jahres-Daten der Nass-Deposition von anthropogenen (nicht-seesalz) oxidierten Schwefelverbindungen ($\text{SO}_x\text{-S}_{\text{Nss}}$), von oxidierten Stickstoffverbindungen ($\text{NO}_y\text{-N}$) und reduzierten Stickstoffverbindungen ($\text{NH}_x\text{-N}$) und der Trocken-Deposition von anthropogenen Schwefel- (SO_2 , SO_4) und Stickstoff-Spezies (NO , NO_2 , NO_3 , HNO_3 , NH_3 , NH_4) und werden am INS von TNO übernommen. Die LOTOS-EUROS Ergebnisse liegen in geographischer Projektion und in einer Raster-Auflösung von $0,0625^\circ \times 0,125^\circ$ vor und werden durch ein massenkonstantes post-processing in GIS basierter Modellierung in der erforderlichen flächentreuen metrischen Projektion und räumlich hohen Auflösung aufbereitet. Hierbei werden die LOTOS-EUROS Rasterdaten mit Hilfe von Geostatistischen Methoden (Ordinary Kriging) in eine Raster-Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ in metrischer Projektion überführt. Die Methodik dieser räumlichen Skalierung ist im Abschlussbericht des sog. MAPESI-Projektes ausführlich dargestellt (Gauger, 2011a, b).

Für die vorliegende Studie wurde das Prognose-Jahr 2020 ausgewählt. Die Prognose der Luftschadstoffeinträge im Jahr 2020 erfolgt unter Nutzung der Ergebnisse und Daten von Emissions-Szenarien, die im Projekt „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (BMU/UBA FE-Nr. 206 43 200/1, PAREST) entwickelt wurden. Diese Daten liegen der LOTOS-EUROS Modellberechnung der Trocken- und Nass-Deposition zugrunde. Die Berechnung erfolgt bei TNO in Utrecht, NL. Daten der zur Modellierung notwendigen Meteorologie stammen grundsätzlich aus dem Jahr 2005. Für Einzelheiten dazu sei hier auf den Bericht des gesondert vergebenen Teil-Projekt „Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer methoden-konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Teil 1“ verwiesen.

Die Aufgaben im vorliegenden Teil 2 des Projektes bestehen im Wesentlichen in der Berechnung von Datensätzen hoch aufgelöster rezeptorspezifischer Gesamt-Deposition für Stickstoff- (N) und Schwefel (S) für das Jahr 2020, die zur Prognose-Berechnung der Critical Loads Überschreitung 2020 verwendet werden. Die Berechnung der Deposition Loads 2020 erfolgt am Institut für Navigation der Universität Stuttgart, die Berechnung der Critical Loads Überschreitungen bei der Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement (ÖKO-DATA) in Strausberg.

Die Modellierung der Gesamt-Deposition für Stickstoff- (N) und Schwefel (S) für das Jahr 2020 erfolgt in

enger Anlehnung an die in BMU/UBA 3707 64 200 verwendeten und dokumentierten Methodik (GAUGER 2011a).

Die Gesamt-Deposition setzt sich aus den drei Teil-Flüssen der Trocken-, Nass-, und Feucht-Deposition zusammen (vgl. Abb. 1). Die mit LOTOS-EUROS modellierten Datensätze Nass- und Trocken-Deposition im Prognose-Jahre 2020 liegen in geographischer Projektion und Rasterzellen von $0,0625^\circ \cdot 0,125^\circ$ vor und werden mit Hilfe von Geostatistischer Modellierung im Geographischen Informations System (GIS: ArcGiIS, ArcInfo) in ein metrisches $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster umgerechnet. Die Trocken-Deposition aus LOTOS-EUROS liegt für die Stickstoff-Spezies NO , NO_2 , HNO_3 , NH_3 , NH_4 , NO_3 und die Schwefel-Spezies SO_2 und SO_4 vor, die Nass-Deposition für SO_4 , NO_3 und NH_4 .

1.1 Zeitliche Skalierung für Datensätze der Nass-Deposition 2020

Da die Nass-Deposition in der Modellierung des LOTOS-EUROS Modells in der Regel sehr deutlich geringere Frachten ausweist als die Ergebnisse des in Deutschland angewendeten Standard-Verfahrens nach dem Mapping Manual des ICP MODELLING&MAPPING (1996, 2004), bei dem sich die Modellierung von Nassdepositionsfrachten auf Messungen stützt, erfolgt eine Übertragung der mit LOTOS-EUROS prognostizierten Änderung der Nassdeposition im Jahr 2020 auf die vorhandene messnetzbasierend modellierte Nass-Deposition des Jahres 2005 (zeitliche Skalierung). Dabei werden die Verhältnisse der LOTOS-EUROS Modellierungsergebnisse der Nass-Deposition zwischen 2005 aus BMU/UBA 3707 64 200 und der Prognose-Modellierung für 2020 berechnet und damit die Ergebnisse der GIS gestützten geostatistischen Modellierung für das Jahr 2005 (GAUGER 2011b) umgerechnet. Die Vorgehensweise bei der zeitlichen Skalierung für Datensätze der Nass-Deposition 2020 besteht in folgenden Arbeitsschritten:

- (1) aus grob aufgelösten LOTOS-EUROS Raster-Daten der Nassdepositionsflüsse werden GIS-Modellierte Karten in $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterauflösung für die Jahre 2005 und 2020 bearbeitet (nach INS scale down Methodik für hohe, ökosystemspezifische flächendeckende Depositionsfluss-Daten)
- (2) das Verhältnis der INS messnetzbasierten original Nassdepositionsflüsse in $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterauflösung für das Jahr 2005 zur LOTOS-EUROS Modell-Nassdeposition in $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterauflösung im Jahr 2005 wird als „Korrekturkarte“ berechnet
- (3) mit dieser wird das Ergebnis der messnetzbasierten Nassdepositionskarte für 2005 auf das Jahr 2020 durch Übertragung der räumlich hoch aufgelösten Verhältnisse zwischen dem Jahr 2005 und 2020 je Rasterzelle skaliert

Die zeitliche Skalierung erfolgt nach Formel 1.1:

$$X_{INSscaled,2020} = (X_{INSorg,2005} / X_{L-Ewet,2005}) \cdot X_{L-Ewet,2020} \quad \text{Formel 1.1}$$

wobei

X = $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterkarte(n) der Nass-Deposition [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]

$X_{INSorg,2005}$ = INS Originaldaten des Jahresbezugs 2005, aus Messnetzbasierter GIS-Modellierung ($1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster)

$X_{L-Ewet,2005}$ = aus LOTOS-EUROS Nassdepositions-Schätzung für 2005 GIS-modellierte Karte (im $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster)

$X_{L-Ewet,2020}$ = aus LOTOS-EUROS Nassdepositions-Schätzung für 2020 GIS-modellierte Karte (im $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster)

$X_{INSscaled,2020}$ = Ergebnis: Messnetzbasierte INS-Nassdepositions-Karte (im $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster), die um die Änderungen der Modellergebnisse der LOTOS-EUROS Nass-Deposition zwischen den Jahren 2005 und 2020 korrigiert ist

Grundannahme ist bei diesem Verfahren, dass sich die Änderungen der Emissionen zwischen 2005 und 2020 bei der Berechnung durch das LOTOS-EUROS Modell in den Schätzungen der Nassdeposition dieser Jahre flächenhaft differenziert abbildet, trotzdem in den durch LOTOS-EUROS modellierten Nassdepositionsfeldern nur ein Bruchteil der tatsächlichen stofflichen Nassdepositionsfracht erfasst wird. Damit wird auch die innerhalb des LOTOS-EUROS Modells erfolgte Abbildung der Verfrachtung vom Emissionsort zum Nass-Depositionsort in das Verfahren indirekt über die LOTOS-EUROS Ergebnisse beider Jahre einbezogen. Andererseits berücksichtigt das Verfahren die Quantitäten und räumliche Verteilung, die sich in den nach der INS-Methodik GIS-modellierten $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterkarten der Messnetzbasierten Nassdepositionsfelder darstellt.

1.2 **Berechnung der Datensätze der zeitlich skalierten Feucht-Deposition 2020**

Die Berechnung der Feucht-Deposition wird nach der in GAUGER (2011a) beschriebenen Methodik bearbeitet. Es kommt das Verfahren nach BLEEKER ET AL. (2000) zur Anwendung. Dabei wird auf die in Abschnitt 1.1 beschriebene, zeitlich auf das Jahr 2020 skalierte Nass-Deposition und Niederschlagsfelder des DWD aus dem Jahr 2005 zurückgegriffen, um die flächendeckende Konzentration im Niederschlag für das Prognose-Jahr 2020 zu berechnen. Die für 2020 prognostizierte Feucht-Deposition wird für Schwefel ($\text{SO}_4\text{-S}$) und die Stickstoff-Spezies ($\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$) mit den mittleren Flüssigwassergehalten der Atmosphäre aus 2005 und den Depositionsgeschwindigkeiten für Partikel nach LOTOS-EUROS Berechnungen für das Jahr 2005 modelliert.

Die Berechnung der Konzentration im Niederschlag für 2020 erfolgt nach Formel 1.2:

$$[C]_{rain,sc2020} = X_{INSscaled,2020} / nied_{2005} \quad \text{Formel 1.2}$$

wobei:

$X_{INSscaled,2020}$ = für das Jahr 2020 zeitlich skalierte Nassdepositions-Karten (im $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster) von $\text{SO}_x\text{-S}$, $\text{NO}_y\text{-N}$ und $\text{NH}_x\text{-N}$

$nied_{2005}$ = $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Rasterkarte des Niederschlagsmenge 2005 (DWD Niederschlag im $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster)

$[C]_{rain,sc2020}$ = Konzentration im Niederschlag für 2020 von $\text{SO}_x\text{-S}$, $\text{NO}_y\text{-N}$ und $\text{NH}_x\text{-N}$ ($1 \cdot 1 \text{ km}^2$ Raster)

Daten-Grundlagen der Berechnung der Feucht-Deposition nach Bleeker et al 2000 sind somit:

- die $\text{SO}_4\text{-S}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen im Niederschlag ($[C]_{rain}$) als $1 \times 1 \text{ km}^2$ Rasterkarten für 2020, berechnet aus zeitlich skalierte Nass-Deposition und Niederschlagsmengen des Jahres 2005
- die Parameter a und b , die die Konzentration im Wolkenwasser ($[C]_{cloud}$) bei gegebener Niederschlagskonzentration ($[C]_{rain}$) beschreiben (nach BLEEKER ET AL. 2000; s. Tabelle 1)
- die Geländehöhe (z) in Deutschland aus einem Digitalen Höhenmodell (DHM des BGR, 1998)
- die mittleren Flüssigwassergehalte der Atmosphäre (LWC , *liquid water content*) des Jahres 2005 (Datenbereitstellung durch die FU-Berlin in BMU/UBA 3707 64 200)
- die aus dem atmosphärischen Widerstand für Partikel modellierten mittleren Jahreswerte der Depositionsgeschwindigkeit (v_d) des Jahres 2005 (LOTOS-EUROS Berechnung aus BMU/UBA 3707 64 200)

Die Berechnung der Feuchten Deposition (nach BLEEKER ET AL. 2000) erfolgt folgendermaßen:

Die Konzentration in der Atmosphäre ($[C]_{air}$) wird bestimmt als:

$$[C]_{cloud} = a \cdot z^b \cdot [C]_{rain} \quad \text{Formel 1.3}$$

Der feuchte Depositionsfluss ($[F]_{cloud}$) wird berechnet als:

$$[F]_{cloud} = [C]_{cloud} \cdot LWC \cdot v_d \quad \text{Formel 1.4}$$

Tabelle 1: Best-fit-Parameter a und b nach BLEEKER ET AL. 2000:

Spezies	a	b
SO_4	341	-0,64
NO_3	912	-0,77
NH_4	25,6	-0,24
H	15,3	-0,24
Na	$9,1 \cdot 10^5$	-1,90
Mg	$6,0 \cdot 10^7$	-2,50
Ca	$1,3 \cdot 10^5$	-1,60
K	$2,2 \cdot 10^3$	-0,99
Cl	$3,0 \cdot 10^6$	-2,09

Die zeitliche Skalierung der Nassdepositionsfelder 2005 auf das Jahr 2020 ist somit auch Grundlage der Berechnung der Feuchte-Deposition für das Jahr 2020. Da keine Prognose der Meteorologie für das Jahr 2020 vorliegt, werden die vorhandenen Daten des Jahres 2005 verwendet.

2 Ergebnisse der Modellierung und Kartierung von Nass-, Trocken-, Feucht- und Gesamtd deposition in Deutschland für das Szenario 2020

In den folgenden Kapiteln werden die Modellierungs- und Kartierungsergebnisse für Einträge der Gesamtd deposition und die einzelnen Flüsse der Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition im Prognosejahr 2020 sowie der Jahre 2005 bis 2007 dargestellt, für die aus dem BMU/UBA-Projekt BMU/UBA 3707 64 200 Modellierungsergebnisse und mit entsprechender Methodik erarbeitete flächendeckende Kartierungsergebnisse vorliegen. Im Kapitel 2.1 werden die jeweiligen Teilflüsse der Gesamtd deposition des Prognosejahrs 2020 und der Jahre 2005 bis 2007 betrachtet. Regionalisierte Erläuterungen der Karten-Darstellungen mit Abbildungen zur inhaltlichen Veranschaulichung der Karten-Statistik sowie Tabellen der Regionalstatistik (auf Basis der Bundesländer und Landnutzungsklassen) der jeweiligen Kartierungsergebnisse werden im Kapitel 2.2 gegeben. Eine vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse des Prognose-Jahres 2020 mit dem Modellierungsergebnissen des Jahres 2005 wird im anschließenden Kapitel 3 anhand von Karten und Abbildungen gemacht.

Die Gesamtd deposition setzt sich aus dem Beitrag von drei verschiedenen Depositionsflüssen zusammen. Die nasse Deposition ist der Eintrag von gelösten Spezies in Rezeptorsysteme durch alle Arten von wassergebundenen Niederschlägen (Regen, Schnee, u. a. Hydrometeore). Die trockene Deposition ist der gasförmige oder partikuläre Eintrag luftgetragener Spezies in ungelöster Form. Die Deposition der Inhaltsstoffe im Nebel- und Wolkenwasser wird als feuchte (auch: „okkulte“) Deposition oder „cloud&fog deposition“ bezeichnet.

Die Gesamtd deposition (F_{gesamt}) wird als Summe der drei einzelnen Depositions-Flüsse der Nass- (F_{nass}), Trocken- ($F_{trocken}$) und Feuchtd deposition (F_{feucht}) berechnet (vgl. Abb. 1):

$$F_{gesamt} = F_{nass} + F_{trocken} + F_{feucht} \quad \text{Formel 2.1}$$

Die bei dem Prognose-Jahr 2020 betrachteten, aufgrund anthropogener Aktivitäten emittierten, und nach atmosphärischem Transport deponierten Spezies sind:

- Nicht-meeresbürtige oxidierte Schwefelverbindungen:
SO_x-S_{nss}, berechnet als Summe von SO₂-S und SO₄-S_{nss}
- Oxidierte Stickstoffverbindungen:
NO_y-N, berechnet als Summe von NO-N, NO₂-N, NO₃-N und HNO₃-N
- Reduzierte Stickstoffverbindungen:
NH_x-N, berechnet als Summe von NH₃-N und NH₄-N
- Gesamt-Stickstoff:
N, berechnet als Summe aus oxidierten und reduzierten Stickstoffverbindungen (N = NH_x-N + NO_y-N)

Für die übrigen deponierten Spezies erfolgt keine Prognose-Berechnung. Soweit sie zur Berechnung der Critical Loads benötigt werden, wird auf die vorhandenen Datensätze für die Jahre 2005 bis 2007 zurückgegriffen. Dese Datensätze (Basische Kationen: BC, berechnet als Summe von Ca, K, Mg und Na, nicht meeresbürtige basische Kationen: BC_{nss}, berechnet als Summe von Ca_{nss}, K_{nss}, Mg_{nss} und Chlor: Cl und nicht meeresbürtiger Chlor: Cl_{nss}) sind im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens BMU/UBA 3707 63 20 dokumentiert (GAUGER 2011a, b):

2.1. Statistik der Modellierungsergebnisse für S und N Spezies

Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Gesamtdepositionsfrachten [in $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$] der betrachteten Schwefel- und Stickstoff-Spezies ($\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$, $\text{NH}_X\text{-N}$, $\text{NO}_Y\text{-N}$ und N) im Kartierungszeitraum 2005 bis 2007 und für das Prognose-Jahr 2020. Die Änderung des mittleren Gesamtdepositionsflusses gegenüber dem jeweiligen Vorjahr und die Änderung im gesamten betrachteten Zeitraum zwischen 2005 und dem Prognose-Jahr 2020 ist in Tabelle 2 als prozentualer Wert [in $\pm \text{x}\%$] angegeben.

Tabelle 2: Mittlere jährliche Gesamtdeposition von $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$, $\text{NH}_X\text{-N}$, $\text{NO}_Y\text{-N}$ und N 2005-2007 und nach dem Szenario 2020

	$\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$ [$\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$]	Änderung zum Vorjahr [%]	$\text{NH}_X\text{-N}$ [$\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$]	Änderung zum Vorjahr [%]	$\text{NO}_Y\text{-N}$ [$\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$]	Änderung zum Vorjahr [%]	N [$\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$]	Änderung zum Vorjahr [%]
2005	7,52	- -	12,86	- -	8,01	- -	20,87	- -
2006	7,45	-0,8	13,96	+8,5	8,36	+4,3	22,32	+6,9
2007	7,67	+2,9	14,09	+0,9	7,89	-5,6	21,98	-1,5
2020	4,96	-35,4	13,12	-6,9	6,37	-19,2	19,48	-11,4
Änderung zwischen 2005 und 2020 [%]		-34,0		+2,0		-20,5		-6,7

2.1.1 Deposition von oxidiertem Schwefel ($\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$)

Die mittlere Gesamtdepositionsfracht für anthropogen emittierten (nicht-seesalz) Schwefel ($\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$) beträgt im Zeitraum 2005 bis 2007 zwischen $7,45 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und $7,67 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Das entspricht auf der Gesamtfläche Deutschlands rund $267 \text{ kt a}^{-1} \text{ S}$ bis $275 \text{ kt a}^{-1} \text{ S}$. Die Prognose für 2020 weist für $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$ eine mittlere Gesamtdeposition von $4,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ aus, was einer deponierten Schwefel-Gesamtmenge von rund $178 \text{ kt a}^{-1} \text{ S}$ auf der Fläche Deutschlands entspricht.

Die Spanne der Unterschiede zwischen der jährlichen Gesamtdeposition von $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$ in den einzelnen Jahren 2005 bis 2007 liegen zwischen $-0,8\%$ bis $+2,9\%$ und sind damit eher gering. Für das Prognose-Jahr 2020 ergibt sich bezogen auf das Basis-Jahr 2005 ein Rückgang der Schwefel-Gesamtfracht um 34% .

Die Anteile der Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$ Gesamtdeposition in den Jahren 2005-2007 und der Prognose 2020 sind in Tabelle 4 dargestellt. Auf den nassen und trockenen Depositionsfluss zusammen entfallen im Mittel aller betrachteten Jahre ca. 92% bis 96% der Gesamtdepositionsfracht, der Anteil der Feucht-Deposition, die verfahrensbedingt nur für Gebiete über 250m Höhe berechnet wird, entfällt in Deutschland im Mittel nur ein Anteil von ca. 4% bis 8% der Gesamtdepositionsfracht von $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$. Die jeweiligen Anteile der Trockenen Deposition von $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{nss}}$ liegt in den Jahren 2005 bis 2007 bei ca. 44% bis 45% , im Prognose-Jahr 2020 bei etwa 61% , der mittlere Anteil der Nass-Deposition liegt in den betrachteten Jahren zwischen 35% und knapp 50% .

Tabelle 3: Anteile der $\text{SO}_x\text{-S}_{\text{nss}}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020

	2005	2006	2007	2020
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Nass-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	3,69	3,48	3,79	1,75
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Anteil Nass- Deposition [%]	49,1%	46,7%	49,4%	35,3%
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Trocken-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	3,41	3,37	3,39	3,01
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Anteil Trocken-Deposition [%]	45,3%	45,2%	44,2%	60,6%
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Anteil Nass- + Trocken-Deposition [%]	94,4%	91,9%	93,6%	95,9%
$\text{SO}_x\text{-S}_{\text{(nss)}}$ Anteil Feucht-Deposition [%]	5,6%	8,1%	6,4%	4,1%

2.1.2 Deposition von reduziertem Stickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$)

Die Gesamtdeposition reduzierter Stickstoffverbindungen ($\text{NH}_x\text{-N}$) aus anthropogenen Aktivitäten liegt in den Jahren 2005-2007 im Mittel zwischen $12,68 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und $14,09 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Das entspricht dem Gesamteintrag von $461 \text{ kt a}^{-1} \text{N}$ bis $505 \text{ kt a}^{-1} \text{N}$ auf die Gesamtfläche Deutschlands. Für das Prognose-Jahr 2020 ergibt sich im Mittel ein Gesamteintrag von $13,12 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, bzw. eine Gesamtmenge von $470 \text{ kt a}^{-1} \text{NH}_x\text{-N}$.

Damit liegt eine Mindeung zwischen dem Jahr 2007 und Prognose-Jahr 2020 um 6,9% vor. Betrachtet man die Änderungen über den Gesamt-Zeitraum zwischen 2005 und 2020 so ergibt sich ein leichter Anstieg der $\text{NH}_x\text{-N}$ -Gesamtdeposition um rund +2%.

In Tabelle 4 sind die Anteile der $\text{NH}_x\text{-N}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020 aufgeführt. Der mittlere Anteil des nassen Depositionsflusses schwankt im recht engen Bereich zwischen ca. 41% und 42%, der des trockenen Depositionsflusses zwischen ca. 52% und 56% und die mittleren Anteile der Feucht-Deposition liegt in den betrachteten Jahren zwischen 4% und 6%.

Tabelle 4: Anteile der $\text{NH}_x\text{-N}$ Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020

	2005	2006	2007	2020
$\text{NH}_x\text{-N}$ Nass-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	5,20	5,80	5,81	5,35
$\text{NH}_x\text{-N}$ Anteil Nass- Deposition [%]	40,5%	41,5%	41,2%	40,8%
$\text{NH}_x\text{-N}$ Trocken-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	7,16	7,30	7,64	7,25
$\text{NH}_x\text{-N}$ Anteil Trocken-Deposition [%]	55,7%	52,3%	54,2%	55,2%
$\text{NH}_x\text{-N}$ Anteil Nass- + Trocken-Deposition [%]	96,1%	93,8%	95,4%	96,0%
$\text{NH}_x\text{-N}$ Feucht-Deposition [%]	3,9%	6,2%	4,6%	4,0%

2.1.3 Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N)

Die Gesamtd deposition oxidiierter Stickstoffverbindungen (NO_Y-N) aus anthropogenen Emissionen liegt 2005-2007 zwischen $7,89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $8,36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Das entspricht auf der Gesamtfläche Deutschlands dem Gesamteintrag von $282 \text{ kt a}^{-1} N$ bis $299 \text{ kt a}^{-1} N$. Im Prognose-Jahr 2020 werden im Mittel $6,37 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NO_Y-N$ deponiert, was einer Gesamtmenge von rund $228 \text{ kt a}^{-1} NO_Y-N$ entspricht. Zwischen 2005 und 2007 ist ein ganz leichter Rückgang der NO_Y-N -Gesamtd deposition um $-1,6\%$ zu verzeichnen. Die Schwankungen zwischen den Einzeljahren des Dreijahreszeitraums 2005-2007 liegen mit $+4,3\%$ und $-5,6\%$ allerdings in einer verhältnismäßig großen Spanne, die keinen gerichteten Trend erwarten lässt. Im Vergleich zwischen 2005 und dem Prognose-Jahr 2020 weist die Berechnung dagegen eine sehr deutliche Minderung um $20,5\%$ aus.

Tabelle 5 zeigt die Zusammenstellung der mittleren Anteile der NO_Y-N Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtd deposition 2005-2007 und 2020 in Deutschland. Die Nass-Deposition nimmt dabei einen Anteil zwischen 46% und 50% an der Gesamtd deposition von NO_Y-N ein, die Trocken-Deposition einen Anteil von 43% und 46% , während die Feucht-Deposition mit einem Anteil zwischen 7% und 10% zur mittleren Gesamtd deposition beiträgt.

Tabelle 5: Anteile der NO_Y-N Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtd deposition 2005-2007 und 2020

	2005	2006	2007	2020
NO_Y-N Nass-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	3,74	3,87	3,76	3,18
NO_Y-N Anteil Nass- Deposition [%]	46,7%	46,4%	47,7%	49,9%
NO_Y-N Trocken-Deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	3,71	3,63	3,49	2,71
NO_Y-N Anteil Trocken-Deposition [%]	46,3%	43,4%	44,3%	42,6%
NO_Y-N Anteil Nass- + Trocken-Deposition [%]	93,0%	89,8%	92,0%	92,5%
NO_Y-N Feucht-Deposition [%]	7,0%	10,2%	8,0%	7,5%

2.1.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N)

Die mittlere Gesamtd deposition von Gesamtstickstoff ($N = NH_X-N + NO_Y-N$) bewegt sich in den Jahren 2005-2007 zwischen $20,87 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $22,32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auf der Gesamtfläche Deutschlands entspricht dies der N -Gesamtmenge von rund $748 \text{ kt a}^{-1} N$ bis $799 \text{ kt a}^{-1} N$. Im Prognose-Jahr 2020 werden im Mittel $19,48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Gesamtstickstoff (N) deponiert, was einer Gesamtmenge von rund $698 \text{ kt a}^{-1} N$ Gesamtd deposition auf die Fläche Deutschlands entspricht.

Unterschiede in der jährlichen N -Gesamtd depositionsfracht liegen zwischen 2005 und 2007 zwischen einem Anstieg von $+6,9\%$ von 2005 bis 2006 und einem leichten Rückgang von $-1,5\%$ zwischen 2006 und 2007. Als Änderung zwischen 2005 und 2007 ist ein Anstieg der N -Gesamtd deposition um $+5,3\%$ zu verzeichnen. Zwischen dem Jahr 2007 und dem Prognose-Jahr 2020 ergibt sich eine rechnerische Minderung um $11,4\%$, bezogen auf das Basis-Jahr 2005 eine Minderung um $6,7\%$.

In den Jahren 2005 bis 2007 werden etwas weniger als zwei Drittel (62% bis 64%) des Gesamt-Stickstoffs (N) als reduzierter Stickstoff (NH_x-N), etwas mehr als ein Drittel (36% bis 38%) als oxidierter Stickstoff (NO_y-N) eingetragen (Tabelle 6), im Prognose-Jahr 2020 beträgt der mittlere Anteil der NH_x-N Gesamtdeposition ca. 67%, der Anteil der Gesamtdeposition von NO_y-N liegt entsprechend bei ca. 33%

Tabelle 6: Anteile von NH_x-N und NO_y-N an der N Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020

	2005	2006	2007	2020
NH_x-N [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]	12,86	13,96	14,09	13,12
NH_x-N [%]	61,6%	62,6%	64,1%	67,3%
NO_y-N [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]	8,01	8,36	7,89	6,37
NO_y-N [%]	38,4%	37,4%	35,9%	32,7%

Die Anteile der N Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020 sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Summe von Nass- und Trockendeposition an der Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) liegt in allen betrachteten Jahren zwischen 92% und 95%, die Feucht-Deposition trägt mit ca. 5% bis 8% zur mittleren N -Gesamtdeposition in Deutschland bei. Der mittlere nass deponierte Beitrag zur Gesamtdeposition in Deutschland liegt in allen betrachteten Jahren bei 43% bis 44%, der trocken deponierte Anteil trägt mit 49% bis 52% etwa zur Hälfte zu der Gesamtdepositionsfracht von Gesamtstickstoff (N) bei.

Tabelle 7: Anteile der N Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition an der Gesamtdeposition 2005-2007 und 2020

	2005	2006	2007	2020
N Nass-Deposition [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]	8,94	9,67	9,57	8,53
N Anteil Nass- Deposition [%]	42,8%	43,3%	43,5%	43,8%
N Trocken-Deposition [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]	10,87	10,93	11,13	9,96
N Anteil Trocken-Deposition [%]	52,1%	49,0%	50,7%	51,1%
N Anteil Nass- + Trocken-Deposition [%]	94,9%	92,3%	94,2%	94,9%
N Feucht-Deposition [%]	5,1%	7,7%	5,8%	5,1%

2.2. Kartierungsergebnisse für S und N Spezies der Prognose für 2020

2.2.1 Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_X-S_{nss})

Die räumliche Verteilung der Nass- Trocken- und Feucht-Depositionsfrachten von SO_X-S_{nss} für das Prognosejahr 2020 ist in Karte 1 abgebildet. Die Kartenlegenden umfassen einen unterschiedlichen Wertebereich, um jeweils die Darstellung von hohen und niedrigen Eintragsraten der drei Einzelflüsse zu ermöglichen.

Räumliches Muster der SO_X-S_{nss} Nass-Deposition

Das räumliche Muster der SO_X-S_{nss} Nass-Deposition zeigt hohe Einträge in weiten Teilen Nordrhein-Westfalens (Westfälische Bucht und Rheinisches Schiefergebirge) und in den verschiedenen Gebieten, die von höheren Mittelgebirgen (Erhebungen der Mittelgebirgsschwelle, Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge, Vogelsberg, Spessart, Odenwald, Rhön, Schwarzwald, südlicher Bayerischer Wald, östliche Schwäbische Alb) und den Alpen eingenommen werden, die relativ hohe Niederschläge erhalten. Überdurchschnittlich hohe Einträge sind auch in Nordwestdeutschland (westliches Niedersachsen und Schleswig-Holstein), d.h. in einem breiten Saum um die Nordseeküste, und im Osten Deutschlands (Südliches Brandenburg und Sachsen) zu beobachten.

Räumliches Muster der SO_X-S_{nss} Trocken-Deposition

Bei der Abbildung der trockenen Deposition von SO_X-S_{nss} (Karte 1, Mitte) treten hohe Einträge deutlich im Bereich der Gebiete mit hoher Industrie- und Bevölkerungsdichte in Deutschland, außerdem in der Lausitz und dem Erzgebirge und im Bereich des Nord-Ostsee-Kanals auf.

Räumliches Muster der SO_X-S_{nss} Feucht-Deposition

Das räumliche Muster der Feucht-Deposition von SO_X-S_{nss} der Karte 1 (rechts) zeigt höchste Eintragsraten unmittelbar an der Mittelgebirgsschwelle und den höher gelegenen Gebieten der Mittelgebirge und der Alpen.

Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der SO_X-S_{nss} Gesamtdeposition nach Landnutzungsklassen

Die mittleren Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der SO_X-S_{nss} Gesamtdeposition im Prognose-Jahr 2020 differenziert nach den neun betrachteten Landnutzungsklassen sind in der Grafik in Abbildung 1 dargestellt.

SO_X-S_{nss} Gesamt-Deposition nach Landnutzungsklassen

Gesamtdepositionsfrachten über dem Durchschnitt für ganz Deutschland liegen bei den Landnutzungsklassen der Bebauten Gebiete und der Wälder (Laub- > Misch- > Nadelwald > Bebaute Gebiete) vor, während die mittlere

Gesamtdepositionsfracht für die übrigen Landnutzungsklassen (semi-natürliche Vegetation > Wiesen & Weiden > Ackerland > Wasserflächen > schütterere Vegetation) unter dem bundesweiten Mittelwert liegen. Diese Abweichungen vom Mittelwert für Deutschland bewegen sich allerdings nur in der relativ geringen Spanne von -15% bis +18%, die einem Bereich kleiner als $\pm 1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$ entspricht.

$\text{SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$ Trocken-Deposition nach Landnutzungsklassen

Über- und unterdurchschnittliche Einträge der Trocken-Deposition verteilen sich auf die selben Landnutzungsklassen wie bei der Gesamtdeposition von $\text{SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$, allerdings in etwas anderer Reihenfolge: Laub- > Nadel- > Mischwald > Bebaute Gebiete > Durchschnitt > Ackerland > semi-natürliche Vegetation > Wiesen & Weiden > Wasserflächen > schütterere Vegetation. Die Unterschiede bewegen sich in einer Spanne von -36% bis +22% um den deutschlandweiten Mittelwert, was einem Bereich innerhalb von etwa $\pm 1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$ entspricht.

$\text{SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$ Nass-Deposition nach Landnutzungsklassen

Die Nass-Deposition ist per se landnutzungsunabhängig, trotzdem sind aber in der nach Landnutzungsklassen gegliederten Statistik geringe Unterschiede in den Eintragsraten zu beobachten, die sich zusammenfassend erklären lassen aus der uneinheitlichen Verteilung der Landnutzungsklassen auf bestimmte Höhen- und geographische Lagen, wobei die Regularitäten von Bewegung, bzw. Transport niederschlagsbringender Luftmassen und die damit einher gehende räumlich differenzierte Befruchtung des Wolkenwassers über Emissionsgebieten sowie regional und lokal unterschiedliche Niederschlagsregimes die in der Karte für das ganze Jahr zusammengefasste jeweils nieder gehende Nass-Depositionsfracht bestimmen. Insgesamt liegt die Spanne der Mittelwertabweichung bei -6% bis +25% und beträgt absolut weniger als $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$. Der größte Unterschied zum deutschlandweiten Mittelwert (ca. $1,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ist bei der Landnutzungs-kategorie schütterere Vegetation zu beobachten, die in Deutschland nur sehr kleine Flächen einnimmt, die zudem auf Felsfluren der Alpen mit höchsten Niederschlagsmengen und einige wenige Dünengebiete beschränkt sind.

$\text{SO}_X\text{-S}_{\text{NSS}}$ Feucht-Deposition nach Landnutzungsklassen

Bei der Feucht-Deposition ist einerseits ähnlich wie bei der Nass-Deposition die geographische und orographische Lage der nach Landnutzungsklassen differenzierten Gebiete, andererseits analog zur Trocken-Deposition auch die nach Landnutzungsklassen differenzierte Depositionsgeschwindigkeit von Wolkenwassertropfen bestimmend für die in Abbildung 2 dargestellten unterschiedlichen mittleren Anteile an der mittleren Gesamt-Deposition bestimmend. Der Blick auf die Darstellung der Feuchtd deposition in Karte 1 (rechts) lässt die Höhenlage und Exposition als sehr wichtigen Parameter für hohe Einträge dieses Depositionsflusses deutlich erkennen: Feucht-Depositionsfrachten an der Mittelgebirgsschwelle und in den Hochlagen der Gebirge erreichen die größten Werte. Zugleich sind dies die Gebiete, die i.d.R. bewaldet sind. Somit erklären sich die überdurchschnittlichen Frachten der Feucht-Deposition dadurch, dass sie in den Luvlagen und damit in den wolkenwasser-exponierten Hang- und Hochlagen von überwiegend bewaldeten

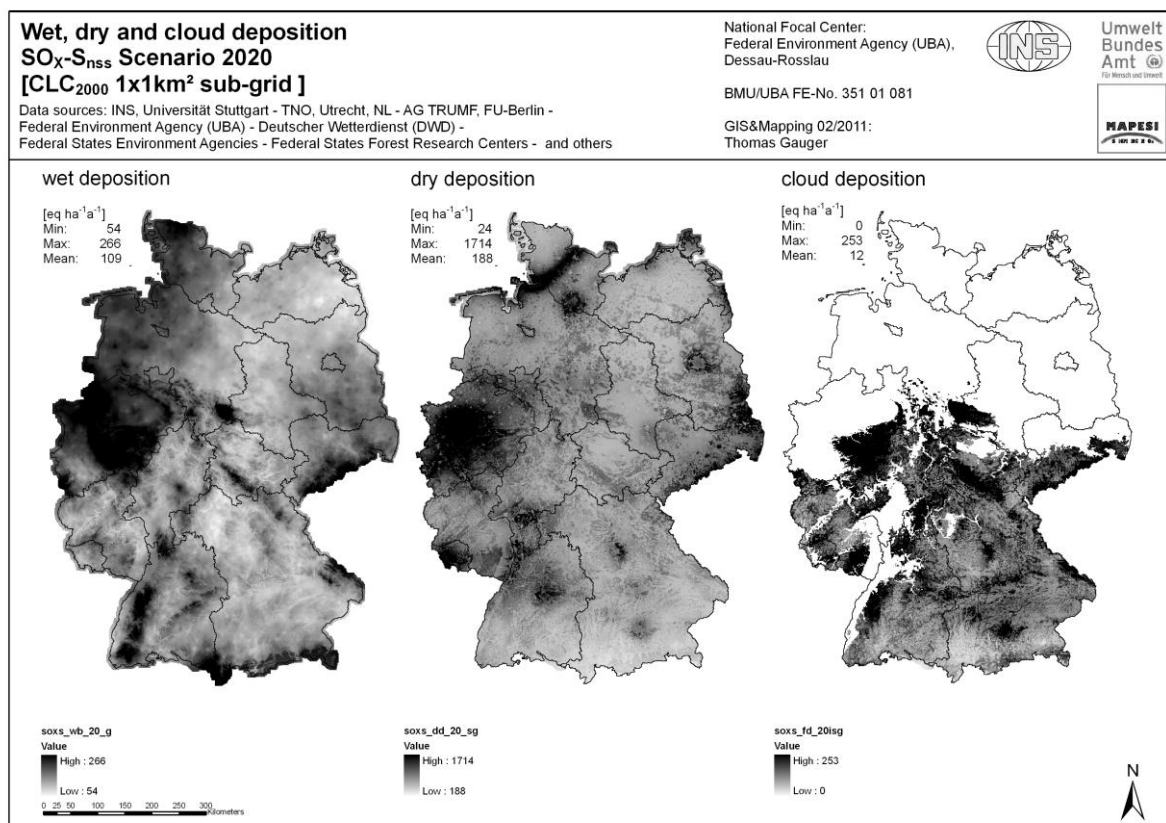
Mittelgebirgen niedergehen. Insgesamt ist die Spanne der Mittelwertabweichung über alle landnutzungsklassen sehr differenziert und liegt zwischen -93% bis +113%, beträgt absolut jedoch nur geringe $\pm 0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ SO}_X\text{-}S_{nss}$ bei einem deutschlandweiten Mittelwert von $0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Räumliches Muster der $\text{SO}_X\text{-}S_{nss}$ Gesamt-Deposition

Die in Deutschland für das Prognose-Jahr 2020 berechneten Frachten der Gesamt-Deposition von $\text{SO}_X\text{-}S_{nss}$ liegen in einer Werte-Spanne zwischen $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Mittelwert von knapp $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Das räumliche Muster der Gesamt-Deposition von $\text{SO}_X\text{-}S_{nss}$ ist in Karte 2 dargestellt.

Maximale Einträge von anthropogenem Schwefel ($\text{SO}_X\text{-}S_{nss}$) bis zu $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ S sind im Ruhrgebiet zu beobachten. Hohe Depositions-Frachten deutlich über dem Durchschnitt in Deutschland verteilen sich auf den Bereich des Nord-Ostsee-Kanals und in einem Streifen entlang der Nordseeküste in Schleswig-Holstein und Niedersachsen, auf die Region Hamburg, auf die gesamte Fläche Nordrhein-Westfalens, das nördliche Rheinland-Pfalz, das Saarland, den Pfälzer Wald, das Rhein-Main-Gebiet einschließlich Spessart, Rhön und Vogelsberg, den Rhein-Neckar Raum, den Nordschwarzwald und den Mittleren Neckar Raum, die Gebiete einiger Ballungsräume in Bayern (München, Ingolstadt, Nürnberg-Erlangen), den südlichen Bayerischen Wald und das Fichtelgebirge, den Thüringer Wald und den Harz, das Erzgebirge und den Osten Sachsens und das östliche Brandenburg (Lausitz). Depositions-Frachten unter dem Durchschnitt von knapp $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Schwefel sind im Norden Schleswig-Holsteins, auf dem überwiegenden Gebiet Niedersachsens, nahezu der gesamten Fläche Mecklenburg-Vorpommerns, Sachsen-Anhalts und Thüringens, dem Westen Brandenburgs und dem Norden und Westen Sachsens, auf der Fläche Bayerns (bis auf große städtische Agglomerationen) und in der südlichen Hälfte Baden-Württembergs zu beobachten (Karte 2).

Eine detaillierte regionale Statistik der Nass-, Trocken-, Feucht-, und Gesamtdeposition für anthropogenen Schwefel ($\text{SO}_X\text{-}S_{nss}$) im Prognose-Jahr 2020 nach Landnutzungsklassen auf der Aggregationsebene der 16 Bundesländer ist in Tabelle 8 aufgeführt.



Karte 1: Nass-, Trocken-, Feuchtdeposition von oxidiertem Schwefel (SO_x-S_{nss}) 2020

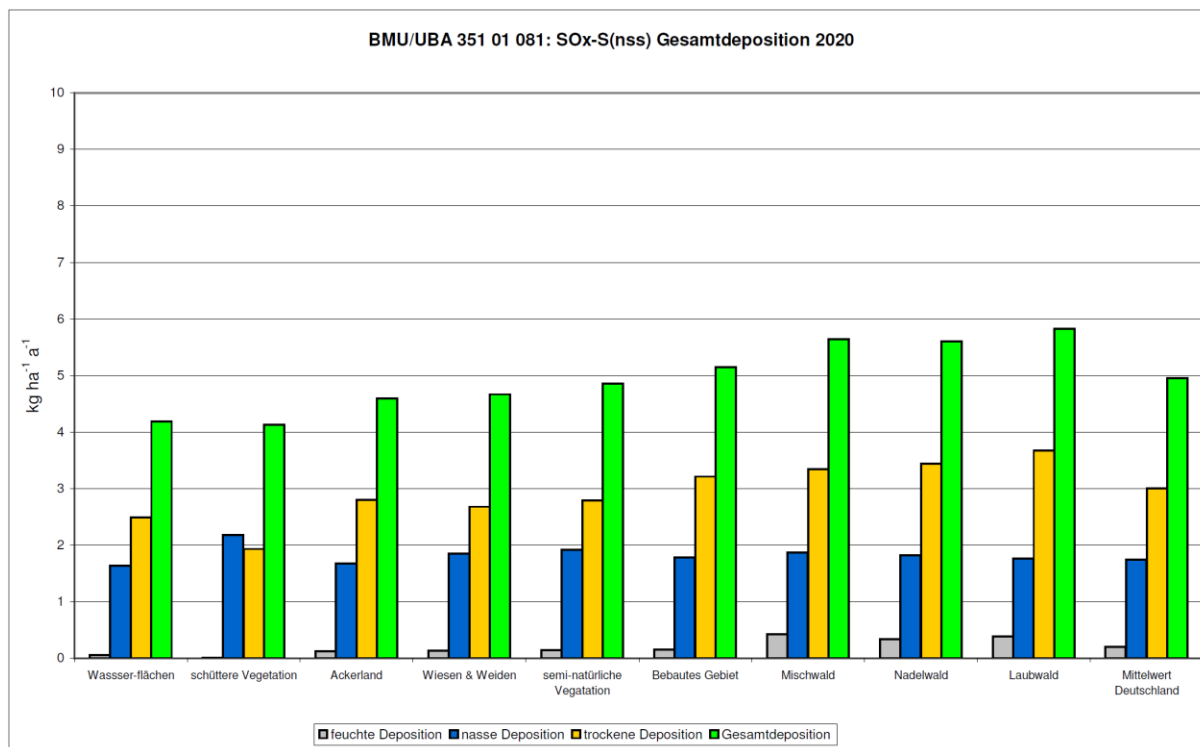
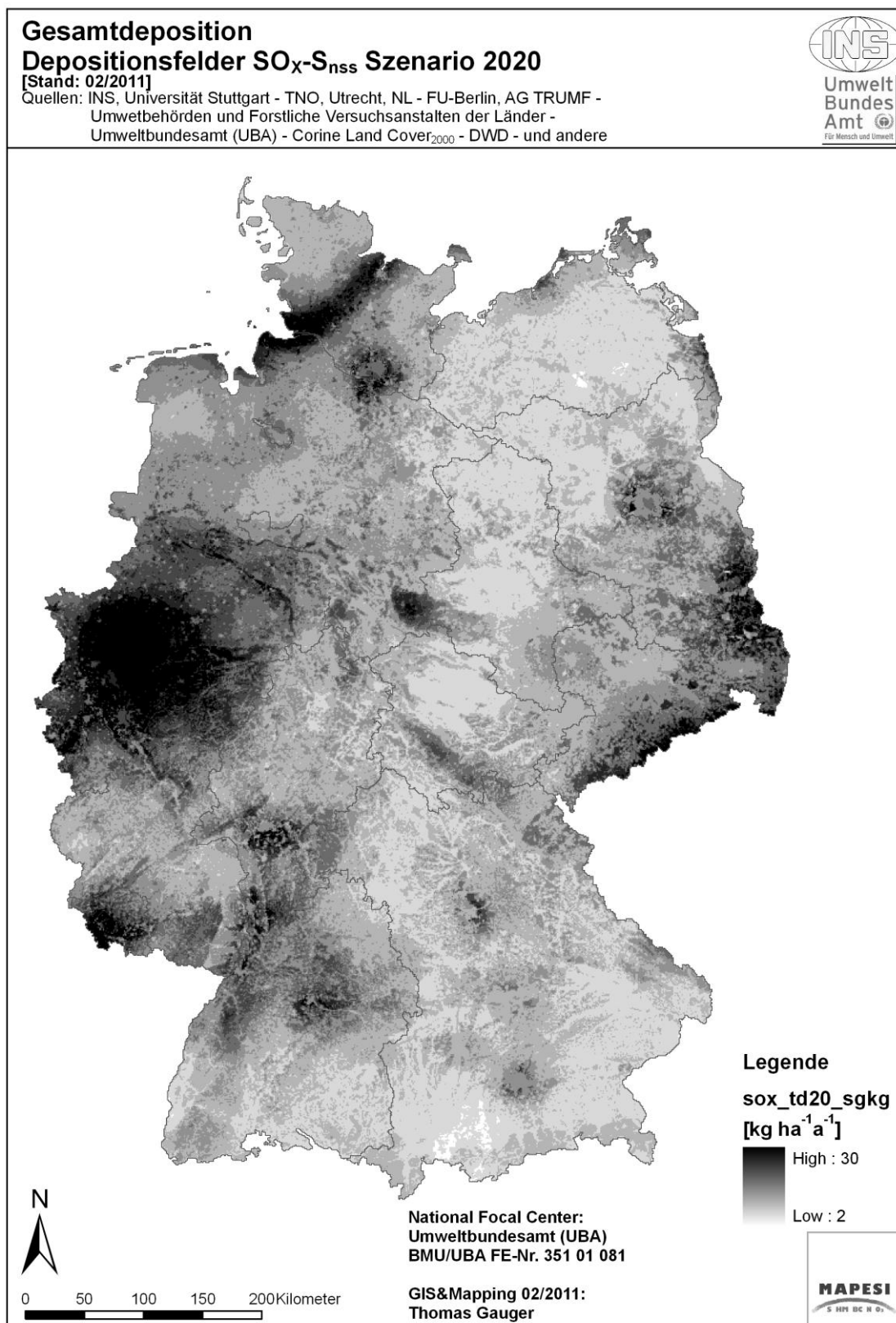


Abbildung 2: Mittlere Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der SO_x-S_{nss} Gesamtd deposition 2020



Karte 2: Gesamtdeposition von oxidiertem Schwefel ($\text{SO}_x\text{-S}_{\text{nss}}$) 2020

Tabelle 8: Regionale Statistik der SO_x-S_{nss} Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtd deposition 2020SO_x-S(nss) Nassdeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	1,90	1,91	2,11	1,78	1,90	1,90	1,82	2,10	2,14	1,97
Hamburg	1,63	1,52	1,65	1,69	1,73	1,77	1,59	1,73	2,00	1,82
Niedersachsen	1,84	1,87	2,04	1,92	1,91	1,97	1,83	2,02	2,15	1,92
Bremen	2,07	2,07	2,09	2,08	2,05	2,15	2,03	2,09	2,05	2,08
Nordrhein-Westfalen	2,44	2,34	2,58	2,47	2,65	2,70	2,45	2,42	2,44	2,44
Hessen	1,54	1,57	1,73	1,73	1,79	1,72	1,37	1,78	1,64	1,66
Rheinland-Pfalz	1,57	1,55	1,78	1,71	1,85	1,76	1,43	1,72	1,67	1,66
Baden-Württemberg	1,70	1,71	1,94	1,82	2,10	1,95	1,65	2,11	1,96	1,84
Bayern	1,44	1,42	1,67	1,50	1,67	1,73	1,51	1,97	2,38	1,56
Saarland	1,57	1,88	1,70	1,71	1,75	1,70	1,64	1,72	0,00	1,68
Berlin	1,68	1,72	1,56	1,67	1,70	1,71	1,72	1,73	1,67	1,68
Brandenburg	1,67	1,56	1,52	1,51	1,68	1,63	1,54	1,65	1,86	1,60
Mecklenburg-Vorpommern	1,35	1,35	1,31	1,35	1,33	1,36	1,31	1,30	1,20	1,34
Sachsen	1,82	1,86	2,02	1,82	2,08	1,91	1,79	1,92	1,73	1,91
Sachsen-Anhalt	1,41	1,40	1,37	1,51	1,59	1,57	1,42	1,54	1,67	1,44
Thüringen	1,47	1,45	1,60	1,67	1,79	1,72	1,37	1,57	1,59	1,56
D	1,79	1,67	1,85	1,77	1,82	1,87	1,81	1,91	2,26	1,75

SO_x-S(nss) Trockendeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	3,03	3,39	3,38	3,90	4,56	4,17	2,98	3,52	1,68	3,39
Hamburg	4,79	5,81	6,23	6,39	8,14	7,19	5,81	7,11	4,43	5,28
Niedersachsen	2,64	2,82	2,91	3,58	3,65	3,39	2,78	2,99	3,15	2,99
Bremen	2,80	3,53	3,88	3,55	3,46	3,59	3,55	3,88	2,85	3,26
Nordrhein-Westfalen	5,79	5,29	5,42	6,29	5,87	6,08	6,67	5,31	6,09	5,57
Hessen	2,80	2,75	2,56	3,52	3,93	3,38	3,11	3,26	3,29	3,07
Rheinland-Pfalz	2,86	3,02	2,89	3,75	4,13	3,66	3,33	3,20	4,49	3,31
Baden-Württemberg	2,63	2,57	2,06	3,47	2,71	2,99	2,65	2,78	3,35	2,68
Bayern	2,07	2,03	1,62	2,77	2,62	2,33	1,54	1,67	0,70	2,14
Saarland	5,20	5,48	5,15	6,48	6,28	6,45	4,07	7,34	0,00	5,73
Berlin	3,62	4,55	2,40	5,67	6,27	5,56	4,37	4,77	4,67	4,22
Brandenburg	2,61	2,40	2,28	3,04	3,70	3,07	2,54	2,96	2,43	2,83
Mecklenburg-Vorpommern	1,96	1,99	2,12	2,61	2,89	2,82	1,67	2,59	3,13	2,18
Sachsen	3,09	3,25	3,62	4,02	5,13	4,07	3,83	4,61	2,96	3,69
Sachsen-Anhalt	2,04	2,13	1,98	2,85	3,03	2,86	2,22	2,34	1,65	2,30
Thüringen	2,05	2,08	2,20	2,72	3,24	2,78	2,32	2,26	2,12	2,40
D	3,22	2,80	2,68	3,68	3,44	3,35	2,49	2,79	1,93	3,01

SO_x-S(nss) Feuchtd deposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hamburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Niedersachsen	0,03	0,02	0,01	0,39	0,24	0,27	0,02	0,04	0,00	0,07
Bremen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nordrhein-Westfalen	0,14	0,09	0,31	0,60	0,81	0,64	0,17	0,24	0,00	0,26
Hessen	0,13	0,20	0,28	0,48	0,53	0,48	0,08	0,29	0,56	0,32
Rheinland-Pfalz	0,19	0,17	0,26	0,42	0,49	0,48	0,04	0,26	0,00	0,30
Baden-Württemberg	0,24	0,22	0,23	0,35	0,39	0,42	0,06	0,33	0,00	0,29
Bayern	0,36	0,28	0,21	0,54	0,42	0,44	0,18	0,25	0,14	0,33
Saarland	0,29	0,28	0,28	0,53	0,50	0,46	0,13	0,44	0,00	0,36
Berlin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brandenburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mecklenburg-Vorpommern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sachsen	0,22	0,19	0,28	0,16	0,43	0,30	0,04	0,12	0,00	0,25
Sachsen-Anhalt	0,03	0,02	0,02	0,27	0,16	0,33	0,04	0,02	0,02	0,06
Thüringen	0,33	0,24	0,35	0,56	0,69	0,60	0,27	0,32	0,24	0,38
D	0,16	0,12	0,14	0,39	0,34	0,43	0,06	0,15	0,01	0,20

SO_x-S(nss) Gesamtd deposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	4,93	5,30	5,49	5,69	6,47	6,07	4,81	5,61	3,82	5,36
Hamburg	6,42	7,34	7,88	8,08	9,88	8,96	7,40	8,84	6,44	6,91
Niedersachsen	4,51	4,71	4,98	5,88	5,79	5,63	4,61	5,06	5,29	4,98
Bremen	4,87	5,60	5,96	5,63	5,51	5,74	5,58	5,97	4,91	5,33
Nordrhein-Westfalen	8,37	7,72	8,31	9,35	9,33	9,43	9,30	7,98	8,53	8,27
Hessen	4,47	4,51	4,57	5,72	6,26	5,56	4,56	5,33	5,48	5,05
Rheinland-Pfalz	4,62	4,75	4,91	5,87	6,47	5,90	4,81	5,18	6,16	5,28
Baden-Württemberg	4,58	4,50	4,23	5,65	5,21	5,36	4,36	5,21	5,31	4,81
Bayern	3,87	3,73	3,50	4,81	4,70	4,50	3,22	3,89	3,21	4,03
Saarland	7,06	7,44	7,14	8,72	8,53	8,61	5,84	9,50	0,00	7,76
Berlin	5,30	6,26	3,96	7,34	7,97	7,27	6,09	6,50	6,34	5,90
Brandenburg	4,28	3,96	3,80	4,55	5,38	4,70	4,08	4,61	4,29	4,43
Mecklenburg-Vorpommern	3,31	3,33	3,43	3,96	4,23	4,19	2,98	3,90	4,32	3,52
Sachsen	5,13	5,30	5,92	6,00	7,64	6,29	5,66	6,66	4,70	5,85
Sachsen-Anhalt	3,48	3,56	3,35	4,62	4,77	4,76	3,68	3,90	3,35	3,80
Thüringen	3,85	3,77	4,14	4,96	5,72	5,09	3,96	4,15	3,94	4,35
D	5,16	4,60	4,67	5,84	5,60	5,64	4,36	4,85	4,20	4,96

2.2.2 Deposition von oxidierten Stickstoff (NO_Y-N)

Die räumliche Verteilung der Nass- Trocken- und Feucht-Depositionsfrachten der oxidierten Stickstoff-Verbindungen (NO_Y-N) für das Prognosejahr 2020 ist in Karte 5 abgebildet. Die Kartenlegenden umfassen einen unterschiedlichen Wertebereich, um jeweils die Darstellung von hohen und niedrigen Eintragsraten der drei Einzelflüsse zu ermöglichen.

Räumliches Muster der NO_Y-N Nass-Deposition

Das räumliche Muster der NO_Y-N Nass-Deposition (Karte 3, links) zeigt hohe Einträge im Rheinischen Schiefergebirge und in den übrigen höheren Mittelgebirgsregionen (Erhebungen der Mittelgebirgsschwelle, Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge, Vogelsberg, Spessart, Odenwald, Rhön, Schwarzwald, südlicher Bayerischer Wald, östliche Schwäbische Alb) sowie in der Alpenregion. Diese Gebiete erhalten einen relativ hohen Jahresniederschlag. Überdurchschnittlich hohe Einträge sind auch in Nordwestdeutschland (westliches Niedersachsen und Schleswig-Holstein), d.h. in einem breiten Saum um die Nordseeküste zu beobachten.

Räumliches Muster der NO_Y-N Trocken-Deposition

Bei der Abbildung der trockenen Deposition von NO_Y-N (Karte 3, Mitte) treten deutlich hohe Einträge sowohl in den Gebieten städtisch-industrieller Agglomerationen in Deutschland hervor (westliches Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Bremen, Berlin, München, Nürnberg-Erlangen, Rhein-Main-Gebiet, Saarbrücken), als auch in geschlossen bewaldeten Regionen des Norddeutschen Flachlandes und der höheren bewaldeten Mittelgebirge (Rheinisches Schiefergebirge, Harz, Thüringer Wald, Spessart, Rhön, Pfälzer Wald, Nordschwarzwald, Schwäbischer Wald, südlicher Bayerischer Wald) hervor.

Räumliches Muster der NO_Y-N Feucht-Deposition

Das räumliche Muster der Feucht-Deposition von NO_Y-N der Karte 3 (rechts) zeigt höchste Eintragsraten unmittelbar an der Mittelgebirgsschwelle und den höher gelegenen Gebieten der bewaldeten Mittelgebirge und in Bayern auch deutlich in Gebieten größerer städtischer Agglomerationsräume (München, Augsburg, Erlangen-Nürnberg).

Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der NO_Y-N Gesamtdosition nach Landnutzungsklassen

Die mittleren Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der NO_Y-N Gesamtdosition im Prognose-Jahr 2020 differenziert nach den neun betrachteten Landnutzungsklassen sind in der Grafik in Abbildung 3 dargestellt.

NO_Y-N Gesamt-Deposition nach Landnutzungsklassen

Gesamtdepositionsfrachten über dem Durchschnitt für ganz Deutschland von ca. $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen bei den Landnutzungsklassen der Bebauten Gebiete und der Wälder vor, wobei letztere nahezu identische mittlere Frachten erhalten, und der semi-natürlichen Vegetation (Misch- $\geq$ Laub- $\geq$ Nadelwald $>$ Bebaute Gebiete $>$ semi-natürliche Vegetation), während die mittlere Gesamtdepositionsfracht für die übrigen Landnutzungsklassen (Wiesen & Weiden $>$ schütterte Vegetation $>$ Ackerland $>$ Wasserflächen) unter dem bundesweiten Mittelwert liegen. Diese Abweichungen vom Mittelwert für Deutschland bewegen sich in einer Spanne von -23% bis +21%, was einem Bereich kleiner als $\pm 1,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NO_Y-N$ entspricht.

NO_Y-N Trocken-Deposition nach Landnutzungsklassen

Mittlere Trockendepositionfrachten über dem Durchschnitt für ganz Deutschland von ca. $2,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen bei den Landnutzungsklassen der Bebauten Gebiete und der Wälder vor (Laub- $>$ Nadel- $>$ Mischwald $>$ Bebaute Gebiete). Unterdurchschnittliche Einträge der Trocken-Deposition verteilen sich auf die übrigen Landnutzungsklassen in der Reihenfolge: Laub- $>$ Nadel- $>$ Mischwald $>$ Bebaute Gebiete $>$ semi-natürliche Vegetation $>$ Ackerland $>$ Wiesen & Weiden $>$ schütterte Vegetation $>$ Wasserflächen. Die Unterschiede bewegen sich in einer Spanne von -33% bis +27% um den deutschlandweiten Mittelwert, was einem Bereich innerhalb von nur etwa $\pm 0,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NO_Y-N$ entspricht.

NO_Y-N Nass-Deposition nach Landnutzungsklassen

Die Nass-Deposition ist landnutzungsunabhängig, trotzdem bilden sich in der nach Landnutzungsklassen gegliederten Statistik geringe Unterschiede in den Eintragsraten aus, die sich zusammenfassend aus der uneinheitlichen Verteilung der Landnutzungsklassen auf bestimmte Höhen- und geographische Lagen erklären lassen, wobei die Regularitäten von Bewegung, bzw. Transport niederschlagsbringender Luftmassen und die damit einher gehende räumlich differenzierte Befruchtung des Wolkenwassers über Emissionsgebieten sowie regional und lokal unterschiedliche Niederschlagsregimes die in der Karte für das ganze Jahr zusammengefasste jeweils nieder gehende Nass-Depositionsfracht bestimmen. Insgesamt liegt die Spanne der Abweichung vom deutschlandweiten Mittelwert von ca. $3,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NO_Y-N$ bei -10% bis +25% und beträgt absolut zwischen -0,3 und +0,8 $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NO_Y-N$. Der größte Unterschied zum Deutschlandweiten Mittelwert mit +0,8 $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist bei der Landnutzungsklasse schütterte Vegetation zu beobachten, die in Deutschland nur sehr kleine Flächen einnimmt, die zudem auf Felsfluren der Alpen mit höchsten Niederschlagsmengen und einige wenige Dünengebiete beschränkt sind.

NO_Y-N Feucht-Deposition nach Landnutzungsklassen

Bei der Feucht-Deposition ist einerseits ähnlich wie bei der Nass-Deposition die geographische und orographische Lage der nach Landnutzungsklassen differenzierten Gebiete, andererseits analog zur Trocken-Deposition auch die nach Landnutzungsklassen differenzierte Depositionsgeschwindigkeit von

Wolkenwassertropfen bestimmend für die in Abbildung 3 dargestellten unterschiedlichen mittleren Anteile an der mittleren Gesamt-Deposition bestimmend. Der Blick auf die Darstellung der Feuchtd deposition in Karte 3 (rechts) lässt die Höhenlage und Exposition als sehr wichtigen Parameter für hohe Einträge dieses Depositionsflusses deutlich erkennen: Feucht-Depositionsfrachten an der Mittelgebirgsschwelle und in den Hochlagen der Gebirge erreichen i.d.R. die größten Werte. Zugleich sind dies die Gebiete, die i.d.R. bewaldet sind. Somit erklären sich die überdurchschnittlichen Frachten der Feucht-Deposition dadurch, dass sie in den Luvlagen und damit in den wolkenwasser-exponierten Hang- und Hochlagen von überwiegend bewaldeten Mittelgebirgen niedergehen. Insgesamt ist die Spanne der Mittelwertabweichung über alle Landnutzungsklassen sehr differenziert und liegt zwischen -93% bis +109%, beträgt absolut jedoch nur geringe $\pm 0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ NO}_Y\text{-N}$ bei einem deutschlandweiten Mittelwert von ca. $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Räumliches Muster der $\text{NO}_Y\text{-N}$ Gesamt-Deposition

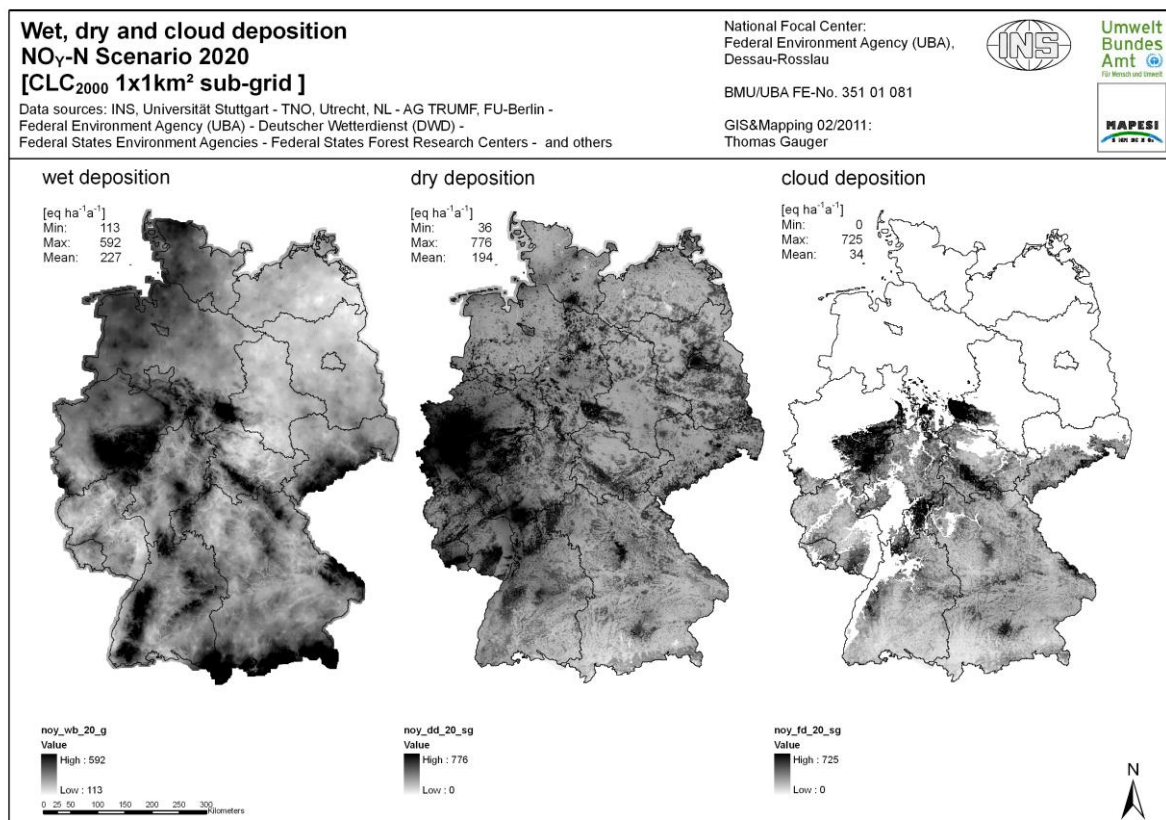
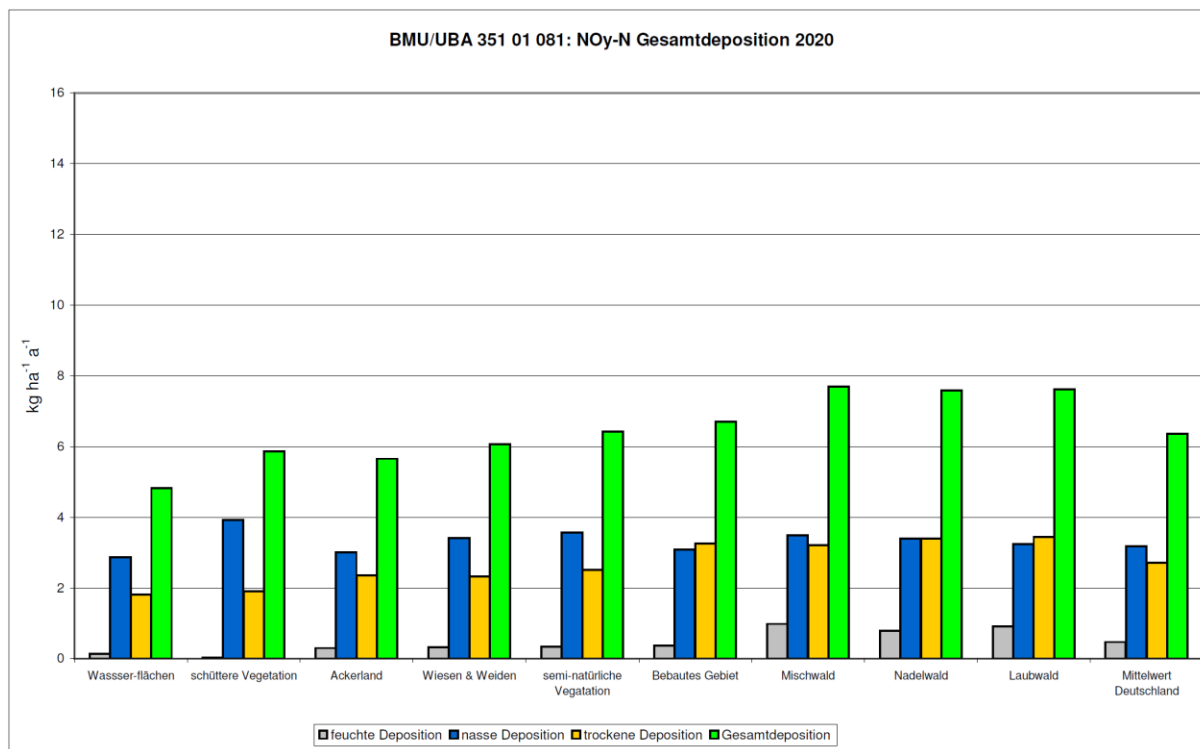
Die in Deutschland für das Prognose-Jahr 2020 berechneten Frachten der Gesamt-Deposition von $\text{NO}_Y\text{-N}$ liegen in einer Werte-Spanne zwischen $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Mittelwert von etwa $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Das räumliche Muster der Gesamt-Deposition von $\text{NO}_Y\text{-N}$ ist in Karte 4 dargestellt.

Maximale Einträge von oxidierten Stickstoff-Verbindungen ($\text{NO}_Y\text{-N}$) bis zu $21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ sind an der Mittelgebirgsschwelle im Harz, Solling, Teutoburger Wald und dem Rheinischen Schiefergebirge zu beobachten.

Hohe Depositions-Frachten deutlich über dem Durchschnitt in Deutschland verteilen sich auf weite Teile West- und Süddeutschlands, wobei in Karte 4 besonders die bewaldeten Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen hervorreten, sowie die größeren städtisch-industriellen Agglomerationsräume.

Depositions-Frachten unter dem Durchschnitt von knapp $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ oxidiertem Stickstoff ($\text{NO}_Y\text{-N}$) nehmen weite Teile im Nord-Osten Deutschlands ein, in Süddeutschland treten einige weite Talschaften, wie z.B. größere Gebiete des Rhein-, Main- und Donautals durch geringe Eintragsraten hervor (vgl. Karte 4).

Eine detaillierte regionale Statistik der Nass-, Trocken-, Feucht-, und Gesamtdeposition für oxidierte Stickstoff-Verbindungen ($\text{NO}_Y\text{-N}$) im Prognose-Jahr 2020 nach Landnutzungsklassen auf der Aggregationsebene der 16 Bundesländer ist in Tabelle 9 aufgeführt.

Karte 3: Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_y-N) 2020Abbildung 3: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der NO_y-N Gesamtdeposition 2020



Karte 4: Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_y-N) 2020

Tabelle 9: Regionale Statistik der NO_y-N Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtd deposition 2020NO_y-N Nassdeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	3,39	3,37	3,73	3,19	3,45	3,40	3,20	3,67	3,70	3,48
Hamburg	3,13	2,95	3,13	3,21	3,29	3,33	3,05	3,25	3,60	3,10
Niedersachsen	3,39	3,40	3,68	3,72	3,59	3,68	3,33	3,62	3,80	3,50
Bremen	3,64	3,61	3,68	3,70	3,68	3,80	3,57	3,69	3,64	3,65
Nordrhein-Westfalen	3,57	3,52	3,99	3,99	4,35	4,31	3,57	3,86	3,88	3,74
Hessen	3,02	3,12	3,52	3,42	3,60	3,44	2,60	3,57	3,19	3,30
Rheinland-Pfalz	2,68	2,65	3,04	2,94	3,14	2,98	2,48	2,94	2,68	2,85
Baden-Württemberg	3,15	3,23	3,66	3,41	3,91	3,64	2,84	3,96	3,45	3,46
Bayern	3,10	3,04	3,63	3,23	3,59	3,77	3,35	4,35	5,53	3,35
Saarland	2,77	2,94	2,98	3,01	3,04	2,99	2,86	3,05	0,00	2,94
Berlin	2,48	2,54	2,42	2,49	2,51	2,54	2,55	2,57	2,48	2,49
Brandenburg	2,54	2,42	2,38	2,36	2,56	2,53	2,40	2,54	2,70	2,46
Mecklenburg-Vorpommern	2,45	2,45	2,40	2,46	2,42	2,48	2,33	2,37	2,20	2,44
Sachsen	3,09	3,13	3,46	2,99	3,53	3,19	2,88	3,08	2,71	3,22
Sachsen-Anhalt	2,38	2,40	2,38	2,64	2,75	2,74	2,39	2,54	2,63	2,47
Thüringen	2,73	2,68	3,18	3,21	3,50	3,33	2,56	2,93	2,78	2,95
D	3,10	3,00	3,41	3,26	3,39	3,50	2,96	3,56	4,10	3,18

NO_y-N Trockendeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	2,74	2,24	2,23	2,82	3,46	2,74	1,77	2,43	1,97	2,32
Hamburg	4,14	2,76	3,29	3,82	4,88	4,15	3,05	3,37	2,63	3,68
Niedersachsen	2,97	2,39	2,35	3,49	3,87	3,28	1,90	2,68	2,55	2,69
Bremen	3,21	2,62	2,68	2,66	3,58	3,24	2,53	2,49	1,74	2,94
Nordrhein-Westfalen	5,03	3,58	4,09	4,78	5,21	4,65	4,01	4,23	3,93	4,17
Hessen	3,50	2,76	2,71	3,71	4,13	3,53	2,97	3,30	3,63	3,23
Rheinland-Pfalz	3,45	3,01	3,06	3,94	4,43	3,89	3,02	3,55	4,05	3,46
Baden-Württemberg	2,63	2,20	2,04	2,92	2,94	2,79	2,01	2,68	2,75	2,48
Bayern	2,39	1,99	1,89	3,00	2,81	2,58	1,34	1,88	1,12	2,23
Saarland	4,10	3,39	3,49	4,29	4,76	4,22	2,94	4,33	0,00	3,82
Berlin	4,27	3,19	2,08	4,23	4,71	4,19	3,49	3,55	2,91	4,14
Brandenburg	2,72	2,08	2,05	2,91	3,37	2,93	1,95	2,54	2,16	2,54
Mecklenburg-Vorpommern	2,33	1,93	2,01	2,59	2,99	2,70	1,40	2,34	2,60	2,13
Sachsen	2,86	2,28	2,49	3,06	3,78	3,07	2,25	2,88	2,32	2,70
Sachsen-Anhalt	2,51	2,05	2,00	3,06	3,36	3,15	1,90	2,34	2,12	2,34
Thüringen	2,58	2,06	2,31	3,01	3,53	3,06	2,13	2,30	2,08	2,53
D	3,25	2,35	2,33	3,45	3,40	3,21	1,82	2,51	1,91	2,71

NO_y-N Feuchtd deposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hamburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Niedersachsen	0,08	0,04	0,03	0,97	0,58	0,67	0,04	0,10	0,00	0,17
Bremen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nordrhein-Westfalen	0,29	0,20	0,64	1,27	1,68	1,33	0,35	0,50	0,00	0,55
Hessen	0,34	0,50	0,70	1,19	1,33	1,15	0,19	0,71	1,37	0,80
Rheinland-Pfalz	0,42	0,37	0,56	0,90	1,03	1,02	0,09	0,54	0,00	0,65
Baden-Württemberg	0,56	0,51	0,52	0,82	0,85	0,96	0,12	0,72	0,00	0,66
Bayern	0,93	0,73	0,54	1,43	1,06	1,14	0,46	0,63	0,34	0,84
Saarland	0,64	0,63	0,63	1,16	1,08	1,02	0,29	0,99	0,00	0,79
Berlin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brandenburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mecklenburg-Vorpommern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sachsen	0,49	0,41	0,58	0,32	0,89	0,64	0,09	0,23	0,01	0,52
Sachsen-Anhalt	0,08	0,04	0,05	0,61	0,37	0,75	0,08	0,04	0,05	0,14
Thüringen	0,78	0,56	0,85	1,34	1,62	1,42	0,64	0,74	0,52	0,91
D	0,37	0,30	0,32	0,92	0,79	0,99	0,14	0,35	0,03	0,47

NO_y-N Gesamtd deposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha⁻¹ a⁻¹]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	6,12	5,61	5,96	6,02	6,91	6,14	4,96	6,10	5,67	5,80
Hamburg	7,26	5,71	6,42	7,03	8,17	7,48	6,10	6,62	6,23	6,78
Niedersachsen	6,44	5,82	6,06	8,17	8,04	7,63	5,27	6,41	6,35	6,36
Bremen	6,85	6,23	6,35	6,36	7,25	7,04	6,10	6,19	5,38	6,59
Nordrhein-Westfalen	8,89	7,29	8,72	10,04	11,24	10,28	7,93	8,59	7,81	8,45
Hessen	6,86	6,39	6,93	8,31	9,06	8,12	5,76	7,59	8,20	7,34
Rheinland-Pfalz	6,55	6,03	6,66	7,78	8,60	7,89	5,59	7,03	6,72	6,95
Baden-Württemberg	6,34	5,93	6,22	7,15	7,71	7,38	4,97	7,36	6,19	6,59
Bayern	6,43	5,76	5,86	7,66	7,46	7,49	5,15	6,85	7,00	6,43
Saarland	7,52	6,97	7,09	8,46	8,87	8,23	6,09	8,37	0,00	7,55
Berlin	6,75	5,74	4,49	6,72	7,22	6,73	6,04	6,12	5,39	6,63
Brandenburg	5,26	4,49	4,43	5,27	5,92	5,46	4,35	5,08	4,86	5,01
Mecklenburg-Vorpommern	4,78	4,37	4,41	5,05	5,41	5,18	3,73	4,72	4,80	4,57
Sachsen	6,43	5,82	6,53	6,37	8,20	6,90	5,22	6,19	5,04	6,44
Sachsen-Anhalt	4,97	4,50	4,42	6,32	6,48	6,64	4,37	4,92	4,79	4,95
Thüringen	6,09	5,30	6,34	7,56	8,66	7,81	5,33	5,98	5,38	6,39
D	6,72	5,66	6,06	7,63	7,58	7,70	4,92	6,42	6,04	6,37

2.2.3 Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_X-N)

Die räumliche Verteilung der Nass- Trocken- und Feucht-Depositionsfrachten der reduzierten Stickstoff-Verbindungen Ammoniak und Ammonium (NH_X-N) für das Prognosejahr 2020 ist in Karte 5 abgebildet. Die Kartenlegenden umfassen einen unterschiedlichen Wertebereich, um jeweils die Darstellung von hohen und niedrigen Eintragsraten der drei Einzelflüsse zu ermöglichen.

Räumliches Muster der NH_X-N Nass-Deposition

Das räumliche Muster der NH_X-N Nass-Deposition (Karte 5, links) zeigt hohe Einträge im gesamten Nordwesten Deutschlands vom südlichen Schleswig-Holstein entlang der niedersächsischen Nordseeküste bis zum Münsterland und entlang der Mittelgebirgsschwelle bis zum Harz. Höher gelegene Mittelgebirge in der Südhälfte Deutschlands, das Allgäu und die Alpenregion weisen ebenfalls hohe Einträge der Nass-Deposition von NH_X-N auf. Relativ geringe Eintragsraten sind in größeren Gebieten im Südwesten Deutschlands, in Hessen, im Nord-Westen Bayerns, in Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern zu beobachten.

Räumliches Muster der NH_X-N Trocken-Deposition

Bei der Abbildung der trockenen Deposition von NH_X-N (Karte 5, Mitte) liegen Gebiete mit deutlich hohen Einträgen in den Gebieten mit hoher Tierdichte im Nordwesten Deutschlands (Schleswig-Holstein, West-Niedersachsen, Westfälische Bucht), und etwas weniger deutlich in Süddeutschland im Gebiet Nordwürttemberg (Hohenloher Ebene) und Mittelfranken, in Oberschwaben, dem Allgäu und dem Niederbayerischen Alpenvorland.

Räumliches Muster der NH_X-N Feucht-Deposition

Das räumliche Muster der Feucht-Deposition von NH_X-N der Karte 5 (rechts) zeigt höchste Eintragsraten unmittelbar an der Mittelgebirgsschwelle und den höher gelegenen Gebieten der bewaldeten Mittelgebirge und im Alpenraum, in Bayern daneben auch deutlich in Gebieten größerer städtischer Agglomerationsräume (München, Augsburg, Erlangen-Nürnberg).

Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition an der NH_X-N Gesamtd deposition nach Landnutzungsklassen

Die mittleren Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition an der NH_X-N Gesamtd deposition im Prognose-Jahr 2020 differenziert nach den neun betrachteten Landnutzungsklassen sind in der Grafik in Abbildung 4 dargestellt.

NH_3 -N Gesamt-Deposition nach Landnutzungsklassen

Mittlere Gesamtdepositionsfrachten über dem Durchschnittswert ganz Deutschlands von ca. $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ NH_3 -N liegen bei den Landnutzungsklassen Nadelwald, Mischwald, Wiesen & Weiden und semi-natürliche Vegetation vor. NH_3 -N Gesamtdepositionsfrachten unter dem deutschlandweiten Mittelwert entfallen auf die übrigen Landnutzungsklassen Laubwald, Ackerland, Bebaute Gebiete, schütterte Vegetation und Wasserflächen.

Die Reihenfolge der Landnutzungsklassen nach der Höhe der mittleren Einträge von NH_3 -N unterscheidet sich damit von der Reihenfolge bei SO_2 - S_{nss} und NO_2 -N: Nadelwald > Mischwald > Wiesen & Weiden > semi-natürliche Vegetation > Durchschnitt > Laubwald > Ackerland > Bebaute Gebiete > schütterte Vegetation > Wasserflächen.

Die Abweichungen vom Mittelwert für Deutschland bewegen sich bei NH_3 -N in einer Spanne von -19% bis +9%, was einem Bereich von $+1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis $-2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ NH_3 -N entspricht.

NH_3 -N Trocken-Deposition nach Landnutzungsklassen

Mittlere Trockendepositionfrachten über dem Durchschnitt für ganz Deutschland von ca. $7,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen bei drei Landnutzungsklassen vor: Nadelwald > Ackerland > Wiesen & Weiden.

Unterdurchschnittliche Einträge der Trocken-Deposition verteilen sich auf die übrigen Landnutzungsklassen in der Reihenfolge: Laub- > Mischwald > semi-natürliche Vegetation > Bebaute Gebiete > Wasserflächen > schütterte Vegetation. Die Unterschiede bewegen sich in einer Spanne von -48% bis +5% um den deutschlandweiten Mittelwert, was einem Bereich innerhalb von nur etwa $+0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis $-3,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ NH_3 -N entspricht.

NH_3 -N Nass-Deposition nach Landnutzungsklassen

Die Nass-Deposition ist landnutzungsunabhängig, trotzdem bilden sich in der nach Landnutzungsklassen gegliederten Statistik geringe Unterschiede in den Eintragsraten aus, die sich zusammenfassend aus der uneinheitlichen Verteilung der Landnutzungsklassen auf bestimmte Höhen- und geographische Lagen erklären lassen, wobei die Regularitäten von Bewegung, bzw. Transport niederschlagsbringender Luftmassen und die damit einher gehende räumlich differenzierte Befruchtung des Wolkenwassers über Emissionsgebieten sowie regional und lokal unterschiedliche Niederschlagsregimes die in der Karte für das ganze Jahr zusammengefasste jeweils nieder gehende Nass-Depositionsfracht bestimmen. Insgesamt liegt die Spanne der Abweichung vom deutschlandweiten Mittelwert von ca. $5,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ NH_3 -N bei -8% bis +30% und beträgt absolut zwischen -0,4 und $+1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ NH_3 -N. Der größte Unterschied zum Deutschlandweiten Mittelwert mit $+1,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist bei der Landnutzungsklasse schütterte Vegetation zu beobachten, die in Deutschland nur sehr kleine Flächen einnimmt, die zudem auf Felsfluren der Alpen mit höchsten Niederschlagsmengen und einige wenige Dünengebiete beschränkt sind.

NH_3 -N Feucht-Deposition nach Landnutzungsklassen

Bei der Feucht-Deposition ist einerseits ähnlich wie bei der Nass-Deposition die geographische und orographische Lage der nach Landnutzungsklassen differenzierten Gebiete, andererseits analog zur Trocken-Deposition auch die nach Landnutzungsklassen differenzierte Depositionsgeschwindigkeit von Wolkenwassertropfen bestimmend für die in Abbildung 4 dargestellten unterschiedlichen mittleren Anteile an der mittleren Gesamt-Deposition bestimmend. Der Blick auf die Darstellung der Feuchtd deposition in Karte 3 (rechts) lässt die Höhenlage und Exposition als sehr wichtigen Parameter für hohe Einträge dieses Depositionsflusses deutlich erkennen: Feucht-Depositionsfrachten an der Mittelgebirgsschwelle und in den Hochlagen der Gebirge erreichen i.d.R. die größten Werte. Zugleich sind dies die Gebiete, die i.d.R. bewaldet sind. Somit erklären sich die überdurchschnittlichen Frachten der Feucht-Deposition dadurch, dass sie in den Luvlagen und damit in den wolkenwasser-exponierten Hang- und Hochlagen von überwiegend bewaldeten Mittelgebirgen niedergehen. Insgesamt ist die Spanne der Mittelwertabweichung über alle landnutzungsklassen sehr differenziert und liegt zwischen -87% bis +100%, beträgt absolut jedoch nur geringe $\pm 0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ NH}_x\text{-N}$ bei einem deutschlandweiten Mittelwert von ca. $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Räumliches Muster der $\text{NH}_x\text{-N}$ Gesamt-Deposition

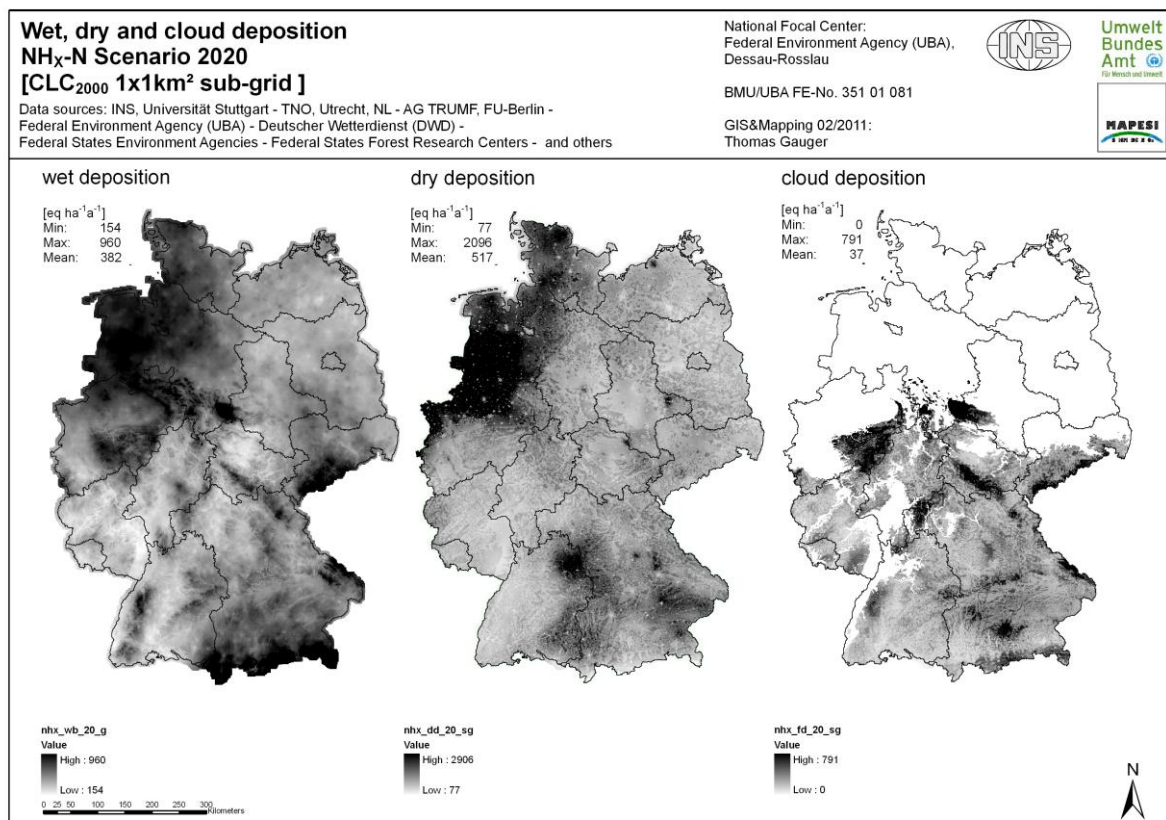
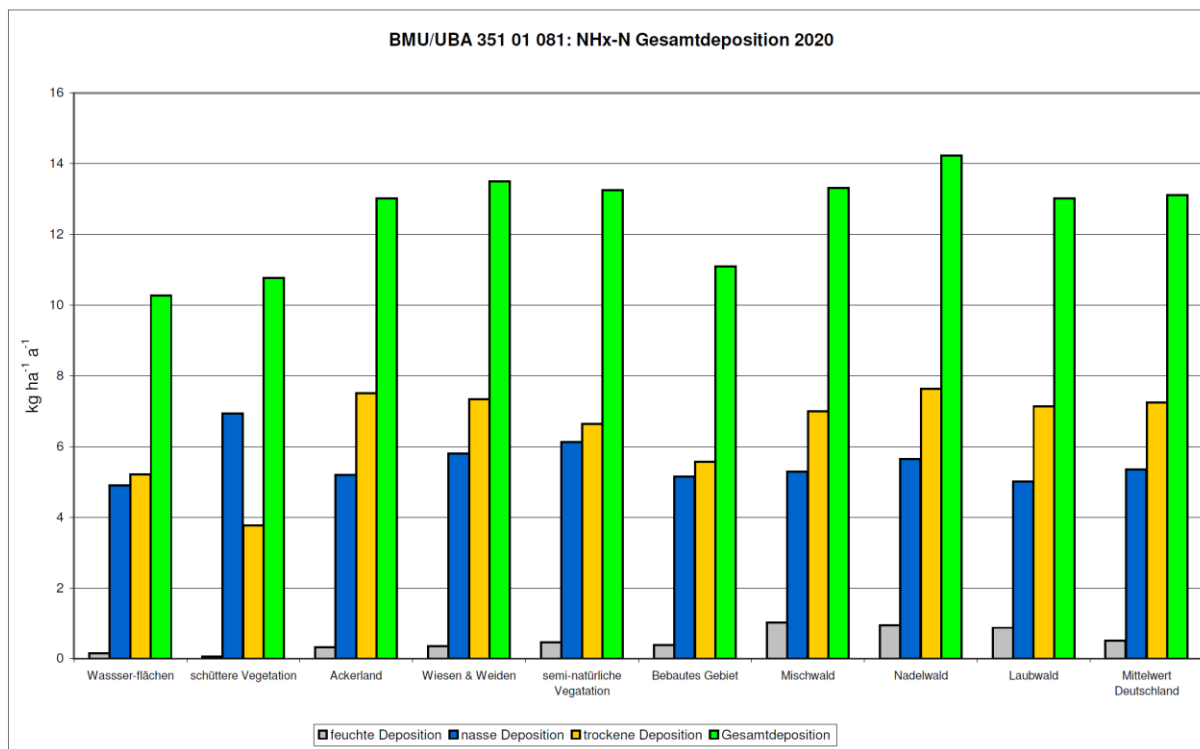
Die in Deutschland für das Prognose-Jahr 2020 berechneten Frachten der Gesamt-Deposition von $\text{NH}_x\text{-N}$ liegen in einer Werte-Spanne zwischen $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Mittelwert von etwa $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Das räumliche Muster der Gesamt-Deposition von $\text{NH}_x\text{-N}$ ist in Karte 6 dargestellt.

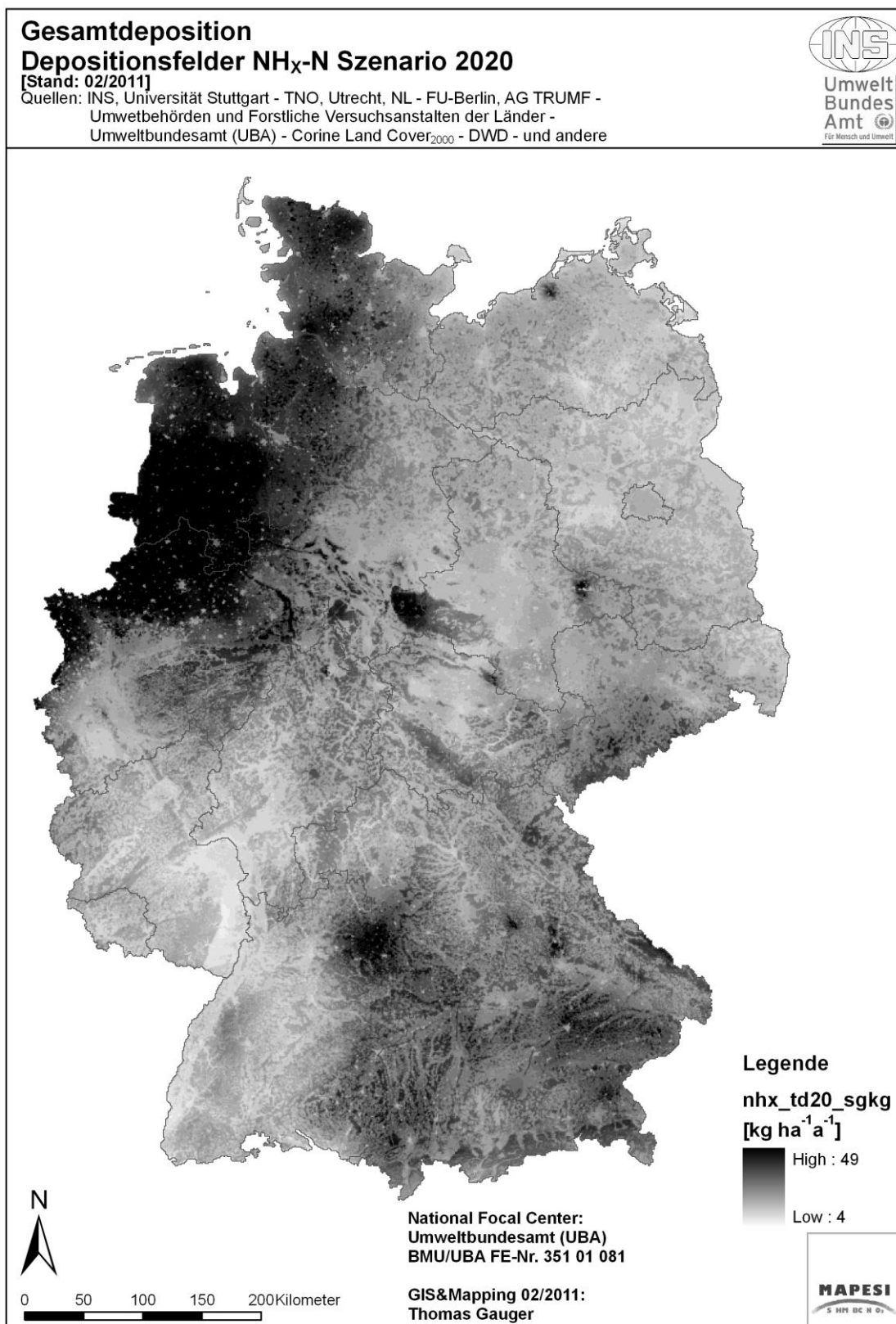
Maximale Einträge von reduzierten Stickstoff-Verbindungen ($\text{NH}_x\text{-N}$) bis zu $49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ sind in Nordwestdeutschland (Emsland, Münsterland) zu beobachten.

Hohe Depositions-Frachten deutlich über dem Durchschnitt in Deutschland verteilen sich auf weite Teile Nordwest- und Südostdeutschlands, wobei in Karte 6 das Relief deutlich hervortritt, weil wiederum bewaldete Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen gegenüber Talschaften deutlich höhere Eintragsraten erhalten.

Depositions-Frachten unter dem Durchschnitt von ca. $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ NH}_x\text{-N}$ nehmen Gebiete in einem vom Südwesten zum Nordosten Deutschlands verlaufenden Streifen ein.

Eine detaillierte regionale Statistik der Nass-, Trocken-, Feucht-, und Gesamtdeposition für reduzierte Stickstoff-Verbindungen ($\text{NH}_x\text{-N}$) im Prognose-Jahr 2020 nach Landnutzungsklassen auf der Aggregationsebene der 16 Bundesländer ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Karte 5: Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) 2020Abbildung 4: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der NH_x-N Gesamtdeposition 2020



Karte 6: Gesamtdeposition von reduziertem Stickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$) 2020

Tabelle 10: Regionale Statistik der NH_x-N Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdeposition 2020NH_x-N Nassdeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	6,12	6,03	6,52	5,86	6,26	6,14	5,70	6,36	6,22	6,18
Hamburg	6,11	5,75	6,13	6,26	6,42	6,51	5,96	6,26	6,56	6,05
Niedersachsen	6,66	6,82	7,22	6,71	7,01	7,06	6,63	7,32	7,17	6,92
Bremen	7,52	7,51	7,61	7,40	7,44	7,44	7,52	7,41	7,07	7,53
Nordrhein-Westfalen	5,73	6,13	6,12	6,24	6,61	6,49	5,64	6,28	6,87	6,14
Hessen	4,01	4,29	4,80	4,67	4,93	4,68	3,48	4,90	4,09	4,51
Rheinland-Pfalz	3,57	3,54	4,15	3,97	4,25	4,04	3,31	3,93	3,43	3,84
Baden-Württemberg	4,10	4,31	5,02	4,48	5,08	4,74	3,63	5,34	4,08	4,58
Bayern	5,37	5,21	6,30	4,95	6,12	6,25	5,97	7,39	9,35	5,72
Saarland	3,59	3,83	3,87	3,92	3,98	3,91	3,79	4,00	0,00	3,83
Berlin	4,75	4,85	4,48	4,80	4,82	4,87	4,86	4,89	4,73	4,77
Brandenburg	4,60	4,48	4,41	4,43	4,67	4,67	4,38	4,67	4,78	4,54
Mecklenburg-Vorpommern	4,55	4,56	4,49	4,58	4,54	4,60	4,38	4,43	4,28	4,54
Sachsen	5,59	5,86	6,15	5,58	6,19	5,86	4,90	5,28	4,58	5,76
Sachsen-Anhalt	4,59	4,58	4,47	4,87	5,15	5,01	4,80	4,94	5,38	4,88
Thüringen	4,24	4,22	4,70	4,84	5,23	4,99	4,06	4,32	5,22	4,54
D	5,16	5,20	5,82	5,03	5,66	5,31	5,24	6,20	7,44	5,36

NH_x-N Trockendeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	6,74	9,26	10,50	10,07	12,40	11,15	7,98	9,11	4,66	9,46
Hamburg	6,50	7,27	8,15	10,02	12,01	11,71	7,26	8,07	3,51	7,00
Niedersachsen	7,40	11,28	11,05	8,60	10,99	10,81	9,35	11,97	5,98	10,77
Bremen	5,76	10,00	10,40	11,52	11,94	8,23	9,24	11,53	9,60	7,88
Nordrhein-Westfalen	7,39	12,43	8,75	9,83	10,25	9,28	9,04	9,42	7,10	10,62
Hessen	4,20	5,10	4,91	6,33	6,73	6,39	4,57	5,65	5,16	5,55
Rheinland-Pfalz	3,89	4,07	4,71	5,34	5,61	5,16	3,87	4,25	3,84	4,65
Baden-Württemberg	4,33	6,59	6,33	7,04	6,51	6,89	4,49	6,14	3,52	6,41
Bayern	5,37	7,58	6,55	7,46	8,18	7,23	5,79	5,48	2,11	7,34
Saarland	4,41	4,52	4,28	5,63	5,78	5,72	4,88	5,80	0,00	4,88
Berlin	5,00	3,78	4,60	5,25	5,35	5,18	3,81	4,01	3,99	4,89
Brandenburg	4,19	4,60	4,24	5,17	5,90	5,61	3,88	4,41	4,10	4,94
Mecklenburg-Vorpommern	4,41	5,22	4,80	6,24	6,59	6,37	4,08	4,61	4,02	5,31
Sachsen	4,98	5,49	4,94	6,35	6,49	6,54	4,53	4,54	3,45	5,61
Sachsen-Anhalt	4,64	5,50	5,36	6,78	7,31	6,44	5,17	4,91	4,11	5,75
Thüringen	4,93	5,65	5,01	7,23	6,65	6,68	5,74	5,38	6,24	5,96
D	5,56	7,50	7,35	7,14	7,63	6,99	5,22	6,65	3,77	7,25

NH_x-N Feuchtdeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hamburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Niedersachsen	0,09	0,04	0,03	0,98	0,71	0,73	0,05	0,14	0,00	0,19
Bremen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nordrhein-Westfalen	0,25	0,19	0,59	1,23	1,69	1,25	0,30	0,53	0,00	0,52
Hessen	0,28	0,43	0,63	1,04	1,21	1,01	0,16	0,70	1,08	0,70
Rheinland-Pfalz	0,35	0,31	0,50	0,77	0,94	0,89	0,08	0,52	0,00	0,56
Baden-Württemberg	0,52	0,50	0,57	0,78	0,94	0,94	0,12	0,81	0,00	0,66
Bayern	1,17	0,87	0,73	1,44	1,41	1,47	0,60	0,96	0,76	1,06
Saarland	0,48	0,49	0,49	0,92	0,88	0,80	0,26	0,79	0,00	0,61
Berlin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brandenburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mecklenburg-Vorpommern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sachsen	0,57	0,47	0,76	0,40	1,22	0,71	0,13	0,37	0,01	0,65
Sachsen-Anhalt	0,08	0,04	0,06	0,66	0,48	0,85	0,10	0,06	0,05	0,16
Thüringen	0,76	0,54	0,88	1,33	1,83	1,45	0,69	0,71	0,59	0,94
D	0,38	0,32	0,36	0,88	0,95	1,02	0,16	0,47	0,07	0,51

NH_x-N Gesamtdeposition Szenario 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterer Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	12,86	15,29	17,02	15,93	18,66	17,28	13,68	15,47	10,88	15,64
Hamburg	12,61	13,02	14,28	16,28	18,43	18,22	13,23	14,33	10,07	13,05
Niedersachsen	14,15	18,14	18,30	16,30	18,71	18,60	16,03	19,42	13,14	17,88
Bremen	13,27	17,51	18,01	18,92	19,38	15,67	16,76	18,94	16,66	15,41
Nordrhein-Westfalen	13,37	18,75	15,46	17,29	18,55	17,02	14,98	16,23	13,98	17,28
Hessen	8,49	9,82	10,34	12,04	12,87	12,08	8,20	11,25	10,33	10,77
Rheinland-Pfalz	7,81	7,93	9,37	10,07	10,80	10,09	7,25	8,70	7,27	9,04
Baden-Württemberg	8,95	11,40	11,91	12,30	12,53	12,56	8,24	12,30	7,59	11,66
Bayern	11,91	13,66	13,58	13,85	15,71	14,95	12,36	13,84	12,22	14,11
Saarland	8,47	8,84	8,65	10,47	10,64	10,43	8,94	10,60	0,00	9,32
Berlin	9,75	8,64	9,07	10,05	10,17	10,05	8,67	8,90	8,72	9,66
Brandenburg	8,79	9,07	8,65	9,60	10,57	10,28	8,26	9,08	8,88	9,48
Mecklenburg-Vorpommern	8,96	9,78	9,29	10,82	11,13	10,97	8,46	9,05	8,30	9,85
Sachsen	11,14	11,63	11,85	12,34	13,90	12,91	9,55	10,17	8,03	12,02
Sachsen-Anhalt	9,31	10,12	9,89	12,32	12,93	12,31	9,87	9,91	9,54	10,59
Thüringen	9,94	10,41	10,59	13,41	13,72	13,12	10,49	10,41	12,05	11,43
D	11,11	13,03	13,53	13,05	14,24	13,32	10,62	13,31	11,28	13,12

2.2.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N)

Gesamtstickstoff (N) ist die Summe aus oxidiertem und reduziertem Stickstoff ($NO_Y-N + NH_X-N$). Die räumliche Verteilung der Nass- Trocken- und Feucht-Depositionsfrachten von reaktivem Stickstoff (N) für das Prognosejahr 2020 ist in Karte 7 abgebildet. Die Kartenlegenden umfassen einen unterschiedlichen Wertebereich, um jeweils die Darstellung von hohen und niedrigen Eintragsraten der drei Einzelflüsse zu ermöglichen.

Räumliches Muster der Stickstoff (N) Nass-Deposition

Das räumliche Muster der N Nass-Deposition (Karte 7, links) zeigt hohe Einträge im gesamten Nordwesten und im äußersten Südosten Deutschlands (Allgäu, Voralpen und Alpen, Bayerischer Wald). Höher gelegene Mittelgebirge in der Südhälfte Deutschlands treten ebenfalls sehr deutlich in der Karte 7 durch hohe Einträge der Stickstoff Nass-Deposition hervor. Relativ geringe Eintragsraten sind in größeren Gebieten im Südwesten Deutschlands (Rheinland-Pfalz, Saarland, Oberrheintal und östlich des Schwarzwaldes in Baden-Württemberg), in den orographisch niedriger gelegenen Gebieten Hessens (Rheinhessen und Hessisches Bergland östlich des Rheinischen Schiefergebirges), Nord-West Bayerns (Fränkische Saale und Maintal in Unterfranken), Thüringens (Werratal und Thüringer Becken), in Sachsen-Anhalt (Leipziger Bucht, Magdeburger Börde und Altmark) und Sachsen (Leipziger Bucht, Vorland des Erzgebirges und Oberlausitz) sowie im östlichsten Niedersachsen und im überwiegenden, niederschlagsärmeren Gebiet Brandenburgs und Mecklenburg-Vorpommerns zu beobachten

Räumliches Muster der Stickstoff (N) Trocken-Deposition

Bei der Abbildung der trockenen Deposition von N (Karte 7, Mitte) liegen Gebiete mit deutlich hohen Einträgen in den Gebieten mit hoher Tierbestandesdichte und deutlich hohem trockenem Eintrag von NH_X-N im Nordwesten Deutschlands (West-Niedersachsen, Westfälische Bucht und Schleswig-Holstein), und etwas weniger deutlich in Süddeutschland im Gebiet Nordwürttemberg (Hohenloher Ebene) und Mittelfranken, in Oberschwaben, dem Allgäu und dem Niederbayerischen Alpenvorland.

Räumliches Muster der Stickstoff (N) Feucht-Deposition

Das räumliche Muster der Feucht-Deposition von NH_X-N der Karte 7 (rechts) zeigt höchste Eintragsraten unmittelbar an der Mittelgebirgsschwelle und den höher gelegenen Gebieten der bewaldeten Mittelgebirge (Rheinisches Schiefergebirge, Solling, Harz, Thüringer Wald und Fichtelgebirge, Rhön, Pfälzer Wald, Nordschwarzwald) und im Alpenraum, in Bayern daneben auch deutlich im Donautal und in Gebieten größerer städtischer Agglomerationsräume (München, Augsburg, Erlangen-Nürnberg).

Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition an der Stickstoff Gesamtdosition nach Landnutzungsklassen

Die mittleren Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition an der NH_x-N Gesamtd eposition im Prognose-Jahr 2020 differenziert nach den neun betrachteten Landnutzungsklassen sind in der Grafik in Abbildung 5 dargestellt.

Stickstoff Gesamt-Deposition nach Landnutzungsklassen

Mittlere Stickstoff Gesamtd epositionsfrachten über dem Durchschnittswert ganz Deutschlands von ca. $19,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} N$ liegen bei den Landnutzungsklassen Nadelwald, Mischwald, Laubwald, Wiesen & Weiden und semi-natürliche Vegetation vor. N Gesamtd epositionsfrachten unter dem deutschlandweiten Mittelwert entfallen auf die übrigen Landnutzungsklassen Ackerland, Bebaute Gebiete, schütterte Vegetation und Wasserflächen.

Die Reihenfolge der Landnutzungsklassen nach der Höhe der mittleren Einträge von Gesamt-Stickstoff (N) ist damit: Nadelwald > Mischwald > Laubwald > Wiesen & Weiden > semi-natürliche Vegetation > Durchschnitt > Ackerland > Bebaute Gebiete > schütterte Vegetation > Wasserflächen.

Die Abweichungen vom Mittelwert für Deutschland bewegen sich bei den N Gesamtd epositionsfrachten in einer Spanne von +12% bis -20%, was einem Bereich von $+2,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis $-3,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} N$ entspricht.

Stickstoff Trocken-Deposition nach Landnutzungsklassen

Mittlere Stickstoff Trockend epositionfrachten über dem Durchschnitt für ganz Deutschland von $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen bei den drei Wald-Landnutzungsklassen vor: Nadelwald > Mischwald > Laubwald.

Ackerland > Wiesen & Weiden.

Unterdurchschnittliche Einträge der Trocken-Deposition verteilen sich auf die übrigen Landnutzungsklassen in der Reihenfolge: Ackerland > Wiesen & Weiden > Mischwald > semi-natürliche Vegetation > Bebaute Gebiete > Wasserflächen > schütterte Vegetation.

Die Unterschiede bewegen sich in einer Spanne von -43% bis +11% um den deutschlandweiten Mittelwert, was einem Bereich innerhalb von etwa $+1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis $-4,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} N$ entspricht.

Stickstoff Nass-Deposition nach Landnutzungsklassen

Die Nass-Deposition ist landnutzungsunabhängig, trotzdem bilden sich in der nach Landnutzungsklassen gegliederten Statistik geringe Unterschiede in den Eintragsraten aus, die sich zusammenfassend aus der uneinheitlichen Verteilung der Landnutzungsklassen auf bestimmte Höhen- und geographische Lagen erklären lassen, wobei die Regularitäten von Bewegung, bzw. Transport niederschlagsbringender Luftmassen und die damit einher gehende räumlich differenzierte Befrachtung des Wolkenwassers über Emissionsgebieten sowie regional und lokal unterschiedliche Niederschlagsregimes die in der Karte für das ganze Jahr zusammengefasste jeweils nieder gehende Nass-Depositionsfracht bestimmen.

Insgesamt liegt die Spanne der Abweichung vom deutschlandweiten Mittelwert von ca. $8,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} N$ bei -9% bis +27% und beträgt absolut zwischen $-0,8$ und $+2,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} N$. Der größte Unterschied zum Deutschlandweiten Mittelwert mit $+2,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist bei der Landnutzungs-klasse schütterte Vegetation zu

beobachten, die in Deutschland nur sehr kleine Flächen einnimmt, die zudem auf Felsfluren der Alpen mit höchsten Niederschlagsmengen und einige wenige Dünengebiete beschränkt sind.

Stickstoff Feucht-Deposition nach Landnutzungsklassen

Bei der Feucht-Deposition ist einerseits ähnlich wie bei der Nass-Deposition die geographische und orographische Lage der nach Landnutzungsklassen differenzierten Gebiete, andererseits analog zur Trocken-Deposition auch die nach Landnutzungsklassen differenzierte Depositionsgeschwindigkeit von Wolkenwassertropfen bestimmend für die in Abbildung 5 dargestellten unterschiedlichen mittleren Anteile an der mittleren Gesamt-Deposition bestimmend. Der Blick auf die Darstellung der Feuchtd deposition in Karte 3 (rechts) lässt die Höhenlage und Exposition als sehr wichtigen Parameter für hohe Einträge dieses Depositionsflusses deutlich erkennen: Feucht-Depositionsfrachten an der Mittelgebirgsschwelle und in den Hochlagen der Gebirge erreichen i.d.R. die größten Werte. Zugleich sind dies die Gebiete, die i.d.R. bewaldet sind. Somit erklären sich die überdurchschnittlichen Frachten der Feucht-Deposition dadurch, dass sie in den Luvlagen und damit in den wolkenwasser-exponierten Hang- und Hochlagen von überwiegend bewaldeten Mittelgebirgen niedergehen. Insgesamt ist die Spanne der Mittelwertabweichung über alle landnutzungsklassen sehr differenziert und liegt zwischen -90% bis +104%, beträgt absolut etwa $\pm 1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ bei einem deutschlandweiten Mittelwert von ebenfalls ca. $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Räumliches Muster der Stickstoff Gesamt-Deposition

Die in Deutschland für das Prognose-Jahr 2020 berechneten Frachten der Gesamt-Deposition von $\text{NH}_x\text{-N}$ liegen in einer Werte-Spanne zwischen $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $58 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Mittelwert von etwa $19,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Das räumliche Muster der Gesamt-Deposition von Stickstoff (N) ist in Karte 8 dargestellt.

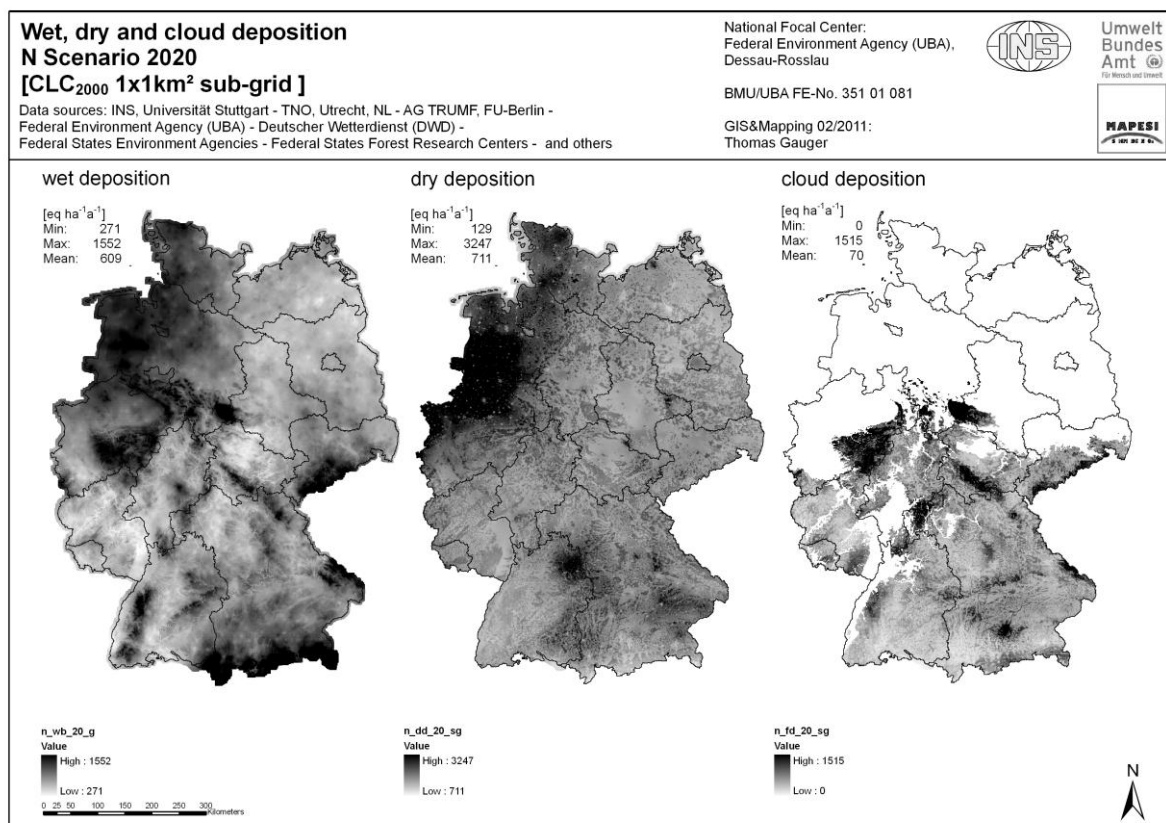
Maximale Einträge von Stickstoff (N) bis zu $58 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ sind wie bei $\text{NH}_x\text{-N}$ (Karte 6) in Nordwestdeutschland (Emsland, Münsterland) und dem Harz zu beobachten.

Hohe Depositionsfrachten deutlich über dem Durchschnitt in Deutschland verteilen sich auf weite Teile Nordwestdeutschlands, wobei in Karte 8 wiederum einerseits das Relief, andererseits bewaldete Gebiete im Norddeutschen Tiefland deutlich auffallen, weil bewaldete Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen gegenüber Talschaften, bzw. der Wechsel zwischen schwach und stark strukturierten Landschaftselementen (Offenland gegenüber Wald) zu deutlich unterschiedlichen Eintragsraten führen.

Depositionsfrachten deutlich unter dem Durchschnitt von ca. $19,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ NH}_x\text{-N}$ nehmen Gebiete in einem vom Südwesten zum Nordosten Deutschlands verlaufenden Streifen ein.

Eine detaillierte regionale Statistik der Nass-, Trocken-, Feucht-, und Gesamtdeposition für Gesamt-Stickstoff (N) im Prognose-Jahr 2020 nach Landnutzungsklassen auf der Aggregationsebene der 16 Bundesländer ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Ergebnisse der Nass-, Trocken-, Feucht- und Gesamtd deposition 2020



Karte 7: Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition von Gesamtstickstoff (N) 2020

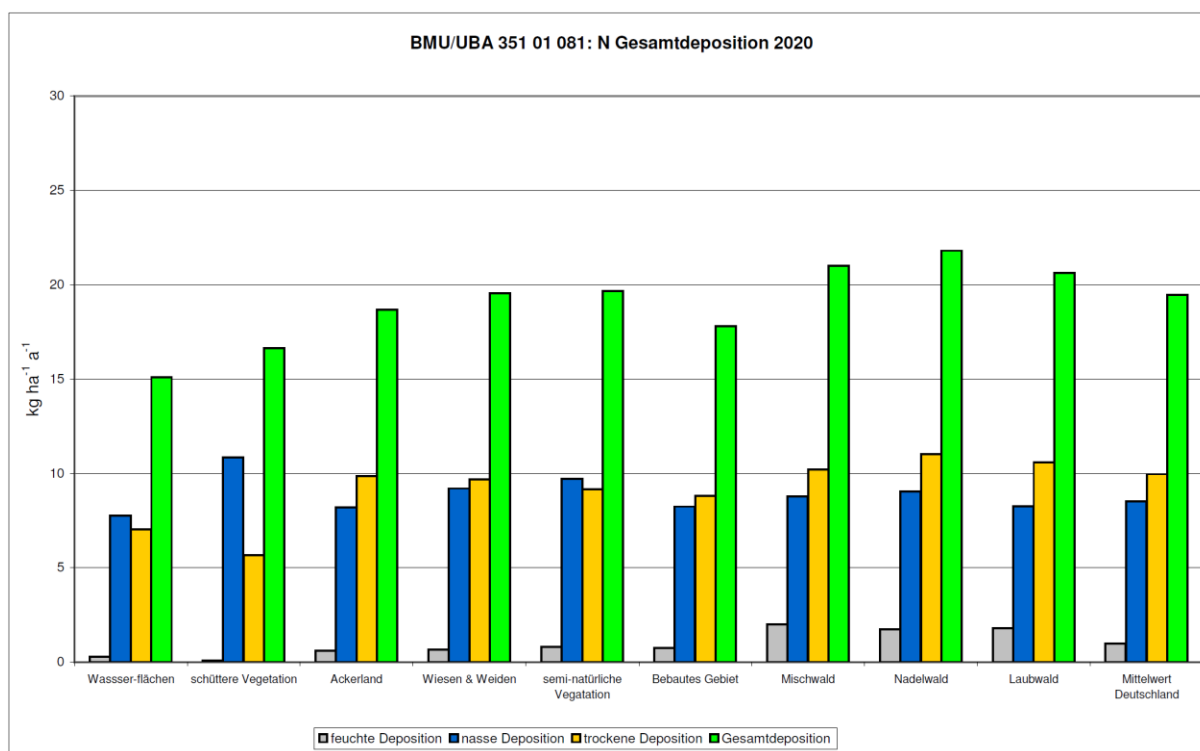
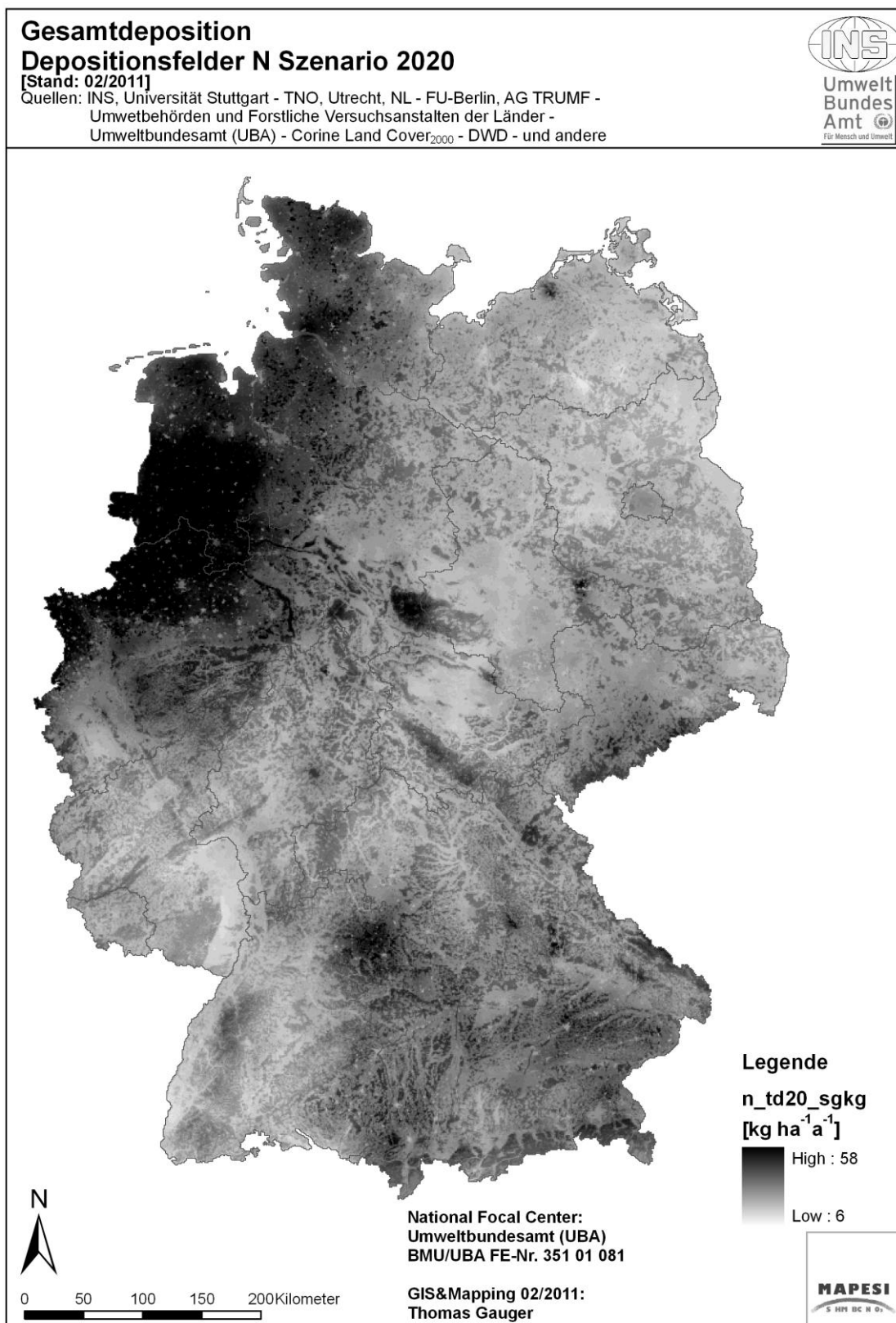


Abbildung 5: Anteile der Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition an der N Gesamtd deposition 2020



Karte 8: Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) 2020

Tabelle 11: Regionale Statistik der N Nass-, Trocken-, Feucht und Gesamtdeposition 2020

N Nassdeposition 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Urban	Arable	Pasture	Deciduous	Coniferous	Mixed Forest	Water	Semi Natural	Other	Mittel
	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterere Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	9,50	9,40	10,25	9,06	9,71	9,54	8,90	10,04	9,91	9,66
Hamburg	9,24	8,70	9,26	9,47	9,70	9,84	9,02	9,51	10,16	9,16
Niedersachsen	10,05	10,22	10,90	10,43	10,60	10,74	9,96	10,94	10,96	10,42
Bremen	11,16	11,12	11,29	11,10	11,12	11,23	11,09	11,10	10,70	11,19
Nordrhein-Westfalen	9,31	9,65	10,11	10,22	10,96	10,80	9,21	10,14	10,75	9,87
Hessen	7,03	7,41	8,32	8,08	8,53	8,11	6,08	8,48	7,30	7,82
Rheinland-Pfalz	6,26	6,19	7,19	6,91	7,39	7,02	5,78	6,87	6,11	6,68
Baden-Württemberg	7,25	7,54	8,68	7,89	8,99	8,38	6,47	9,31	7,52	8,04
Bayern	8,47	8,28	9,92	8,18	9,71	10,03	9,32	11,74	14,88	9,07
Saarland	6,36	6,77	6,85	6,93	7,01	6,90	6,85	7,06	0,00	6,77
Berlin	7,23	7,40	6,90	7,29	7,33	7,41	7,41	7,46	7,21	7,27
Brandenburg	7,14	6,90	6,79	6,80	7,22	7,19	6,78	7,21	7,49	7,00
Mecklenburg-Vorpommern	7,00	7,01	6,88	7,04	6,95	7,07	6,71	6,81	6,49	6,98
Sachsen	8,68	8,79	9,61	8,57	9,72	8,85	7,78	8,34	7,29	8,98
Sachsen-Anhalt	6,98	6,98	6,85	7,51	7,89	7,76	6,99	7,48	8,01	7,15
Thüringen	6,97	6,89	7,87	8,05	8,73	8,32	6,62	7,25	8,00	7,49
D	8,26	8,21	9,24	8,29	9,05	8,81	8,20	9,75	11,54	8,55

N Trockendeposition 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Urban	Arable	Pasture	Deciduous	Coniferous	Mixed Forest	Water	Semi Natural	Other	Mittel
	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterere Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	9,48	11,50	12,73	12,89	15,98	13,89	9,74	11,54	6,83	11,79
Hamburg	10,63	10,03	11,44	13,84	16,90	15,85	10,31	11,44	6,14	10,67
Niedersachsen	10,37	13,67	13,40	12,09	14,98	14,09	11,25	14,65	8,53	13,46
Bremen	8,96	12,62	13,08	14,18	15,51	11,47	11,77	14,03	11,35	10,82
Nordrhein-Westfalen	12,42	16,01	12,83	14,61	15,46	13,93	13,05	13,65	11,04	14,79
Hessen	7,70	7,87	7,62	10,04	10,87	9,92	7,53	8,95	8,77	8,78
Rheinland-Pfalz	7,33	7,08	7,77	9,28	10,04	9,05	6,89	7,79	7,87	8,11
Baden-Württemberg	6,96	8,78	8,37	9,96	9,45	9,67	6,50	8,82	6,26	8,89
Bayern	7,76	9,56	8,25	10,46	11,00	9,80	7,13	7,36	3,23	9,57
Saarland	8,51	7,92	7,77	9,92	10,54	9,94	7,83	10,13	0,00	8,70
Berlin	9,27	6,98	6,67	9,48	10,06	9,37	7,29	7,56	6,90	9,03
Brandenburg	6,91	6,67	6,29	8,08	9,27	8,55	5,82	6,95	6,26	7,48
Mecklenburg-Vorpommern	6,73	7,15	6,81	8,83	9,58	9,07	5,49	6,96	6,61	7,44
Sachsen	7,83	7,77	7,43	9,41	10,27	9,61	6,77	7,42	5,77	8,31
Sachsen-Anhalt	7,15	7,55	7,36	9,85	10,67	9,59	7,06	7,25	6,22	8,09
Thüringen	7,51	7,71	7,33	10,25	10,19	9,73	7,87	7,68	8,31	8,48
D	8,82	9,86	9,67	10,59	11,03	10,20	7,04	9,16	5,68	9,96

N Feuchtdeposition 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Urban	Arable	Pasture	Deciduous	Coniferous	Mixed Forest	Water	Semi Natural	Other	Mittel
	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterere Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hamburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Niedersachsen	0,17	0,07	0,05	1,94	1,29	1,40	0,09	0,24	0,00	0,36
Bremen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nordrhein-Westfalen	0,54	0,38	1,23	2,49	3,36	2,56	0,65	1,02	0,00	1,06
Hessen	0,61	0,92	1,31	2,21	2,52	2,15	0,35	1,40	2,44	1,49
Rheinland-Pfalz	0,76	0,68	1,05	1,65	1,96	1,89	0,16	1,04	0,00	1,19
Baden-Württemberg	1,07	1,00	1,07	1,59	1,78	1,88	0,24	1,51	0,00	1,31
Bayern	2,09	1,59	1,25	2,85	2,45	2,59	1,05	1,58	1,09	1,89
Saarland	1,11	1,11	1,10	2,06	1,94	1,81	0,54	1,78	0,00	1,39
Berlin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brandenburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mecklenburg-Vorpommern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sachsen	1,05	0,88	1,33	0,72	2,10	1,35	0,22	0,59	0,01	1,16
Sachsen-Anhalt	0,16	0,09	0,10	1,27	0,85	1,60	0,19	0,10	0,10	0,30
Thüringen	1,54	1,09	1,71	2,66	3,44	2,86	1,31	1,44	1,11	1,84
D	0,75	0,62	0,67	1,79	1,74	2,00	0,29	0,81	0,10	0,98

N Gesamtdeposition 2020, Mittelwerte [kg ha-1 a-1]

	Urban	Arable	Pasture	Deciduous	Coniferous	Mixed Forest	Water	Semi Natural	Other	Mittel
	Bebautes Gebiet	Agrarland	Wiese&Weide	Laubwald	Nadelwald	Mischwald	Wasserflächen	semi-nat. Veg.	schütterere Veg.	Mittel
Schleswig-Holstein	18,98	20,91	22,98	21,95	25,57	23,43	18,64	21,57	16,54	21,44
Hamburg	19,87	18,73	20,70	23,31	26,60	25,69	19,33	20,95	16,30	19,83
Niedersachsen	20,59	23,97	24,35	24,46	26,74	26,23	21,30	25,83	19,49	24,24
Bremen	20,12	23,74	24,37	25,28	26,63	22,70	22,86	25,13	22,05	22,00
Nordrhein-Westfalen	22,26	26,03	24,17	27,32	29,78	27,29	22,90	24,81	21,79	25,73
Hessen	15,34	16,20	17,25	20,33	21,92	20,18	13,96	18,82	18,51	18,09
Rheinland-Pfalz	14,35	13,95	16,01	17,84	19,38	17,96	12,84	15,71	13,98	15,98
Baden-Württemberg	15,27	17,32	18,12	19,44	20,22	19,93	13,20	19,64	13,79	18,24
Bayern	18,32	19,41	19,42	21,50	23,15	22,42	17,50	20,67	19,21	20,52
Saarland	15,98	15,79	15,72	18,91	19,50	18,65	15,02	18,95	0,00	16,86
Berlin	16,50	14,38	13,57	16,77	17,39	16,78	14,71	15,02	14,11	16,29
Brandenburg	14,05	13,57	13,08	14,88	16,50	15,74	12,61	14,16	13,75	14,49
Mecklenburg-Vorpommern	13,74	14,15	13,70	15,87	16,53	16,15	12,19	13,76	13,10	14,42
Sachsen	17,56	17,44	18,37	18,71	22,09	19,80	14,77	16,35	13,07	18,45
Sachsen-Anhalt	14,28	14,61	14,31	18,63	19,41	18,95	14,24	14,83	14,33	15,54
Thüringen	16,01	15,69	16,91	20,98	22,36	20,91	15,80	16,37	17,42	17,81
D	17,83	18,68	19,58	20,67	21,82	21,01	15,53	19,72	17,32	19,48

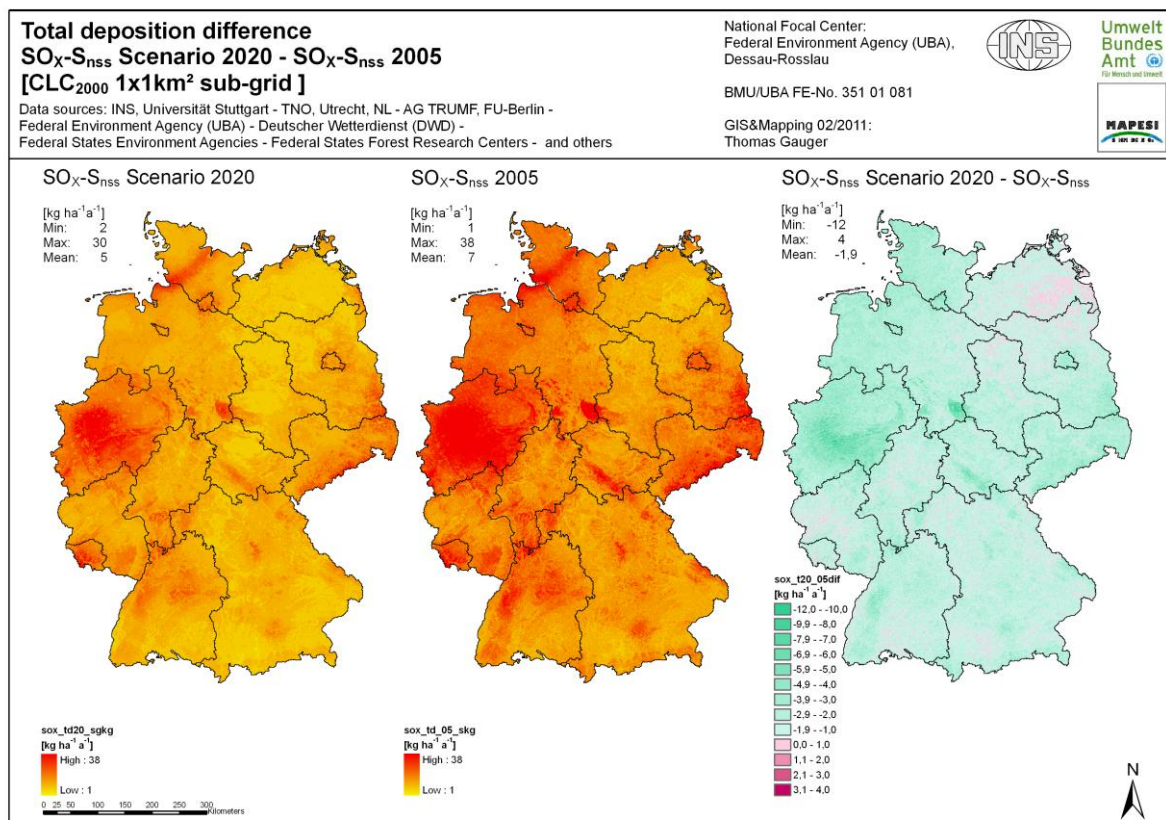
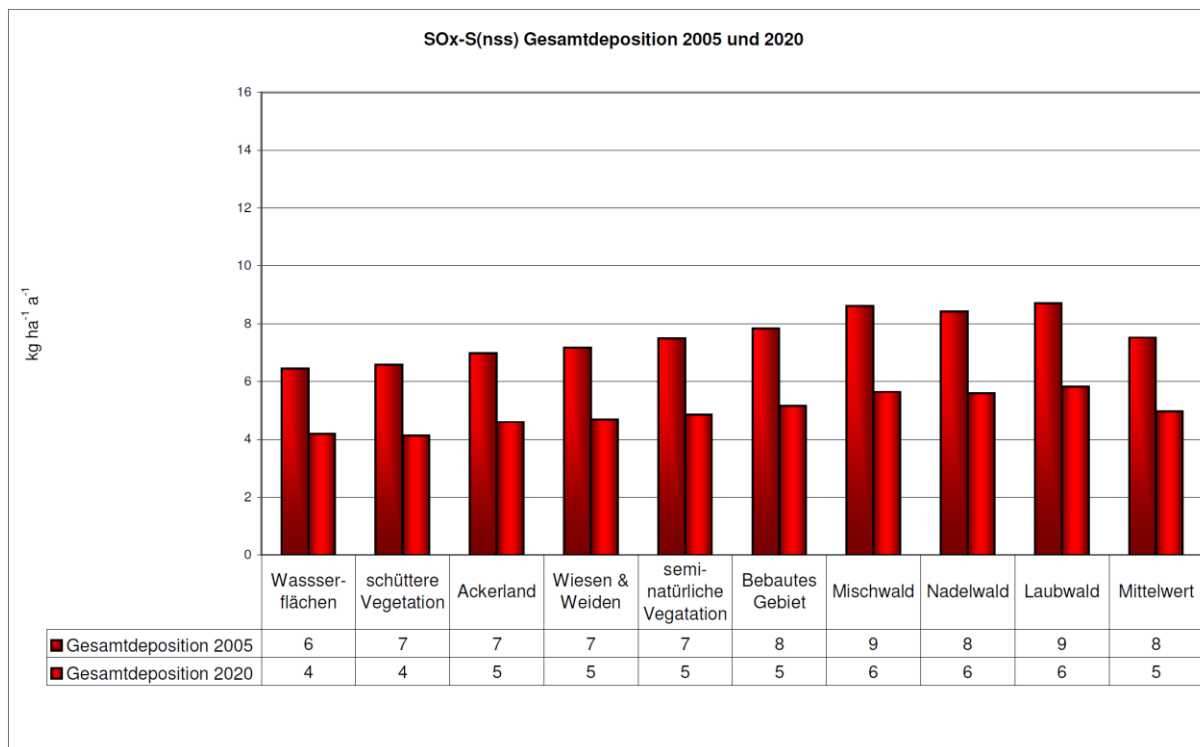
3 Vergleich zwischen der Modellierung und Kartierung für 2005 und dem Szenario 2020

Zur Darstellung der Modellierungs- und Kartierungsergebnisse für das Prognose-Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 2005 sind die Differenzen und Verhältnisse zwischen diesen beiden Jahren bezüglich der betrachteten Einzelnen Depositosflüsse (Nass-, Trocken, Feucht- und Gesamtd deposition) der versauernd und eutrophierend wirkenden Spezies Schwefel (SO_X-S_{nss}), der oxidierten Stickstoffverbindungen (NO_Y-N), der reduzierten Stickstoffverbindungen (NH_X-N) und für Gesamtstickstoff (N) kartographisch in den Karten 9 bis 12 und graphisch für die Gesamtdeposition nach Landnutzungsklassen in den Abbildungen 6 bis 9 dargestellt.

3.1 *Deposition von oxidiertem Schwefel (SO_X-S_{nss}) 2005 und 2020*

Die Kartierungsergebnisse der Schwefel-Gesamtdeposition (SO_X-S_{nss}) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 9 abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen überwiegend in Minderungen des Schwefel-Gesamteintrags (blau-grün in Karte 9, rechts). Nur in denjenigen Gebieten, die im Jahr 2005 relativ geringe Einträge erhielten sind Erhöhungen der Schwefel-Gesamtdeposition zu beobachten (violett in Karte 9, rechts), besonders deutlich in einem größeren Gebiet in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, aber auch in einzelnen Gebieten Hessens, in Reinland Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern ist dies zu erkennen. Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei $-1,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu $-12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Schwefel (S).

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 6 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der Schwefel-Gesamteinträge um im Mittel für Deutschland ca. -34% ist bei jeder Landnutzungs-kategorie deutlich sichtbar.

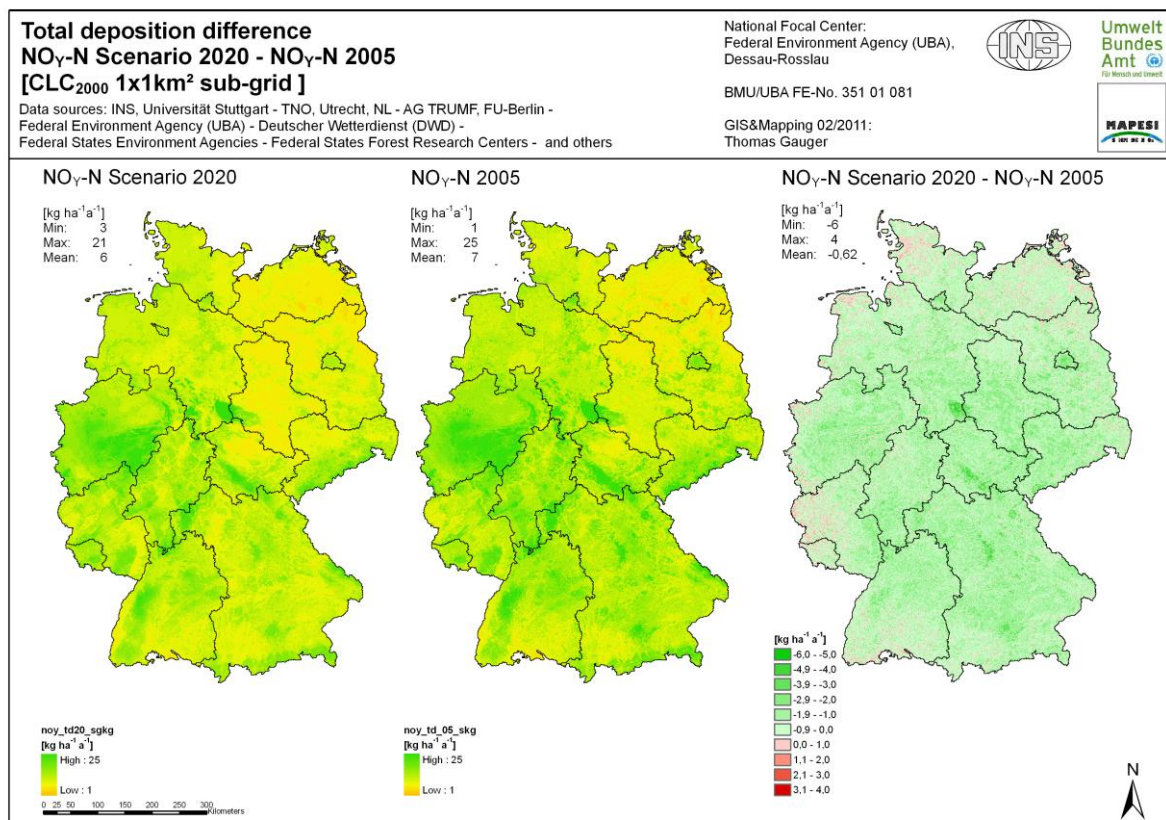
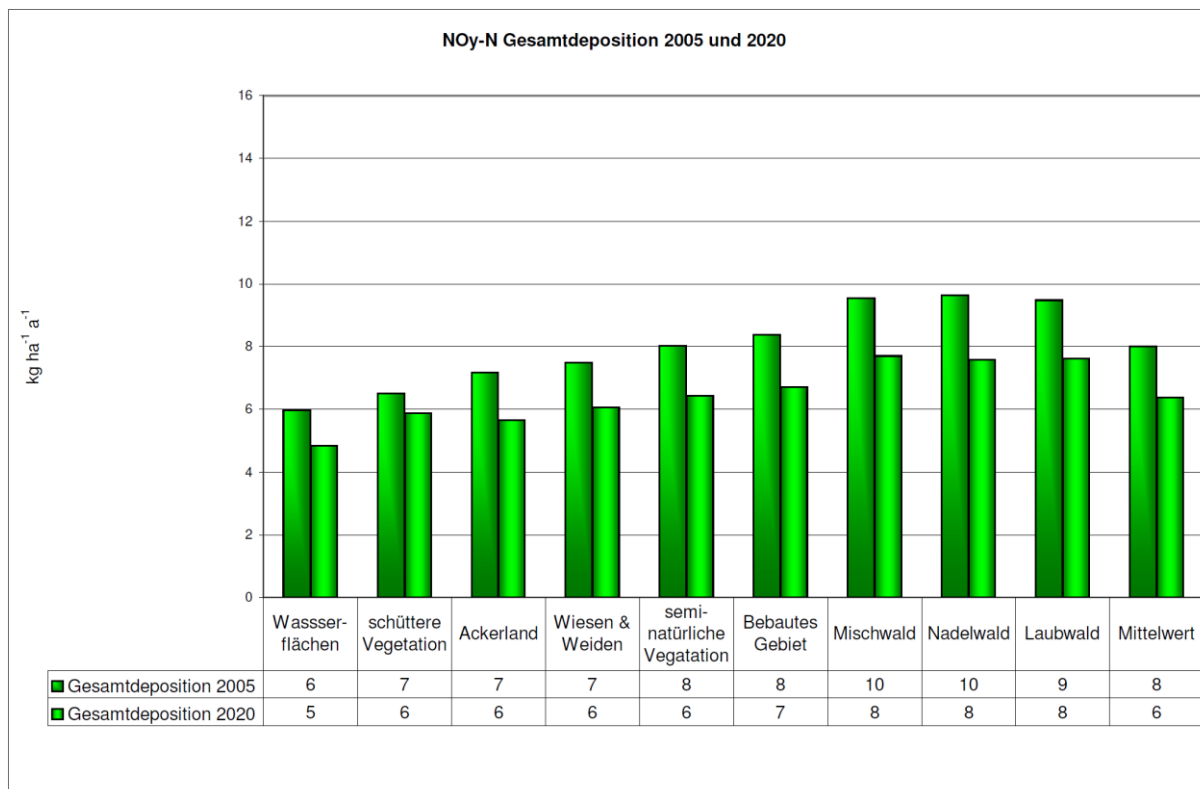
Karte 9: Vergleich der SO_x-S_{nss} Deposition 2005 und 2020Abbildung 6: Gegenüberstellung der SO_x-S_{nss} Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

3.2 *Deposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) 2005 und 2020*

Die Kartierungsergebnisse der Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 10 von links nach rechts abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen überwiegend in Minderungen des Gesamteintrags von oxidiertem Stickstoff (grün in Karte 10, rechts). Auch hier sind in denjenigen Gebieten, die im Jahr 2005 relativ geringe Einträge erhielten Erhöhungen der NO_Y-N Gesamtdeposition zu beobachten (rot in Karte 9, rechts). Dies ist deutlicher in einzelnen Gebieten in Schleswig-Holstein, an der Niedersächsischen Nordseeküste, am Niederrhein und im äußersten Südwesten Nordrhein-Westfalens, im westlichen Rheinland-Pfalz und dem nördlichen Saarland, im Süden Baden-Württembergs und dem Bayerischen Allgäu sowie in Nordost-Brandenburg und Teilen Mecklenburg-Vorpommerns zu erkennen. Minderungen entfallen im Wesentlichen auf diejenigen Gebiete, die in 2005 relativ hohe NO_Y-N Einträge erhalten.

Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei etwa $-0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu $-6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N).

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von oxidiertem Stickstoff (NO_Y-N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 7 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der NO_Y-N -Gesamteinträge um im Mittel für Deutschland ca. -21% ist bei jeder Landnutzungsklasse deutlich sichtbar.

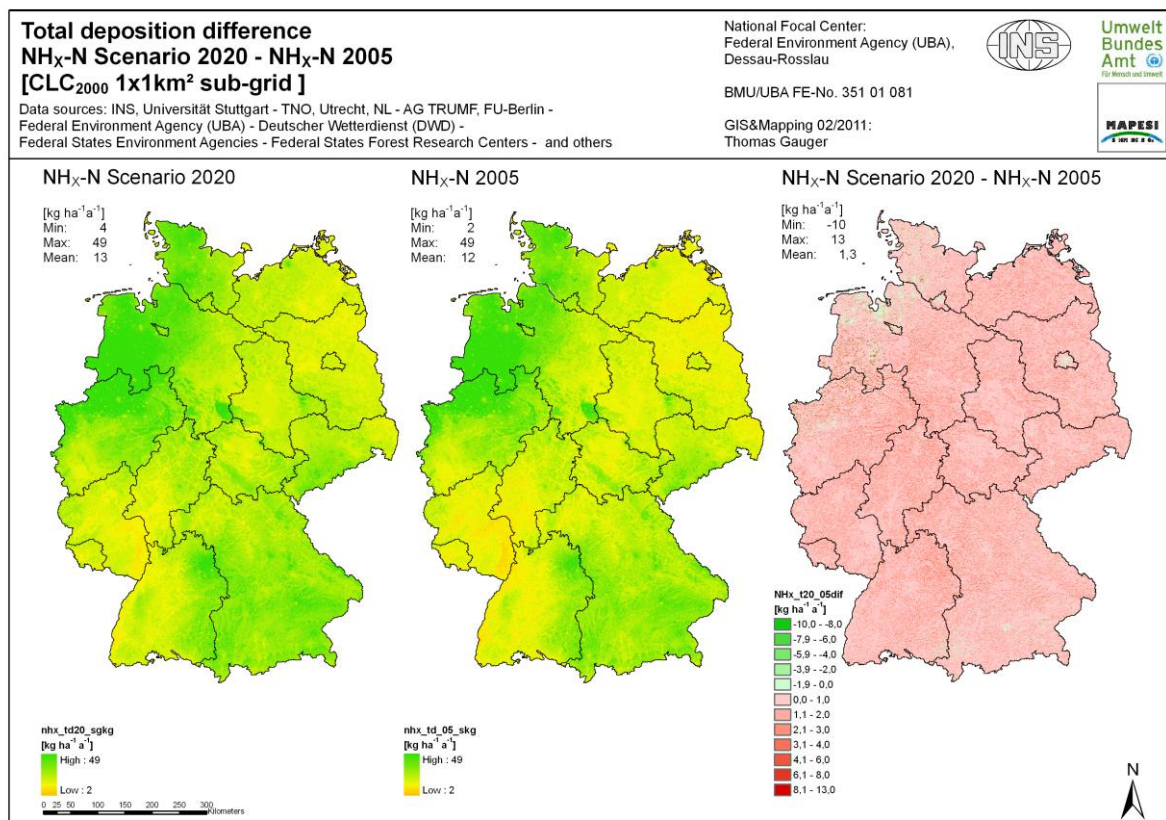
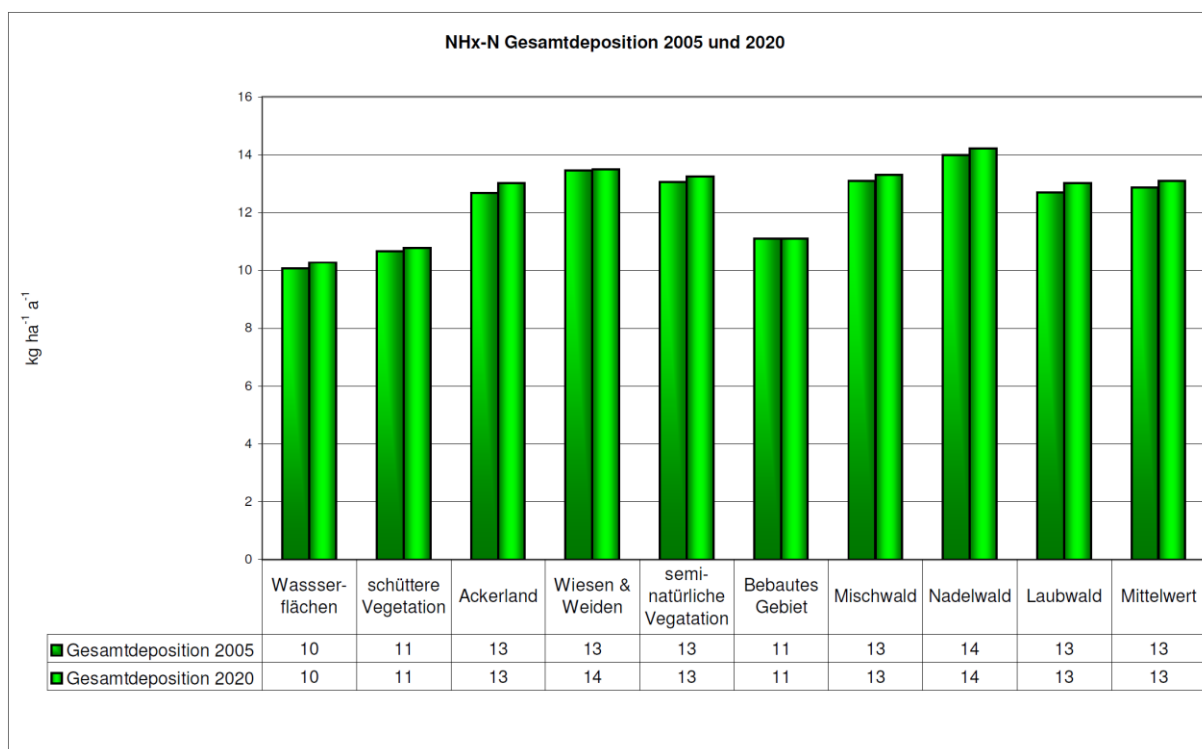
Karte 10: Vergleich der NO_y-N Gesamt-Deposition 2005 und 2020Abbildung 7: Gegenüberstellung der NO_y-N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

3.3 *Deposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) 2005 und 2020*

Die Kartierungsergebnisse der Gesamtdeposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 11 von links nach rechts abgebildet. Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen überwiegend in Erhöhungen des Gesamteintrags von reduziertem Stickstoff (rot in Karte 11, rechts). Nur wenige kleinere Gebiete erhalten nach der Prognose-Berechnung für 2020 geringere NH_x-N Einträge als im Jahr 2005 (grün in Karte 9, rechts). Dies ist etwas deutlicher in einzelnen Gebieten im Hinterland der Niedersächsischen Nordseeküste, in Teilen von Hamburg und Berlin, in zentralen Teilbereichen des Ruhrgebietes und in München zu erkennen.

Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer Zunahme um etwa $+1,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} NH_x-N$ und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu $-10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ reduziertem Stickstoff (NH_x-N).

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von reduziertem Stickstoff (NH_x-N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 8 dargestellt. Der prognostizierte Anstieg der NH_x-N -Gesamteinträge um rund $+2\%$ im Mittel für Deutschland ist sehr gering, wodurch sich die Änderungen der Mittelwerte je Landnutzungsklasse nur im Nachkommastellenbereich der dargestellten $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bewegen und die Säulen im Prognose-Jahr 2020 gleich hoch oder nur geringfügig größer sind als die der Berechnung für das Jahr 2005.

Karte 11: Vergleich der NH_x-N Gesamt-Deposition 2005 und 2020Abbildung 8: Gegenüberstellung der NH_x-N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

3.4 Deposition von Gesamt-Stickstoff (N) 2005 und 2020

Die Kartierungsergebnisse der Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff ($N = NH_4-N + NO_3-N$) für das Prognose-Jahr 2020, im Jahr 2005 und die Differenzen zwischen diesen beiden Jahren sind in Karte 12 von links nach rechts abgebildet.

Die Änderungen zwischen beiden Berechnungsergebnissen bestehen sowohl in Erhöhungen als auch in Minderungen des Gesamteintrags von Gesamt-Stickstoff (rot und grün in Karte 11, rechts). Hierbei überlagern sich die prognostizierten Entwicklungen für NO_3-N und NH_4-N .

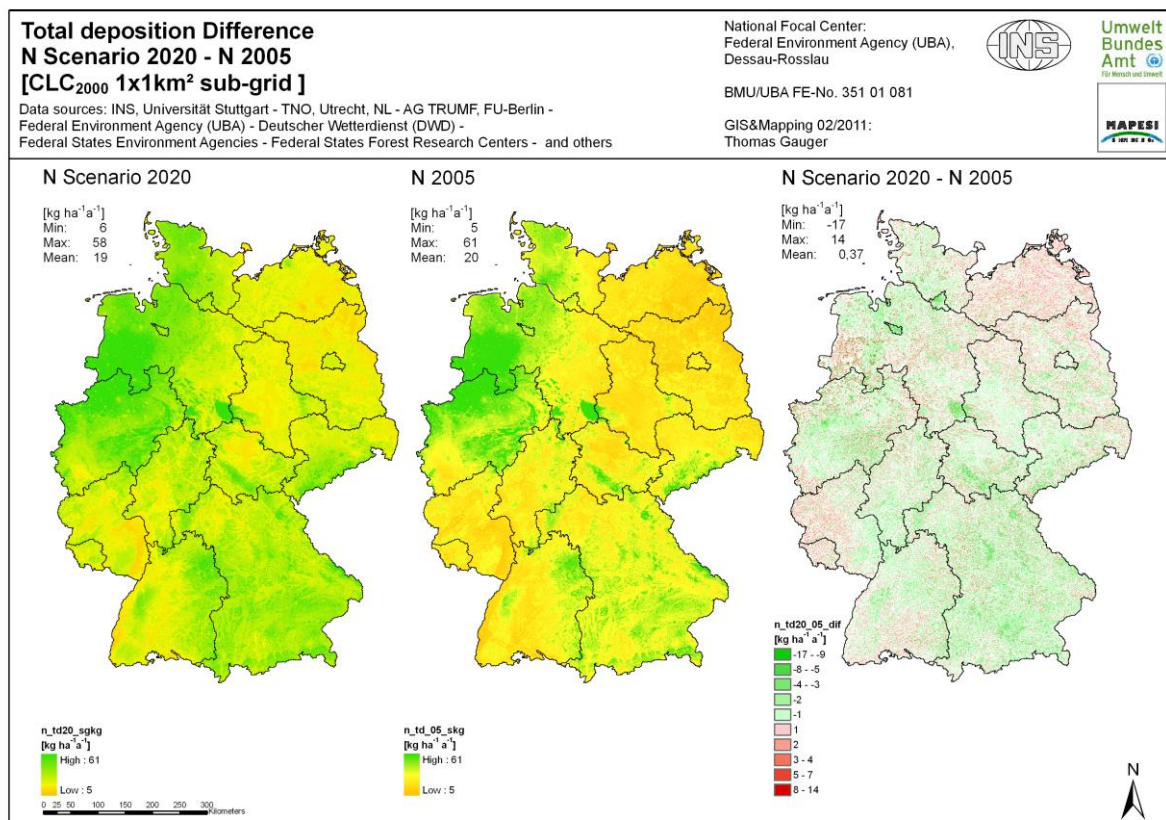
Nach der Prognose-Berechnung für 2020 erhalten einerseits Gebiete im Nordosten, Südwesten und Süden Deutschlands, die im Jahr 2005 durch relativ niedrige Stickstoff-Gesamtdepositionsfrachten gekennzeichnet sind, höhere N-Einträge im Jahr 2020 (rot in Karte 9, rechts), andererseits erhöhen sich die N-Einträge im Prognose-Jahr 2020 auch im bereits hoch belasteten Nordwesten Deutschlands (West-Niedersachsen und Münsterland).

Geringe N Einträge als im Jahr 2005 (grün in Karte 9, rechts) sind in Gebieten zu beobachten, die durch höhere Anteile der Nassdepositionsfrachten einerseits (z.B. in Hochlagen der Mittelgebirge: Harz, Schwarzwald, Thüringer Wald, Fichtelgebirge) und/oder durch höhere Anteile von oxidiertem Stickstoff (NO_3-N) an der N-Gesamtdeposition andererseits gekennzeichnet sind (z.B. in städtischen Agglomerationsräumen).

Die Änderungen zwischen dem Prognose-Jahr 2020 und dem Jahr 2005 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer leichten Abnahme um knapp $-0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ N}$ und bestehen im Einzelnen in einer Spanne von Minderungen bis zu $-17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Erhöhungen des Jahreseintrags bis zu $14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Stickstoff (N).

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 9 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der N-Gesamteinträge um knapp -7% im Mittel für Deutschland ist bei jeder Landnutzungsklasse deutlich sichtbar.

Die Gegenüberstellung der mittleren Gesamtdeposition von Gesamt-Stickstoff (N) im Jahr 2005 und im Prognose-Jahr 2020 nach den 9 Landnutzungsklassen der flächendeckenden Kartierung ist im Säulendiagramm der Abbildung 9 dargestellt. Der prognostizierte Rückgang der N-Gesamteinträge um im Mittel für Deutschland ca. -7% ist gering, d.h. die Minderungen der Mittelwerte je Landnutzungsklasse bewegen sich hier nur im Bereich von unter 1 bis $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bewegen.



Karte 12: Vergleich der N Gesamt-Deposition 2005 und 2020

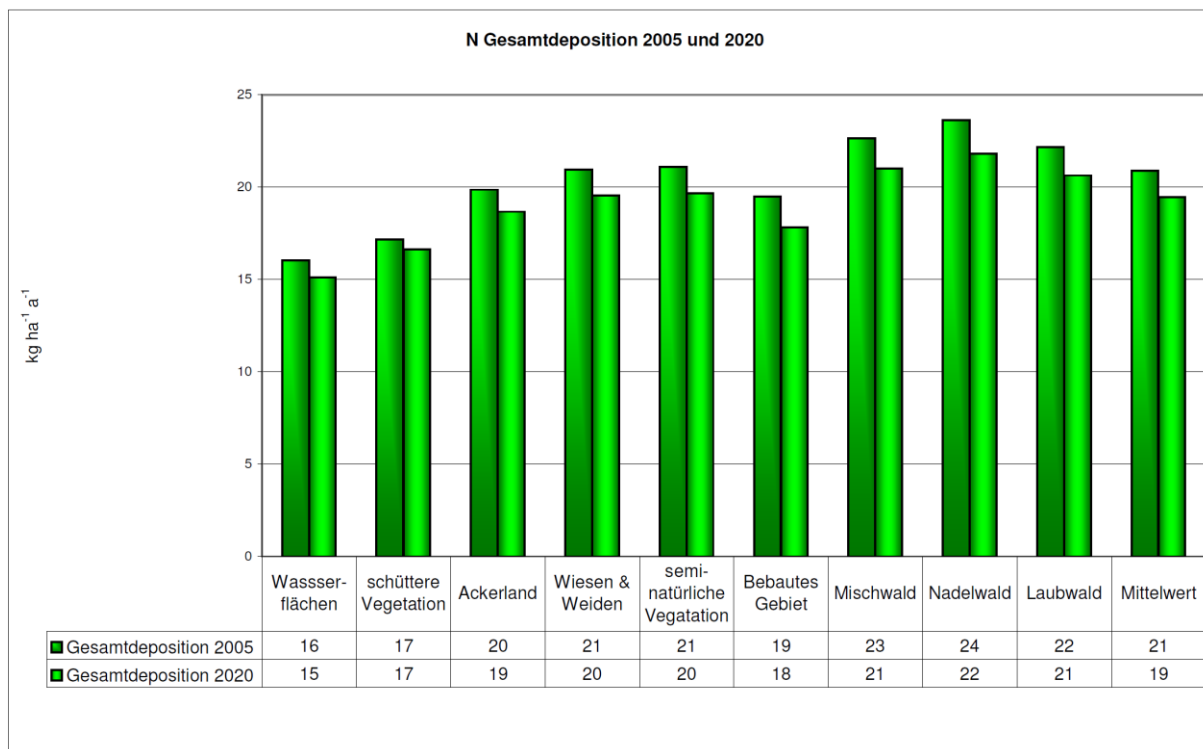


Abbildung 9: Gegenüberstellung der N Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wird die Gesamt-Deposition der anthropogen emittierten oxidierten Schwefelverbindungen (SO_x-S_{nss}), oxidierten Stickstoffverbindungen (NO_x-N) und reduzierten Stickstoffverbindungen (NH_x-N) auf der Datenbasis der Emissionsprognose des BMU/UBA Projektes „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“ (PArtikel REduktions STRategien, PAREST, BMU/UBA FE-Nr. 206 43 200/01) für das Prognose-Jahr 2020 ermittelt. Diese Emissionsprognosen, im PAREST-Projekt als Referenzszenario 2020 bezeichnet, sind Grundlage der Berechnungen mit dem LOTOS-EUROS Modell, das auf der Basis von Meteorologie-Daten des Jahres 2005 Ergebnisse für Trocken- und Nass-Depositionsflüsse im Prognose-Jahr 2020 liefert.

Die Datenaufbereitung und Bereitstellung der Gesamt-Deposition für das Prognose-Jahr 2020 erfolgt in methodischer Analogie zum abgeschlossenen BMU/UBA Forschungsvorhaben FE-Nr 3707 64 200 „Erfassung, Prognose und Bewertung von Schadstoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland“ („Modelling of Air Pollutants and Ecosystem Impact – MAPESI“). Dazu sind umfangreiche Bearbeitungsschritte nötig zur geometrisch einheitlichen, hoch aufgelösten Berechnung der Flüsse von Nass-, Trocken- und Feucht-Deposition im $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster, die zur Gesamt-Deposition addiert werden.

Die flächenhafte GIS basierte Modellierung der Nass-Deposition beruht im methodischen Standard-Ansatz der Depositionskartierung in Deutschland (vgl. Gauger et al. 2008, Gauger 2011a) auf Messungen in den Routine-Messnetzen des Depositionsmonitoring der Länder und des Bundes. Auf dieser Datengrundlage kann jedoch ohne weiteres keine Zukunfts-Prognose erfolgen.

Parallel zur Trocken-Deposition berechnet das LOTOS-EUROS Modell in einer vereinfachten Prozess-Simulation der Auswaschung aus der Atmosphäre auch eine Nass-Deposition auf der Basis von Emissionsdaten, Ausbreitungsberechnungen und Daten von Niederschlagsraten. Die Nassdepositionsfrachten dieser Modellberechnung stimmen im Ergebnis jedoch nicht gut mit den vorliegenden Messungen der Nass-Deposition überein, sondern diese unterschätzen i.d.R. deutlich. Die LOTOS-EUROS Prognose der Nass-Deposition in 2020 wird deshalb in einem GIS basierten Verfahren mit dem Ziel einer Anpassung an die aus Monitoring-Daten erzeugten Nass-Depositionsfrachten nachbearbeitet.

Dazu werden die Änderungen zwischen 2005 und 2020 nach den Ergebnissen der LOTOS-EUROS Berechnung auf die flächenhaften Karten der Nass-Depositionsfrachten im $1 \times 1 \text{ km}^2$ des Basis-Jahres 2005 als Verhältnisse übertragen (s. Kapitel 1.1 „Zeitliche Skalierung für Datensätze der Nass-Deposition 2020“).

Die Berechnung der Feucht-Deposition basiert auf dem Methodischen Ansatz von BLEEKER ET AL. (2000). Dazu werden die im GIS räumlich hoch aufgelösten und zeitlich skalierten Daten der Nass-Deposition für das Prognose-Jahr 2020 und die DWD-Niederschlagsdaten des Jahres 2005 verwendet (s. Kapitel 1.2 „Berechnung der Datensätze der zeitlich skalierten Feucht-Deposition 2020“).

Mit dem angewandten Verfahren werden Datensätze für das Prognose-Jahr 2020 erzeugt, die mit den vorhandenen Depositions-Datensätzen vorangegangener Jahre geometrisch übereinstimmen und in erforderlicher hoher räumlicher, auf Ökosystemebene gültiger Auflösung verfügbar sind, um beispielsweise für eine Wirkungsanalyse auch Critical Loads Überschreitungen zu berechnen (siehe NAGEL ET AL. 2011).

Die Änderungen der Gesamtdeposition für Schwefel- und Stickstoffverbindungen zwischen dem Basis-Jahr 2005 und dem Prognose-Jahr 2020 sind nicht groß.

Betrachtet man die Mittelwerte, so weisen die Daten bei der Gesamt-Deposition von **oxidiertem Schwefel aus anthropogenen Quellen (SO_x-S_{nss})** im Jahr 2020 gegenüber dem Jahr 2005 eine mittlere Minderung um ca. 34% aus, was absolut jedoch nur ca. $1,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ entspricht. Die gesamte Spanne aller Änderungen zwischen 2005 und 2020 besteht örtlich in Minderungen des Jahreseintrags um bis zu $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einem erhöhtem Eintrag um bis zu $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1} SO_x-S_{nss}$.

Bei der Gesamt-Deposition von Stickstoff ist bei **oxidiertem Stickstoff (NO_y-N)** für das Jahr 2020 eine mittlere Minderung um etwa 21% gegenüber dem Jahreseintrag in 2005 festzustellen. Die absoluten Änderungen zwischen 2005 und der Prognose für 2020 liegen im deutschlandweiten Mittelwert bei einer Minderung um nur ca. $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, wobei die gesamte Werte-Spanne örtlich zwischen einer Mehrbelastung von $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einer Minderbelastung von bis zu $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegt.

Zunahmen der Gesamt-Deposition sind nach der Prognoseberechnung bei **reduziertem Stickstoff (NH_x-N)** in einer Größenordnung von im Mittel etwa $1,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwischen 2005 und 2020 zu erwarten, die örtlich in der Spanne von Minderungen der Jahresfracht um bis zu $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis zu Erhöhungen um bis zu $13 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auftreten. Im Mittel über Deutschland ist eine Erhöhung des Gesamteintrags von NH_x-N um ca. 2% festzustellen. Die modellierten Jahresfrachten der Gesamt-Deposition von **Gesamt-Stickstoff (N)** weisen im Mittel über Deutschland eine leichte Abnahme von ca. $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zwischen 2005 und 2020 aus. Im Einzelnen setzt sich dieser Mittelwert aus Daten in der Spanne zwischen Minderungen von bis zu $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ einerseits und um bis zu $14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ höheren Jahresfrachten zusammen. Damit mindert sich die Gesamtfracht in der N-Gesamt-Deposition im Vergleich des Jahres 2005 zum Prognose-Jahr 2020 im Mittel um nur etwa 7%.

Bei der gemeinsamen Betrachtung der für 2020 Prognostizierten Schwefel- und Stickstoff-Gesamtdeposition im Vergleich zur Belastungssituation im Basis-Jahr 2005 ist festzustellen, dass der relative Anteil reduzierter Stickstoffverbindungen (NH_x-N) bedeutender wird, hinsichtlich der Wirksamkeit sowohl als eutrophierender Eintrag, als auch hinsichtlich des Eintrags potentieller Säure (Abbildung 10), während Emissions-Minderungen bei Schwefel und oxidiertem Stickstoff fortschreiten.

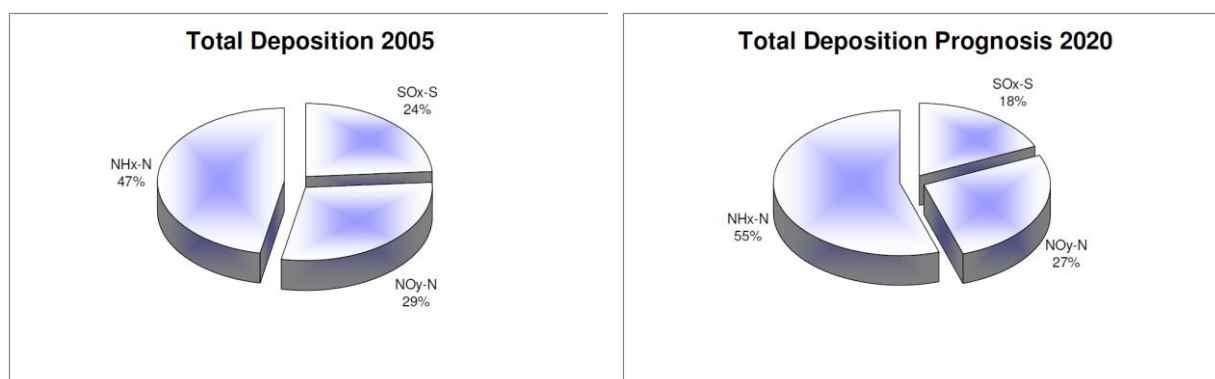


Abbildung 10: Gegenüberstellung der mittleren NH_x-N , NO_y-N und SO_x-S Gesamt-Deposition 2005 mit dem Ergebnis der Prognose 2020 auf Grundlage von (Säure-)Äquivalenten [eq ha⁻¹ a⁻¹]

Literatur

- Bleeker A, Draaijers GPJ, Klap JM, van Jaarsveld JA (2000) Deposition of acidifying compounds and base cations in Germany in the period 1978-1995. RIVM, Bilthoven, NL, Report no. 722108027.
- Gauger Th, Köble R, Smiatek G (1997) Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und –raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Endbericht zum Forschungsvorhaben 106 01 061 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Navigation der Universität Stuttgart. - Teil 1: Deposition Loads. 126 p. - Teil 2: Critical Levels. 75 p. - Teil 3: Informationssystem CANDIS. 27 p.
- Gauger Th, Köble R, Anshelm F (2000) Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald- und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme. Teil 1: Deposition Loads. Teil 2: Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 297 85 079. Institut für Navigation, Universität Stuttgart.
[http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/INS_UBA29785079_1.pdf]
- Gauger Th, Anshelm F, Schuster H, Erisman JW, Vermeulen AT, Draaijers GPJ, Bleeker A, Nagel H-D (2002) Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with Critical Loads and Critical Levels. Final Report on behalf of Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin. BMU/UBA FE-Nr. 299 42 210. [http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/EB_29942210_T1.pdf]
- Gauger Th (2005) Nationale Luftreinhaltestrategie – Umsetzung von EU Anforderungen; Teilvorhaben 02: Aufbereitung, Nutzung und Weiterentwicklung nationaler, hochauflösender Datensätze zu Konzentrationen und Depositionen von Luftschadstoffen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes BMU/UBA 203 43 257/02.
[http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/EB_20343257_02.PDF]
- Gauger Th, Haenel HD, Rösemann C, Dämmgen U, Bleeker A, Erisman JW, Vermeulen AT, Schaap M, Timmermanns RMA, Builtjes PJH, Duyzer JH (2008) National Implementation of the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Effects) / Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen): Part 1: Deposition Loads: Methods, modelling and mapping results, trends. BMU/UBA FE-Nr. 204 63 252. UBA-Texte 38/08 (1). ISSN 1862-4804 . Teil 2: Wirkungen und Risikoabschätzungen: Critical Loads, Biodiversität, Dynamische Modellierung, Critical Levels Überschreitungen, Materialkorrosion. BMU/UBA 204 63 252. UBA-Texte 38/08 (2). ISSN 1862-4804. [<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3646.pdf> & <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3647.pdf>]
- Gauger Th (2011a) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Kartierung von Deposition Loads 2004 bis 2007. Anhang XVI: INS Methodik. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes BMU/UBA 3707 63 200. Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS). (in Druck)
[http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/EB_3707_63_200_INS_Methodik]
- Gauger Th (2011b) Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. Kartierung von Deposition Loads 2004 bis 2007. Anhang XI: Textteil, Karten und Ergebnis-Statistik. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes BMU/UBA 3707 63 200. Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS). (in Druck)
[http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/EB_3707_63_200_Ergebnisse]
- ICP Modelling and Mapping (1996) Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and geographical areas where they are exceeded. UBA-Texte 71/96
[http://www.umweltdaten.de/uid/manual/manual_mapping.pdf]
- ICP Modelling and Mapping (2004) Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and geographical areas where they are exceeded. UBA-Texte 52/ [<http://www.icpmapping.org/>]
- Nagel HD, Schlutow A, Scheuschner T (2011) Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer methoden-konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland – Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren Überschreitungen für eine prognostizierte Deposition im Jahr 2020. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes BMU/UBA FE-Nr. 351 01 081. ÖKO-DATA, Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH, Strausberg.

Abschluss-Bericht der

Teilaufgabe ÖKO-DATA:

Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren Überschreitungen für eine prognostizierte
Deposition im Jahr 2020

UFOPLAN FKZ 351 01 081
Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen
und ihren Wirkungen in Deutschland
- MAPESI –
(Modelling of Air Pollutant and EcoSystem Impact)

Teilaufgabe:

Genfer Luftreinhaltekonvention der UNECE: Erstellung einer methoden-konsistenten Zeitreihe von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland
Berechnung und Kartierung von Critical Loads und deren Überschreitungen für eine prognostizierte Deposition im Jahr 2020

Autoren:
Hans-Dieter Nagel, Angela Schlutow, Thomas Scheuschner

ÖKO-DATA
Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

März 2011

1 Zur umweltpolitischen Einordnung des Projektes

Im Jahr 2010 standen die Ziele wichtiger europäischer umweltpolitischer Vereinbarungen auf dem Prüfstand – die Minderung der Emission von Luftschadstoffen nach dem Multikomponentenprotokoll¹ und die Einhaltung der Emissionsobergrenzen nach der NEC-Richtlinie².

Während die ersten internationalen Luftreinhalteprotokolle für alle Länder einheitliche Minderungsziele festlegten, standen die Protokolle der 2. Generation im Zeichen einer auf die ökologischen Effekte ausgerichteten Zielgebung bei der Verminderung von Schadstoffeinträgen. Bei diesen wirkungsbezogenen Ansätzen wird zunächst die Empfindlichkeit des ausgewählten Schutzgutes gegenüber dem Luftschadstoffeintrag ermittelt. Schutzgüter können ganze Ökosysteme, spezielle Lebensraumtypen oder sensitive Tier- und Pflanzenarten, aber auch Gewässer, Bauwerke oder Materialien sein. Um alle diese Bereiche abzudecken, sind fünf internationale Kooperationsprogramme unter der Genfer Luftreinhaltekonvention eingerichtet worden³.

Die europaweite Kartierung von Critical Loads⁴ und Levels ist heute international als eine fachliche Grundlage für Protokollverhandlungen zur Begrenzung von Schadstoffemissionen

¹ Protokoll to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, in Kraft getreten am 17.05.2005; (Bundesgesetzblatt 2004, Teil II Nr. 21 vom 08.07.2004)

² Richtlinie über nationale Emissionsobergrenzen 2001/81/EG (NEC-Direktive oder NEC-Richtlinie)

³ <http://www.unece.org/env/lrtap/>

⁴ Naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen, die für die Wirkung von Luftschadstoffen auf die Umwelt ermittelt werden

anerkannt. Im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention sind 27 Länder derzeit an dem Kartierungsprogramm beteiligt, in dessen Ergebnis Datensätze und Karten der Empfindlichkeit der ausgewählten Rezeptoren gegenüber von Luftschadstoffen entstehen. Aus dem Vergleich dieser maximal zulässigen Einträge (der Critical Loads) mit den aktuell gemessen oder modellierten Schadstoff-Frachten kann die Einhaltung bzw. Überschreitung der ökologischen Belastungsgrenzen ermittelt werden.

Mit der NEC-Richtlinie sind verbindliche, bis 2010 in den Ländern der EU zu erreichende Emissionshöchstmengen festgelegt worden. Es zeichnet sich ab, dass einige Länder diese Ziele nicht oder nicht vollständig erreichen werden. Deutschland wird voraussichtlich weder bei den oxidierten noch bei den reduzierten Stickstoff-Verbindungen seine Verpflichtungen erfüllen und damit der politisch oft beanspruchten Vorreiterrolle im Umweltschutz nicht gerecht werden. Das kann auch durch die „Übererfüllung“ der Senkungsziele beim Schwefel nicht ausgeglichen werden – was im vorliegenden Bericht fachlich begründet wird.

Für den Zeitraum bis 2020 hat die EU eine „Luftreinhaltestrategie“ vorgelegt, die Festlegungen zur Reduzierung der Gesundheitsbelastung durch Feinstaub und Ozon sowie des Eintrags von Säuren und Nährstoffen in Ökosysteme und Gewässer trifft⁵. In Deutschland fordert die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt bis zum Jahr 2020 alle empfindlichen Ökosysteme vor Versauerung und Eutrophierung zu schützen⁶.

2 Bestimmung und Kartierung der Critical Loads für versauernde und eutrophierende Luftschadstoffe in Deutschland

In Deutschland wurden als Schutzgüter oder ökologische Rezeptoren (die vor akuter bzw. langfristiger Schädigung bewahrt werden sollen) die Wälder und weitere naturnahe waldfreie Ökosysteme ausgewählt. In diesem Rahmen sind auf etwa 30 % der Fläche Deutschlands ökologische Belastungsgrenzen für den Eintrag versauernder Luftschadstoffe (Schwefel- und Stickstoffverbindungen) und für die Eutrophierung durch Stickstoffeinträge aus der Luft bestimmt und kartiert worden (Abbildung 1).

Im Vergleich mit der aktuellen Luftbelastung durch diese Stoffe zeigt sich dann, in welcher Größenordnung und in welchen Regionen Maßnahmen notwendig sind, um auf Dauer stabile Ökosysteme zu erhalten. Die Höhe der jeweils tolerierbaren (weil langfristig unschädlichen) Deposition richtet sich allein nach den Eigenschaften des betrachteten Ökosystems/Rezeptors (ein Ökosystem auf sandigem Boden ist z.B. empfindlicher gegenüber Versauerung als eines mit einem kalkreichen Lehmboden). Die Bestimmung der Critical Loads für wichtige ökologische Rezeptoren in Deutschland ist eine wesentliche Grundlage für die Anwendung des Vorsorgeprinzips im Umweltschutz und zum Schutz der Biodiversität. Methodisch werden hierarchisch verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Critical Loads (Empirische Ansätze, Massenbilanzmethode, dynamische Modelle) unterschieden. Auf allen drei Ebenen werden räumlich differenzierte Critical Loads bestimmt bzw. berechnet, wobei das Ausmaß ihrer Überschreitungen dann die Grundlage für Szenarien zur Verminderung der atmosphärischen Schadstoffbelastung und für die Luftreinhaltepolitik bildet.

⁵ Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft in Europa

⁶ Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt (vom Bundeskabinett am 07.11.2007 beschlossen), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Oktober 2007

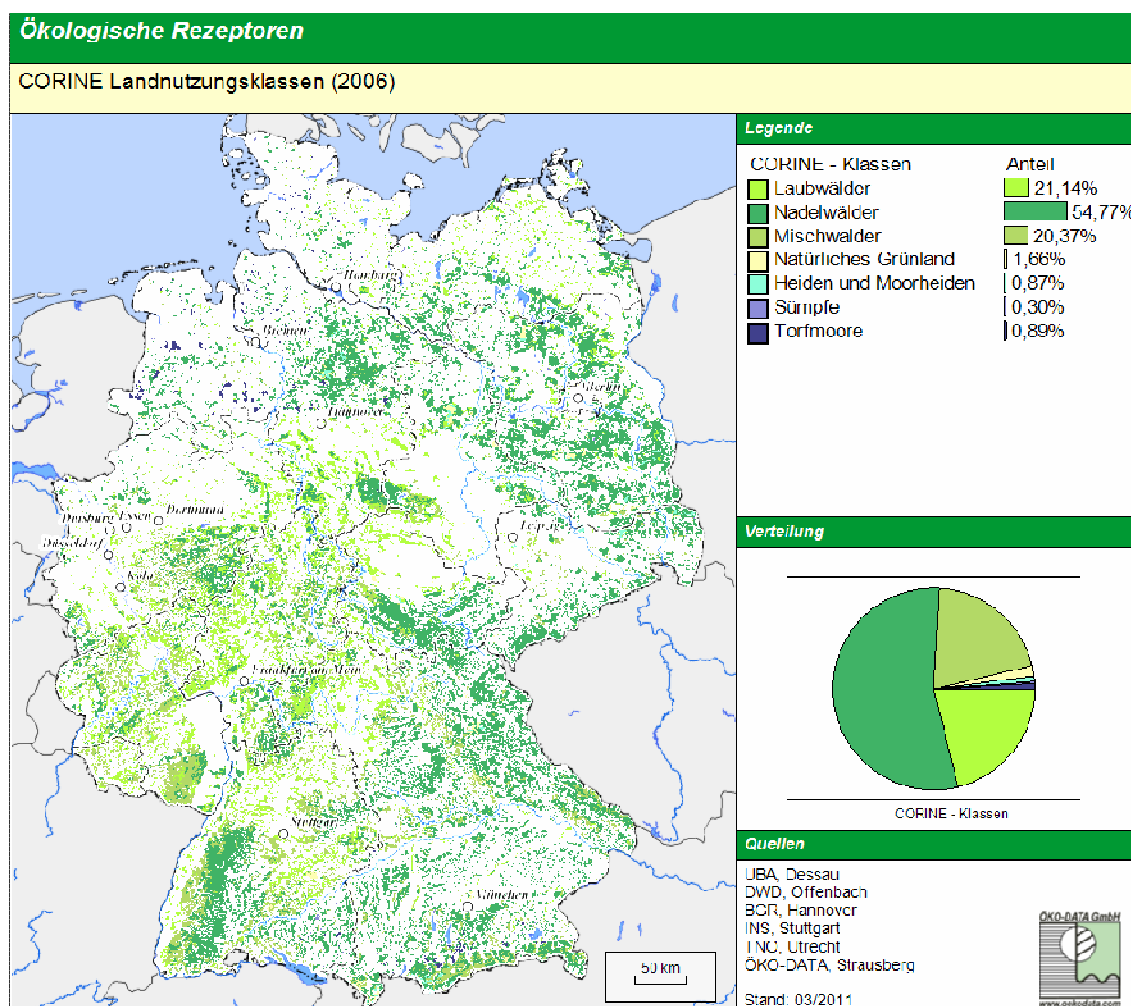


Abbildung 1: Ökologische Rezeptoren für die Berechnung von Critical Loads

2.1 Ermittlung der Critical Loads für Säureeinträge nach der Massenbilanzmethode

Als "Critical Load für Säureeinträge" wird die höchste Deposition von säurebildenden Verbindungen (Schwefel und Stickstoff) verstanden, die langfristig keine schädigenden Effekte in Struktur und Funktion der Ökosysteme infolge chemischer Veränderungen hervorruft. Um beide Luftschadstoffe berücksichtigen zu können, wird die Empfindlichkeit des Ökosystems in Säureäquivalenten angegeben. 1000 Äquivalente pro Hektar und Jahr ($\text{eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) entsprechen dann etwa einem Eintrag von 16 kg Schwefel oder 14 kg Stickstoff. Da ein Teil des Stickstoffeintrags von der Vegetation als Nährstoff aufgenommen werden kann, gilt als Belastungsgrenze für die Säure der Wert für Schwefel, $\text{CL}_{\text{max}}(\text{S})$, der in Abbildung 2 dargestellt wird. Damit wird gewährleistet, dass der Critical Load für beliebige Depositionsbedingungen Gültigkeit hat und somit die genaue Zusammensetzung von versauernden Stoffeinträgen nicht bestimmt werden muss.

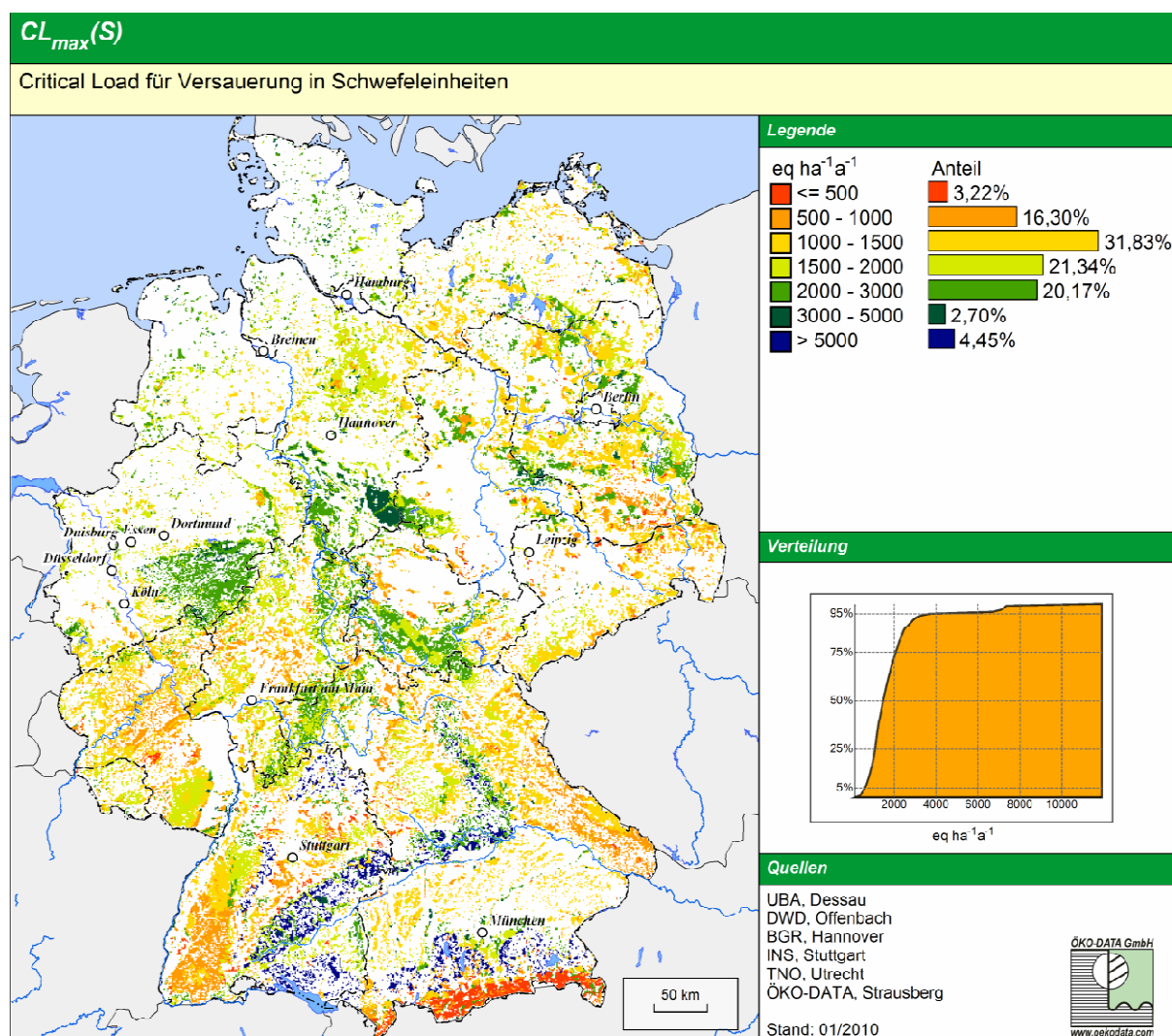


Abbildung 2: Regionale Verteilung der Critical Loads für Säureeinträge in Schwefeleinheiten

Da über 96 % der untersuchten Rezeptorflächen mit Wald bestanden sind, wird überwiegend die regionale Verteilung der **Belastbarkeitsklassen der Wälder** wiedergegeben. Besonders empfindlich für Säureeinträge sind das Rheinische Schiefergebirge, der Bayrische, Oberpfälzer und Frankenwald, Thüringer Wald, Erzgebirge, Sauerland, Südschwarzwald, Ostharz, Steigerwald und Frankenhöhe, weil sie natürlich saure Böden aufweisen, die nur wenig basische Kationen verwittern und daher eine geringe Neutralisationskapazität besitzen. In den Alpen sollen die Kalkbraunerden vor Degradierung geschützt werden. Deshalb ist auch hier eine hohe Empfindlichkeit angesetzt worden.

Im **natürlichen Grünland** sind die Vegetationstypen der (geschützten) Kalktrockenrasen sowie der schutzwürdigen Traubentrespen- und Kalkbinsenrasen gegenüber Säureeinträgen besonders empfindlich (wenn auch deren Böden weniger empfindlich sind). Degradation dieser Standorte infolge Verminderung des Basengehaltes sollte nicht zugelassen werden. Relativ niedrige Critical Loads weisen auch die basenarmen, stark podsolierten Standorte der nordostdeutschen Tiefebene (Land Brandenburg) auf.

Basenreiche Sümpfe (Kalkzwischenmoore bzw. Niedermoore auf Kalkmudde) haben ebenfalls relativ niedrige Belastbarkeitsgrenzen und sind besonders schützenswert.

2.2 Ermittlung der Critical Loads für eutrophierende Stickstoffeinträge nach der Massenbilanzmethode

Stickstoffeinträge wirken nicht nur als Säurebildner sondern liefern auch zusätzliche Nährstoffe ins Ökosystem, wodurch das Nährstoffgleichgewicht gestört wird. Dieser Effekt ist als Eutrophierung bekannt. Die zulässige eutrophierende Stickstoffdeposition kann als die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Stoffein- und -austrägen beschrieben werden. Zeitweilige Abweichungen vom Gleichgewichtszustand werden toleriert, solange das System aus sich heraus regenerationsfähig bleibt (quasistationärer Zustand).

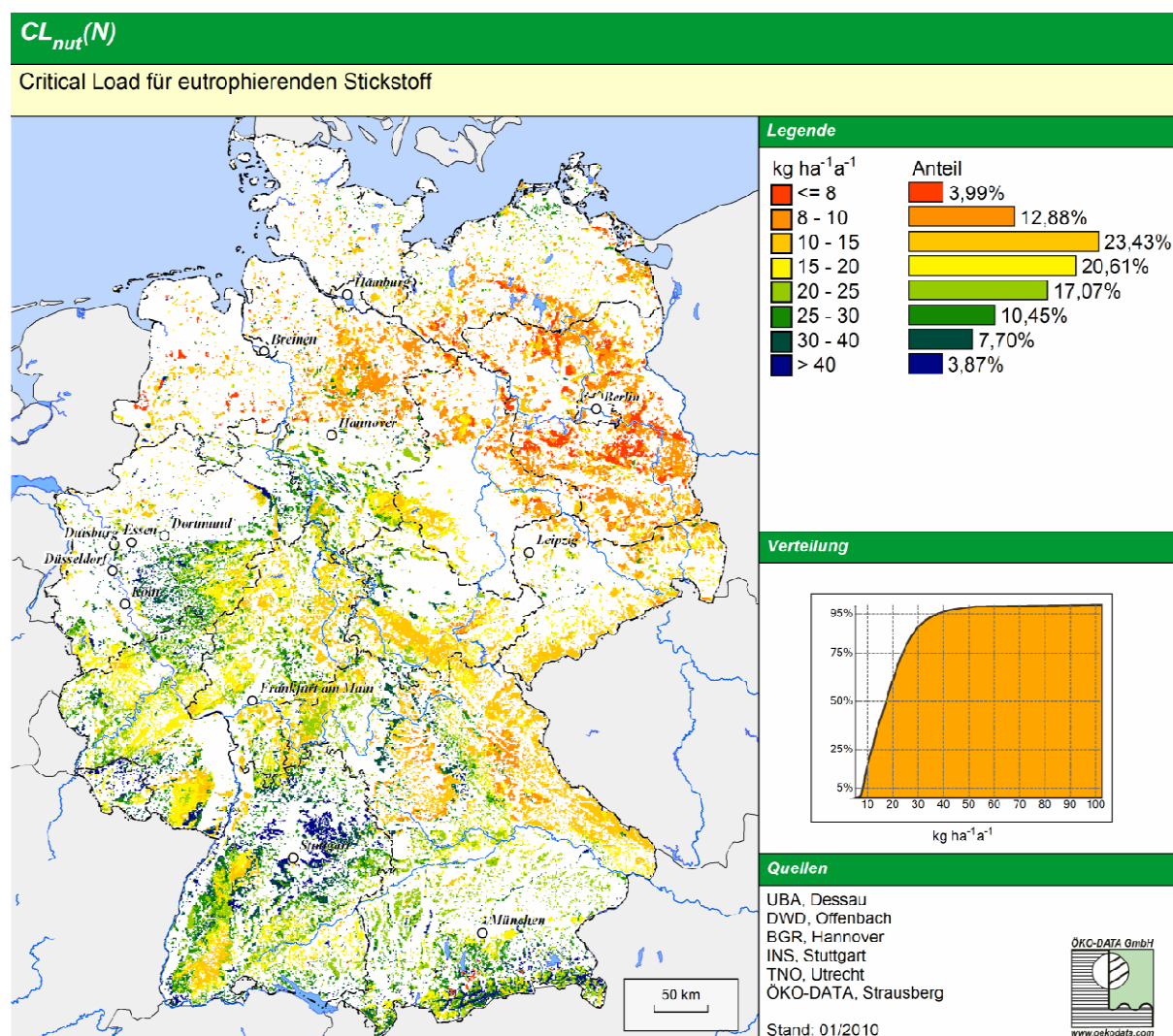


Abbildung 3: Regionale Verteilung der Critical Loads für eutrophierende Stickstoffeinträge

Die nach der Massenbilanz ermittelten Critical Load für eutrophierenden Stickstoff, $CL_{nut}(N)$, schließen auch den Bereich der empirischen Critical Loads⁷ ein, sind jedoch sehr viel differenzierter und überdecken einen größeren Wertebereich (Abbildung 3).

⁷ Empirische Critical Loads werden aus Literaturdaten abgeleitet und geben für verschiedene Ökosysteme Wertespans eines zulässigen Stickstoffeintrags an, in der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Immissionsschutz (LAI) wurden die internationalen Empfehlungen an Gegebenheiten in Deutschland angepasst, siehe auch http://www.lanuv.nrw.de/landwirtschaft/zulassung/pdf/LAI_N-Leitfaden_03.03.10_Langfassung.pdf

Da die **Rezeptorflächen** überwiegend durch **Wälder** repräsentiert werden, ist deren Verbreitung ausschlaggebend für die regionale Verteilung der ermittelten Critical Loads.

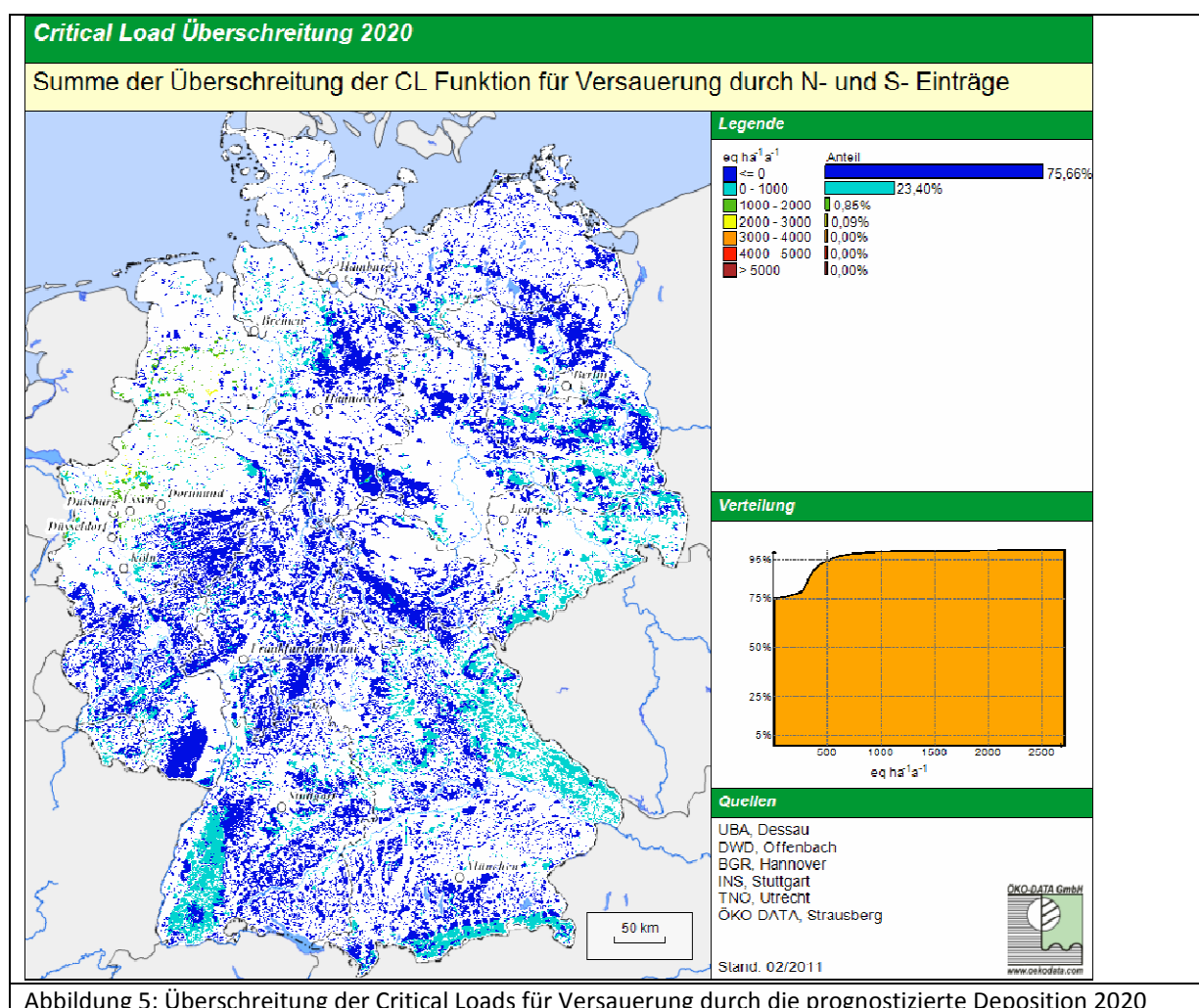
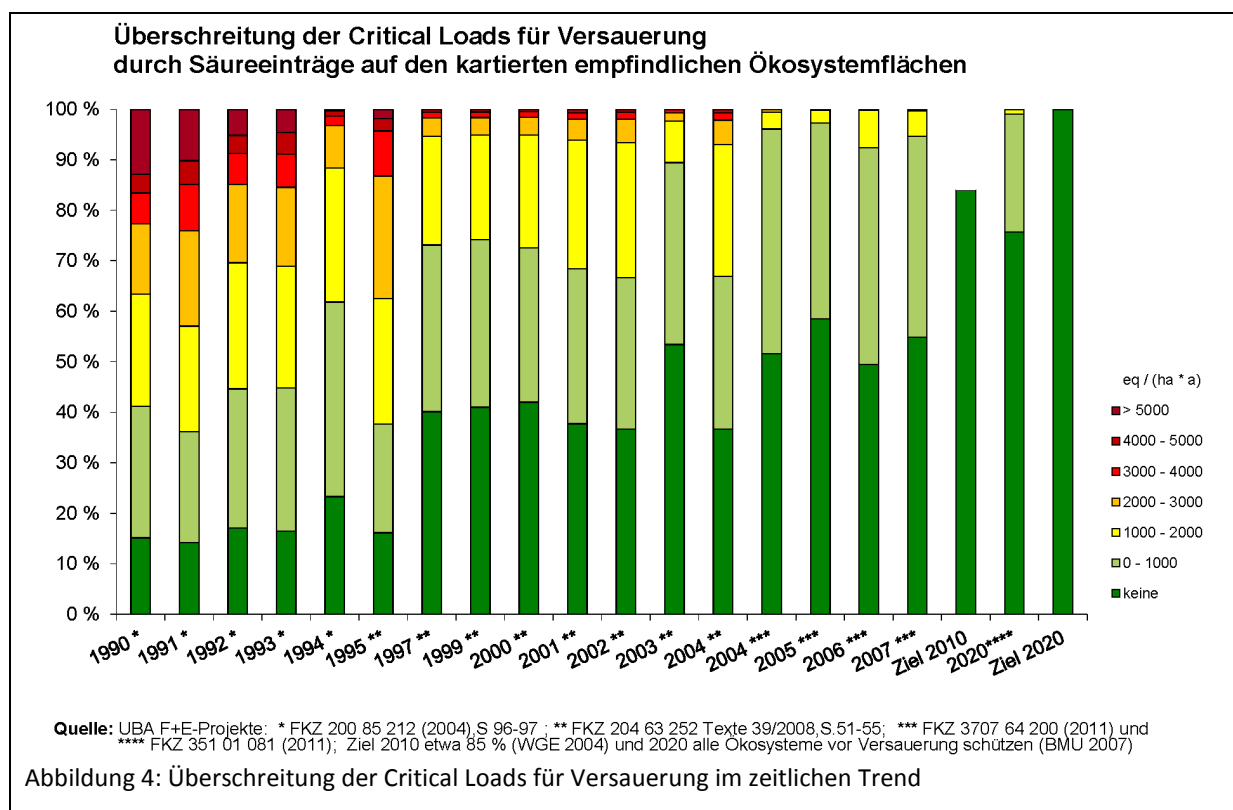
Die niedrigsten Belastbarkeitsgrenzen (und damit die höchste Empfindlichkeit gegenüber anthropogenen N-Einträgen) liegen auf den trockenen Sanderflächen am Rande des Spreeurstromtals, des Baruther Urstromtals, der Dahmeseenkette und in der Prignitz, was eine Folge der hier sehr niedrigen Sorptionsfähigkeit (Immobilisierungsrate) der sauren Podsole und Podsolbraunerden ist. Infolge der relativ geringen Produktivität der nährstoffarmen Böden in der subkontinentalen trockenen Klimazone ist der Entzug von Stickstoffverbindungen mit der Holzernte ebenfalls nur gering: Ein Band sehr empfindlicher Standorte erstreckt sich über die gesamte norddeutsche Tiefebene (von der Niederlausitz, Dübener Heide, Barnim, Fläming, Havelland, Prignitz, Altmark bis zur Lüneburger Heide).

Von den **waldfreien Rezeptorflächen** sind die empfindlichen **Grünlandstandorte** (Critical Loads $5 - 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) auf grundwasserfernen armen Sand- und Eisenpodsolböden im norddeutschen Flachland (Brandenburg, Colbitz-Letzlinger Heide, Lüneburger Heide, Münsterland) zu nennen. Empfindlich gegen N-Einträge sind auch alle **Heiden und Moorheiden**, da sie nur auf Böden vorkommen, die im natürlichen Zustand sauer bis subneutral und nährstoffarm bis mäßig nährstoffversorgt sind. **Torfmoore** sind immer empfindliche Ökosysteme mit niedrigen Critical Loads für eutrophierende N-Einträge, so die großflächigen Torfmoore im Nordwesten von Niedersachsen (Ostfriesland, Emsland, Bourtanger Moor).

3 Überschreitung der Critical Loads durch Depositionen

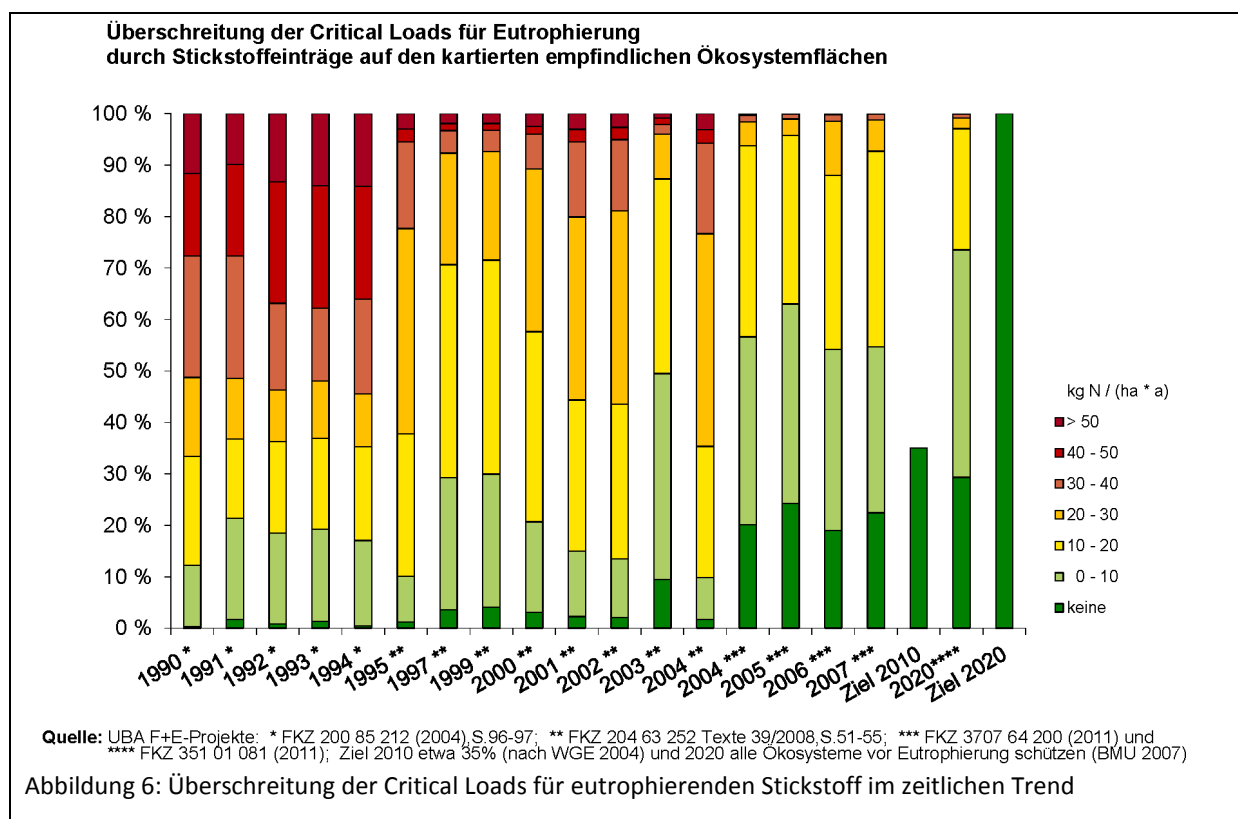
3.1 Überschreitung der Critical Loads für versauernde Einträge durch Deposition von Schwefel- und Stickstoffeinträgen

Die Gefährdung der naturnahen Ökosysteme in Deutschland durch Versauerung ist zurückgegangen, insbesondere im Ergebnis der Reduktion der Schwefelemissionen im Zeitraum von 1990 und 2000. Bis zum Jahr 2010 sollte die Gefährdung der Ökosysteme durch einen zu hohen Eintrag von Luftschadstoffen europaweit (EU 27) auf etwa 85 % der Rezeptorflächen ausgeschlossen werden. Von dieser Zielstellung ist Deutschland noch erheblich entfernt und zählt im europäischen Vergleich weiterhin zu den Ländern mit einem relativ hohen Anteil an Flächen, die einem Versauerungsrisiko unterliegen. Extrem hohe Überschreitungen, wie sie noch zu Beginn der 90er Jahre zu verzeichnen waren, gibt es jedoch nicht mehr. Über die Hälfte der Ökosysteme sind keinem Versauerungsrisiko mehr ausgesetzt (siehe Abbildung 4). Seit geraumer Zeit stagniert dieser positive Trend jedoch. Dabei ist nach der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt für das Jahr 2020 die Zielstellung formuliert, alle empfindlichen Ökosysteme vor Versauerung zu schützen (BMU 2007). Da jedoch nach bisherigen Prognosen im Jahr 2020 noch kein ausreichender Schutz für die Ökosysteme erreicht wird (siehe Abbildung 5), sind weitere Maßnahmen zur Luftreinhaltung dringend geboten. Zudem stellte sich die Frage, ob und wann geschädigte Ökosysteme sich von den extremen Belastungen der Vergangenheit erholen. Antworten hierzu lassen sich nur durch Anwendung dynamischer Modelle gewinnen.



3.2 Überschreitung der Critical Loads für eutrophierende Einträge durch die Deposition von Stickstoffverbindungen

Im Jahr 2007 war nur etwas mehr als ein Fünftel der untersuchten Ökosysteme keiner Gefährdung durch Eutrophierung ausgesetzt (Abbildung 6). Insgesamt ist jedoch über die letzten Jahrzehnte – ebenso wie bei der Versauerung – eine deutliche Abnahme der Belastungsintensität zu verzeichnen.



Extrem überbelastete Ökosysteme mit $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und mehr über dem Critical Load machten 2007 nur 7 % aus, im Jahr 1990 waren es noch 67 %. Allerdings verlangt die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt (BMU 2007), mit der die internationale Konvention zum Schutz der Biodiversität (CBD) für Deutschland umgesetzt wird, dass bis 2020 alle Ökosysteme vor weiterer Eutrophierung zu bewahren sind. Dieses Ziel wird nach der bisher vorliegenden Depositionsprognose nicht erreicht (Abbildung 7).

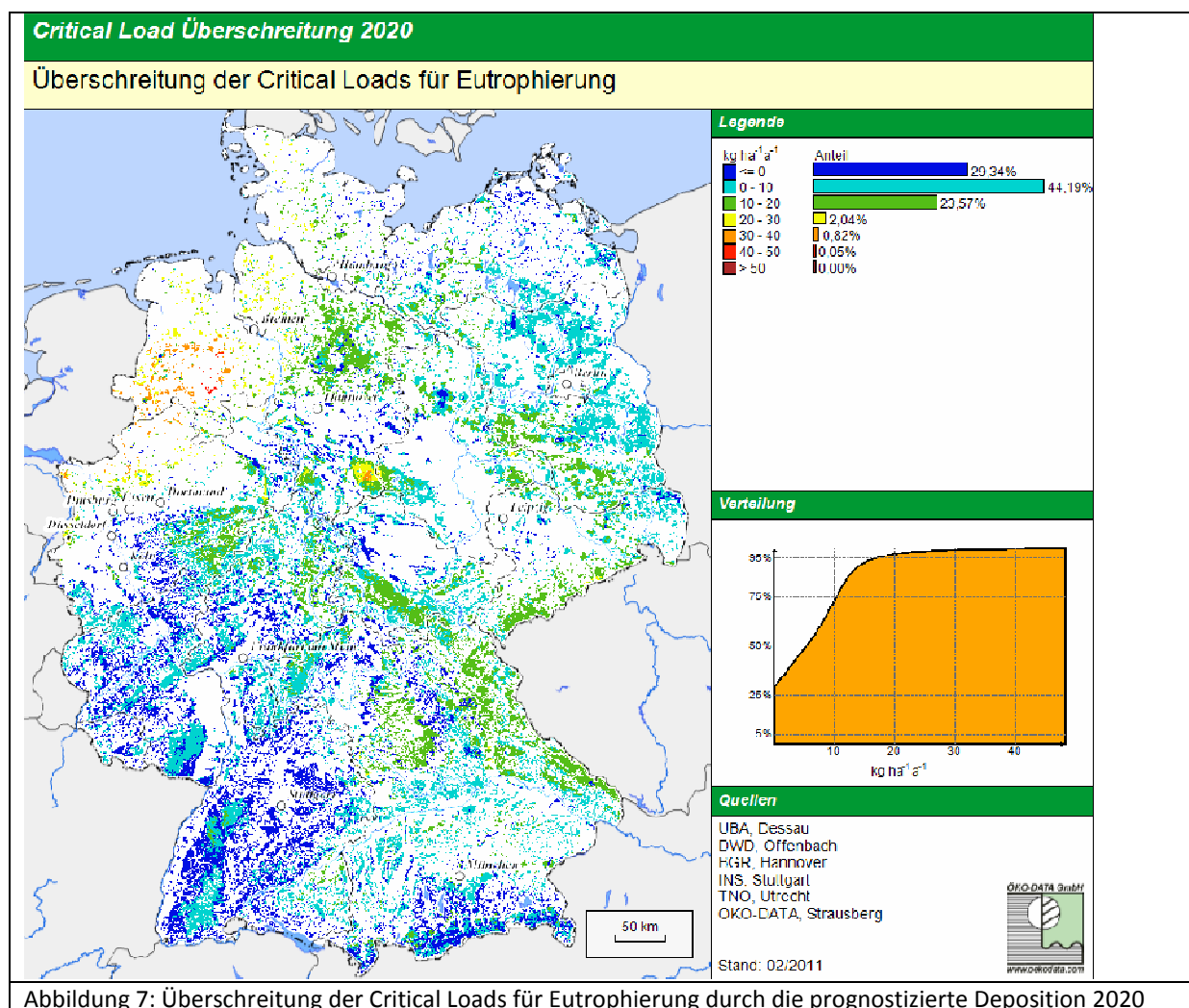
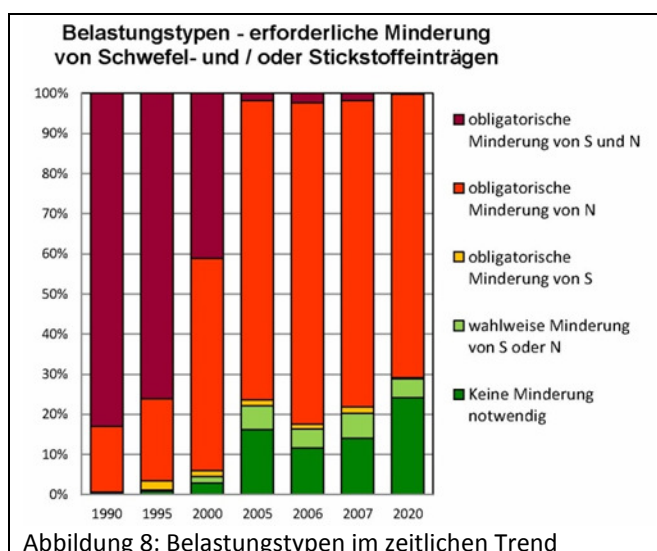


Abbildung 7: Überschreitung der Critical Loads für Eutrophierung durch die prognostizierte Deposition 2020

Um die versauernd wirkenden Einträge von Schwefel- und Stickstoff-Verbindungen und der Eutrophierungswirkung des Stickstoffs im Zusammenhang zu bewerten, wurden Critical-Load-Funktionen mit 5 Belastungstypen genutzt, die sich durch die unterschiedliche Kombination der Überschreitungsfaktoren und deren Höhe unterscheiden. Ihre Ergebnisse ermöglichen die Ableitung notwendiger Maßnahmen zur Senkung des Schadstoffeintrags (Abbildung 8).

Ergebnis aus den Belastungstypen für Deutschland im Jahr 2007 ist, dass bei 76 % der untersuchten Ökosysteme als vordringliche Maßnahme die Minderung des Stickstoffeintrags zwingend erforderlich ist. 1990 ergab eine gleiche Analyse noch, dass auf 83% der Flächen sowohl Schwefel als auch Stickstoff zu reduzieren waren, 2007 trifft das nur noch auf unter 2 % der Rezeptoren zu. Damit wird der Wandel vom schwefelgeprägten Eintragstyp zum Stickstoff als Hauptbelastungsfaktor nochmals eindeutig belegt.



4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Gefährdung der Böden in Deutschland durch Versauerung ist zurückgegangen, insbesondere im Ergebnis der Reduktion von Schwefelemissionen. Im europäischen Vergleich zählt Deutschland jedoch weiterhin zu den Ländern mit einem relativ hohen Anteil an Flächen, die einem Versauerungsrisiko unterliegen. Auch 2007 wurden noch die Belastungsgrenzwerte für den versauernden Eintrag auf 40% der Rezeptorflächen überschritten, dabei auf 5% erheblich mit mehr als $1000 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Da die Möglichkeiten zur Minderung von Schwefeleinträgen nahezu ausgeschöpft sind, ist ein weiterer Fortschritt beim Schutz der Ökosysteme vor allem durch Maßnahmen zur Senkung der Stickstoffeinträge zu erreichen, die in Deutschland ebenso wie in Europa insgesamt nach wie vor auf zu hohem Niveau sind und zu einer Schädigung von empfindlichen Ökosystemen in Form von Versauerung und Eutrophierung führen.

Die wichtigsten Quellen für die Emission von Stickstoff-Verbindungen sind der Straßenverkehr (Stickoxide) und die Landwirtschaft (Ammoniak), wie das Statistische Bundesamt im Indikatorenbericht 2010 zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland belegt. Die mit dem erhöhten Eintrag von Stickstoff verbundenen Risiken sind heute viel weiter verbreitet als das Risiko einer weiteren Versauerung durch Schwefeleinträge.

Bei einem durchschnittlichen Gesamt-N-Eintrag von $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei Waldökosystemen von $24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Spannweite $6 - 62 \text{ kg N kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) werden die gesteckten Ziele zum Schutz der Ökosysteme nicht erreicht werden. Erst auf 55 % der sensiblen Flächen war 2007 die Versauerung gestoppt, bis zum Jahr 2020 könnten es nach bisherigen Prognosen 75 % sein. Nach der „Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt“ sollten bis 2020 jedoch alle empfindlichen Biotop vor Versauerung geschützt sein.

Die geringen Fortschritte bei der Verminderung von Stickstoffbelastungen in den letzten Jahren sind besonders kritisch zu sehen. Nur 22,5% der betrachteten sensiblen Ökosysteme waren 2007 vor Eutrophierung geschützt und für 2020 werden etwa 30 % erwartet, also nicht einmal ein Drittel der Zielstellung erreicht. 45% der Rezeptoren erhalten 2007 mehr als $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 7% sogar $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ über dem Critical Load-Wert. Nach der „Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt“ sollten bis 2020 jedoch alle empfindlichen Biotop vor Versauerung geschützt sein.

Bei Berechnung mit der Critical Load-Funktion, die beide Schädwirkungen berücksichtigt, ergibt sich aus dem Vergleich mit der aktuellen Deposition (2007), dass auf mehr als drei Vierteln (76,2%) aller Rezeptorflächen eine Reduzierung der N-Einträge zwingend erforderlich ist. 1990 ergab eine gleiche Analyse noch, dass auf 83% der Flächen sowohl Schwefel als auch Stickstoff zu reduzieren waren, 2007 trifft das nur noch auf unter 2 % der Rezeptoren zu. Damit wird der Wandel vom schwefelgeprägten Eintragstyp zum Stickstoff als Hauptbelastungsfaktor eindeutig belegt. Eine Verminderung der Stickstoffbelastung gehört deshalb ins Zentrum der Maßnahmen zur Luftreinhaltung

Die summarische Darstellung der Schadstoffbelastung der Luft (ausgewiesen als Indikator 13 im Indikatorenbericht des Statistischen Bundesamtes „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland“) sollte daher aufgegeben werden. Zur öffentlichkeitswirksameren Darstellung insbesondere der seit 20 Jahren stagnierenden Ammoniakemissionen und bei der anstehenden Überarbeitung der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie wird eine separate Ausweisung von Stickstoff, Schwefel und NMVOC vorgeschlagen, für die auch getrennte Ziele und gesonderte Indikatoren für das Monitoring vorgegeben werden.

Bei den umweltpolitischen Zielvorgaben für die Luftreinhaltung in den nächsten Jahrzehnten ist zu berücksichtigen, dass allein „technische“ Maßnahmen nicht ausreichen werden. Nur durch veränderte Weichenstellungen zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise, so unter anderem durch einen höheren Anteil ökologischer Landwirtschaft ohne den Einsatz mineralischer N-Dünger, durch die Reduzierung des Straßengüterverkehrs (im Verhältnis zur Warenproduktion) im Ergebnis des Ausbaus regionaler Wirtschaftskreisläufe, durch eine gesündere Lebensweise mit weniger Fleischkonsum (und damit weniger Ammoniakemissionen), können die N-Einträge weiter gesenkt und damit der Schutz der Ökosysteme und der Biodiversität langfristig gesichert und eine dauerhaft stabile Lebensgrundlage für die Gesellschaft erhalten werden.