Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

2. Sitzung des Begleit-Arbeitskreises des Kooperationsprojektes GROWA+ NRW 2027
Duisburg, 13.12.2023

Entwicklung der atmosphärischen Stickstoffdeposition – PINETI-4 Projekt

Dr. Alexander Moravek

Fachgebiet II 4.3
„Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme“
Umweltbundesamt

Naturwissenschaftliche Motivation zur Erhebung der Stickstoffdeposition

- **Stickstoffdeposition trägt zur Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen bei**
- **Stickstoffdeposition gefährdet Biodiversität**

[1] Heiden auf sandigen Böden (Calluna-Heiden)
Foto ©: Maren Meyer-Grünefeldt

[2] Halbtrockenrasen auf karbonatischem Untergrund
Foto ©: Bundesamt für Naturschutz

[3] Birken-Eichenwald feuchter bis frischer Standorte
Foto ©: Fabian Wankmüller

[4] Sandtrockenrasen
Foto ©: Robin Schmidt

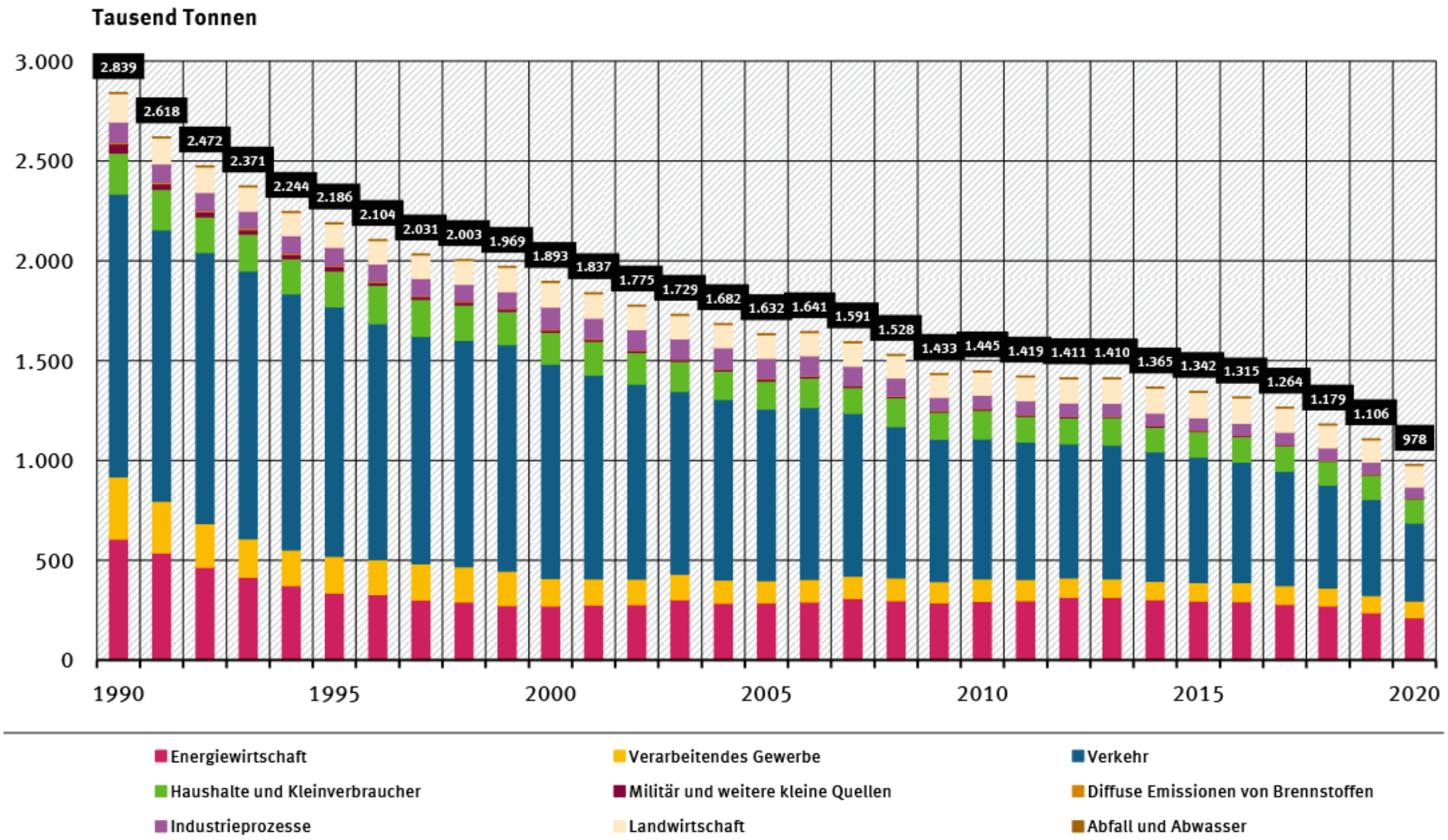
Umweltkosten durch die Emission von Stickstoff (N) in die Luft

Verlust der Biodiversität:

- NO_x - Emissionen → 9,1 € / kg-N
- NH_3 - Emissionen → 13,4 € / kg-N

Quelle: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Umweltbundesamt, 2020

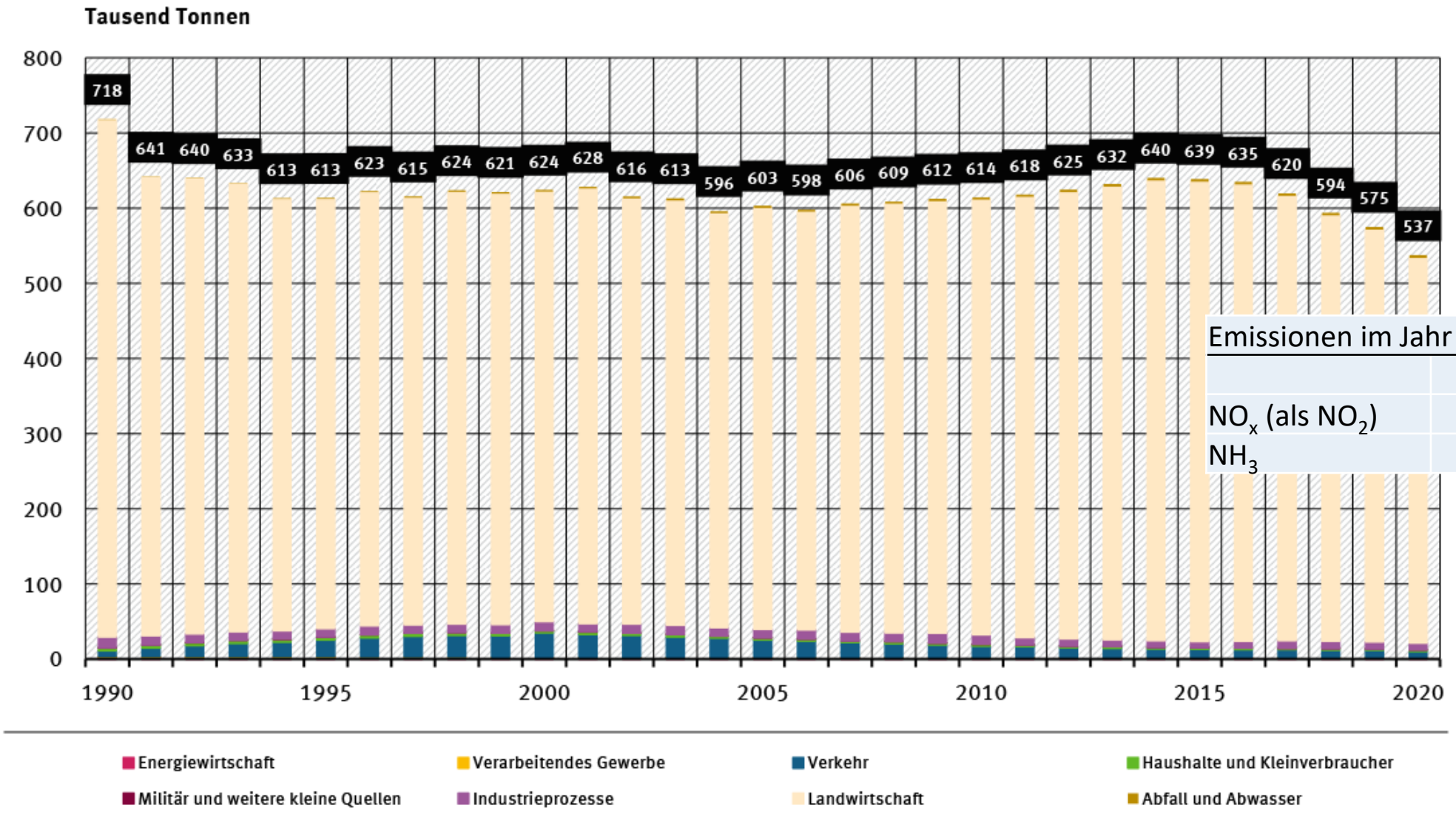
Stickstoffoxid (NO_x, gerechnet als NO_2) -Emissionen nach Quellkategorien



Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2020 (Stand 02/2022)

Ammoniak-Emissionen nach Quellkategorien

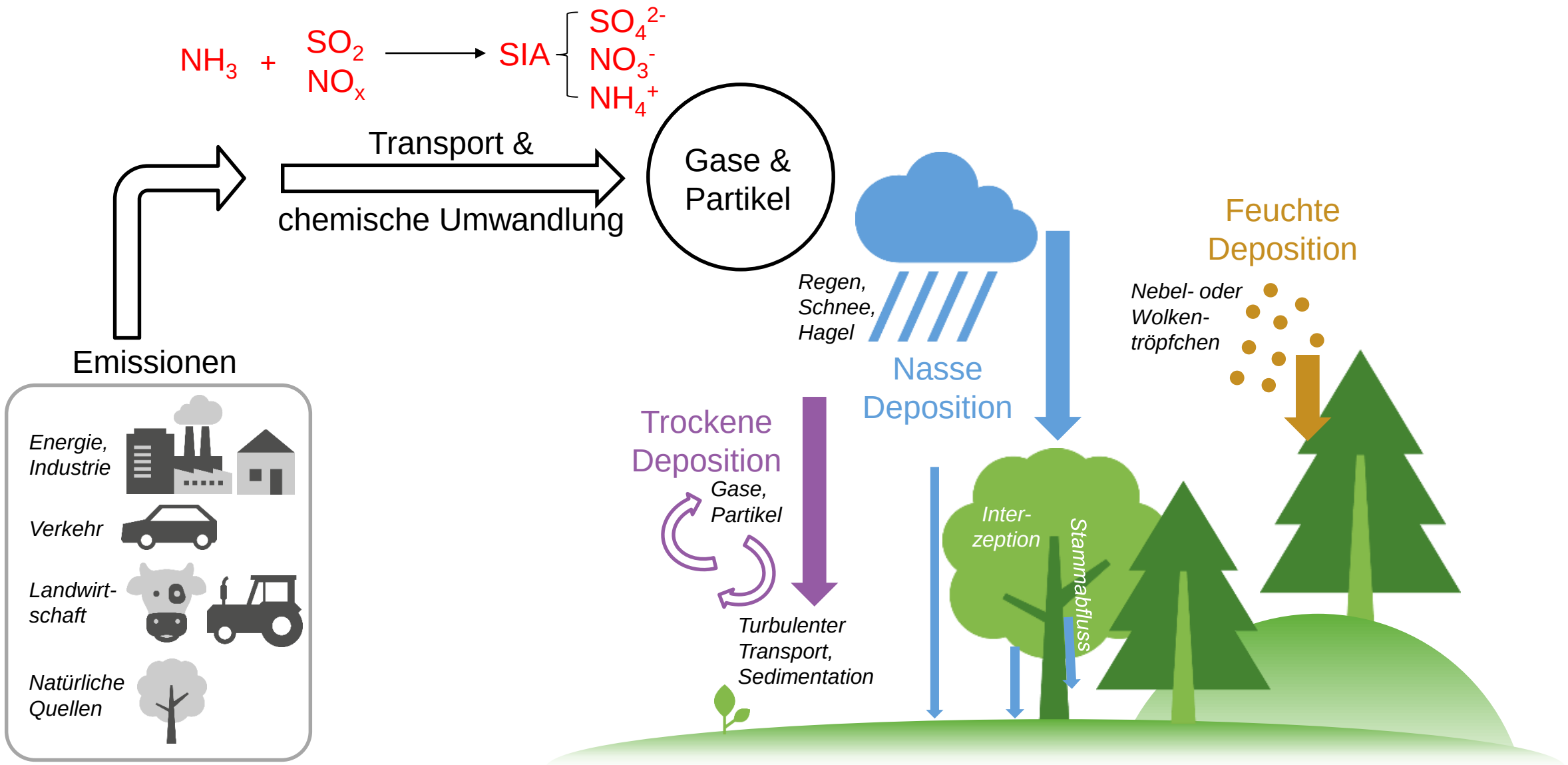


Emissionen im Jahr 2020			Kosten*
	kt/a	kt-N/a	Mrd-€
NO_x (als NO_2)	978	298	2,7
NH_3	537	442	5,9

**durch Verlust der Biodiversität (nach Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Umweltbundesamt, 2020)*

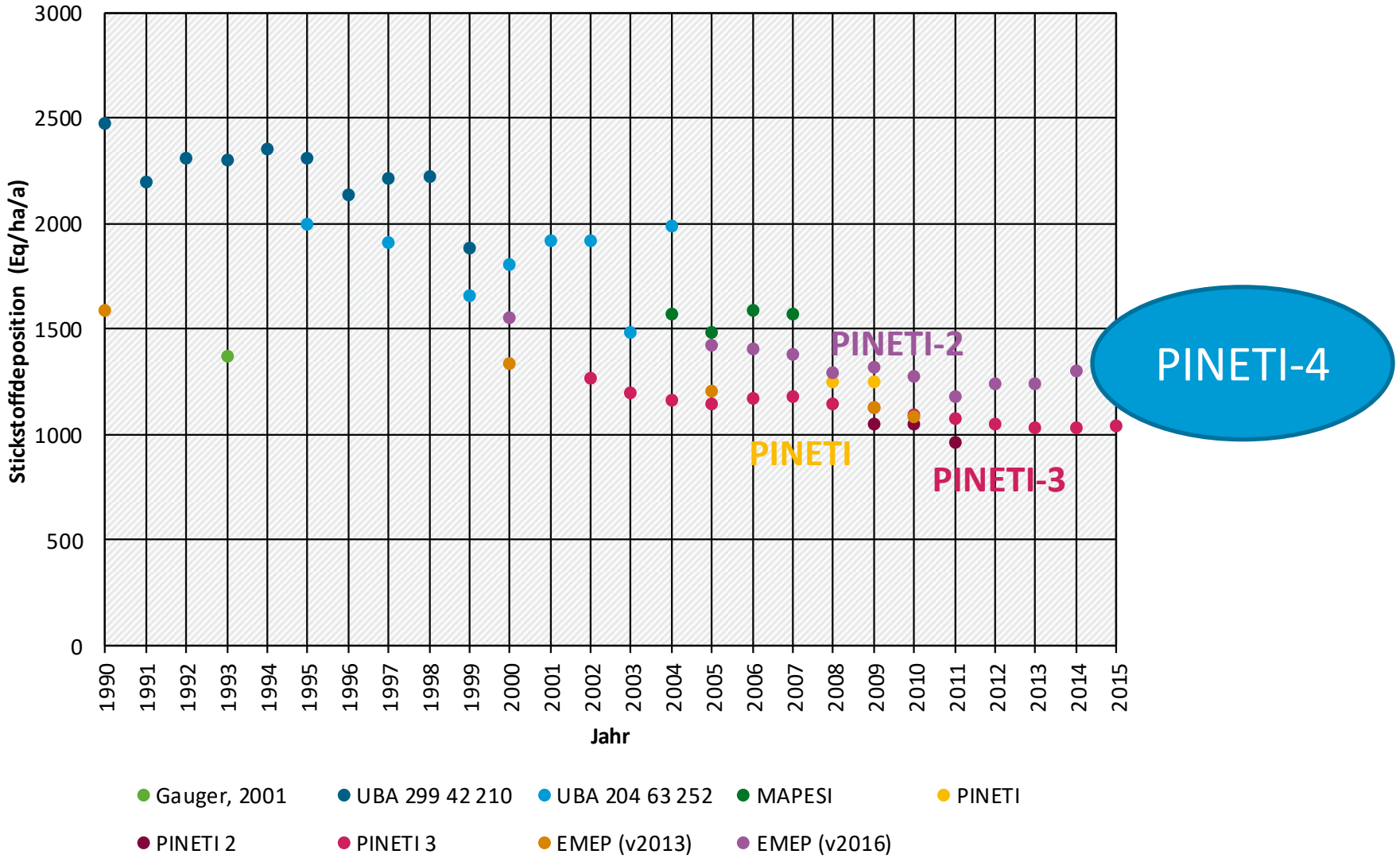
Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2020 (Stand 02/2022)


NH_3 + SO_2 NO_x → SIA { SO_4^{2-} NO_3^- NH_4^+
Transport &
chemische Umwandlung
Gase & Partikel
Emissionen
Energie, Industrie
Verkehr
Landwirt-schaft
Natürliche Quellen
Regen, Schnee, Hagel
Nasse Deposition
Feuchte Deposition
Nebel- oder Wolken-tröpfchen
Trockene Deposition
Gase, Partikel
Turbulenter Transport, Sedimentation
Inter-zeption
Stammabfluss

PINETI - Pollutant INput and EcosysTem Impact

Stickstoff-Gesamtdeposition in früheren UBA-Forschungsvorhaben



PINETI-4

UBA-Forschungsprojekt FKZ 3718 63 2020
Laufzeit 09/19 – Ende 2023

Titel: „Verbesserung des Instrumentariums zur Modellierung der deutschlandweiten Deposition von Luftschadstoffen und Fortschreibung von Zeitreihen“

Ermittlung der N-Hintergundbelastung
- Verbesserte Methodik
- Erweiterung der Zeitreihe
- Quellzuordnung einzelner Bundesländer, Inland/Ausland

Emissionsminderungen nach NEC-Emissionsszenarien
- N-Deposition für Deutschland
- N-Deposition in Nord-/Ostsee

Einfluss von Punktquellen und unterschiedlicher Quellkategorien auf die Deposition

Messungen der trockenen Deposition und Emission von reaktiven Stickstoffverbindungen (Gnarrenburger Moor; 2020 + 2021)

<u>Projekt-Konzortium:</u>

TNO innovation for life

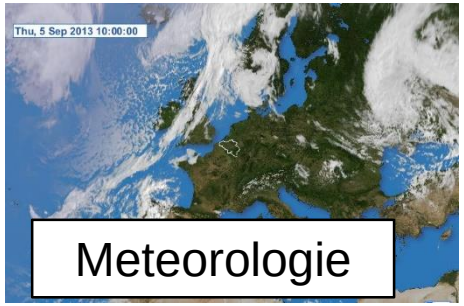
Freie Universität Berlin

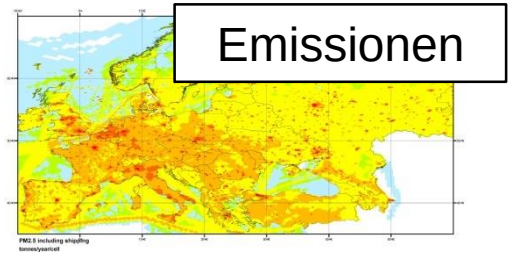
TrUmF

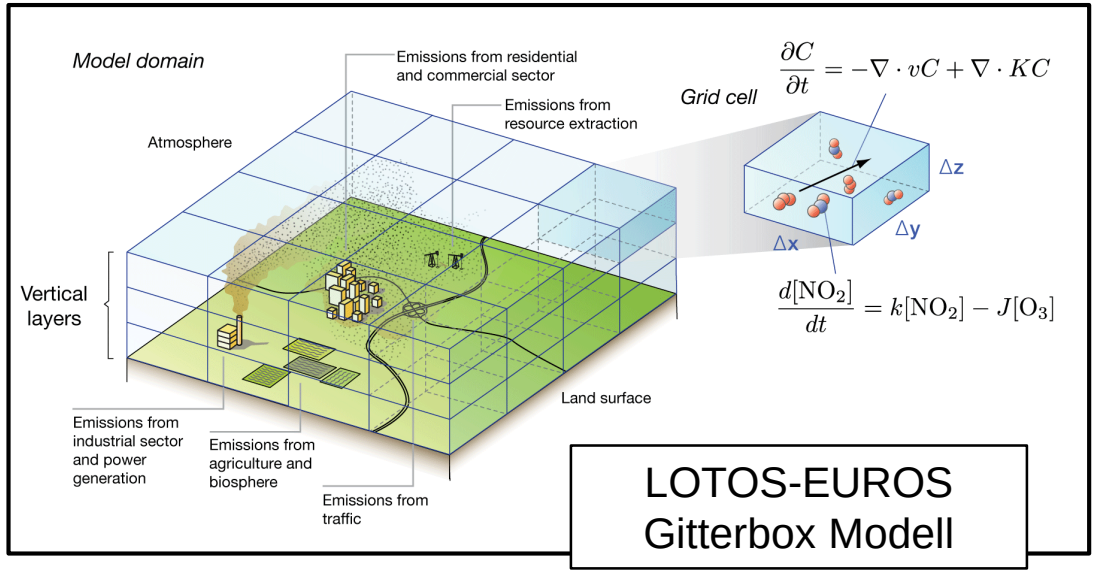
THÜNEN

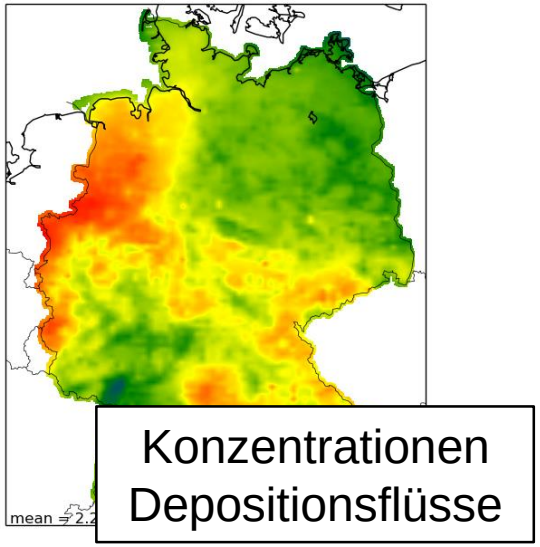
Methodik: Ermittlung der Stickstoffdeposition

Atmosphärisches Chemietransportmodell LOTOS-EUROS





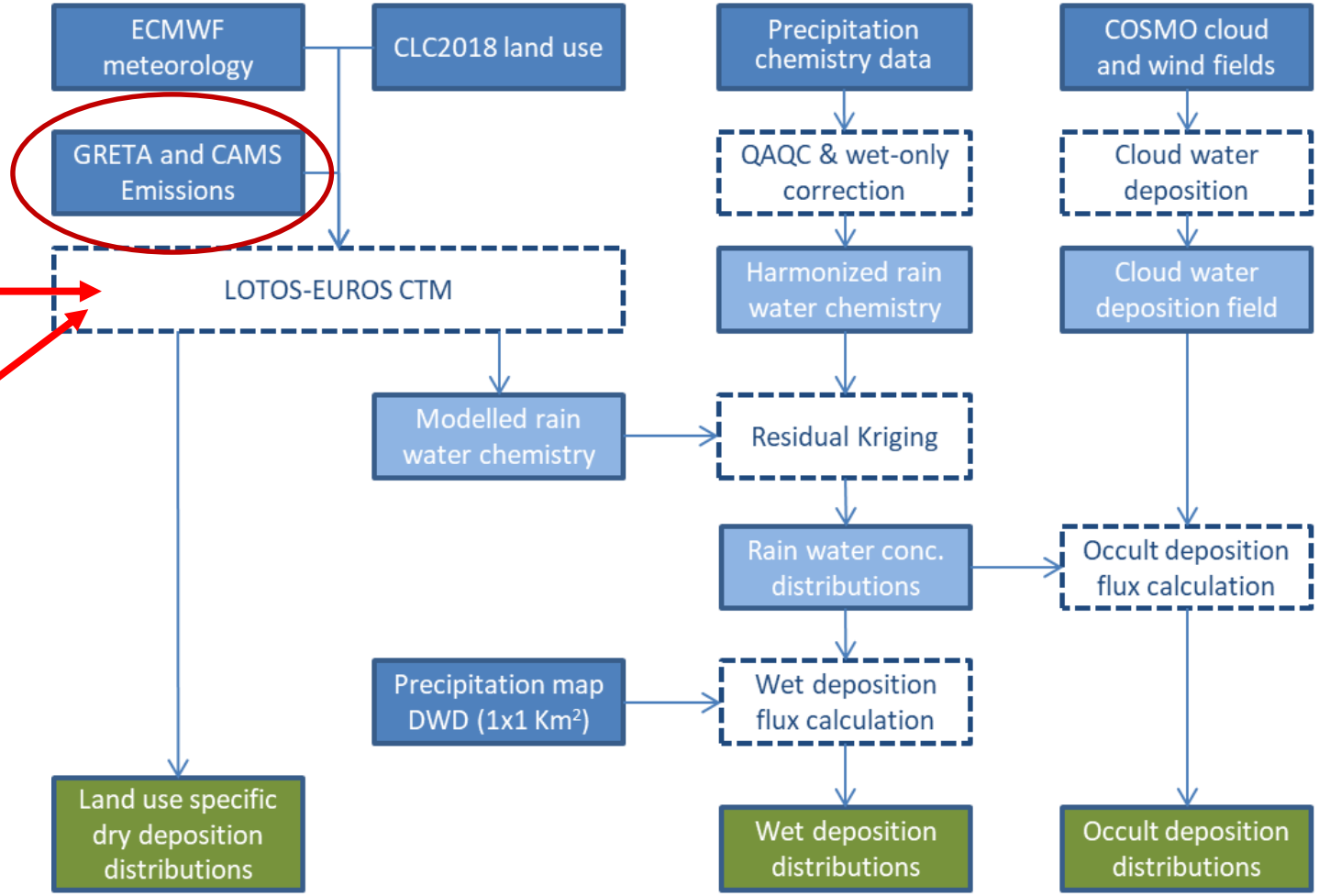




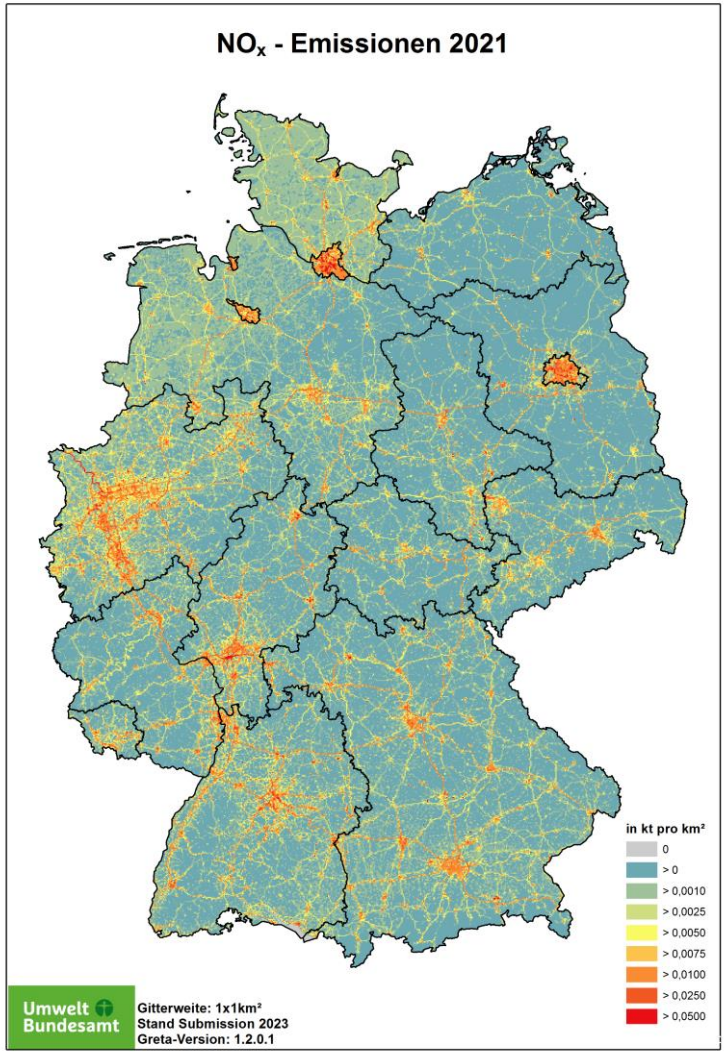
PINETI-4: Ermittlung der Hintergrundbelastung

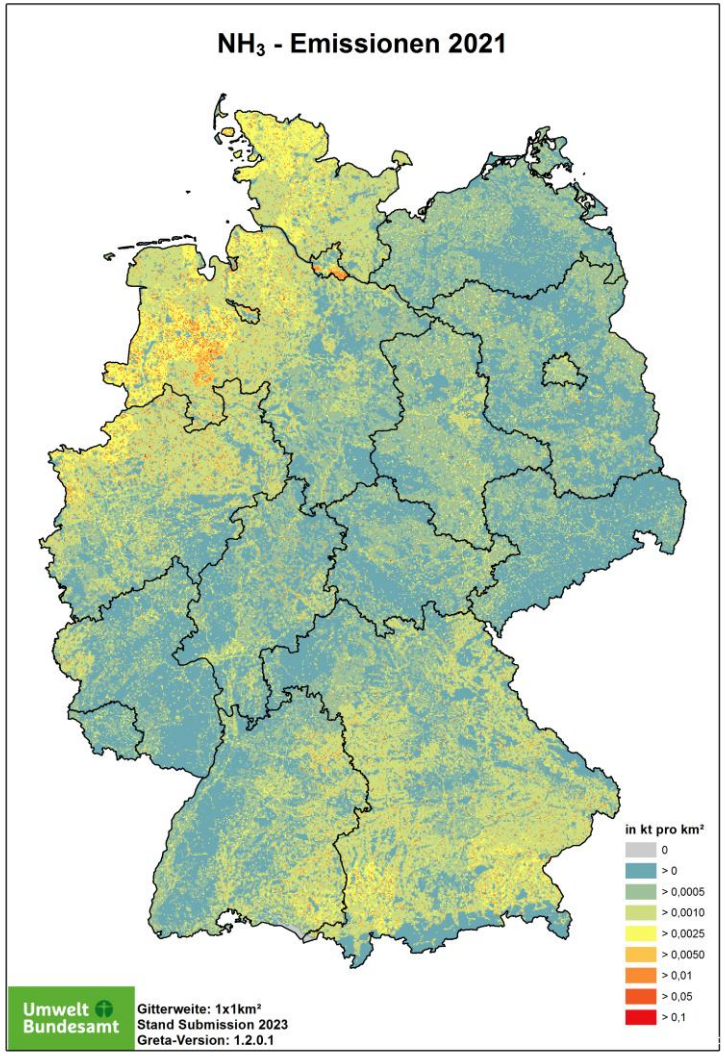
Horizontal Auflösung:
PINETI-3: 7 x 7 km²
PINETI-4: 2 x 2 km²

Vertikale Auflösung:
PINETI-3: 5 Schichten
PINETI-4: 12 Schichten



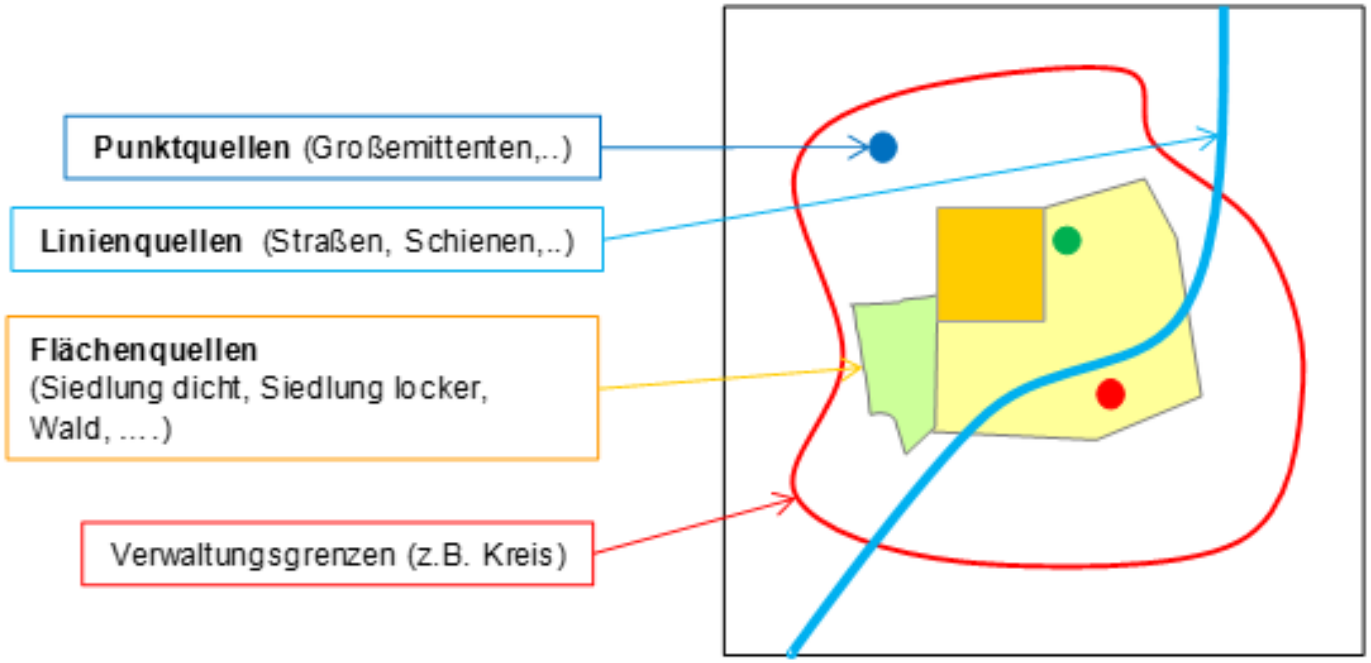
Räumliche Verteilung der NO_x und NH_3 Emissionen



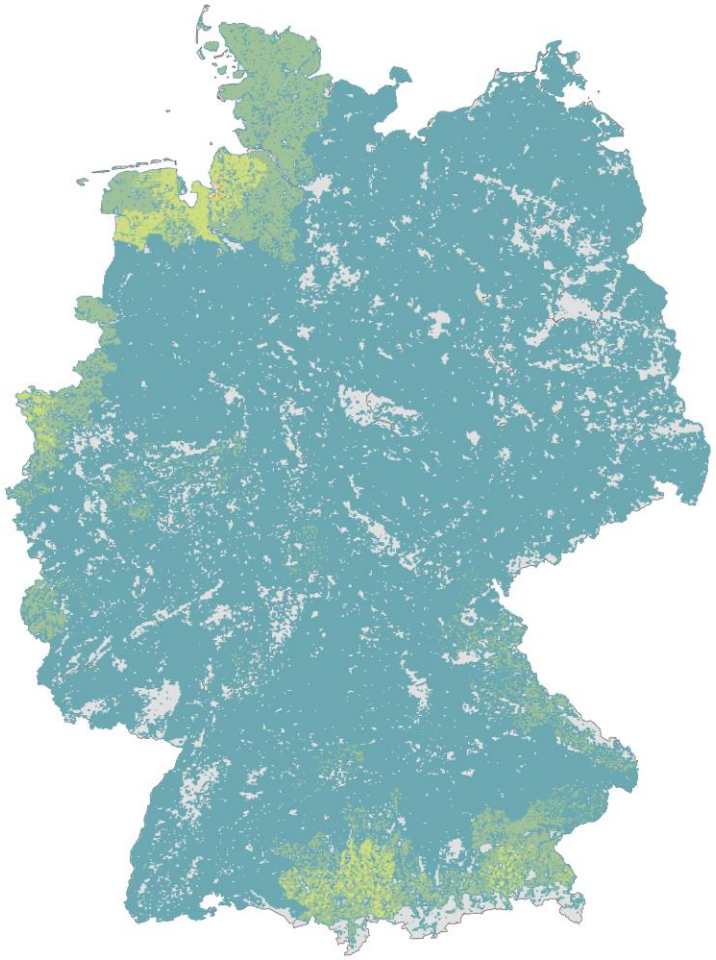


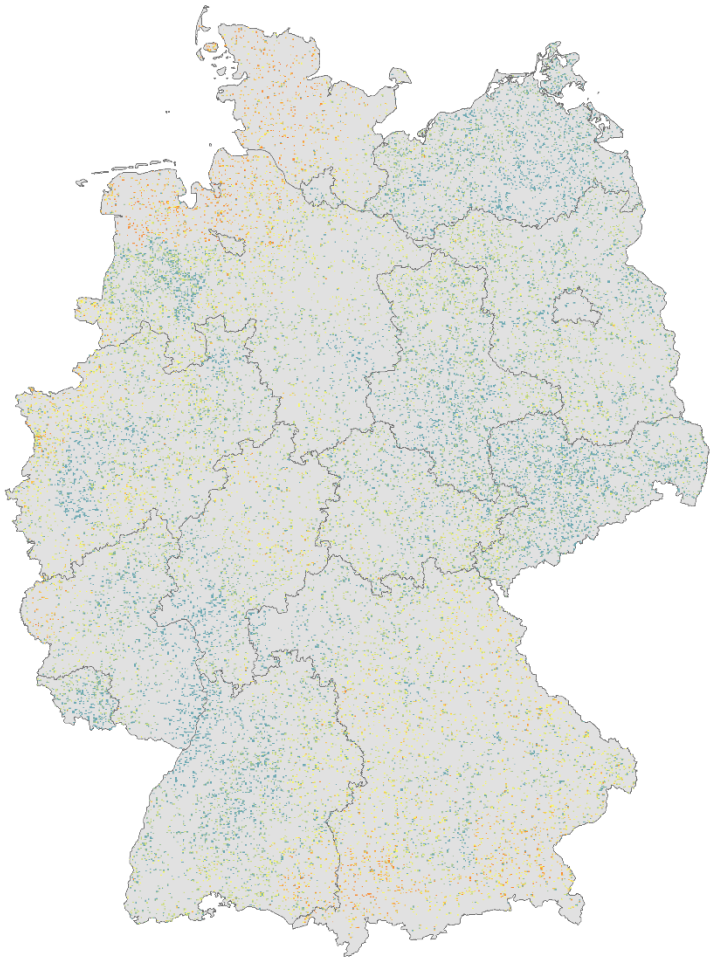
Verteilung der nationalen Emissionen mit GRETA (Gridding Emission Tool for ArcGIS)

- Verteilparameter pro NFR (Nomenclature for Reporting) Sektor
- Je nach Verteilparameter erfolgt die Verteilung über Punkt, Linie oder Fläche

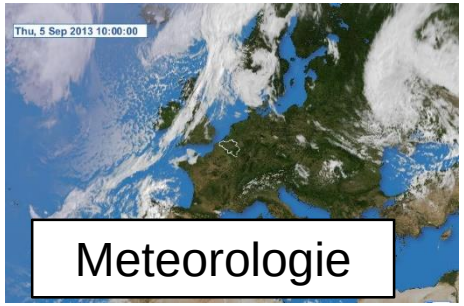


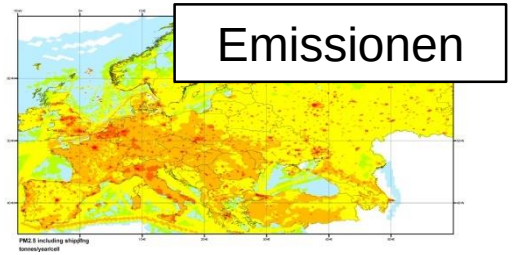
GRETA: neue Verteilung der Emissionen aus Stall und Lagerung

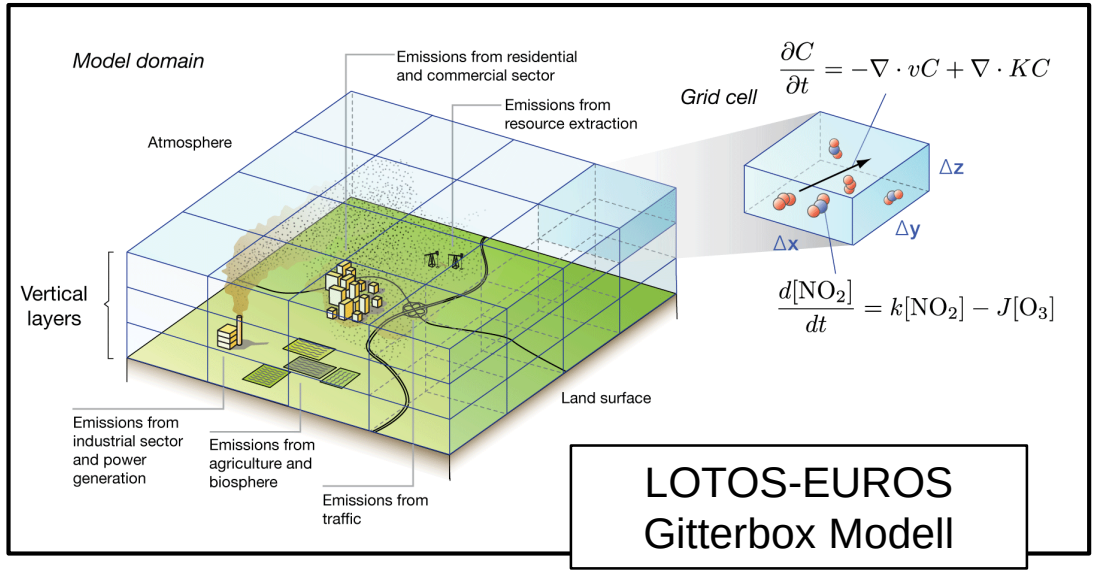


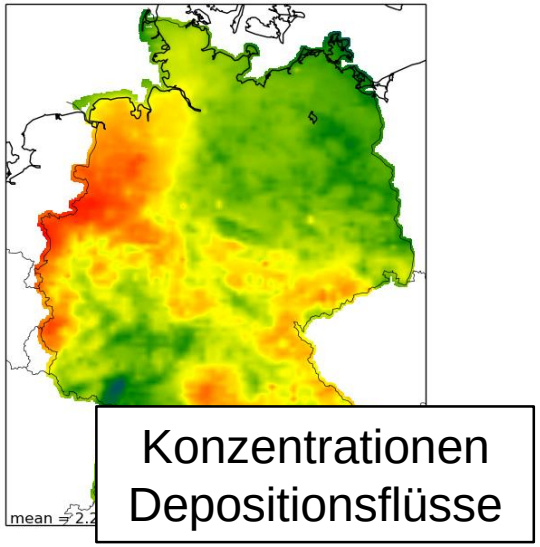


Atmosphärisches Chemietransportmodell LOTOS-EUROS



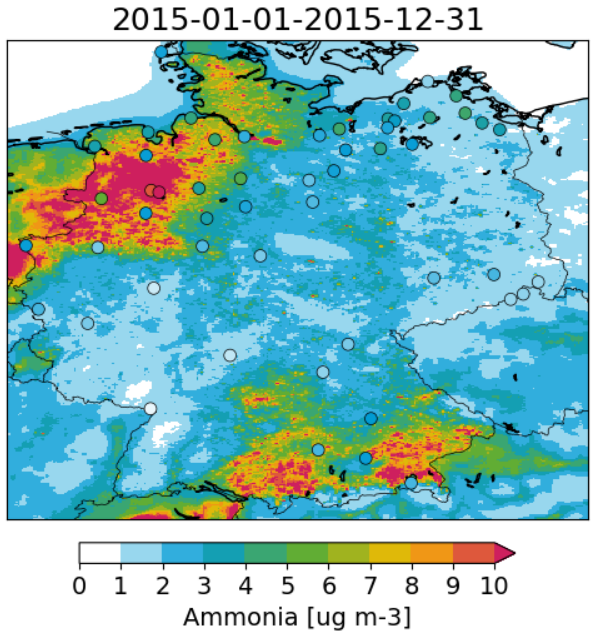




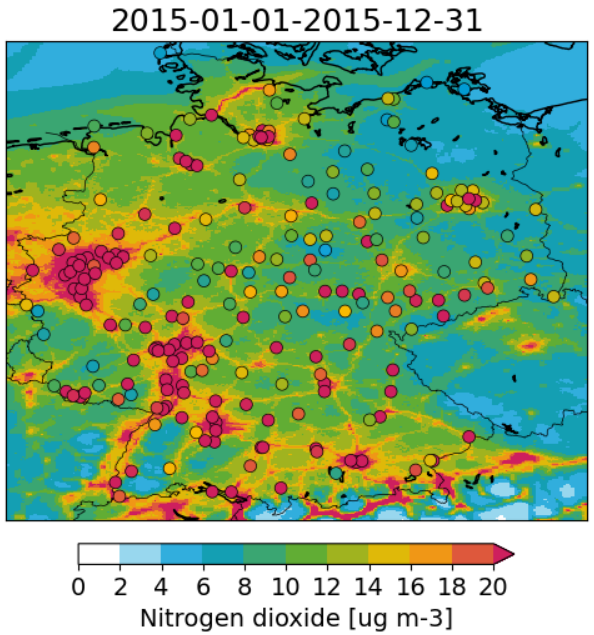


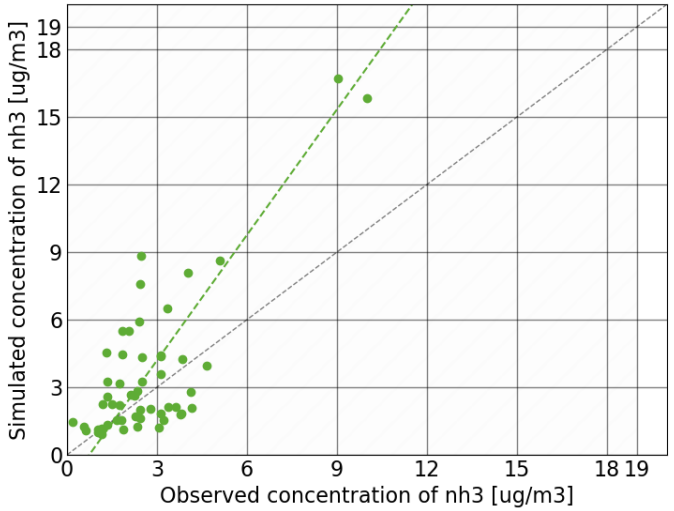
Validierung der modellierten Konzentrationen mit Messdaten

NH_3

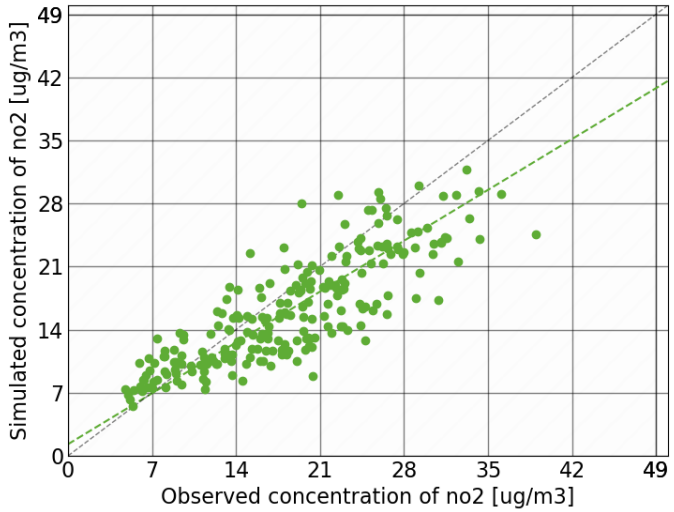


NO_2

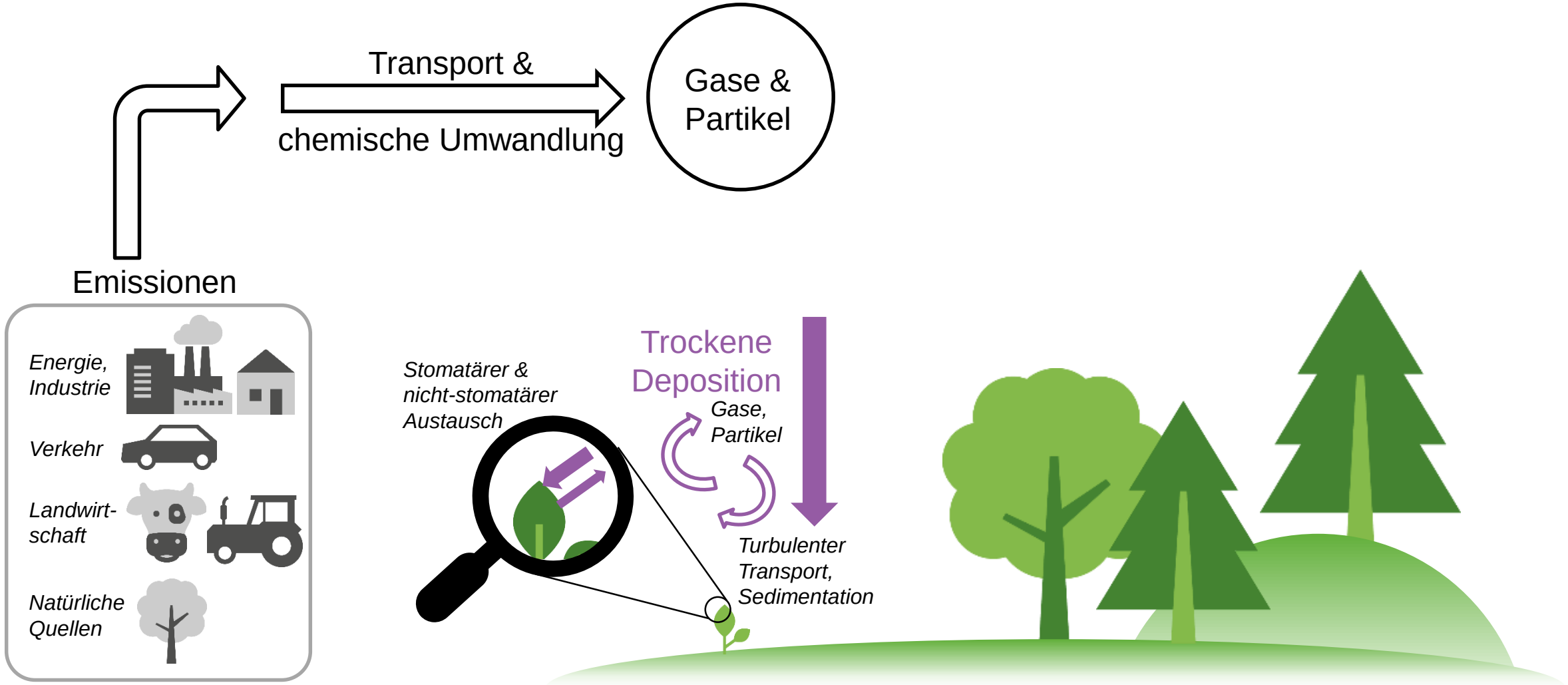




nh3; y=1.86x + -1.38; r^2=0.58; RMSE=2.39; NMB=0.34



no2; y=0.81x + 1.29; r^2=0.69; RMSE=4.71; NMB=-0.12


Transport &
chemische Umwandlung
Gase &
Partikel
Emissionen
Energie,
Industrie
Verkehr
Landwirt-
schaft
Natürliche
Quellen
Stomatärer &
nicht-stomatärer
Austausch
Trockene
Deposition
Gase,
Partikel
Turbulenter
Transport,
Sedimentation

Trockene Deposition

Widerstandsmodell:

R_a = atmosphärischer Widerstand
R_b = Grenzschichtwiderstand
R_c = Oberflächenwiderstand
V_d = Depositionsgeschwindigkeit

Stoff- und Landnutzungsabhängige Parametrik
10 Landnutzungsklassen, die sich aus CLC-Klassen aggregieren lassen

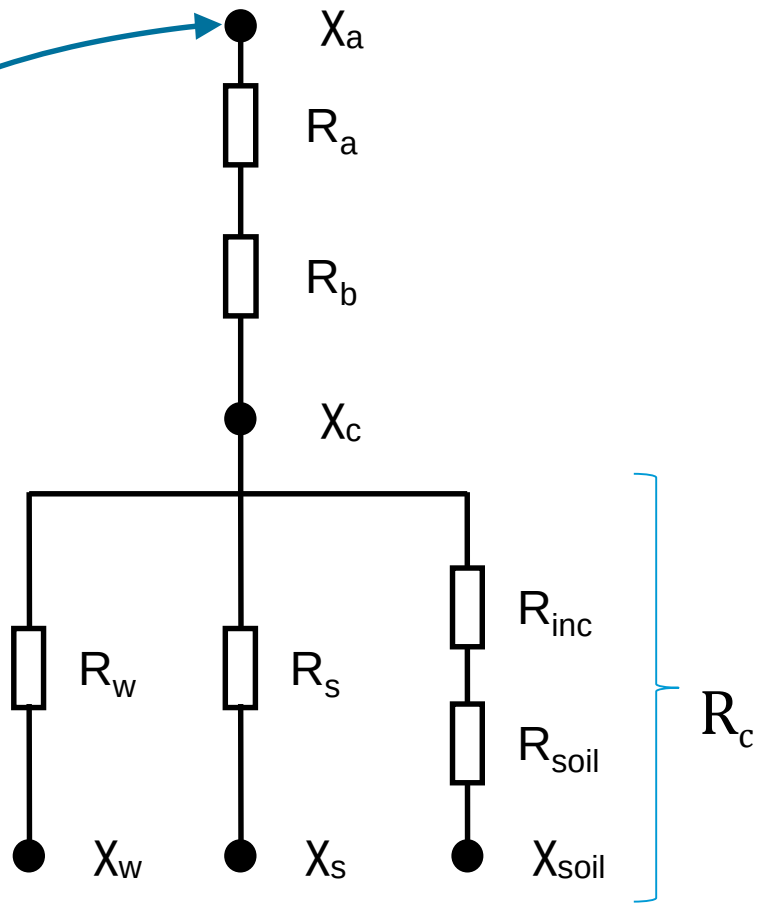
Depositionsfluss (F):

$$V_d = \frac{1}{R_a + Rb + Rc}$$

$$F = Vd * C_{atm}$$

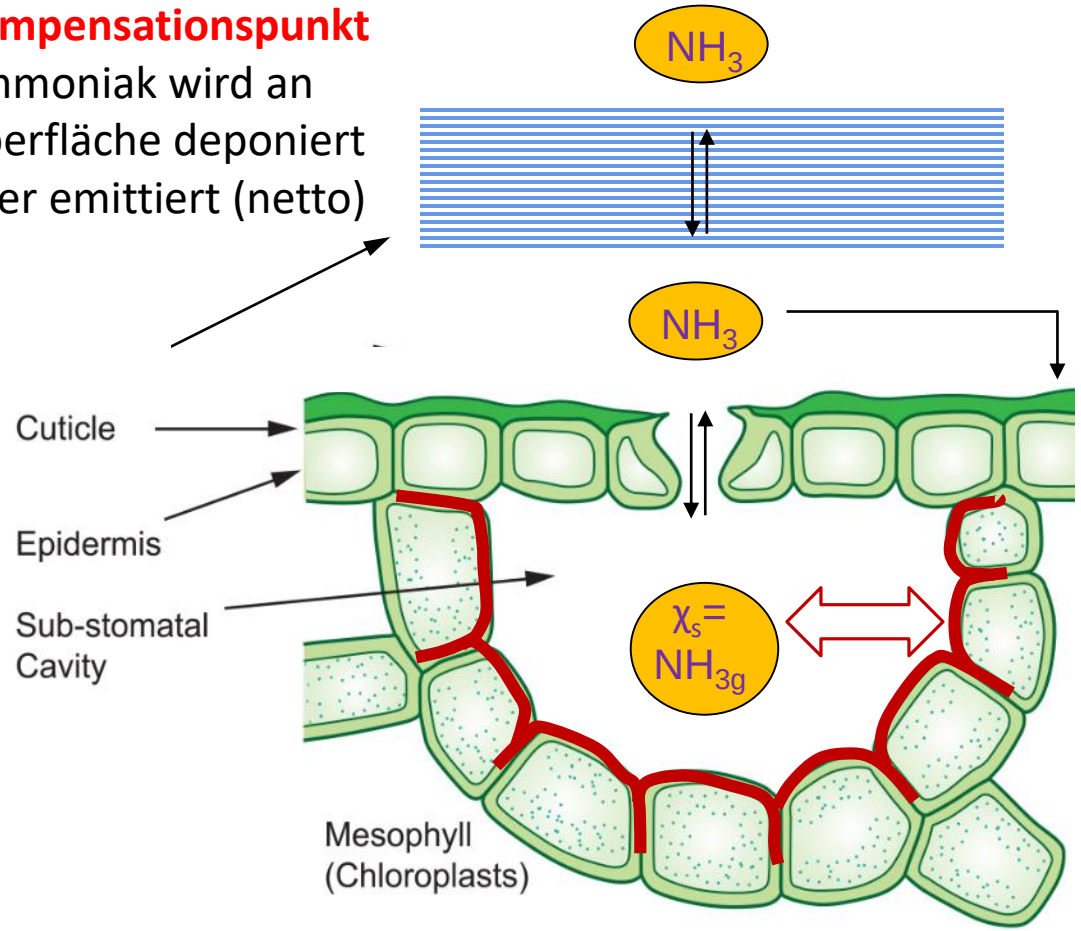
$$F = Vd * (C_{atm} - C_{comp})$$

Depositionsmodul DEPAC 3.11

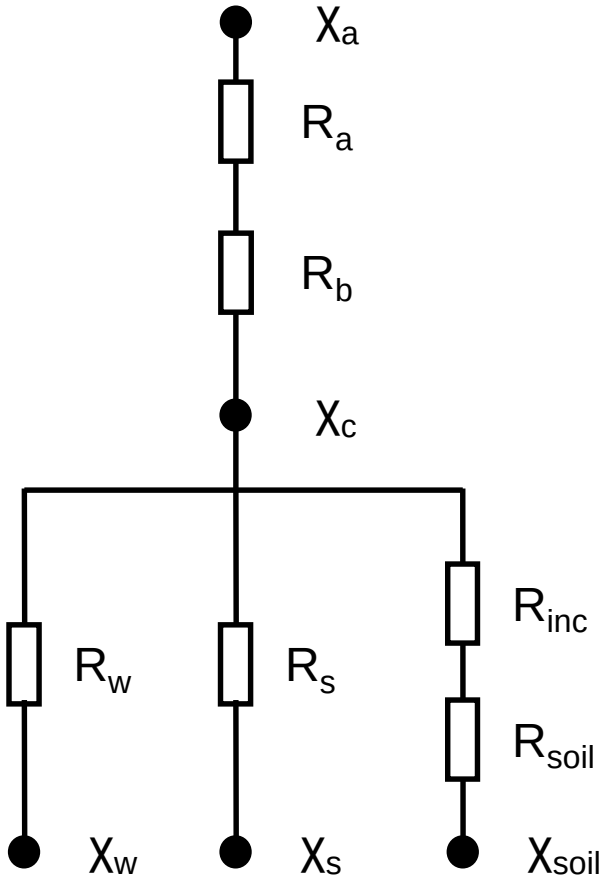


Deposition von Ammoniak: Bi-direktionaler Austausch

Kompensationspunkt
Ammoniak wird an Oberfläche deponiert oder emittiert (netto)

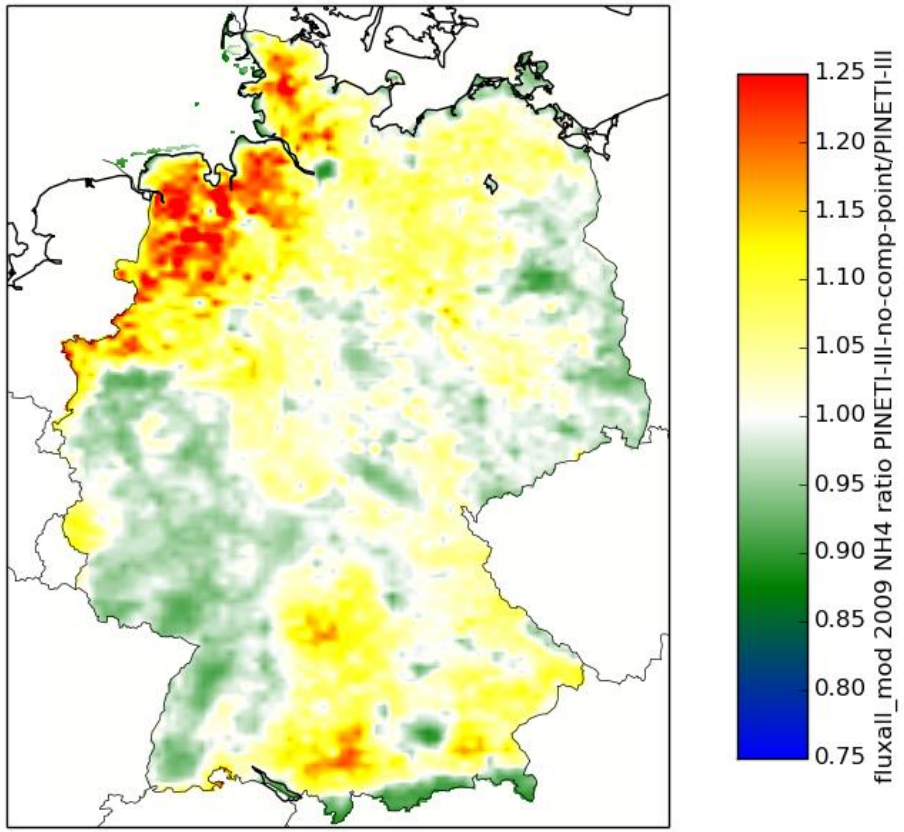


Depositionsmodul DEPAC 3.11

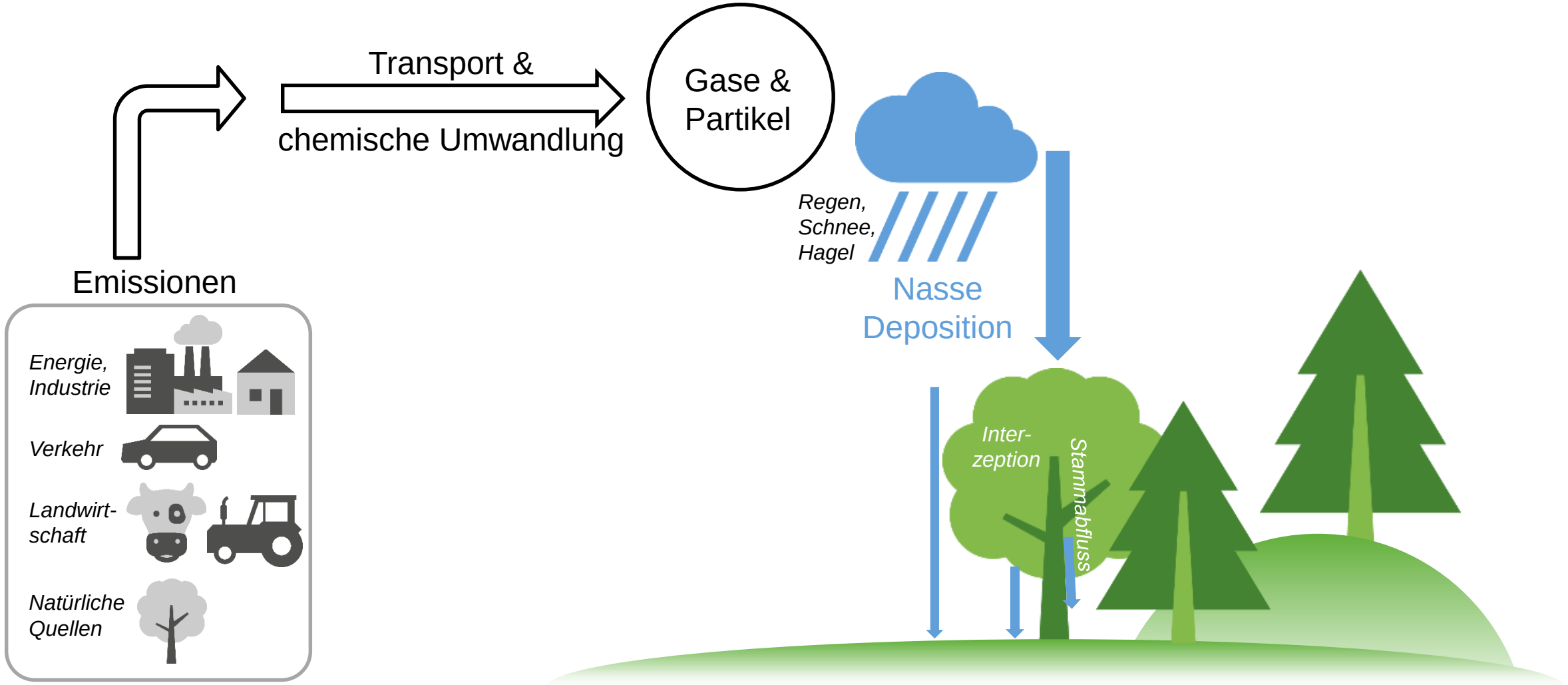


Einfluss des Kompensationspunktes auf effektive Deposition

$$\frac{\text{Modellergebnis } \underline{\text{ohne}} \text{ Kompensationspunkt}}{\text{Modellergebnis } \underline{\text{mit}} \text{ Kompensationspunkt}}$$



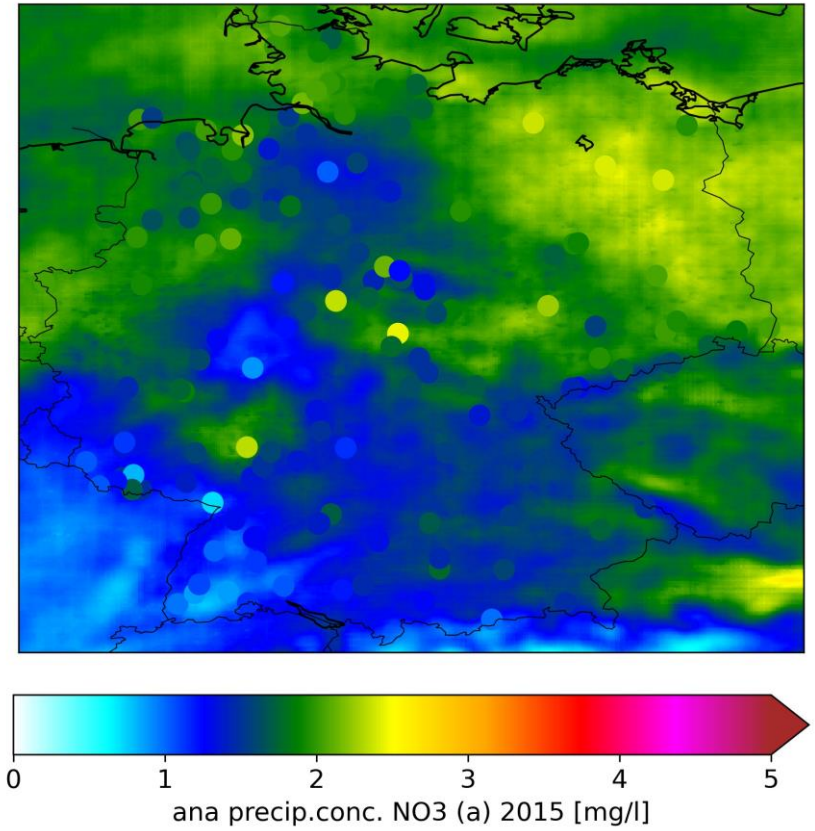
- → Je höher die NH_3-Belastung, desto höher der Kompensationspunkt
- → Der **Kompensationspunkt verringert die effektive Deposition,** es kann auch zu Emission von NH_3 kommen
- → Vernachlässigung des Kompensationspunktes führt zu erhöhter trockener Deposition in Quellgebieten, verringert jedoch den Ferntransport
- → Änderung ist im Mittel nur 3-4 % für mittleren Gesamteintrag in DEU


Transport &
chemische Umwandlung
Gase &
Partikel
Emissionen
Energie,
Industrie
Verkehr
Landwirt-
schaft
Natürliche
Quellen
Regen,
Schnee,
Hagel
Nasse
Deposition
Inter-
zeption
Stammabfluss

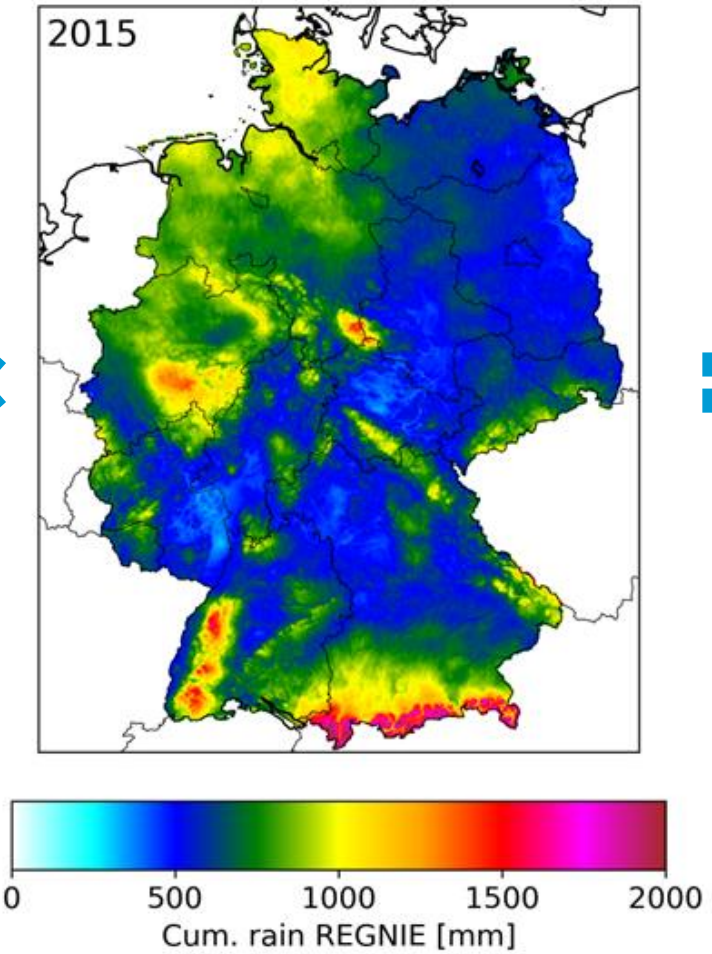
Nasse Deposition (Beispiel NO_3)

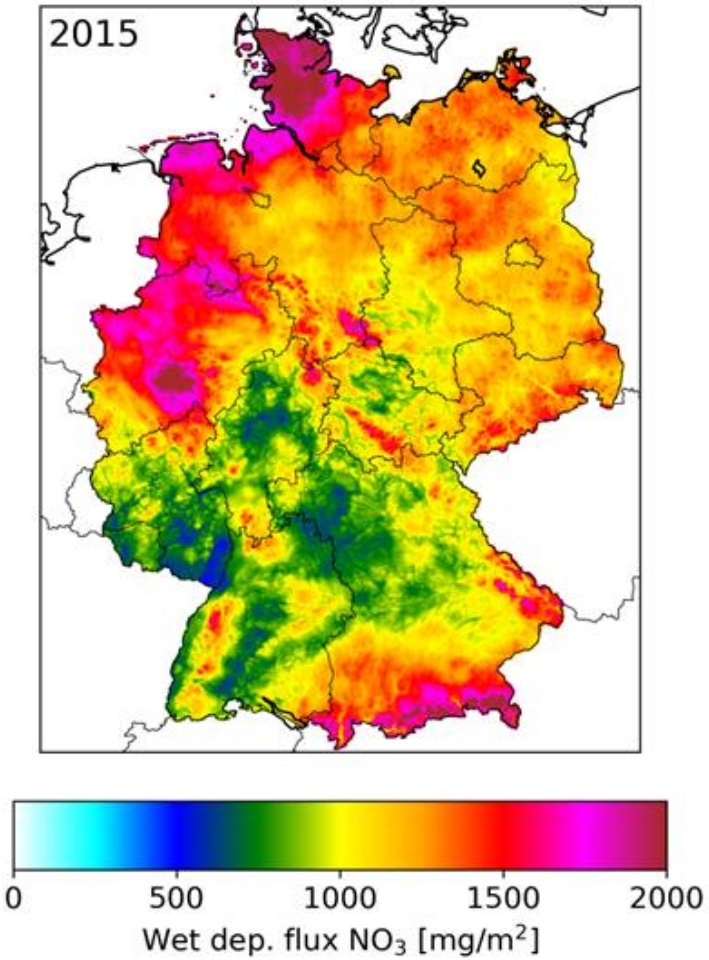
Wasserkonzentration x **Niederschlag** = **Nasse Deposition**

LOTOS-EUROS



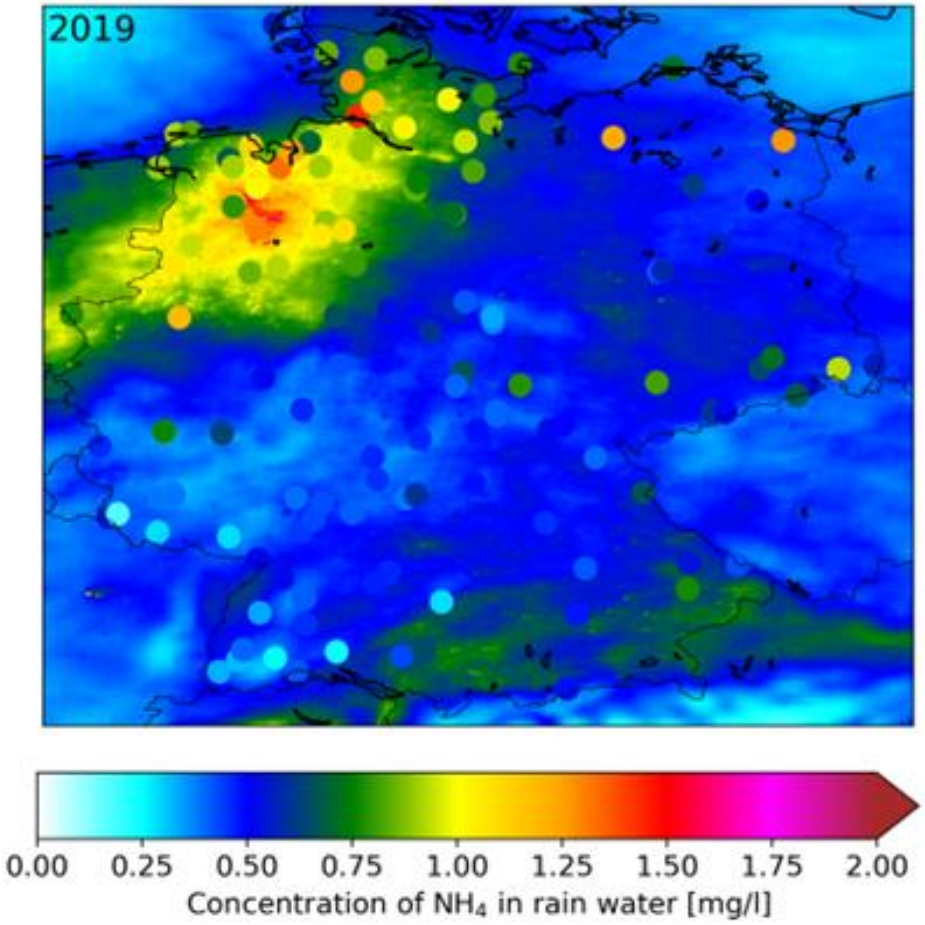
DWD-Niederschlagsdaten





Nasse Deposition: Korrektur mit Messdaten (Kriging)

modelliert

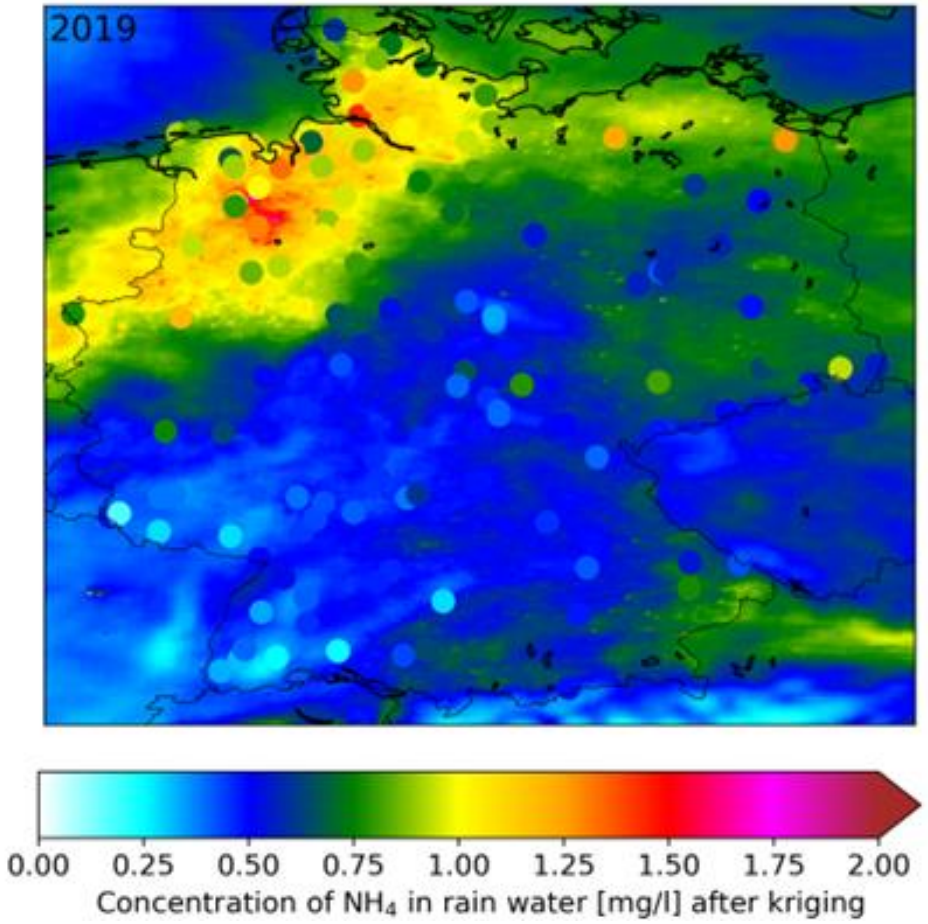


Residual Kriging mit gemessener Konzentration im Niederschlag

- Messdaten nasse Deposition
- Länderdaten → Ca. 300 Stationen aus
  - Forstlichem Umweltmonitoring
  - Immissionsmessnetz
  - Hydrologischen Messnetz

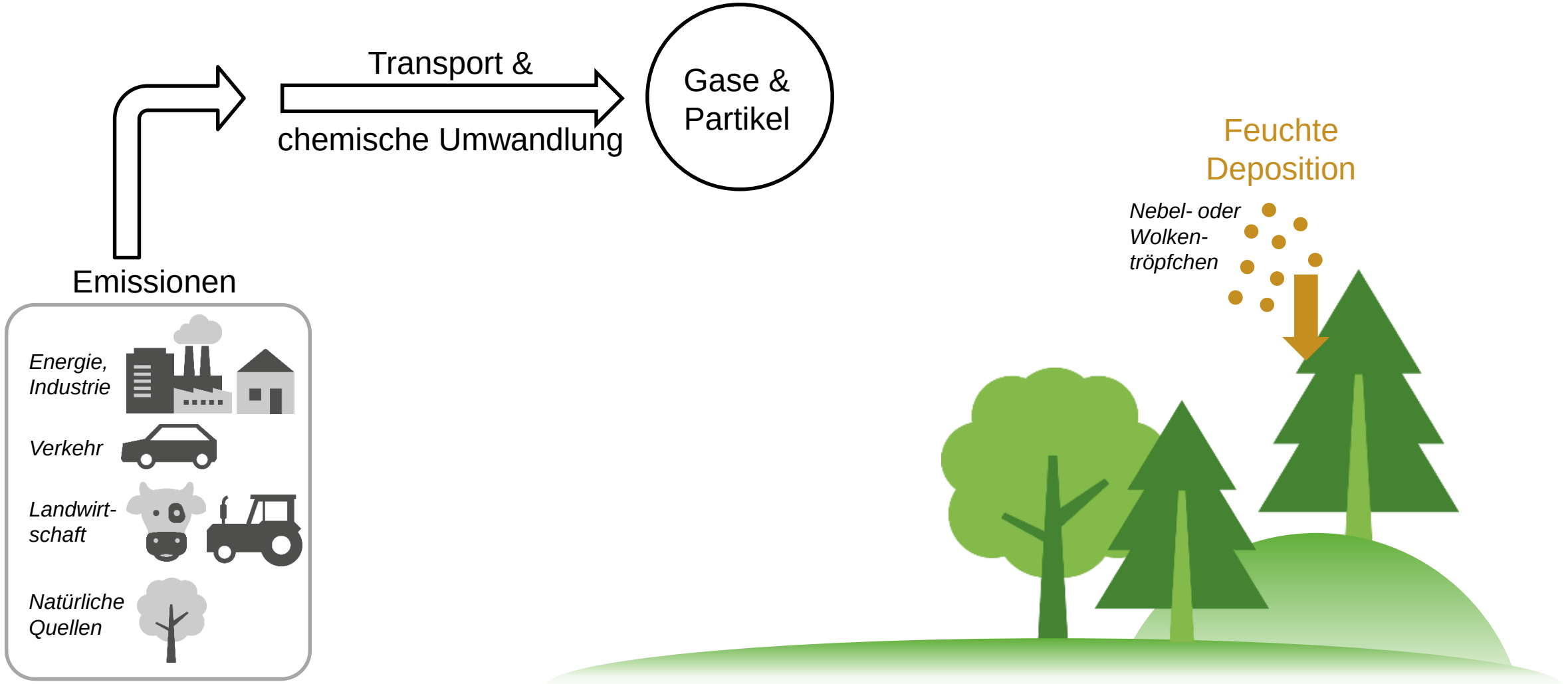
Nasse Deposition: Korrektur mit Messdaten (Kriging)

mit Messwerten korrigiert



Residual Kriging mit gemessener Konzentration im Niederschlag

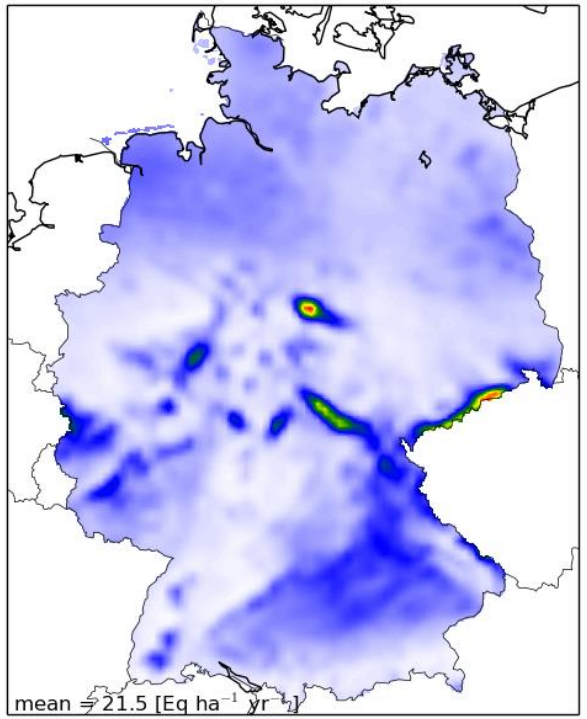
- Messdaten nasse Deposition
- Länderdaten → Ca. 300 Stationen aus
  - Forstlichem Umweltmonitoring
  - Immissionsmessnetz
  - Hydrologischen Messnetz


Transport &
chemische Umwandlung
Gase &
Partikel
Emissionen
Energie,
Industrie
Verkehr
Landwirt-
schaft
Natürliche
Quellen
Feuchte
Deposition
Nebel- oder
Wolken-
tröpfchen

Feuchte Deposition

$$F_{feucht} = F_{wolkenwasser} * C_{ww}$$

Deposition von Wolkenwasser



Schadstoffkonzentration im Wolkenwasser

$$C_{ww} = C_{niederschlag} * EF$$

Species	Enrichment Factor (EF)
SO_4^{2-}	7.0
NO_3^-	8.6
NH_4^+	9.2

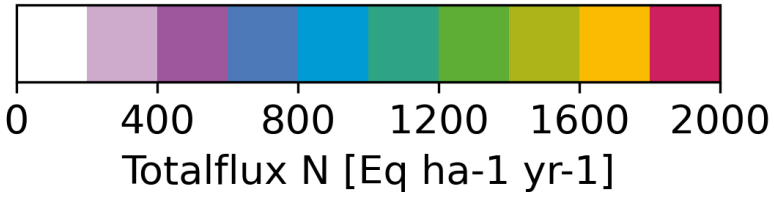
Ansatz von Katata et al. (2009; 2011) anhand COSMO-EU Daten

- abhängig vom Blattflächen-Index LAI)
- für Wald-Landnutzungsklassen

Ergebnisse: Stickstoffdeposition in Deutschland von 2015-2019

Verteilung der Gesamtdeposition von 2015-2019

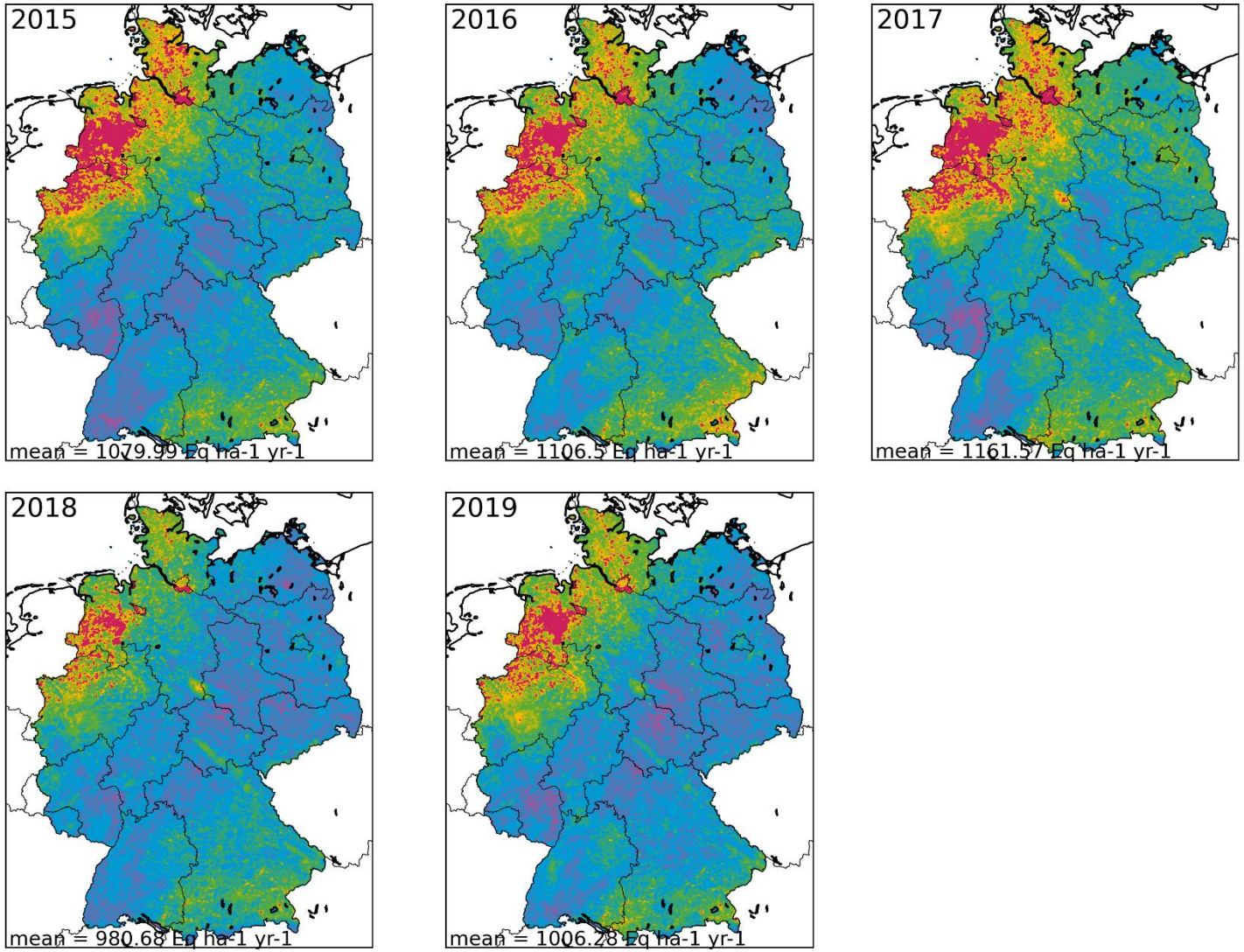
- Höchste Depositionsflüsse in landwirtschaftlichen Regionen im Nordwesten und Südosten
- Sekundäre Maxima in den Mittelgebirgen
- 2015, 2016, 2017 deutlich höher als 2018, 2019, was auf die Niederschlagsmuster zurückzuführen ist



Einheit: Eq ha^{-1} yr^{-1}
= Äquivalent pro Hektar und Jahr

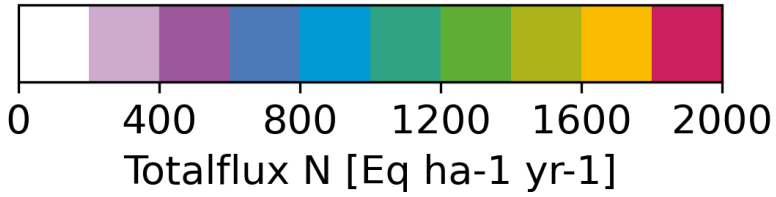
Ladungen der Stickstoffionen

1 Eq ha^{-1} yr^{-1} = 1/71,4 kg-N ha^{-1} yr^{-1}



Verteilung der Gesamtdeposition von 2015-2019

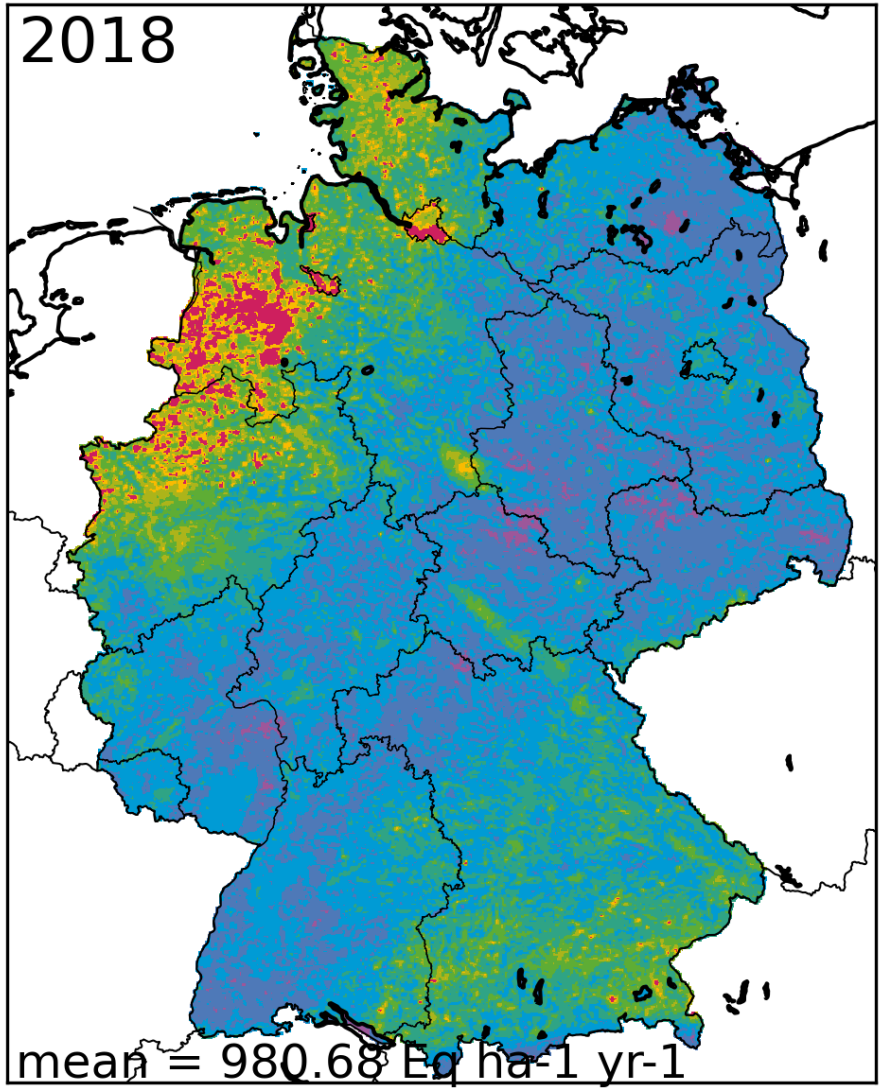
- Höchste Depositionsflüsse in landwirtschaftlichen Regionen im Nordwesten und Südosten
- Sekundäre Maxima in den Mittelgebirgen
- 2015, 2016, 2017 deutlich höher als 2018, 2019, was auf die Niederschlagsmuster zurückzuführen ist

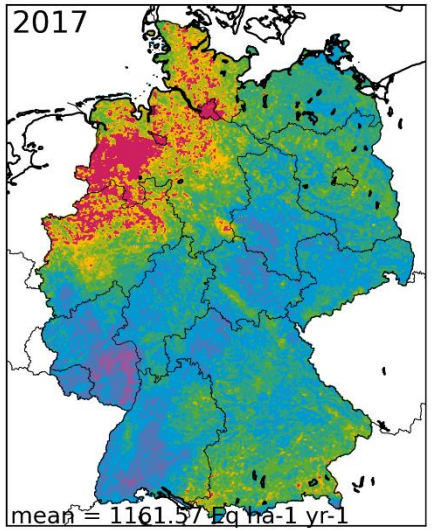


Einheit: Eq ha^{-1} yr^{-1}
= Äquivalent pro Hektar und Jahr

Ladungen der Stickstoffionen

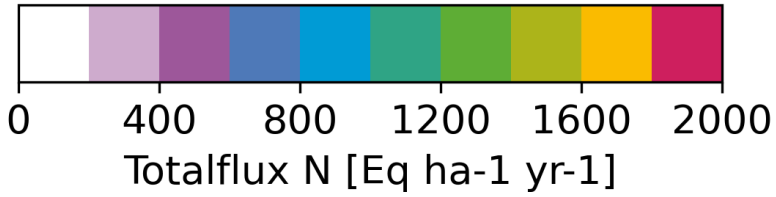
1 Eq ha^{-1} yr^{-1} = 1/71,4 kg-N ha^{-1} yr^{-1}





Verteilung der Gesamtdeposition von 2015-2019

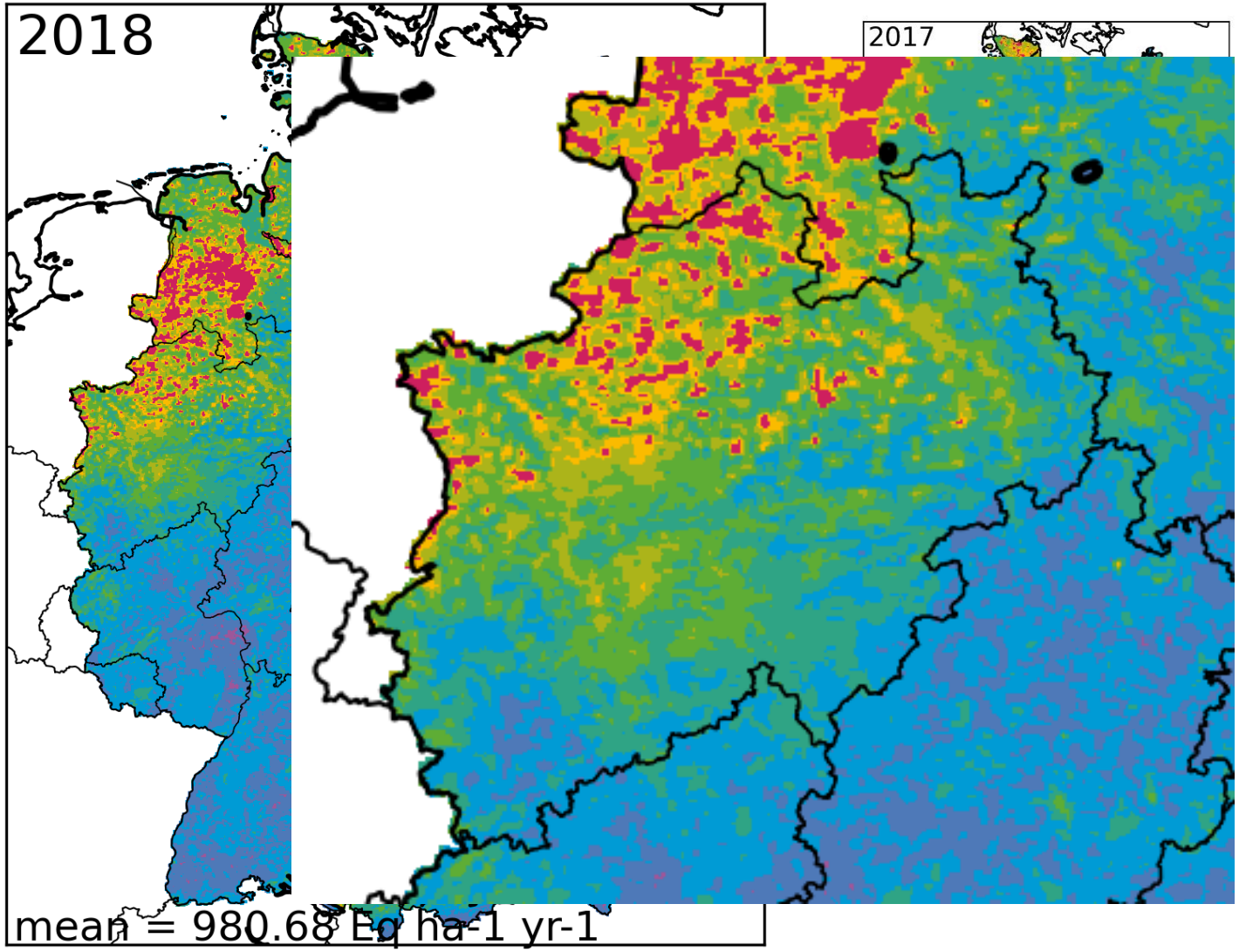
- Höchste Depositionsflüsse in landwirtschaftlichen Regionen im Nordwesten und Südosten
- Sekundäre Maxima in den Mittelgebirgen
- 2015, 2016, 2017 deutlich höher als 2018, 2019, was auf die Niederschlagsmuster zurückzuführen ist



Einheit: Eq ha^{-1} yr^{-1}
= Äquivalent pro Hektar und Jahr

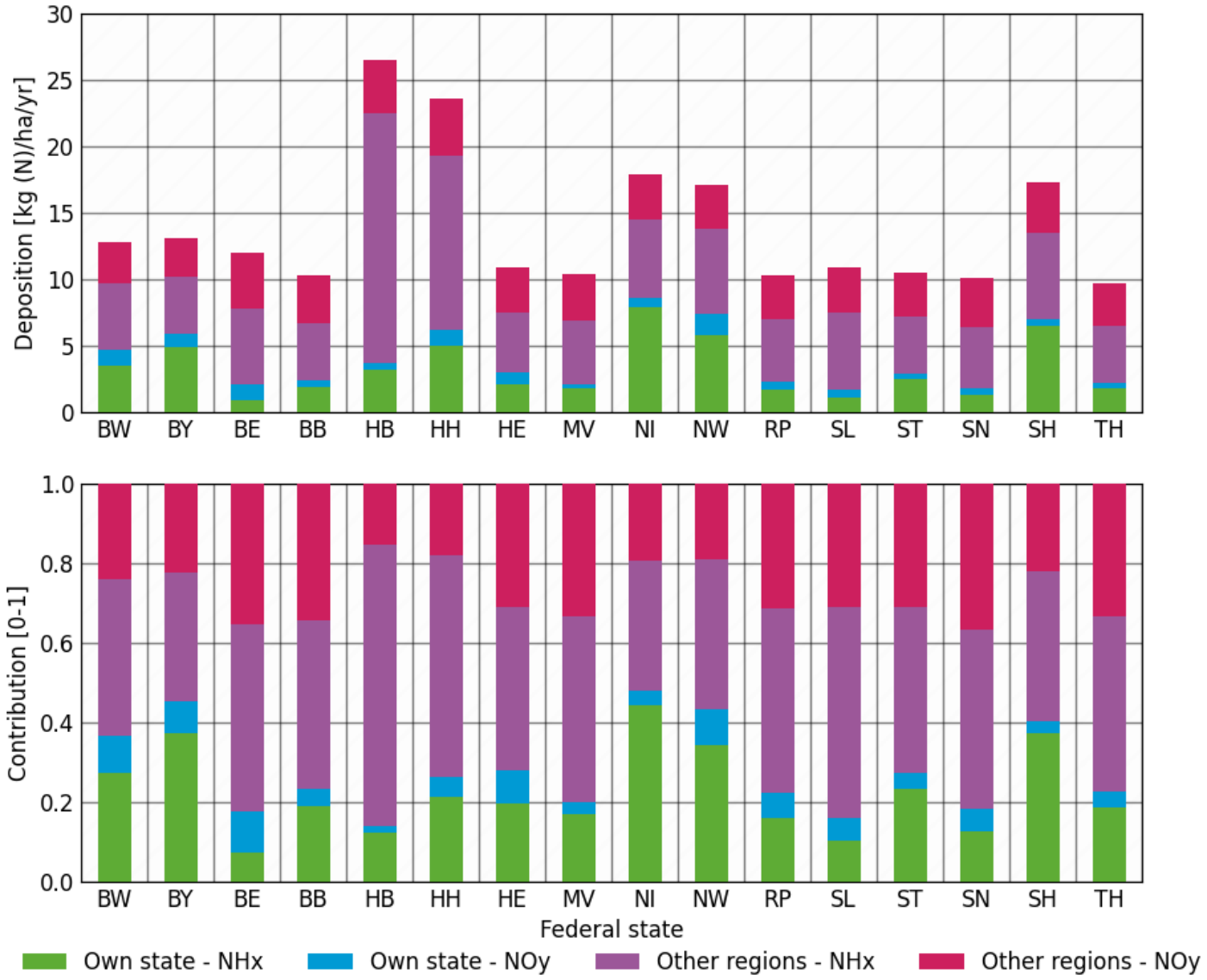
Ladungen der Stickstoffionen

1 Eq ha^{-1} yr^{-1} = 1/71,4 kg-N ha^{-1} yr^{-1}

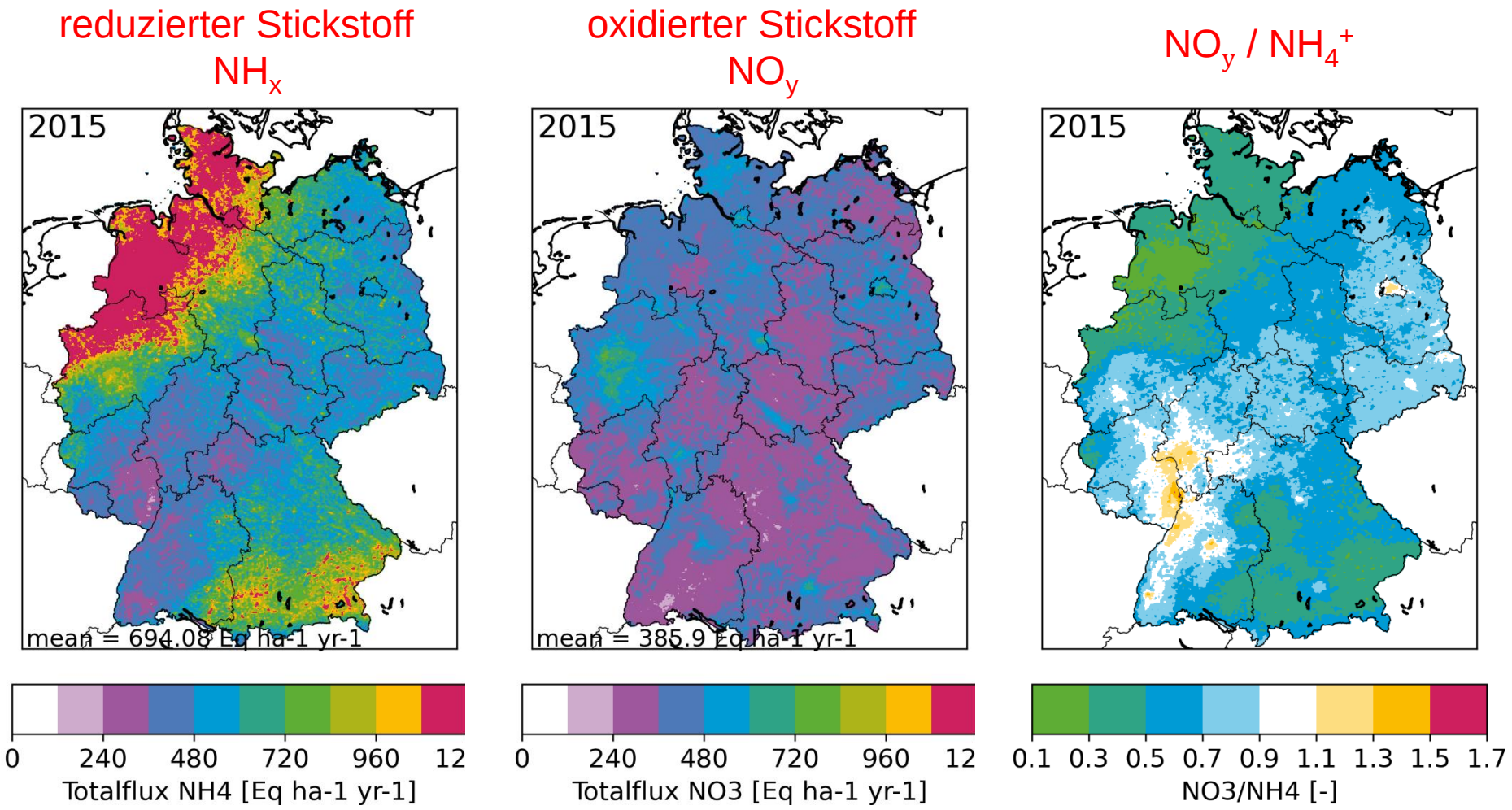


Quellenzuordnung

- Mittlere Depositionen über Bundesländer zeigen höchste Werte für HB, HH, NI, NW und SH
- Eigenanteil versus importierte Stickstoffdeposition
- Nur fur Niedesachsen wird ein Eigenanteil von nahezu 50% ermittelt
- Alle landwirtschaftlich geprägten Bundesländer zeigen höhere Eigenanteile
- NO_x wird von den Bundesländern vorallem exportiert
- Ergebnisse sind für Bundesland zu Bundesland verfügbar



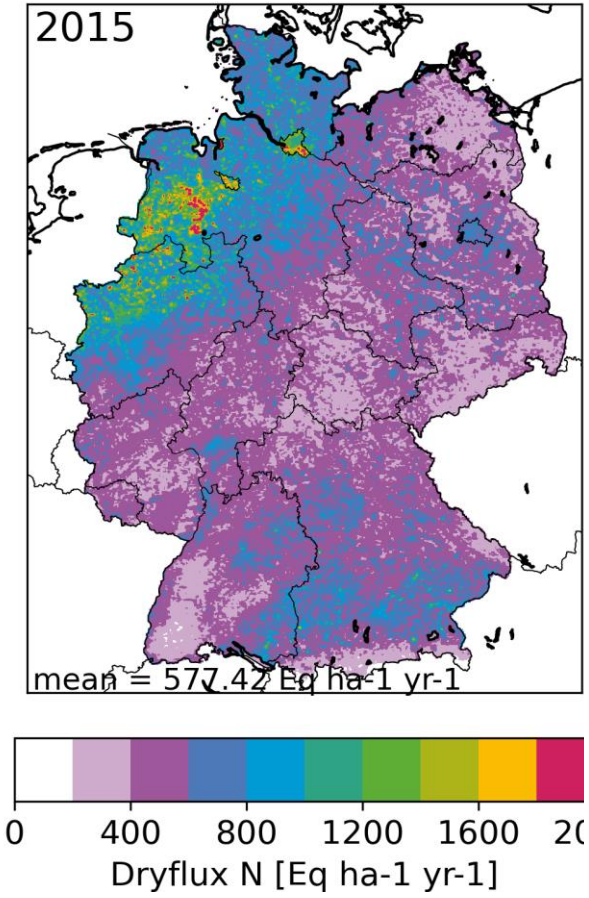
2015 – Deposition von reduzierten und oxidierten Stickstoffverbindungen



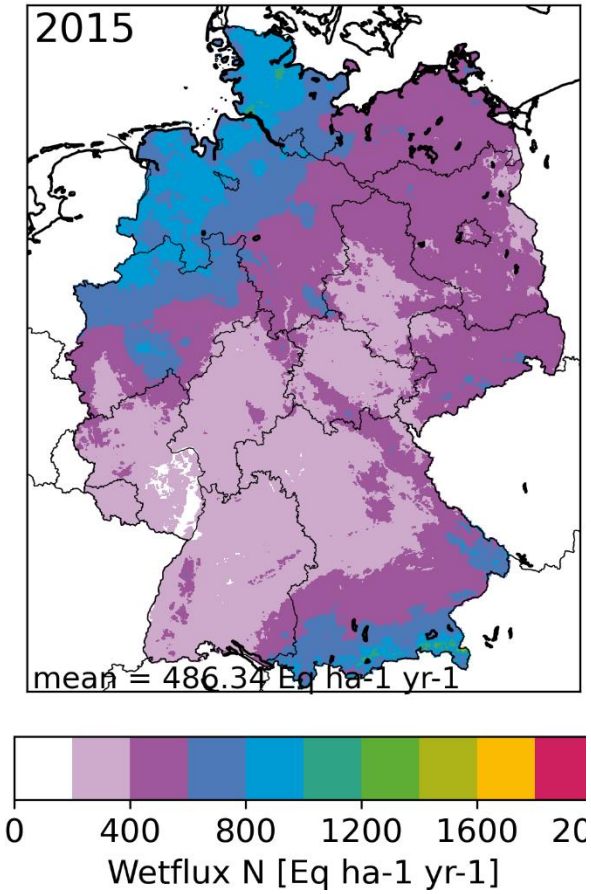
- NH_x dominiert in landwirtschaftlichen Gebieten, NO_y dominiert in urbanen Gebieten
- Im gesamten Land ist NO_y im Allgemeinen kleiner als NH_x (außer im Rhein-Main-Gebiet und in Berlin)

2015 - Depositionspfade

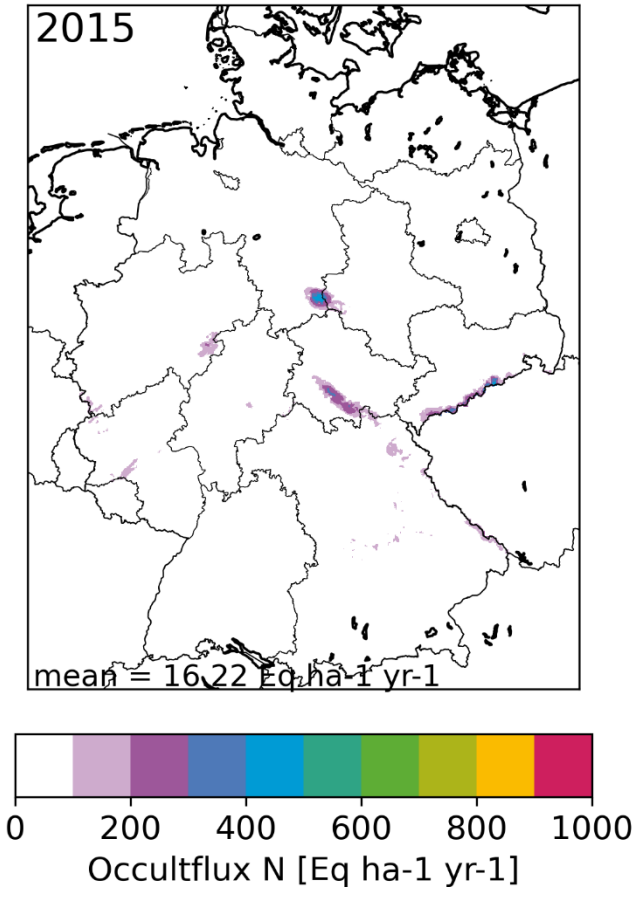
Trocken



Nass

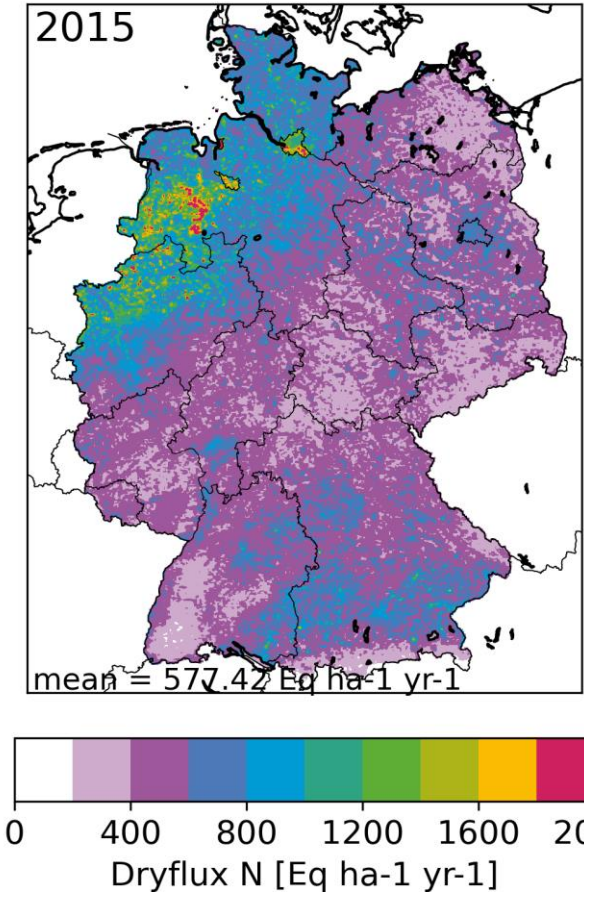


Feucht

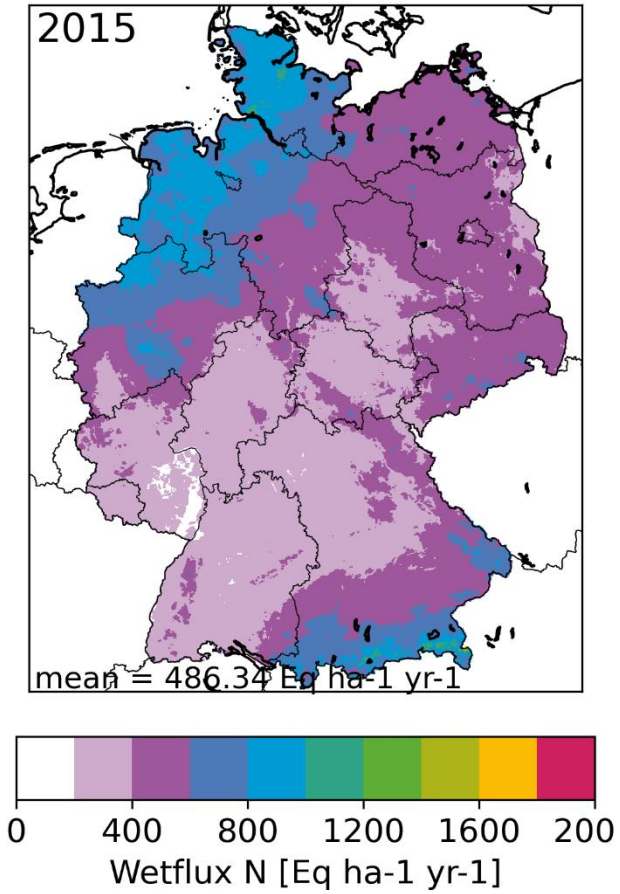


2015 – Verhältnis trockener zu nasser Deposition

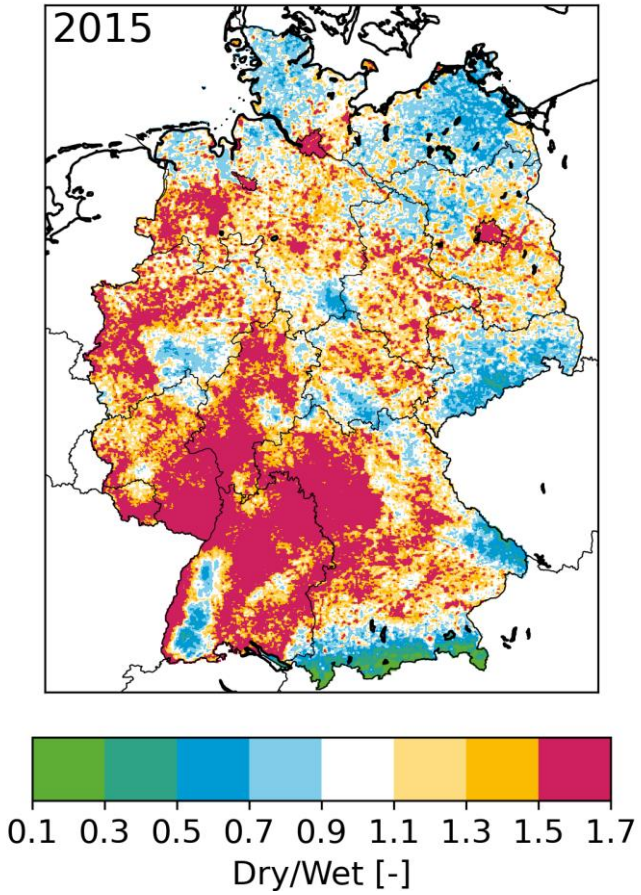
Trocken



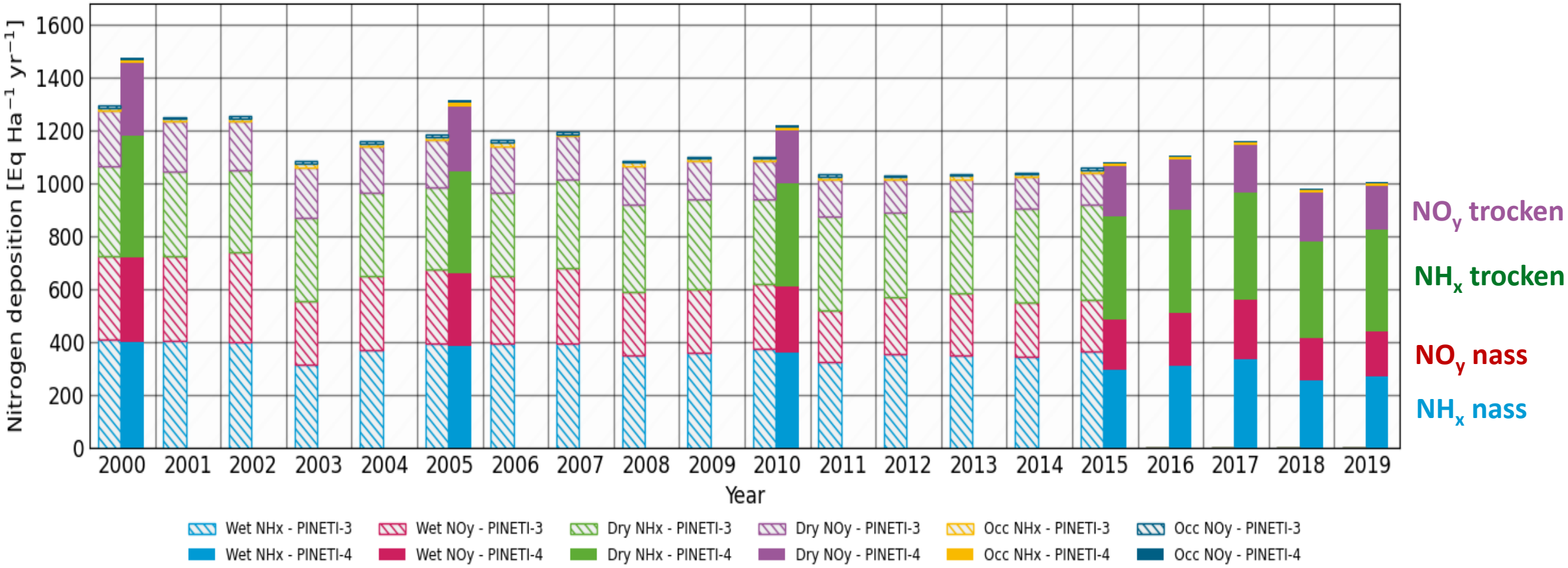
Nass



Trocken/Nass



Zeitreihe der Stickstoffdeposition – Vergleich PINETI-3 vs. PINETI-4

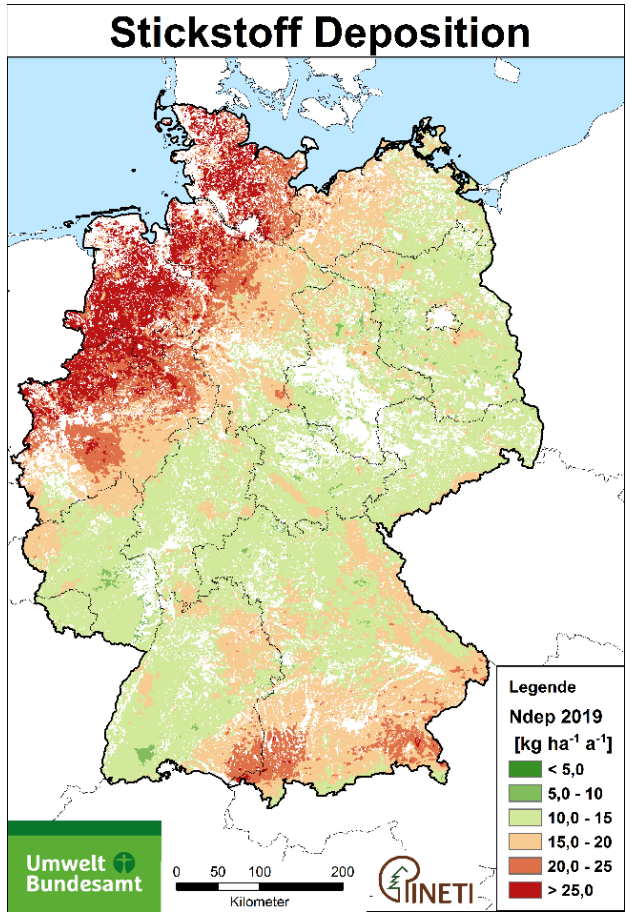


Bewertung der Wirkungen der Stickstoffdeposition

Critical-Load-Überschreitung

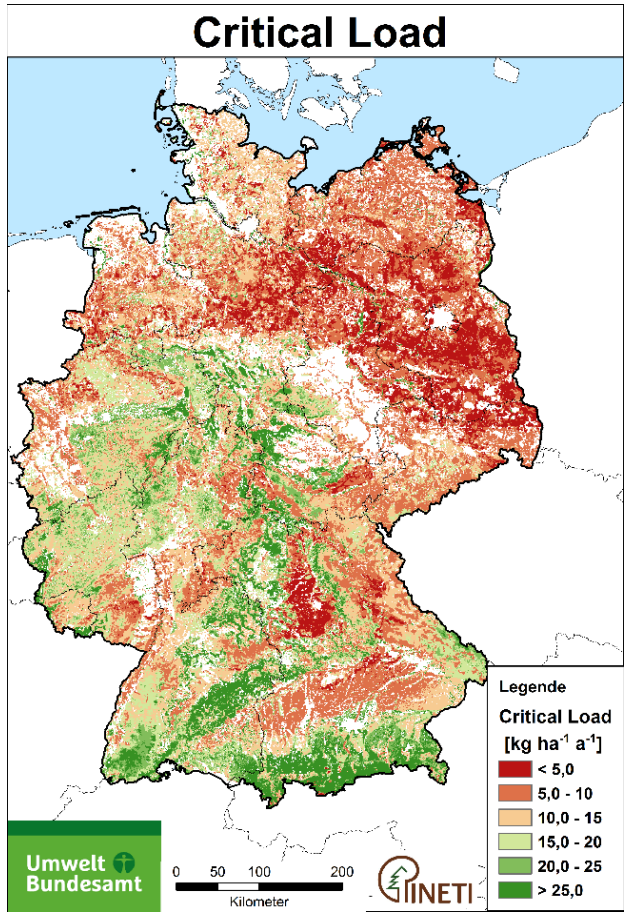
Stickstoffdeposition und Critical-Load-Überschreitung

Belastungssituation



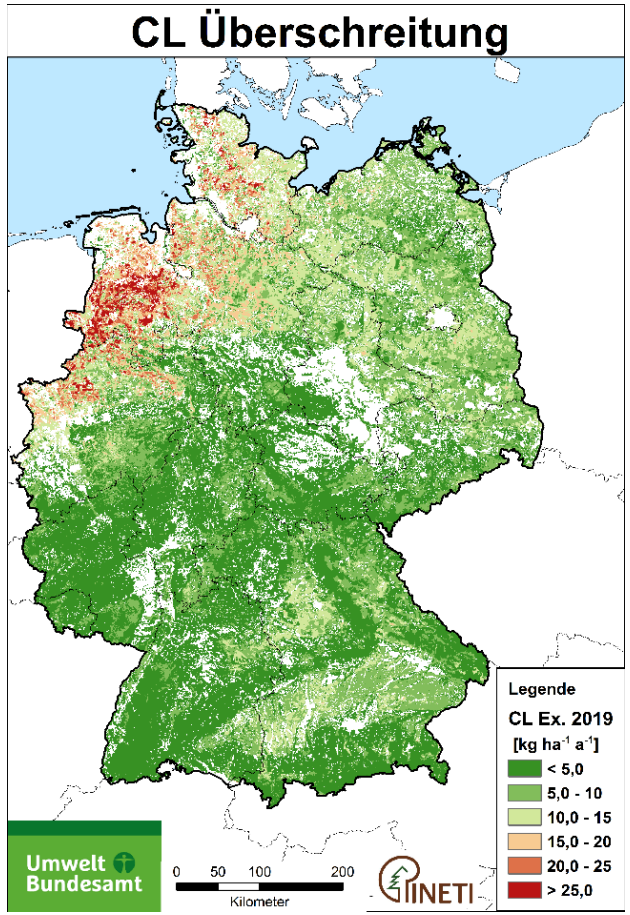
-

Empfindlichkeit der ÖS



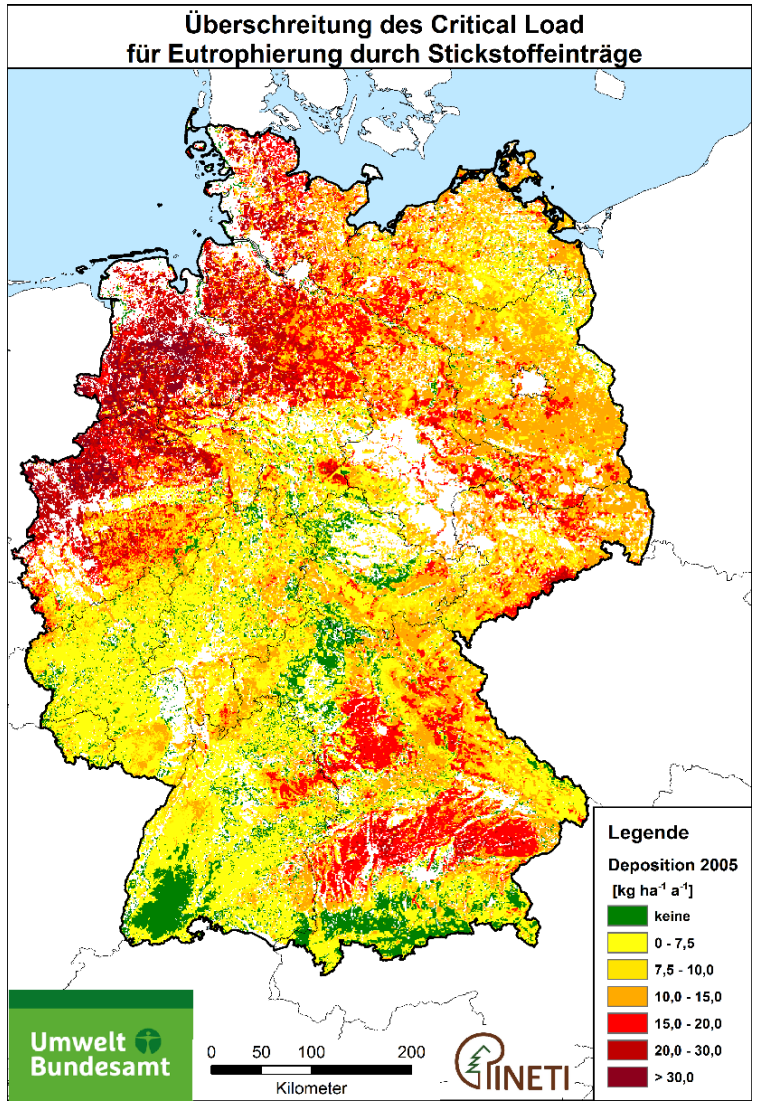
=

Risiko (Eutrophierung)

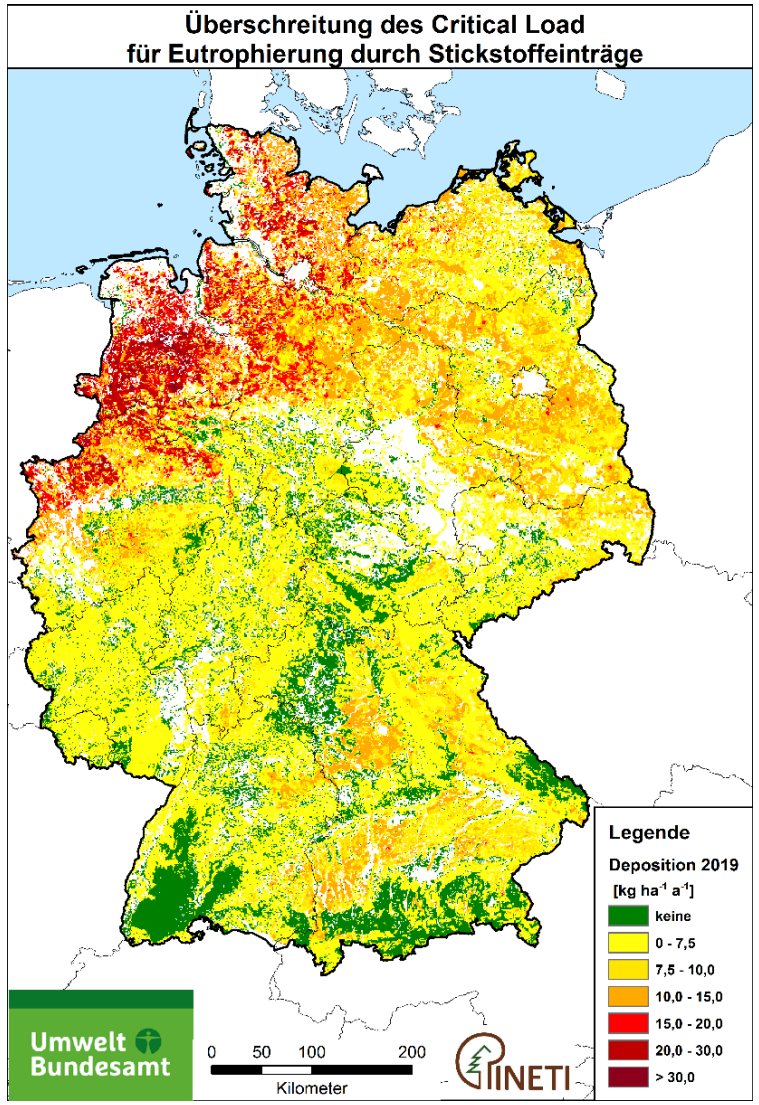


Überschreitung der Critical-Load für Eutrophierung

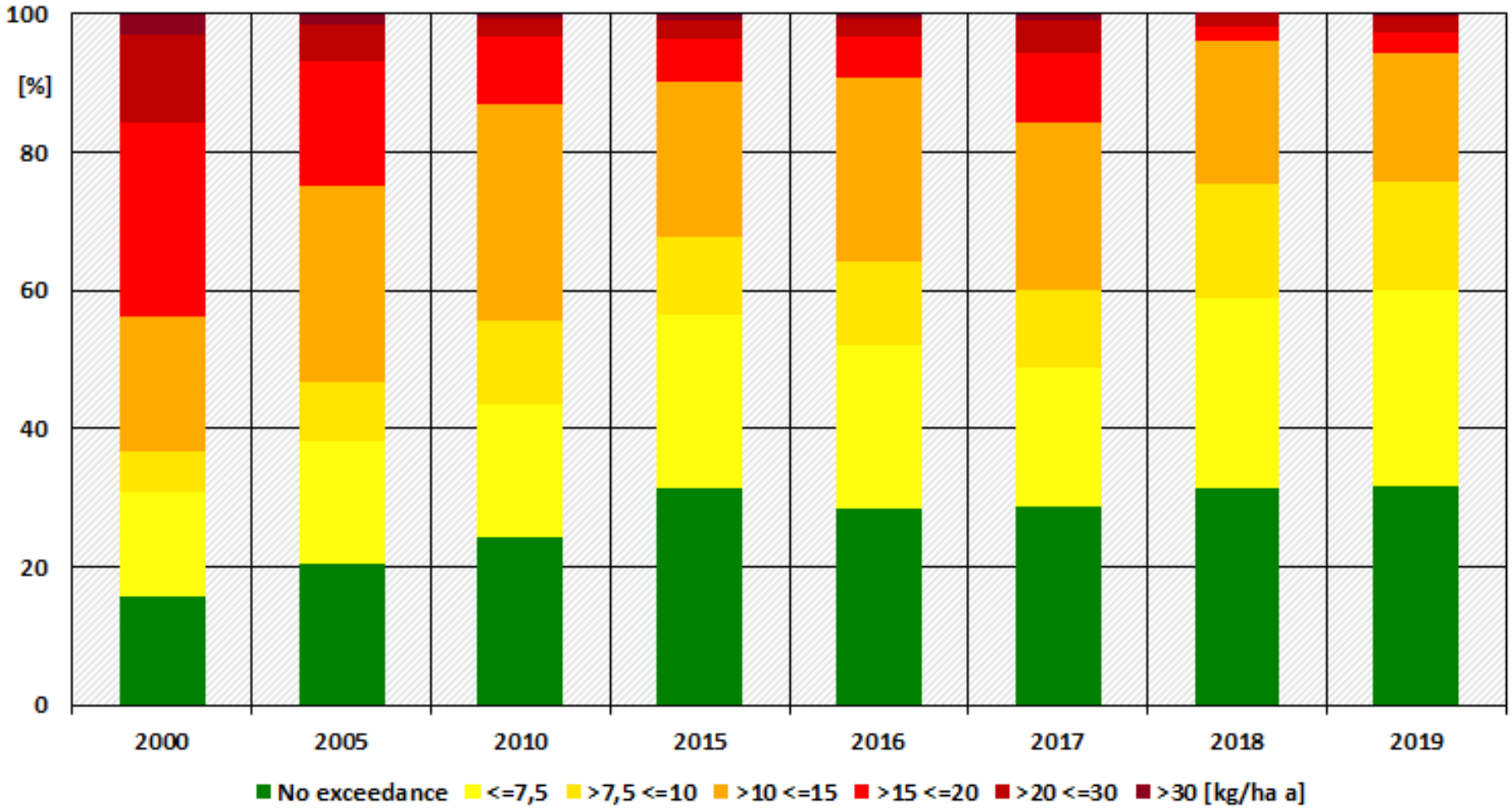
2005



2019



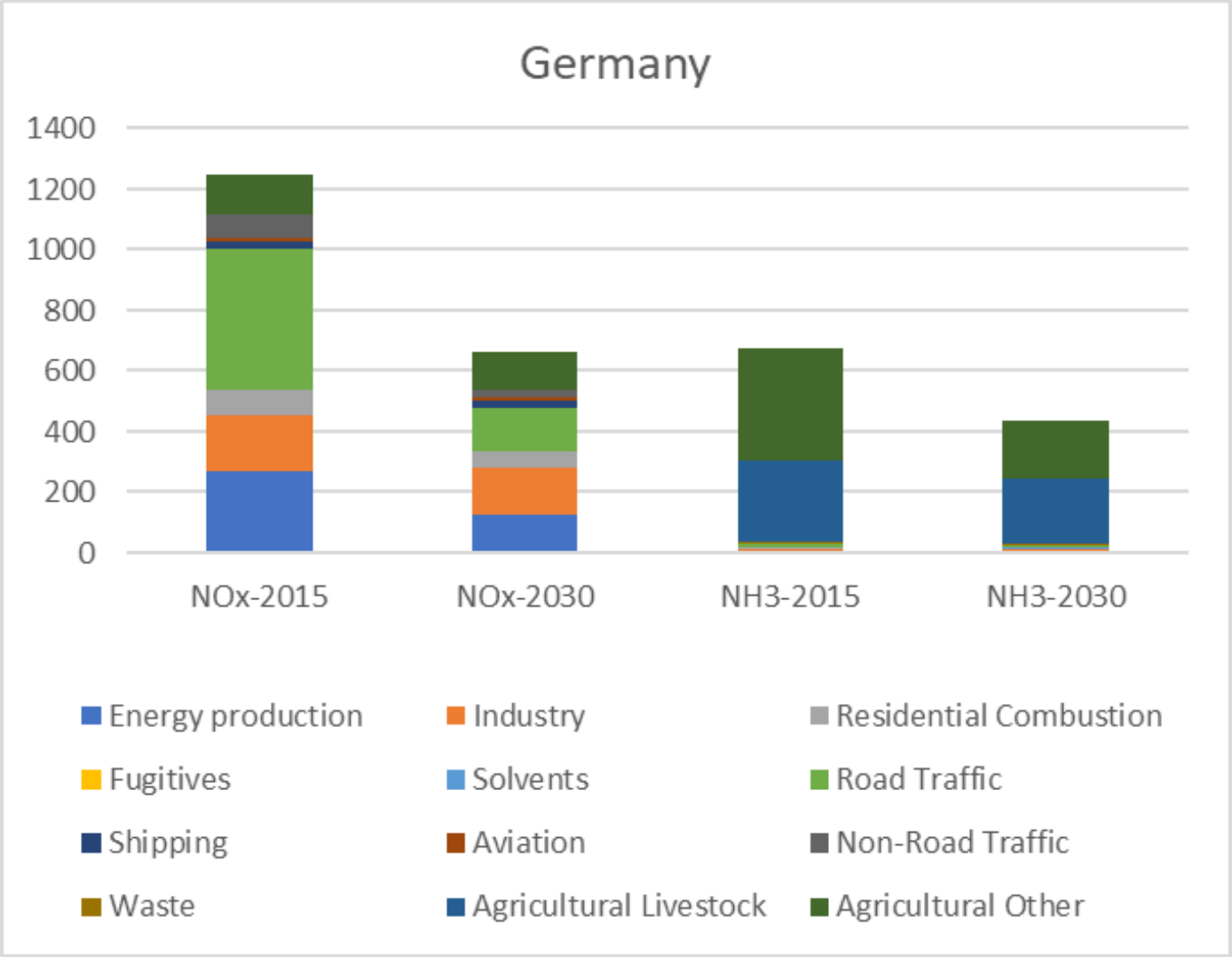
Anteil empfindlicher Ökosysteme mit Critical Load Überschreitung (Eutrophierung)



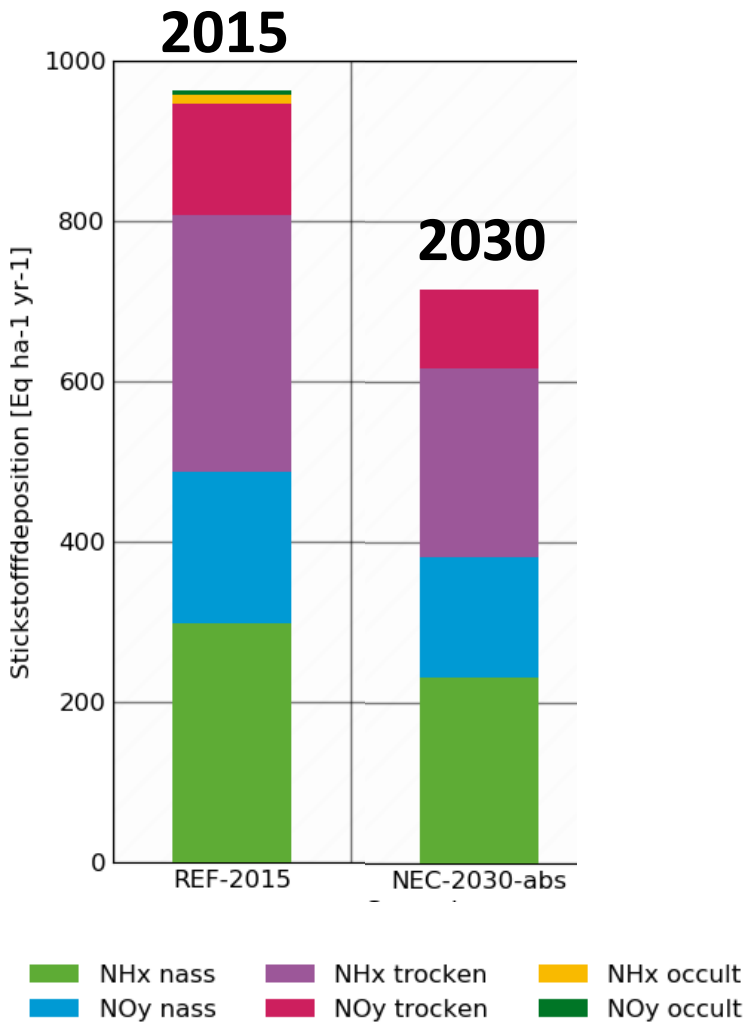
Source: Own Illustration

Entwicklung der Stickstoffdeposition unter Einhaltung der NEC-Ziele

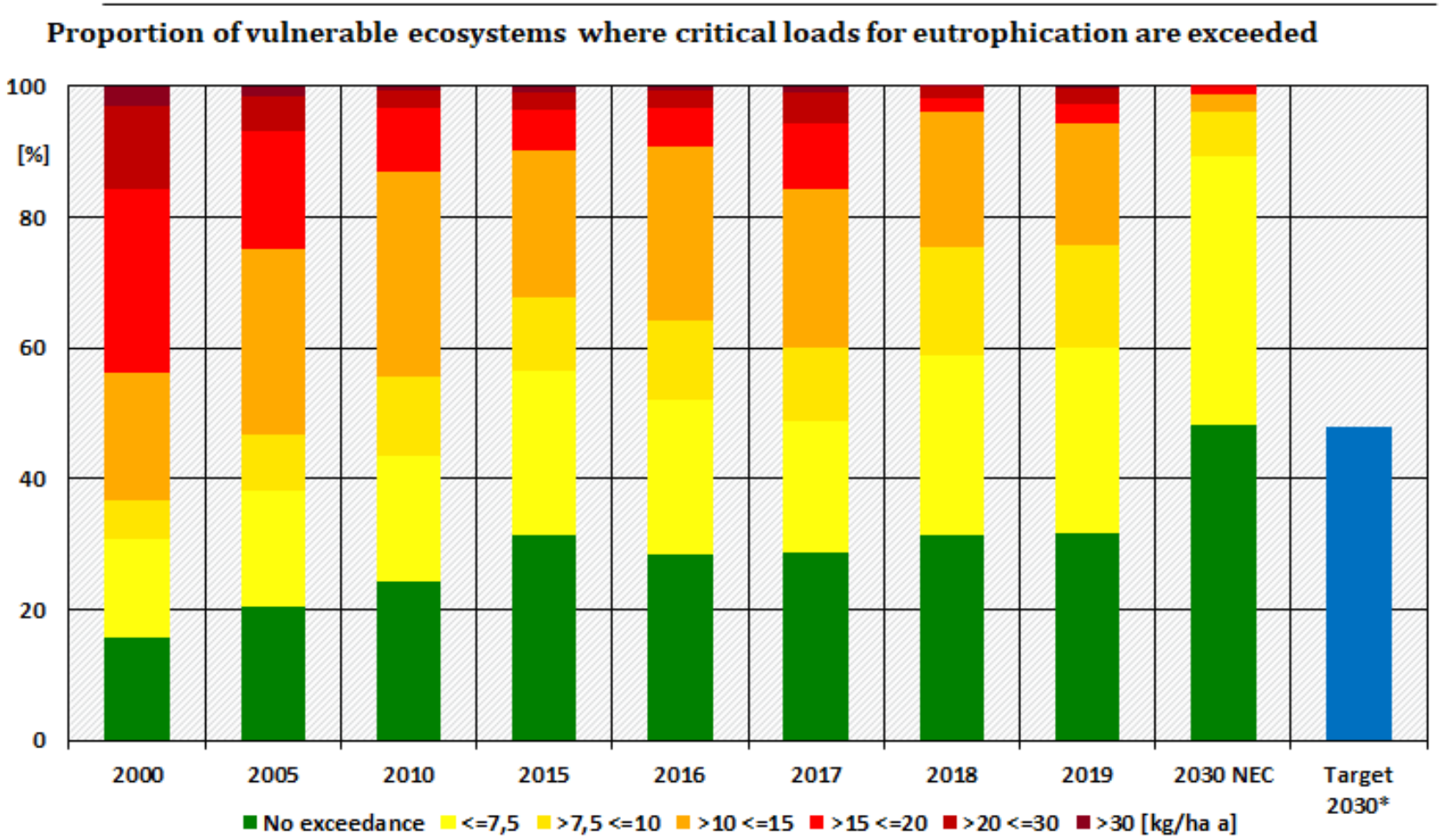
Emissionen für 2030 nach dem NEC-Szenario



N-Deposition



Critical Load Überschreitungen für Eutrophierung

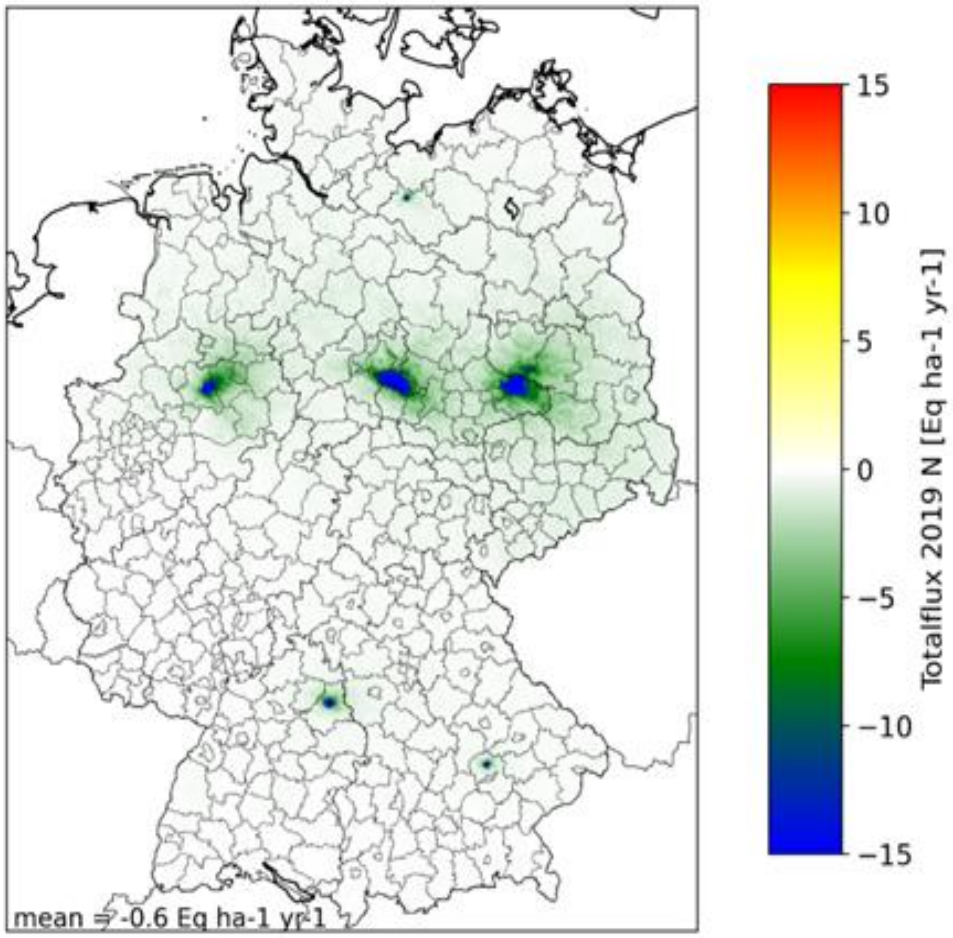


* Federal Government's Strategy for Sustainable Development: The proportion of land affected by excess nitrogen deposition should fall by 35 % between 2005 and 2030. Based on a value of 79 % in 2005, this gives a target value of 52 % for 2030.

Source: Own Illustration

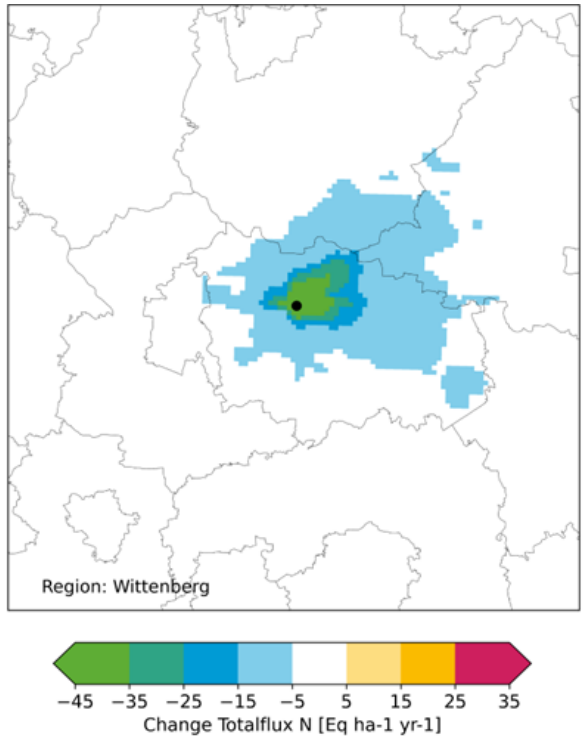
Einfluss einzelner Quellen auf die Stickstoffdeposition

Reduktion lokaler Emissionsquellen

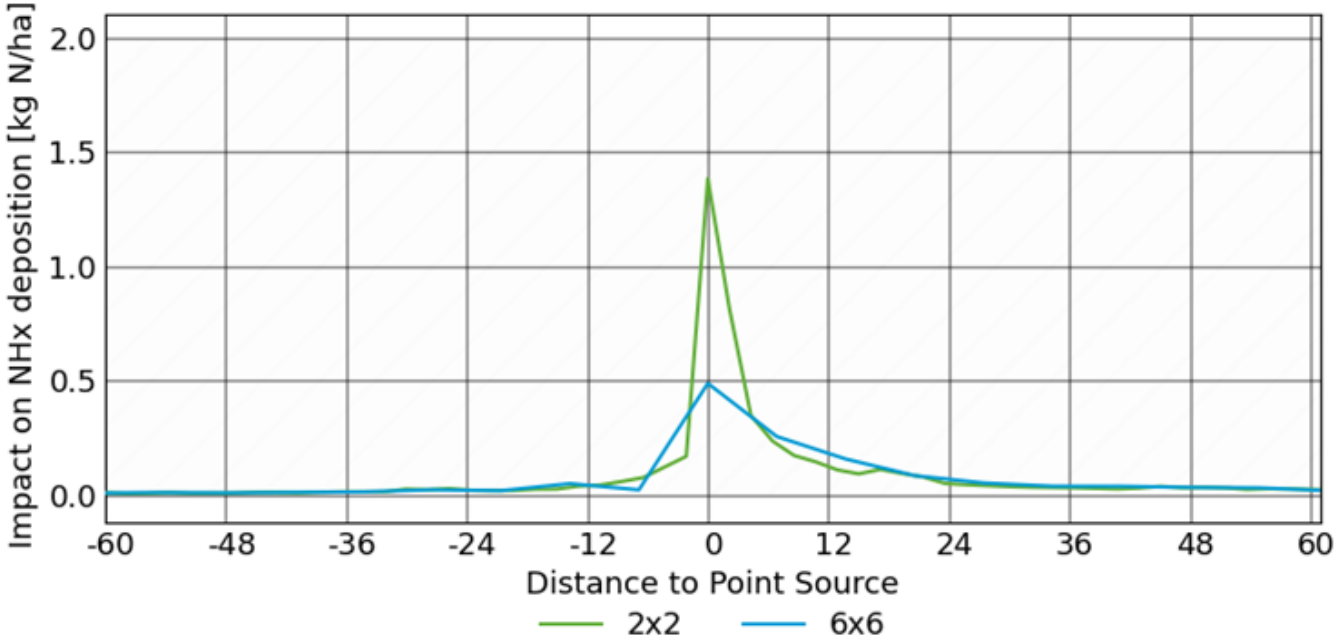


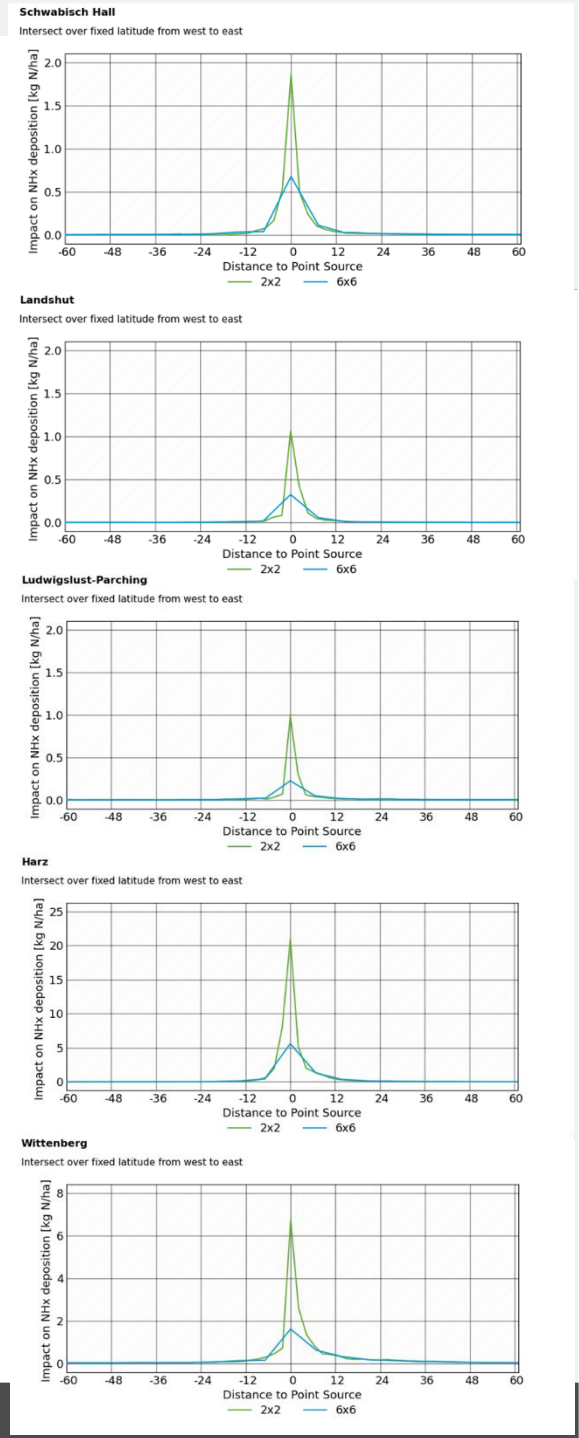
Region	NH_3 back-ground	Emission height	Type of facility	NH_3 [ton N]	NO_x [ton N]	Area km^2
Warendorf	High	Stack	Cement industry	162.2	95.8	1319
Schwäbisch Hall	Med-high	Surface	Poultry farm	27.4	0.0	1484
Landshut	Med-high	Surface	Swine farm	10.2	0.0	1413
Ludwigslust-Parchim	Low	Surface	Swine farm	9.3	0.0	4767
Harz	Low	Surface	Swine farm	233.9	0.0	2104
Wittenberg	Medium	Stack	Fertilizer industry	299.8	146.3	1932

Einfluss der horizontalen Auflösung



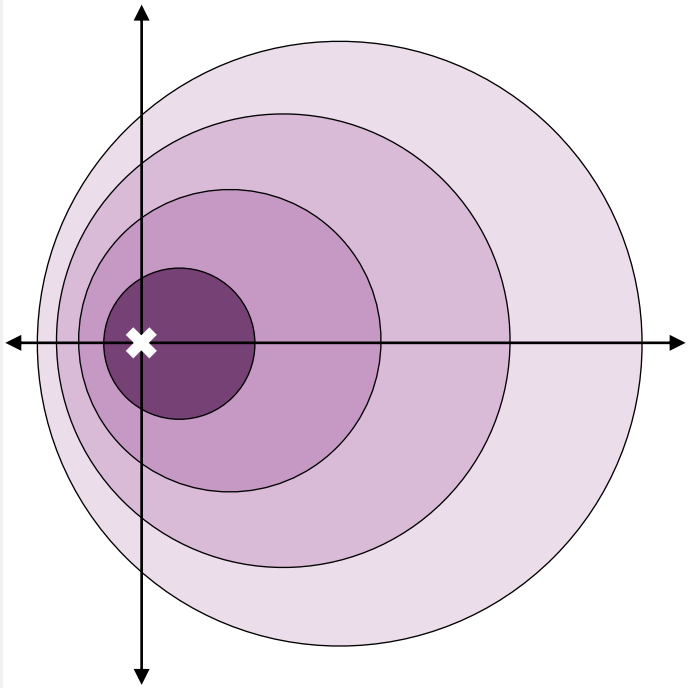
Warendorf, Schornstein, 162 ton/a NH_3

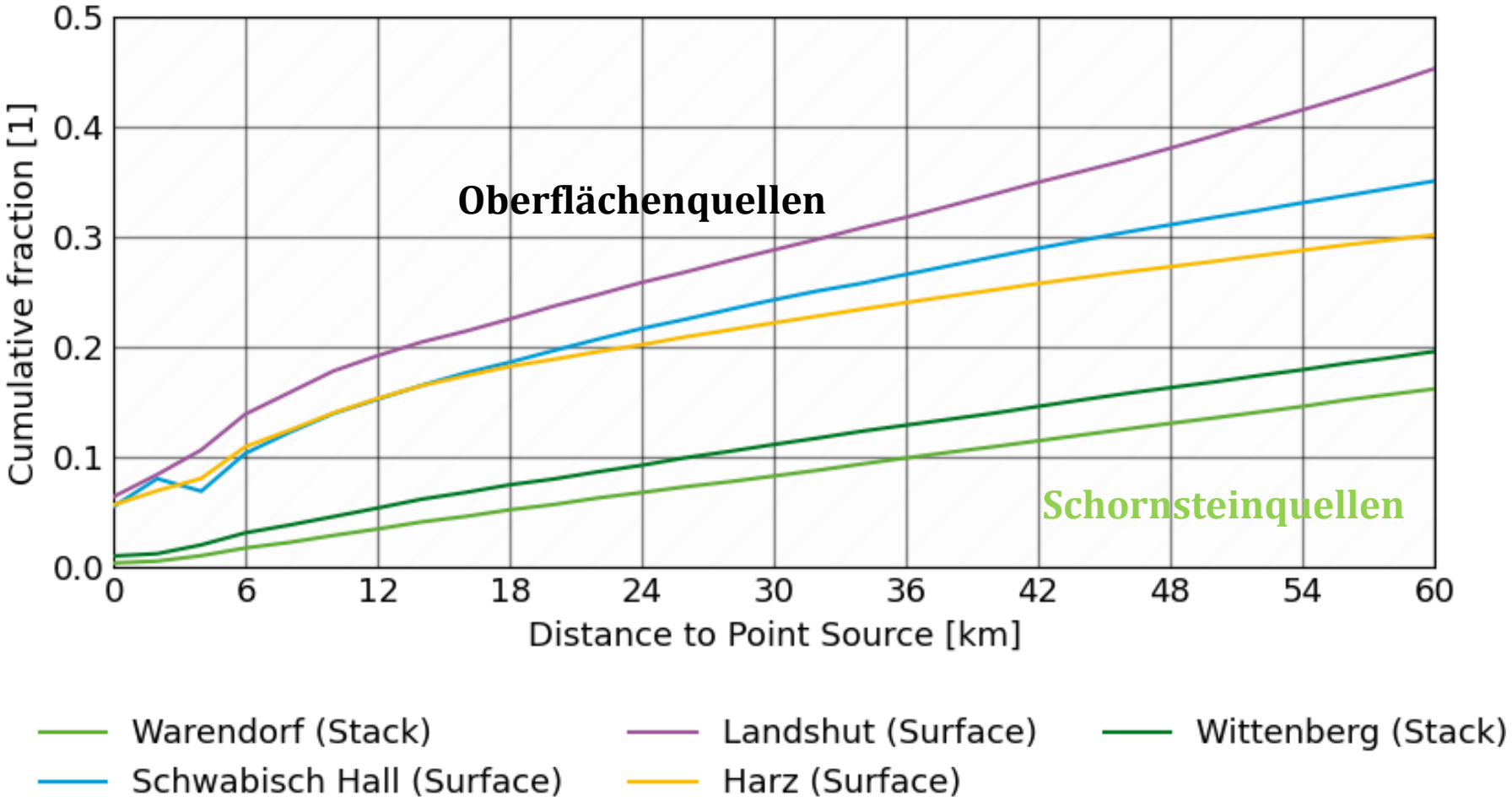




→ Erhöhte Auflösung hat Auswirkungen auf die Darstellung einzelner (großer) Emittenten
→ Nur Relevanz für Quellen, die auch ortsgenau im Emissionsinventar angeben sind.
→ Keine räumlichen Korrektur (Genehmigungsverfahren) Emissionen, die punktgenau in GRETA lokalisiert werden können

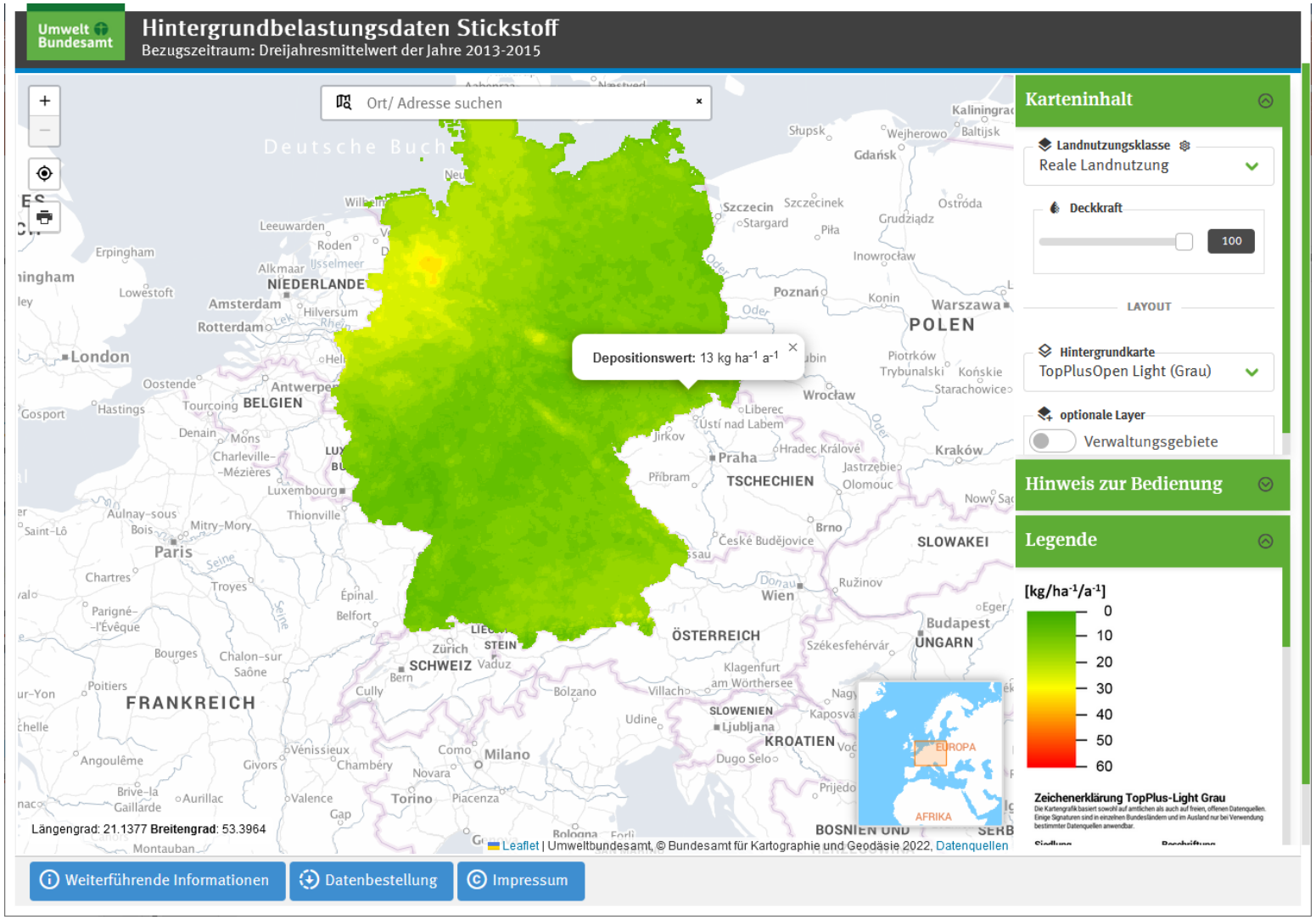
Anteil der Ammoniakemissionen, welcher bis zu einer bestimmten Entfernung zu einer Punktquelle deponiert





UBA-Kartendienst zur Stickstoffhintergrundbelastung

UBA-Kartendienst Hintergrunddeposition Stickstoff (aktuelle Version -> PINETI-3)



Alter (derzeitger) Kartendienst:

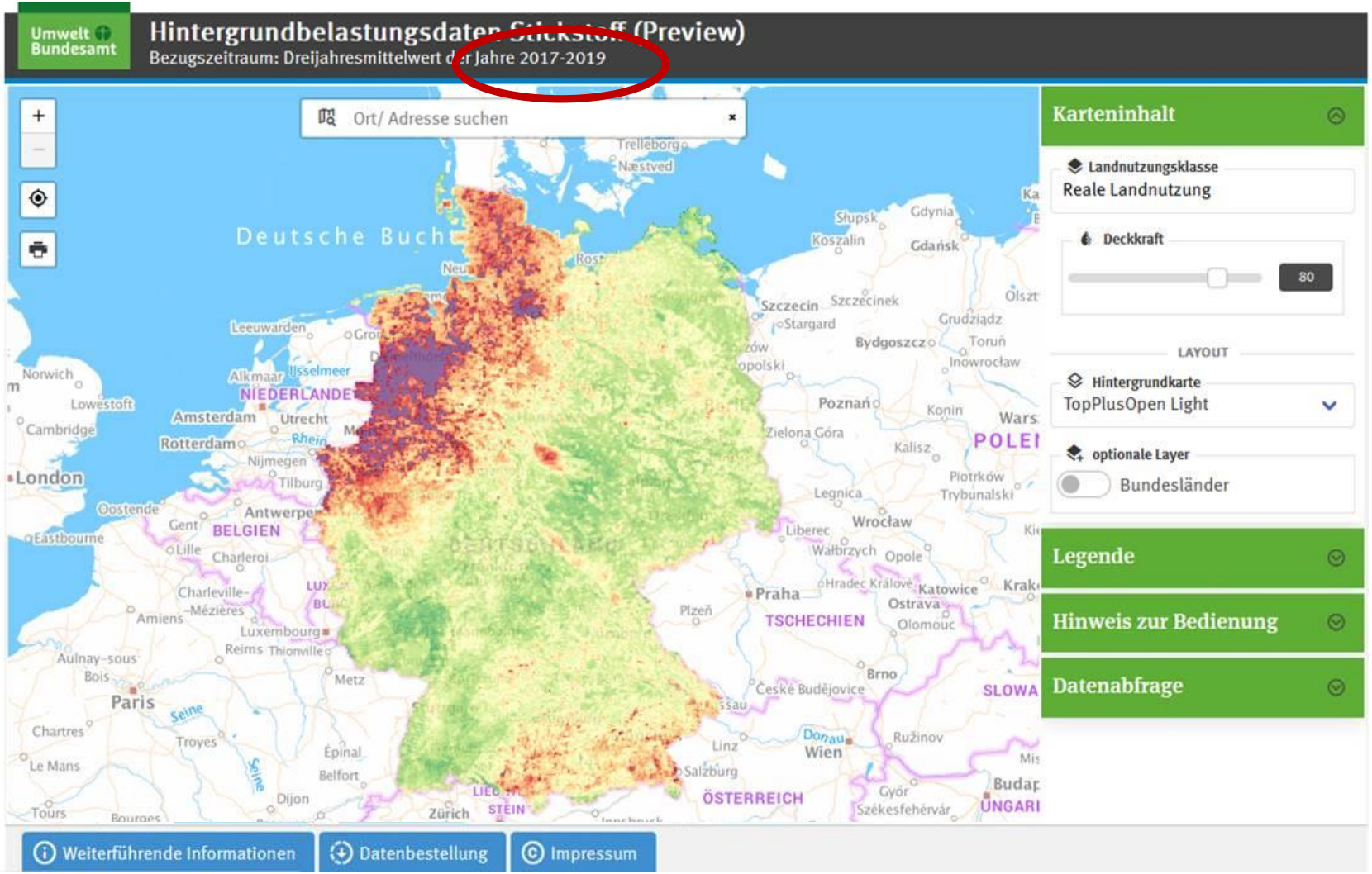
Datengrundlage: PINETI-3
3-Jahresmittel 2013-2015

Zusätzlich vorhandene Daten:

- Stoffe: Stickstoff reduziert, Stickstoff oxidiert, Schwefel (Sulfat), Basische Kationen
- Deposition: Trockene, nasse und feuchte Deposition
- Konzentrationen
- Zeitraum:
  - Einzeljahre 2000-2015

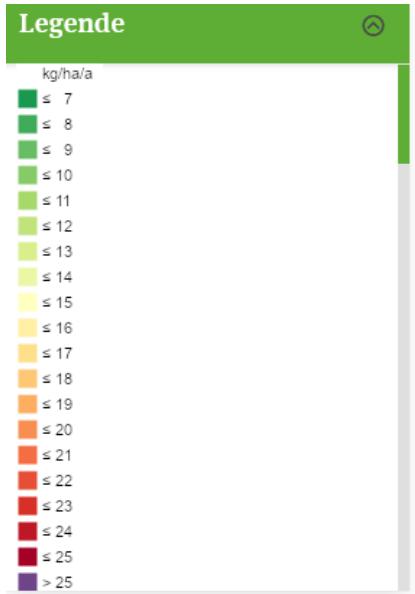
https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html

UBA-Kartendienst Hintergrunddeposition Stickstoff (zukünftige Version-> PINETI-4)



Neuer Kartendienst:
Datengrundlage: PINETI-4
3-Jahresmittel 2017-2019

Veröffentlichung mit Forschungsbericht (voraussichtl. Februar 2024)



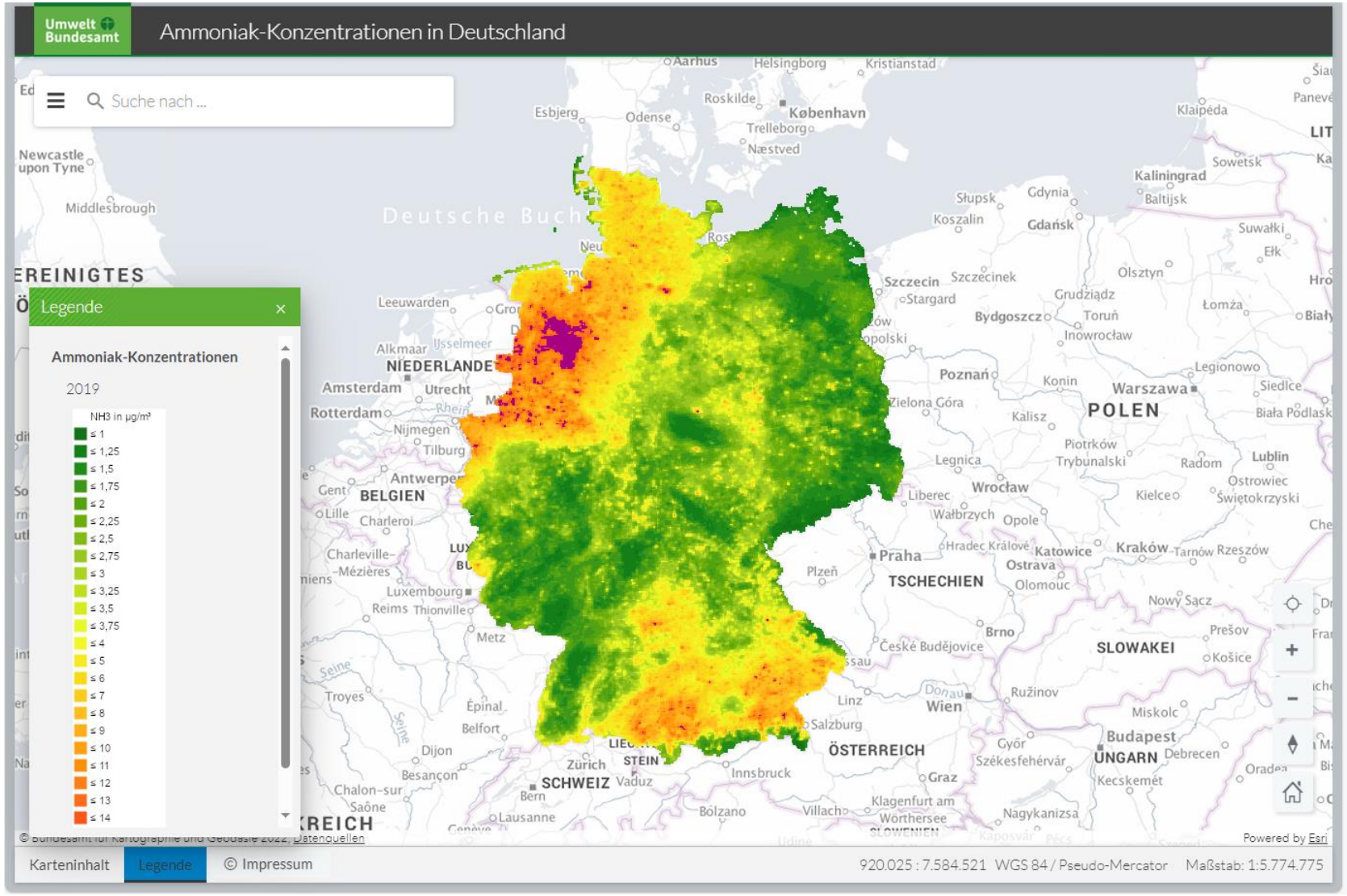
Zeitplan bis zur Veröffentlichung des neuen Kartendienstes

- Voraussichtl. Februar 2024: Veröffentlichung des PINETI-4 Abschlussberichts (Dokumentation neuer Methodik) als UBA-Text

- Zeitgleich: Launch des neuen Kartendienstes, inkl. Dokument mit Erläuterungen und FAQs

<u>LAI-Fachgespräch Stickstoffdeposition</u>
-> derzeitige Überarbeitung des Stickstoffleitfadens (Auftrag des LWV nach Inkrafttreten der neuen TA-Luft)

Verteilung der Ammoniak-Konzentration



<u>Neuer Kartendienst:</u>
Datengrundlage: PINETI-4
Einzeljahre 2000, 2005, 2010, 2015-2019

Veröffentlichung mit Forschungsbericht (voraussichtl. Februar 2024)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Alexander Moravek
alexander.moravek@uba.de

Fachgebiet II 4.3
Luftreinhaltung & terrestrische Ökosysteme