



Energy research Centre of the Netherlands

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

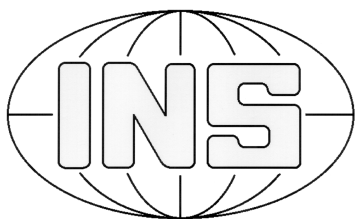
**Datenaufbereitung auf Basis von Daten und
Ergebnissen des BMU/UBA Forschungsvorhabens
204 63 252**

T. Gauger¹

A. Vermeulen²

¹ Universität Stuttgart

² Energy research Center of the Netherlands (ECN)



**Modellierung der Gesamt-Deposition
für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland**
Datenaufbereitung auf Basis von Daten und Ergebnissen
des BMU/UBA Forschungsvorhabens 204 63 252

Thomas Gauger¹, Alex Vermeulen²

¹ Universität Stuttgart,
Institut für Navigation (INS)
Breitscheidstraße 2,
70174 Stuttgart

² Energy research Center of the
Netherlands (ECN),
P.O. Box 1,
1755 ZG Petten,
The Netherlands

Im Auftrag des
Johann Heinrich von Thünen-Institut,
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI)
Institut für Waldökologie und Waldinventuren (WOI), Alfred-Möller-Str.1, 16225 Eberswalde



Universität Stuttgart

2009

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland – Datenaufbereitung auf Basis von Daten und Ergebnissen des BMU/UBA Forschungsvorhabens 204 63 252 (Gauger et al. 2008)

Fragestellung und Aufgabe

Beim Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei – Institut für Waldökologie und Waldinventuren (vTI-WOI) besteht Bedarf an Daten des atmosphärischen Eintrags von Luftinhaltsstoffen (Deposition) für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland. An diesen Standorten liegen verschiedene weitere Erkenntnisse zur Charakterisierung und Bilanzierung der Ökosysteme vor. Die Erfassung der Gesamten atmosphärischen Deposition, d.h. der gesamten Erfassung aller atmosphärischen Teilflüsse in die Wald-Standorte, ist wesentlich zur Beschreibung der stofflichen Flüsse in diesen Ökosystemen. Die Modellierung der Gesamtdeposition für alle Waldflächen von Interesse in Deutschland ist ein ergänzender Beitrag zu Daten des umfangreichen Umweltmonitoring im Wald. Sie sollen für weitere integrierende Auswertungen im Zusammenhang mit der Bodenzustandserhebung zur Verfügung stehen, um den Zusammenhang zwischen Luftverunreinigungen und Wald- / Bodenzustand zu klären.

Die Koordinaten der Standorte und Angaben zum Bestand (Kennungen, Bestandestyp: Laub-, Nadel- oder Mischwald und Bestandeshöhe) sind vom vTI-WOI in einer eigenen Datei zusammengestellt und für die Bearbeitung zur Verfügung gestellt worden.

Die Modellierung der Deposition auf Ökosystemebene erfasst die nasse, trockene, feuchte Deposition. Die Summe dieser drei Flüsse ist die Gesamt-Deposition. Die angewendeten Modell-Verfahren beruhen auf einer geprüften und international anerkannten Methodik und entsprechen dem Stand der Wissenschaft.

Die erfassten Spezies, für die Depositionsfrachten zur Verfügung gestellt werden, sind:

Natrium (Na), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Chlorid (Cl), freie Protonen i.d. Nassdeposition (H), Stickstoff oxidierter Stickstoffverbindungen ($\text{NO}_Y\text{-N} = \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{HNO}_3$), Stickstoff reduzierter Stickstoffverbindungen ($\text{NH}_X\text{-N} = \text{NH}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$), Schwefel oxidierter Schwefelverbindungen ($\text{SO}_X\text{-S} = \text{SO}_2\text{-S} + \text{SO}_4\text{-S}$).

Die Berechnung und Datenzusammenstellung erfolgt für die Bezugsjahre 1995, 1997 und 1999-2004.

Die Gesamtdeposition ist als Summe der betrachteten drei Teil-Depositionsflüsse zu berechnen:

Gesamtdeposition = Nassdeposition + Trockendeposition + Feuchte Deposition

Die Daten werden als EXCEL-Tabellen aufbereitet und übergeben. Dieser Begleitbericht enthält Methoden- und Ergebnisbeschreibung sowie Fehlerdiskussion.

Umsetzung der Modellierungsaufgabe

Nasse Deposition

Betrachtete Spezies:

Ca, Cl, K, Mg, Na, H, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, N ($= \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$), $\text{SO}_4\text{-S}$.

Die Nasse Deposition ist rezeptorunabhängig. Bestimmende Prozesse für die Konzentration einzelner Spezies im Niederschlag sind die Befruchtung der Tropfen mit Spezies aus der Atmosphäre in der Regenwolke vor dem Niederschlagsereignis (in-cloud scavenging), und die Auswaschung von Spezies durch den fallenden Niederschlag aus der Atmosphäre während des Niederschlagsereignisses (below-cloud scavenging). Der flächenbezogene Eintrag der Nassdeposition lässt sich aus flächenhaft berechneter Niederschlagsmenge und flächenhaft berechneter Konzentration im Niederschlag bestimmen.

Die Nassdeposition für die Wald-Standorte von Interesse werden aus vorliegenden im Forschungsvorhaben BMU/UBA 204 63 252 (Gauger et al. 2008) berechneten $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster-Karten ermittelt, bzw. aus diesen Deutschland-Karten nach den gegebenen Koordinaten lagetreu „ausgestochen“.

Die Datengrundlagen der im Forschungsvorhaben BMU/UBA 204 63 252 (Gauger et al. 2008) berechneten $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster-Karten sind Freiland-Daten des Depositionsmonitoring in Deutschland und einiger Stationen im benachbarten Ausland (A, CZ, P) in grenznaher Lage. Wesentliche Messnetze in Deutschland sind die Messnetze des Forstlichen Monitoring in den einzelnen Bundesländern (Level II und weitere Stationen), Messnetze des Immissionsschutzes und ggf. der Wasserwirtschaft sowie Messungen weiterer Forschungsinstitutionen. Die Daten (Jahresfrachten, Niederschlagsmengen, Niederschlagskonzentrationen) werden bei den Messnetzbetreibern angefragt und nach der Datenbereitstellung in einer Datenbank am Institut für Navigation der Universität Stuttgart gespeichert.

Die flächenhafte Kartierung der Nassdeposition basiert auf Monitoringdaten und wird an der Universität Stuttgart modelliert. Die flächendeckende Modellierung von Konzentrationen im Niederschlag und Depositionsfrachten erfolgt mithilfe eines Geographischen Informations-Systems (ArcGIS, ArcInfo).

Die Modellierung erfolgt in 6 Bearbeitungsschritten:

- (1) Pre-Processing der Inputdaten: gelieferte Daten der einzelnen Messstationen erhalten eine Kenn-Nummer (ID) und werden einheitlich aufbereitet, so dass sie für alle betrachteten Spezies als Niederschlagskonzentrationen [$\text{meq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$] vorliegen. Daten aus Bulk-Depositionsmessungen werden mit Hilfe von Korkturfaktoren (mittleres Verhältnis bulk/wet-only) aus Parallelmessungen in Deutschland auf den nass deponierten Eintrag reduziert (Tabelle 1). Die Lage-Koordinaten werden einheitlich auf Dezimalgrad umgerechnet. Zur Berechnung der Konzentration im Niederschlag aus den Jahresfrachten [$\text{in kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] werden primär die mitgelieferten Niederschlagsmengen verwendet. Sollten diese nicht vorliegen, wird

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

auf die Jahresniederschläge des DWD am Koordinatenpunkt der Messstation zurückgegriffen. Zur Identifizierung von unplausiblen Datenreihen werden Ionenbilanzen der Summen von An- und Kationen berechnet und in der Datenbank abgelegt; unplausible Datenreihen werden von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen (Ausschlusskriterium: Abweichung $> \pm 20\%$).

Außerdem werden unplausibel hohe Werte („Ausreißer“) einzelner Spezies mit dem ‚4-Sigma-Test‘ identifiziert und ebenfalls von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen

(Ausschlusskriterium: Werte $> \text{Mittelwert} + 4 \cdot \text{Standardabweichung}$ aller Daten).

- (2) Die Daten werden in das GIS eingelesen und es werden Punkt-Karten generiert. Die Lage der Mess-Punkte ist durch die Koordinaten jeder Freiland-Messstation gegeben, die vorliegenden jährlichen Niederschlagskonzentrationen sind als Attribute (Werte) mit der Lage der Punkte über eine ID verknüpft.
- (3) Die Daten von nah nebeneinander liegenden Messpunkten werden gemittelt: die mittlere Konzentration im Niederschlag wird für alle Datenpunkte innerhalb $5 \times 5 \text{ km}^2$ berechnet.
- (4) Berechnung von Flächendeckenden Konzentrationsfeldern der einzelnen Spezies [$\text{meq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$] in ein $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster über Deutschland mithilfe der Kriging-Technik (Kriging-Interpolation, vgl. Abbildung 1, linke Karte).
- (5) Berechnung der Depositionsfrachten: Mit Hilfe von räumlich hoch aufgelösten Niederschlagskarten des DWD (Jahresniederschlag im $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster; vgl. Abbildung 1, mittlere Karte) [$\text{l m}^{-2} \text{ a}^{-1}$] werden aus den Niederschlagskonzentrationen [$\text{meq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$] Felder der Depositionsfrachten [$\text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] im $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster berechnet (vgl. Abbildung 1, rechte Karte).
- (6) Für Spezies, die meeresbürtige Anteile besitzen (Ca, K, Mg, Cl, $\text{SO}_4\text{-S}$), wird eine Seesalzkorrektur berechnet. Dabei wird angenommen, dass deponiertes Na ausschließlich aus dem Seesalz stammt. Unter Verwendung der Anteile von Na zu den übrigen meeresbürtigen Spezies im Meerwasser (Tabelle 2) werden die Nassdepositionsfelder korrigiert. Die so berechneten Nicht-Seesalz Depositionsflüsse ($\text{Ca}_{(\text{nss})}$, $\text{K}_{(\text{nss})}$, $\text{Mg}_{(\text{nss})}$, $\text{Cl}_{(\text{nss})}$, $\text{SO}_4\text{-S}_{(\text{nss})}$) sind überwiegend anthropogenen Emissionsprozessen zuzuordnen.

Tabelle 1: Mittlere Verhältnisse von wet-only und bulk Depositionsflüssen in Deutschland (Gauger et al. 2008)

	K	Ca	Mg	Na	SO ₄ -S	Cl	NO ₃ -N	NH ₄ -N	pH	Nieder-schlag	H
Parallelmessungen, n =	66	65	67	67	87	54	86	79	35	54	37
Mittleres Verhältnis wet-only / bulk	0.62	0.63	0.76	0.81	0.82	0.85	0.90	0.95	0.97	1.03	1.34
Maximum	1.44	1.77	1.36	1.47	1.07	1.42	2.01	1.79	1.06	3.00	3.17
Minimum	0.09	0.21	0.18	0.22	0.26	0.32	0.30	0.29	0.83	0.84	0.48
Standardabweichung	0.24	0.24	0.25	0.20	0.17	0.19	0.22	0.25	0.06	0.29	0.62

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Table 2: Verhältnisse von S, Cl, Ca, K, and Mg zu Na im Meerwasser [eq/eq] und Berechnung von nicht-Seesalz Einträgen (ICP Modelling&Mapping 2004)

Na_{sw}/Na_{sw}	Ca_{sw}/Na_{sw}	Mg_{sw}/Na_{sw}	K_{sw}/Na_{sw}	S_{sw}/Na_{sw}	Cl_{sw}/Na_{sw}
1	0,043	0,278	0,021	0,120	1,166
--	$Ca_{nss} = Ca_{dep} - (Na_{dep} \cdot 0,043)$	$Mg_{nss} = Mg_{dep} - (Na_{dep} \cdot 0,278)$	$K_{nss} = K_{dep} - (Na_{dep} \cdot 0,021)$	$S_{nss} = S_{dep} - (Na_{dep} \cdot 0,120)$	$Cl_{nss} = Cl_{dep} - (Na_{dep} \cdot 1,166)$

Die Daten für die Punkte der ausgewählten Waldstandorte (angegebene Koordinaten in der Datenübermittlung des vTI-WOI) werden der vorhandenen Kartierung (1x1km² Rasterkarten) mittels GIS ortsgenau entnommen (aus den Karten ausgestochen). Die Datenzusammenstellung erfolgt für die Bezugsjahre 1995, 1997 und 1999-2004.

Die angegebenen Einheiten aller Spezies (Ca, Cl, K, Mg, Na, NH₄-N, NO₃-N, N (= NH₄-N + NO₃-N), SO₄-S, Azidität (=NH₄-N + NO₃-N + SO₄-S) sind [eq ha⁻¹ a⁻¹]

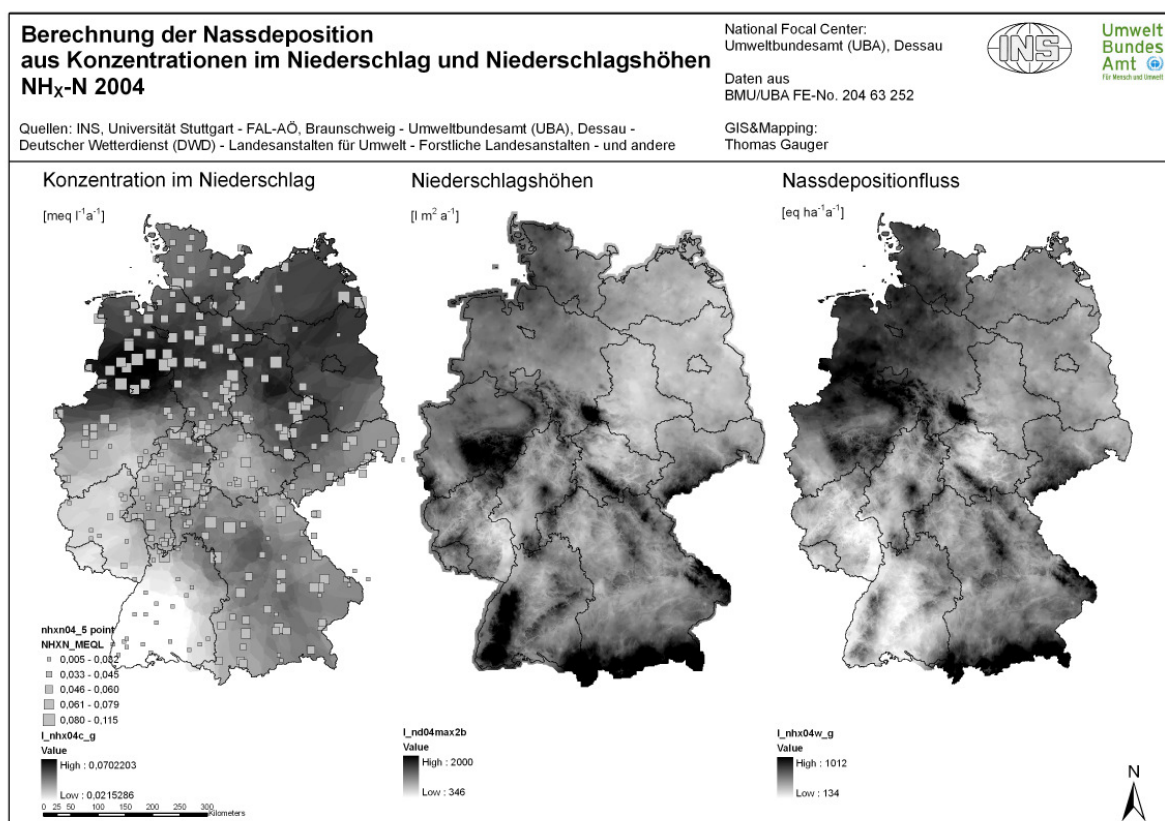


Abbildung 1: Illustration der flächenhaften Berechnung der Nassdeposition (Bsp. NH_x-N 2004)

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Qualitätssicherung und Fehlerdiskussion der Nassdeposition

Die Validierung der Kartierungsergebnisse der Nassdeposition erfolgt in der Regel in drei Schritten, durch

- (1) einen Konsistenztest, der durch die flächenhafte Berechnung der Ionenbilanz der Hauptkomponenten im Niederschlag erfolgt. Hierbei wird flächenhaft die Qualität der $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ -Raster-Datensätze geprüft.
- (2) den Vergleich zwischen Kartenwerten und Monitoringdaten am Ort der Messpunkte.
- (3) die Überprüfung des Kriging-Fehlers (Gauger et al., 2008).

Der Vergleich zwischen Messwert aus dem Depositionsmonitoring und dem entsprechenden Rasterwert in der flächenhaft modellierten Karte der Nassdeposition 2004 für Stickstoffspezies ist in den Streudiagrammen der Abbildung 2 dargestellt.

Als Größenordnung der Fehler bei der Messung sind etwa $\pm 30 \%$ zugrunde zu legen (Erisman et al., 2003). Je höher die Variation der Messergebnisse innerhalb kurzer Distanz, das heißt u. a. je geringer die räumliche Gültigkeit der Messung ist, und je ungleichmäßiger die Messdaten über die Fläche verteilt sind, desto größer sind die Nivellierungen durch die flächendeckende Modellberechnung und damit die Verhältnisse zwischen Mess- und Kartenwert. Die größten Unterschiede treten i. d. R. dort auf, wo relativ hohe Niederschlagsraten bei gleichzeitig geringen Konzentrationen vorkommen. Das Modellierungs- und Kartierungsergebnis für Nitrat- ($\text{NO}_y\text{-N}$), Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_x\text{-N}$) und für Gesamtstickstoff (N) - als Summe der beiden Stickstoffspezies - liefert gut übereinstimmende Ergebnisse. In Abbildung 2 bleibt folglich die Streuung der Werte um das Verhältnis 1:1 zwischen Mess- und Kartenwert recht eng und die Korrelationen der Wertepaare ($r > 0,56$) sind relativ hoch. Bei ca. 80 % der Modellwerte für Gesamtstickstoff sind die Abweichungen vom gemessenen Wert geringer als $\pm 30 \%$.

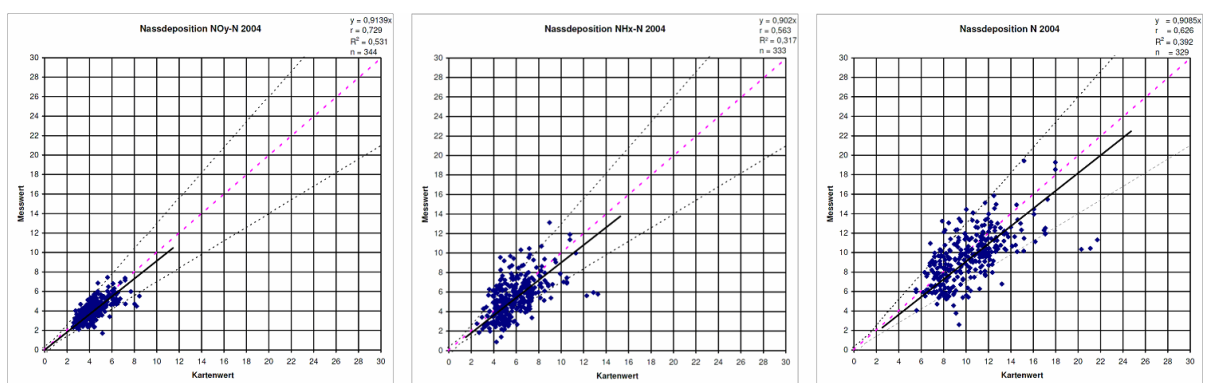


Abbildung 2: Vergleich von Karten- und Messwerten der nassen Depositionsfrachten von Ammonium-, Nitrat- und Gesamtstickstoff im Jahr 2004 [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]

Trockene Deposition versauernd und eutrophierend wirkender Luftinhalstoffe

Die Modellierung der Trockenen Deposition erfolgt mit dem IDEM-Modell (Integrated DEposition Model) bei ECN in Petten, NL. Die Modelberechnung der trockenen Deposition an ausgewählten Waldstandorten in Deutschland erfolgt anhand der punktgenauen Bestandeshöhen (Inventurdaten der Bodenzustandserhebung).

Datengrundlage der Modellierung mit IDEM sind die Modellergebnisse der Modellierungen der atmosphärischen Konzentrationen mit dem LOTOS-EUROS Modell (Long Term Ozone Simulation; EUROpean Operational Smog Model) bei TNO in Utrecht (früher Apeldoorn), NL. Ausgangsdaten für die Modellierung im Chemie-Transport-Modell LOTOS-EUROS (www.lotos-euros.nl) sind Emissionsdaten aller erfassten Sektoren aus dem Emissionskataster. Die Berechnung der atmosphärischen Konzentrationen erfolgt zeitlich hoch aufgelöst (3 Stunden Mittelwerte), um auch relevante Tagesgänge der Emissionen in den Modellergebnissen abbilden zu können. Die betrachteten und mit LOTOS-EUROS berechneten Spezies sind NO, NO₂, NO₃, HNO₃, NH₃, NH₄, SO₂ und SO₄.

Die Konzentrationsfelder aus der Berechnung mit LOTOS-EUROS werden bei der Bereitstellung zur Berechnung der Trockendeposition mit IDEM in ein einheitliches 1x1 km² Rasterformat durch Anwendung räumlicher Interpolation (Inverse Distance Weighting, IDW) übertragen.

Mit IDEM werden aus den atmosphärischen Konzentrationen die Trockendepositionsflüsse für die Spezies NO, NO₂, NO₃, HNO₃, NH₃, NH₄, SO₂ und SO₄ bearbeitet. Die Ergebnisse werden zu Trockendepositionsflüssen von Stickstoff aus oxidierten Stickstoffverbindungen ($\text{NO}_Y\text{-N} = \text{NO-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{HNO}_3\text{-N}$), von Stickstoff aus reduzierten Stickstoffverbindungen ($\text{NH}_X\text{-N} = \text{NH}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$), von Gesamtstickstoff ($\text{N} = \text{NO}_Y\text{-N} + \text{NH}_X\text{-N}$) und Schwefel aus oxidierten Schwefelverbindungen ($\text{SO}_X\text{-S} = \text{SO}_2\text{-S} + \text{SO}_4\text{-S}$) aggregiert.

Meteorologische Input-Daten des IDEM-Modells zur Berechnung der Trockendeposition stammen aus der Bereitstellung durch ECMWF MARS (European Centre for Medium Range Forecasts Meteorological Archival Retrieval System) in einer räumlichen Auflösung von 0,5°x0,5° (ca. 35x55 km²) mit einem Mittelungszeitraum im Zeitintervall von 3 Stunden. Auch diese Datensätze werden in ein einheitliches 1x1km² Rasterformat durch Inverse Distance Weighting (IDW) überführt.

Für die basischen Kationen Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Natrium sowie den um Seesalzanteile korrigierten Spezies (Ca_{nss} , K_{nss} , Mg_{nss} ; nss = ‚nicht-seesalz‘) liegen – auf Grund noch fehlender geeigneter Emissionsdaten für Seesalz-Spezies – bisher noch keine verwendbaren Konzentrationsfelder aus LOTOS-EUROS Modellergebnissen vor. Deshalb wird auf die Kartierungsergebnisse der Nassdeposition als Datenbasis zur Modellierung der Trockendeposition der basischen Kationen zurückgegriffen. Mit Hilfe von Auswaschverhältnissen (‚scavenging ratios‘), die unter Berücksichtigung des herrschenden Luftdrucks das Verhältnis der Konzentrationen im Niederschlag zur atmosphärischen Konzentrationen beschreiben, kann auf letztere geschlossen werden. Die so ermittelten atmosphärischen Konzentrationen von Ca, Ca_{nss} , K, K_{nss} , Mg, Mg_{nss} und Na, liegen als mittlere Jahreswerte im 1x1km² Raster vor und werden zur Berechnung der

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Trockendeposition dieser Spezies verwendet (s.u. Abschnitt ‚Trockene Deposition basischer Kationen‘).

Der Trockendepositionsfluss (F) zum Rezeptor ist das Produkt aus der Konzentration der betrachteten Luftinhalstoffe (c) in der Atmosphäre und deren Depositionsgeschwindigkeit (v_d). Ein Widerstandsmodell (DEPAC) bildet das Kernmodul in IDEM und verknüpft dabei einzelne Prozesse, die durch die Rezeptoroberfläche einerseits, die Luftinhalstoffe andererseits sowie durch deren Wechselwirkungen bestimmt werden. Die Berechnung der Depositionsgeschwindigkeiten erfolgt durch Parametrisierung der beteiligten Prozesse. Dazu wurden Beobachtungen und Ergebnisse zahlreicher Studien zu meteorologischen Untersuchungen der Trockendeposition ausgewertet. Die Untersuchungsergebnisse zu physikalischen Kenngrößen, welche die Eigenschaften der unteren Atmosphäre und der Rezeptoroberflächen wiedergeben, bilden die Grundlage der Modellberechnungen. Die Parametrisierung der Prozesse erfolgt nach der Widerstandsanalogie (Ohmsches Gesetz) durch die Berechnung aller wichtigen Widerstände beim Transport zu den unterschiedlichen Rezeptoren. Der Gesamtwiderstand R setzt sich aus Komponentenwiderständen (R_a , R_b , R_c) zusammen. Die drei Widerstände repräsentieren zusammenfassend die Eigenschaften der unteren Atmosphäre und der Rezeptoroberfläche ($v_d = 1/(R_a + R_b + R_c)$). Die wichtigsten Widerstände sind hierbei:

- R_a : aerodynamischer Widerstand gegen turbulenten Transport zur Rezeptoroberfläche
- R_b : quasi-laminarer Widerstand gegen den molekularen Transport durch die oberflächennahe Grenzschicht
- R_c : Oberflächenwiderstand gegen Aufnahme bzw. Absorption am Rezeptor insgesamt.

Die genannten Widerstände wirken fallweise, parallel oder in Serie und ergeben aufsummiert den Wert des Gesamtwiderstandes. Sie werden jeweils modifiziert durch die meteorologischen Verhältnisse, die exponierte Blattfläche, die Physiologie der Stomata, den Zustand von Boden und Blattoberfläche (z. B. pH-Wert), das Vorhandensein und den Chemismus von Wasserfilmen bzw. von Schneebedeckung etc.. Der zeitlichen Variabilität der bestimmenden Faktoren wird bei der Parametrisierung der Widerstände bzw. Depositionsgeschwindigkeiten durch die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten (Immissionen, Meteorologie, Blattflächenindex) Rechnung getragen.

Bei der Modellierung für Waldbestände werden zusätzliche Informationen herangezogen (z.B. art- und lagespezifische Baumhöhen) sowie den Rezeptoren zugeordnete Rauigkeitslängen, die zur Ermittlung der rezeptorspezifischen Depositionsgeschwindigkeiten und Trockendepositionsflüsse notwendig sind (s. Tabelle 3). Die für die Waldform „Mischwald“ ausgewiesenen Trockendepositionsflüsse werden nicht gesondert modelliert, sondern als Mittelwert der beiden Trockendepositionsflüsse für Laub- und Nadelwald berechnet.

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Tabelle 3: IDEM Rauigkeitslängen für Waldbestände

Waldbestand	Rauigkeitslänge (m)	
	Sommer	Winter
Nadelwald	$0,085 \times BH^*$	
Laubwald	$0,06 \times BH^*$	$0,09 \times BH^*$
* BH = Baumhöhe (m)		

Ergebnisse für die trockene Deposition liegen für die Jahre 1995, 1997 und 1999-2004 vor.

Die Modelberechnung der trockenen Deposition an ausgewählten Waldstandorten in Deutschland erfolgt anhand der Standortkoordinaten und Baumhöhenangaben. Die übrigen Eingangsdaten zur Berechnung der Trockendeposition (Meteorologie, atmosphärische Konzentrationen, etc.) sind identisch mit denjenigen der flächendeckenden Modellierung für ganz Deutschland (Gauger et al. 2008).

Trockene Deposition basischer Kationen

Die Berechnung der Trockenen Deposition erfolgt nach einem empirischen Modellansatz, dem Scavenging Ratio Ansatz (nach Draaijers et al. 1996). Dabei werden die Konzentrationen in der Atmosphäre aus den Konzentrationen im Niederschlag ermittelt. Die trockendeposition der basischen Kationen (Ca, K, Mg, Na) und der basischen Kationen ohne Seesalzbestandteile (Ca_{nss} , K_{nss} , Mg_{nss}) werden dann mit Hilfe von IDEM-Modelldaten der Depositionsgeschwindigkeiten (v_d) berechnet. Die Berechnung erfolgt für Jahreswerte.

Grundlagen der Berechnung sind dabei

- die Konzentrationen im Niederschlag ($[C]_{rain}$), die aus den Monitoringdaten mit Hilfe der Kriging-Technik flächenhaft zu Konzentrationsfeldern im 1x1 km² Rasterkarten berechnet werden (vgl. Nasse Deposition)
- die Konstanten A und B, die das Verhältnis von mittlerem Partikeldurchmesser und Niederschlagskonzentrationen beschreiben (nach Draaijers et al. 1996; s. Tabelle 4)
- die für Basische Kationen aus dem atmosphärischen Widerstand für Partikel modellierten Jahreswerte der Depositionsgeschwindigkeit (v_d)
- die mittlere Dichte der Luft ($\rho = 1200 \text{ g m}^{-3}$)

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

$$[C]_{air} = (\rho * [C]_{rain}) / (188 * e^{0.227 * (A * [C]_{rain} + B)})$$

Der Trockendepositionsfluss ($[F]_{dd}$) wird berechnet als:

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

$$[F]_{dd} = [C]_{air} * v_d$$

Tabelle 4: Best-fit-Konstanten des linearen Verhältnisses aus mittlerem Partikeldurchmesser (Mean Mass Diameter, *MMD*) und den Niederschlagskonzentrationen für Na, Mg, Ca and K.
Nach Draaijers et al. (1996).

$MMD = A * C_{rain} + B$	A	B
Na	0,574	6,082
Mg	2,778	5,694
Ca	1,52	6,316
K	2,74	4,096

In Abbildung 3 ist beispielhaft die Berechnung der Trockendeposition für nicht-seesalz Calcium (Ca_{nss}) für das Bezugsjahr 2004 anhand der Karten der berechneten atmosphärischen Konzentration (c_{air}) der verwendeten Depositionsgeschwindigkeiten (v_d) aus dem IDEM-Modell und der Trockenen Depositionsflüsse (F_{dd}) in Deutschland dargestellt.

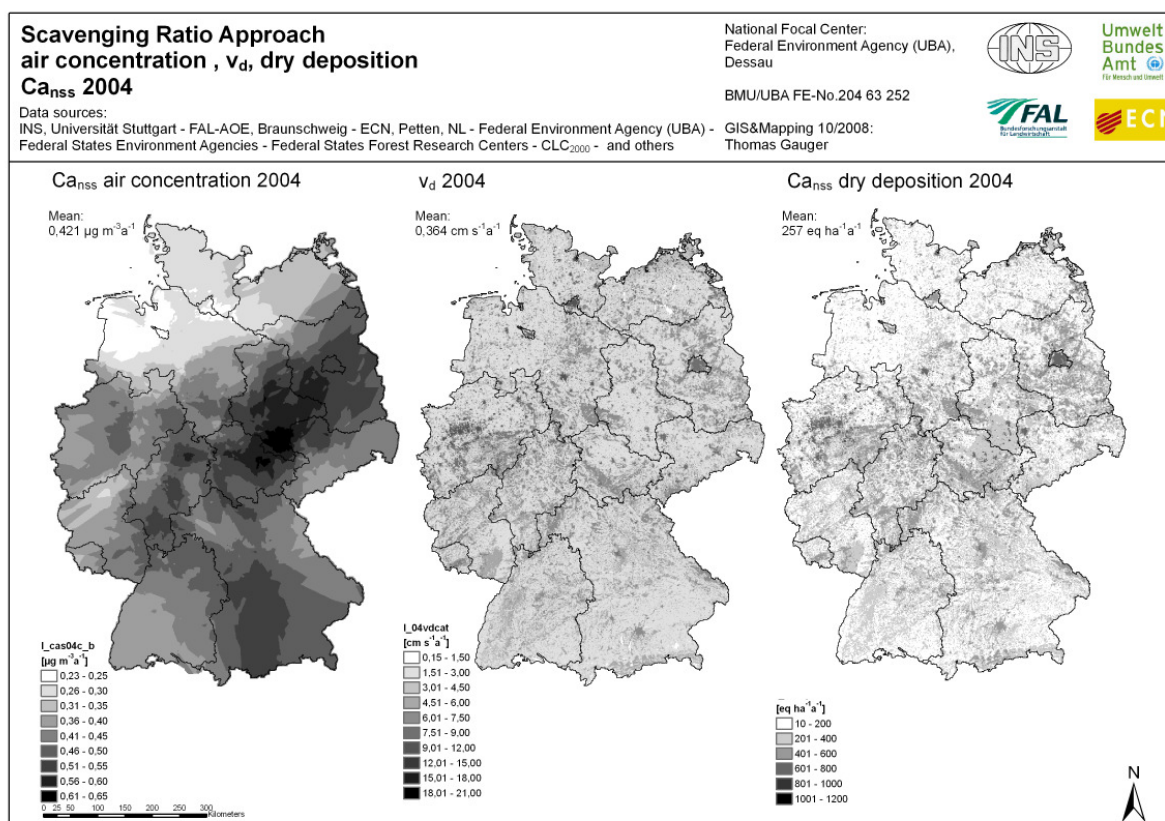


Abbildung 3: Illustration der flächenhaften Berechnung der Trockendeposition basischer Kationen (Bsp. Ca_{nss} 2004)

Feuchte Deposition

Unter feuchter Deposition (in der Literatur auch: ‚okkulte‘ Deposition) wird der Depositionsfluss verstanden, bei dem der Eintrag aus der Atmosphäre direkt mit Wolkenwassertropfen in die betrachteten Rezeptorsysteme abgeschieden wird. Die Berechnung der feuchten Deposition erfolgte mit dem IDEM Wolkenwasser-Depositions-Modul („cloud deposition module“). Besonders Waldgebiete erhalten zum Teil nennenswerte Depositionsfrachten (in Einzelfällen über 30%) über diesen Depositionsfluss, i. d. R. liegt die Feuchtdosition jedoch sehr deutlich unter den Einträgen durch den Nass- und Trockendepositionsfluss und erreicht im Mittel nur einen Anteil von ca. 2% an der Gesamtdeposition in Wälder in Deutschland. Die feuchte Deposition ist an orographischen Nebel gebunden, d.h. an das Auftreten von niedrigen Wolken in Folge von aufsteigender Bewegung feuchter Luftmassen. Die Berechnung der Feuchten Deposition beruht auf dem Ansatz von Bleeker et al. 2000. Die feuchte Deposition kann mit dieser Methode nur für Waldgebiete in einer Höhenlage oberhalb von 250m ausgewiesen werden.

Grundlagen der Berechnung sind

- die Konzentrationen im Niederschlag ($[C]_{rain}$), die aus den Monitoringdaten mit Hilfe der Kriging-Technik flächenhaft zu Konzentrationsfeldern im 1x1 km² Rasterkarten berechnet werden (vgl. oben, ‚Nasse Deposition‘)
- 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 5)
- die Geländehöhe (z) in Deutschland aus einem Digitalen Höhenmodell (DHM des BGR, 1998)
- die mittleren Flüssigwassergehalte der Atmosphäre (LWC , *liquid water content*)
- die aus dem atmosphärischen Widerstand für Partikel modellierten Jahreswerte der Depositionsgeschwindigkeit (v_d)

Berechnung der Feuchten Deposition (nach Bleeker et al. 2000):

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

$$[C]_{cloud} = a * z^b * [C]_{rain}$$

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

$$[F]_{cloud} = [C]_{cloud} * LWC * v_d$$

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Tabelle 5: 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 10 ⁵	-1,90
Mg	6,0 10 ⁷	-2,50
Ca	1,3 10 ⁵	-1,60
K	2,2 10 ³	-0,99
Cl	3,0 10 ⁶	-2,09

Die Daten für die Feuchtdeposition werden aus den Rasterkarten der vorhandenen Kartierung (Ergebnisse aus Gauger et al. 2008, vgl. Abbildung 4, rechts) mittels GIS lagegenau entnommen (aus den Karten ausgestochen).

Die Gesamtdeposition jeder der betrachteten Spezies ist als Summe der drei Teilflüsse von Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition (vgl. Abbildung 4) zu berechnen.

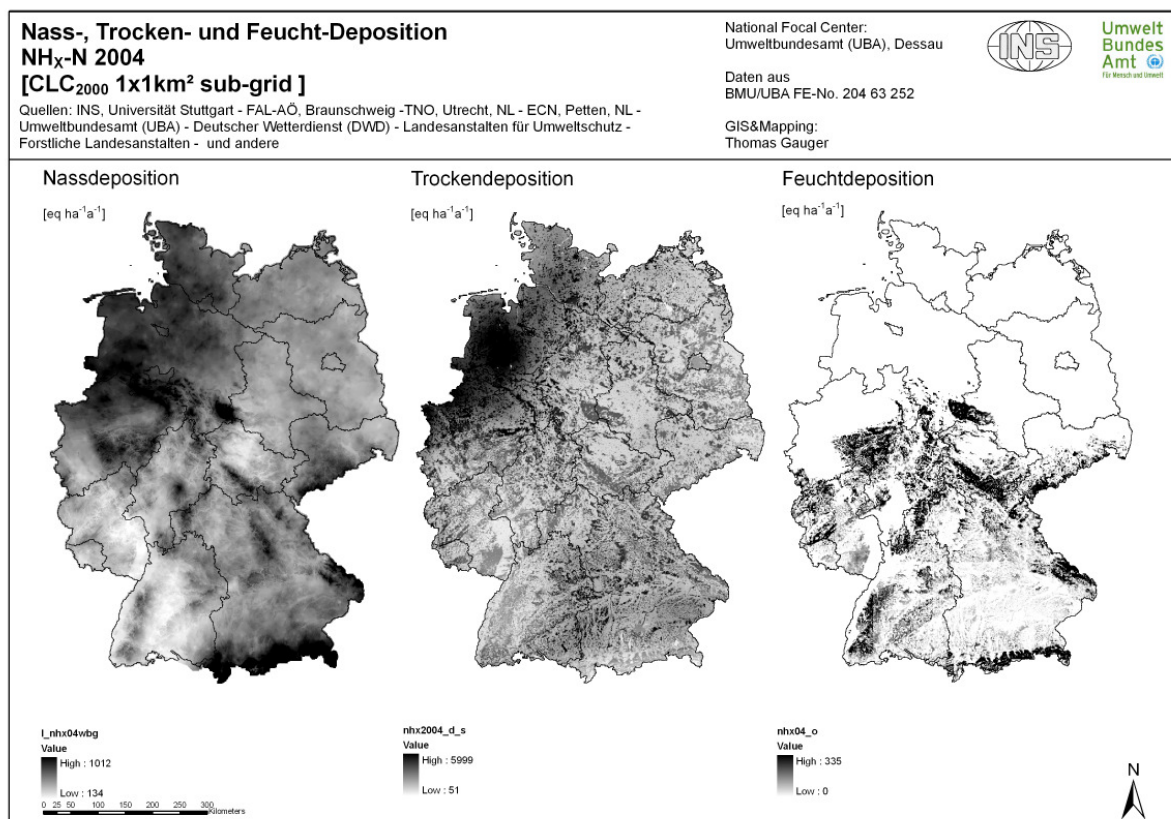


Abbildung 4: Ergebnisse der flächenhaften Kartierung von Nass-, Trocken- und Feuchtdeposition (Bsp. NH_x-N 2004)

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Qualitätssicherung und Fehlerdiskussion der Gesamtdeposition

Für insgesamt 33 Messstandorte in Bayern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen wurden Messwerte der Deposition und mit IDEM modellierte Werte der Stickstoffgesamtdeposition verglichen.

Die Messwerte basieren auf verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Deposition:

- (1) Messung der Bulk-Deposition im Freiland und Multiplikation der Ammoniakkonzentrationen mit Depositionsgeschwindigkeiten
- (2) Kronentraufenmessungen an Waldstandorten (Ammonium, Nitrat und organischer Stickstoff)
- (3) Mikrometeorologische Messung der Trockendeposition.

Alle durchgeführten Vergleiche weisen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten auf:

- Die mit Bulk-Sammlern im Freiland gemessene Stickstoffdeposition beschreibt die modellierte Stickstoffgesamtdeposition nicht vollständig. Die Deposition einzelner Stickstoffverbindungen wird unterschätzt und der Beitrag einiger Stickstoffkomponenten ganz vernachlässigt. Durch zusätzliche Berücksichtigung von gemessener Ammoniakkonzentration als trockene Deposition (durch Multiplikation mit der Depositionsgeschwindigkeit unter der Annahme, dass das gemessene Ammoniak vollständig deponiert), werden die Modellwerte nahezu erreicht. Bei besonderen Standortbedingungen, wie z. B. Grünlandwirtschaft mit Gülleausbringung, kann die Summe dieser gemessenen Parameter den Modellwert sogar überschreiten.
- Bei Waldstandorten unterschätzen Messungen die Modellwerte der Gesamtdeposition, da die Kronentraufe die im Kronenraum verbleibenden Stickstoffkomponenten nicht, bzw. bei zusätzlicher Berechnung mit Kronenraumbilanzmodellen (z.B. nach Ulrich oder Draaijers) nicht vollständig berücksichtigt.
- Die Messung der trockenen Deposition mit mikrometeorologischen Methoden bedient sich zusätzlicher, ebenfalls mit Unsicherheiten behafteter Modellrechnungen. Der Vergleich zwischen Modellwerten und mikrometeorologischen Messwerten der Trockendeposition eines Standorts weist für einzelne Stickstoffspezies sowohl bei den Messergebnissen als auch bei den Modellergebnissen höhere Werte auf. Im Mittel der Jahre 2002 und 2003 ergibt sich eine um 35 % höhere mit IDEM modellierte N-Trockendeposition, die N-Gesamtdeposition der Modellierung und Kartierungsergebnisse liegt um 27% höher als die Messergebnisse.

Angeichts der Einschränkungen der Messwerte bei der Bestimmung der Gesamtdeposition ist die Übereinstimmung von Mess- und Modellwerten als gut zu bewerten.

Ergebnisse

Format der Datenübergabe und verwendete Einheiten der Modellierungsergebnisse

Alle Daten sind in EXCEL-Tabellen abgelegt. Die Angabe aller Depositionswerte erfolgt in H^+ Ionen-Äquivalenten pro Hektar und Jahr ($mol_e ha^{-1} a^{-1} = eq ha^{-1} a^{-1}$).

Die Umrechnung der verwendeten Einheiten in $g ha^{-1} a^{-1}$ oder $kg ha^{-1} a^{-1}$ kann mithilfe der in Tabelle 6 aufgelisteten und blau gekennzeichneten speziesspezifischen Umrechnungsfaktoren durchgeführt werden. Die Umrechnungsfaktoren entsprechen der Äquivalentmasse, die aus Molmasse und Wertigkeit berechnet wird. Für die Berechnung von $kg ha^{-1} a^{-1}$ aus den gegebenen Ionenäquivalenten ($eq ha^{-1} a^{-1}$) ist eine Division durch 1000 erforderlich (Umrechnung $g \rightarrow kg$; siehe Tabelle 6, Rechenbeispiel).

Tabelle 6: Umrechnungsfaktoren (keq , bzw. $cmol_e \leftrightarrow kg$) sind blau:

	Wertigkeit	Molmasse [g]	Äquivalentmasse [g]	Faktor $mol_e \rightarrow g$	Faktor $g \rightarrow mol_e$
Ca	2 ⁺	40,08	20,04	20,04	0,050
Cl	1 ⁻	35,45	35,45	35,5	0,028
H	1 ⁺	1,01	1,01	1,01	0,992
K	1 ⁺	39,10	39,10	39,10	0,026
Mg	2 ⁺	24,31	12,15	12,15	0,082
Na	1 ⁺	22,99	22,99	22,99	0,043
NH_x-N	1 ⁺	14,01	14,01	14,01	0,071
NO_y-N	1 ⁻	14,01	14,01	14,01	0,071
SO_x-S	2 ⁻	32,06	16,03	16,03	0,062

Umrechnungsbeispiel:

$mol_e ha^{-1} a^{-1}$ (Standard-Einheit der Modellierungs-Ergebnisse) in $kg ha^{-1} a^{-1}$ für Stickstoff Spezies (N):
 $2000 mol_e ha^{-1} a^{-1} / 1000 * 14,01 = 28,02 kg ha^{-1} a^{-1}$, bzw. $2000 mol_e ha^{-1} a^{-1} * 0,01401 = 28,02 kg ha^{-1} a^{-1}$

In den Excel-Tabellen ist jede Zeile einem Wald-Standort zugeordnet. In den ersten Spalten sind Kennungen jeder Station (interne laufende Nr., Monitoringprogramm, BFH-Nummer), das Bundesland, Sations-Koordinaten und Baumhöhen aufgeführt, nachfolgende Spalten enthalten die Werte der Depositionsflüsse. In der Kopfzeile sind die entsprechenden Spezies aufgeführt.

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Ergebnisse Nassdeposition:

Die Nassdeposition ist rezeptorunabhängig und wird durch Niederschlagsmenge und Konzentration im Niederschlag bestimmt. Für die einzelnen Waldstandorte werden die Nassdepositionsfrachten an den Koordinatenpunkten mittels GIS lagegenau aus den 1x1 km² Rasterkarten entnommen (aus den Karten ausgestochen).

Die Ergebnisse sind in den EXCEL-Tabellen für die einzelnen Jahre 1995, 1997, 1999-2004 (Dateien: mod_totdep_<Jahr>.xls, Tabellenblatt wet_waldform_Alles) aufgelistet. In den Spalten B bis N sind die Kennungen der Standorte (Wald-Punkte) angegeben. Die Spalten O bis AC enthalten die Werte der Depositionsflüsse der einzelnen 15 betrachteten Spezies der Nassdeposition (s. Tabelle 7). Für diejenigen Spezies, die zum Teil aus dem Seesalz stammen (Ca, Mg, K, Cl, SO₄-S), ist auch der seesalkorrigierte Depositionsfluss angegeben (Ca_{nss}, Mg_{nss}, K_{nss}, Cl_{nss}, SO₄-S_{nss}; nss = nicht-seesalz Depositionsfluss). Für Na gilt die Annahme, dass es komplett aus dem Seesalz stammt und keine anderen Emissionsquellen bestehen. Die Berechnungsmethode der Seesalkorrektur ist im Text oben kurz dargestellt (s. o. 'Umsetzung der Modellierungsaufgabe – Nasse Deposition', Bearbeitungsschritt (6) und Tabelle 2).

Tabelle 7: Die Nassdeposition ist in den EXCEL-Ergebnistabellen folgendermaßen aufgelistet
(Jahreswerte der Nassdeposition in mol_e ha⁻¹ a⁻¹ = eq ha⁻¹ a⁻¹ in den Dateien: mod_totdep_<Jahr>_x.xls,
Tabellenblatt: wet_Waldform_Alles)

Ca Calcium	Spalte O: CA<Jahr>W	Ca _{nss}	Spalte P: CA<Jahr>SW
Mg Magnesium	Spalte Q: MG<Jahr>W	Mg _{nss}	Spalte R: MG<Jahr>SW
K Kalium	Spalte S: K<Jahr>W	K _{nss}	Spalte T: K<Jahr>SW
Cl Clorid	Spalte U: CL<Jahr>W	Cl _{nss}	Spalte V: CL<Jahr>SW
SO ₄ -S Sulfatschwefel	Spalte W: SOX<Jahr>W	SO ₄ -S _{nss}	Spalte X: SOX<Jahr>SW
NO ₃ -N Nitratstickstoff	Spalte Y: Ca<Jahr>W		
NH ₄ -N	Spalte Z: NHX<Jahr>W		
N Gesamtstickstoff	Spalte AA: N<Jahr>W		
Na Natrium	Spalte AB: NA<Jahr>W		
H	Spalte AC: H<Jahr>W		

nss = nicht-seesalz; seesalkorrigiert. In den Spaltenköpfen angegeben mit dem Kürzel S
<Jahr> = Angabe des jeweiligen Bezugsjahres in den Spaltenköpfen (z.B. 04 für 2004)
W = in den Spaltenköpfen Kürzel für wet deposition (= Nassdeposition)

Die Daten der einzelnen Waldformen 1 = Laubwald, 2 = Nadelwald, 3 = Mischwald sind im Tabellenblatt untereinander angeordnet und in den Spalten B bis M zusätzlich farbig markiert. Wald-Punkte ohne Angabe der Waldform u./o. von Baumhöhen (z. T. als Waldform 4 angegeben) sind in den letzten Zeilen der Tabellenblätter aufgeführt (s. Abbildung 4).

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Kennung der Waldstandorte in den Spalten B bis N,										Nassdeposition der Waldstandorte in Spalte O bis AC																																																							
<table><tr><td>Nr.</td><td>Monitoringprogramm</td><td>IBPH NUMMER</td><td>LAND</td><td>RECHTENWERT</td><td>HÖCHTWERT</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td>GE4 RECHTS</td><td>GE4 HOCH</td><td>AME</td><td>ALN</td><td>WALDFORM</td><td>RESTANDESHÖHE</td><td>ID</td><td colspan="3"></td></tr></table>										Nr.	Monitoringprogramm	IBPH NUMMER	LAND	RECHTENWERT	HÖCHTWERT					GE4 RECHTS	GE4 HOCH	AME	ALN	WALDFORM	RESTANDESHÖHE	ID				<table><tr><td>GAdeW</td><td>CAdeSW</td><td>MOdeW</td><td>MOdeSW</td><td>KAdeW</td><td>KAdeSW</td><td>CLdeW</td><td colspan="5"></td></tr><tr><td>SOdeW</td><td>SOdeSW</td><td>NOdeW</td><td>NOdeSW</td><td>WOdeW</td><td>WOdeSW</td><td>HOdeW</td><td colspan="5"></td></tr></table>												GAdeW	CAdeSW	MOdeW	MOdeSW	KAdeW	KAdeSW	CLdeW						SOdeW	SOdeSW	NOdeW	NOdeSW	WOdeW	WOdeSW	HOdeW					
Nr.	Monitoringprogramm	IBPH NUMMER	LAND	RECHTENWERT	HÖCHTWERT																																																												
GE4 RECHTS	GE4 HOCH	AME	ALN	WALDFORM	RESTANDESHÖHE	ID																																																											
GAdeW	CAdeSW	MOdeW	MOdeSW	KAdeW	KAdeSW	CLdeW																																																											
SOdeW	SOdeSW	NOdeW	NOdeSW	WOdeW	WOdeSW	HOdeW																																																											
Zeilen sind sortiert nach Waldform und farblich markiert:										Einheiten: eq ha ⁻¹ a ⁻¹ = mol _e ha ⁻¹ a ⁻¹																																																							
Waldform 1																																																																	
Waldform 2																																																																	
Waldform 3																																																																	
Waldform 4,																																																																	
bzw. ohne Angabe von Waldform u./o. Baumhöhe																																																																	

n = keine Angabe

Dateien: mod_totdep <Jahr>_x.xls, Tabellenblatt: wet Waldform alle

Abbildung 4: Aufbau der Excel-Ergebnistabellen für Nassdeposition an Waldstandorten

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Ergebnisse Trockendeposition:

Die Trockendeposition ist abhängig vom jeweiligen Rezeptor. Bei der Berechnung der Trockendeposition mit IDEM wird für Waldökosysteme die Bestandeshöhe berücksichtigt. Die Baumhöhe der einzelnen Waldstandorte geht somit in die Parameterisierungen des IDEM-Modells bei der Berechnung der Depositionsgeschwindigkeiten und Trockendepositionsfrachten ein. Für die einzelnen Waldstandorte werden die Trockendepositionsfrachten an jedem Koordinatenpunkt bestimmt.

Die Ergebnisse sind in den EXCEL-Tabellen für die einzelnen Jahre 1995, 1997, 1999-2004 (Dateien: mod_totdep_<Jahr>x.xls, Tabellenblatt dry_waldform_alle) aufgelistet. In den Spalten B bis N sind, wie bei der Nassdeposition, die Kennungen der Standorte (Wald-Punkte) angegeben. Die Spalten O bis AB enthalten die Werte der Depositionsflüsse der einzelnen 11 betrachteten Spezies der Trockendeposition (s. Tabelle 8). Die Zeilen sind sortiert nach der angegebenen Waldform (1 = Laubwald, 2 = Nadelwald, 3 = Mischwald). Standorte, bzw. Wald-Punkte ohne Angabe der Waldform u./o. von Baumhöhen sind in den letzten Zeilen des Tabellenblattes aufgeführt und enthalten keine Werte (bzw. Fehlwert „n“) für den Trockendepositionsfluss, weil eine Berechnung hier nicht möglich ist.

Im Unterschied zu den Daten der Nassdeposition werden keine Trockendepositionsflüsse für Cl, Cl_{nss}, SO_x-S und H berechnet und ausgewiesen. Dies liegt daran, dass für diese Spezies keine Emissionsdaten vorliegen und folglich weder atmosphärische Konzentrationen noch Trockendepositionsflüsse berechnet werden können.

Bei Cl wird davon ausgegangen, dass anthropogene Cl Emissionen (als HCl emittiert) i.d.R. nur sehr lokal begrenzt vorkommen und die trockene Deposition von Cl_{nss} quantitativ von sehr untergeordneter Bedeutung sind. Somit gibt es für den nicht-natürlichen Anteil nur die Berechnung der seesalzkorrigierten Nassdepositionsfracht Cl_{nss}, die als gute Annäherung an die Gesamtdeposition von anthropogenem Cl bewertet wird (ICP Modelling and Mapping 1996, 2004; Gauger et al. 2008).

Für natürliche Emissionen von oxidiertem Schwefel (SO_x-S, bzw. SO₄-S) gibt es bislang keine brauchbaren Emissionsdaten, sondern nur für anthropogene Schwefel-Emissionen (SO₂-S). Somit kann nur der anthropogene Anteil von oxidiertem Schwefel (SO_x-S_{nss}) bei der Modellierung mit LOTOS-EUROS und IDEM berechnet werden. Die Trockendeposition von Schwefel wird folglich als der Summe von anthropogenem SO₂-S und SO₄-S_{nss} quantifiziert und angegeben.

Für die übrigen Spezies, die zum Teil aus dem Seesalz stammen (Ca, Mg, K), ist auch der seesalzkorrigierte Depositionsfluss angegeben (Ca_{nss}, Mg_{nss}, K_{nss}, nss = nicht-seesalz Depositionsfluss). Berechnungsgrundlagen sind beim Modellierungsansatz für die Trockendeposition basischer Kationen die Niederschlagskonzentrationsfelder der jeweiligen Spezies als Jahreswerte. Die Berechnungsmethode ist der sog. Scavenging-Ratio-Ansatz und ist im Text oben kurz dargestellt (s. o. ‚Trockene Deposition basischer Kationen‘).

Die punktweise Modellierung der Trockendepositionsflüsse mit IDEM erfolgt für alle Waldstandorte mit den gegebenen Baumhöhenangaben zunächst sowohl für die Waldform Nadelwald, wie auch für die

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Waldform Laubwald, während der Mittelwert der Berechnungen für diese beiden Waldformen den Trockendepositionsfluss für Mischwald darstellt. Diese Werte der modellierten Trockendepositionsflüsse werden für jeden Waldstandort für die Waldform Laubwald in den Spalten AF bis AS, für Nadelwald in den Spalten AX bis BK und für Mischwald in den Spalten BP bis CC der Ergebnistabellenblätter der EXCEL-Dateien aufgelistet.

Tabelle 8: Die Trockendeposition ist in den EXCEL-Ergebnistabellen folgendermaßen aufgelistet

(Jahreswerte der Trockendeposition in $\text{mol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} = \text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in den Dateien: mod_totdep_<Jahr>_x.xls,

Tabellenblatt: dry_Waldform_alle)

Ca Calcium	Spalte O: CA<Jahr>D	Ca _{nss}	Spalte P: CA<Jahr>SD
Mg Magnesium	Spalte Q: MG<Jahr>D	Mg _{nss}	Spalte R: MG<Jahr>SD
K Kalium	Spalte S: K<Jahr>D	K _{nss}	Spalte T: K<Jahr>SD
[Cl Clorid – n.b. –	Spalte U: CL<Jahr>D]	[Cl _{nss} – n.b. –	Spalte V: CL<Jahr>SD]
[SO _x -S – n.b. –	Spalte W: SOX<Jahr>D]	SO _x -S _{nss}	Spalte X: SOX<Jahr>SD
NO _y -N Nitratstickstoff	Spalte Y: NOY<Jahr>D		
NH _x -N	Spalte Z: NHX<Jahr>D		
N Gesamtstickstoff	Spalte AA: N<Jahr>D		
Na Natrium	Spalte AB: NA<Jahr>D		

n_{ss} = nicht-seesalz; seesalzkorrigiert. In den Spaltenköpfen angegeben mit dem Kürzel **S**

<Jahr> = Angabe des jeweiligen Bezugsjahres in den Spaltenköpfen (z.B. **04** für 2004)

D = in den Spaltenköpfen Kürzel für dry deposition (= Trockendeposition)

[... – n.b. – ...] = nicht berechnet, da keine Emissionsdaten, folglich keine atmosphärischen Konzentrationen mögl.: Cl, Cl_{nss}, SO_x

Kennung der Waldstandorte in den Spalten B bis N,	Trockendeposition der Waldstandorte in Spalte O bis AC	Berechnung für Laubwald an allen Waldstandorten Spalte AF bis AS	Berechnung für Nadelwald an allen Waldstandorten Spalte AX bis BK	Berechnung für Mischwald an allen Waldstandorten Spalte BP bis CC																																										
<table><tr><td>Nr.</td><td>Measuresystem</td><td>BEZUGSWERT</td><td>JAHR</td><td>RECHNUNGSWEISE</td><td>RECHNUNGSWEISE</td></tr><tr><td>SEA RECHT</td><td>SEA RECHT</td><td>af</td><td>Jahr</td><td>WALDFORM</td><td>BESTANDESHÖHE</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	Nr.	Measuresystem	BEZUGSWERT	JAHR	RECHNUNGSWEISE	RECHNUNGSWEISE	SEA RECHT	SEA RECHT	af	Jahr	WALDFORM	BESTANDESHÖHE							<table><tr><td>CL</td><td>CL_{nss}</td><td>SO_x-S</td><td>SO_x-S_{nss}</td><td>NO_y-N</td><td>NH_x-N</td><td>N</td><td>Na</td></tr><tr><td>CL</td><td>CL_{nss}</td><td>SO_x-S</td><td>SO_x-S_{nss}</td><td>NO_y-N</td><td>NH_x-N</td><td>N</td><td>Na</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	CL	CL _{nss}	SO _x -S	SO _x -S _{nss}	NO _y -N	NH _x -N	N	Na	CL	CL _{nss}	SO _x -S	SO _x -S _{nss}	NO _y -N	NH _x -N	N	Na											
Nr.	Measuresystem	BEZUGSWERT	JAHR	RECHNUNGSWEISE	RECHNUNGSWEISE																																									
SEA RECHT	SEA RECHT	af	Jahr	WALDFORM	BESTANDESHÖHE																																									
CL	CL _{nss}	SO _x -S	SO _x -S _{nss}	NO _y -N	NH _x -N	N	Na																																							
CL	CL _{nss}	SO _x -S	SO _x -S _{nss}	NO _y -N	NH _x -N	N	Na																																							
Zeilen sind sortiert nach Waldform und farbig markiert:	Einheiten: eq ha ⁻¹ a ⁻¹ = mol, ha ⁻¹ a ⁻¹	[eq ha ⁻¹ a ⁻¹]	[eq ha ⁻¹ a ⁻¹]	[eq ha ⁻¹ a ⁻¹]																																										
Waldform 1	Waldform 1																																													
Waldform 2	Waldform 2																																													
Waldform 3	Waldform 3																																													
Waldform 4,	Waldform 4,	Keine Berechnung für Waldstandorte ohne Angabe der Baumhöhe																																												
bzw. ohne Angabe von Waldform u./o. Baumhöhe	bzw. ohne Angabe von Waldform u./o. Baumhöhe																																													
n = keine Angabe																																														
Dateien: mod_totdep_<Jahr>_x.xls, Tabellenblatt: dry_Waldform_alle																																														

Abbildung 5: Aufbau der Excel-Ergebnistabellen für Trockendeposition an Waldstandorten

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Ergebnisse Feuchtdeposition:

Die Feuchtdepositionsdaten werden aus den vorliegenden Kartierungsergebnissen (Gauger et al. 2008) an den Koordinatenpunkten der Waldstandorte lagetreu ausgestochen. Die Berechnung der Feuchtdeposition erfolgt nur für Standorte über 250 m Höhe. Tiefer gelegene Standorte erhalten den Wert 0 eq ha⁻¹ a⁻¹. Die Modellergebnisse ist nur gültig für Waldstandorte, d.h. für Wälder mit einem Bestandescharakter, der durch hohe Bäume geprägt ist.

Die Ergebnisse sind in den EXCEL-Tabellen für die einzelnen Jahre 1995, 1997, 1999-2004 (Dateien: mod_totdep_<Jahr>.xls, Tabellenblatt cuf_waldform_alle) aufgelistet. In den Spalten B bis N sind, wie bei der Nassdeposition, die Kennungen der Standorte (Wald-Punkte) angegeben. Die Spalten O bis AB enthalten die Werte der Depositionsflüsse der einzelnen 14 betrachteten Spezies der Feuchtdeposition (s. Tabelle 9). Die Zeilen sind sortiert nach der angegebenen Waldform (1 = Laubwald, 2 = Nadelwald, 3 = Mischwald). Standorte, bzw. Wald-Punkte ohne Angabe der Waldform u./o. von Baumhöhen sind in den letzten Zeilen des Tabellenblattes aufgeführt. Die Zeilen der Waldform 4 enthalten keine Werte (bzw. Fehlwert „n“) für den Feuchtdepositionsfluss, weil die Berechnung der Feuchtdeposition nur für Waldbestände mit Baumhöhen hoher Bäume Aussagen trifft.

Tabelle 9: Die Feuchtdeposition ist in den EXCEL-Ergebnistabellen folgendermaßen aufgelistet

(Jahreswerte der Trockendeposition in mol_c ha⁻¹ a⁻¹ = eq ha⁻¹ a⁻¹ in den Dateien: mod_totdep_<Jahr>_x.xls,

Tabellenblatt: cuf_Waldform_alle)

Ca Calcium	Spalte O: CA<Jahr>CF	Ca _{nss}	Spalte P: CA<Jahr>SCF
Mg Magnesium	Spalte Q: MG<Jahr>CF	Mg _{nss}	Spalte R: MG<Jahr>SCF
K Kalium	Spalte S: K<Jahr>CF	K _{nss}	Spalte T: K<Jahr>SCF
Cl Chlorid – n.b. –	Spalte U: CL<Jahr>CF	Cl _{nss} – n.b. –	Spalte V: CL<Jahr>SCF
SO _x -S – n.b. –	Spalte W: SOX<Jahr>CF	SO _x -S _{nss}	Spalte X:
		SOX<Jahr>SCF	
NO _y -N Nitratstickstoff	Spalte Y: NOY<Jahr>CF		
NH _x -N	Spalte Z: NHX<Jahr>CF		
N Gesamtstickstoff	Spalte AA: N<Jahr>CF		
Na Natrium	Spalte AB: NA<Jahr>CF		

n_{ss} = nicht-seesalz; seesalzkorrigiert. In den Spaltenköpfen angegeben mit dem Kürzel S

<Jahr> = Angabe des jeweiligen Bezugsjahres in den Spaltenköpfen (z.B. 04 für 2004)

CF = in den Spaltenköpfen Kürzel für cloud and fog deposition (= Wolken- und Nebelwasserdeposition, Feuchtdeposition)

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Kennung der Waldstandorte in den Spalten B bis N,										Feuchtdeposition der Waldstandorte in Spalte O bis AB																																											
<table><tr><td>Nr.</td><td>Monitoringprogramm</td><td>IBPH NUMMER</td><td>LAND</td><td>RECHTMERK</td><td>HÖCHTMERK</td></tr><tr><td>GR4 RECHTS</td><td>GR4 HOCH</td><td>GR4</td><td>GR4</td><td>WALDFORM</td><td>RESTANDERHÖHE</td></tr><tr><td>II</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										Nr.	Monitoringprogramm	IBPH NUMMER	LAND	RECHTMERK	HÖCHTMERK	GR4 RECHTS	GR4 HOCH	GR4	GR4	WALDFORM	RESTANDERHÖHE	II						<table><tr><td>CaSCF</td><td>CaSCF</td><td>MgSCF</td><td>MgSCF</td><td>KSCF</td><td>KSCF</td><td>ClSCF</td><td>ClSCF</td></tr><tr><td>SO₄SCF</td><td>SO₄SCF</td><td>NO₃SCF</td><td>NO₃SCF</td><td>NH₄SCF</td><td>NH₄SCF</td><td>NH₄SCF</td><td>HSCF</td></tr></table>										CaSCF	CaSCF	MgSCF	MgSCF	KSCF	KSCF	ClSCF	ClSCF	SO ₄ SCF	SO ₄ SCF	NO ₃ SCF	NO ₃ SCF	NH ₄ SCF	NH ₄ SCF	NH ₄ SCF	HSCF
Nr.	Monitoringprogramm	IBPH NUMMER	LAND	RECHTMERK	HÖCHTMERK																																																
GR4 RECHTS	GR4 HOCH	GR4	GR4	WALDFORM	RESTANDERHÖHE																																																
II																																																					
CaSCF	CaSCF	MgSCF	MgSCF	KSCF	KSCF	ClSCF	ClSCF																																														
SO ₄ SCF	SO ₄ SCF	NO ₃ SCF	NO ₃ SCF	NH ₄ SCF	NH ₄ SCF	NH ₄ SCF	HSCF																																														
Zeilen sind sortiert nach Waldform und farbig markiert:										Einheiten: eq ha ⁻¹ a ⁻¹ = mol _e ha ⁻¹ a ⁻¹																																											
Waldform 1																																																					
Waldform 2																																																					
Waldform 3																																																					
Waldform 4,																																																					
bzw. ohne Angabe von Waldform u/o. Baumhöhe																																																					
n = keine Angabe																																																					
Dateien: mod_totdep <Jahr> x.xls, Tabellenblatt: cuf Waldform alle																																																					

Abbildung 7: Aufbau der Excel-Ergebnistabellen für Feuchtd deposition an Waldstandorten

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Ergebnisse Gesamtd deposition:

Die Gesamtd deposition ist die Summe der drei Teilflüsse von Nass-, Trocken- und Feuchtd deposition des jeweiligen Ökosystem-Standorts.

Die Ergebnisse sind in den EXCEL-Tabellen für die einzelnen Jahre 1995, 1997, 1999-2004 (Dateien: mod_totdep_<Jahr>.xls, Tabellenblatt tot_waldform_alle) aufgelistet. In den Spalten B bis N sind, wie bei der Nassd deposition, die Kennungen der Standorte (Wald-Punkte) angegeben. Die Spalten O bis AB enthalten die Werte der Depositionsflüsse der einzelnen 11 betrachteten Spezies der Feuchtd deposition (s. Tabelle 10). Voraussetzung der Berechnung für jeden Waldstandort ist, dass alle drei Depositionsflüsse gültige Daten an diesem Standort aufweisen, anderenfalls werden in den Ergebnistabellen der Gesamtd deposition Fehlwerte (d.h. der EXCEL-spezifische Fehlwert: #WERT!) ausgegeben. Die Zeilen der Ergebnistabelle sind sortiert nach der angegebenen Waldform (1 = Laubwald, 2 = Nadelwald, 3 = Mischwald). Standorte, bzw. Wald-Punkte ohne Angabe der Waldform u./o. von Baumhöhen sind in den letzten Zeilen des Tabellenblattes aufgeführt.

Tabelle 10: Die Gesamtd deposition ist in den EXCEL-Ergebnistabellen folgendermaßen aufgelistet

(Jahreswerte der Trockendeposition in $\text{mol}_e \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} = \text{eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in den Dateien: mod_totdep_<Jahr>_x.xls,

Tabellenblatt: tot_Waldform_alle)

Ca Calcium	Spalte O: CA<Jahr>_T	Ca _{nss}	Spalte P: CA<Jahr>S_T
Mg Magnesium	Spalte Q: MG<Jahr>_T	Mg _{nss}	Spalte R: MG<Jahr>S_T
K Kalium	Spalte S: K<Jahr>_T	K _{nss}	Spalte T: K<Jahr>S_T
[Cl Clori_T – n.b. –	Spalte U: CL<Jahr>_T]	[Cl _{nss} – n.b. –	Spalte V: CL<Jahr>S_T]
[SO _x -S – n.b. –	Spalte W: SOX<Jahr>_T]	SO _x -S _{nss}	SpalteX: SOX<Jahr>S_T
NO _y -N Nitratstickstoff	Spalte Y: NOY<Jahr>_T		
NH _x -N	Spalte Z: NHX<Jahr>_T		
N Gesamtstickstoff	Spalte AA: N<Jahr>_T		
Na Natrium	Spalte AB: NA<Jahr>_T		

n_{ss} = nicht-seesalz; seesalzkorrigiert. In den Spaltenköpfen angegeben mit dem Kürzel S

<Jahr> = Angabe des jeweiligen Bezugsjahres in den Spaltenköpfen (z.B. 04 für 2004)

_T = in den Spaltenköpfen Kürzel für **total** deposition (= Gesamtd deposition)

[...- n.b. -...] = nicht berechnet, da keine Emissionsdaten, keine Modellierung der atmosphärischen Konzentrationen und folglich keine Berechnung der Trocken- und damit der Gesamtd deposition mögl.: Cl, Cl_{nss}, SO_x

Modellierung der Gesamt-Deposition für ausgewählte Wald-Standorte in Deutschland

Kennung der Waldstandorte in den Spalten B bis N,										Gesamtdeposition der Waldstandorte in Spalte O bis AC																	
Nr.		Monitoringprogramm		IBPH NUMMER		LAND		RECHTSMERK		HOCHWERT		GAS4 T		GAS4S T		MO44 T		MO44S T		NS44 T		NS44S T		CL44 T		CL44S T	
GK4 RECHTS		GK4 HOCH		JME		JBR		WALDFORM		BESTANDESHÖHE		ID		SOK44 T		SOK44S T		NOY44 T		NBY44 T		NS44 T		NS44S T		H44 T	
Zeilen sind sortiert nach Waldform und farbig markiert:																											
Waldform 1																											
Waldform 2																											
Waldform 3																											
Waldform 4,																											
bzw. ohne Angabe von Waldform u./o. Baumhöhe																											
n = keine Angabe;																											
#WERT! = Fehlwerte (keine Berechnung aufgrund fehlender Angaben möglich)																											
Dateien: mod_totdep <Jahr> x.xls, Tabellenblatt tot Waldform alle																											

Abbildung 7: Aufbau der Excel-Ergebnistabellen für Gesamtdeposition an Waldstandorten

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.

Draaijers GPJ, van Leeuwen EP, de Jong PGH, Erisman JW (1996): Deposition of base-cations in Europe and its role in acid neutralization and forest nutrition. RIVM, Bilthoven, NL, Report no. 722108017.

Gauger Th, Haenel H-D, Rösemann C, Dämmgen U, Bleeker A, Erisman JW, Vermeulen AT, Schaap M, Timmermanns RMA, Bultjes PJH, Duyzer JH, Nagel H-D, Becker R, Kraft P, Schlutow A, Schütze G, Weigelt-Kirchner R, Anshelm F (2008): Erfüllung der Zielvorgaben der UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen). Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 204 63 252. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, gefördert vom Bundesministerium f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dessau-Rosslau.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3646.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 52/04. <http://www.icpmapping.org/>