

TEXTE

112/2021

Stickstoff- Immobilisierung – Regionalisierung von Eingangsdaten der Critical-Load-Berechnung

Abschlussbericht

TEXTE 112/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Projektnummer 92646

FB000605

Stickstoff-Immobilisierung – Regionalisierung von Eingangsdaten der Critical-Load-Berechnung

Abschlussbericht

von

Daniel Ziche, Nicole Wellbrock

Thünen Institut für Waldökosysteme, Eberswalde

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Thünen-Institut für Waldökosysteme
Alfred-Möller-Str. 1
16225 Eberswalde

Abschlussdatum:

Mai 2018

Redaktion:

Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Thomas Scheuschner

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Stickstoff-Immobilisierung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, für Deutschland flächendeckend Stickstoffimmobilisierungsraten für die Critical-Load-Berechnung abzuleiten. Es soll dabei geprüft werden, inwieweit die landnutzungs – spezifische Bodenübersichtskarte Deutschland 1/1.000.000 (BÜK1000N v2.3) sowohl als Karten- wie auch als Datengrundlage genutzt werden kann. Aufbauend auf dem Vorgängerprojekt (Projektnr. 76011) werden die Stickstoffimmobilisierungsraten anhand rezent gemessenen Stickstoffvorräte und dem dazugehörigen Bodenalter abgeleitet. Die Eignung der BÜK1000N als Datengrundlage wird dabei aufgrund der Datenlage zu den Stickstoffvorräten als unzureichend eingeschätzt. Die Nutzung der Daten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) wird favorisiert. An den BZE-Punkten können Stickstoffvorräte der organischen Auflage und des Mineralbodens bis zu einer Tiefe von 90 cm berechnet werden. Das Bodenalter der BZE-Punkte wird entsprechend dem Vorgehen des Vorgängerprojektes anhand der maximalen Vereisung während der letzten Eiszeit festgelegt. Die Stickstoffvorräte der BZE-Aufnahmepunkte werden den BÜK1000N-Einheiten und Corine Landnutzungsklassen zugeordnet. Es zeigt sich, dass sich die Stickstoffimmobilisierungsraten anhand der BÜK1000N-Einheiten in drei Klassen gruppieren lassen. Die höchsten Immobilisierungsraten finden sich in den organischen Böden der BÜK1000N-Einheiten 6 und 7 mit $1,37 \pm 0,29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, mittlere Raten in Höhe von $0,93 \pm 0,06 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in den BÜK1000-Einheiten 19 – 21 mit mittel- bis tiefgründige Böden vorwiegend aus Geschiebelehm oder –mergel sowie Böden im montanen und subalpinen Bereich des Alpenraums. In den übrigen BÜK1000N-Einheiten weisen die Böden Raten von $0,31 \pm 0,04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf. Innerhalb der einzelnen BÜK1000N-Einheiten zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Waldtypen der Corine Landnutzungsdaten, so dass empfohlen wird, die Stratifizierung der Immobilisierungsraten anhand der BÜK1000N-Einheiten vorzunehmen. Mit dem vorliegenden Regionalisierungsansatz können 98,8 % der Rezeptorflächen der Critical-Load-Berechnung abgedeckt werden.

Abstract: Nitrogen-Immobilisation

The aim of this study is to estimate rates of nitrogen immobilization for the calculation of critical loads. First, the ability of the map “landnutzungs – spezifische Bodenübersichtskarte Deutschland 1/1.000.000 (BÜK1000N v2.3)” as data source and as mapping source has to be checked. In accordance with the preceding project (Project number 76011) the nitrogen immobilization rates are calculated based on recently measured nitrogen stocks which are divided by soil age. The ability of the BÜK1000 as data source is limited due to a limited amount of nitrogen data. Therefore we favor the use of the data of the second national forest soil inventory (BZE II). For the BZE II sample plots the nitrogen stocks of the organic layer and the mineral soil to a depth of 90 cm can be calculated. The soil age is estimated according to the recommendation of the preceding project by the last glacial maximum. The nitrogen stocks at the BZE II sample plots are assigned to the mapping units of the BÜK1000N and to the Corine Land Cover classes. The results reveal that according to the BÜK1000N mapping units the nitrogen immobilization rates of the BZE II sample plots can be grouped into three classes. Organic soils in the mapping units 6 & 7 exhibit the highest immobilization rates with $1.37 \pm 0.29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Medium rates can be found in depths soils on glacial loams or till (mapping units 19 – 20) and in forest soil in montane areas in the Alps in with $0.93 \pm 0.06 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. The immobilization rate of the other soils amounts to $0.31 \pm 0.04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Within the mapping units of the BÜK1000N there are only little differences between Corine Land Cover forest types. Therefore, we recommend stratifying the nitrogen immobilization rates according to the BÜK1000N mapping units. With our approach and the available data we cover an area of 98.8 % of the critical load receptors in Germany.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	10
1 Einleitung.....	11
2 Material und Methoden	12
3 Ergebnisse	15
3.1 Stickstoffvorräte.....	15
3.2 Stickstoffimmobilisierung	16
3.3 Festlegung von Immobilisierungsraten für die Critical-Load-Berechnung	18
4 Diskussion.....	21
5 Quellenverzeichnis	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl der in der BÜK1000N hinterlegten Bodenprofile (Tabelle Horizonte) pro Landnutzungsklasse.	12
Abbildung 2:	Anzahl der Probepunkte gruppiert nach BÜK1000N – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp	13
Abbildung 3:	Klassen des Bodenalters und BZE-Punkte.	14
Abbildung 4:	Stickstoffvorräte [t ha^{-1}] gruppiert nach BÜK1000N – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp.	15
Abbildung 5:	Stickstoff-Immobilisierungsraten [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] gruppiert nach BÜK1000 – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp.....	17
Abbildung 6:	Stickstoffimmobilisierungsraten [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und BZE II - Punkte.	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Matrix der Mittelwertvergleiche zwischen den Stickstoffvorräten der BÜK1000N – Einheiten.	16
Tabelle 2:	Matrix der Mittelwertvergleiche zwischen den Stickstoff-Immobilisierungsraten der BÜK1000N – Einheiten.....	18
Tabelle 3:	Stickstoffimmobilisierungsraten für die Berechnung der Critical Load für Deutschland.....	19

Abkürzungsverzeichnis

N_i	Stickstoffimmobilisierungsrate im Kontext der Critical-Load-Berechnung
BÜK1000N	Bodenübersichtskarte 1/1.000.000
BZE	Bodenzustandserhebung im Wald

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, für Deutschland flächendeckend Stickstoffimmobilisierungsraten für die Critical-Load-Berechnung abzuleiten. Es soll dabei geprüft werden, inwieweit die landnutzungs – spezifische Bodenübersichtskarte Deutschland 1/1.000.000 (BÜK1000N v2.3) sowohl als Karten- wie auch als Datengrundlage genutzt werden kann. Aufbauend auf dem Vorgängerprojekt (Projektnr. 76011) werden die Stickstoffimmobilisierungsraten anhand rezent gemessenen Stickstoffvorräte und dem dazugehörigen Bodenalter abgeleitet. Die Eignung der BÜK1000N als Datengrundlage wird dabei aufgrund der Datenlage zu den Stickstoffvorräten als unzureichend eingeschätzt. Die Nutzung der Daten der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) wird favorisiert. An den BZE-Punkten können Stickstoffvorräte der organischen Auflage und des Mineralbodens bis zu einer Tiefe von 90 cm berechnet werden. Das Bodenalter der BZE-Punkte wird entsprechend dem Vorgehen des Vorgängerprojektes anhand der maximalen Vereisung während der letzten Eiszeit festgelegt. Die Stickstoffvorräte der BZE-Aufnahmepunkte werden den BÜK1000-Einheiten und Corine Landnutzungsklassen zugeordnet. Es zeigt sich, dass sich die Stickstoffimmobilisierungsraten anhand der BÜK1000N-Einheiten in drei Klassen gruppieren lassen. Die höchsten Immobilisierungsraten finden sich in den organischen Böden der BÜK1000-Einheiten 6 und 7 mit $1,37 \pm 0,29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, mittlere Raten in Höhe von $0,93 \pm 0,06 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in den BÜK1000N-Einheiten 19 – 21 mit mittel- bis tiefgründige Böden vorwiegend aus Geschiebelehm oder –mergel sowie Böden im montanen und subalpinen Bereich des Alpenraums. In den übrigen BÜK1000N-Einheiten weisen die Böden Raten von $0,31 \pm 0,04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf. Innerhalb der einzelnen BÜK1000N-Einheiten zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Waldtypen der Corine Landnutzungsdaten, so dass empfohlen wird, die Stratifizierung der Immobilisierungsraten anhand der BÜK1000N-Einheiten vorzunehmen. Mit dem vorliegenden Regionalisierungsansatz können 98,8 % der Rezeptorflächen der Critical-Load-Berechnung abgedeckt werden.

Summary

The aim of this study is to estimate rates of nitrogen immobilization for the calculation of critical loads. First, the ability of the map “landnutzungs – spezifische Bodenübersichtskarte Deutschland 1/1.000.000 (BÜK1000N v2.3)” as data source and as mapping source has to be checked. In accordance with the preceding project (Project number 76011) the nitrogen immobilization rates are calculated based on recently measured nitrogen stocks which are divided by soil age. The ability of the BÜK1000N as data source is limited due to a limited amount of nitrogen data. Therefore we favor the use of the data of the second national forest soil inventory (BZE II). For the BZE II sample plots the nitrogen stocks of the organic layer and the mineral soil to a depth of 90 cm can be calculated. The soil age is estimated according to the recommendation of the preceding project by the last glacial maximum. The nitrogen stocks at the BZE II sample plots are assigned to the mapping units of the BÜK1000N and to the Corine Land Cover classes. The results reveal that according to the BÜK1000N mapping units the nitrogen immobilization rates of the BZE II sample plots can be grouped into three classes. Organic soils in the mapping units 6 & 7 exhibit the highest immobilization rates with $1.37 \pm 0.29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Medium rates can be found in depths soils on glacial loams or till (mapping units 19 – 20) and in forest soil in montane areas in the Alps in with $0.93 \pm 0.06 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. The immobilization rate of the other soils amounts to $0.31 \pm 0.04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Within the mapping units of the BÜK1000N there are only little differences between Corine Land Cover forest types. Therefore, we recommend stratifying the nitrogen immobilization rates according to the BÜK1000N mapping units. With our approach and the available data we cover an area of 98.8 % of the critical load receptors in Germany.

1 Einleitung

Die Stickstoffimmobilisierung in Böden gehört zu den am schlechtesten dokumentierten Eingangsgrößen bei der Bestimmung der Critical Loads für Eutrophierung. Zur genauen Berechnung der Critical Loads muss die Stickstoffimmobilisierung aber bekannt sein (Bingham & Cotrufo, 2016). Im Kontext der Critical-Load-Berechnung wird Stickstoffimmobilisierung dabei als langfristige Akkumulation von Stickstoff in Böden ohne Änderung des CN-Verhältnisses aufgefasst (CLRTAP, 2016). Der Critical Load für Eutrophierung berechnet sich als einfache Massenbilanz:

$$CL_{nut}N = N_{upt} + N_i + N_{de} + N_{le}$$

mit

$CL_{nut}N$ = Critical Load für Eutrophierung [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]

N_{upt} = Festlegung von Stickstoff in der Biomasse [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]

N_i = Nettoimmobilisierung von Stickstoff im Boden [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]

N_{de} = Denitrifikation [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]

N_{le} = tolerierbarer bzw. unvermeidbarer Nitrataustrag mit dem Sickerwasser [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$].

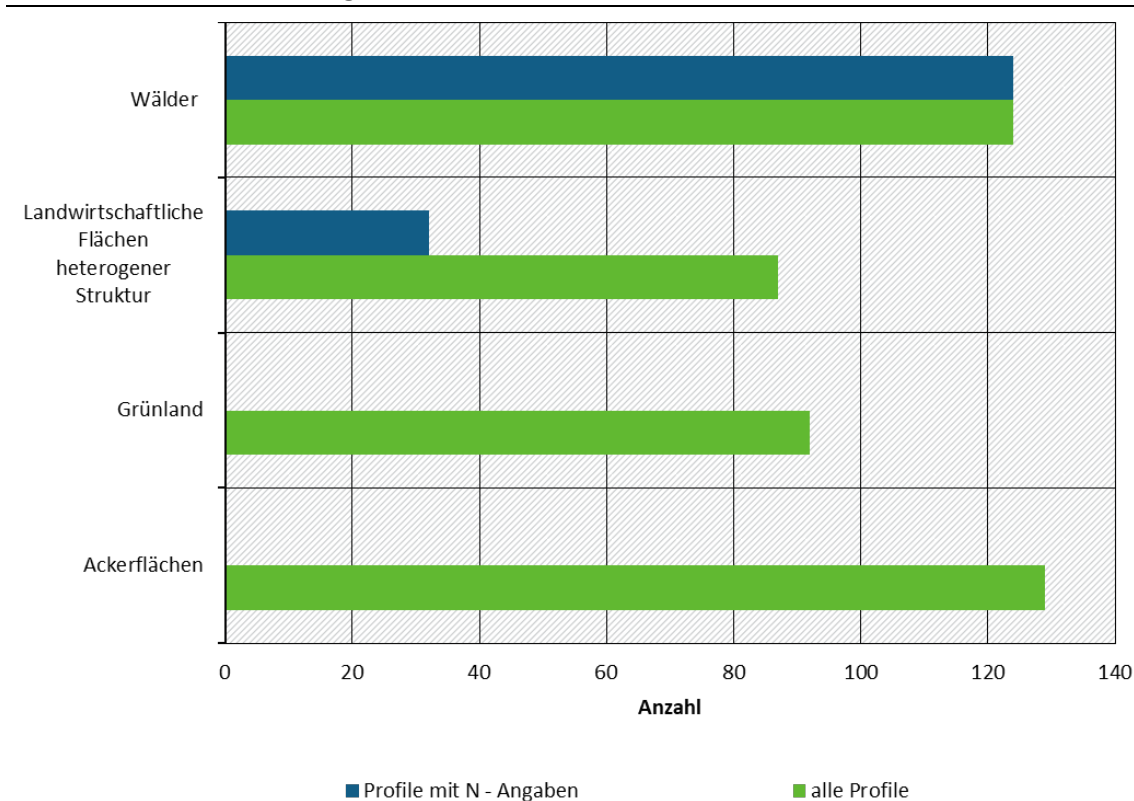
Gegenwärtige Stickstoffvorräte in Böden sind das Ergebnis der Bodenbildung im Holozän. Daher ist es eine gängige Vorgehensweise zur Ermittlung der N-Immobilisierungsraten die rezent gemessenen Stickstoffvorräte durch das Bodentalter zu teilen (Grennfelt, 1992). Diese Methode ist konservativ, und sicherer als die Ermittlung von N-Immobilisierungsraten anhand von gemessenen Zeitreihen, die selbst wenn sie über mehrere Dekaden gehen, unter dem Einfluss anthropogener Umweltänderungen, wie z.B. Stickstoffeinträge, oder kurzfristigen Störungen, wie z.B. Windwürfe, stehen. Dieser Ansatz wurde auch vom Vorgängerprojekt empfohlen (Höhle & Wellbrock, 2017). Die bisher genutzte Methode für Deutschland geht dagegen von temperaturabhängigen Immobilisierungsraten mit Werten zwischen $5\ kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$ bei mittleren Jahrestemperaturen von $< 5\ ^\circ C$ und $0.5\ kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$ bei $> 8\ ^\circ C$ aus (CCE, 2001). Diese Werte wurden anhand der Humusvorräte der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) modifiziert (Schlutow et al., 2018). Ein Expertenworkshop in Olten (23.02. - 24.02.2017) kam aber zu dem Schluss, dass das Bodentalter gegenüber der Temperatur den größeren Einfluss hat.

Ziel der vorliegenden Studie war es Immobilisierungsraten für die Critical-Load-Berechnung in Deutschland flächenrepräsentativ abzuleiten. Die an Messpunkten abgeleiteten Immobilisierungsraten sollten dabei mittels geeigneter Verfahren und Kartengrundlagen regionalisiert werden. Die Vorgehensweise sollte sich an den Empfehlungen des Expertenworkshops in Olten orientieren. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse für die Critical-Load-Berechnung auf nationaler Ebene fand eine besondere Berücksichtigung.

2 Material und Methoden

Grundlage für eine flächendeckende Ableitung der Stickstoffimmobilisierungsraten war die landnutzungs-spezifische Bodenübersichtskarte Deutschlands 1/1.000.000 (BÜK1000N v2.3). Weiterhin wurden als flächendeckende Informationen der Landnutzung zur Berechnung flächengewichteter Mittelwerte (s.u.) die Corine Landcover Daten 2006 (EEA, 2010) genutzt. Eine Prüfung der Datenbank der BÜK1000N ergab, dass nur Bodenprofile von zwei Landnutzungsklassen mit N-Gehalten hinterlegt sind (Abbildung 1). Die Daten liegen dabei horizontweise vor. Die Daten der Klasse Wälder entstammen vermutlich vorwiegend der BZE I. Gemessene Trockenraumdichten und Grobbodenanteile sind nicht hinterlegt, was die Vorratsberechnung erschwert. Als weitere Landnutzungskategorie enthält nur die Klasse „Landwirtschaftliche Flächen heterogener Struktur“ Daten zu N-Gehalten. Auch diese Daten sind weitestgehend unbrauchbar, da sich diese Klasse keiner der bei der Critical-Load-Berechnung verwendeten Nutzungskategorien zuordnen lässt. Für die Ableitung der Immobilisierungsraten wurden daher die Daten der BZE II (Wellbrock et al., 2016) genutzt.

Abbildung 1: Anzahl der in der BÜK1000N hinterlegten Bodenprofile (Tabelle Horizonte) pro Landnutzungsklasse.



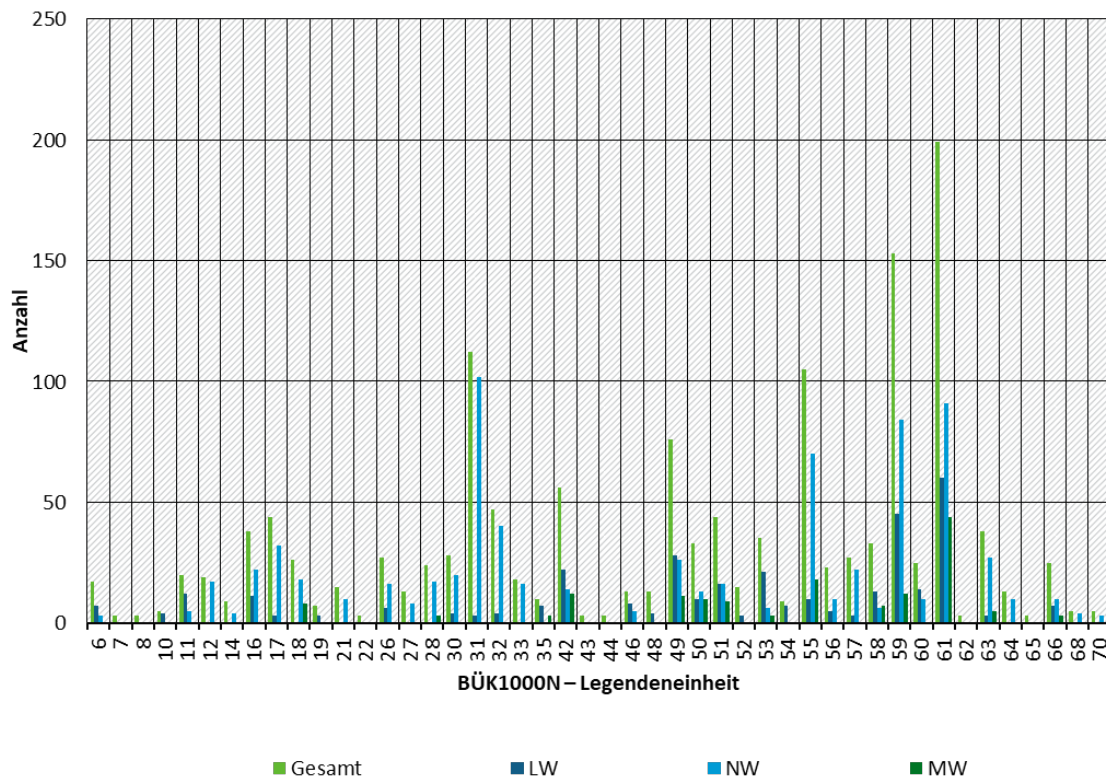
„Profile mit N - Angaben“ = Bodenprofile, die Angaben zu N-Konzentrationen enthalten.

Quelle: eigene Darstellung, Datenquelle: BGR.

Die BZE liefert Daten zu Stickstoffvorräten von über 1800 Punkten. Die BZE-Daten sind darüber hinaus in Waldkategorien unterteilt und wurden auch den bodenkundlichen Legendeneinheiten der BÜK1000N zugeordnet. Aus den BZE II - Daten lassen sich an 1647 Punkten Stickstoffvorräte für die Auflage und den Mineralboden bis zu einer Tiefe von 90 cm ableiten (Abbildung 2). Der flächengewichtete Median der Vorräte der Auflage und des Mineralbodens bis zu einer Tiefe von 90 cm beträgt dabei 6,3 t ha⁻¹ (Andreae et al., 2016, Fleck et al., 2018). Die BZE-Punkte wurden

anhand ihrer Profilsprache den BÜK1000N - Einheiten zugeordnet. Die Zuordnung wurde dabei von der BZE-Auswertung (Wellbrock et al., 2016) übernommen. Anhand der Bestockungsaufnahme der BZE wurde weiterhin die Corine Landnutzungs-kategorie zugeordnet. Die Flächeninformationen aus BÜK1000N und Corine wurden verschnitten und den BZE-Punkten für die Berechnung flächengewichteter Mittelwerte zugeordnet. Um Unterschiede in der Netzdichte zwischen den einzelnen Bundesländern auszugleichen, wurde die Klasse Bundesland als weitere Stratifizierungseinheit eingeführt. Für jede Einheit wurde eine Ausreißerkontrolle entsprechend Grüneberg et al. (2014) durchgeführt und bei der statistischen Auswertung nur Einheiten mit mindestens drei Probepunkten berücksichtigt.

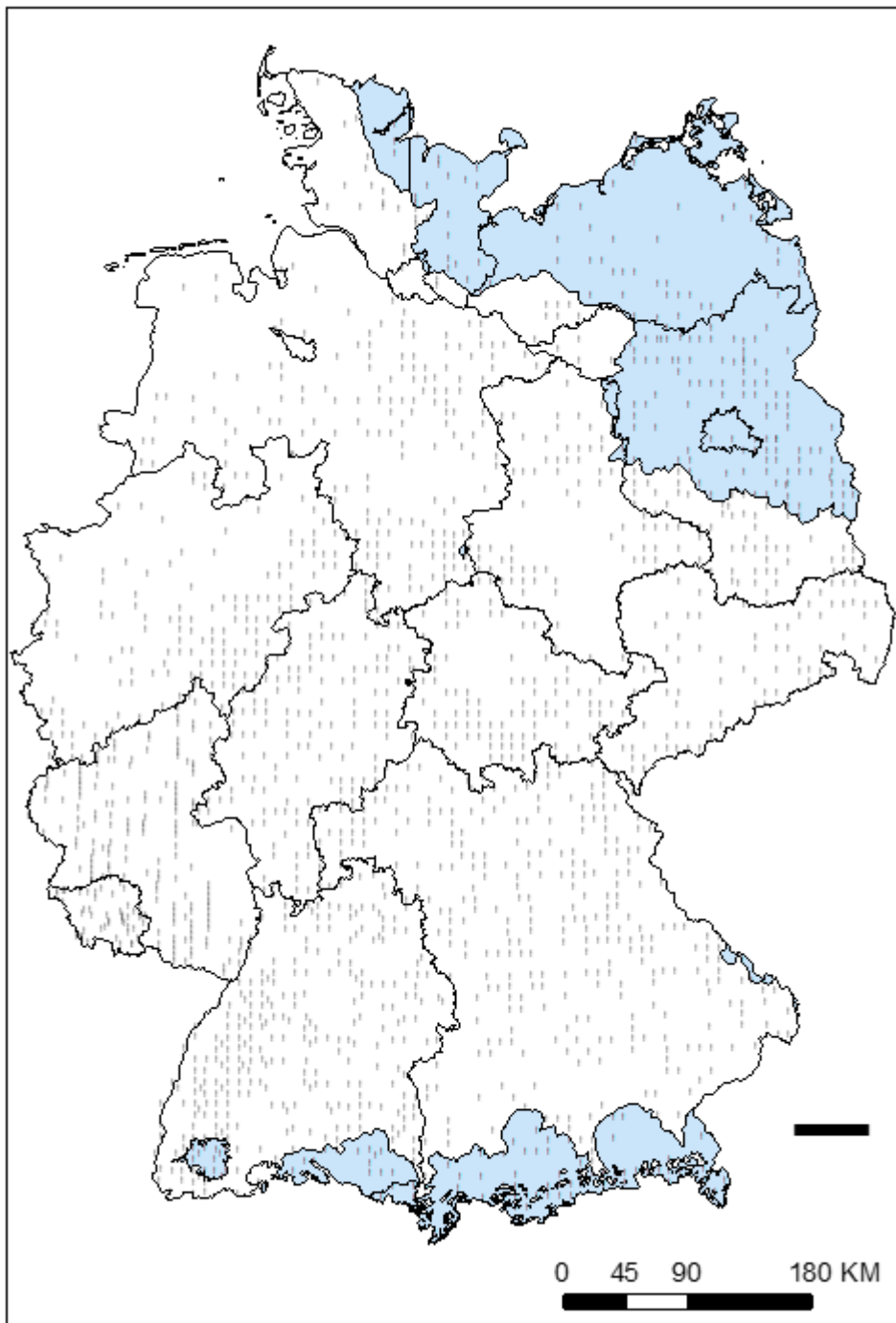
Abbildung 2: Anzahl der Probepunkte gruppiert nach BÜK1000N – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Das Bodenalter wurde entsprechend der Vorgehensweise im Vorläuferprojekt von Höhle & Wellbrock (2017) anhand der maximalen Ausdehnung der letzten Eiszeit der Weichsel/Würm-Eiszeit abgeleitet (Abbildung 3, Ehlers et al., 2011). Es wurden zwei Altersstufen angenommen: für den vergletscherten Bereich wurde pauschal 10.000 Jahre gesetzt, für den unvergletscherten Bereich 24.000 Jahre. Um den Einfluss des Bodenalters auf die räumlichen Muster der Immobilisierungsraten abschätzen zu können, wurden parallel zu den Immobilisierungsraten auch die Stickstoffvorräte ausgewertet.

Abbildung 3: Klassen des Bodenalters und BZE-Punkte.



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut, Datenquelle Vergletscherung: Elsevier.

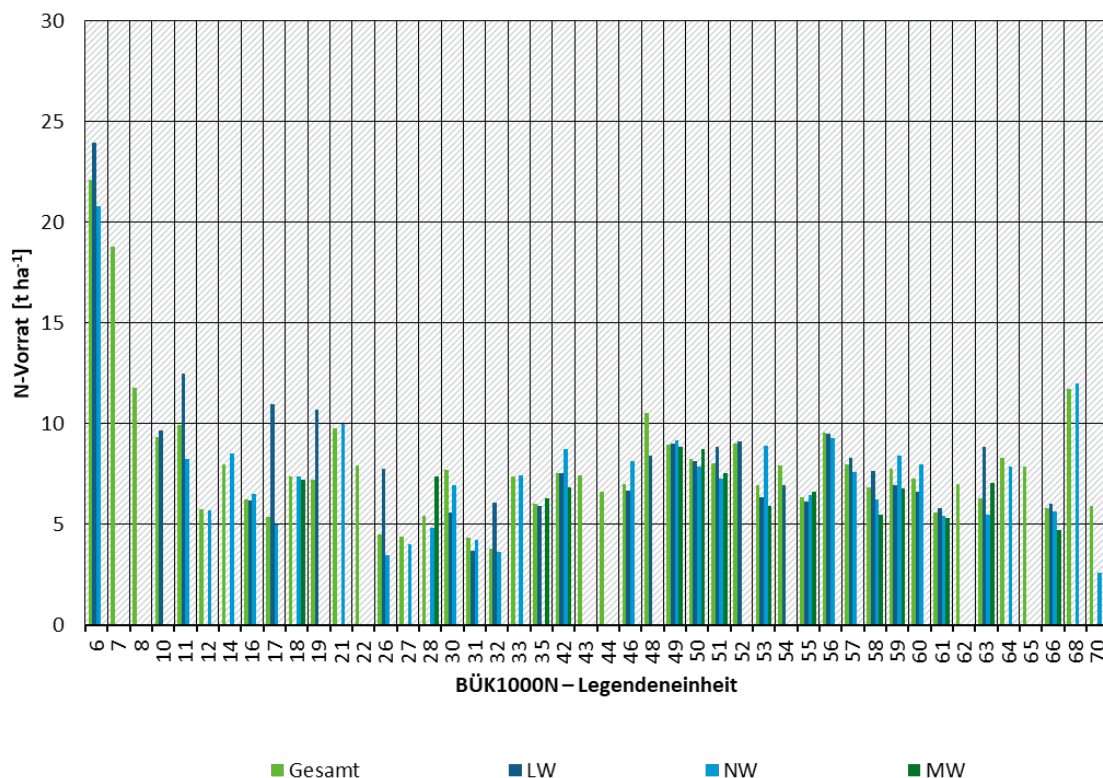
Unterschiede zwischen den Stickstoffvorräten und N-Immobilisierungsraten der BÜK1000N – Einheiten wurden mit einer Varianzanalyse getestet. Anschließend wurde ein multipler Mittelwertvergleich durchgeführt (proc glm, SAS Institute, Carry). Da sehr viele Mittelwerte miteinander verglichen werden mussten, wurde dazu ein Test gewählt, der das Gesamt-Signifikanzniveau an die Zahl der Mittelwertvergleiche ($m = 1352$) anpasst. Die Wahl fiel auf den GT2 – Test, da dieser auch für unterschiedliche Gruppengrößen geeignet ist. Auf eine Flächengewichtung der einzelnen BZE-Punkte wurde bei den multiplen Mittelwertvergleichen verzichtet, da der Einfluss der Wichtung bei multiplen Mittelwertvergleichen ungeklärt ist.

3 Ergebnisse

3.1 Stickstoffvorräte

Beim Vergleich der BÜK1000N-Einheit heben sich vor allem die hohen N-Vorräte der organischen Böden in den Einheiten 6 und 7 ab (Abbildung 4). Hier beträgt der Vorrat $22,1 \pm 3,5 \text{ t ha}^{-1}$ und $18,8 \pm 5,7 \text{ t ha}^{-1}$. Daneben zeichnen sich die Auenböden in den Einheiten 8, 10 und 11 mit $11,8 \pm 2,0 \text{ t ha}^{-1}$, $9,3 \pm 1,4 \text{ t ha}^{-1}$ und $10,0 \pm 1,1 \text{ t ha}^{-1}$ durch hohe N-Vorräte aus. Auch Böden der montanen und subalpinen Stufe im Alpenraum (Einheit 68) haben mit $11,7 \pm 0,8 \text{ t ha}^{-1}$ hohe Vorräte. Niedrige Stickstoffvorräte finden sich vor allem in den Einheiten 31 und 32 mit $4,3 \pm 0,2 \text{ t ha}^{-1}$ und $3,8 \pm 0,2 \text{ t ha}^{-1}$. Auch 26 und 27 sowie 61 zeichnen sich $4,5 \pm 0,9 \text{ t ha}^{-1}$, $4,4 \pm 0,5 \text{ t ha}^{-1}$ sowie $5,6 \pm 0,1 \text{ t ha}^{-1}$ durch niedrige Vorräte aus. Mittels des GT2-Testes wurde geprüft, ob sich die Stickstoffvorräte zwischen den BÜK1000N-Einheiten signifikant unterscheiden (Tabelle 1). Die Unterschiede der genannten Einheiten zu anderen Einheiten sind in der Regel signifikant. Das bundesweite flächengewichtete Mittel ohne organische Böden liegt bei $7,1 \pm 0,1 \text{ t ha}^{-1}$.

Abbildung 4: Stickstoffvorräte [t ha^{-1}] gruppiert nach BÜK1000N – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp.

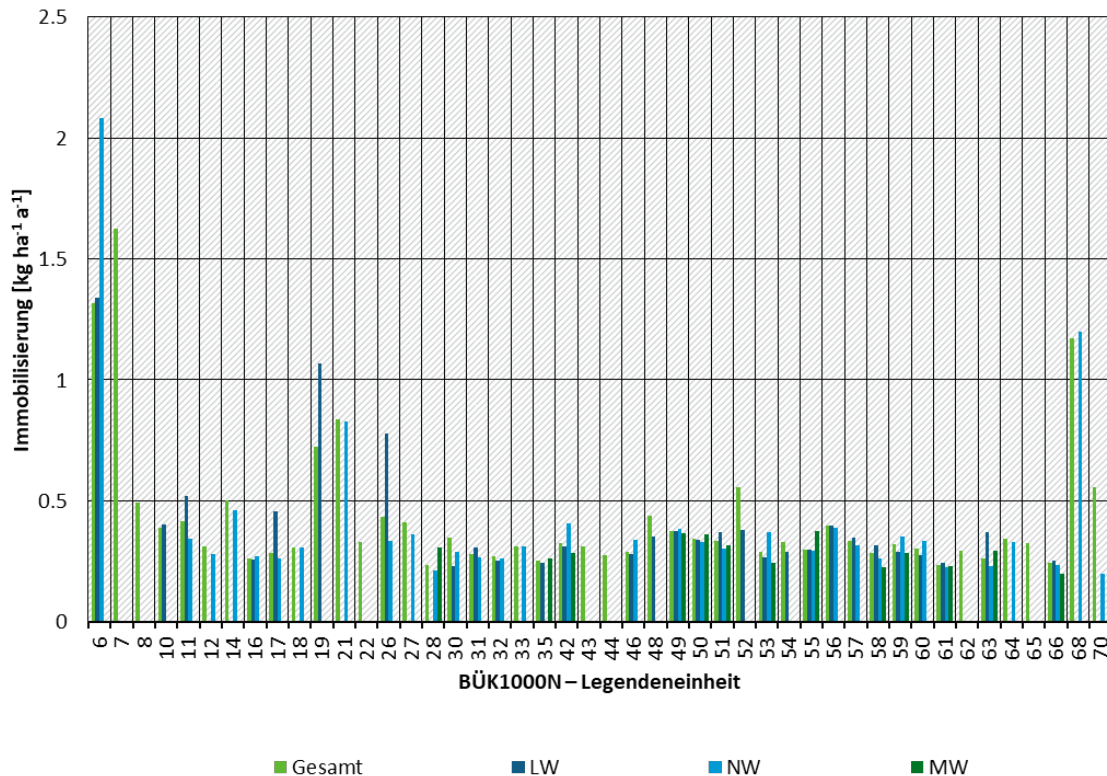


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut.

Im bundesweiten flächengewichteten Mittel ohne organische Böden finden sich unter Laubwald $8,0 \pm 0,2 \text{ t ha}^{-1}$, unter Mischwald $7,0 \pm 0,2 \text{ t ha}^{-1}$ und unter Nadelwald $6,5 \pm 0,1 \text{ t ha}^{-1}$. Allerdings sind die Waldtypen ungleichmäßig zwischen den BÜK1000N – Einheiten verteilt. Zwischen den Waldtypen finden sich bei den Stickstoffvorräten nur innerhalb der BÜK1000N - Einheiten 17, 26, 32 und 63 Unterschiede. Dort sind die Vorräte unter Laubwäldern jeweils höher als unter Nadelwald. Innerhalb der BÜK1000N - Einheiten 31, 32 und 55 sind signifikante Unterschiede in

$0,84 \pm 0,12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sowie 68 mit $1,17 \pm 0,08 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ von zahlreichen der übrigen Einheiten (Tabelle 2). Das flächengewichtete Mittel der übrigen Einheiten beträgt $0,31 \pm 0,04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Abbildung 5: Stickstoff-Immobilisierungsraten [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] gruppiert nach BÜK1000 – Legendeneinheit und Corine-Waldtyp.



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut.

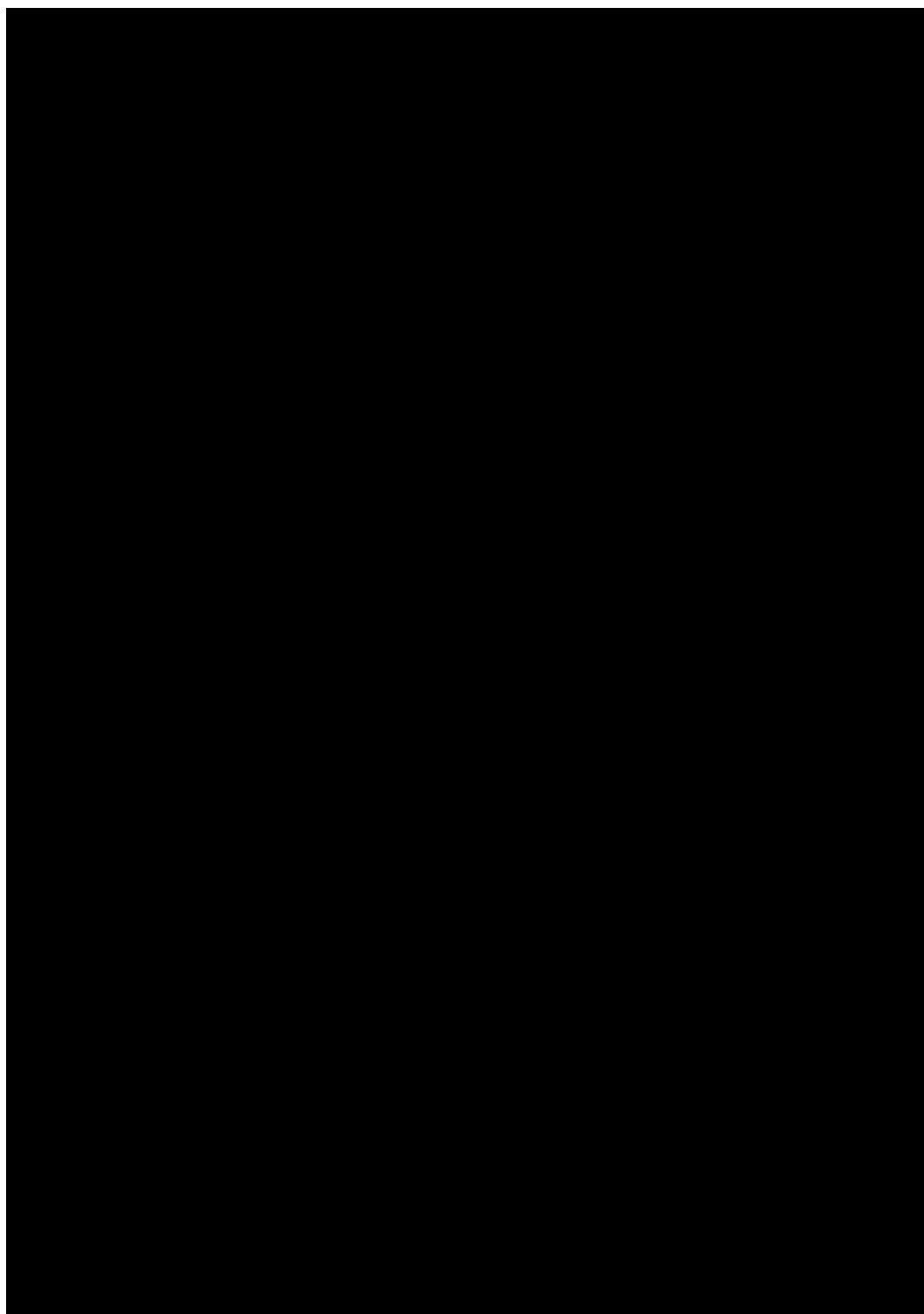
Im bundesweiten flächengewichteten Mittel liegen die Immobilisierungsraten für Laubwald bei $0,39 \pm 0,01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, für Nadelwald bei $0,32 \pm 0,01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und für Mischwald bei $0,34 \pm 0,02 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Unterschiede zwischen Laubwald und Nadelwald sind signifikant. Allerdings sind die Landnutzungstypen sehr unterschiedlich zwischen den BÜK1000N - Einheiten verteilt. Unterschiede zwischen den Waldtypen innerhalb der BÜK1000N - Einheiten ergeben sich nur in Ausnahmefällen. In den BÜK1000N - Einheiten 17, 26 und 63 unterscheiden sich die Immobilisierungsraten zwischen Laub- und Nadelwald, wobei in 17 und 63 die Anzahl der Probepunkte im Laubwald gering ist. Wie auch bei den Stickstoffvorräten sind innerhalb der BÜK1000N - Einheiten 31, 32 und 55 bei den Immobilisierungsraten signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Bodenalter zu finden. In den übrigen Einheiten ergeben sich keine Unterschiede oder allen BZE-Punkten ist dasselbe Bodenalter zugeordnet worden.

Innerhalb des Critical - Load - Datensatzes des UBA liegt der Anteil der nicht-belegten BÜK1000N - Einheiten am Gesamtdatensatz bei 1,2 %.

Tabelle 3: Stickstoffimmobilisierungsraten für die Berechnung der Critical Load für Deutschland

Nr.	Beschreibung (BÜK-Einheiten)	N _i [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	Flächenanteil im Critical-Load-Datensatz [%]
1	Organische Böden (6 & 7)	1.37 ± 0.29	5.3
2	mittel- bis tiefgründige Böden vorwiegend aus Geschiebelehm oder –mergel (19 – 21) & Böden im montanen und subalpinen Bereich des Alpenraums (68)	0.93 ± 0.06	6.4
3	Alle nicht in 1 & 2 enthaltene Böden	0.31 ± 0.04	87.1
4	Böden junger Dünengebiete und sturmüberfluteter Sandplatten der Küstengebiete (1), Marschböden (3-5), Schwarzerden / Lößgebiet (36-41), Böden oberhalb der Waldgrenze im Alpenraum (69)	N.A.	1.2

Abbildung 6: Stickstoffimmobilisierungsraten [$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und BZE II - Punkte.



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut, Datenquelle BÜK1000N: BGR.

4 Diskussion

Für die Mehrzahl der Böden liegen die Immobilisationsraten mit $0,31 \pm 0,04 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich unter den Werten von Nilsson & Grennfelt (1988) mit 1 bis $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Raten für Deutschland befinden sich in der Größenordnung von Untersuchungen, die in den Schweizer Alpen und Rocky Mountains (Egli et al., 2012) sowie Schweden (Rosen et al., 1992) durchgeführt wurden. Hier lagen die Raten unter Wald zwischen $0,1$ und $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Im Vorgängerprojekt wurden für Böden, die während der letzten Eiszeit vergletschert waren, $0,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für die Schweiz und Frankreich ermittelt. Auf unvergletscherten Böden waren es $0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für Frankreich, bzw. $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für die Schweiz (Höhle & Wellbrock, 2017). Auch Johnson & Turner (2014) kamen bei ihrem Literaturstudium mit $0,5 - 1,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf vergleichbare Werte für Waldböden. Allerdings können bei Beginn der Bodenbildung im Vorfeld von Gletschern die Immobilisationsraten mit bis zu $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sehr viel höher sein (Egli et al., 2012). Aggenbach et al. (2017) zeigten, dass bei der Bodenentwicklung auf Dünen die Netto-Akkumulation von N nach ca. 100 Jahren abgeschlossen ist. Die Immobilisierungsrate ändert sich im Laufe der Bodenentwicklung mit hohen Raten in sehr jungen Böden und niedrigen in älteren Böden. Untersuchungen zu Vorratsänderungen oder N-Budget-Berechnungen ergaben mit $-70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bis hin zu $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sehr viel größere und in ihrer Ursache nicht geklärte Änderungsraten in Waldböden (Johnson & Turner 2014). Der Vergleich von BZE II mit der BZE I ergab eine Abnahme von $-8,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Fleck et al., 2018). Offensichtlich sind die Stickstoffvorräte in Böden einer großen Dynamik unterworfen. Der Ansatz, Stickstoffvorräte durch das Bodenalter zu teilen, ist daher als konservativer Ansatz bei der Critical-Load-Berechnung zu bevorzugen. Der Einfluss der Landnutzung wurde anhand der drei Waldtypen abgeschätzt. Die bundesweit bestehenden Unterschiede zwischen den Waldtypen lassen sich mit der ungleichmäßigen Verteilung der Waldtypen zwischen den BÜK1000N - Einheiten erklären. Es zeigten sich dabei zwischen den Waldtypen innerhalb der BÜK1000N - Einheiten kaum Unterschiede. Weiterhin ist die Spreizung der Werte bei einer Klassifizierung anhand Waldtypen sehr viel geringer als bei einer Klassifizierung anhand der BÜK1000N - Einheiten. Daher ist es sinnvoll, die Differenzierung der Immobilisationsraten anhand der BÜK1000N - Einheiten vorzunehmen. Die N-Immobilisationsraten wurden in der vorliegenden Studie anhand von Aufnahmepunkten unter Wald ermittelt. Weiterhin sind mehrere BÜK1000N - Einheiten nicht durch Aufnahmepunkte hinterlegt. Dabei handelt es sich vorwiegend um fruchtbare Böden der Marsch (3-5) und Schwarzerden (36-41), oder auch um vorwiegend oder gänzlich waldfreie Gebiete, wie Böden in der alpinen bis nivalen Höhenstufe (69) bzw. Böden junger Dünengebiete und sturmüberfluteter Sandplatten der Küstengebiete (1). Ebenso sind waldfreie Gebiete innerhalb der Moore und anderer Feuchtgebiete nicht mit eingeschlossen. Es ist zu diskutieren, inwieweit sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie auf andere Landnutzungsklassen und nicht-belegte BÜK1000N-Einheiten übertragen lassen. Dabei ist zunächst zu bedenken, dass Deutschland ohne anthropogenen Einfluss fast völlig von Wald bedeckt wäre. Eine zunehmende Entwaldung setzte erst mit Beginn der mittelalterlichen Städtegründungen ein und erreichte ihr Maximum vor dem Beginn der modernen Forstwirtschaft. Der Großteil der Böden war somit während eines wesentlichen Teils seiner Entwicklung Waldboden. Daher können die Immobilisierungsraten unter Wald prinzipiell als naturnahe Raten für das Gesamtgebiet gelten, während Immobilisierungsraten, die an anderen Landnutzungsklassen ermittelt wurden, stärker anthropogen beeinflusst sind. Ausgenommen davon sind natürlicherweise waldfreie Gebiete: diese finden sich oberhalb der (natürlichen) Waldgrenze, in den Überflutungsbereichen der Küsten und Binnengewässer, in junge Dünengebieten und in waldfreien Bereichen von Mooren. Dabei kann es sich z.T. um sehr junge Böden handeln, die sehr hohe und variable Immobilisierungsraten aufweisen, so z.B. bis zu $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei der Sukzession von Dünen

(Gerlach et al., 1994) oder zwischen 1 und 100 kg ha⁻¹ a⁻¹ oberhalb der Baumgrenze (Egli et al., 2012). Für diese Böden ist eine gesonderte Ermittlung der Immobilisierungsraten notwendig. Ebenso sollten die Immobilisationsraten für Marschböden (3-5) und Schwarzerden (36-41) gesondert ermittelt werden. Wie gezeigt, bietet die BÜK1000N keine ausreichende Datenbasis, um die Lücken aufzufüllen. Für die genannten Gruppen könnten die Daten der BZE - Landwirtschaft Werte liefern. Diese stehen voraussichtlich ab dem 4. Quartal 2018 zur Verfügung. Hier bietet sich eine Auswertung der Grünlandböden an. Es kann angenommen werden, dass das Stickstoffimmobilisierungsvermögen von Grünlandböden analog zu ihrem Kohlenstoffspeichervermögen (Poeplau & Don, 2013) in einer mit Waldböden vergleichbaren Größenordnung liegt. Abgesehen von den genannten Ausnahmen konnten mit dem vorliegenden Regionalisierungsansatz für 98,8 % der Fläche der Critical-Load-Rezeptoren Immobilisierungsraten ermittelt werden.

5 Quellenverzeichnis

- Aggenbach, C.J.S., Kooijman, A.M., Fujita, Y., van der Hagen, H., van Til, M., Cooper, D. & Jones, L. (2017): Does atmospheric nitrogen deposition lead to greater nitrogen and carbon accumulation in coastal sand dunes? *Biological Conservation* 212: 416–422.
- Andreae, H., Eickenscheidt, N., Evers, J., Grüneberg, E., Ziche, D., Ahrends, B., Höhle, J., Nagel, H.-D. & Wellbrock, N. (2016): Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008* [Hrsg: Wellbrock, N, Bolte, A & Flessa, H]. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, pp. 135-180.
- Bingham, A.H. & Cotrufo, M.F. (2016): Organic nitrogen storage in mineral soil: Implications for policy and management. *Science of the Total Environment*, 551-552, 116-126.
- CCE (2001): *Modelling and Mapping of Critical Thresholds in Europe: Status Report 2001*. Bilthoven: Coordination Center for Effects National Institute for Public Health and the Environment, 188p.
- CLRTAP (2016): Mapping critical loads for ecosystems, Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution 115p.; accessed on 04.03.2018 at www.icpmapping.org (last update 13.01.2017)
- EEA (2010): Raster data on land cover for the CLC 2006 inventory. European Environment Agency, Copenhagen. Available at: http://www.eea.europa.eu/dataand-maps/data/ds_resolveuid/a645109f7a11d43f5d7e275d81f35c61 (accessed 23 September 2013).
- Egli, M., Favilli, F., Krebs, R., Pichler, B. & Dahms, D. (2012): Soil organic carbon and nitrogen accumulation rates in cold and alpine environments over 1Ma. *Geoderma*, 183-184, 109-123.
- Ehlers, J., Gibbard, P.L. & Hughes, P.D. (2011): *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Volume 15*. Amsterdam: Elsevier, 1126p.
- Fleck, F., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Evers, J., Grüneberg, E., Ziche, D., Höhle, J., Schmitz, A., Weis, W., Schmidt-Walter, P., Andreae, H. & Wellbrock, N. (2018): Nitrogen status and dynamics in German forest soils. Unveröffentlichtes Manuskript.
- Gerlach, A., Albers, E.A. & Broedlin, W. (1994): Development of the nitrogen-cycle in the soils of a coastal dune succession. *Acta Botanica Neerlandica* 43, 189-203.
- Grennfelt, P. (1992): Critical loads for nitrogen: a workshop report. Report from a workshop held at Lökeberg, Sweden, 6-10 April 1992. Nordic Council of Ministers.
- Höhle, J. & Wellbrock, N. (2017): Immobilisation of nitrogen in context of critical loads – Literature review and analysis of German, French and Swiss soil data. Dessau: UBA-Texte, 21p.
- Johnson, D.W. & Turner, J. (2014): Nitrogen budgets of forest ecosystems: A review. *Forest Ecology and Management*, 318, 370-379.
- Nilsson, J. & Grennfelt, P. (1988): Critical loads for sulphur and nitrogen: report from a workshop held at Skokloster, Sweden, 19-24 March 1988. Nordic Council of Ministers Copenhagen, pp. 225-268.
- Poeplau, C. & Don, A. (2013): Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma* 192, 189–201.
- Rosen, K., Gundersen, P., Tegnhammar, L., Johansson, M. & Frogner, T. (1992): Nitrogen enrichment of Nordic forest ecosystems: The concept of critical loads. *Ambio*, 21, 364-368.

Schlutow, A., Nagel, H.-D., Bouwer, Y. (2017): Bereitstellung der Critical Load Daten für den Call for Data 2015 - 2017 des Coordination Centre for Effects im Rahmen der Berichtspflichten Deutschlands für die Konvention über weitreichende grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (CLRTAP). Straussberg: ÖKO-DATA, 153p.

Wellbrock, N., Bolte, A. & Flessa, H. [Hrsg.] (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Rep 43, Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 550p. DOI:10.3220/REP1473930232000.