

**Vergleich der Daten der LUCAS 2015-Inventur und
der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald**
Untersuchungen zur Vergleichbarkeit und Repräsentanz
zweier bodenkundlicher Inventuren in Deutschland

**Comparison of the LUCAS 2015 inventory with the
second National Forest Soil Inventory**

**Comparability and representativeness of two soil
inventories conducted in Germany**

Daniel Ziche, Erik Grüneberg, Winfried Riek, Nicole Wellbrock

Thünen Report 94

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Ziche D, Grüneberg E, Riek W, Wellbrock N (2022) Comparison of the LUCAS 2015 inventory with the second National Forest Soil Inventory : Comparability and representativeness of two soil inventories conducted in Germany. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 62 p, Thünen Rep 94, DOI:10.3220/REP1651759791000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Report 94

Herausgeber/Redaktionsanschrift – Editor/address

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@thuenen.de
www.thuenen.de

ISSN 2196-2324

ISBN 978-3-86576-239-9

DOI:10.3220/REP1651759791000

urn:nbn:de:gbv:253-202205-dn064841-1

Vergleich der Daten der LUCAS 2015-Inventur und der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald

Untersuchungen zur Vergleichbarkeit und Repräsentanz zweier bodenkundlicher Inventuren in Deutschland

Comparison of the LUCAS 2015 inventory with the second National Forest Soil Inventory

Comparability and representativeness of two soil inventories conducted in Germany

Daniel Ziche, Erik Grüneberg, Winfried Riek, Nicole Wellbrock

Thünen Report 94

Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE)

Fachbereich für Wald und Umwelt
Eberswalde University of Sustainable Development
Faculty of Forest and Environment
Alfred-Möller-Straße. 1, 16225 Eberswalde, Germany

Daniel Ziche

Tel: +49 3334 657-186

Fax: +49 3334 657-206

Mail: daniel.ziche@hnee.de

Winfried Riek

Tel: +49 3334 657-170

Fax: +49 3334 657-206

Mail: winfried.riek@hnee.de

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Institut für Waldökosysteme
Johann Heinrich von Thünen Institute
Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries
Institute of Forest Ecosystems
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Germany

Erik Grüneberg

Tel: +49 3334 3820-368

Fax: +49 3334 3820-354

Mail: erik.grueneberg@thuenen.de

Nicole Wellbrock

Tel: +49 3334 3820-304

Fax: +49 3334 3820-354

Mail: nicole.wellbrock@thuenen.de

Thünen Report 94

Eberswalde/Germany, Mai 2022

Zusammenfassung

Die Produktivität von Waldökosystemen wird durch die Bereitstellung von Nährstoffen und Wasser gewährleistet. Somit ist das Wissen über die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Böden essentiell sowohl zur Beurteilung des Bodenzustands als auch der Güte des Waldstandorts. Hierfür können Daten aus zwei bundesweiten Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE-Wald) von über 1.800 Probepunkten eines 8 x 8 km-Grundrasters herangezogen werden. Die Erhebungen fanden zwischen 1986 bis 1994 (BZE I-Wald) und 2006 bis 2008 (BZE II-Wald) nach einheitlichem Aufnahmeverfahren statt. Das LUCAS-Projekt zielt auf die Erstellung eines harmonisierten Datensatz zur Landbedeckung und Landnutzung innerhalb der Europäischen Union (EU). Das Europäische Datenzentrum (ESDAC) stellt 265.000 georeferenzierte Punkte auf einem 2 x 2 km-Raster bereit, die jeweils in den Jahren 2009 und 2015 an 10 % der Punkte am gleichen Standort beprobt wurden. Angesichts von zwei parallelaufender Bodeninventuren stellt sich die Frage einer potentiellen Verknüpfung miteinander. In dieser Studie werden die LUCAS-Bodendaten der Inventur des Jahres 2015 mit den entsprechenden bundesweiten BZE-Daten verglichen und auf ihre Repräsentativität überprüft. Um eine flächengewichtete Hochrechnung für Deutschland zu ermöglichen, erfolgte eine Zordnung der Inventurpunkte des LUCAS-Programms anhand ihrer Koordinaten zu den bei der bundesweiten BZE-Auswertung verwendeten 16 BZE-Substratklassen. Alle Klassen wurden hinsichtlich signifikanter und systematischer Unterschiede zwischen beiden Inventuren überprüft. Darüber hinaus wurden die BZE-Daten dahingehend evaluiert, inwieweit die ausschließlich im LUCAS Programm verwendete Tiefenstufe 0-20 cm im Vergleich zum Mineralboden bis in 90 cm Tiefe und der Humusaufgabe bei der Berechnung von Vorräten zukommt. Der Vergleich der bodenchemischen Kennwerte ergab deutliche Unterschiede zwischen den Inventuren. Sowohl die pH(H₂O)-Werte als auch die C/N-Verhältnisse waren bei LUCAS 2015 niedriger, die Konzentrationen von C und N jedoch höher als bei der BZE II. Die Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff weisen noch größere Abweichungen gegenüber der BZE II aufgrund der Unsicherheiten bei der Ableitung von Trockenrohddichten aus Kartenmaterial auf. Im Gegensatz dazu erfolgte durch die BZE II eine volumenbezogene Beprobung an fast allen Standorten. Eine Ableitung von Trockenrohddichten aus Kartenmaterial führt bei der LUCAS-Inventur zu einer hohen Unsicherheit der Ergebnisse und zu einer Überschätzung von Vorratsänderungen. Die höheren Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen bei der LUCAS-Inventur könnten an einer unzureichend genauen Trennung der organischen Auflage vom Mineralboden liegen, da dieser durch Bestandteile der Auflage aufkonzentriert würde. Während der Erhebung der BZE-Wald wurde explizit auf die systematische Trennung beider Kompartimente geachtet. Weiterhin steht die Anzahl der beprobten LUCAS-Waldpunkte im Missverhältnis zur Waldfläche, da in Nord- und Süddeutschland zu wenig Probepunkte vorkamen. Allerdings sind die Waldanteile der LUCAS-Gesamtinventur mit denen der dritten Bundeswaldinventur vergleichbar. Die Stichprobengröße von LUCAS 2015 umfasst etwa 25 % der BZE II-Stichprobe. Hierdurch sind einige Substrattypen nur unzureichend belegt, weshalb zum einen wesentliche Bodeneigenschaften unberücksichtigt blieben und andererseits eine flächengewichtete Hochrechnung erschwert werden würde. Infolge der geringeren Stichprobe weichen die bodenchemischen Kennwerte der einzelnen Substratgruppen zwischen den Messnetzen ab. Außerdem erhöhen sich die Unsicherheiten durch die Reduzierung der Stichprobe. Somit ließen sich Bodenveränderungen bei einer Wiederholungsinventur schwerer detektieren. Die Daten aus den Bodeninventuren sind für die Treibhausgasberichterstattung relevant, da Kohlenstoffvorräten für die organische Auflage und für den Mineralboden bis zu einer Tiefe von mindestens 30 cm zu berichten sind. Im Mittel werden nach den Daten der BZE II 16 % des bis 90 cm Tiefe vorkommenden Kohlenstoffs in der Auflage gespeichert, wobei diese mit der LUCAS-Inventur nicht beprobt wurde. Der in der organischen Auflage gebundene Kohlenstoff ist vulnerebel gegenüber Klima- und Umwelteinflüssen, so dass eine Auswertung diesbezüglich nicht möglich ist. Weiterhin wurde bei LUCAS 2015 nur die oberen 20 cm des Mineralbodens beprobt und damit lediglich 42 % des bei der BZE II abgeschätzten Kohlenstoffs erfasst. Durch das Fehlen der Auflage und die geringere Tiefe sind die Daten aus LUCAS 2015 nur eingeschränkt für die Treibhausgasberichterstattung nutzbar. Aufgrund einer geringeren Repräsentativität sowie größeren Unsicherheiten und Diskrepanzen von LUCAS 2015 gegenüber der BZE im Wald würde eine Vereinigung beider Datensätze keine zusätzlichen Synergien erzeugen.

Schlüsselwörter: Boden, Wald, Inventur, Probenahme, Karten, Konzentrationen, Vorräte, Kohlenstoff, Stickstoff, pH-Wert, Trockenrohddichte, Unsicherheiten, Harmonisierung, Repräsentativität

Summary

The productivity of forest ecosystems depends on the supply of both nutrients and water by soils. Therefore, the knowledge of the chemical and physical soil properties is crucial for assessing the soil condition as well as the quality of forest sites. For this purpose, data are available from two nationwide Forest Soil Inventories (NFSI) on more than 1,800 sample plots of an 8 x 8 km grid. The inventories were conducted between 1986 and 1994 (NFSI I) and 2006 and 2009 (NFSI II) in accordance with harmonized surveying techniques. The LUCAS Project aims at the development of a harmonized dataset on land cover and land use within the European Union (EU). Approximately 265.000 georeferenced plots on a 2 x 2 km grid were available from the European Soil Data Centre (ESDAC). Soil samples were taken in 2009 and in 2015 at approximately 10 % of these plots at the same locations. Considering two almost parallel running soil inventories, questions have arisen to their potential links to one another. In this study, the LUCAS soil data from the 2015 inventory were compared with the corresponding NFSI II data and reviewed under the aspect of representativeness. In order to enable an area weighted estimation for Germany the plots of the LUCAS program were attributed to the same 16 soil parent material groups used in the German NFSI data using geographical coordinates. All classes were tested for significant and systematic differences between the inventories. To quantify C stocks, it is important to compare the depth level 0-20 cm of the LUCAS program to Germany's NFSI sampling scheme, where data available for the organic layer and the mineral soil down to 90 cm. The comparison of various chemical soil parameters showed clear differences between the inventories. The pH(H₂O) and the C/N ratio derived from LUCAS 2015 was lower while carbon (C) and nitrogen (N) concentrations were higher compared to the NFSI II. The C and N stocks deviate even more from the NFSI II due to uncertainties in the estimation of bulk densities derived from maps. By contrast Germany's NFSI, where volume-based sampling was obligatory for almost all plots. As a result, fine earth stock estimates from map derived bulk densities could result in highly uncertain and overestimated stocks change rates. Higher C and N concentrations of the LUCAS inventory could be attributed to an insufficient separation of the organic layer from the mineral soil because if the separation is not practiced carefully, residues of the organic layer can contaminate the mineral soil sample and cause significant higher concentrations. The soil sampling of the NFSI focused explicitly on the systematic separation of both compartments. The number of the sampled forest plots of LUCAS 2015 showed a lack of representativeness because in the northern and southern parts of Germany an insufficient number of plots were sampled. Nevertheless, the proportion of the forest area of the total LUCAS inventory is comparable with Germany's Third National Forest Inventory. The selected LUCAS 2015 samples comprise 25 % of the NFSI II plots which results in an insufficient coverage of various soil groups. This means that soil properties remain unconsidered and that the area-weighted extrapolation could become more difficult. Chemical soil parameters within individual substrate groups differed between the sampling grids due to the smaller sample of LUCAS 2015 compared to the NFSI II. Moreover, the reduction of sampling plots results in an increase of uncertainties. Thus, the detection of changes in soil conditions could be more difficult in respect to repeated sampling. Soil inventory data are of importance in greenhouse gas reporting because C stocks of the organic layer and the mineral soil down to 90 cm must be reported. The analysis of the NFSI II revealed that the organic layer comprises 16 % of the C stored in the entire soil profile. The organic layer was not sampled in the LUCAS inventory. Nevertheless, changes in C stored in the organic layer is vulnerable to impacts of climate and other environmental and anthropogenic variables but the effects cannot be considered with LUCAS 2015. Due to the LUCAS 2015 mineral soil sampling depth down to 20 cm only 42 % of the stored C was detected in the entire soil profile. Therefore, data based on LUCAS 2015 are insufficiently qualified for the greenhouse gas reporting due to the lack of a sampled organic layer and the limitation to the sampling depth of 20 cm. Compared to Germany's NFSI, the results based on the LUCAS inventory revealed a smaller representativity and were associated with larger uncertainties as well as discrepancies. Consequently, the union of both data sets will not result in additional synergies.

Keywords: Soil, Forest, Monitoring, Inventory, Sampling, Mapping, Stocks, Concentrations, Carbon, Nitrogen, pH-Value, Bulk density, Uncertainties, Representativity, Harmonisation

Inhaltsverzeichnis

A.1 Einleitung	5
A.2 Material und Methoden	6
A.2.1 Beschreibung der Inventuren	6
A.2.2 LUCAS-Daten	6
A.2.3 Daten der BZE II-Wald	7
A.2.4 Weitere Daten	7
A.2.5 Berechnungen, Bodenklassifikation und Statistik	7
A.3 Ergebnisse	9
A.3.1 Repräsentanz von LUCAS 2015	10
A.3.2 Stratifizierter Vergleich von LUCAS 2015 und den Daten der BZE II	12
A.3.3 pH-Werte	14
A.3.4 Kohlenstoffgehalte	16
A.3.5 Stickstoffgehalte	16
A.3.6 C/N-Verhältnis	19
A.3.7 Trockenrohddichte	20
A.3.8 Kohlenstoffvorrat	20
A.3.9 Stickstoffvorrat	23
A.3.10 Tiefenstufenvergleich von LUCAS 2015 und den Daten der BZE II	24
A.3.11 Vergleich von Kohlenstoffvorräten in verschiedenen Beprobungstiefen	26
A.4 Diskussion	27
A.5 Schlussfolgerungen	29

Table of contents	
B.1 Introduction	30
B.2 Materials and methods	31
B.2.1 Inventory designs	31
B.2.2 Data of the LUCAS program	32
B.2.3 Data of the German NFSI	32
B.2.4 Further data	32
B.2.5 Analyses, soil classification and statistics	33
B.3 Results	34
B.3.1 Representativeness of LUCAS 2015	35
B.3.2 Sampling number	37
B.3.3 pH values	38
B.3.4 Carbon and nitrogen concentrations	40
B.3.5 C/N ratio	42
B.3.6 Dry bulk density	43
B.3.7 Carbon and nitrogen stocks	45
B.3.8 Depth distribution of carbon and nitrogen concentrations	47
B.3.9 Depth distribution of carbon and nitrogen stocks	49
B.4 Discussion	51
B.5 Conclusions	53
Literaturliste/List of references	54

A.1 Einleitung

Die Kenntnis des Bodenzustands ist von entscheidender Bedeutung zur Beurteilung der Güte von Waldstandorten und für die Planung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung. Die Versorgung der Bestände durch den Boden mit Nährstoffen und Wasser bestimmen die Produktivität der Wälder. Wesentliche bodenchemische Merkmale für das Nährstoffangebot eines Standortes sind Kenngrößen wie der pH-Wert, das C/N-Verhältnis und die Gehalte von Nährstoffen im Boden. Wichtig für die Bindefähigkeit von Nährstoffen und für die Wasserspeicherfähigkeit ist der Kohlenstoffgehalt, der gleichzeitig auch Aufschluss gibt über die Senkenwirkung des Bodens für das Treibhausgas Kohlendioxid. Für Deutschland liegen Daten zum Zustand von Waldböden aus der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE-Wald) vor. Die erste Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I) wurde in den Jahren 1986 bis 1994, die zweite in den Jahren 2006 bis 2008 durchgeführt. Aus der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) liegen Daten zu über 1.800 Probepunkten eines 8 x 8 km-Grundrasters vor, die nach einem einheitlichen Aufnahmeverfahren erhoben wurden.

Das Ziel des LUCAS-Projekts (Land Use/Cover Area frame Statistical Survey) ist es, einen harmonisierten Datensatz zur Landbedeckung und Landnutzung innerhalb der Europäischen Union (EU) zu erstellen. Dazu wurden 265.000 georeferenzierte Punkte auf einem 2 x 2 km-Raster aufgesucht. Im Jahr 2009 wurden auf fast 10 % der Punkte erstmals Bodenproben genommen, während im Jahr 2015 eine Wiederholungsbeprobung erfolgte. Angesichts von zwei parallellaufenden Bodeninventuren stellt sich zwingend die Frage, ob beide miteinander verknüpft werden können. Es stellt sich die Frage nach Synergieeffekten und Widersprüchen. Dies ist äußerst relevant, da die Ergebnisse beider Inventuren nicht nur wissenschaftlich ausgewertet, sondern auch für die Politikberatung genutzt werden. So fließen z.B. die BZE Wald-Ergebnisse zu Kohlenstoffvorräten und -Vorratsänderungen in Waldböden (Grüneberg et al., 2014) in die deutsche Treibhausgasberichterstattung mit ein (Stümer et al., 2019). Gegenwärtig wurden auf Basis der LUCAS-Bodeninventur auch Kohlenstoffvorräte und -vorratsänderungen in den EU-Staaten auf regionaler Ebene (NUTS1) als „Science for Policy report“ des Joint Research Center veröffentlicht (Panagos et al., 2020).

Die LUCAS-Bodendaten der Inventur des Jahres 2015 der Waldstandorte in Deutschland (Jones et al., 2020) werden exemplarisch für die Gehalte und Vorräte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff sowie pH-Werte mit den entsprechenden bundesweiten BZE-Daten verglichen und unter dem Aspekt der Repräsentativität kritisch überprüft. Während für die LUCAS-Inventurpunkte Bodenkennwerte der Tiefe 0-20 cm vorliegen, sind an den BZE-Punkten für die Humusaufgabe sowie für den Mineralboden bis 90 cm Tiefe Daten vorhanden. Für einen direkten Vergleich sind die Analysewerte der BZE-Tiefenstufen des Mineralbodens (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm) zunächst unter Berücksichtigung von Trockenrohdichten und Skelettanteilen bzw. Feinsubstanzmengen auf die Tiefe 0-20 cm umzurechnen. Die Inventurpunkte des LUCAS-Programms sind anhand ihrer Koordinaten den bei der bundesweiten BZE-Auswertung ausgewiesenen insgesamt 16 Klassen (Wellbrock et al., 2016) zuzuordnen. Diese Klassen basieren im Wesentlichen auf den Legendeneinheiten der Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1.000), die entsprechend Ausgangsgestein und Substratgenese weiter gruppiert wurden. Zum einen wird so die flächengewichtete Hochrechnung für ganz Deutschland ermöglicht und zum anderen bestimmen die auf Ausgangsgestein und Substratgenese basierenden Klassen wesentliche Bodeneigenschaften. Klassen mit ausreichendem Stichprobenumfang sind weiter nach der jeweiligen Zusammensetzung des Bestandes in Standorte mit Nadel-, Laub- und Mischwaldbestockung nach CORINE Landcover zu differenzieren und Klassen mit sehr geringem Stichprobenumfang ggf. zusammenzufassen. Alle Klassen wurden hinsichtlich signifikanter und ggf. systematischer Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Inventur-Programme sowie der Konfidenzbereiche der jeweiligen Mittelwerte überprüft, um daraus Aussagen zur Repräsentativität des LUCAS-Programms im Vergleich zur BZE abzuleiten. Geprüft wurde dies für die Stichprobe im 16 x 16 km und im 8 x 8 km-Raster. Darüber hinaus wurden die BZE-Daten evaluiert, welche Bedeutung die Tiefenstufe 0-20 cm im Vergleich zum gesamten Wurzelraum inkl. Humusaufgabe, insbesondere bei der Quantifizierung des Kohlenstoffvorrats zukommt. So wurde geklärt, ob eine ausschließliche Betrachtung des Oberbodens für die Nutzungsform Wald bei LUCAS gegebenenfalls

relationale Aussagen bezüglich der gesamten Speicherkapazität zulässig, bzw. mit welchen Fehlern durch das Ausklammern der Humusaufgabe und der Unterbodenschichten zu rechnen ist. Gegebenenfalls soll ein Vorschlag für die Verknüpfung der BZE-Wald- und LUCAS-Daten dargestellt werden.

A.2 Material und Methoden

A.2.1 Beschreibung der Inventuren

Die BZE II-Wald wurde in den Jahren 2006-2008 durchgeführt (Wellbrock et al., 2019). Für diese Inventur stehen Daten von 1.857 Probepunkten zur Verfügung. Die Beprobung erfolgte nach einer einheitlichen Aufnahmeanleitung (Wellbrock et al., 2006). Beprobt wurden sowohl die organische Auflage als auch der Mineralboden in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm. Es erfolgte eine volumengerechte Beprobung, indem die Bodenmasse pro Volumeneinheit ebenso wie der Grobbodenanteil bestimmt wurde. Die Anleitung dazu ist im Handbuch für forstliche Analytik veröffentlicht (GAFA, 2006). Weiterhin wurde an einer aufgegrabenen Profilwand bodenkundliche Ansprachen, etwa zum Bodentyp, der Horizontabfolge und dem Ausgangssubstrat durchgeführt, was eine Zuordnung zu den Legendeneinheiten der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1.000) ermöglicht.

Das primäre Ziel der LUCAS-Inventur ist die Erfassung der Landbedeckung und Landnutzung innerhalb der EU. Auf einer Unterstichprobe des LUCAS-Rasters erfolgt zusätzlich eine Beprobung des Oberbodens. In Deutschland wurden 415 Punkte beprobt. Die Beprobung erfolgte nach einer einheitlichen Anleitung und wurde für die Tiefenstufe 0-20 cm durchgeführt. Gemäß Aufnahmeanleitung wurde die organische Auflage nicht beprobt, sondern mit einem Spaten vorsichtig abgetragen. Die Beprobung des Mineralbodens erfolgte ebenfalls mit einem Spaten, indem in aus einem zuvor gegrabenen Kleinschürf bis zur Tiefe von 20 cm 3 cm mächtige Schichten abgestochen wurden. Die Beprobung erfolgte somit ohne Berücksichtigung des Probevolumens.

Auf Basis der LUCAS-Bodendaten wurde der Oberbodenzustand für die Fläche Europas in mehreren Projekten modelliert. Die daraus resultierenden Daten wurden ebenfalls ausgewertet. Dazu gehören bodenchemische Eigenschaften wie Kohlenstoff- (de Broginiez et al., 2015) und Stickstoffgehalte, das C/N-Verhältnis und pH-Werte gemessen in wässriger (H₂O) und Kalziumchlorid-Lösung (CaCl₂) (Ballabio et al., 2019) sowie bodenphysikalische Eigenschaften wie Korngrößenverteilung, Grobbodenanteile und Trockenrohdichten (Ballabio et al., 2016). Da die Trockenrohdichten nicht in der LUCAS-Bodeninventur gemessen wurden, erfolgte deren Modellierung mit der europaweiten Karte der effektiven Lagerungsdichte, die per Pedotransfer-Funktionen aus der Bodentextur und Bodenstruktur der Bodenkarte sowie der Landnutzungsklasse abgeleitet wurde (van Ranst et al., 1995). Von der effektiven Lagerungsdichte wurde der mit dem Faktor 0.009 multiplizierte und in LUCAS gemessene Tongehalt abgezogen (Jones et al., 2003). Weiterhin wurden Daten zum Kohlenstoffvorrat ausgewertet (Yigini et al., 2016). Hier erfolgte die Ableitung der für Vorratsberechnungen notwendige Trockenrohdichten ebenfalls auf Grundlage der Karte der effektiven Lagerungsdichte.

A.2.2 LUCAS-Daten

Verfügbare Punkt-Daten basierend auf LUCAS 2009 und LUCAS 2015:

- <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/data/primary-data/2015>
- <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas2009-topsoil-data>
- <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas2015-topsoil-data>

Auf LUCAS basierende Flächendaten:

- Bodenphysik: Tiff 500 m basierend auf Ballabio et al. (2016), enthält u.a. Trockenrohddichte (berechnet mit Karte der effektiven Lagerungsdichte und LUCAS Tongehalt).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data>
- Bodenchemie: Tiff 500 m, Basierend auf Ballabio et al. (2019), enthält chemische Eigenschaften, u.a. N, C/N, pH, CEC. *<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data>*
- Kohlenstoffgehalt: Tiff 500 m, basierend auf de Broginez et al. (2015).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-soil-organic-carbon-lucas-eu25>
- Kohlenstoffvorrat: Grid, 1 km, basierend auf Yigini et al. (2016).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-organic-carbon-soc-projections-europe>

A.2.3 Daten der BZE II-Wald

Punktbezogenen bodenchemische Kennwerte:

- Mineralboden (für die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm)
 - pH-Werte (gemessen in H₂O, CaCl₂, KCl)
 - Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen
 - Anteile von Sand, Ton und Schluff
 - Trockenrohddichte und Grobbodenanteil
- Humusauflage
 - pH-Wert (gemessen in CaCl₂-Lösung)
 - Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen
 - Humusvorrat
- Weitere Informationen
 - Höhe ü. NN und geografische Koordinaten
 - Bodentyp, Bestandestyp, Humusform
 - BÜK 1.000-Legendeneinheiten und BZE-Substratgruppen

A.2.4 Weitere Daten

- CORINE-Landcover 2012 Raster version 2020 20u1, CMLS 2021 (*<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>*)
- Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1 000 000, BÜK 1000N v23, BGR 2013 (*<https://www.bgr.bund.de>*)
- Vorläufige Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:250 000, BÜK 250, BGR 2021 (*<http://www.bgr.bund.de>*)
- Deutschland NUTS Gebiete, NUTS250, GeoBasis-DE / BKG 2021 (*<http://www.bkg.bund.de>*)
- BWI-Ergebnisdatenbank, TI 2021 (*<https://bwi.info>*)

A.2.5 Berechnungen, Bodenklassifikation und Statistik

Die Vorräte von Kohlenstoff und Stickstoff wurden entsprechend der Formel berechnet:

$$\text{Vorrat [t ha}^{-1}\text{]} = \text{Gehalt [mg g}^{-1}\text{]} * \text{TRD [g cm}^{-3}\text{]} * (1-\text{GBA [\%]} / 100) * d [\text{cm}] * 100,$$

mit *Vorrat*, *Gehalt* = Konzentrationen an Kohlenstoff, bzw. Stickstoff, *TRD* = Trockenrohddichte, *GBA* = Grobbodenanteil, *d* = Schichtdicke der Tiefenstufe.

Die Vorräte wurden bei der BZE für die einzelnen Tiefenstufen berechnet. Bei den LUCAS-Probepunkten wurden aufgrund nicht gemessener Trockenrohdichten diese aus der auf Ballabio et al. (2016) beruhenden Karte der Trockenrohdichte per räumlicher Verschneidung entnommen. Kohlenstoffvorräte wurden mit der gleichen Formel auf Basis von Ballabio et al. (2016, 2019) veröffentlichten Rasterdaten per Rasteroperation ermittelt, wobei zunächst die Kohlenstoffgehalte aus dem C/N-Verhältnis und dem Stickstoffgehalt berechnet wurden, da diese in den veröffentlichten Datensätzen nicht enthalten sind. Modellunsicherheiten der Flächendatensätze konnten nicht einheitlich für alle Datenquellen aus den Originalveröffentlichungen ausgelesen werden. Daher wurde darauf verzichtet Unsicherheiten für Flächendatensätze in der Auswertung anzugeben.

Um bei den BZE-Daten Gehalte für die Tiefenstufe 0-20 cm aus den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm zu berechnen, wurden die Gehalte entsprechend den Feinbodenvorräten gewichtet gemittelt. Bei den pH-Werten erfolgte die Mittelwertbildung anhand der delogarithmierten Werte. Für die Tiefenstufe 10-30 cm wurde jeweils nur der halbe Feinbodenvorrat angesetzt. Ebenso wurde bei der Berechnung der Vorräte in der Tiefenstufe 0-20 cm beim Aufsummieren der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte der Vorrat der Tiefenstufe 10-30 cm halbiert.

Die Auswertung erfolgte stratifiziert nach BZE-Substratgruppe (Tabelle 1) und CORINE-Landnutzungs-kategorie. Für die Auswertung wurden zunächst sämtliche Geodaten in ein einheitliches Koordinatensystem überführt (ETRS89-LAEA, EPSG: 3035).

Um die Waldflächen für jedes Stratum zu erhalten, wurden die BÜK 1.000 und die CLC 12-Rasterdaten miteinander verschnitten. Allerdings weisen die Geometrien der BÜK 1.000 gegenüber neueren Geodaten (z.B. Deutschland-NUTS 250, BÜK 250, CLC12) eine leichte Verzerrung auf, die im Rahmen des Vorhabens nicht ausgeglichen werden konnte. Die aktuellere BÜK 250, deren Geometrien keine Verzerrung aufweisen, ist dagegen noch im Bearbeitungsstadium und nur als Zwischenergebnis veröffentlicht. Ihre Gesamtlegende besteht aus über 1000 Einheiten und ist daher nicht zur zusammenfassenden Stratifizierung geeignet.

Es wurde zunächst für jedes Stratum aus BZE-Substratklasse und CORINE-Waldtyp der arithmetische Mittelwert berechnet. Anschließend wurde entsprechend der Waldflächen der Klassen und der mit Probepunkten belegten Gesamtwaldfläche für die drei Waldtypen und die 17 BZE-Substratklassen sowie für den gesamten Wald Deutschlands flächengewichtet hochgerechnet. Im Unterschied zu vorangegangenen Auswertungen zum Kohlenstoffvorrat in Waldböden (Grüneberg et al. 2014) wurden Moorböden in die Hochrechnung einbezogen.

Unterschiede zwischen den Inventuren, den CORINE-Waldtypen und den BZE-Substratklassen wurden mittels Varianzanalyse auf Basis eines 95 %-Vertrauensintervalls auf Signifikanz getestet. Die Inventurpunkte wurden dabei entsprechend des Waldanteil des dazugehörigen Stratums und der Anzahl der Inventurpunkte pro Stratum gewichtet. Im linearen Model der Varianzanalyse gingen der Faktor Inventur und die Wechselwirkungen zwischen Inventur und CORINE-Waldtyp, sowie Inventur und BZE-Substratklasse ein. Die Größen Inventur, CORINE-Waldtyp und BZE-Substratklasse stellten dabei klassifizierte Faktoren dar. Lineare Kontraste wurden innerhalb der Inventuren zwischen den CORINE-Waldtypen und zwischen den BZE-Substratklassen gebildet. Multiple Mittelwertvergleiche wurden mit dem Scheffe-Test durchgeführt.

Tabelle 1: Gruppierung der BÜK 1.000 Legendeneinheiten in die 17 BZE-Substratklassen

Nr.	Bodentypen	Ausgangsgestein	Erklärung	Legendeneinheiten
1	Braunerde, Podsol, Lockersyosem, Regosol	Trockene, basenarme Sande	Indifferent	1, 16, 17, 31, 33, 34
2	Auenboden, Gley	Sandige bis lehmige fluviatile Sedimente	Böden der breiten Flusstäler, einschließlich Terrassenflächen und Niederungen	8, 10, 11, 12,
3	Auenboden, Gley,	Lehmige bis tonige, teilweise kalkhaltige Sedimente von Terrassenablagerungen	Böden der breiten Flusstäler, einschließlich Terrassenflächen und Niederungen	13, 14, 15,
4	Braunerde, Fahlerde, Parabraunerde, Pararendzina, Pseudogley	Geschiebelehm und Geschiebemergel	Böden des wellig-hügeligen Flachlandes und der Hügelländer	18, 19, 20, 21, 23, 30
5	Braunerde, Pseudogley, Parabraunerde, Regosol	Sandige Deckschichten über Geschiebelehm	Böden des wellig-hügeligen Flachlandes und der	22, 25, 26, 27, 28, 29,
6	Braunerde, Parabraunerde	Eutrophe sandige Deckschichten	Indifferent	32
7	Braunerde, Fahlerde, Parabraunerde, Pararendzina, Pseudogley	Sandvermischter Löss und Lösslehm über verschiedenen Gesteinen	Böden der Lössgebiete	35, 38, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47 48,
8	Braunerde, Rendzina	Hangschutt über Kalk-, Mergel- und Dolomitgestein	Flachgründige Böden aus Verwitterungsrückständen	49
9	Braunerde, Terra fusca	Umlagerungsprodukte der Kalk-, Mergel- und Dolomitverwitterung	Tiefgründige Böden aus Verwitterungsrückständen	50
10	Braunerde, Pseudogley	Mergel- und Tongestein und kalkhaltige Schotter	Böden aus verwittertem Mergel- und Tongestein	51, 52
11	Braunerde	Basische und intermediäre magmatische Gesteine	Böden der Berg- und Hügelländer aus Festgestein	53, 54
12	Braunerde, Pseudogley	Magmatische und metamorphe Gesteine	Böden der Berg- und Hügelländer aus Festgestein	55, 56, 57,
13	Braunerde	Harte Ton- und Schluffschiefer, Grauwacken, Quarzite und Sandsteine	Böden der Berg- und Hügelländer aus Festgestein	58, 59, 60
14	Braunerde, Podsol, Pseudogley	Sandsteine, Quarzite und Konglomerate	Böden aus Lösslehm über verschiedenen Gesteinen	61, 62, 63, 64
15	Braunerde, Pseudogley, Pararendzina, Rendzina	Engräumiger Wechsel von Böden aus Tonschiefer, Grauwacke, Sand- und Schluffstein, Kalk- und Mergelgestein	Lössvermischte Deckschichten verschiedener Gesteine	65, 66
16	Braunerde, Pseudogley, Ranker, Rendzina	Kalk- und Dolomitgestein, sowie kalkfreies Silikatgestein	Gebirgsböden der Alpen	68
17	Moorböden	Torf	Hoch- und Niedermoore	6, 7

Nicht berücksichtigte Legendeneinheiten der BÜK 1.000: 2, 3, 4, 5, 9, 24, 36, 37, 39, 41, 67, 69, 70, 71,72

A.3 Ergebnisse

A.3.1 Repräsentanz von LUCAS 2015

Die Beprobungsdichte der Bodenbeprobung des LUCAS-Projektes weist in der Landnutzungsclassse Wald eine deutliche räumliche Verzerrung auf (Abbildung 1). Während der Waldanteil in der LUCAS-Bodenprobenstichprobe in einem Streifen in West-Ost Richtung von Nordrhein-Westfalen bis Brandenburg relativ dicht ist, ist die Beprobung nördlich und südlich davon deutlich ausgedünnt. Diese Inhomogenität der Beprobungsdichte trifft nur auf die Unterstichprobe der Bodenbeprobung des LUCAS-Projekts zu. Die Gesamtstichprobe des LUCAS-Projekts ist davon ausgenommen (Abbildung 3 & 3). Hier stimmen die Waldanteile pro Bundesland und der Anteil des Bundeslandes am gesamten deutschen Wald im Wesentlichen mit denen der dritten Bundeswaldinventur (BWI³) überein. Bei der Bodenstichprobe sind die Waldanteile dagegen stark verzerrt. So liegen z.B. in Bayern nur 6 % der bodenkundlich beprobten Punkte im Wald, obwohl laut BWI³ der Waldanteil bei 36 % (Holzboden) liegt, und bei der LUCAS-Gesamtstichprobe 35 % der Punkte im Wald liegen. Das hat zur Folge, dass nur 5 % der im LUCAS-Projekt beprobten deutschen Punkte bayrische Punkte sind, obwohl der Waldanteil Bayerns am deutschen Wald bei 23 % laut BWI bzw. bei 21 % laut LUCAS-Gesamtstichprobe liegt. Daraus kann gefolgert werden, dass sich aus dem LUCAS-Projekt keine für Deutschland repräsentativen Aussagen ableiten lassen. Zwar können kleinere bundeslandspezifische Unterschiede in der Beprobungsdichte problemlos ausgeglichen werden, im Fall der LUCAS-Bodendaten liegen aber für bedeutende Waldgebiete Deutschlands, z.B. dem Pfälzer Wald, keine Proben vor.

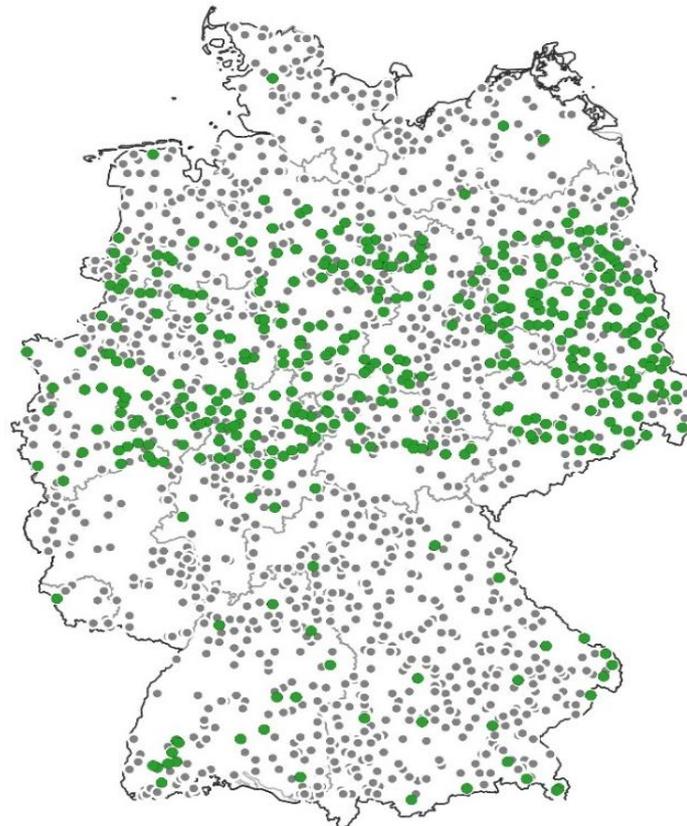


Abbildung 1: Bodenproben im LUCAS-Projekt, mit Bodenproben außerhalb des Waldes (grau) und innerhalb des Waldes (grün)

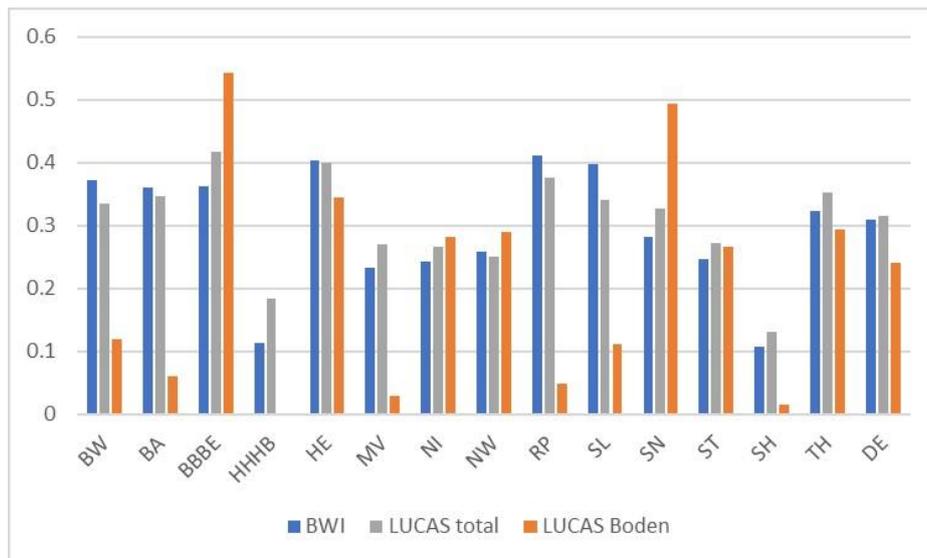


Abbildung 3: Anteil des Bundeslandes am gesamten deutschen Wald, nach den Daten der BWI³ (blau), der Gesamtstichprobe des LUCAS-Projekts (grau) und der Bodenstichprobe des LUCAS-Projekts (orange)

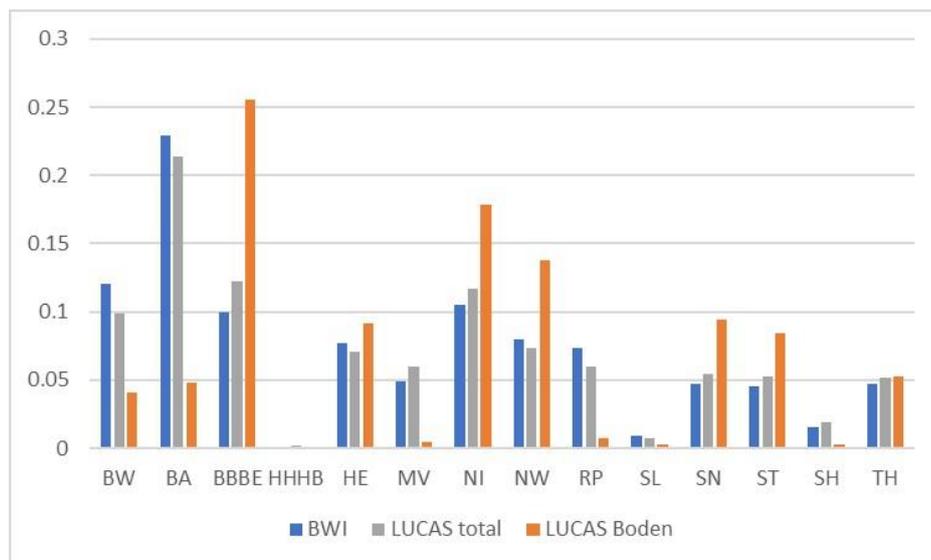


Abbildung 2: Waldanteil je Bundesland und am gesamten deutschen Wald nach den Daten der BWI³ (blau), der Gesamtstichprobe des LUCAS-Projekts (grau) und der Bodenstichprobe des LUCAS-Projekts (orange)

A.3.2 Stratifizierter Vergleich von LUCAS 2015 und den Daten der BZE II

Im Folgenden werden die Messwerte der BZE II mit den Werten aus der LUCAS 2015-Inventur verglichen. Der Vergleich erfolgte stratifiziert nach Waldtypen und BZE-Substratgruppe. Die Aggregation zu höheren Einheiten, wie Gesamtwald pro Substratgruppe bzw. Waldtyp und Gesamtwald von Deutschland erfolgte gewichtet nach der Waldfläche pro Stratum. In der folgenden Ergebnisdarstellung werden die Ergebnisse einheitlich in der Reihenfolge BZE II im 8 x 8 km-Raster, BZE II im 16 x 16-Raster, LUCAS 2015-Punktdaten und Werte der verschiedenen LUCAS-Flächendatensätze (de Broginez et al., 2015, Ballabio et al., 2016, Yigini et al., 2016, Ballabio et al., 2019) dargestellt. Insgesamt stehen bei der BZE II 1.774 von 1.831 beprobten Punkten mit Messwerten zum Kohlenstoffgehalt zur Verfügung (Abbildung 4). In der 16 x 16 km EU/WZE-Unterstichprobe des BZE II-Netzes befinden sich 429 Punkte. Davon lassen sich bei 414 Punkten Kohlenstoffvorräte berechnen und Klassen zuordnen. Bei der LUCAS 2015-Inventur sind es 415 Punkte, wobei 10 Punkte zwar als beprobte gekennzeichnet sind, die allerdings keine Messwerte aufweisen.

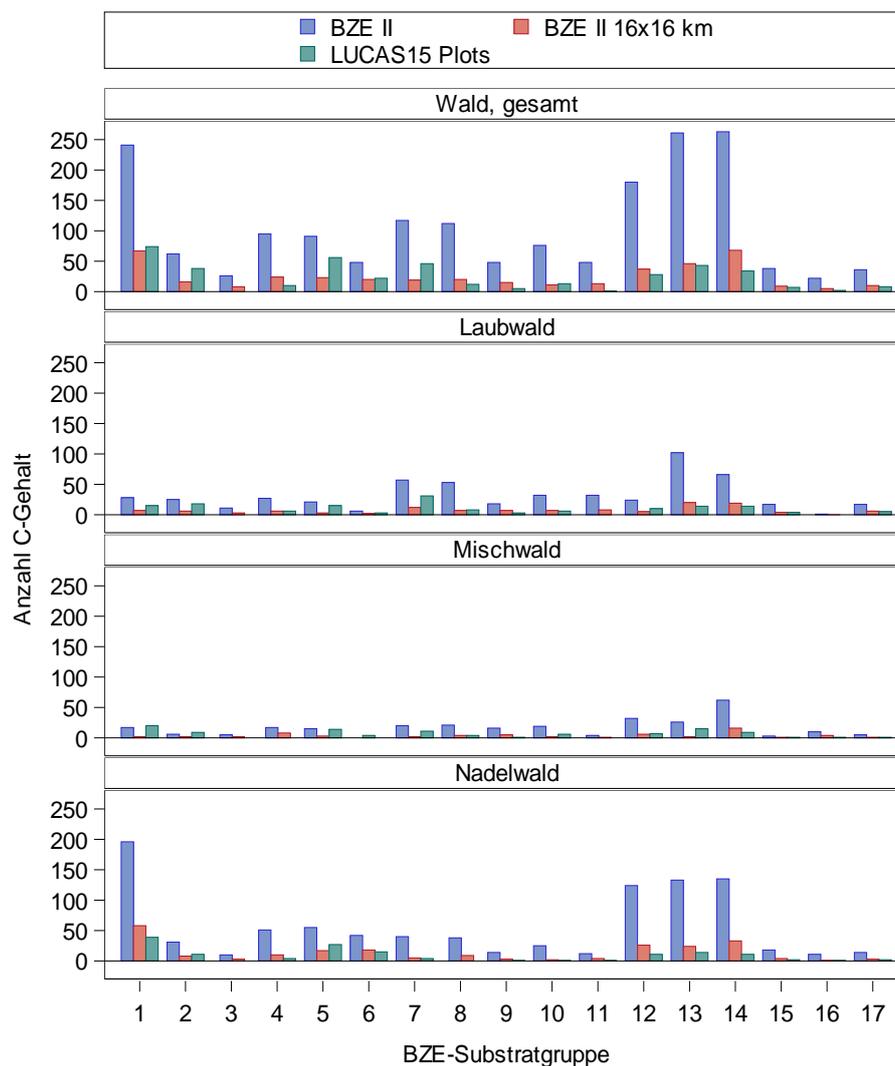


Abbildung 4: Anzahl der Punkte mit gemessenen Kohlenstoffkonzentrationen pro Substratgruppe und Waldtyp mit Wald, gesamt = Wald undifferenziert, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte 16 x 16 km-EU/WZE-Raster, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten

Während bei der LUCAS 2015-Inventur die Mittelgebirgsstandorte der Substratgruppen 12, 13 und 14 unterrepräsentiert und die Substratgruppen 5, 6 und 7 überrepräsentiert sind, stimmen bei der BZE II die Anteile in den einzelnen Klassen gut mit der Waldverteilung überein (Abbildung 5).

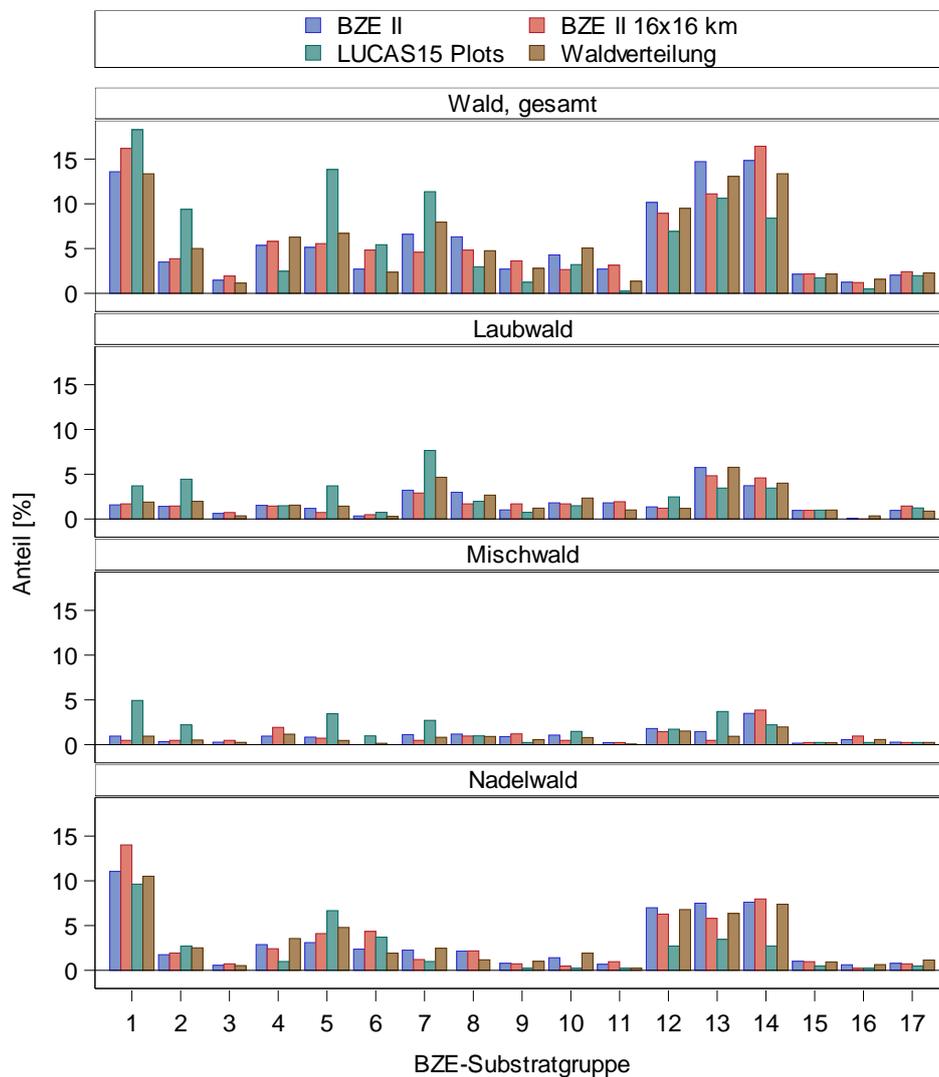


Abbildung 5: Prozentuale Punktanteile mit gemessenen Kohlenstoffkonzentrationen pro Substratgruppe und Waldtyp mit Wald, gesamt = Wald undifferenziert, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte 16 x 16 km EU/WZE-Raster, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, sowie Anteil der Waldfläche des Stratums an der Gesamtwaldfläche Deutschlands.

A.3.3 pH-Werte

Bei der BZE II liegt der pH-Wert in wässriger Lösung deutschlandweit im Mittel bei $4,74 \pm 0,02$ (Abbildung 6). Laubwälder weisen dabei mit $5,12 \pm 0,04$ einen höheren pH-Wert auf als Nadelwälder mit $4,46 \pm 0,02$. Mischwälder liegen mit $4,92 \pm 0,05$ dazwischen. In der Unterstichprobe des 16 x 16 km-EU/WZE-Netz liegt der deutschlandweite pH-Wert bei $4,70 \pm 0,04$. Die pH-Werte für Laub-, Misch- und Nadelwald sind mit $5,12 \pm 0,09$, $4,87 \pm 0,13$ und $4,42 \pm 0,04$ mit denjenigen der Gesamtstichprobe vergleichbar.

An den LUCAS 2015-Plots beträgt das deutschlandweite Mittel $4,55 \pm 0,04$. Die Werte liegen somit unter denen der BZE II. Auch bei der LUCAS 2015-Inventur weisen Laubwälder mit $5,02 \pm 0,09$ höhere pH-Werte auf als Nadelwälder mit $4,21 \pm 0,04$. Mischwälder und Laubwälder unterscheiden sich mit einem pH-Wert von $4,89 \pm 0,12$ nicht von Laubwäldern. Die Werte der Nadelwälder liegen bei der LUCAS 2015-Inventur signifikant unter denen der BZE II-Inventur.

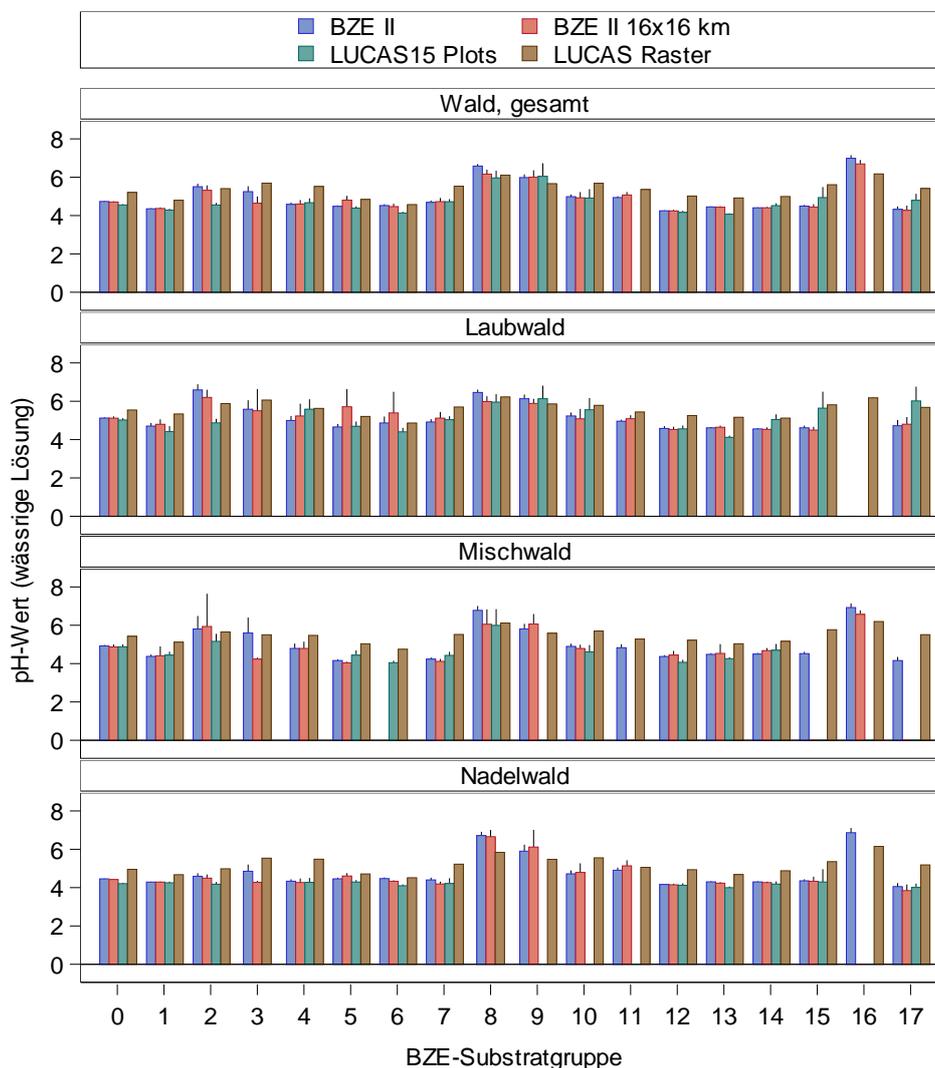


Abbildung 6: pH Werte in wässriger Lösung in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Raster, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS Flächendaten (Ballabio et al., 2019), schwarze Balken = Standardfehler

Die auf Grundlage der LUCAS-Inventur berechneten Flächendaten nach Ballabio et al. (2019) betragen 5,2 für den Gesamtwald, 5,5 für Laubwald, 5,4 für Mischwald und 5,0 für Laubwald und liegen somit sowohl über denen der BZE II-Daten als auch über denen der originalen Plotdaten der LUCAS 2015-Inventur.

Bei den in Kalziumchlorid-Lösung gemessenen pH-Werten sind die Unterschiede aufgrund des durch das Logarithmieren bedingten Effekts zwischen der BZE II und LUCAS 2015 geringer (Abbildung 7).

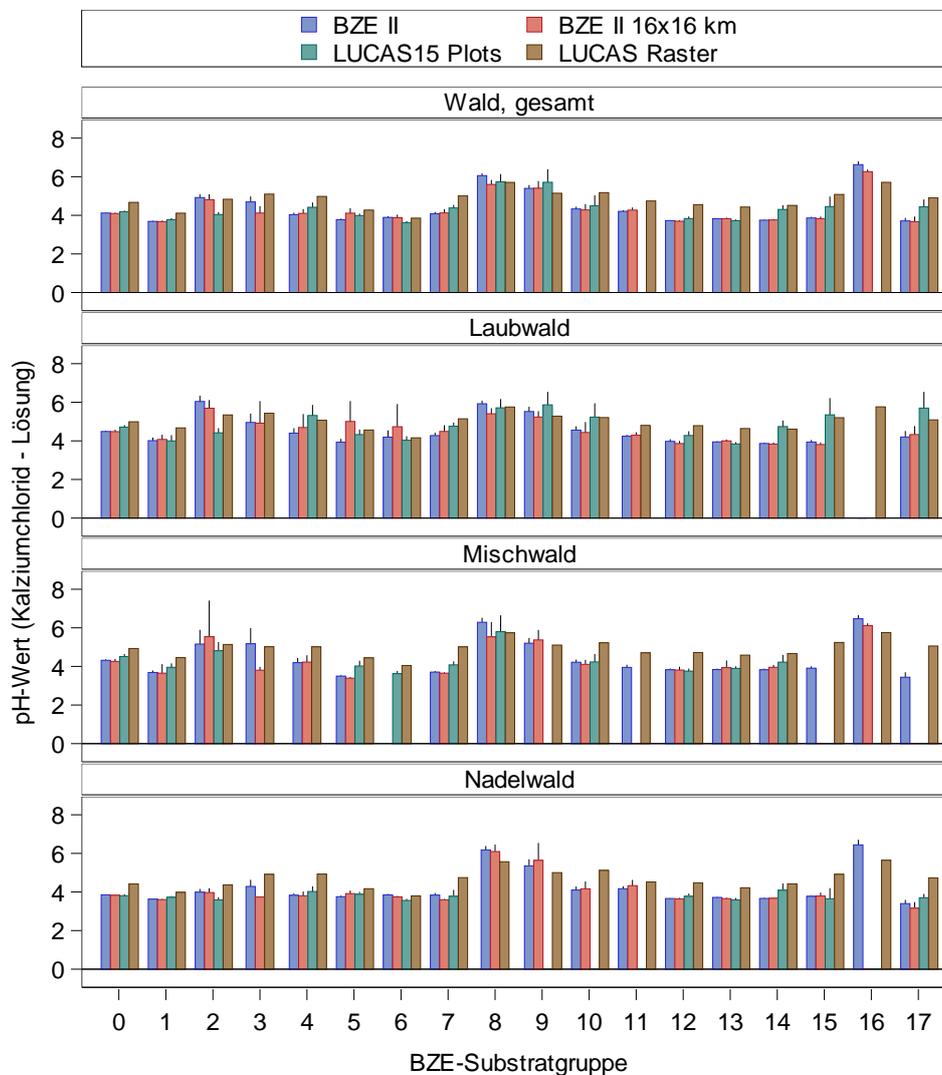


Abbildung 7: pH Werte in Kalziumchlorid-Lösung in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS Flächendaten (Ballabio et al., 2019), schwarze Balken = Standardfehler

Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede sowohl beim Gesamtwald mit Werten von $4,12 \pm 0,02$ bei der BZE II und von $4,19 \pm 0,05$ bei LUCAS 2015 als auch beim Mischwald mit $4,32 \pm 0,05$ gegenüber $4,51 \pm 0,13$ und beim Nadelwald mit $3,85 \pm 0,02$ gegenüber $3,81 \pm 0,07$. Die pH-Werte im Laubwald sind bei der BZE II mit $4,49 \pm 0,04$ gegenüber LUCAS 2015 mit $4,71 \pm 0,10$ niedriger. Die Werte der 16 x 16 km EU/WZE-Unterstichprobe sind mit denen des BZE II-Gesamtkollektivs vergleichbar. Der Gesamtwald hat einen pH-Wert von $4,10 \pm 0,04$, Laubwald von $4,48 \pm 0,10$, Mischwald von $4,26 \pm 0,13$ und Nadelwald von $3,83 \pm 0,04$.

Die Werte der auf LUCAS basierenden Flächendaten (Ballabio et al., 2019) liegen mit 4,67 beim deutschlandweiten Mittel, mit 4,99 bei Laubwald, mit 4,93 bei Mischwald und mit 4,42 bei Nadelwald signifikant über den BZE II und den LUCAS 2015-Daten.

A.3.4 Kohlenstoffgehalte

Die Kohlenstoffkonzentration der Tiefenstufe 0-20 cm liegt bei der BZE II im deutschlandweiten Mittel bei $34,1 \pm 0,7 \text{ mg g}^{-1}$ (Abbildung 8). Zwischen Laubwald, Mischwald und Nadelwald finden sich mit $35,2 \pm 1,2 \text{ mg g}^{-1}$, $34,3 \pm 1,9 \text{ mg g}^{-1}$ und $33,4 \pm 1,1 \text{ mg g}^{-1}$ keine signifikanten Unterschiede. In der 16 x 16 km Unterstichprobe des BZE-Netzes ist der mittlere Kohlenstoffgehalt im Wald mit $35,2 \pm 1,6 \text{ mg g}^{-1}$ annähernd gleich. Die Werte für Laub-, Misch- und Nadelwald betragen jeweils $34,9 \pm 2,5 \text{ mg g}^{-1}$, $37,0 \pm 2,4 \text{ mg g}^{-1}$ und $35,0 \pm 2,5 \text{ mg g}^{-1}$. Die Werte der LUCAS 2015-Inventur sind deutlich höher und liegen im deutschlandweiten Mittel bei $66,1 \pm 4,5 \text{ mg g}^{-1}$. Auch hier ergeben sich zwischen Laubwald, Mischwald und Nadelwald mit $60,4 \pm 5,9 \text{ mg g}^{-1}$, $68,5 \pm 6,4 \text{ mg g}^{-1}$ und $69,0 \pm 7,3 \text{ mg g}^{-1}$ keine signifikanten Unterschiede.

Die auf LUCAS basierenden Flächendaten von Ballabio et al. (2019) liegen im Wertebereich der BZE II-Daten. Im deutschlandweiten Mittel betragen die Kohlenstoffkonzentrationen $35,2 \text{ mg g}^{-1}$ für Laubwald $33,5 \text{ mg g}^{-1}$ für Mischwald $35,6 \text{ mg g}^{-1}$ und für Nadelwald $36,1 \text{ mg g}^{-1}$. Der zweite auf LUCAS-Daten basierende Flächendatensatz von de Broginiez et al. (2015) ergibt wiederum höhere Werte. Das deutschlandweite Mittel beträgt $49,6 \text{ mg g}^{-1}$. Die Kohlenstoffkonzentrationen für Laubwald liegen bei $44,5 \text{ mg g}^{-1}$, für Mischwald bei $51,7 \text{ mg g}^{-1}$ und für Nadelwald bei $52,2 \text{ mg g}^{-1}$.

A.3.5 Stickstoffgehalte

Der Stickstoffgehalt der Tiefenstufe 0-20 cm beträgt bei der BZE II $1,87 \pm 0,04 \text{ mg g}^{-1}$ (Abbildung 9). Laubwälder weisen dabei mit $2,22 \pm 0,08 \text{ mg g}^{-1}$ die höchsten Gehalte auf, gefolgt von Mischwald mit $1,94 \pm 0,09 \text{ mg g}^{-1}$ und Nadelwald mit $1,64 \pm 0,04 \text{ mg g}^{-1}$. Im 16 x 16 km-Raster unterscheiden sich die BZE II-Stickstoffgehalte mit $1,92 \pm 0,07 \text{ mg g}^{-1}$ für Gesamtwald, $2,28 \pm 0,19 \text{ mg g}^{-1}$ Laubwald und $1,64 \pm 0,06 \text{ mg g}^{-1}$ Nadelwald nicht von denen des Gesamtkollektivs, allerdings weist die Teilstichprobe der Mischwälder $2,18 \pm 0,12 \text{ mg g}^{-1}$ höhere Gehalte auf, als Mischwald in der Gesamt BZE II-Stichprobe. Wie auch die Kohlenstoffgehalte liegen die Stickstoffgehalte der LUCAS 2015-Inventur deutlich über denen der BZE II. Das deutschlandweite Mittel im Wald beträgt $3,87 \pm 0,22 \text{ mg g}^{-1}$. Die Unterschiede zwischen Laub-, Misch- und Nadelwäldern sind bei der LUCAS 2015-Inventur mit $4,11 \pm 0,32 \text{ mg g}^{-1}$, $4,08 \pm 0,31 \text{ mg g}^{-1}$ und $3,68 \pm 0,34 \text{ mg g}^{-1}$ nicht signifikant. Die auf LUCAS-Daten basierende Modellierung von Ballabio et al. (2019) liegt wiederum mit Werten von $2,21 \text{ mg g}^{-1}$ für den Gesamtwald, $2,34 \text{ mg g}^{-1}$ für Laubwald, $2,44 \text{ mg g}^{-1}$ für Mischwald und $2,08 \text{ mg g}^{-1}$ für Nadelwald im Bereich der BZE II-Daten.

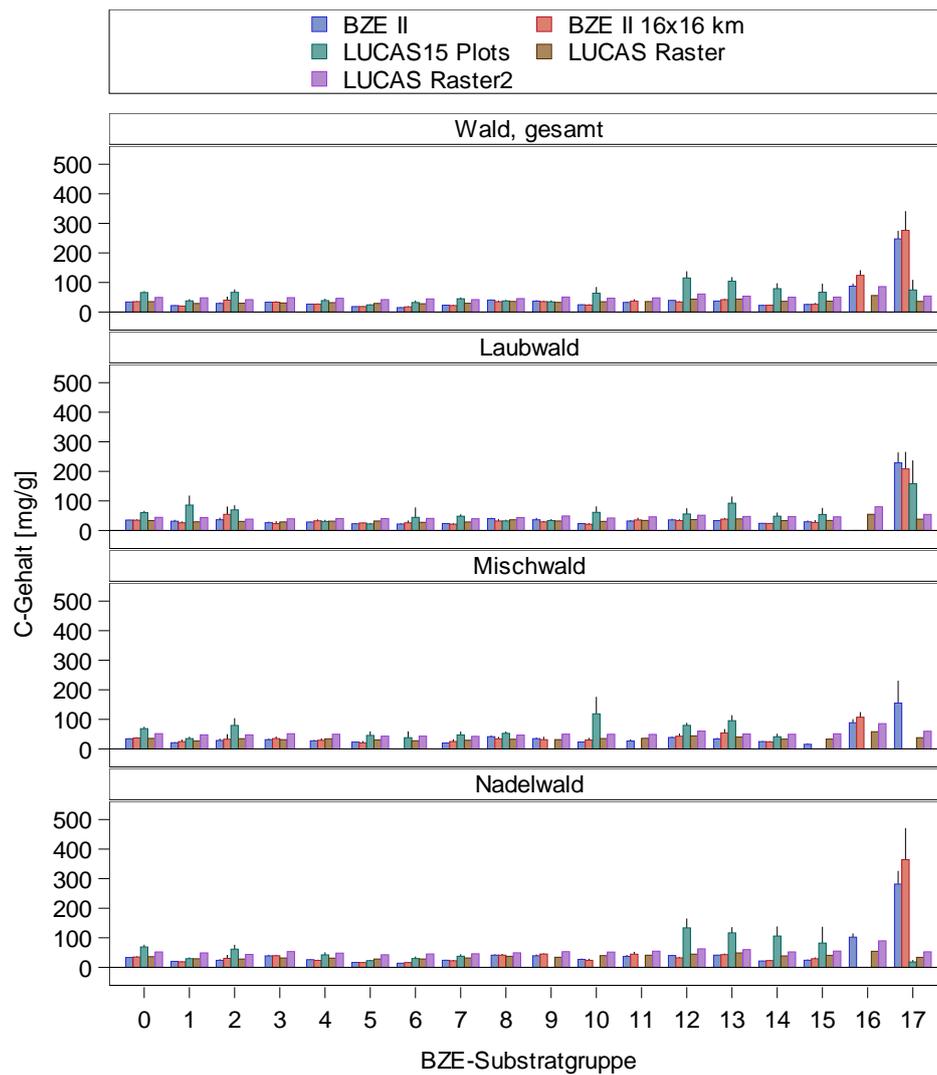


Abbildung 8: Kohlenstoffkonzentrationen in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE Rasters, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015 Punktdaten, LUCAS Raster & LUCAS Raster2 = Werte aus LUCAS Flächendaten (Ballabio et al., 2019 & de Broginiez et al., 2015), schwarze Balken = Standardfehler

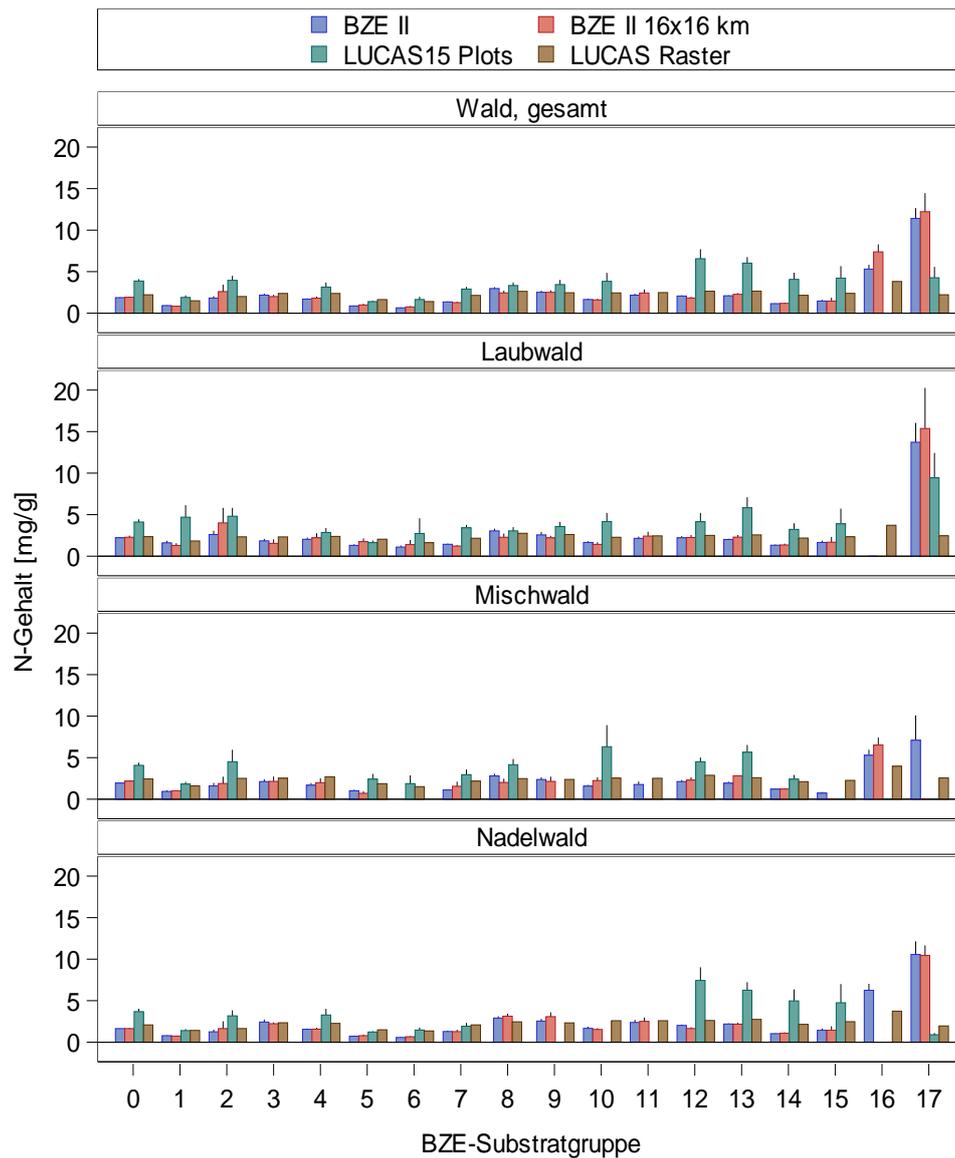


Abbildung 9: Stickstoffkonzentrationen in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS Flächendaten (Ballabio et al., 2019), schwarze Balken = Standardfehler

A.3.6 C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis im Wald liegt für die BZE II bei $19,8 \pm 0,2$ (Abbildung 10). Laubwälder weisen mit $16,8 \pm 0,3$ die engsten C/N-Verhältnisse auf, Nadelwälder mit $21,8 \pm 0,2$ die weitesten. Das durchschnittliche C/N-Verhältnis von Mischwäldern beträgt $18,6 \pm 0,3$. Das deutschlandweite C/N-Verhältnis für den Wald liegt in der 16 x 16 km-Unterstichprobe bei $19,8 \pm 0,4$. Im Unterschied zum BZE II-Gesamtkollektiv sind hier die Unterschiede zwischen Laub- und Mischwäldern mit $17,2 \pm 0,9$ und $17,7 \pm 0,8$ nicht signifikant. Nadelwälder haben in der 16 x 16 km-Stichprobe ebenfalls ein C/N-Verhältnis von $21,8 \pm 0,4$.

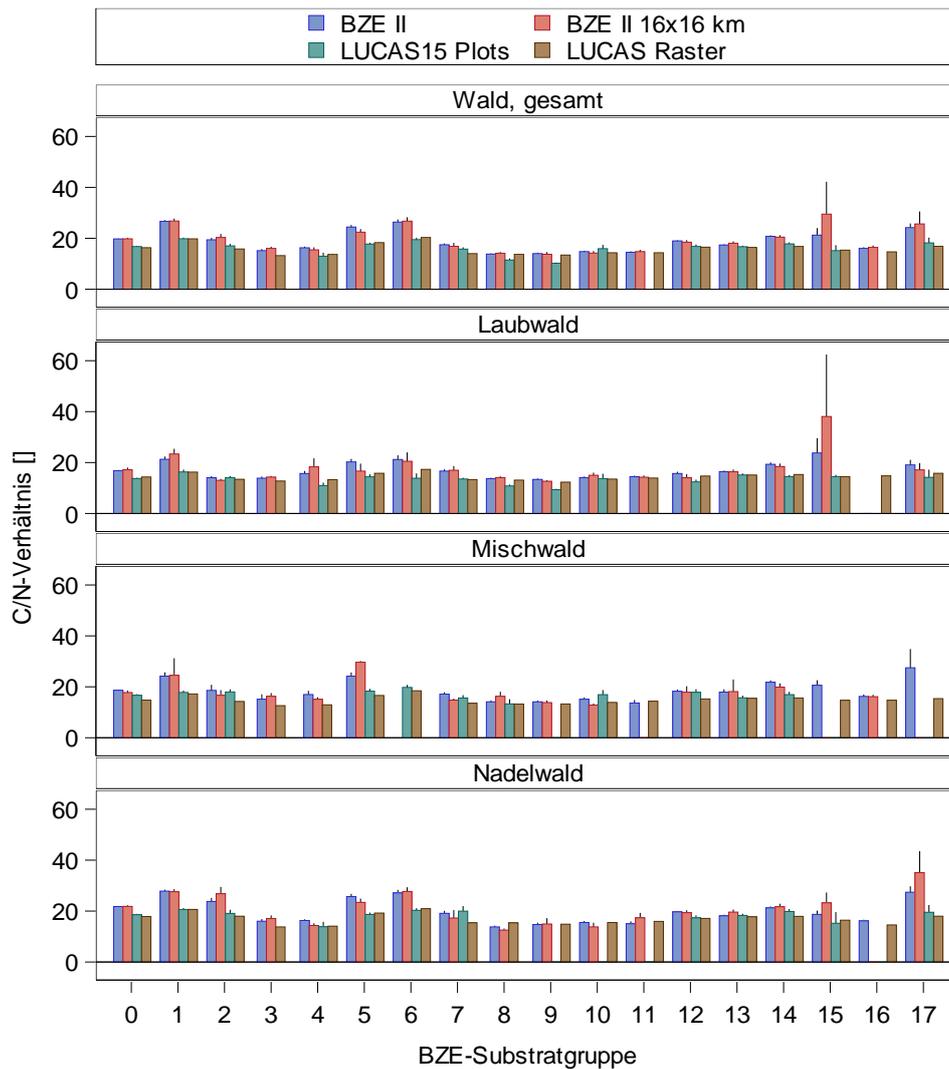


Abbildung 10: C/N-Verhältnis in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS Flächendaten (Ballabio et al., 2019), schwarze Balken = Standardfehler

Die Daten der LUCAS 2015-Inventur weisen im Durchschnitt engere C/N-Verhältnisse auf als die BZE II. Das deutschlandweite Mittel beträgt $16,8 \pm 0,2$. Laubwälder haben ein C/N-Verhältnis von $13,7 \pm 0,3$, Mischwälder von $16,7 \pm 0,4$ und Nadelwälder von $18,6 \pm 0,3$. Die Ergebnisse der auf den LUCAS-Daten basierenden Modellierung von Ballabio et al. (2019) zeigen im deutschlandweiten Mittel für Wald ein C/N-Verhältnis von 16,3 an. Dabei liegen allerdings die Werte von Laubwäldern mit 14,3 über denen der LUCAS 2015-Inventur und die Ergebnisse für Mischwälder mit 14,8 und Nadelwälder mit 17,9 darunter.

A.3.7 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte liegt bei der BZE II im Durchschnitt bei $1,10 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ (Abbildung 11). Laubwälder haben Trockenrohdichten von $1,10 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, Mischwälder von $1,03 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ und Nadelwälder von $1,12 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$. Die Trockenrohdichten der BZE II-Unterstichprobe des 16 x 16 km-Netzes weisen mit Werten von $1,10 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ für den gesamten Wald, $1,09 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$ für Laubwald, $1,02 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$ für Mischwald und $1,14 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$ für Nadelwald keine signifikanten Unterschiede zum BZE II-Gesamtkollektiv auf. Die LUCAS-Inventur verfügt über keine gemessenen Trockenrohdichten. Um dennoch Vorräte an den LUCAS 2015-Inventurpunkten berechnen zu können, wurden diese den modellierten Trockenrohdichten aus Ballabio et al. (2016) per räumlicher Verschneidung entnommen. Diese Daten ergaben im Vergleich zur BZE II deutlich höhere Werte. Der Durchschnitt für Wald liegt bei $1,31 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$. Laubwälder weisen eine Trockenrohdichte von $1,30 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, Mischwälder von und Nadelwälder von $1,33 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ auf. Die Werte der auf LUCAS basierenden Rasterdaten von Ballabio et al., (2016) sind, da es sich um dieselbe Quelle handelt, mit den hier gezeigten Ergebnissen der LUCAS 2015-Inventur vergleichbar.

A.3.8 Kohlenstoffvorrat

Die Kohlenstoffvorräte für 0-20 cm Tiefe betragen bei der BZE II im Mittel $52,8 \pm 0,7 \text{ t ha}^{-1}$ (Abbildung 12). Laubwälder haben im Mittel mit $56,9 \pm 1,6 \text{ t ha}^{-1}$ höhere Vorräte als Mischwälder mit $52,8 \pm 1,1 \text{ t/ha}$ und Nadelwälder mit $50,4 \pm 0,8 \text{ t ha}^{-1}$. Die Kohlenstoffvorräte der 16 x 16 km-Unterstichprobe sind für den Gesamtwald mit $53,1 \pm 1,4 \text{ t ha}^{-1}$ mit denen des BZE II-Gesamtkollektives vergleichbar. Allerdings unterscheiden sich Laubwälder mit $54,7 \pm 2,4 \text{ t ha}^{-1}$ nicht von Mischwäldern mit $57,5 \pm 3,0 \text{ t ha}^{-1}$ und Nadelwälder mit $51,1 \pm 2,1 \text{ t ha}^{-1}$.

Die berechneten Kohlenstoffvorräte basierend auf den Kohlenstoffkonzentrationen und Grobbodenanteilen von LUCAS 2015 sowie den Trockenrohdichten aus Ballabio et al. (2016) unterscheiden sich deutlich von den Kohlenstoffvorräten der BZE II, die für den deutschen Wald im Mittel $143,1 \pm 9,4 \text{ t ha}^{-1}$ betragen. Laubwälder weisen einen Vorrat von $131,3 \pm 13,3 \text{ t ha}^{-1}$, Mischwälder von $139,3 \pm 14,5 \text{ t ha}^{-1}$ und Nadelwälder von $150,8 \pm 14,7 \text{ t ha}^{-1}$ auf. Die aus den Ergebnissen der Modellierungen von Ballabio et al. (2016) und Ballabio et al. (2019) berechneten Kohlenstoffvorräte liegen deutlich unter den LUCAS 2015-Inventurdaten, aber noch über den BZE II-Werten. Hiernach betragen die Kohlenstoffvorräte für den gesamten deutschen Wald im Mittel $75,8 \text{ t ha}^{-1}$, während die Vorräte für Laubwälder $72,8 \text{ t ha}^{-1}$, für Mischwälder $73,4 \text{ t ha}^{-1}$ und für Nadelwälder $78,1 \text{ t ha}^{-1}$ aufweisen. Die auf LUCAS-Daten basierende Modellierung von Yigini et al. (2016) ergeben $77,9 \text{ t ha}^{-1}$ für den gesamten Wald, $71,7 \text{ t ha}^{-1}$ für Laubwald, $80,1 \text{ t ha}^{-1}$ für Mischwald und $81,1 \text{ t ha}^{-1}$ für Nadelwald und rangieren somit in einem ähnlichen Wertebereich.

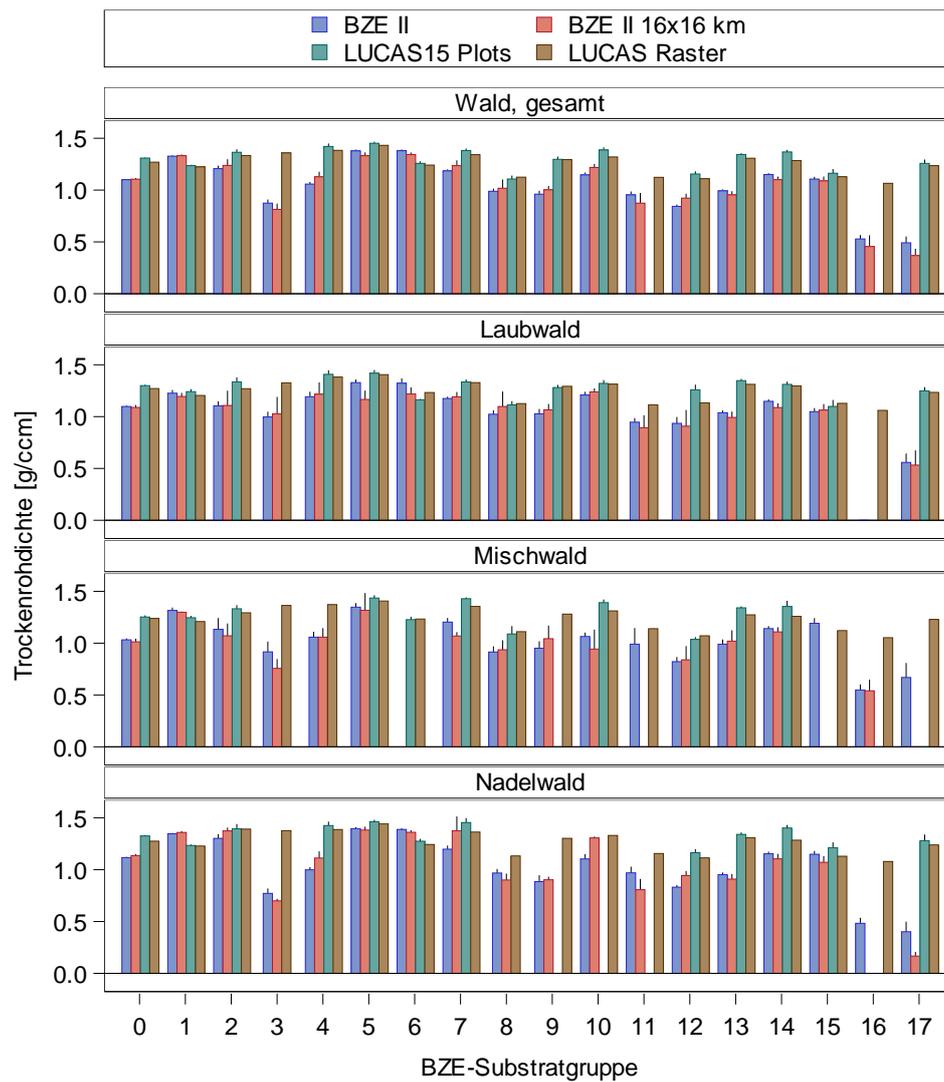


Abbildung 11: Trockenrohichte in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS15 Plots und LUCAS Raster = Werte aus LUCAS-Flächendaten (Ballabio et al., 2016). Bei LUCAS15 Plots wurden die Flächendaten an den LUCAS 2015-Punkten ausgeschnitten, schwarze Balken = Standardfehler

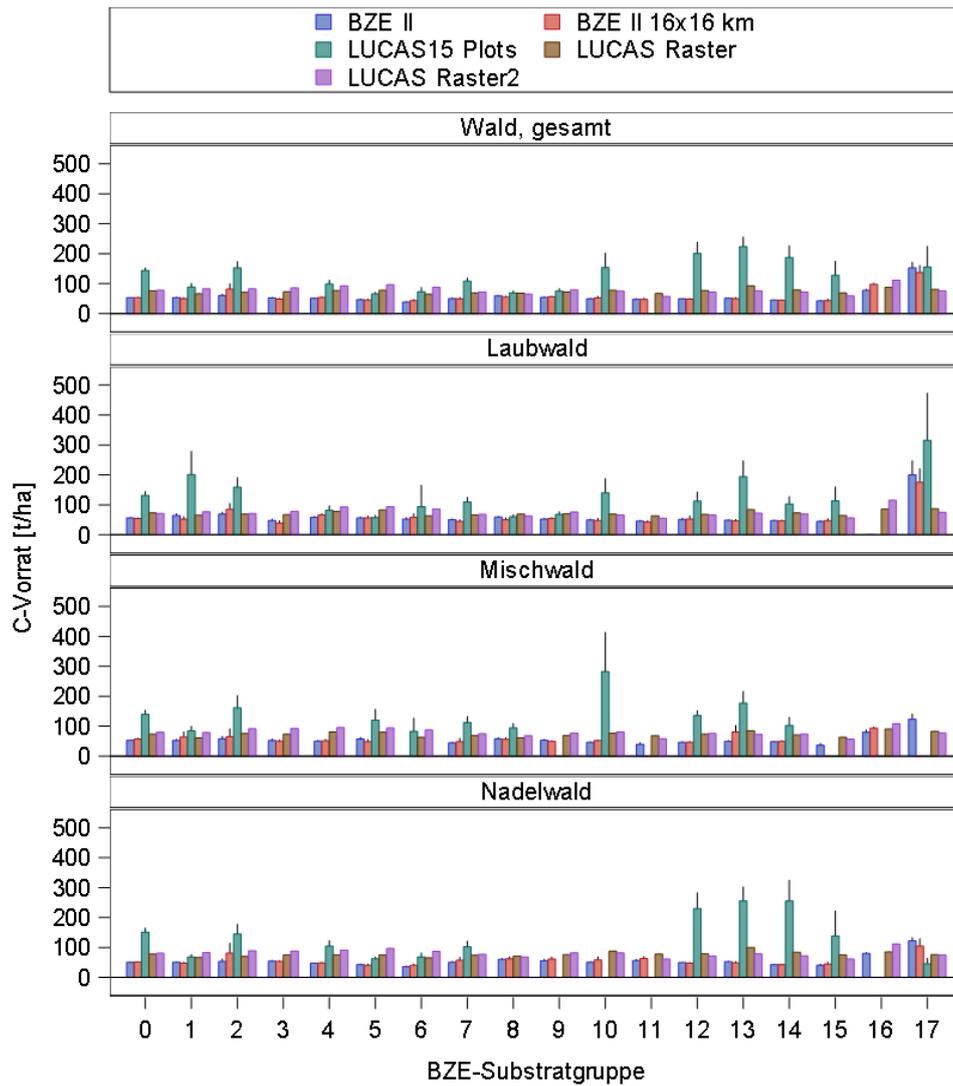


Abbildung 12: Kohlenstoffvorrat in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS15 Plots = Werte aus LUCAS 2015-Punktdaten und Ballabio et al., 2016, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS-Flächendaten (Ballabio et al., 2016, 2019), LUCAS Raster2 = Werte aus LUCAS-Flächendaten (Yigini et al., 2016), schwarze Balken = Standardfehler

A 3.9 Stickstoffvorrat

Der Stickstoffvorrat beträgt basierend auf den BZE II-Daten für den gesamten deutschen Wald durchschnittlich $2,90 \pm 0,04 \text{ t ha}^{-1}$ (Abbildung 13). Für Laubwälder ergeben sich $3,54 \pm 0,07 \text{ t ha}^{-1}$, für Mischwälder $2,97 \pm 0,07 \text{ t ha}^{-1}$ und für Nadelwälder $2,49 \pm 0,05 \text{ t ha}^{-1}$. Die Unterschiede zwischen den Waldtypen sind signifikant. Die mittleren Stickstoffvorräte der Unterstichprobe des 16 x 16-km-Netzes betragen $2,98 \pm 0,09 \text{ t ha}^{-1}$ und sind mit denen des BZE II-Gesamtkollektivs vergleichbar. Auch die Werte für Laub- und Nadelwälder mit $3,51 \pm 0,16 \text{ t ha}^{-1}$ und $2,58 \pm 0,14 \text{ t ha}^{-1}$ zeigen keine signifikanten Unterschiede zum BZE II-Gesamtkollektiv. Allerdings sind die Stickstoffvorräte in Mischwäldern mit $3,38 \pm 0,12 \text{ t ha}^{-1}$ deutlich höher. Deutlich erhöht sind ebenfalls die Stickstoffvorräte der LUCAS 2015-Inventur gegenüber den BZE II-Werten.

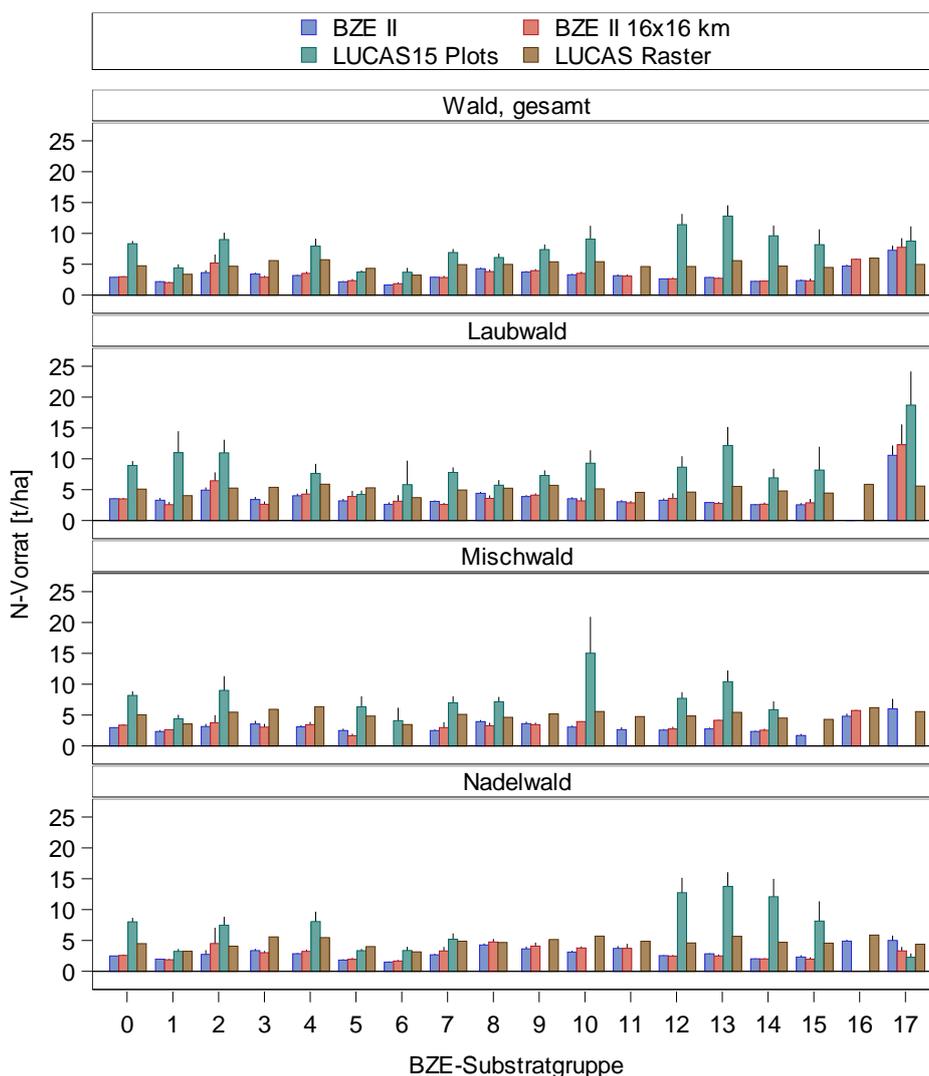


Abbildung 13: Stickstoffvorrat in 0-20 cm Tiefe pro Substratgruppe und Waldtyp mit Substratgruppe 0 = Gesamtwald aller Substratgruppen, Wald, gesamt = Gesamtwald aller Waldtypen, BZE II = BZE II-Werte, BZE II 16 x 16 km = BZE II-Werte des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters, LUCAS 15 Plots = Werte aus LUCAS 2015-Punktdaten und Ballabio et al., 2016, LUCAS Raster = Werte aus LUCAS-Flächendaten (Ballabio et al. 2016, 2019), schwarze Balken = Standardfehler.

Im Durchschnitt ergibt sich für den Gesamtwald ein Stickstoffvorrat von $8,34 \pm 0,44 \text{ t ha}^{-1}$, während Laubwälder $8,93 \pm 0,71 \text{ t ha}^{-1}$, Mischwälder $8,18 \pm 0,68 \text{ t ha}^{-1}$ und Nadelwälder $8,02 \pm 0,66 \text{ t ha}^{-1}$ Stickstoff speichern. Zwischen den Waldtypen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Die auf LUCAS-Daten basierende Modellierung von Ballabio et al. (2016, 2019) ergibt mit $4,76 \text{ t ha}^{-1}$ für den Gesamtwald, $5,09 \text{ t ha}^{-1}$ für Laubwald, $5,05 \text{ t ha}^{-1}$ für Mischwald und $4,49 \text{ t ha}^{-1}$ für Nadelwald niedrigere Werte als LUCAS 2015.

A.3.10 Tiefenstufenvergleich von LUCAS 2015 und den Daten der BZE II

Der in der Auflage bei der BZE II gemessenen Kohlenstoffgehalt beträgt im Mittel $374,6 \pm 1,8 \text{ mg g}^{-1}$. Die Kohlenstoffgehalte der LUCAS 2015-Stichprobe für die Tiefenstufe 0-20 cm liegen mit $66,1 \pm 4,5 \text{ mg g}^{-1}$ im deutschlandweiten Mittel etwas höher als für die BZE II-Tiefenstufe 0-5 cm mit $65,8 \pm 1,0 \text{ mg g}^{-1}$ und deutlich höher als für die darunter liegende BZE II-Tiefenstufe 5-10 cm mit $37,6 \pm 0,8 \text{ mg g}^{-1}$. In den darunter folgenden BZE-Tiefenstufen 10-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm betragen die Kohlenstoffgehalte $22,0 \pm 0,8 \text{ mg g}^{-1}$, $10,7 \pm 0,8 \text{ mg g}^{-1}$ und $6,7 \pm 0,8 \text{ mg g}^{-1}$. In allen Substratgruppen übersteigen die Kohlenstoffgehalte der LUCAS 2015-Proben die der BZE-Proben der Tiefenstufe 5-10 cm (Abbildung 14).

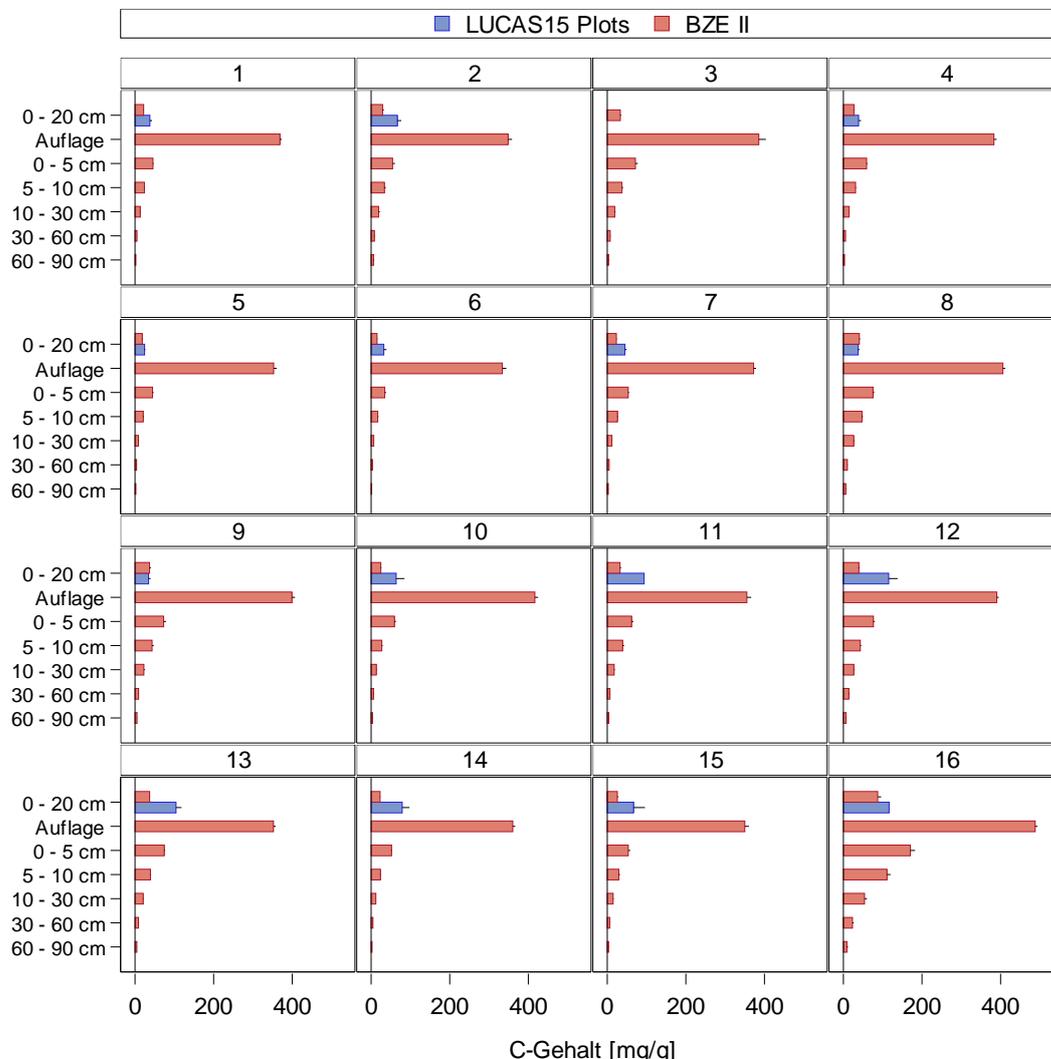


Abbildung 14: Kohlenstoffgehalt pro Substratgruppe und Tiefenstufe sowie Auflage mit BZE II = BZE II-Werte, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, schwarze Balken = Standardfehler

Die Stickstoffgehalte der Auflage der BZE II sind mit $15,00 \pm 0,08 \text{ mg g}^{-1}$ deutlich höher als die der darunter liegenden BZE-Tiefenstufen. Die in der LUCAS 2015-Inventur gemessenen mittleren Stickstoffgehalte für den deutschen Wald betragen für die Tiefenstufe 0-20 cm $3,87 \pm 0,22 \text{ mg g}^{-1}$ und überschreiten signifikant die von der BZE II in der Tiefenstufe 0-5 cm ermittelten Werte von $3,47 \pm 0,05 \text{ mg g}^{-1}$. Dabei weist LUCAS 2015 im Vergleich zu der BZE II vor allem in den Substratgruppen 10 bis 15 höhere Stickstoffgehalte auf. Die für LUCAS 2015 gemessenen Stickstoffgehalte sind auch signifikant höher als die von der BZE ermittelten Gehalte in der Tiefenstufe 5-10 cm von $2,06 \pm 0,04 \text{ mg g}^{-1}$. In dieser Tiefenstufe übersteigen die Stickstoffgehalte der LUCAS 2015-Proben in allen Substratgruppen die der BZE-Proben (Abbildung 15). Die Stickstoffgehalte in der Tiefenstufe 10-30 cm betragen $1,25 \pm 0,04 \text{ mg g}^{-1}$, in der Tiefenstufe 30-60 cm $0,68 \pm 0,03 \text{ mg g}^{-1}$. In der Tiefenstufe 60-90 cm liegen zahlreiche Messwerte unter der Nachweisgrenze. Die Werte dieser Tiefenstufe sind daher nicht mehr für Deutschland repräsentativ.

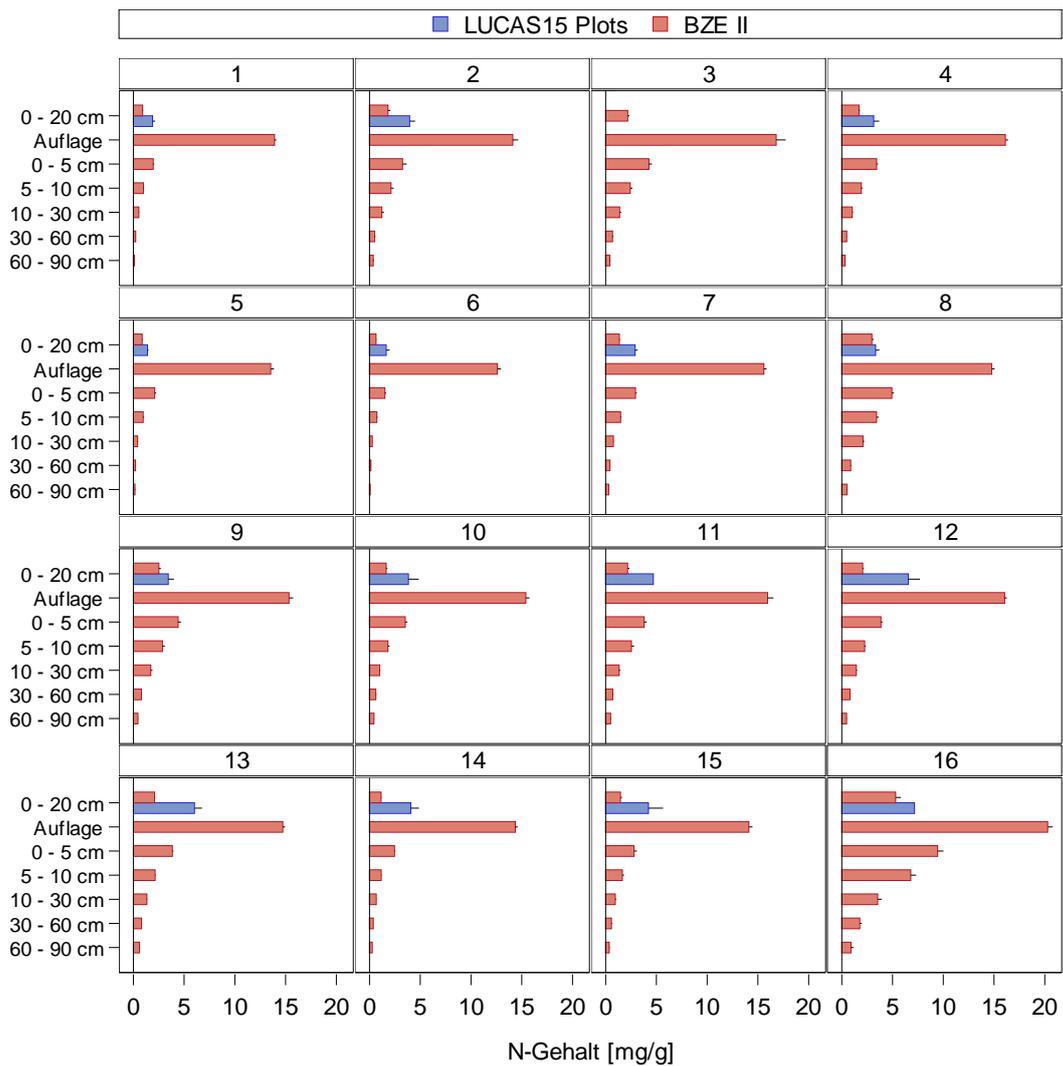


Abbildung 15: Stickstoffgehalt pro Substratgruppe und Tiefenstufen sowie Auflage mit BZE II = BZE II-Werte, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, schwarze Balken = Standardfehler

A.3.11 Vergleich von Kohlenstoffvorräten in verschiedenen Beprobungstiefen

Die Kohlenstoffvorräte, die aus den LUCAS 2015-Daten und den Trockenrohichte nach Ballabio et al. (2016) für die Tiefenstufe 0-20 cm für Waldböden berechnet wurden, sind mit $143,1 \pm 0,7 \text{ t ha}^{-1}$ im deutschlandweiten Mittel höher als die BZE II-Werte für die gesamte Bodensäule bis 90 cm Tiefe einschließlich der organischen Auflage ($127,1 \pm 1.7 \text{ t ha}^{-1}$). Dabei sind die LUCAS 2015-Werte für Mittelgebirgsböden höher als für Böden im Norddeutschen Tiefland. Die auf Grundlage der BZE II ermittelten Kohlenstoffvorräte bis 20 cm Tiefe betragen dagegen nur $52,8 \pm 0,7 \text{ t ha}^{-1}$. Die entspricht einem Anteil von 42 % am Gesamtvorrat bis 90 cm einschließlich der organischen Auflage. Die bei der deutschen Treibhausgasberichterstattung verwendete Tiefenstufe von 0-30 cm enthält mit $69,8 \pm 1,0 \text{ t ha}^{-1}$ dagegen 55 % des Gesamtkohlenstoffs.

Der organischen Auflage kommt anteilig am Gesamtvorrat bis 90 cm Bodentiefe auf basenärmeren Substraten eine größere Bedeutung zu als auf basenreicheren Substraten (z.B. Substratgruppen 1 und 8, Abbildung 16). Im Mittel beträgt der Anteil des bis in 90 cm Tiefe gespeicherten organischen Kohlenstoffs in der Auflage 16 %, während der Anteil in Tiefenstufe 30-90 cm 29 % beträgt.

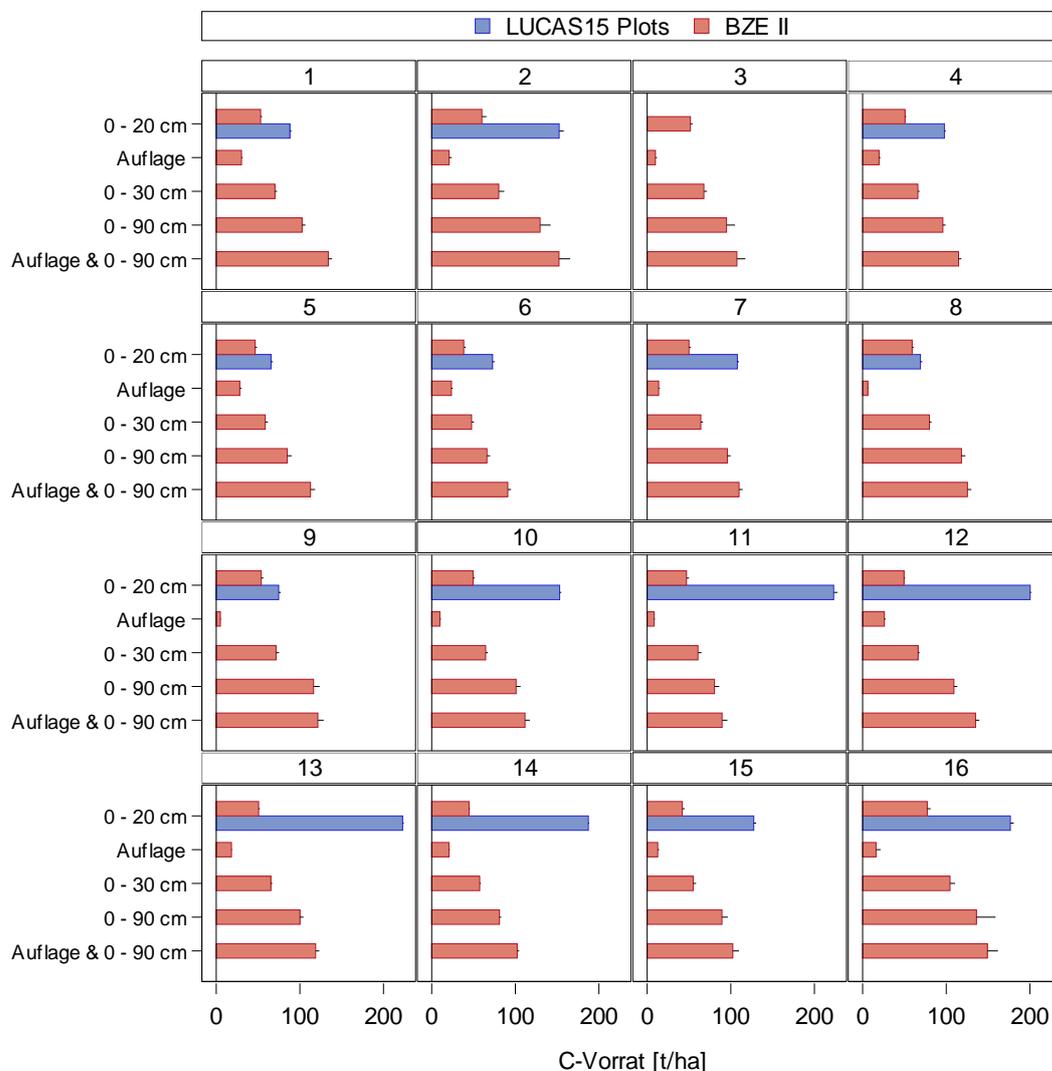


Abbildung 16: Kohlenstoffvorräte pro Substratgruppe und Beprobungstiefe mit BZE II = BZE II-Werte, LUCAS15 Plots = LUCAS 2015-Punktdaten, schwarze Balken = Standardfehler

A.4 Diskussion

Ziel der vorliegenden Studie war es, die LUCAS-Bodendaten der Inventur des Jahres 2015 (Jones et al., 2020) der Waldstandorte in Deutschland exemplarisch für die Gehalte und Vorräte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff sowie pH-Werte mit den entsprechenden bundesweiten BZE-Daten zu vergleichen und unter dem Aspekt der Repräsentativität kritisch zu überprüfen. Der Vergleich der bodenchemischen Kennwerte ergab deutliche Unterschiede zwischen der BZE II und LUCAS 2015. Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte waren im bundesweiten Mittel bei der LUCAS 2015-Inventur niedriger als bei der BZE II. Bei den $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Werten ergaben sich hingegen keine Unterschiede zwischen den Inventuren. Die unterschiedlichen Befunde bezüglich der Werte für $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ basieren auf einem rechnerischen Effekt: bei niedrigen $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Werten ergeben sich bei gleichen Differenzen der Protonenkonzentrationen geringere Differenzen der logarithmierten Werte als bei einem höheren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$. Der Vergleich der bei der LUCAS 2015-Inventur gemessenen Kohlenstoffgehalte mit denen der BZE II ergab, dass die LUCAS 2015-Werte fast doppelt so hoch sind, wie die BZE II-Werte und sich somit signifikant unterscheiden. Gleiches trifft für die Stickstoffgehalte zu. Die C/N-Verhältnisse waren bei LUCAS 2015 signifikant niedriger als bei der BZE. Gegenüber den Gehalten weisen die berechneten Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff der LUCAS 2015-Inventur noch extremere Abweichungen gegenüber der BZE II auf. Da bei LUCAS keine Trockenrohdichten ermittelt wurden, mussten diese aus Kartenmaterial entnommen werden. Diese Trockenrohdichten waren höher als bei der BZE II. Die Kombination aus erhöhten Trockenrohdichten und erhöhten Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten hatte zur Folge, dass die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte bei LUCAS fast dreimal so hoch waren wie bei der BZE II. Die Unterschiede für die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte waren zwischen der BZE II und den auf Basis von LUCAS modellierten Rasterdaten weniger extrem ausgeprägt, aber ebenfalls signifikant. Es zeigt sich, dass die Ermittlung von Vorräten unter Einbeziehung von aus Karten abgelesenen Trockenrohdichten problematisch ist. Im Gegensatz zur bundesweiten BZE im Wald erfolgte keine volumengerechte Beprobung des Mineralbodens, denn die Trockenrohdichten wurden ausschließlich anhand von Bodenkarten aus Lagerungsdichten abgeleitet. Die abgeleiteten Trockenrohdichten fallen im Vergleich zu den bei der BZE gemessenen sehr viel höher aus. Die Kombination von zu hohen Kohlenstoffkonzentrationen und Trockenrohdichten, die mit aus Karten abgelesenen effektiven Lagerungsdichten ermittelt wurden, ergeben für die Tiefenstufe 0-20 cm unrealistisch hohe Kohlenstoffvorräte. Weiterhin hätten aus zu hohen Trockenrohdichten berechnete Feinbodenvorräte zur Folge, dass Veränderungsraten überschätzt würden.

Ein Grund für die deutlich höheren Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen in LUCAS 2015 könnte darin liegen, dass bei der Beprobung nur unzureichend zwischen Auflage und Mineralboden getrennt wurde. Laut Anleitung wird bei LUCAS 2015 die organische Auflage mit dem Spaten abgetragen und verworfen. Eine genauere Anweisung zur Trennung von Auflage und Mineralboden fehlt in der Aufnahmeanleitung. Sowohl für die Analyse des Probenmaterials als auch für die Interpretation der Ergebnisse ist die exakte Trennung beider Kompartimente essentiell. Durch mangelnde Sorgfalt bei der Trennung können Reste der organischen Auflage in die Mineralbodenprobe gelangen und somit für deutlich höhere Kohlenstoffkonzentrationen sorgen. Bei der BZE-Beprobung wird die organische Auflage angesprochen und beprobt. Die Probenehmer beschäftigen sich dadurch intensiver mit der Auflage, was vermutlich die Problematik der Verunreinigung der Mineralbodenprobe mit Auflageresten mindert. Probleme, die bei der Beprobung im Wald durch die Entfernung der organischen Auflage auftreten, werden von Panagos et al. (2020) als Grund für hohe Unsicherheiten bei den LUCAS-Kohlenstoffvorräten im Wald genannt.

Bei der Überprüfung der Repräsentativität ergab sich, dass die Beprobung der LUCAS-Waldpunkte nicht repräsentativ erfolgte. In Nord- und Süddeutschland wurden im Verhältnis zur Waldfläche und im Gegensatz zu Mitteldeutschland zu wenig Punkte beprobt. So liegen zum Beispiel 25 % aller beprobten Waldpunkte in Brandenburg und Berlin und weniger als 5 % in Bayern, obwohl der Waldanteil am deutschen Wald von Brandenburg und Berlin 10 % und der von Bayern 23 % ausmacht. Diese Verzerrung trifft nur auf die beprobten LUCAS-Punkte zu. Die Waldanteile der LUCAS-Gesamtinventur sind mit denen der BWI vergleichbar.

Ein weiterer Aspekt der Repräsentativität betrifft das 16 x 16 km-Raster. Die Stichprobengröße umfasst etwa 25 % der BZE-Stichprobe. Die Beprobung im 16 x 16 km-Raster hat zur Folge, dass einige Substrattypen nur unzureichend belegt sind. Um dem entgegenzuwirken, müssten die Substratgruppen weiter zusammengefasst werden oder es müsste ohne Berücksichtigung des Ausgangssubstrats stratifiziert werden. Das hätte aber zur Folge, dass die Bodendiversität Deutschlands schlechter erfasst werden würde. Eine Stratifizierung ohne Berücksichtigung der Substratgruppe hätte den Nachteil, dass wesentliche Faktoren, die die Bodeneigenschaften beeinflussen, nicht berücksichtigt wären. Zudem würde die Anbindung an die BÜK 1.000 fehlen, was eine flächengewichtete Hochrechnung erschweren würde. Weitere Auswirkungen der kleineren Stichprobe lassen sich durch den Vergleich des 16 x 16 km EU/WZE-Rasters mit dem 8 x 8 km-Rasters der BZE abschätzen. Infolge der geringeren Stichprobe kommt es bei fast allen bodenchemischen Kennwerten in einzelnen Substratgruppen zu signifikanten Abweichungen zwischen der EU/WZE-Unterstichprobe und der BZE II-Gesamtstichprobe. Davon betroffen sind bei den pH-Werten die Substratgruppen 5 und 8, beim Kohlenstoffgehalt die Substratgruppen 16 und 17, beim Stickstoffgehalt die Substratgruppe 16 und beim C/N-Verhältnis die Substratgruppen 5 und 15. Somit würden sich für die genannten Substratgruppen bei Verwendung des ausgedünnten 16 x 16 km-Rasters abweichende Werte ergeben. Eine weitere, sich aus der Ausdünnung des Netzes ergebende Konsequenz wäre die erhöhte Unsicherheit. Die Standardfehler sind z.B. bei der Kohlenstoffkonzentration im 16 x 16 km-Raster doppelt so hoch wie bei der Gesamtstichprobe der BZE II. Damit wären Unterschiede zwischen den Inventuren schwerer zu entdecken. Bodenveränderungen könnten so mittels Wiederholungsinventur schlechter erfasst und interpretiert werden.

Da die Daten der Bodeninventuren auch für die Treibhausgasberichterstattung verwendet werden, kommt den Bodenkohlenstoffvorräten eine besondere Bedeutung zu. Hierbei spielt für die Repräsentativität die Beprobungstiefe eine wichtige Rolle. Nach den Vorgaben zur Treibhausgasberichterstattung ist die organische Auflage zu erfassen (IPCC, 2003). Im Mittel werden nach den Daten der BZE II 16 % des bis 90 cm Tiefe vorkommenden Kohlenstoffs in der Auflage gespeichert. Die Auflage würde bei Verwendung der LUCAS-Daten fehlen. Der in der organischen Auflage gebundene Kohlenstoff ist aber vulnerabel gegenüber Umwelteinflüssen, wie z.B. Klimaänderungen oder Änderungen der Eintragsmengen von bodenversauerenden Stoffen. Derartige Prozesse können beim Fehlen der Beprobung der organischen Auflage nicht ausgewertet werden. Anhand der bei LUCAS beprobten Bodentiefe von 0-20 cm werden nach den Daten der BZE II nur 42 % des bis 90 cm Bodentiefe vorkommenden Kohlenstoffs erfasst. Bei der in der deutschen Treibhausgasberichterstattung verwendeten Tiefe 0-30 cm und einschließlich der organischen Auflage (Stümer et al., 2019) sind es 71 % des gesamten bis 90 cm Tiefe vorkommenden Kohlenstoffs. Damit verfügt die LUCAS 2015-Inventur durch das Fehlen der organischen Auflage und die Beschränkung auf eine Beprobungstiefe von 20 cm über eine geringere vertikale Repräsentativität.

Die Ergebnisse zur Repräsentanz zeigen, dass ein Vergleich der Daten von LUCAS 2015 mit denen der BZE II mit großen Unsicherheiten und Diskrepanzen verbunden ist. Dies betrifft die Vergleiche sowohl zu den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten als auch zu deren Vorratsberechnungen. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass eine Vereinigung der beiden Datensätze ebenfalls die Unsicherheiten erhöhen, statt vermindern würde.

A.5 Schlussfolgerungen

Das wesentliche Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die bei der LUCAS-Bodeninventur im Jahr 2015 gemessenen bodenchemischen Kenngrößen mit den Werten der BZE II zu vergleichen. Der Vergleich ergab deutliche systematische Abweichungen der LUCAS-Daten von den BZE II-Werten. Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sind bei der LUCAS-Inventur sehr viel höher als bei der BZE, was möglicherweise auf eine Verunreinigung der Mineralbodenprobe mit Resten der organischen Auflage zurückzuführen ist. Die Auflage wurde bei LUCAS nicht beprobt. Die Berechnung von Vorräten ist bei der LUCAS-Inventur problembehaftet, da keine Bestimmung der Trockenrohddichte mittels volumengerechter Beprobung erfolgte. Die aus Karten ermittelten Trockenrohddichten sind gegenüber der BZE um 19 % höher, was die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Vorräten entsprechend erhöhen würde. Weiterhin zeigte es sich, dass die Beprobung von Waldböden bei der LUCAS-Inventur nicht gleichmäßig über ganz Deutschland verteilt erfolgte. Große Teile des deutschen Waldes in Süd- und Norddeutschland sind in der LUCAS-Bodenstichprobe deutlich unterrepräsentiert, während die übrigen Teile überrepräsentiert sind. Die sich aus dem geringeren Stichprobenumfang ergebende Problematik der höheren Unsicherheiten und nicht besetzten Klassen kann gegenüber den drei Hauptproblemen der LUCAS-Bodenbeprobung im Wald – der fehlenden Repräsentanz, den stark erhöhten Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen und der fehlenden volumengerechten Beprobung – als nachrangig eingeschätzt werden. Die Daten beider Bodeninventuren können nicht vereinigt werden. Es würden sich daraus keine Synergie – Effekte ergeben, sondern die Qualität des vereinigten Datensatzes würde durch einen systematischen Fehler zwischen beiden Inventuren gegenüber dem BZE II-Datensatz gemindert werden. Es wird daher empfohlen, für Deutschland ausschließlich den Datensatz der BZE zu nutzen. Sie verfügt über eine höhere Netzdichte und ein umfangreicheres Messprogramm. Dieses zeichnet sich durch feinere Beprobungsschichten im Oberboden und eine größere Beprobungstiefe sowie Horizontansprachen aus und erfasst zusätzlich forstlich relevante Informationen zum Bestand und zur Vegetation. Vor allem werden die zur Vorratsberechnung wichtigen Trockenrohddichten durch eine volumengerechte Beprobung direkt erfasst.

B.1 Introduction

Knowledge of soil condition is crucial for assessing the quality of forest sites and for sustainable forest management planning. The supply of both nutrients and water by soils are quintessential in maintaining productive forest ecosystems. Essential soil chemical characteristics for the nutrient supply of a site are parameters such as the pH value, the ratio between carbon (C) and nitrogen (N) and the content of nutrients. The C concentrations are important for the binding capacity of nutrients and for water storage capacity and provides information on soils as sources and sinks for greenhouse gases (GHG). For Germany, data on the condition of forest soils are available from the nationwide Forest Soil Inventory (NFSI) on more than 1,800 sample plots of an 8 x 8 km grid. The first inventory (NFSI I) was launched at the end of the 1980s. The second inventory (NFSI II) was carried out between 2006 and 2008 and implemented in accordance with the soil survey manual from Wellbrock et al. (2006).

The aim of the LUCAS Project (Land Use/ Cover Area frame Statistical Survey) is to develop a harmonized dataset on land cover and land use within the European Union (EU). The plot data are available upon request from the European Soil Data Centre (ESDAC). For this purpose, 265,000 georeferenced plots were established on a 2 x 2 km grid. In 2009, soil samples were taken for the first time at approximately 10 % of these preselected plots. A second sampling was conducted in 2015 at these same locations.

Considering the two soil inventories running almost parallel and have partly similar objectives, questions have arisen about their comparability, synergies and the potential links to one another. The comparison of results of the inventories could offer differences in soil chemical properties in Germany which is relevant to both the scientific community and to policy makers alike. For example, the results of the NFSI on C stocks and stock changes in forest soils (Grüneberg et al., 2014) are included in the German greenhouse gas (GHG) reporting (Stümer et al., 2019). On the other hand, the C stocks and C stock change data from the LUCAS soil inventory for the EU countries, at regional level (NUTS1), was published as a "Science for Policy report" by the Joint Research Center (Panagos et al., 2020).

In this study, the LUCAS soil data from the 2015 inventory (Jones et al., 2020) of forest plots in Germany were compared with the corresponding NFSI II data for various soil parameters including, the concentrations and stocks of organic C and N as well as pH values. Both studies will be compared and critically reviewed under the aspect of representativeness.

For the LUCAS inventory, soil parameters are available for a depth of 0-20 cm, while for the NFSI II soil parameters are available for both the organic layer and for the mineral soil (in depth increments of 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, and 60-90 cm). To compare both inventories, the German NFSI data from the three upper depth increments were recalculated to 0-20 cm depth, considering site dry bulk densities, stone content and fine-earth content, respectively. The plots of the LUCAS program were attributed to the same 16 soil parent material groups used in the German NFSI data using geographical coordinates (Wellbrock et al., 2016). These classes were derived from the 72 soil units of the national soil map 1:1,000,000 (BÜK,1000), which describes soil groups and parent material based on (1) the revised FAO legend (FAO UNESCO ISRIC, 1990) and (2) the soil mapping units assigned to soil groups (BGR, 1998). This approach enables an area-weighted extrapolation of the data for the whole country, and secondly, the classes are based on parent material and substrate genesis that, in turn, determine essential soil properties. For the classes a sufficient sample size was considered by a further differentiation according to Corine Landcover classifications into sites with coniferous, deciduous and mixed forest. Classes with a low number of samples were merged to reach a sufficient sample size.

Subsequently, all classes were tested for significant and systematic differences between the inventories as well as between the means of the respective confidence limits. Thus, the representativeness can be estimated by comparing the LUCAS program to the German NFSI in respect to the 16 x 16 km and 8 x 8 km sample grid. To quantify C stocks, it is important to compare the depth level 0-20 cm of the LUCAS program

to Germany's NFSI sampling scheme, where data available for the organic layer and the mineral soil down to 90 cm. In this study, it is intended to evaluate whether the exclusive focus of the LUCAS program on the topsoil of forested sites allows relational conclusions in respect to C storage capacity, and what uncertainties can be expected from excluding the organic layer and subsoil, respectively. Suggestions linking the inventories are intended to elaborate.

B.2 Materials and methods

B.2.1 Inventory designs

The German NFSI II was conducted between 2006 and 2008 at 1,857 sample plots on a representative 8 x 8 km grid in accordance with the soil survey manual by Wellbrock et al. (2006, 2019). The organic layer and the mineral soil were sampled at depths of 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm. Volume-based samples, taken at eight satellite plots surrounded 10 m from the plot centre in cardinal and intercardinal directions, were pooled for all the depth levels down to 30 cm for each respective plot. Depending on stone content, volume-based mineral soil samples were taken with cylindrical core or cap cutter, with an AMS core sampler or a motor-driven auger. The volume-based sampling was used to determine the soil mass as well as the coarse soil proportion according to a manual on forestry analytics (GAFA, 2006). Soil profiles at the centre of the plot were used to designate soil horizons, classify soil types and determine parent material, enabling an assignment to the legend units of the soil map (BÜK 1,000).

The primary objective of the LUCAS inventory is to record land cover and land use within the EU. A sampling of the topsoil (0-20 cm) was carried out on a sub-sample of the LUCAS grid plots. In Germany, a total of 415 plots were sampled according to a standardized procedure (Fernández-Ugalde 2018). The organic layer was not sampled but carefully removed. Mineral soil was sampled in a 20 cm deep soil pit by extracting soil layers with a thickness of 3 cm. A volume-based sampling was not applied.

Based on the LUCAS soil data, the soil chemical and physical characteristics were modelled and evaluated in several projects. These include the regionalisation of C concentrations (de Broginiez et al., 2015), N concentrations, C to N ratios, pH values in H₂O and CaCl₂ (Ballabio et al., 2019), and soil physical properties such as texture, coarse stone content, and bulk density (Ballabio et al., 2016). Since bulk density was not measured in the LUCAS soil inventory a modelling approach was performed using the Europe-wide map of the effective bulk density, which was derived by pedotransfer functions from the soil texture and the structure of the soil map as well as from land use classes (van Ranst et al., 1995). In this analysis the clay content measured in LUCAS was multiplied by a factor of 0.009 and subtracted from the effective bulk density (Jones et al., 2003). Next, using these bulk density estimates, soil C stocks were calculated (Yigini et al., 2016).

B.2.2 Data of the LUCAS program

Plot data based on LUCAS 2009 and LUCAS 2015 are available here:

- <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas/data/primary-data/2015>
- <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas2009-topsoil-data>
- <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas2015-topsoil-data>

Area data based on LUCAS:

- Soil physics: Tiff 500m based on Ballabio et al. (2016), includes dry bulk density (calculated with the dry bulk density map and LUCAS clay content).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-physical-properties-europe-based-lucas-topsoil-data>
- Soil chemistry: Tiff 500m, based on Ballabio et al. (2019), includes chemical properties, e.g., N, C/N, pH, CEC. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/chemical-properties-european-scale-based-lucas-topsoil-data>
- Carbon concentrations: Tiff 500 m, based on de Broginez et al. (2015).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/topsoil-soil-organic-carbon-lucas-eu25>
- Carbon stocks: Grid, 1 km, based on Yigini et al. (2016).
<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-organic-carbon-soc-projections-europe>

B.2.3 Data of the German NFSI

Soil parameters based on plot data:

- Mineral soil (for depth increments 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm)
 - pH(H₂O), pH(CaCl₂), pH(KCl)
 - C and N concentrations
 - Proportions of the sand, clay and silt fractions
 - Dry bulk density and the coarse soil content
- Organic layer
 - pH(KCl)
 - C and N concentrations
 - Humus stocks
- Further parameters
 - Elevation above sea level and geographical coordinates
 - Soil types, forest stand types, and humus forms
 - Soil mapping units assigned to soil groups

B.2.4 Further data

- Corine Landcover 2012 raster version 2020 20u1, CMLS 2021 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>)
- National Soil Map of Germany 1:1 000 000, BÜK1000N v23, BGR 2013 (<http://www.bgr.bund.de>)
- National Soil Map of Germany 1:250 000 (provisional issue), BÜK250, BGR 2021 (<http://www.bgr.bund.de>)
- Nomenclature of Territorial Units for Statistics areas of Germany (NUTS250), GeoBasis-DE / BKG 2021 (<http://www.bkg.bund.de>)
- National Forest Inventory result data base, TI 2021 (<https://bwi.info>)

B.2.5 Analyses, soil classification and statistics

Carbon and N stocks were calculated according to the formula:

$$\text{stock [t ha}^{-1}] = \text{concentration [mg g}^{-1}] * \text{TRD [g cm}^{-3}] * (1-\text{GBA [\%]/100) * } d \text{ [cm] * 100,}$$

with *stock* = stocks of C or N stocks, *concentration* = C or N concentration, *TRD* = dry bulk density, *GBA* = coarse soil fraction, *d* = thickness of the depth increment.

For the NFSI, C and N stocks were calculated for each depth increment. Dry bulk densities were not measured on LUCAS sample plots but were taken by spatial intersection from the map of dry bulk density based on Ballabio et al. (2016). Carbon and N stocks were calculated with raster operation on raster data Ballabio et al. (2016) and Ballabio et al. (2019) using the formula above. The C concentrations were calculated from the C to N ratio and the N concentrations, as this parameter was not included in the published data sets. Model uncertainties for the area data sets was not consistent for all data sources from the original publications. Therefore, it was decided not to indicate uncertainties for raster data sets.

The depth increments of 0-5 cm, 5-10 cm, and 10-30 cm of the NFSI II were transformed to the 0-20 cm LUCAS depth increment by weighting the C and N concentrations with the fine earth content in relation to the thickness of the overlapping range. For pH values, the same was done but using delogarithmized values. For the depth level 10-30 cm, half the fine earth content was used. Similarly, C and N stocks of the 0-20 cm depth increments were calculated by half the fine earth content.

The analyses were carried out according to the new assigned soil groups of the NFSI (Table 1) and Corine Landcover classes. Initially, geospatial data was transferred to a uniform coordinate system (ETRS89 LAEA, EPSG: 3035). Forest areas were derived from a GIS based intersection of the German soil map (BÜK1,000N) with the use of the CORINE land cover raster map. However, the geometries of the soil map showed a small bias compared to more recent geodata as Germany-NUTS250, BÜK250, CLC12. However, the more recent BÜK250 was not used because the map has not been published completely. Moreover, the high number of legend units is not suitable for the applied class match approach.

After calculating arithmetic means for each soil group and Corine forest type, area-weighted means were calculated for three forest types, for the soil groups as well as for Germany's total forest area according to the forest areas of the classes and the total forest area covered with sample plots. In contrast to a previous analyses of C stocks in forest soils peatland soils were included (Grüneberg et al. 2014).

Differences were tested for significance by one-way analysis of variance (ANOVA) with a 95 % confidence level. The inventory plots were weighted according to the proportion of the forest area and the number of inventory plots. The classified factor inventory and as well as its interaction with the Corine forest type and the soil group were included in the linear model of the ANOVA. Linear contrasts were applied within the inventories between the Corine forest types and between the soil groups. The Scheffe test was used for multiple comparisons of means. Statistical analysis was performed with SAS 9.4 (SAS Institute, Carry, NC, USA).

Table 1: List of the new assigned soil groups of the NFSI

No.	Soil types	Parent material	Explanation	Soil mapping units
1	Regosols, Arenosols, Podzols	Dystrophic sand deposits	Indifferent	1, 16, 17, 31, 33, 34
2	Fluvisols, Gleysols, Podzols	Sandy to loamy deposits	Soils in broad river valleys, including terraces and lowlands	8, 10, 11, 12,
3	Fluvisols, Gleysols, Luvisols	Loamy to clayey partly calcareous deposits	Soils in broad river valleys, including terraces and lowlands	13, 14, 15,
4	Cambisols, Luvisols, Regosols, Podzoluvisols	Boulder clay and till	Soils in undulating lowlands and hilly areas	18, 19, 20, 21, 23, 30
5	Gleysols, Arenosols, Regosols, Cambisols	Sandy deposits overlaying boulder clay	Soils in undulating lowlands and hilly areas	22, 25, 26, 27, 28, 29,
6	Cambisols, Arenosols	Eutrophic sand deposits	Indifferent	32
7	Luvisols, Podzoluvisols, Cambisols	Sandy loess to loessic loam partly overlying various rocks	Soils in loess areas of the lowlands and hilly areas	35, 38, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47 48,
8	Leptosols, Cambisols	Slope deposits over limestone, marlstone and dolomite	Shallow soils derived from limestone weathering	49
9	Cambisols, Luvisols	Redeposited material derived from limestone, marlstone, and dolomite	Deep soils derived from limestone weathering	50
10	Cambisols, Gleysols	Marlstone and claystone or calcareous gravels	Weathered marlstone and claystone	51, 52
11	Cambisols	Basic and intermediate igneous rocks	Soils from solid rocks of mountains and hills	53, 54
12	Cambisols, Gleysols	Igneous and metamorphic rocks	Soils from solid rocks of mountains and hills	55, 56, 57,
13	Cambisols, Podzols	Hard argillaceous and silty slates with greywacke, sandstone, quartzite, and phyllite	Soils from solid rocks of mountains and hills	58, 59, 60
14	Cambisols, Podzols, Gleysols	Sandstones, quartzite, and conglomerates	Loss bearing sediments overlying various rocks	61, 62, 63, 64
15	Leptosols, Cambisols, Luvisols, Gleysols	Frequently alternating soils from slate, greywacke, limestone,	Loss bearing sediments mixed with various rocks	65, 66
16	Leptosols, Cambisols	Limestone, dolomite, and noncalcareous silicate rocks	Alpine soils	68
17	Histosolss	Peat	Peat soils	6, 7

Not considered soil mapping units: 2, 3, 4, 5, 9, 24, 36, 37, 39, 41, 67, 69, 70, 71, 72

B.3 Results

B.3.1 Representativeness of LUCAS 2015

The sampling density of LUCAS 2015 shows a geographic bias in the sampled forest land use class plots (Figure 1). Specifically, as shown in figure 1, there is a high-density band of plots in central part of Germany from the eastern part in Brandenburgia to the western part in North Rhine-Westphalia. In contrast there are comparatively few sampling plots to the north and south of this band. It should be noted, that this geographical sampling bias only applies to the subsample and not to the total sample of the LUCAS project (Figure 2 & 3). For the total sample, the proportion of the forest area of the federal states and the proportion of the federal states of the German forest area agree with results of the Third National Forest Inventory (3rd NFI). On the other hand, the proportions of forest area in the subsample were highly biased. In Bavaria, f. e. only 6 % of the sampled plots are forest plots, although according to the 3rd NFI the proportion of forest is 36 % (forest area) and in the LUCAS project 35 % of the plots are in forest. Therefore only 5 % of the German plots sampled in the LUCAS 2015 project are Bavarian plots, although Bavarian forests share 23 % of Germanies total forest area according to the 3rd NFI or 21 % according to the LUCAS project. Consequently, conclusions about the representativeness of soil information for Germany are subject to errors in respect to the LUCAS 2015 project. It is possible to compensate smaller state-specific differences in the sampling density but with LUCAS 2015 no samples are available for significant forest areas in Germany, f. e. the Palatinate Forest.

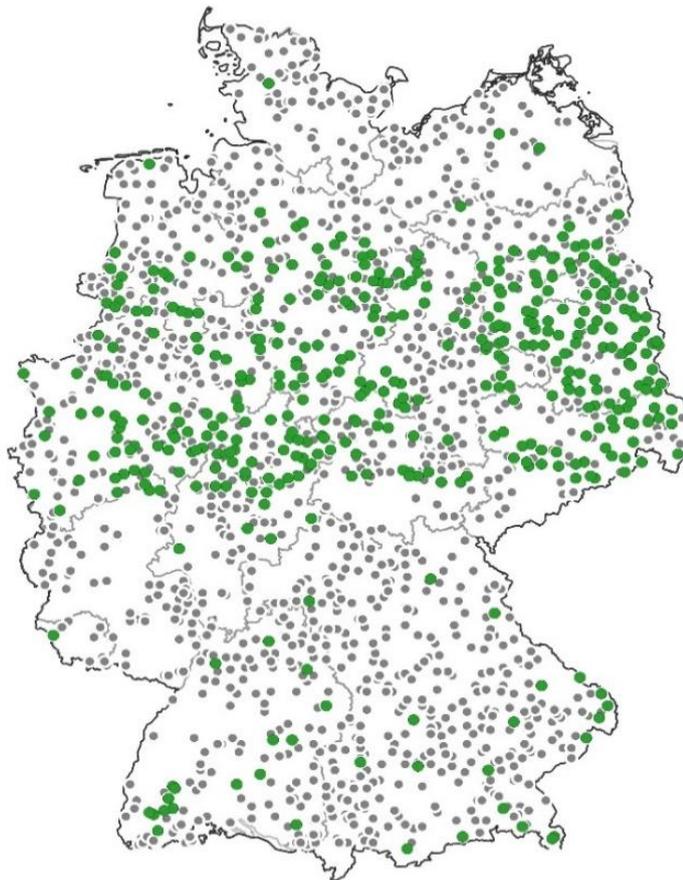


Figure 1: Soil samples in the LUCAS project, showing soil sampling locations both outside (grey) and inside the forest (green).

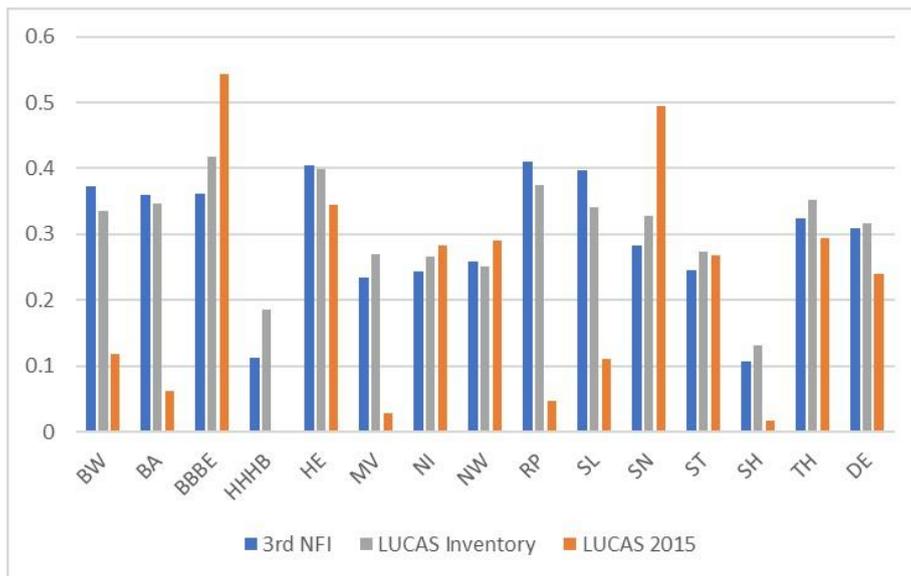


Figure 2: The proportion of federal state forest area to the German forest area based on the inventories

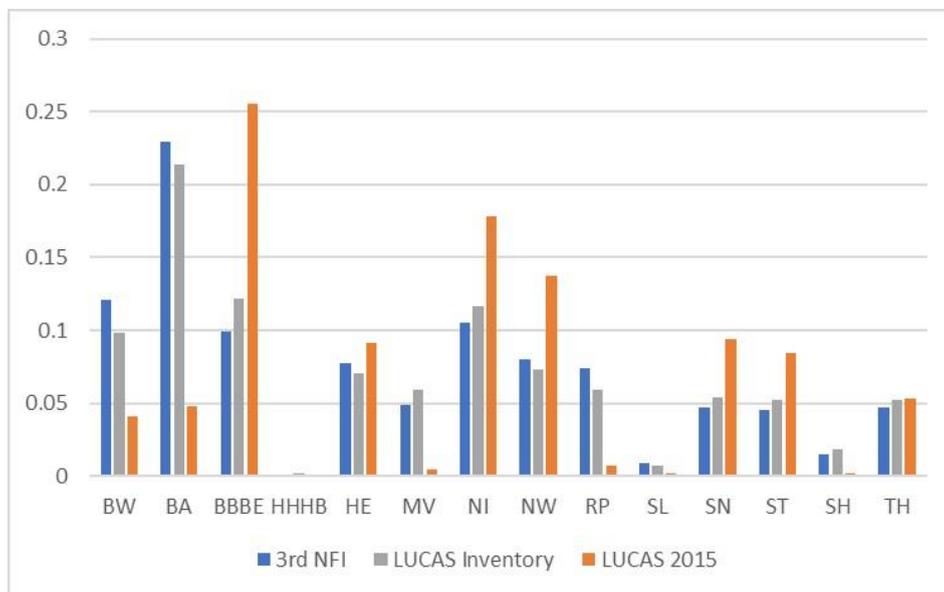


Figure 3: The proportion of forest area within each federal state and total Germany based on the inventories

B.3.2 Sampling number

The measured values of the NFSI II and LUCAS 2015 were compared stratified by forest stand type and soil group. The aggregation into higher units was carried out by weighting the forest area with each class. The results are given in the order NFSI II in the 8 x 8 km grid, NFSI II in the 16 x 16 km grid, plot data of LUCAS 2015 and various LUCAS area data sets (de Broginez et al., 2015, Ballabio et al. 2016, Yigini et al., 2016, Ballabio et al., 2019). For C concentrations of the mineral soil down to a depth of 20 cm 1,774 out of 1,831 sampled plots for the 8 x 8 km grid of the NFSI II and 429 sampled plots for the 16 x 16 km EU of the NFSI II are available (Figure 4). Therefore, C stocks were calculated and assigned to classes for 414 plots. In LUCAS 2015, 415 plots were used for calculating C stocks and assigning classes.

In respect to LUCAS 2015 the soil groups 12, 13 and 14 are underrepresented while the soil groups 5, 6 and 7 are overrepresented. The soil classes of the NFSI II are represented by the forest distribution (Figure 5).

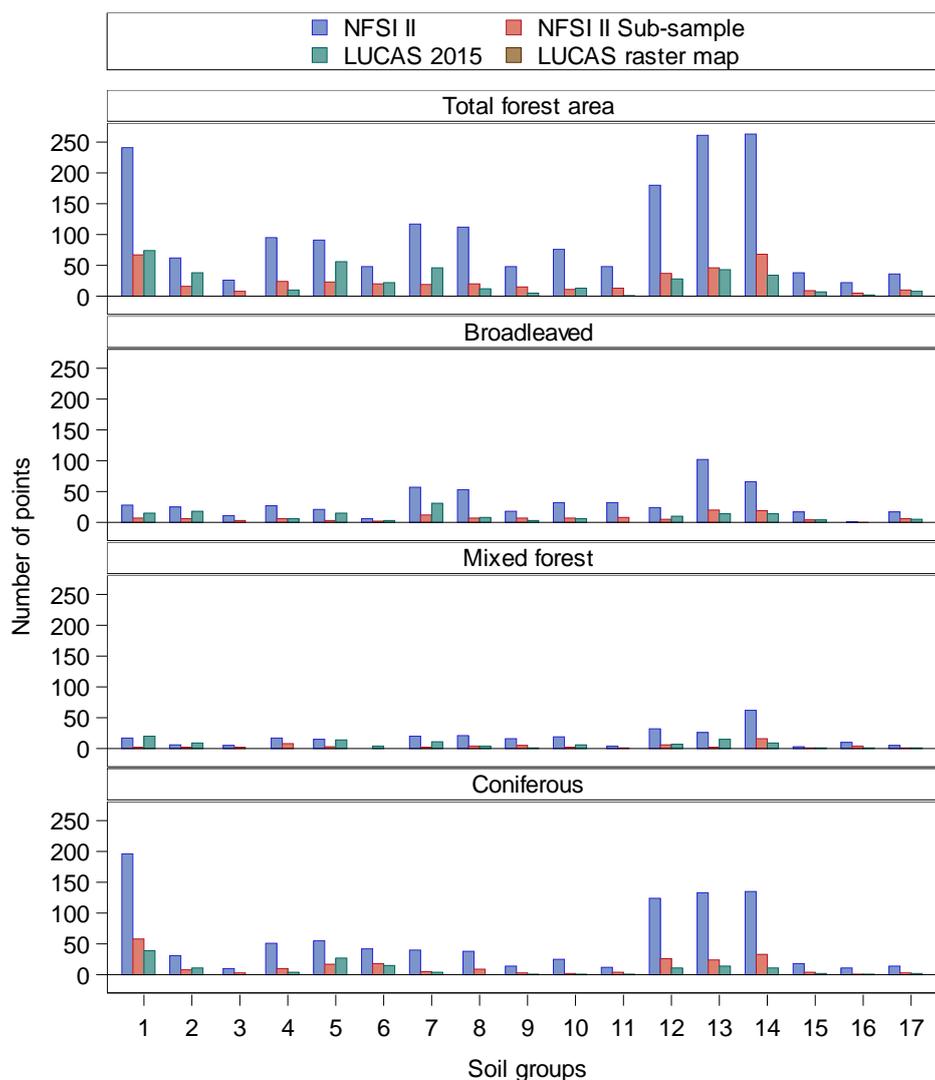


Figure 4: Number of plots with measured C concentrations for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. *Numbered soil groups see table 1

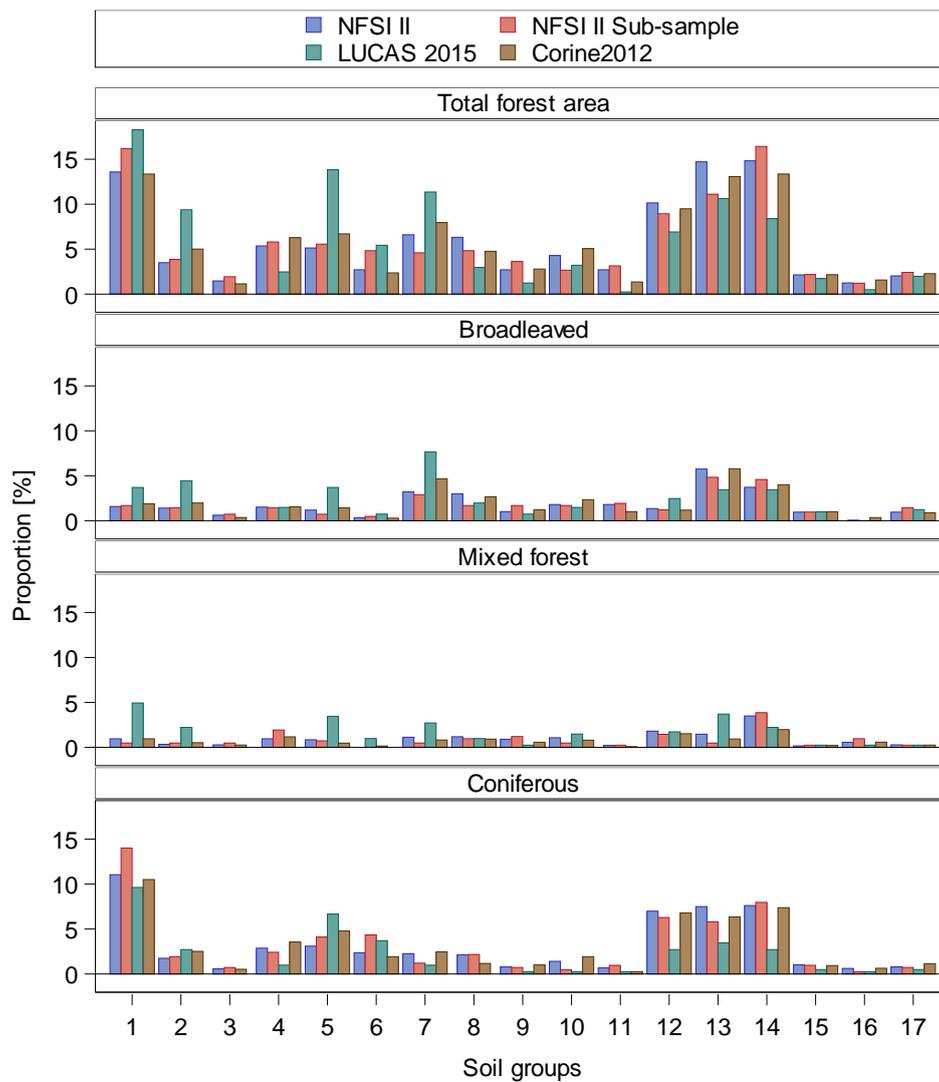


Figure 5: Percentage of plots with measured C concentrations for different forest stands and soil groups based on soil inventories and CORINE land cover data from 2012. *Numbered soil groups see table 1

B.3.3 pH values

According to the results of the NFSI II, the averaged $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ of the mineral soil to a depth of 20 cm throughout Germany is 4.74 ± 0.02 (Figure 6). Deciduous forests show with 5.12 ± 0.04 the highest values, while for mixed and coniferous forest the $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ was lower with 4.92 ± 0.05 and 4.46 ± 0.02 . The NFSI II subsample the mean $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ is with 4.70 ± 0.04 similar to the total sample, which also was found for deciduous, mixed and coniferous forests ranging from 5.12 ± 0.09 to 4.87 ± 0.13 and 4.42 ± 0.04 , respectively. On the LUCAS 2015 plots, the nationwide mean was 4.55 ± 0.04 and thus lower than for the NFSI II. This is confirmed by forest types with 5.02 ± 0.09 for deciduous, 4.89 ± 0.12 for mixed and 4.21 ± 0.04 for coniferous forests. The $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ of coniferous forests was significantly lower compared to the NFSI II. The averaged $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ of the area data based on the LUCAS inventory according to Ballabio et al. (2019) is 5.2 for Germanies forests. The different forest types show values ranging from 5.5 for deciduous to 5.4 for mixed and 5.0 for deciduous forests, respectively. Both for the NFSI II and LUCAS 2015 the $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ is higher compared to the LUCAS inventory.

The differences of the $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ between the NFSI II and LUCAS 2015 are less pronounced compared to $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ (Figure 7). There are no significant differences between the total forest area based on the NFSI II with 4.12 ± 0.02 compared to LUCAS 2015 with 4.19 ± 0.05 as well as between mixed forests with 4.32 ± 0.05 compared to 4.51 ± 0.13 , and between coniferous forests with 3.85 ± 0.02 compared to 3.81 ± 0.07 . The $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ in deciduous forests are lower for NFSI II with 4.49 ± 0.04 compared to LUCAS 2015 with 4.71 ± 0.10 . The pH -values of the 16 x 16 km sub-sample are comparable with the total collective of NFSI II, ranging from 4.10 ± 0.04 for the total forest area, to 4.48 ± 0.10 of deciduous, to 4.26 ± 0.13 of mixed, and to 3.83 ± 0.04 of coniferous forests, respectively. The LUCAS inventory-based area data according to Ballabio et al. (2019) revealed significantly higher pH values compared to the NFSI II and LUCAS 2015 both for the nationwide mean of 4.67, for deciduous forests of 4.99, for mixed forests of 4.93 and for coniferous forests of 4.42.

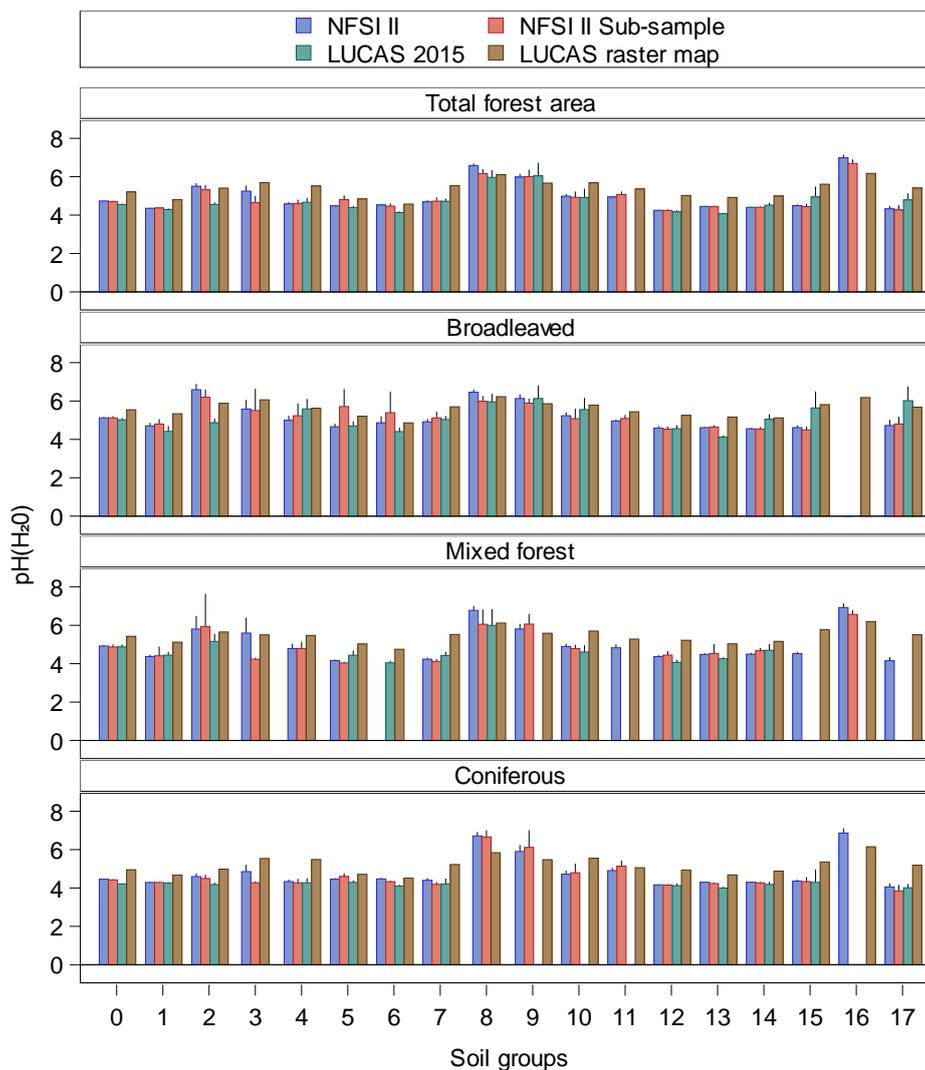


Figure 6: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

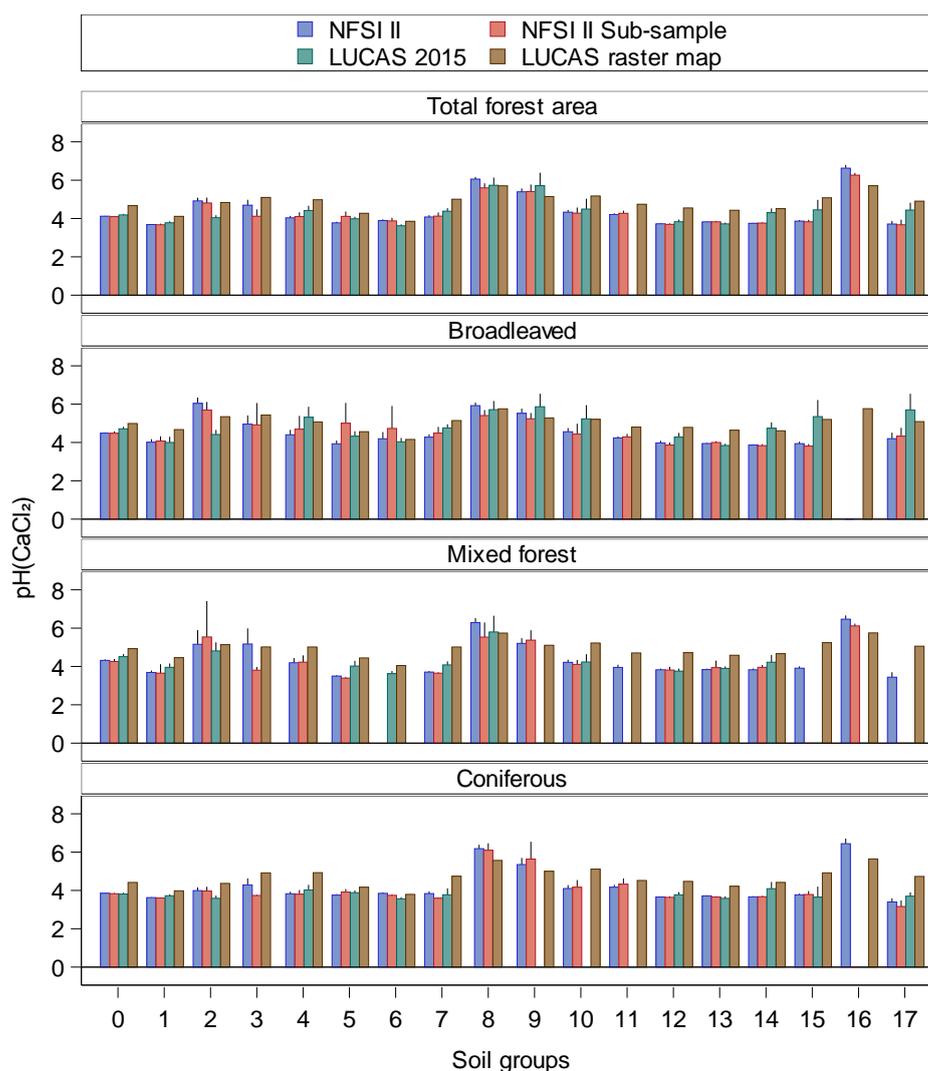


Figure 7: pH(CaCl₂) at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.3.4 Carbon and nitrogen concentrations

The averaged NFSI II C concentration of the soil to a depth of 0-20 cm was $34.1 \pm 0.7 \text{ mg g}^{-1}$ of the total forest area (Figure 8). There are no significant differences between deciduous ($35.2 \pm 1.2 \text{ mg g}^{-1}$), mixed ($34.3 \pm 1.9 \text{ mg g}^{-1}$) and coniferous forests ($33.4 \pm 1.1 \text{ mg g}^{-1}$). In the NFSI II sub-sample, the mean C concentration of the total forest area is with $35.2 \pm 1.6 \text{ mg g}^{-1}$ similar to the total sample. The C concentrations for deciduous, mixed and coniferous forests ranges from 34.9 ± 2.5 to $37.0 \pm 2.4 \text{ mg g}^{-1}$ and $35.0 \pm 2.5 \text{ mg g}^{-1}$, respectively. LUCAS 2015 shows significant higher C concentrations of $66.1 \pm 4.5 \text{ mg g}^{-1}$ for the total forest area but there were no significant differences between deciduous, mixed and coniferous forests with concentrations of 60.4 ± 5.9 , 68.5 ± 6.4 and $69.0 \pm 7.3 \text{ mg g}^{-1}$, respectively. The area data based on LUCAS (Ballabio et al. 2019) show similar C concentrations to the NFSI II. The average value for the total forest area is 35.2 mg g^{-1} , while the values for deciduous, mixed, and coniferous forest range from 33.5 to 35.6 mg g^{-1} , and 36.1 mg g^{-1} . The second area-based LUCAS data set from de Broginiez et al. 2015 shows higher values as the nationwide mean C concentrations (49.6 mg g^{-1}). For the various forest stands, the averaged values are 44.5 mg g^{-1} for deciduous, 51.7 mg g^{-1} for mixed, and 52.2 mg g^{-1} for coniferous forests.

For the NFSI II, the N concentration of the mineral soil down to 0-20 cm of the total forest area is $1.87 \pm 0.04 \text{ mg g}^{-1}$ (Figure 9). Deciduous forests reveal highest values ($2.22 \pm 0.08 \text{ mg g}^{-1}$), followed by mixed ($1.94 \pm 0.09 \text{ mg g}^{-1}$) and coniferous forests ($1.64 \pm 0.04 \text{ mg g}^{-1}$). For the total forest area of the NFSI II sub-sample, the N concentration is $1.92 \pm 0.07 \text{ mg g}^{-1}$. There were no significant differences between the inventories and the different forest stands which range from $2.28 \pm 0.19 \text{ mg g}^{-1}$ in deciduous forests to $1.64 \pm 0.06 \text{ mg g}^{-1}$ in coniferous and $2.18 \pm 0.12 \text{ mg g}^{-1}$ in mixed forests. Similar to C, the N concentrations of the total forest area of LUCAS 2015 ($3.87 \pm 0.22 \text{ mg g}^{-1}$) are significantly higher than in the NFSI II sub-sample. However, there were no significant differences between deciduous ($4.11 \pm 0.32 \text{ mg g}^{-1}$), mixed ($4.08 \pm 0.31 \text{ mg g}^{-1}$) and coniferous forests ($3.68 \pm 0.34 \text{ mg g}^{-1}$). The LUCAS data modelled according to Ballabio et al. (2019) are within the range of the NFSI II with values of 2.21 mg g^{-1} (total forest area), 2.34 mg g^{-1} (deciduous forests), 2.44 mg g^{-1} (mixed forests), and 2.08 mg g^{-1} (coniferous forests).

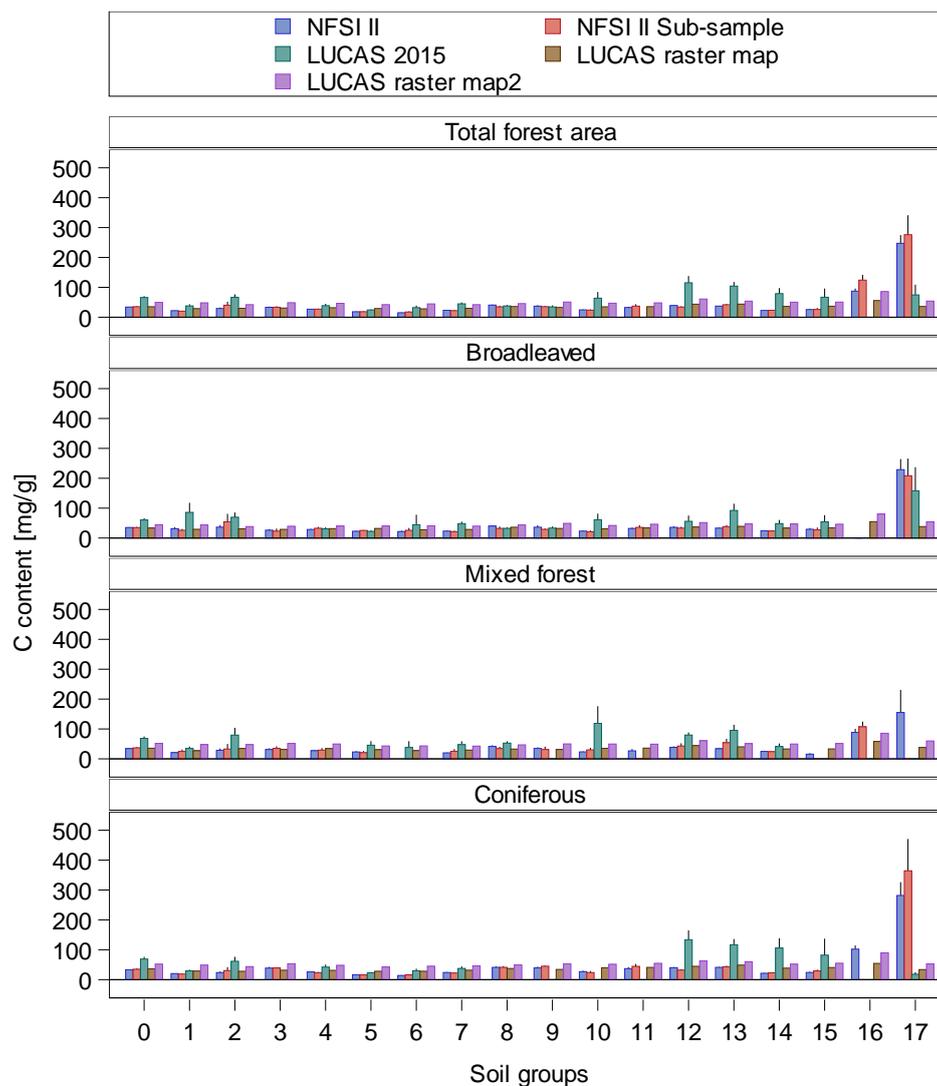


Figure 8: Carbon concentrations at 0-20 cm depth of the mineral for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

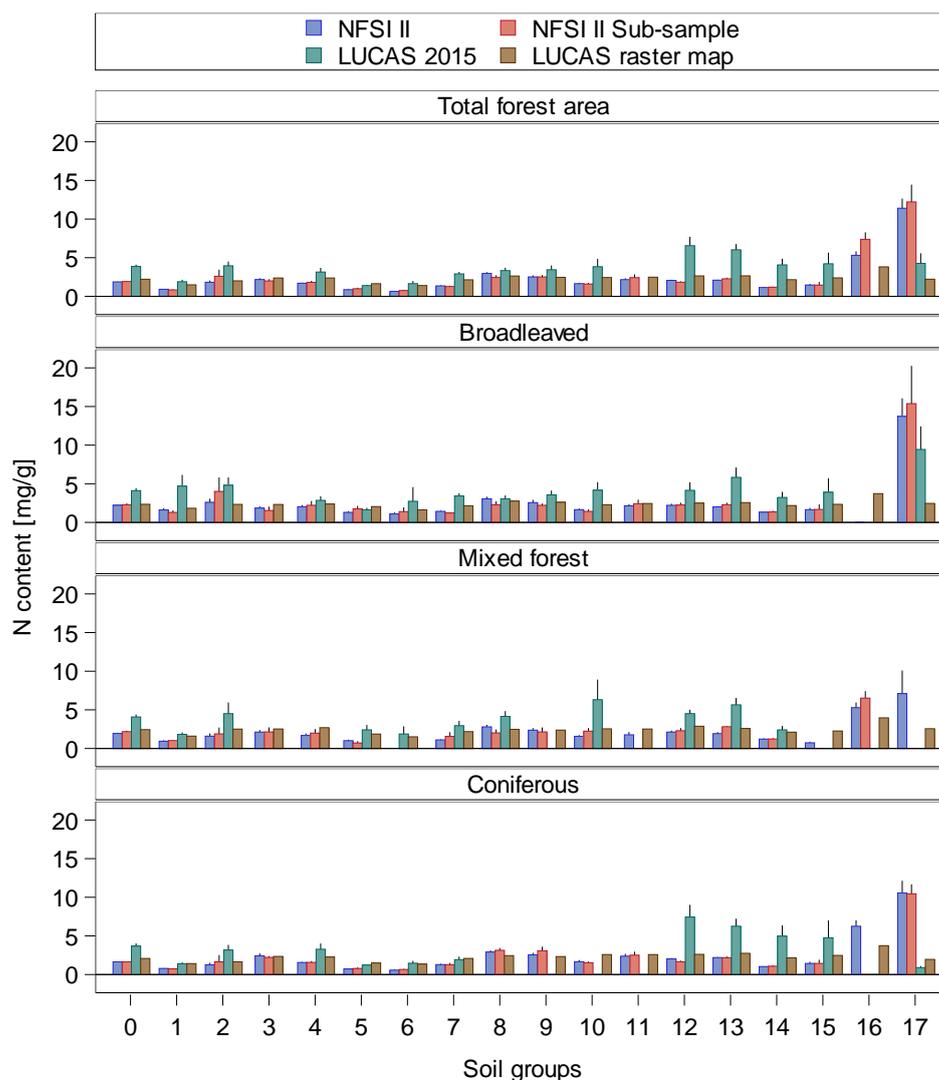


Figure 9: Nitrogen concentrations at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.3.5 C/N ratio

The C/N ratio based on the NFSI II of the total forest area is 19.8 ± 0.2 but the various forest stands show values ranging from 16.8 ± 0.3 for deciduous to 18.6 ± 0.3 for mixed and 21.8 ± 0.2 for coniferous forests, respectively (Figure 10). In the NFSI II sub-sample, the C/N ratio of the total forest area is 19.8 ± 0.4 . In contrast to the NFSI II total sample, the differences between deciduous (17.2 ± 0.9) and mixed forests (17.7 ± 0.8) are not significant. The C/N ratio of coniferous forests is 21.8 ± 0.4 . LUCAS 2015 reveals lower C/N ratios compared to the NFSI II with values for the total forest area of 16.8 ± 0.2 , for deciduous forests of 13.7 ± 0.3 , for mixed forests of 16.7 ± 0.4 , and for coniferous forests of 18.6 ± 0.3 . The outcomes based on the modelled LUCAS data from Ballabio et al. (2019) results in an averaged C/N ratio of 16.3 for the total forest area. Compared to LUCAS 2015, the C/N ratio is higher for deciduous forests (14.3) but lower for mixed (14.8) and coniferous forests (17.9).

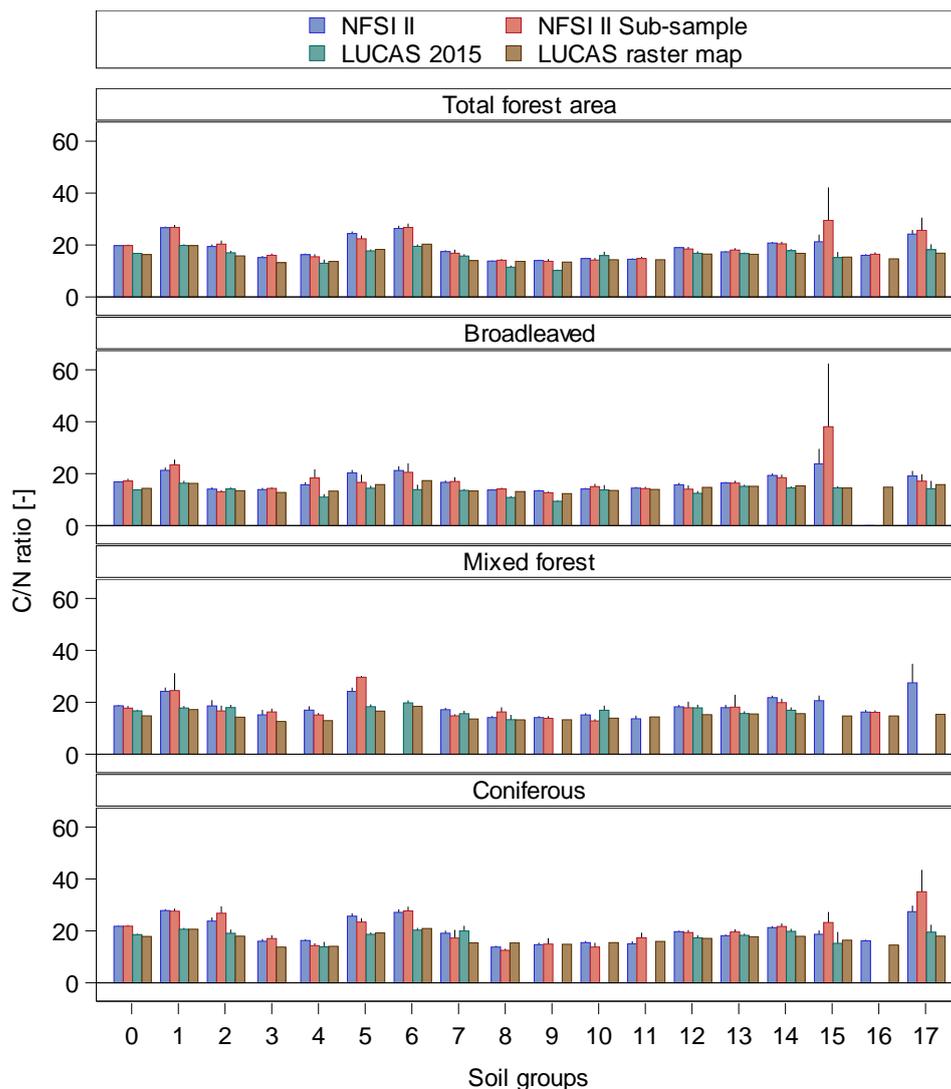


Figure 10: C/N ratio at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.3.6 Dry bulk density

The averaged dry bulk density for the NFSI II is $1.10 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$. The variation between the forest stands is less pronounced and ranges from $1.10 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ for deciduous forests to 1.03 ± 0.01 and $1.12 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ for mixed and coniferous forests, respectively (Figure 11). The dry bulk densities of the NFSI II sub-sample are not significantly different from the total sample. The values range from $1.10 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ for the total forest area to $1.09 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ for deciduous forests, to $1.02 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$ for mixed forests, and to $1.14 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ for coniferous forests. For the LUCAS inventory, the modelled dry bulk densities from Ballabio et al. (2016) for the total forest area ($1.31 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$) were significantly higher compared to the NFSI II. The comparison of the forest stands results in dry bulk densities ranging from $1.30 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ for deciduous forests to $1.33 \pm 0.01 \text{ g cm}^{-3}$ for coniferous forests. The modelled dry bulk densities of the LUCAS inventory are comparable with LUCAS 2015 because they came from the same data source.

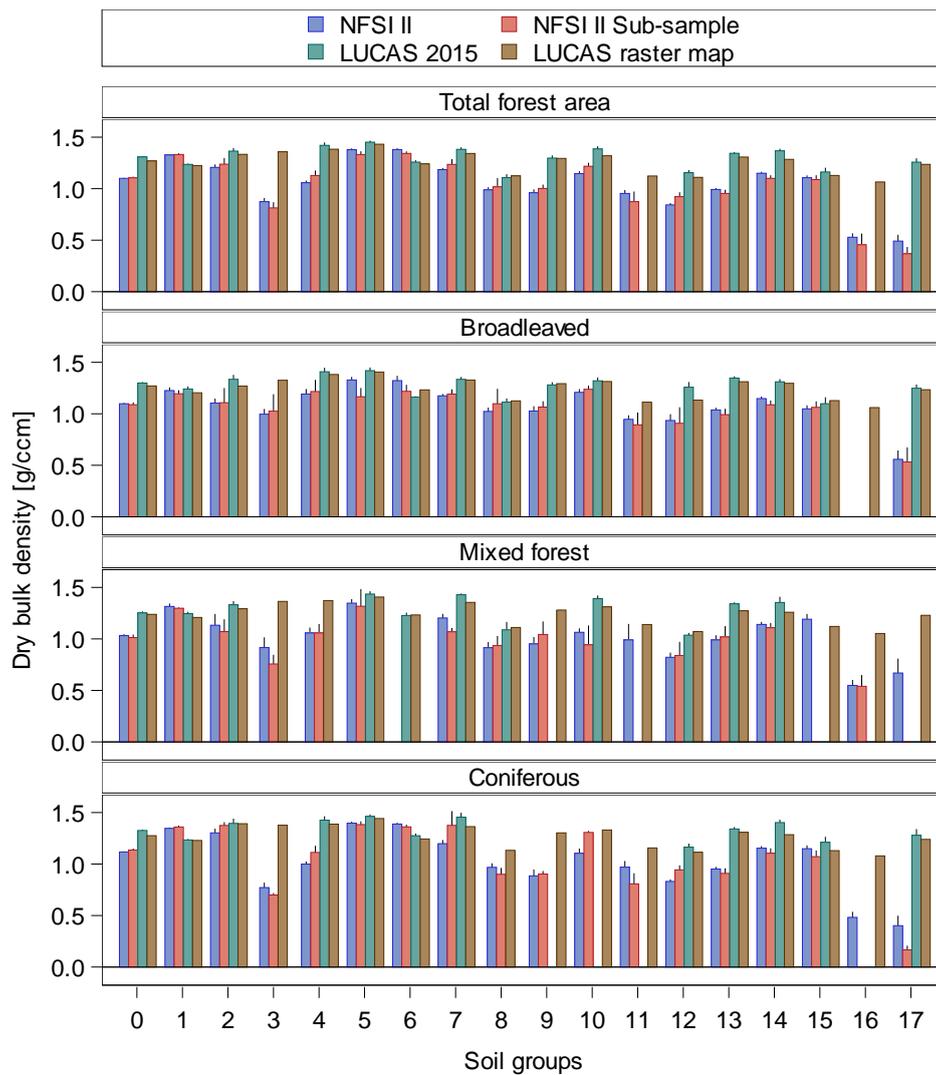


Figure 11: Dry bulk density at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.3.7 Carbon and nitrogen stocks

The C stocks based on the NFSI II down to 20 cm of the mineral soil amounts to $52.8 \pm 0.7 \text{ t ha}^{-1}$ for the total forest area. The C stored in the various forest stands range from $50.4 \pm 0.8 \text{ t ha}^{-1}$ under coniferous forests to 52.8 ± 1.1 and $56.9 \pm 1.6 \text{ t ha}^{-1}$ under mixed and deciduous forests, respectively (Figure 12). The NFSI II sub-sample results in C stocks of 53.1 ± 1.4 and 1.6 t ha^{-1} which is in the same range as for the total forest area. However, deciduous forests ($54.7 \pm 2.4 \text{ t ha}^{-1}$) differs not significantly from mixed ($57.5 \pm 3.0 \text{ t ha}^{-1}$) and coniferous forests ($51.1 \pm 2.1 \text{ t ha}^{-1}$). Carbon stocks based on LUCAS 2015 and on the modelled dry bulk densities from Ballabio et al. (2016) are significantly higher compared to the values based on the NFSI II. The mean C stocks of the total forest area amounts to $143.1 \pm 9.4 \text{ t ha}^{-1}$, while the forest types show values ranging from $131.3 \pm 13.3 \text{ t ha}^{-1}$ in deciduous forests to $139.3 \pm 14.5 \text{ t ha}^{-1}$ and $150.8 \pm 14.7 \text{ t ha}^{-1}$ in mixed and coniferous forests, respectively. The calculated C stocks based on Ballabio et al. (2016) and Ballabio et al. (2019) are similar to the values based on LUCAS 2015 and NFSI II. The total forest area store on average 75.8 t C ha^{-1} , while the C stocks of the various forest stands range from 72.8 t ha^{-1} (deciduous forests) to 73.4 t ha^{-1} (mixed forests) and 78.1 t ha^{-1} (coniferous forests). The modelled C stocks based on LUCAS data by Yigini et al. (2016) show a similar range and amounts to 77.9 t ha^{-1} for the total forest area, to 71.7 t ha^{-1} for deciduous forest, to 80.1 t ha^{-1} for mixed forest, and to 81.1 t ha^{-1} for coniferous forest.

Based on the NFSI II, N stocks for the total forest area are on average 2.90 ± 0.04 and 1.6 t ha^{-1} (Figure 13). The values of the various forest stands are significantly different and amounts to 3.54 ± 0.07 and 1.6 t ha^{-1} for deciduous forests, to 2.97 ± 0.07 and 1.6 t ha^{-1} for mixed forests and to 2.49 ± 0.05 and 1.6 t ha^{-1} for coniferous forests. The averaged N stocks based on the NFSI II sub-sample for the total forest are $2.98 \pm 0.09 \text{ t ha}^{-1}$ and thus comparable with the total collective. Compared to the NFSI II collective, N stocks differ not significantly for deciduous ($3.51 \pm 0.16 \text{ t ha}^{-1}$) and coniferous forests ($2.58 \pm 0.14 \text{ t ha}^{-1}$), while mixed forests ($3.38 \pm 0.12 \text{ t ha}^{-1}$) show significant higher values. Similarly, N stocks based on LUCAS 2015 for the total forest area are with 8.34 ± 0.44 and 1.6 t ha^{-1} significantly higher compared to the NFSI II. Nitrogen stocks of the forest types range from 8.93 ± 0.71 and 1.6 t ha^{-1} in deciduous forests to 8.18 ± 0.68 in mixed forests and to 8.02 ± 0.66 and 1.6 t ha^{-1} in coniferous forests. The differences are not significant. Nitrogen stocks based on Ballabio et al. (2016, 2019) are lower than the values based on LUCAS 2015. The total forest area store 4.76 t N ha^{-1} , while deciduous forests store 5.09 t N ha^{-1} , mixed forests store 5.05 t N ha^{-1} and coniferous forests store 4.49 t N ha^{-1} .

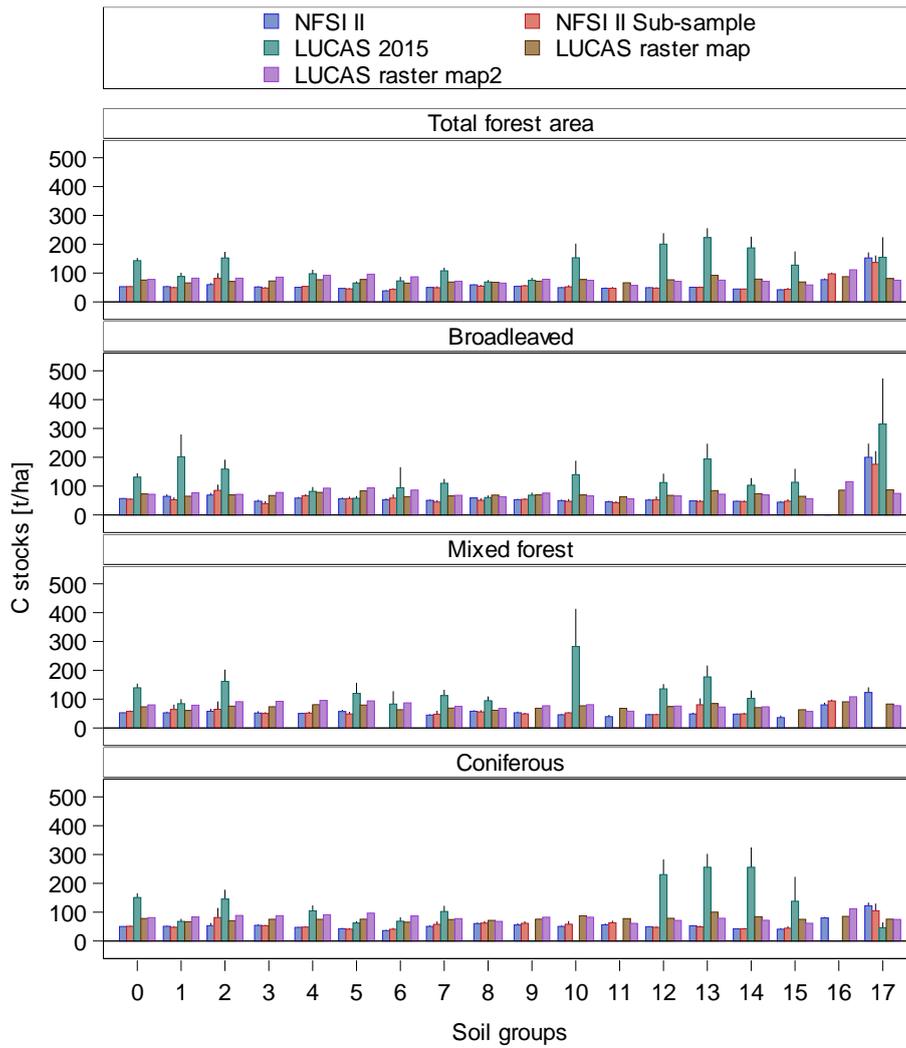


Figure 12: Carbon stocks at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

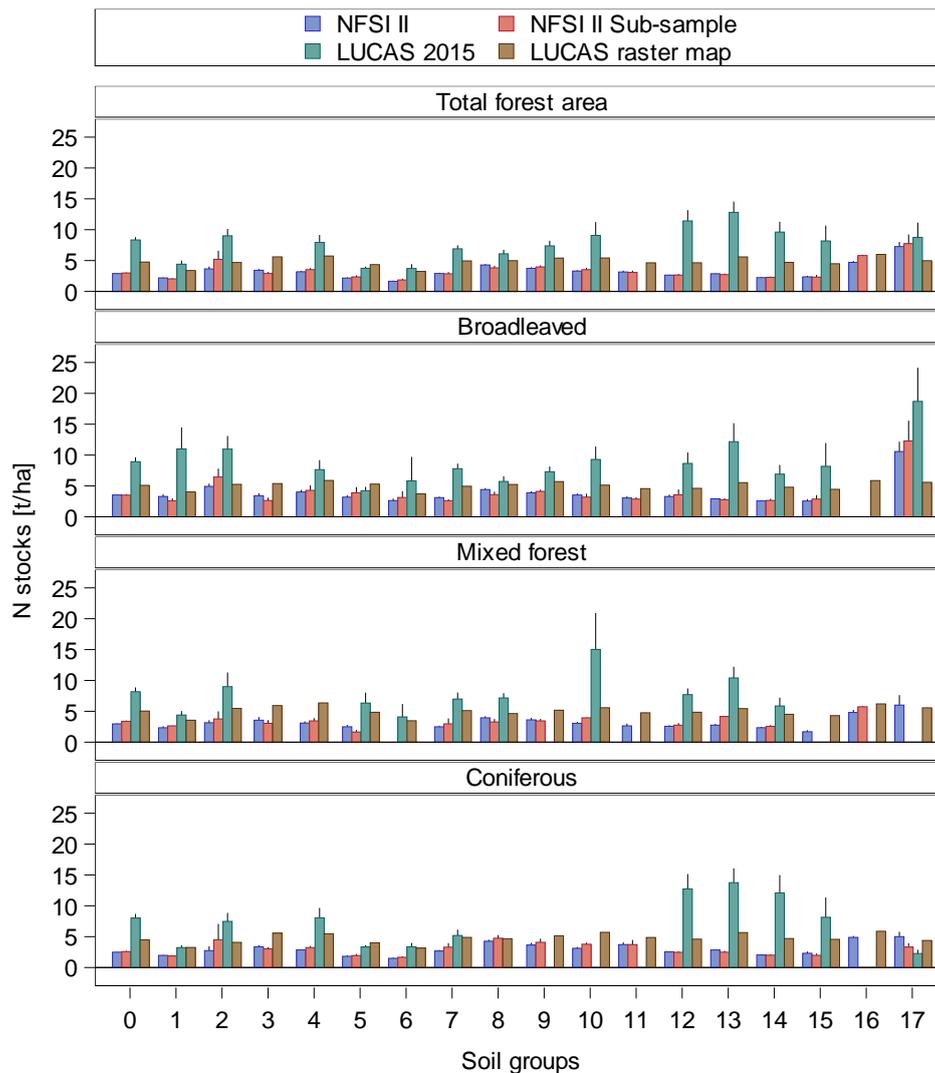


Figure 13: Nitrogen stocks at 0-20 cm depth of the mineral soil for different forest stands and soil groups based on the soil inventories Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.3.8 Depth distribution of carbon and nitrogen concentrations

Soil data of the organic layer as well as of the various depth increments is only available for the NFSI II. Lucas 2015 contribute soil data exclusively for the mineral soil depth increment 0-20 cm. The C concentration of the organic layer for the total forest area is on average $374.6 \pm 1.8 \text{ mg g}^{-1}$ (Figure 14). The C concentration of LUCAS 2015 for the mineral soil down to 0-20 cm is $66.1 \pm 4.5 \text{ mg g}^{-1}$, which is higher compared to the depth of 0-5 cm ($65.8 \pm 1.0 \text{ mg g}^{-1}$) and significantly higher for the depth of 5-10 cm ($37.6 \pm 0.8 \text{ mg g}^{-1}$). The depth increments below 10 cm reveal decreasing C concentrations from 22.0 ± 0.8 to $10.7 \pm 0.8 \text{ mg g}^{-1}$ and $6.7 \pm 0.8 \text{ mg g}^{-1}$, respectively. In all soil groups, the C concentrations of LUCAS 2015 exceeded the values of the NFSI II below 10 cm.

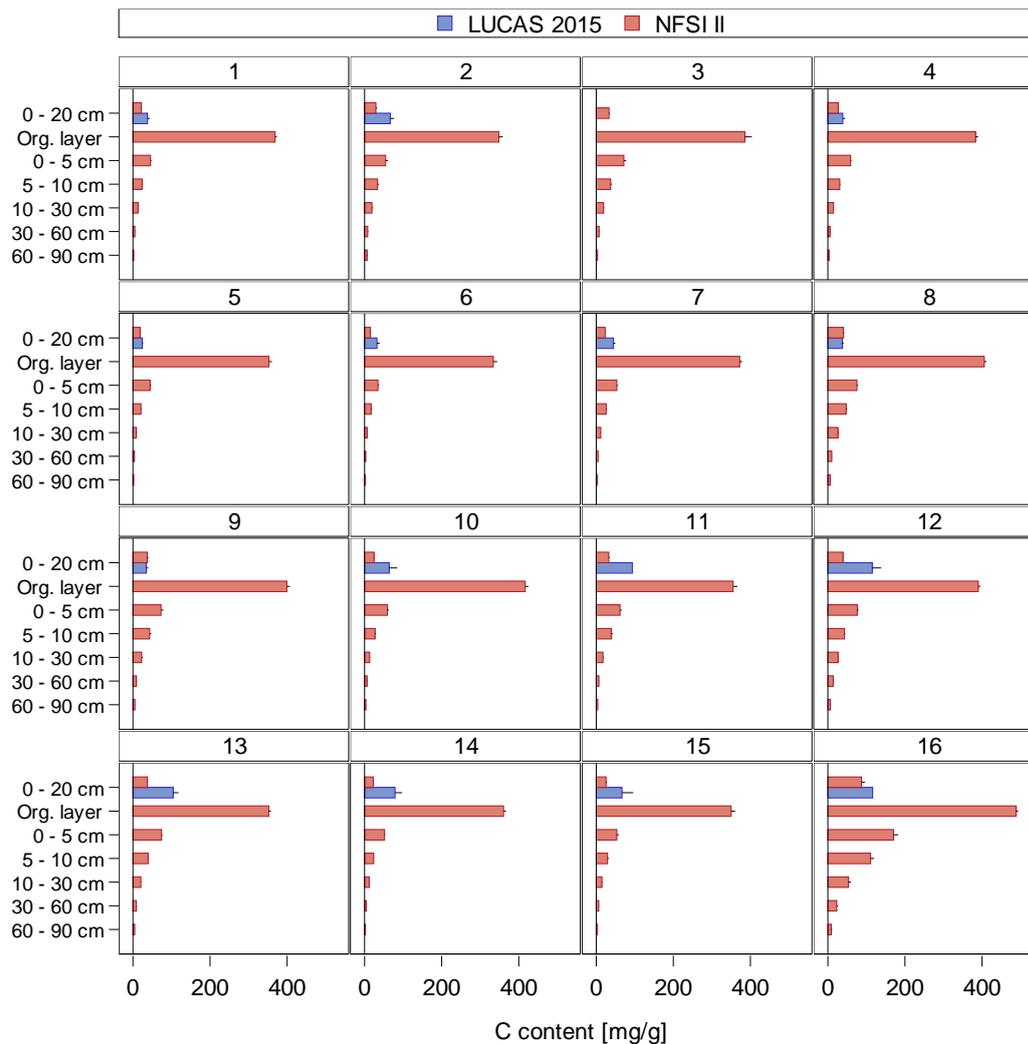


Figure 14: Depth distribution of the C concentrations for soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

Taking the N concentrations of the NFSI II into account, the organic layer of the total forest area showed higher values ($15.00 \pm 0.08 \text{ mg g}^{-1}$) compared to the mineral soil depth increments (Figure 15). The mean N concentration of LUCAS 2015 for the 0-20 cm depth increment was $3.87 \pm 0.22 \text{ mg g}^{-1}$ and thus exceeds significantly the 0-5 cm depth increments of NFSI II ($3.47 \pm 0.05 \text{ mg g}^{-1}$). LUCAS 2015 shows higher N concentrations, especially in the soil groups 10 to 15. At the depth level 5-10 cm, the N concentrations exceeded the values in all soil groups compared to the NFSI II. The N concentrations decrease continuously with depth ranging from $1.25 \pm 0.04 \text{ mg g}^{-1}$ in 10-30 cm to $0.68 \pm 0.03 \text{ mg g}^{-1}$ in 30-60 cm. Numerous analytical results for N concentrations below 60 cm of the mineral soil range below the detection limit and thus, the results for that depths increment are not representative for Germany.

B.3.9 Depth distribution of carbon and nitrogen stocks

The mean C stocks of the mineral soil down to 20 cm depth for the total forest area calculated from LUCAS 2015 and Ballabio et al. (2016) amounts to $143.1 \pm 0.7 \text{ t ha}^{-1}$ (Figure 16). Taking the NFSI II into account, the entire soil profile (organic layer and the mineral soil down to 90 cm) store $127.1 \pm 1.7 \text{ t C ha}^{-1}$. Carbon stocks based on LUCAS 2015 are higher in soils from solid rocks of mountains and hills compared to soils in undulating lowlands and hilly areas. In contrast, the mineral soil down to 20 cm based on the NFSI II store $52.8 \pm 0.7 \text{ t C ha}^{-1}$, which amounts to a proportion of 42 % stored in the entire soil profile. The C stored in the mineral soil down to 30 cm is $69.8 \pm 1.0 \text{ t C ha}^{-1}$, contributing 55 % of the C stored in the entire soil profile. The proportion of C stored in the organic layer compared to the mineral soil down to 90 cm is higher in soils lower in base saturation than in base-rich soils. Taking the entire soil profile into account, the C stored in the organic layer is 16 %, while 29 % of C is stored below 30 cm.

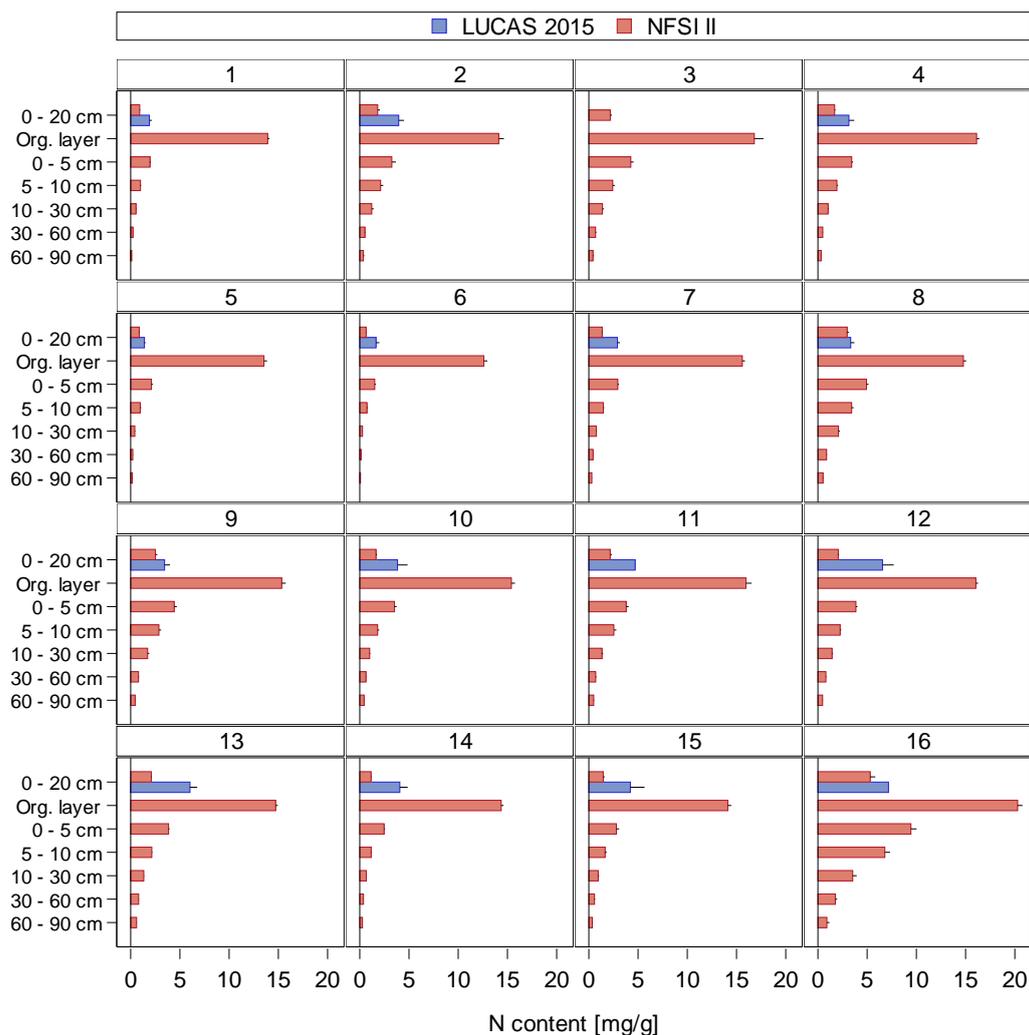


Figure 15: Depth distribution of N concentrations for soil groups based on the soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

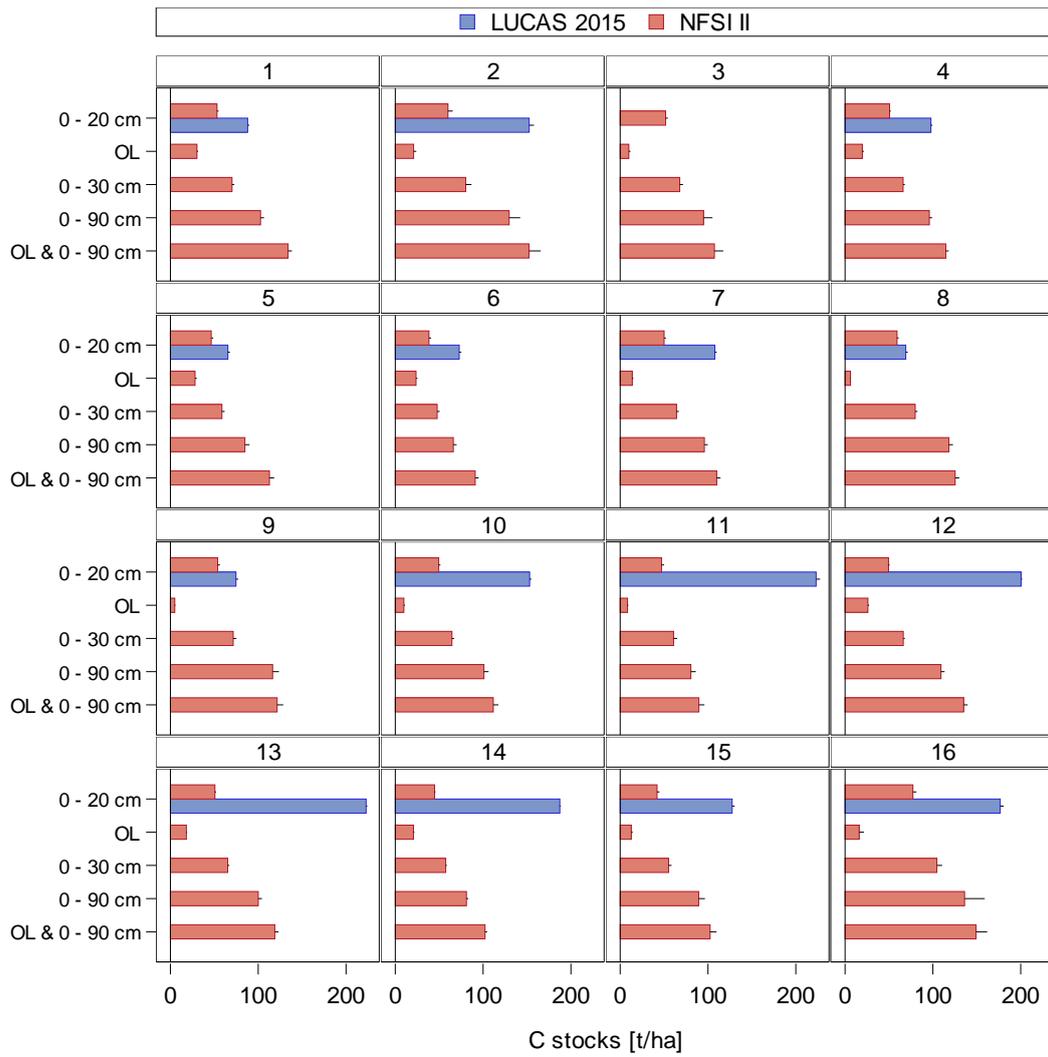


Figure 16: Depth distribution of C stocks for soil groups based on the considered soil inventories. Black bars = standard error, *Numbered soil groups see table 1

B.4 Discussion

The aim of the present study was to compare critically and under the aspect of representativeness the organic C and N concentrations, organic C stocks and pH values sampled and measured by the LUCAS soil inventory 2015 (Jones et al., 2020) and the German NFSI II. The comparison of the soil chemical parameters showed clear differences between the inventories. LUCAS 2015 showed a lower pH(H₂O) than the NFSI II, while the pH measured in CaCl₂ solution differed not significantly between the inventories. This can be attributed to the mathematical effect, that at low pH(CaCl₂), equal differences in proton concentrations result in smaller differences in logarithmized values than at higher pH(H₂O). The comparison of the C concentrations showed almost twice as high values for LUCAS 2015 as for the NFSI II, which also was found for the N concentrations. On the other hand, C/N ratios were significantly lower for LUCAS 2015 than for the NFSI II. In comparison to the C concentrations, the calculated C stocks and N concentrations of LUCAS 2015 deviate even more from the NFSI II. Dry bulk densities were derived from maps due to the lack of measured data from the LUCAS 2015. Both the dry bulk density and the C and N concentrations of the LUCAS 2015 was higher compared to the data derived from the German NFSI II. Therefore, their combination resulted in significant higher C and N stored in the upper 20 cm of the mineral soil. On the other hand, differences of the stored C and N were somewhat less pronounced between the NFSI II and the data based on the published LUCAS raster data. This turns out the difficulties of map derived information on dry bulk density compared to measured data. In contrast to the German NFSI II, where volume-based sampling of the organic layer and the mineral soil was conducted for almost all plots, bulk densities of LUCAS were derived exclusively from bulk density maps. Furthermore, fine earth stocks estimated from map derived bulk densities could result in highly uncertain and overestimated C stocks change rates.

Significantly higher C and N concentrations can be attributed to an insufficient separation of the organic layer from the mineral soil during the sampling conducted by LUCAS 2015. According to the LUCAS 2015 soil sampling manual, the organic layer should be removed with a spade and discarded. The exact separation of the compartments is essential for both analysis of the sample material and for the interpretation of the results. If the separation is not practiced carefully, residues of the organic layer can contaminate the mineral soil sample and cause significant higher C concentrations. The soil sampling manual of the NFSI II contribute detailed information in separating material of the organic layer from the mineral soil surface. Since the organic layer was collected individually, the samplers become more intensively involved in the sampling procedure. Problems in soil sampling encountered due to the removal of the organic layer are discussed by Panagos et al. (2020) as a reason for high uncertainties in C stocks derived by LUCAS 2015.

The distribution analysis of the sampled forest plots of the LUCAS 2015 showed a lack of representativeness. In contrast to central Germany, in the northern and southern parts of Germany an insufficient number of plots were sampled in relation to the forest area. It was shown that more than 25 % of all sampled forest plots were distributed over Brandenburgia and Berlin but less than 5 % over Bavaria, although the proportion to the Germany's forest area of Brandenburgia and Berlin is 10 % and Bavaria is 23 %. Taking the total LUCAS inventory into account, the sampled plots showed a similar proportion of the covered forest area compared to Germany's Third National Forest Inventory.

Another aspect of representativeness concerned the NFSI II sub-samples. The selection of 25 % of the NFSI II plots resulted in an insufficient coverage of various soil groups. Hence, the soil groups would need to be classified into groups without considering the essential soil chemical and physical properties as well as the geographical distribution. Moreover, Germany's soil diversity was not sufficiently represented. Furthermore, the associated units of the National Soil Maps resulted in difficulties by class matching and by an area-weighted extrapolation. Further implication raised from the comparison of the NFSI II total sample with the NFSI II sub-sample, which revealed significant differences for almost all soil chemical parameter within the individual soil groups. This was particularly applicable for the pH values of the soil groups 5 and 8, for the C and N concentration of the soil groups 16 and for the C/N ratio of the soil groups 5 and 15. The

reduction of the sampling plots results in an increase of the uncertainty indicated by the standard errors for the C concentration, which was twice as high for the NFSI II sub-sample than for the NFSI I. A larger variation of soil parameter may constrain the detection of differences between the inventories. Thus, the detection and interpretation of changes in soil conditions could be more difficult in respect to the comparison of soil data from different inventories.

Soil inventory data are of increasing importance in greenhouse gas reporting, accounting for the land use, land use change and forestry sector. In respect to changes in C stored in soils, both soil horizons and sampling depth play an important role for the representativeness. According to the requirements for greenhouse gas reporting, the organic layer must be recorded (IPCC, 2003). The analysis of the NFSI II revealed that the organic layer comprises 16 % of the C stored in the entire soil profile (organic layer and the mineral soil down to 90 cm). Changes in C stored in the organic layer is vulnerable to impacts of climate and other environmental and anthropogenic variables. Nevertheless, the organic layer was not sampled in the LUCAS inventory. Due to the LUCAS 2015 mineral soil sampling depth down to 20 cm of the, only 42 % of C stored was detected in the entire soil profile. Taking the organic layer and the upper 30 cm of the mineral soil into account, which is used in the German greenhouse gas reporting (Stümer et al., 2019), the results based on the NFSI II showed that 71 % of the C was stored in the entire soil profile. Therefore, data based on LUCAS 2015 reveal a lower vertical representativeness due to the lack of a sampled organic layer and the limitation to the sampling depth of 20 cm.

The results of the of representativity analysis show that a data comparison of LUCAS 2015 with the German NFSI II is associated with large uncertainties and discrepancies. This concerns both the comparisons of the C and N concentrations and the estimated C and N stocks. Consequently, the union of the data sets considered in this study will increase the uncertainties instead of reducing them.

B.5 Conclusions

The aim of the analysis was to compare soil parameters measured in both the LUCAS 2015 soil inventory and in the 2nd German National Forest Soil Inventory. The comparison revealed clear systematic differences between LUCAS 2015 and the German NFSI II. The detected concentrations of C and N are higher based on the LUCAS inventory probably due to the contamination of the mineral soil sample with residues of the organic layer which was not sampled. Moreover, bulk density was derived from soil maps instead of data derived from a volume-based sampling. Therefore, the map derived bulk density was 19 % higher than the values based on the German NFSI II which increase the uncertainty of stock estimations. The different approach of LUCAS in collecting soil samples and the estimation of bulk density based on soil maps are sources of uncertainties. Furthermore, it was shown that the sampling of forest soils in the LUCAS inventory was not evenly distributed over Germany. Large parts of the forest in southern and northern Germany are clearly underrepresented in the LUCAS soil sample, while other parts are overrepresented.

Beside the uncertainties due to the smaller sampling size and the associated problems in class matching there are three main problems in respect to LUCAS 2015, which are (i) the insufficient representativeness for some German forest areas, (ii) the higher C and N concentrations compared to the German NFSI II, and (III) the lack of a volume-based sampling. The results illustrate that the combination of both inventories is problematic and that greater synergy effects cannot be achieved. The quality of a combined data set would be afflicted by systematic errors. Therefore, it is recommended to use the dataset of the German NFSI II. An extensive monitoring program with a sufficient representativeness for the German forest area was established with the NFSI II. The monitoring program is characterized by including the soil heterogeneity through sampling at 8 satellites around the central soil pit, by sampling various depth increments, by a greater sampling depth, by a volume-based sampling as well as by a detailed designation of the soil profile. Additionally, information is available for many physical and chemical soil parameters, forest stand and vegetation and further environmental and anthropogenic factors affecting soil conditions.

Literaturverzeichnis/List of references

- Ballabio C., Panagos P., Montanarella L. (2016) Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, 110-123. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.07.006
- Ballabio C., Lugato E., Fernández-Ugalde O., Orgiazzi A., Jones A., Borrelli P., Montanarella L., Panos Panagos P. (2019) Mapping LUCAS topsoil chemical properties at European scale using Gaussian process regression. *Geoderma* 355, 113912- DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113912
- BGR (1998) Soil Map of the Federal Republic of Germany 1:1,000,000 (B€UK 1000° N). Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover
- de Broginiez D., Ballabio C., Stevens A., Jones R.J.A., Montanarella L., van Wesemael B. (2015) A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model *European Journal of Soil Science* 66, 121–134. DOI: 10.1111/ejss.12193
- FAO UNESCO ISRIC (1990) Soil Map of the World. Revised Legend. Soil Ressources Report 60. Rome.
- Fernández-Ugalde O., Orgiazzi A., Jones A., Lugato E., Panagos P. (2018) LUCAS 2018 –Soil Component: Sampling Instructions for Surveyors, EUR 28501EN, doi 10.2760/023673
- GAFa (2006) Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich, Gutachterausschuss Forstliche Analytik. Federal Ministry of Food and Agriculture, Berlin
- Grüneberg E., Ziche D., Wellbrock N. (2014) Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology* 20, 2644–2662. DOI: 10.1111/gcb.12558
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, vi + 307 S. ISBN 4-88788-003-0
- Jones A., Fernandez-Ugalde O., Scarpa S. (2020) LUCAS 2015 Topsoil Survey. Presentation of dataset and results, EUR 30332 EN, Publications Office of the European Union: Luxembourg. ISBN 978-92-76-21080-1, JRC121325, DOI: 10.2760/616084
- Jones R.J.A., Spoor G., Thomasson A.J. (2003) Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis, *Soil and Tillage Research*, 73, 131-143. DOI: 10.1016/S0167-1987(03)00106-5
- Panagos P., Ballabio C., Scarpa S., Borrelli P., Lugato E., Montanarella L. (2020) Soil related indicators to support agro-environmental policies, EUR 30090 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-15644-4, DOI:10.2760/011194
- Stümer W., Dunger K., Riedel T., Ziche D., Grüneberg E., Wellbrock N. et. al. (2019) Chapter 6.4: Forest land (4.A). *Climate Change 2019/24*, 582-618
- Van Ranst E., Thomasson A.J., Daroussin J., Hollis J.M., Jones R.J.A., Jamagne M. et al. (1995) Elaboration of an extended knowledge database to interpret the 1:1,000,000 EU Soil Map for environmental purposes. In: King D., Jones R.J.A. & Thomasson A.J. (Eds.) *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*, EUR 16232 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp.71-84
- Wellbrock N., Aydin C.-T., Block J., Bussian B., Deckert M., Diekmann O. et al. (2006) Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Federal Ministry of Consumer Protection, Nutrition and Agriculture, Berlin
- Wellbrock N., Ahrends B., Bögelein R., Bolte A., Eickenscheidt N., Grüneberg E. et al. (2019) Concept and Methodology of the National Forest Soil Inventory. In *Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, 1st ed.; Wellbrock N., Bolte A. (Eds.) Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. ISBN 978-3-030-15734-0
- Yigini Y., Panagos P. (2016) Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe *Science of the Total Environment* 557–558, 838–850. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.085

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

1 - 75	siehe http://www.thuenen.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/
76	Mirko Liesebach (ed.) Forstpflanzenzüchtung für die Praxis, 6. Tagung der Sektion Forstgenetik/Forstpflanzenzüchtung vom 16. bis 18. September 2019 in Dresden, Tagungsband
77	Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2018 Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2018
78	Alexandra Purkus, Jan Lüdtko, Dominik Jochem, Sebastian Rüter, Holger Weimar Entwicklung der Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland: Eine Innovationssystemanalyse im Kontext der Evaluation der Charta für Holz 2.0
79	Peter Elsasser, Kerstin Altenbrunn, Margret Köthke, Martin Lorenz, Jürgen Meyerhoff Regionalisierte Bewertung der Waldleistungen in Deutschland
80	Lutz Laschewski, Andreas Tietz Auswirkungen überregional aktiver Investoren in der Landwirtschaft auf ländliche Räume : Ergebnisse aus zwei Fallstudien
81	Martin Ohlmeyer, Friederike Mennicke, Saskia Poth Erarbeiten eines objektiven Verfahrens unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen bei der Bewertung ihres Einflusses auf die Innenraumluftqualität (HolnRaLu), TV 1: Untersuchungen unter realen Raumluftbedingungen
82	Marlen Haß, Martin Banse, Claus Deblitz, Florian Freund, Inna Geibel, Alexander Gocht, Peter Kreins, Verena Laquai, Frank Offermann, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Jörg Rieger, Claus Rösemann, Petra Salamon, Maximilian Zinnbauer, Max-Emanuel Zirngibl Thünen-Baseline 2020 – 2030: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland
83	Marc Simon Weltersbach, Carsten Riepe, Wolf-Christian Lewin, Harry V. Strehlow Ökologische, soziale und ökonomische Dimensionen des Meeresangelns in Deutschland
84	Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Cora Vos, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2019 Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2019
85	Andreas Tietz, Richard Neumann, Steffen Volkenand Untersuchung der Eigentumsstrukturen von Landwirtschaftsfläche in Deutschland
86	Katja Butter, Martin Ohlmeyer Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen von Holz und Holzwerkstoffen
87	Kim Pollermann Regional Governance: Begriffe, Wirkungszusammenhänge und Evaluationsansätze



- 88 Gerold Rahmann, Frédéric Rey, Reza Ardakani, Khalid Azim, Véronique Chable, Felix Heckendorn, Paola Migliorini, Bram Moeskops, Daniel Neuhoff, Ewa Rembiałkowska, Jessica Shade, Marc Tchamitchian (eds.)
From its roots, organic inspires science, and vice versa. Book of Abstracts of the Science Forum at the Organic World Congress 2021, September 8-10, 2021. Rennes, France
- 89 Walter Dirksmeyer, Klaus Menrad (eds.)
Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie : Digitalisierung und Automatisierung - Welche Chancen und Herausforderungen ergeben sich für den Gartenbau? Tagungsband zum 3. Symposium für Ökonomie im Gartenbau am 15. November 2019 in Freising / Weihenstephan
- 90 Tobias Mettenberger, Patrick Küpper
Innovative Versorgungslösungen in ländlichen Regionen: Ergebnisse der Begleitforschung zum Modellvorhaben Land(auf)Schwung im Handlungsfeld „Daseinsvorsorge“ : Band 1 der Begleitforschung Land(auf)Schwung
- 91 Cora Vos, Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß
**Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020
Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2020**
- 92 Kurt-Jürgen Hülsbergen, Harald Schmid, Hans Marten Paulsen (eds)
Steigerung der Ressourceneffizienz durch gesamtbetriebliche Optimierung der Pflanzen- und Milchproduktion unter Einbindung von Tierwohlaspekten – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben
- 93 Heike Peter, Cornelia Toppel, Annett Steinführer
Wohnstandortentscheidungen in einer wohnbiographischen Perspektive : Eine explorative Studie in ländlichen und großstädtischen Kontexten
- 94 Daniel Ziche, Erik Grüneberg, Winfried Riek, Nicole Wellbrock
Comparison of the LUCAS 2015 inventory with the second National Forest Soil Inventory : Comparability and representativeness of two soil inventories conducted in Germany



Thünen Report 94

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

www.thuenen.de

ISBN 978-3-86576-239-9



9 783865 762399