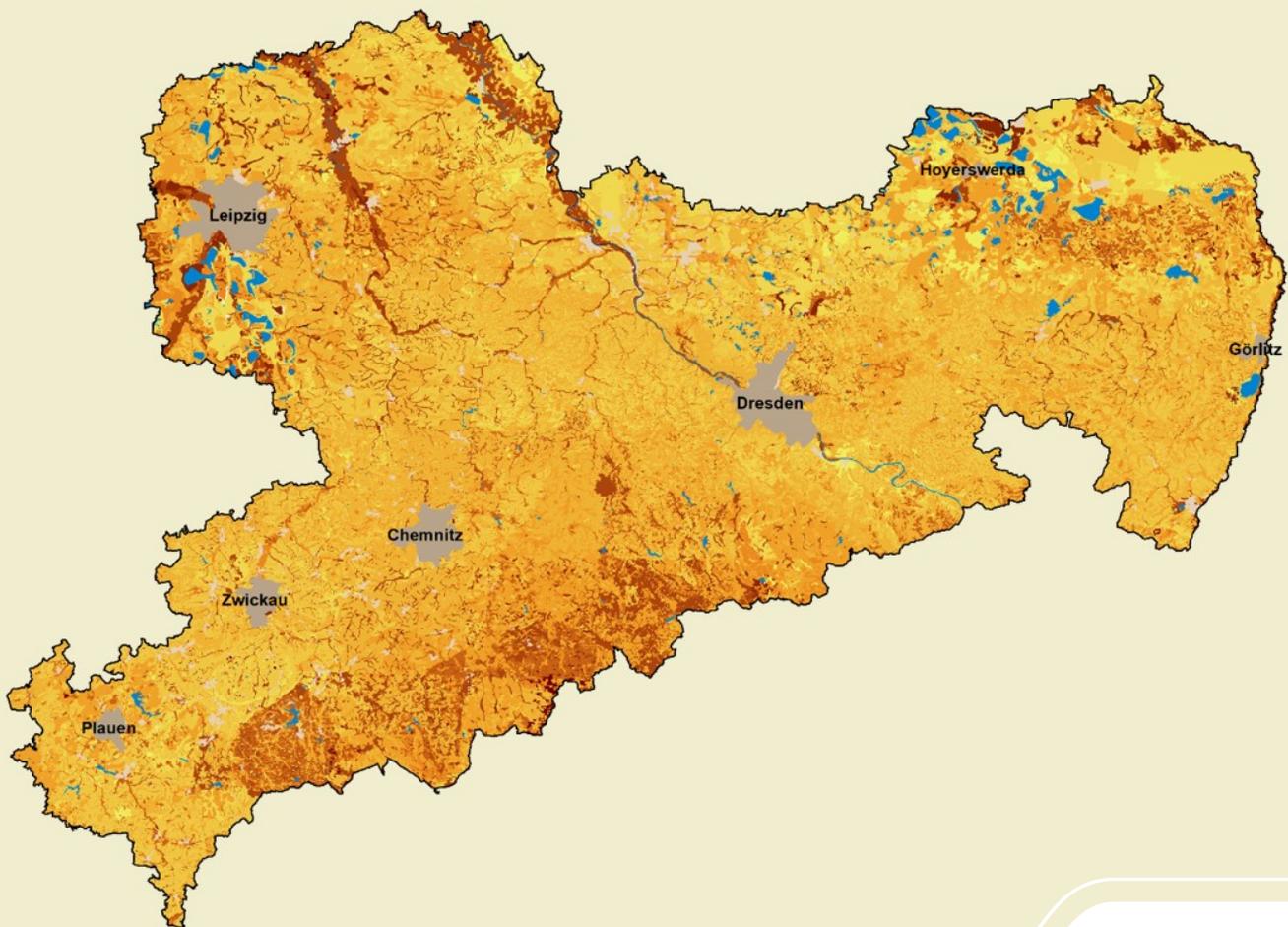


Kohlenstoffvorräte der Böden in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 13/2025



Wissenschaftliche Studie zur Vorbereitung eines
Monitorings der Kohlenstoffspeicherung der
Böden relevanter Landnutzungssysteme in Sach-
sen und ihrer flächenhaften Darstellung
(Vorstudie C-Monitoring)

Los 2:

Landesweite Abschätzung und Darstellung der
C-Vorräte

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	12
1 Einleitung.....	13
1.1 Ausgangslage des Vorhabens	13
1.2 Ziel- und Aufgabenstellung	14
2 Einbezogene Daten	15
3 Allgemeine Methodik der Vorratsberechnung	19
4 Datenaufbereitung / Herleitung Berechnungsparameter.....	22
4.1 Wahl des methodischen Ansatzes	22
4.2 Ableitung und Ergänzung der Trockenrohddichte	22
4.2.1 Trockenrohddichte nach HOLLIS et al. (2012)	23
4.2.2 Trockenrohddichte nach RENGER et al. (2009)	24
4.2.3 Vergleich der Ansätze.....	26
4.3 Herleitung des Skelettvolumens	31
4.4 Zusammenstellung des Datenbestandes zur Vorratsberechnung	32
5 Ableitung der Kohlenstoffvorräte Sachsens.....	36
5.1 Erste Abschätzung der C-Vorräte auf Basis der Leitprofile der BK50	36
5.2 Übertragung der Vorratsergebnisse auf die Polygone der BK50	41
5.3 Kohlenstoffvorräte in den Böden Sachsens.....	46
5.4 Kohlenstoffvorräte in den Torfen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte (SIMON).....	47
5.5 Kohlenstoffvorräte in den organischen Auflagehorizonten	52
5.6 Gesamt-Kohlenstoffvorräte Sachsens	54
6 Bilanzierungen	55
6.1 Kohlenstoffvorräte auf Basis bodensystematischer Einheiten	55
6.2 Kohlenstoffvorräte nach Nutzungsart	58
6.3 Kohlenstoffvorräte in den Bodenregionen und Bodenlandschaften Sachsens	71
7 Kohlenstoffgehalt in den Oberböden Sachsens	76
8 Statistische Auswertung	79
8.1 Statistische Auswertung der C _{org} -Gehalte im Oberboden.....	80
8.1.1 Höhenlage und Bodennutzung	80
8.1.2 Bodentyp Braunerde	84
8.1.3 Jahresniederschläge.....	88
8.2 Statistische Auswertung der C-Vorratsberechnungen (ohne org. Auflagen).....	89

8.2.1	Bodennutzung	89
8.2.2	Höhenlage und klimatische Einflussfaktoren	95
9	Vergleich mit Daten anderer Bundesländer	99
10	Abschätzung des Untersuchungsbedarfs	104
11	Vorstudie zur Erfassung von Bodenkohlenstoff mittels Satellitendaten	109
12	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	119
12.1	Zusammenfassung	119
12.2	Schlussfolgerungen und Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	124
A 1	Tabelle Zusammenstellung der Vorgehensweise einzelner Bundesländer und Institutionen zur Abschätzung der C-Vorräte.....	128
A 2	Zusammenfassung der Ansätze ausgewählter Bundesländer	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Profilstandorte mit Kohlenstoffanalysen im Oberboden (Standorte mit Nutzungsbezug).....	16
Abbildung 2: Profilstandorte mit vollständig vorliegenden Analysen (Standorte mit Nutzungsbezug).....	18
Abbildung 3: Auszug aus der Tabelle zur Ableitung der effektiven Lagerungsdichte über das Horizontsymbol (BUG et al. 2020).	25
Abbildung 4: KA6 Teil B: Nomogramm zur Ermittlung der Klassen für die effektive Lagerungsdichte in Abhängigkeit von der Bodenart (RENGER et al. 2009)	25
Abbildung 5: Darstellung der Korrelation zwischen analytisch bestimmten und nach der Methode von HOLLIS et al. (2012) berechneten Trockenrohdichten.	27
Abbildung 6: Darstellung der Korrelation zwischen analytisch bestimmten und nach der Methode von RENGER et al. (2009) berechneten Trockenrohdichten.	27
Abbildung 7: Anteil der Profile im grünen, gelben und roten Bereich vergleichend für die Berechnung der TRD bzw. C-Vorräte nach HOLLIS et al. (2012) und RENGER et al. (2009) für die Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm.	29
Abbildung 8: Auszug aus der Referenzliste zur Zuordnung des Skelettvolumens.	32
Abbildung 9: Profilstandorte mit Vorratsberechnungen (n = 3.793).	35
Abbildung 10: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 0-30 cm.	38
Abbildung 11: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 30- 100 cm.....	39
Abbildung 12: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm.	40
Abbildung 13: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-30 cm.	43
Abbildung 14: Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 30-100 cm.....	44
Abbildung 15: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm.	45
Abbildung 16: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha der Moor- und Torfverbreitungsflächen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte (SIMON).....	51

Abbildung 17: Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm (inkl. Auflagehorizonte).....	53
Abbildung 18: Karte mit der räumlichen Verteilung der Hauptlandnutzungen.	59
Abbildung 19: Mittlere flächengewichtete C-Vorräte nach einer Nutzungsdifferenzierung in den Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und der Auflage für die Nutzung Wald.....	63
Abbildung 20: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Ackernutzung – Tiefenstufe 0-100 cm.	66
Abbildung 21: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Grünlandnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm.	67
Abbildung 22: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Waldnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm (ohne Auflagehorizonte).	68
Abbildung 23: C-Vorräte der Böden Sachsens sonstige Nutzungen – Tiefenstufe 0-100 cm.	69
Abbildung 24: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Waldnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm (inkl. Auflagehorizonte).....	70
Abbildung 25: Überblick über die sächsischen Bodenregionen. Die Bodenregionen bestehen aus unterschiedlichen Bodenlandschaften.	71
Abbildung 26: C _{org} -Gehalte im Oberboden sächsischer Böden – Punktdarstellung (ohne org. Auflagen).	76
Abbildung 27: Mittlere C _{org} -Gehalte im Oberboden sächsischer Böden – Flächendarstellung (ohne org. Auflagen).	78
Abbildung 28: Streudiagramm von C _{org} und Höhe für alle Aufschlüsse.	81
Abbildung 29: Verteilung der C _{org} -Werte des Oberbodens für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung.....	82
Abbildung 30: Streudiagramm von C _{org} (Oberboden) und Höhe für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung „Acker“.	83
Abbildung 31: Verteilung der C _{org} -Werte im Oberboden für alle Aufschlüsse des Bodentyps Braunerde (inkl. Subtypen & Varietäten) differenziert nach Nutzung.	84
Abbildung 32: Streudiagramm von C _{org} -Gehalt im Oberboden und Höhe für den Bodentyp Braunerde und die Nutzung Acker.	86
Abbildung 33: Einteilung der C _{org} -Gehalte im Oberboden in die standortbezogenen Niederschlagsstufen und Darstellung in Boxplots.	88
Abbildung 34: Mittlere C-Vorräte in den Tiefenstufen 0-30 cm und 30-100 cm nach Nutzung ohne Berücksichtigung der organischen Auflagen unter Wald.....	89
Abbildung 35: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung für die Tiefenstufe 0-30 cm.....	91
Abbildung 36: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung für die Tiefenstufe 0-100 cm.....	92

Abbildung 37: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) nach Bodentypen (inkl. Subtypen & Varietäten) in der Tiefenstufe 0-30 cm.....	93
Abbildung 38: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) nach Bodentypen (inkl. Subtypen & Varietäten) in der Tiefenstufe 0- 100 cm.....	93
Abbildung 39: Streudiagramm von C-Vorrat und Höhe für die Nutzung Acker.....	96
Abbildung 40: Streudiagramm von C-Vorrat und Höhe für den Bodentyp Braunerde und die Nutzung Acker.	97
Abbildung 41: Anzahl vollständiger Vorratsprofile je Legendeneinheit der BK50.....	105
Abbildung 42: Schätzgüte C-Vorräte (Krige-Varianz) Tiefenstufe 0- 100 cm.....	106
Abbildung 43: Schätzgüte C-Vorräte (Krige-Varianz) Tiefenstufe 0-100 cm mit Standorten vorliegender Vorratsberechnungen.	107
Abbildung 44: Schätzgüte C _{org} -Gehalte im Oberboden (Krige-Varianz).....	108
Abbildung 45: Prognostizierte C _{org} -Gehalte der Tiefenstufe 0-30 cm (Modellbildung SEQANA).	112
Abbildung 46: Prognostizierte Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm (Modellbildung SEQANA, ohne org. Auflagen).....	114
Abbildung 47: Prognostizierte C _{org} -Gehalte und C-Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm im Umfeld von Rübenau (Modellbildung SEQANA – Vergleich G.E.O.S.)	116
Abbildung 48: Prognostizierte C _{org} -Gehalte der Tiefenstufe 0-30 cm im Umfeld von Grillenburg (Tharandter Wald) (Modellbildung SEQANA)	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl vorliegender Profile mit Kohlenstoffanalysen bezogen auf die Hauptnutzungstypen.	16
Tabelle 2:	Anzahl vorliegender Profile mit Kohlenstoffanalysen, Trockenrohdichten und Skelettgehalten (SKV = Skelettvolumen).	17
Tabelle 3:	Klassifizierung der C-Vorräte in Analogie zu WALDMANN und WEINZIERL (2015).....	21
Tabelle 4:	Pedotransferfunktionen nach HOLLIS et al. (2012) zur Ableitung der Trockenrohdichte (TRD).	24
Tabelle 5:	Anzahl an Profilen die nach den beiden Berechnungsmethoden in den jeweiligen Bereichen liegen.	28
Tabelle 6:	Zusammenfassung und Vergleich der beiden zur Berechnung der Trockenroh-dichte genutzten Methoden.	30
Tabelle 7:	Bodenprofile für Vorratsberechnungen und Einteilung in Qualitätsstufen.	34
Tabelle 8:	Zuordnung Humusstufen und TRD-Stufen der Generallegende BK50.	37
Tabelle 9:	Berechnete C-Vorräte sächsischer Böden (ohne org. Auflagen unter Wald) in den Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm.	46
Tabelle 10:	C-Vorratsberechnung für die Flächen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte (SIMON).....	49
Tabelle 11:	Kohlenstoffvorräte nach Bodenwasserhaushalt (Einteilung in Bodenabteilungen).	55
Tabelle 12:	Zusammenstellung der Kohlenstoffvorräte der Legendeneinheiten der BK50 anhand des dominierenden Bodentyps.	57
Tabelle 13:	Genutzte Zuordnung der CLC-Klassen.....	60
Tabelle 14:	Vergleich der Ergebnisse der Verschneidung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen).....	61
Tabelle 15:	Kohlenstoffvorräte differenziert nach Nutzung für Sachsen (Grundlage BK50, Nutzung von Sachsenforst und InVeKoS Daten).	62
Tabelle 16:	Flächengewichteter mittlerer C-Vorrat der jeweiligen Nutzungsart und Tiefenstufe.	64
Tabelle 17:	Kohlenstoffgehalte der Bodenregionen in Sachsen. Die Bodenregion mit dem höchsten und niedrigsten C-Vorrat (ohne org. Auflagen) in t/ha ist jeweils markiert (grün: höchster C-Vorrat; rot: niedrigster C-Vorrat).....	72
Tabelle 18:	Kohlenstoffvorräte der sächsischen Bodenlandschaften. Die Bodenlandschaft mit dem höchsten und niedrigsten C-Vorrat (ohne org. Auflagen) in t/ha ist jeweils markiert (grün: höchster C-Vorrat; rot: niedrigster C-Vorrat).	73
Tabelle 19:	Statistische Kennwerte der C_{org} -Werte des Oberbodens für unterschiedliche Hauptnutzungstypen (alle Punktdaten).	82

Tabelle 20:	Statistische Kennwerte der C_{org} -Werte im Oberboden für den Bodentyp Braunerde und die unterschiedlichen Hauptnutzungstypen.	85
Tabelle 21:	Ergebnisse der Korrelationsanalysen des C_{org} -Gehaltes des Oberbodens für den Bodentyp Braunerde (BB) und die Nutzungen Acker (n = 1.239) und Grünland (n = 796).	87
Tabelle 22:	Zusammenstellung des mittleren C-Vorrates der Bodenprofile ohne Berücksichtigung der organischen Auflagen unter Wald.	90
Tabelle 23:	Zusammenstellung der mittleren C-Vorräte (ohne org. Auflagen) der Aufschlüsse für unterschiedliche Nutzungen, Tiefenstufen und Bodentypen (grau hinterlegt < 20 Datenpunkte).	94
Tabelle 24:	Ergebnisse der Korrelationsanalysen des C-Vorrates der Tiefenstufe 0-30 cm für den Bodentyp Braunerde (BB) und die Nutzungen Acker (n = 377) und Grünland (n = 167).....	98
Tabelle 25:	Vergleich von Daten zum Kohlenstoffvorrat (i.d.R. ohne org. Auflagen) für unterschiedliche Bundesländer (Auswahl). Zusammenstellung erfolgte in Anlehnung an WIESNER und SAUER 2021.	100
Tabelle 26:	C-Vorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm (ohne org. Auflage) im Ländervergleich.	102
Tabelle 27:	C-Vorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm im Ländervergleich, Werte bezogen auf einheitliche Fläche von 1.000.000 ha.	103
Tabelle 28:	Für die Modellbildungen von SEQANA genutzte Eingangsdaten (Ausreißer wurden vorher entfernt, org. Auflagen unter Wald nicht berücksichtigt).	110
Tabelle 29:	Vorhergesagte C_{org} -Gehalte für die Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm für Sachsen (Modellbildung nur mit Ackerland & Grünland-Standorten).	110
Tabelle 30:	Vorhergesagte C-Vorräte für die Tiefenstufe 0-30 cm für Sachsen mit dem erstellten Modell von SEQANA und Vergleich mit den in diesem Bericht ermittelten Werten.	113

Tabellenverzeichnis im Anhang

Tabelle A 1:	Zusammenstellung der Vorgehensweise einzelner Bundesländer und Institutionen zur Abschätzung der C-Vorräte	128
--------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Abkürzungsverzeichnis

ACCESS	Datenbanksystem Microsoft Corporation
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BB	Braunerden
BDF	Bodendauerbeobachtungsfläche
BK50	Bodenkarte des LfULG im Maßstab 1:50.000
BKKonz	Bodenkonzeptkarte des LfULG im Maßstab 1:25.000
BLA	Bodenkundliche Landesaufnahme
BZE	Bodenzustandserhebung
C _{org}	Organischer Kohlenstoffgehalt
C-Vorrat	Kohlenstoffvorrat
dB	Dichte des Bodens (Synonym zur Trockenrohichte TRD)
DB	Datenbank
DGM1	Digitales Geländemodell 1 x 1m
DS	Datensatz
EXCEL	Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Corporation
FIS	Fachinformationssystem
FS	Feinskelett
FSV	Feinskelettvolumen
FuE	Forschung und Entwicklung
GIS	Geographisches Informationssystem
GS	Grobskelett
GSV	Grobskelettvolumen
ID	Ident
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage
KA6	Bodenkundliche Kartieranleitung 6. Auflage
Ld	Lagerungsdichte
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
PDF	Portable Document Format
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
SKEL	Skelettgehalt
SKV	Skelettvolumen in %

SQL	Structured Query Language
TRD	Trockenrohdichte
UBODEN	Bodenkundliches Erfassungs- und Auswerteprogramm des LfULG
UTM	Universal Transverse Mercator (globales Koordinatensystem)
VBA	Visual Basic für Applikationen (interpretierte Programmiersprache für verschiedene Microsoft Office-Anwendungen)

Kurzfassung

Böden sind weltweit der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff. Sowohl bei globaler als auch bei lokaler Betrachtung finden in den Böden zeitgleich Prozesse der Speicherung als auch der Freisetzung von Kohlenstoff in Form organischer Substanz statt. Damit spielen Böden eine zentrale Rolle im (globalen) Kohlenstoffkreislauf.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden aus den in Sachsen vorliegenden Analysedaten zum organischen Kohlenstoff Vorräte berechnet und diese auf Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50) regionalisiert. Eingang in die Vorratsberechnungen fanden Analysedaten für Mineralböden aus dem Fachinformationssystem Boden (Punktaufschlüsse) und der Bodenzustandserhebung Wald (BZE II). Aufgrund der unzureichenden Datenverfügbarkeit für die organischen Auflagehorizonte unter Wald im Fachinformationssystem Boden wurden für diese Humusaufgaben keine Kohlenstoffvorräte berechnet, sondern anhand von Mittelwerten geschätzt.

Der Bericht enthält Ergebnisse zu den Kohlenstoffvorräten bezogen auf verschiedene Tiefenstufen (0-30 Zentimeter, 30-100 Zentimeter, 0-100 Zentimeter) sowohl mit Einbezug der Landnutzungen als auch ohne Landnutzungseinfluss. Die gesamten mittleren Kohlenstoffvorräte der sächsischen Mineralböden, bezogen auf eine Tiefe bis 100 Zentimeter, belaufen sich auf ca. 160 Mio. Tonnen. In den Oberböden, den oberen 30 Zentimetern der Böden, sind ca. 99,8 Mio. Tonnen organischer Kohlenstoff gespeichert. Die Unterböden, mit einer Tiefe von 30 Zentimetern bis 100 Zentimetern unter der Bodenoberfläche, speichern ca. 60,6 Mio. Tonnen organischen Kohlenstoff. Unter Wald sind zusätzlich die organischen Auflagehorizonte zu berücksichtigen, diese speichern im Mittel ca. 18,7 Mio. Tonnen Kohlenstoff. Darüber hinaus sind in den im sächsischen Informationssystem für Moore und organische Nassstandorte (SIMON) erfassten Mooren ca. 4,6 Mio. Tonnen organischer Kohlenstoff eingelagert. Damit ergibt sich die Summe aller für Sachsen bilanzierter C-Vorräte in Höhe von ca. 184 Mio. Tonnen.

Bezogen auf die unterschiedlichen Landnutzungen ergibt sich folgende Vorratsverteilung für die Tiefenstufe 0-100 Zentimeter: Unter Berücksichtigung der organischen Auflagehorizonte sind in den Böden der sächsischen Wälder mit ca. 129 Tonnen je Hektar die höchsten Kohlenstoffvorräte gespeichert. Es folgen Grünland mit ca. 105 Tonnen je Hektar und die sonstigen Nutzungen mit ca. 95 Tonnen je Hektar. Ackerböden weisen mit im Mittel ca. 83 Tonnen je Hektar die geringsten nutzungsbezogenen Vorräte auf.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

Das Umweltmedium Boden kann beachtliche Mengen an Kohlenstoff in Form von Humus speichern. Dieser ist jedoch nur in Teilen fest und dauerhaft gebunden. Je nach Bodennutzung kommen regelmäßig erhebliche Mengen neu in den Boden, im Wesentlichen über abgestorbene pflanzliche Biomasse, welche zuvor den Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen hat. Zugleich finden im Boden mikrobielle Umbau- und Abbauprozesse statt, so dass Teile des Bodenkohlenstoffs wieder in die Atmosphäre abgegeben werden. Der Auf- und Abbau der C-Vorräte im Boden unterliegt zum einen den natürlichen klimatischen Bedingungen und unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Böden, zum anderen aber in deutlichem Maße auch Nutzungs- und Bewirtschaftungseinflüssen.

Zunehmend rücken Ansätze des Klimaschutzes den Boden in seiner Funktion als C-Speicher in den Fokus, um die verankerten Ziele hin zur Klimaneutralität zu erreichen (Bundesklimaschutzgesetz 2021; Verordnung (EU) 2021/1119 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität - „Europäisches Klimagesetz“, COM (2021) 800 final „Nachhaltige Kohlenstoffkreisläufe“). So soll auf allen Böden der standorttypische Humusgehalt erhalten bleiben oder wiederhergestellt werden (§ 17 BBodSchG) und z. B. auf Moorböden, organischen Nassstandorten und anderen humusreichen Böden die nutzungs- und bewirtschaftungsbedingte C-Freisetzung soweit wie möglich vermindert werden (Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung, Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz 2021). Alle klimaorientierten Betrachtungen oder Maßnahmen mit Bezug zum Boden müssen dabei die Ausgangssituation (insbesondere C-Vorräte im Boden, Ausprägung der C-Speicherfunktion) berücksichtigen.

In Sachsen fehlen flächenrepräsentative Informationen zu den C-Vorräten der Böden und ihrer kurz-, mittel- und langfristigen Zu- bzw. Abnahme. Nur mit diesen Informationen lassen sich bodenbezogene Maßnahmen des Klimaschutzes a) fachlich begründen, b) Bedarfe räumlich konkretisieren, c) Prognosen künftiger Entwicklungen aufzeigen und d) Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit überprüfen.

Die Berichte des abgeschlossenen LfULG-Vorhabens zur Kohlenstoffbindung in Böden (GRÜNWALD et al. 2021) und des LfULG-Projekts „Ist-Analyse C-Bindung Sachsen“ (GRÜNWALD 2018) zeigen die Notwendigkeit eines C-Monitorings sächsischer Böden auf und wiesen hierzu bereits auf fachliche wie organisatorische Eckpunkte hin.

In Sachsen existieren bereits mehrere Messnetze, die in Teilen der Erfassung von Kohlenstoffvorräten und deren Änderungen in landwirtschaftlichen und forstlichen Ökosystemen dienen können und die sich ergänzen, aber im Hinblick auf die räumliche Verteilung und Flächenrepräsentativität, teils auch im

Hinblick auf Probenahme und Untersuchungsparameter Harmonisierungen und/oder Erweiterungen erfordern. Diese Messnetze werden durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), den Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) und die Technische Universität (TU) Dresden betrieben; hierzu liegen teilweise erste Auswertungen vor (GRÜNWALD et al. 2021; STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2019) Um ein langfristig angelegtes C-Monitoring konkret und zeitnah beginnen zu können, sind im Vorfeld noch offene Fragen, insbesondere der praktischen Umsetzung, zu klären.

Bislang fehlt eine flächenhafte Darstellung der C-Vorräte für die Böden Sachsens und eine entsprechende Interpretation. Den inhaltlichen Ausgangspunkt bilden hier Projekte und Ergebnisberichte des Bundes und anderer Bundesländer (z. B. WIESMEIER 2014; WALDMANN und WEINZIERL 2015; KLINGENFUß ET AL. 2019; JACOBS et al. 2018).

An diesen Punkten soll das Gesamtvorhaben in Form einer methodisch orientierten Vorstudie ansetzen und mit seinen Ergebnissen den Start eines künftigen C-Monitorings in Sachsen wissenschaftlich fundiert und dabei so konkret wie möglich vorbereiten.

1.2 Ziel- und Aufgabenstellung

Ziel des vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) initiierten Forschungsvorhabens war die wissenschaftlich fundierte Erarbeitung einer konkreten Methodik für eine künftig regelmäßige Erfassung der Kohlenstoffvorräte und ihrer Änderungen in den Böden Sachsens (Los 1) sowie einer flächenbezogenen Darstellung und Interpretation (Los 2).

Schwerpunkt der Arbeiten im Los 2 war die landesweite Abschätzung und flächenhafte Darstellung der C-Vorräte von Sachsen auf Basis aktuell verfügbarer Daten- und Kartengrundlagen (FuE Vorstudie C-Monitoring, Los 2: Landesweite Abschätzung und Darstellung der C-Vorräte, Z428/22).

Aus den vorliegenden bzw. recherchierten, zumeist punktbezogenen Bodenuntersuchungsergebnissen waren alle erforderlichen Kernparameter/Kennzahlen zur Abschätzung der C-Vorräte abzuleiten, die Vorräte zu berechnen und flächenbezogen zuzuweisen. Die Ergebnisse waren abschließend mit Hilfe eines GIS-Projektes darzustellen.

Die Projektergebnisse sowie erkennbare Einflussgrößen auf den C-Vorrat der Böden waren zu interpretieren, Unsicherheits- und Defizitanalysen durchzuführen und nach methodischen Anpassungen iterativ verbesserte Abschätzungen und Darstellungen vorzunehmen.

Zudem sollten Hinweise gegeben werden, wie zukünftig mit einem vertretbaren Aufwand die Aussagen zu den C-Vorräten Sachsens verbessert werden können.

2 Einbezogene Daten

In die konzeptionelle sowie die fachliche Bearbeitung wurden die vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und dem Staatsbetrieb Sachsenforst zur Verfügung gestellten Bodendaten einbezogen. Im Einzelnen wurden folgende Datengrundlagen verwendet:

- Aktuelle Bodenkarte des LfULG (BK50) einschließlich Informationen zu den Legendeneinheiten (Shape-Datei und xlsx-Datei mit Profil- und Horizontdaten der Leitprofile)
- Profil- und Analysendaten des Fachinformationssystems (FIS) Boden einschließlich Daten der Bodendauerbeobachtungsflächen (Punktdateien)
- Profil- und Analysendaten der Bodenzustandserhebung (BZE) (Punktdateien einschließlich Vorratsberechnungen bereitgestellt vom Staatsbetrieb Sachsenforst)
- Daten / Informationen zur Lage und Verbreitung von Mooren und anderen organischen Nässtandorten in Sachsen (GIS-Projekt SIMON)
- Kohlenstoff- und Humusgehalte der landwirtschaftlichen Dauertestflächen Sachsens
- Geobasisdaten Sachsen (WMS von GeoSN Internetseite)

Die verwandten Bodenprofildateien sind i. d. R. mit Koordinaten (Ost- und Nordwerte) räumlich exakt verortet.

Zudem wurde die Einbindung der Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft des Thünen-Instituts für Agrarklimaschutz geprüft (JACOBS et al. 2018). Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) ist die erste bundesweit einheitliche Inventur landwirtschaftlich genutzter Böden. Da es sich hierbei jedoch um aus datenschutzrechtlichen Gründen verschleierte Standorte handelt, bei denen Lageabweichungen von bis zu 4 km auftreten können, musste auf die Einbeziehung dieser Daten verzichtet werden.

Insgesamt standen für Sachsen Kohlenstoffanalysen von 10.264 Standorten zur Verfügung, die sich wie folgt auf die Hauptnutzungstypen verteilen:

Tabelle 1: Anzahl vorliegender Profile mit Kohlenstoffanalysen bezogen auf die Hauptnutzungstypen.

Quelle	Acker	Grünland	Wald	Sonstige	Gesamt
FIS Boden	3.767	2.335	2.795	325	9.222
BZE Wald	0	0	279	0	279
Landwirtschaft	763	0	0	0	763
Summe	4.530	2.335	3.074	325	10.264

Analysen lagen jedoch nicht immer komplett über alle Horizonte eines Profils vor. So beziehen sich die Analysendaten zu den landwirtschaftlichen Dauertestflächen lediglich auf die Tiefenstufe 0-20 cm. Angaben zur Trockenrohdichte und zum Skelettvolumen fehlen komplett. Im Falle der Bodenzustandserhebung Wald (BZE) erfolgte eine tiefenstufenbezogene Beprobung. Zur Betrachtung der Oberböden standen hier die Werte der obersten 5 cm zur Verfügung.

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Profilstandorte, bei denen Kohlenstoffanalysen für den Oberboden vorliegen, unterschieden nach den Hauptnutzungstypen.

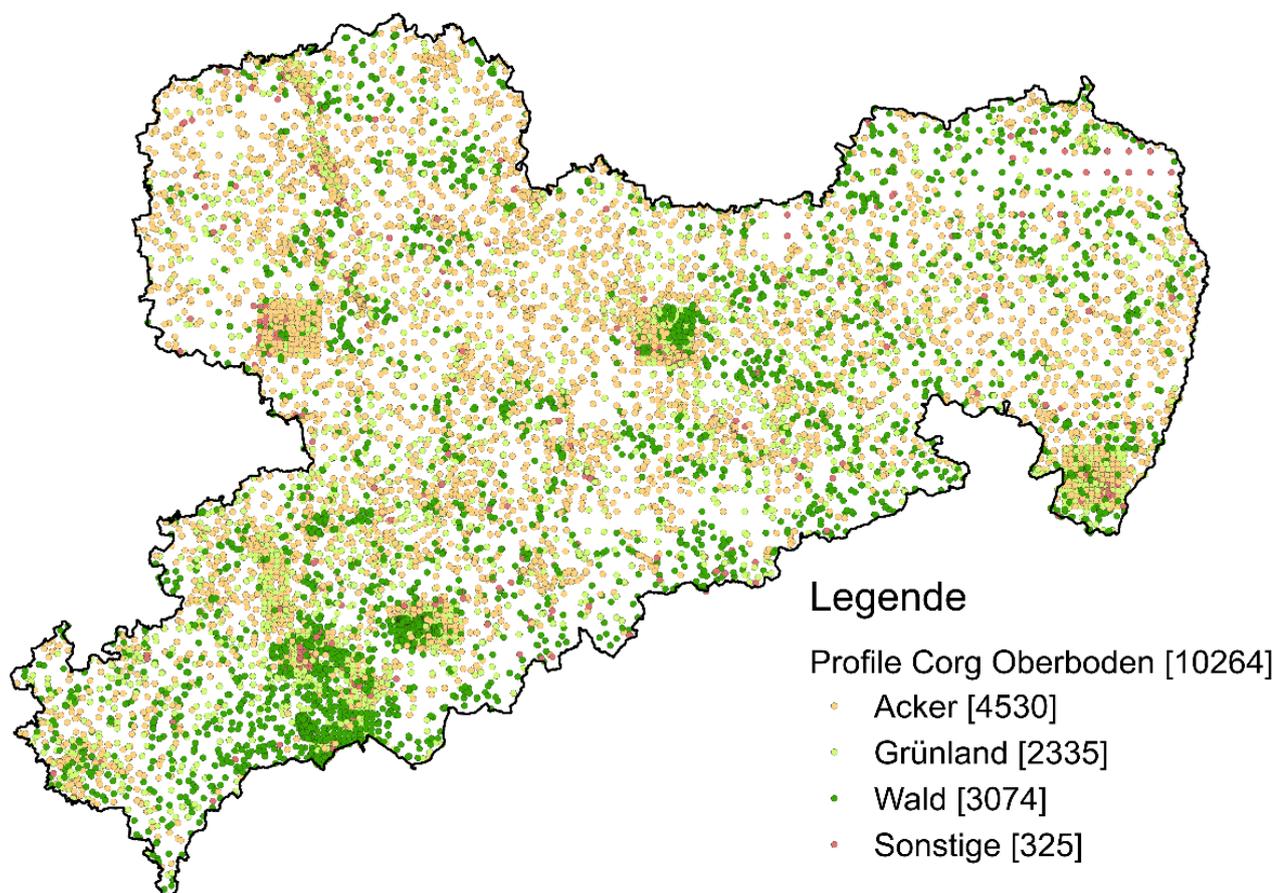


Abbildung 1: Profilstandorte mit Kohlenstoffanalysen im Oberboden (Standorte mit Nutzungsbezug).

Betrachtet man die zur C-Vorratsberechnung neben der Horizontmächtigkeit zusätzlich erforderlichen Parameter Trockenrohdichte (TRD) und Skelettvolumen (SKV), so ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 2: Anzahl vorliegender Profile mit Kohlenstoffanalysen, Trockenrohdichten und Skelettgehalten (SKV = Skelettvolumen).

Quelle	C _{org}	TRD	SKV
FIS Boden	9.222	802	5.738
BZE Wald	279	279	279
Landwirtschaft	763	0	0
Summe	10.264	1.081	6.017

Tabelle 2 zeigt, dass die zur Berechnung der C-Vorräte erforderlichen Parameter lediglich in dem vom Sachsenforst bereitgestellten Datenbestand zur Bodenzustandserhebung unter Wald (BZE) vollständig war. Zu den landwirtschaftlichen Dauertestflächen lagen keine Informationen zu Trockenrohdichten (TRD) bzw. Skelettgehalten (SKV) vor.

Auch der Datenbestand des FIS-Boden wies zum Teil größere Lücken auf. Minimierender Parameter der C-Vorratsberechnung ist die Trockenrohdichte (TRD). Hier lagen lediglich für 1.081 Profile Analysendaten vor. Trockenrohdichten über alle Horizonte wiesen nur 615 der 802 Profile des FIS-Bodens auf. Die Verteilung dieser Standorte über Sachsen kann Abbildung 2 entnommen werden.

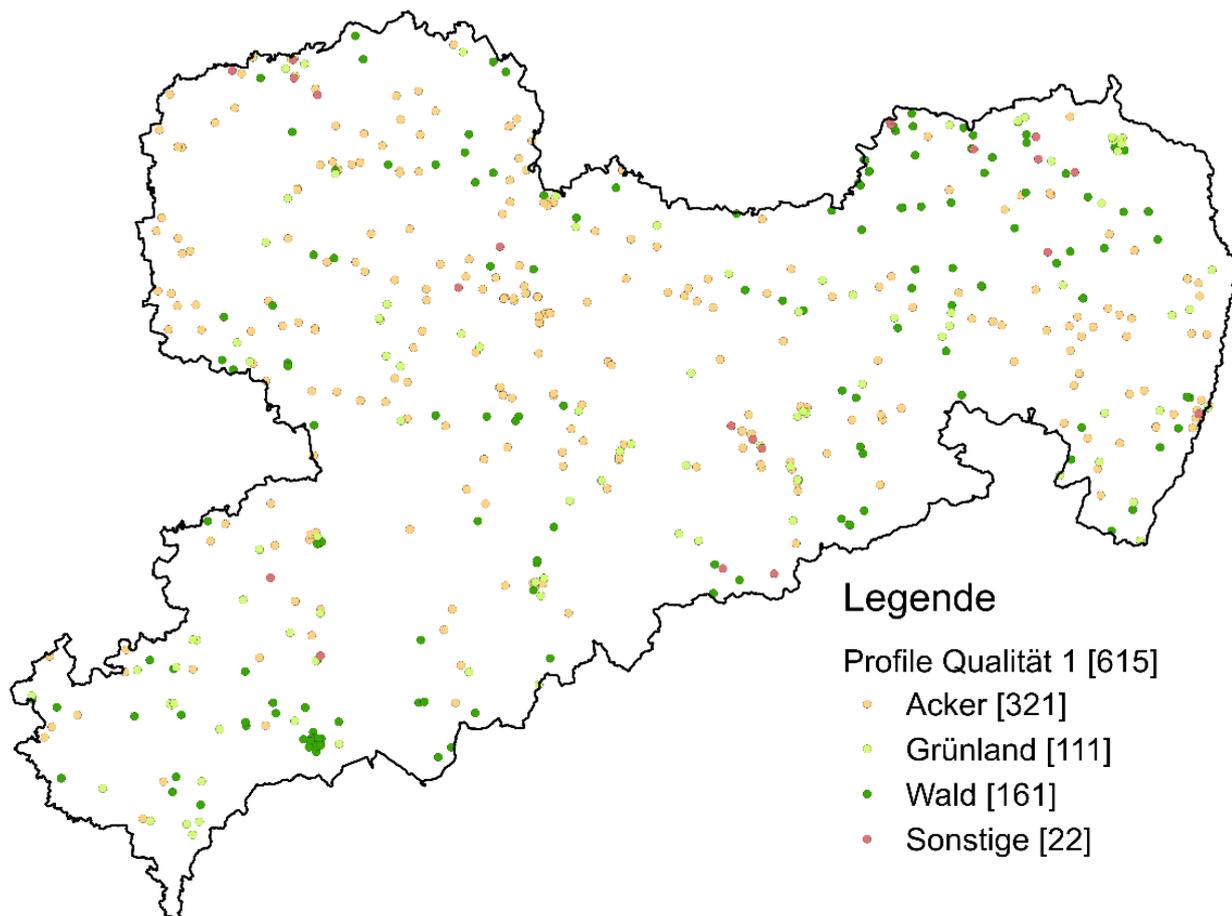


Abbildung 2: Profilstandorte mit vollständig vorliegenden Analysen (Standorte mit Nutzungsbezug).

Der Datenbestand des FIS-Boden beinhaltet zudem Bodenprofile, für die teilweise mehrere Laboranalysen je Horizont vorliegen. Zur Einbeziehung dieser Profile mussten vorab horizontrepräsentative Mittelwerte errechnet werden. Es handelt sich fast ausschließlich um die Standorte der sächsischen Boden-Dauerbeobachtungsflächen.

3 Allgemeine Methodik der Vorratsberechnung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens erfolgte eine erste flächen- und nutzungsbezogene Abschätzung der C-Vorräte sächsischer Böden. Die erforderlichen Kernparameter/Kennzahlen zur Abschätzung der C-Vorräte der Böden wurden auf Basis der für Sachsen vorhandenen Datenbestände (siehe Kapitel 2) flächen- und nutzungsbezogen (statistisch) abgeleitet. Mit Hilfe einer vorgeschalteten Unsicherheits- und Defizitanalyse konnten methodische Anpassungen abgeleitet und Optimierungen des Datenbestandes vorgenommen werden (siehe Kapitel 4).

Aufgrund der vorliegenden Datenlage wurden ausschließlich Kohlenstoffvorräte für die Mineralböden berechnet. Humusaufgaben bei Nutzung Wald blieben weitgehend unberücksichtigt, hier erfolgte lediglich eine Abschätzung der Vorratsmengen (siehe Kapitel 5.5).

Um die Kohlenstoffvorräte einzelner Horizonte berechnen zu können, sind Angaben zur Trockenroh-dichte (TRD), dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}), dem Skelettvolumen (SKV) und der Horizontmächtigkeit (Δz) erforderlich. Die Berechnungsgrundlage bildet nachfolgende Gleichung (1) aus der Publikation: „Kohlenstoffbindung in Böden“ von GRÜNWALD et.al. (2021):

$$C_V = C_{org} \cdot TRD \cdot \Delta z \cdot \left(1 - \frac{SKV}{100}\right) \quad (1)$$

C_V Kohlenstoffvorrat in t/ha

C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt (für einen Horizont) [%]

TRD Trockenroh-dichte $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Δz Horizontmächtigkeit [cm]

SKV Skelettvolumen [%]

Zur Automatisierung der Vorratsberechnungen wurde eine Access-Projektdatenbank aufgebaut. In ihr können alle zur C-Vorratsberechnung benötigten Daten verwaltet und die erforderlichen Berechnungen durchgeführt werden. Konkret erfolgt die Berechnung der C-Vorräte unter Nutzung von SQL-Abfragen und programmierter VBA-Module. Aufgrund der Verwaltung und der Umsetzung des Algorithmus in der Datenbank können automatisierte Berechnungen unter anderem für nachfolgende Tiefenstufen durchgeführt werden:

- 0 – 30 cm
- 0 – 60 cm
- 0 – 90 cm
- 0 – 100 cm
- 30 – 100 cm
- Gesamtes Profil

Da die Horizontmächtigkeiten der Daten des FIS-Boden i. d. R. nicht den oben genannten Tiefenstufen entsprechen, wurden die Vorräte in t/ha für jeweils 1 cm Mächtigkeit berechnet. Im Anschluss wurden die berechneten Vorratswerte in der Datenbank mit den entsprechenden Mächtigkeiten der Horizonte multipliziert und für die jeweiligen Tiefenstufen der einzelnen Profile aufsummiert. Es wurden ausschließlich Profile einbezogen, für die ein vollständiger Datensatz zur C-Vorratsberechnung vorlag (siehe Kapitel 4).

Die Ergebnisse der C-Vorratsberechnungen in der Datenbank lassen sich flächenkonkret und flächendeckend den Polygonen der BK50 zuweisen und direkt per GIS-Programm visualisieren.

Die Klassifizierung der Vorräte in t/ha erfolgte einheitlich in Anlehnung an die Vorgehensweise in Baden-Württemberg (WALDMANN und WEINZIERL 2015) für die dort betrachtete Tiefenstufe 0 bis 100 cm nach folgendem Schema (Tabelle 3).

Tabelle 3: Klassifizierung der C-Vorräte in Analogie zu WALDMANN und WEINZIERL (2015).

Klasse	C-Vorrat [t/ha]
1	< 30
2	30 – 50
3	50 – 70
4	70 – 90
5	90 – 110
6	110 – 130
7	130 – 150
8	150 – 250
9	250 – 500
10	> 500

Aufgrund der automatisierten Umsetzung der Vorratsberechnungen in der Datenbank, können die Prozeduren bei zukünftig verbesserter Datenlage mit geringem Aufwand wiederholt werden und so eine schrittweise Aktualisierung der C-Vorratskarten erfolgen. Die über die Datenbank neu berechneten Vorratsergebnisse können direkt über das angebundene GIS-Projekt visualisiert werden.

4 Datenaufbereitung / Herleitung Berechnungsparameter

4.1 Wahl des methodischen Ansatzes

Im Verlaufe des Vorhabens wurden verschiedene methodische Ansätze geprüft. Vorratsberechnungen erfolgten sowohl auf Basis vorhandener Analysendaten als auch unter Nutzung der Aufschlusdaten (Kartiererergebnisse) des FIS-Boden. Im Ergebnis einer Unsicherheits- und Defizitanalyse konnten deutliche Unterschiede hinsichtlich der abgeleiteten Vorratsmengen beider Ansätze festgestellt werden. Vor allem die lediglich als Humusstufe vorliegende Information zum Kohlenstoffgehalt sowie fehlende Angaben zur Trockenrohddichte haben zu signifikanten Unterschieden im Vorratsergebnis geführt. Es zeigte sich, dass neben der Vollständigkeit vor allem der Qualität der Eingangsdaten eine entscheidende Rolle zukommt.

Eine Nutzung der Bodenansprachen im Gelände zur Ableitung der Trockenrohddichte über die Bodenart (mittlere Körnung) ist prinzipiell zwar möglich, jedoch stark mit Fehlern behaftet. Erfahrungsgemäß, unterscheiden sich die Bodenansprachen infolge des subjektiven Empfindens der Kartierenden teils deutlich voneinander. Dies betrifft insbesondere Böden mit mittleren Tongehalten. Gleiches gilt auch für den Humusgehalt. Auch hier ist die Abschätzung der Humusstufe in der Regel dem subjektiven Empfinden des Kartierenden geschuldet. Im Ergebnis der vergleichenden Betrachtung wurde daher auf die Einbeziehung der Kartiererergebnisse verzichtet.

Stattdessen wurde ein Ansatz gewählt, der auf der alleinigen Nutzung vorliegender Analysendaten zur Ableitung der C-Vorräte beruht. Aber auch hier unterscheiden sich die in die Untersuchung eingehenden Standorte hinsichtlich Umfang und Qualität der vorliegenden Daten. Neben unterschiedlichen Arten der Beprobung (Horizonte oder Tiefenstufen) variiert auch der Beprobungsumfang. So liegen Daten zu vollständigen Profilen, zu ausgewählten Horizonten oder nur zum Oberboden vor (vgl. Kapitel 2).

Die Berechnung der C_{org} -Vorräte einzelner Standorte kann jedoch nur auf Basis vollständig vorliegender Angaben zu den Kohlenstoffgehalten, den Trockenrohddichten, dem Bodenskelett und zur Schichtmächtigkeit erfolgen. Dies war anfänglich jedoch nur bei einer geringen Anzahl an Profilen möglich. Zur Einbeziehung der größtmöglichen Anzahl an analysierten Bodenprofilen, waren vorab umfangreiche Datenaufbereitungen und -ergänzungen erforderlich, die im Folgenden kurz skizziert werden.

4.2 Ableitung und Ergänzung der Trockenrohddichte

Die Trockenrohddichte der Böden stellt eine zentrale Größe bei der Berechnung von Kohlenstoffvorräten dar. Sie kann als Funktion zwischen der Textur und dem Gehalt an organischer Substanz beschrieben

werden. So enthält die KA5 beispielsweise eine Möglichkeit zur Ableitung der Trockenrohddichte aus der Lagerungsdichte in Abhängigkeit vom Tongehalt.

Die TRD-Werte im FIS-Boden stammen in der Regel aus Stechringuntersuchungen und beziehen sich zumeist auf den Gesamtboden (> 95 % der Daten). Aufgrund fehlender Trockenrohddichten mit Feinbodenbezug können jedoch nur die im FIS-Boden enthaltenen Werte der Trockenrohddichte bezogen auf den Gesamtboden (TRD_{ges}) zur Vorratsberechnung herangezogen werden.

Die TRD_{ges} wird gemäß Fachliteratur bei skeletthaltigen Böden zwar tendenziell als zu gering eingeschätzt, bis zu einem Grobbodenanteil von 5 % kann sie aber weitestgehend mit der Trockenrohddichte bezogen auf den Feinboden (TRDFB) gleichgesetzt werden (RIEK et al. 2006). Zudem muss bei Analysen auch immer mit Fehlertoleranzen von 10 – 15 % durch Messungenauigkeiten gerechnet werden. Schon bei einer Abweichung der TRD um 0,1 g/cm³ muss mit einer Zu- bzw. Abnahme des C-Vorratswertes um 10 % gerechnet werden.

Unter Berücksichtigung aller möglichen Fehlerquellen, die schon bei der Probenahme beginnen können, ist es daher vertretbar, die auf den Stechringuntersuchungen basierende TRD_{ges} zur Vorratsberechnung heranzuziehen. Die Abschätzung der C-Vorräte kann daher aber nur näherungsweise erfolgen. Abweichungen müssen toleriert werden.

In Auswertung des zur Verfügung stehenden Datenbestandes (Kapitel 2) waren Trockenrohddichten zu allen relevanten Horizonten lediglich bei 615 Profilen des FIS-Boden vorhanden. Für den Großteil der FIS-Boden Profile fehlten Analysen bzw. Angaben zur Trockenrohddichte komplett oder lagen nur für einzelne Horizonte vor. Eine Berechnung der C-Vorräte kann allerdings nur erfolgen, wenn eine Information zur Trockenrohddichte vorhanden ist, so dass entsprechende Ansätze zur Datenvervollständigung gesucht werden mussten.

Zur Herleitung von Trockenrohddichten aus den vorliegenden Datenbeständen wurden daher zwei methodische Ansätze geprüft und miteinander verglichen. Beide können zunächst als grundsätzlich geeignet angesehen werden.

4.2.1 Trockenrohddichte nach HOLLIS et al. (2012)

Für die Berechnung der Trockenrohddichte können die Pedotransferfunktionen nach HOLLIS et al. (2012) genutzt werden. Die Nutzung der Funktionen war nur für Horizonte mit vorhandener Körnungsanalyse (Ausnahme: organische Horizonte), sowie bei Angabe des C_{org}-Gehaltes möglich.

Grundsätzlich stehen die in Tabelle 4 aufgeführten Pedotransferfunktionen zur Verfügung.

Tabelle 4: Pedotransferfunktionen nach HOLLIS et al. (2012) zur Ableitung der Trockenrohdichte (TRD).

Nr.	Anwendung der Funktion	Gleichung
1	Vulkanisches Substrat	$TRD (g \cdot cm^{-3}) = 1,5868 - (0,4682 \cdot e^{(0,0578 \cdot C_{org}[\%])}) - (0,07778 \cdot \ln(\text{Mittelpunkt des Horizontes [cm]}))$
2	Bearbeitete Oberbodenhorizonte	$TRD (g \cdot cm^{-3}) = 0,80806 + (0,823844 \cdot e^{(-0,27993 \cdot C_{org}[\%])}) + (0,0014065 \cdot \text{Sandgehalt [\%]}) - (0,0010299 \cdot \text{Tongehalt [\%]})$
3	Dichte Unterböden	$TRD (g \cdot cm^{-3}) = 1,1257 - (0,1140245 \cdot \ln(C_{org} [\%])) + (0,0555 \cdot \ln(\text{Mittelpunkt des Horizontes [cm]})) + (0,002248 \cdot \text{Sandgehalt [\%]})$
4	Alle anderen mineralischen Horizonte	$TRD (g \cdot cm^{-3}) = 0,69794 + (0,750636 \cdot e^{(-0,230355 \cdot C_{org} [\%])}) + (0,0008687 \cdot \text{Sandgehalt [\%]}) - (0,0005164 \cdot \text{Tongehalt [\%]})$
5	Alle organischen Horizonte	$TRD (g \cdot cm^{-3}) = 1,4903 - 0,33293 \cdot \ln(C_{org} [\%])$

Zur Ableitung der Trockenrohdichten wurden im Forschungsvorhaben die Gleichungen 2, 4 und 5 wie folgt genutzt.

Gleichung 2: für alle Horizonte mit Nutzung Acker und alle Ap-Horizonte, deren Unterkante bei $\leq 0,4$ cm lag

Gleichung 5: für alle organischen Horizonte mit Horizontsymbol H und > 20 % Humus

Gleichung 4: für alle übrigen Horizonte, deren TRD nicht nach Gleichung 2 oder 5 berechnet wurde

4.2.2 Trockenrohdichte nach RENGGER et al. (2009)

Die Berechnung der TRD nach RENGGER et al. (2009) setzt das Vorhandensein einer effektiven Lagerungsdichte (L_d) voraus. Zur Ableitung ist daher zwingend ein Eintrag im Datenfeld „Ld_SV“ der FIS-Boden Aufschlusssdatenbank erforderlich. Bei fehlenden Angaben zur Lagerungsdichte musste daher eine Zuordnung der L_d -Stufe gemäß der Verknüpfungsregel VKR 6.1.4 der Methodenbank (Abschätzung der effektiven Lagerungsdichte und des Substanzvolumens) (BUG et al. 2020) über das Horizontsymbol der KA5 unter Berücksichtigung sächsischer Zusatzsymbole erfolgen. Nachfolgende Abbildung 3 zeigt einen Auszug aus der Zuordnungstabelle der VKR 6.1.4.

Horizont	Ld	Horizont	Ld
Aa	Ld2	Bh3	Ld3
Ae	Ld2	Bh4	Ld4
Aeh	Ld2	Bh5	Ld4
Ael	Ld2	Bhs	Ld3
Ah	Ld2	Bhs1	Ld3
Ahe	Ld2	Bhs2	Ld3
Ahl, gAhl	Ld2	Bhs3	Ld3
Ai	Ld2	Bhs4	Ld4
Al	Ld3	Bhs5	Ld4
Alh	Ld2	Bht	Ld3
Ap	Ld2	Bhv	Ld3

Abbildung 3: Auszug aus der Tabelle zur Ableitung der effektiven Lagerungsdichte über das Horizontsymbol (Bug et al. 2020).

Nach Zuordnung der effektiven Lagerungsdichte gemäß VKR 6.1.4 konnte anschließend die TRD nach Renger et al. (2009) über die Bodenarten der Horizonte abgeleitet werden. Da die Ansprache der Bodenart entsprechend dem subjektiven Empfinden bodenkundliche Kartierender variiert, wurden auch hier ausschließlich Horizonte mit vorhandener Körnungsanalyse genutzt.

Unter Einbeziehung der vorliegenden Körnungsanalysen und der Nutzung der im FIS-Boden vorhandenen bzw. ergänzten Angaben zur Lagerungsdichte, lässt sich mit Hilfe der in nachfolgender Abbildung 4 angeführten Formeln jeweils eine mittlere Trockenrohdichte für die mineralischen Horizonte ableiten.

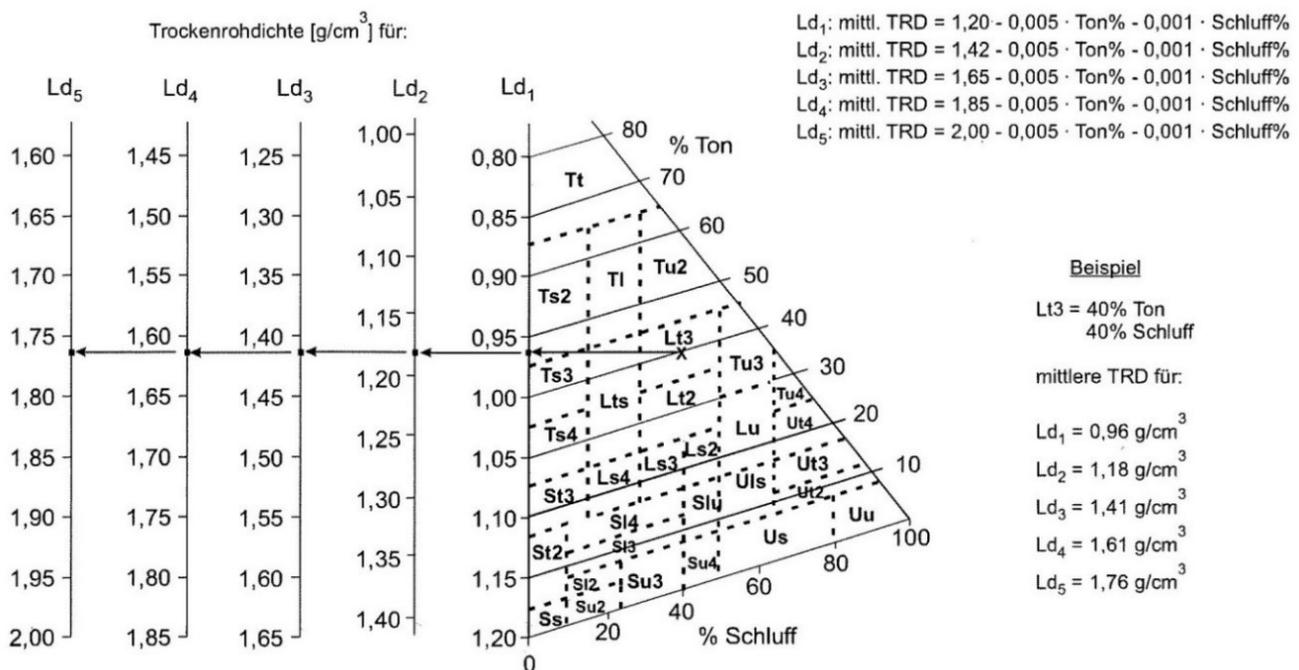


Abbildung 4: KA6 Teil B: Nomogramm zur Ermittlung der Klassen für die effektive Lagerungsdichte in Abhängigkeit von der Bodenart (Renger et al. 2009); Quelle: KA6 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE 2022).

Für Horizonte mit Humusgehalten $\geq 1\%$ erfolgte zusätzlich eine Korrektur der TRD nach folgendem Schema:

- Bei Humusgehalten $> 1\% - 6\%$: Reduktion der berechneten TRD um $0,04 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ pro % Humus
- Bei Humusgehalten von $> 6\%$: Reduktion der berechneten TRD um $0,03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ pro % Humus

Bei allen im FIS-Boden ausgewiesenen organischen Horizonten (Horizontsymbol H) war eine Einzelfallentscheidung erforderlich. Zunächst wurde geprüft, ob sie aufgrund der analysierten Humusgehalte als mineralischer oder organischer Horizonte betrachtet werden müssen. Es wurden nur solche als Torfhorizonte angesehen, deren Humusgehalte mit $> 20\%$ bzw. h_7 angegeben war. Für diese Horizonte wurden Lagerungsdichten nach Tabelle B-11 KA6 (AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE 2022) zugeordnet. Alle anderen wurden als mineralische Horizonte betrachtet und die TRD nach der Methode von RENGGER et al. (2009) abgeleitet.

4.2.3 Vergleich der Ansätze

Um den finalen Ansatz zur Ableitung der TRD im Forschungsvorhaben wählen zu können, mussten die mit beiden Methoden berechneten Trockenrohdichten anschließend mit Referenzwerten verglichen werden. Als Referenzwerte wurden die analytisch bestimmten TRD aller vollständigen Profile herangezogen, für die komplette Körnungsanalysen vorlagen und somit auch eine Berechnung der TRD nach HOLLIS et al. (2012) oder RENGGER et al. (2009) möglich war.

Neben den 615 vollständig vorliegenden Profilen (Kapitel 2) lagen bei weiteren 187 Profilen die benötigten Parameter weitestgehend vor. Hier fehlten bei dem ein oder anderen Horizont allerdings Angaben zur Trockenrohdichte, die jedoch durch eine Tiefenallokation ergänzt werden konnten. Dabei wurde die Angabe der Trockenrohdichte aus dem jeweils überlagernden Horizont übernommen. Bei 14 Profilen lag zwar ein Analysenwert für die TRD vor, jedoch waren keine Ergebnisse zu Körnungsanalysen hinterlegt, sodass für die Horizonte dieser Profile keine TRD nach HOLLIS et al. (2012) oder RENGGER et al. (2009) berechnet werden konnte.

Somit lagen insgesamt 788 Profile mit insgesamt 3.343 Horizonten vor, für die der analytisch bestimmte Wert der TRD mit den geschätzten Werten nach HOLLIS/RENGER verglichen werden konnte. Hierfür wurden zunächst Streudiagramme erstellt, die die nachfolgenden Abbildungen zeigen (Abbildung 5 und Abbildung 6).

Korrelation TRD Analytik & TRD Hollis (n = 3343 Horizonte)

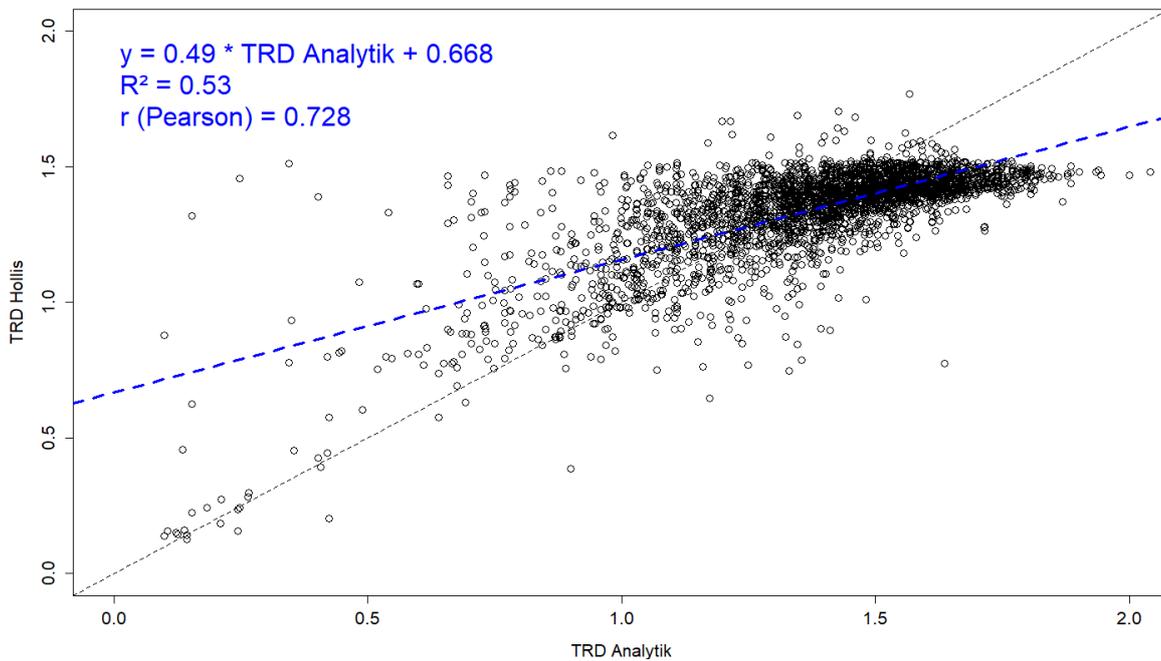


Abbildung 5: Darstellung der Korrelation zwischen analytisch bestimmten und nach der Methode von HOLLIS et al. (2012) berechneten Trockenrohdichten.

Idealerweise sollten alle Punkte auf der gestrichelten Linie liegen (Übereinstimmung analytisch bestimmter TRD mit der berechneten TRD nach HOLLIS).

Korrelation TRD Analytik & TRD Renger (n = 3343 Horizonte)

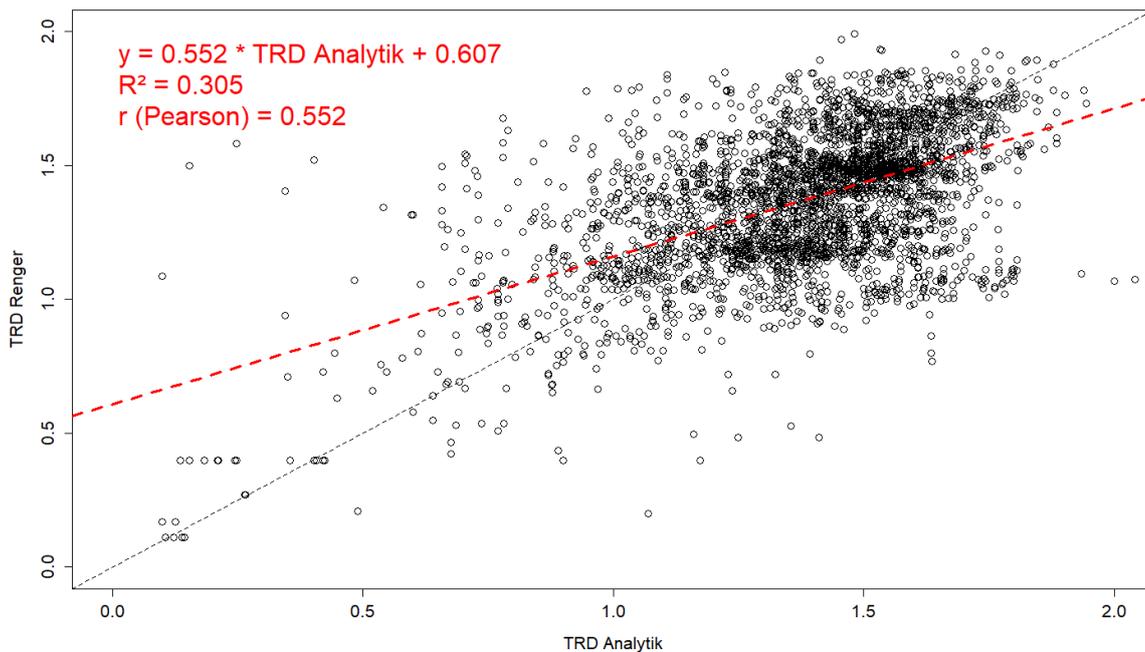


Abbildung 6: Darstellung der Korrelation zwischen analytisch bestimmten und nach der Methode von RENGIER et al. (2009) berechneten Trockenrohdichten.

Idealerweise sollten alle Punkte auf der gestrichelten Linie liegen (Übereinstimmung analytisch bestimmter TRD mit der berechneten TRD nach RENGIER).

Die nach HOLLIS et al. (2012) berechneten Trockenrohdichten stimmten vergleichsweise besser mit den analytisch bestimmten Trockenrohdichten überein, als es bei den nach RENGER et al. (2009) berechneten TRD-Werten der Fall ist. Dies zeigt sich insbesondere im Unterschied der nach Pearson ermittelten Korrelationskoeffizienten, welcher für die Methode nach HOLLIS et al. (2012) bei 0,728 und bei RENGER et al. (2009) bei 0,552 liegt. Grundsätzlich streuen die TRD-Werte nach RENGER et al. (2009) deutlich stärker um die ideale Gerade, als es bei der TRD-Berechnung nach HOLLIS et al. (2012) der Fall ist.

Zusätzlich zum Abgleich der berechneten TRD im Vergleich zu TRD-Referenzwerten, erfolgte ein Abgleich der auf Basis der Trockenrohdichten berechneten C-Vorräte mit C-Vorrats-Referenzwerten. Als Referenzwerte wurden die C-Vorräte vollständiger Profile (TRD aller Horizonte analytisch bestimmt) genutzt. Hierzu standen ebenfalls 788 Profile zur Verfügung. Der Abgleich erfolgte für die Vorratsergebnisse der Tiefenstufen 0-30 cm, 0-100 cm und für das gesamte Profil (siehe Tabelle 5). Folgende farbliche Zuordnung wurde vorgenommen:

Grüner Bereich geringe Abweichung	-10 % bis 10 % Abweichung zwischen C-Vorrat Analyse und Schätzung
Gelber Bereich mittlere Abweichung	-25 % bis -10 % und 10 % bis 25 % Abweichung zwischen C-Vorrat Analyse und Schätzung
Roter Bereich Große Abweichung	< -25% und > 25 % Abweichung zwischen C-Vorrat Analyse und Schätzung

Tabelle 5: Anzahl an Profilen die nach den beiden Berechnungsmethoden in den jeweiligen Bereichen liegen.

Methode	Profile Grüner Bereich (-10 bis +10 % Abw.)		Profile Gelber Bereich (-25 bis -10% bzw. +10 bis +25 % Abw.)		Profile Roter Bereich (< -25% bzw. > +25% Abw.)	
	HOLLIS	RENGER	HOLLIS	RENGER	HOLLIS	RENGER
C-Vorrat 0-30 cm	502	332	228	323	58	133
C-Vorrat 0-100 cm	555	393	183	279	50	116
C-Vorrat Profil	554	405	182	269	52	114

Der prozentuale Anteil der Profile im grünen, gelben und roten Bereich sind für die beiden Berechnungsmethoden in den nachfolgenden Kreisdiagrammen gezeigt (Abbildung 7). Es wird zwischen den Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm unterschieden.

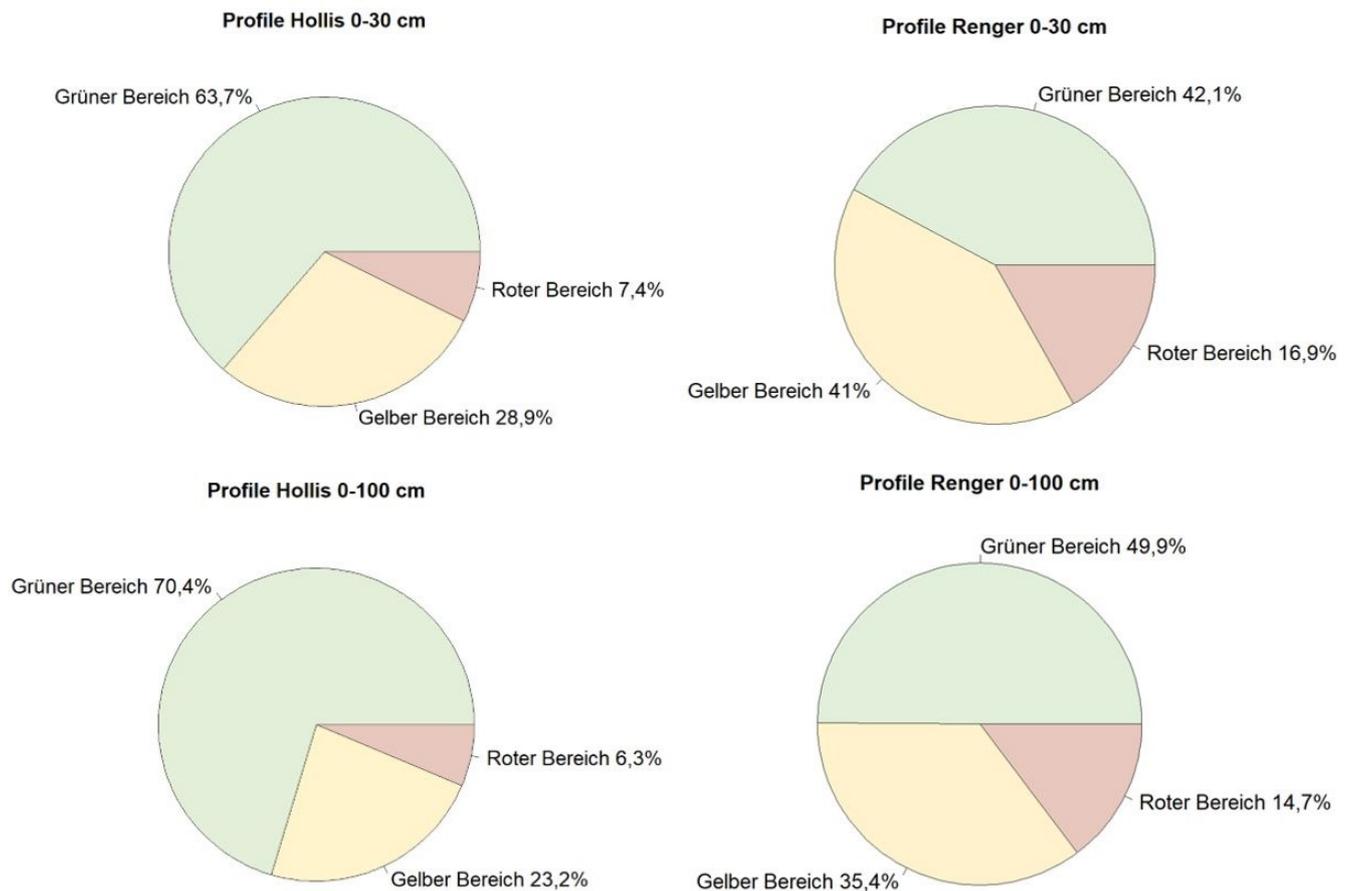


Abbildung 7: Anteil der Profile im grünen, gelben und roten Bereich vergleichend für die Berechnung der TRD bzw. C-Vorräte nach HOLLIS et al. (2012) und RENGGER et al. (2009) für die Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm.

Abbildung 7 zeigt, dass die C-Vorräte der jeweiligen Tiefenstufen mit der über die Pedotransferfunktion nach HOLLIS et al. (2012) abgeleiteten TRD besser geschätzt werden als mit der nach RENGGER et al. (2009) berechneten TRD. Die nach HOLLIS berechneten Trockenrohdichten liegen also näher am Ergebnis der Analysendaten. Somit ergibt sich im Ergebnis folgende Gegenüberstellung der beiden Methoden zur Berechnung der Trockenrohdichte (Tabelle 6).

Tabelle 6: Zusammenfassung und Vergleich der beiden zur Berechnung der Trockenrohdichte genutzten Methoden.

	TRD nach HOLLIS et al. (2012)	TRD nach RENGER et al. (2009)
Notwendige Parameter	Organische Horizonte: C_{org} Mineralische Horizonte: C_{org} + Körnungsanalysen	Organische Horizonte: Humusgehalt Mineralische Horizonte: Bodenart bzw. Körnungsanalysen, Lagerungsdichte (Stufe), Angabe zum Humusgehalt
Vorgehen	Nutzung der Pedotransfergleichungen	Nutzung der Tabelle B-2 der KA6 (für mineralische Horizonte) bzw. Tabelle B-11 der KA6 (für organische Horizonte), Quelle: (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE 2022)
Abgleich mit Referenzwerten	Bessere Korrelation zwischen analytisch ermittelter TRD und nach HOLLIS et al. (2012) berechneter TRD r (Pearson) = 0,728 Die mit der TRD nach HOLLIS et al. (2012) berechneten Vorräte liegen näher am Ergebnis der mit den Analysendaten berechneten C-Vorräte	Schlechtere Korrelation zwischen analytisch ermittelter TRD und nach RENGER et al. (2009) berechneter TRD r (Pearson) = 0,552 Die Abweichung zwischen Analyse und Schätzung der unter Nutzung der TRD nach Renger et al. (2009) berechneten C-Vorräte ist deutlich höher als bei Nutzung der Pedotransferfunktion nach HOLLIS et al. (2012)
Fazit	→ Genutzte Variante	

Aufgrund der deutlich besseren Korrelation mit der analytisch ermittelten TRD und der geringeren Abweichung bei den berechneten C-Vorräten wurde im Ergebnis der vergleichenden Betrachtung der Ansatz nach HOLLIS et al. (2012) zur Ableitung fehlender Trockenrohdichten im Vorhaben herangezogen.

4.3 Herleitung des Skelettvolumens

Das Skelettvolumen geht als Korrekturparameter in die Gleichung zur Vorratsberechnung ein (siehe Gleichung 1 auf Seite 19). Der Skelettanteil von Böden wird in der Regel nur geschätzt, da eine volumenbezogene Messung bei skelettreichen Böden sehr aufwendig ist. Jedoch weisen diese subjektiven Schätzungen oftmals hohe Fehlerraten auf, die sich insbesondere bei skelettreichen Böden erheblich auf die Abschätzung der Kohlenstoffvorräte auswirken können. So verringert sich der Kohlenstoffvorrat eines Horizontes entsprechend dem prozentualen Anteil des ausgewiesenen Bodenskeletts.

Vorliegende Analysenergebnisse zu Kies-, Grus- oder Steingehalten wurden, soweit vorliegend, übernommen. Lagen keine bzw. unvollständige Analysendaten vor, mussten die Angaben zum Skelettgehalt aus den KA5-Profilaufnahmen des FIS-Boden entnommen werden. Zunächst wurde der Inhalt des Datenfeldes SKEL (Skelettgehalt) geprüft. Waren Angaben zum Skelettgehalt eingetragen, konnten diese für den jeweiligen Horizont übernommen werden. Lautete der Eintrag von SKEL beispielsweise „zz, 35“ kann ein Skelettvolumen von 35 % angenommen werden.

War das Datenfeld SKEL nicht mit einem gültigen Wert belegt, so musste die Ableitung des Skelettvolumens über die Datenfelder FS (Feinskelett) und GS (Grobskelett) erfolgen. Hierfür wurde vom LfULG eine Referenzliste mit allen in den FIS-Daten vorkommenden Kombinationen von Skelettart und Skelettanteil mit dem jeweils zugeordneten Wert für das Skelettvolumen bereitgestellt. Fehlten Angaben in einem der beiden Datenfelder wurde bei der Zuweisung des Skelettgehaltes von folgenden Annahmen ausgegangen:

Angabe ohne Skelett-Kurzzeichen (z. B. 3) → wird mit Stufe gleichgestellt und erhält Stufen-Minimum

Skelett-Kurzzeichen ohne Stufenangabe (z. B. G) → erhält Stufe 1 mit Stufen-Minimum

Ergab sich durch die Zuweisungen in Summe ein Skelettgehalt größer 100, so wurde ein Gesamt-Skelettvolumen des Horizonts von 90 % festgelegt.

Nachfolgende Abbildung 8 zeigt einen Auszug aus der Referenzliste zur Zuweisung des Skelettvolumens.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	FS	GS	SKEL	Verkettung	FS1	FS2	FS3	GS1	GS2	GS3	FSV1	FSV2	FSV3	GSV1	GSV2	GSV3	Summe Skelettvolumen
26	Gr4;;	0;;	,	Gr4;0;;	Gr4			0			25	0	0	0	0	0	25
27	G6;;	01;;	,	G6;01;;	G6			01			75	0	0	1	0	0	76
28	G4;;	0;;	,	G4;0;;	G4			0			25	0	0	0	0	0	25
29	0;;	0;;	,	0;0;0	0			0			0	0	0	0	0	0	0
30	03;;	0;;	,	03;0;;	3			0			10	0	0	0	0	0	10
116	G2;;	05;;	,	G2;05;;	G2		O5				2	0	0	50	0	0	52
117	Gr1;;	0;;	,	Gr1;0;;	Gr1			0			1	0	0	0	0	0	1
118	mGr5;;	fx3;;	,	mGr5;fx3;;	mGr5			fx3			50	0	0	10	0	0	60
119	mGr6;;	fx2;;	,	mGr6;fx2;;	mGr6			fx2			75	0	0	2	0	0	77
120	Gr3;;	0;;	,	Gr3;0;;	Gr3			0			10	0	0	0	0	0	10
121	G;;	-1;;	,	G;-1;;	G			-1			1	0	0	0	0	0	1
248	fg2;mG2;	0;;	0,0	fg2;mG2;0;;0,0	fg2	mG2					2	2	0	0	0	0	4
249	G;;	0;;	0,0	G;;0;0,0	G			0			1	0	0	0	0	0	1
250	Gr4;;	0;;	0,0	Gr4;0;0,0	Gr4			0			25	0	0	0	0	0	25
251	Gr6;;	X1;;	0,0	Gr6;X1;0,0	Gr6		X1				75	0	0	1	0	0	76
252	G2;;	0;;	-1,0	G2;0;;-1,0	G2			0			2	0	0	0	0	0	2
253	fg1;gG1;	0;;	-1,0	fg1;gG1;0;;-1,0	fg1	gG1		0			1	1	0	0	0	0	2
254	fg1;mG1;gG1	0;;	-1,0	fg1;mG1;gG10;;-1,0	fg1	mG1	gG1	0			1	1	1	0	0	0	3
255	fg2;mG1;gG1	fO1;;	-1,0	fg2;mG1;gG1fO1;;-1,0	fg2	mG1	gG1	fO1			2	1	1	1	0	0	5
256	fGr2;mGr;gGr	fx4;;	,	fGr2;mGr;gGrfx4;;	fGr2	mGr	gGr	fx4			2	1	1	25	0	0	29
257	fGr3;mGr;gGr	-1;;	,	fGr3;mGr;gGr-1;;	fGr3	mGr	gGr	-1			10	1	1	0	0	0	12
258	fGr6;mGr;	fx6;;	,	fGr6;mGr;fx6;;	fGr6	mGr		fx6			75	1	0	75	0	0	151
259	fGr1;mGr;	-1;;	,	fGr1;mGr;-1;;	fGr1	mGr		-1			1	1	0	0	0	0	2
260	fg3;mG;gG	fx1;;	,	fg3;mG;gGfx1;;	fg3	mG	gG	fx1			10	1	1	1	0	0	13
261	fGr2;mGr;gGr	fx5;fx;	,	fGr2;mGr;gGrfx5;fx;;	fGr2	mGr	gGr	fx5	fx		2	1	1	50	1	0	55

Abbildung 8: Auszug aus der Referenzliste zur Zuordnung des Skelettvolumens.

4.4 Zusammenstellung des Datenbestandes zur Vorratsberechnung

Die Berechnung der C-Vorräte erfolgte unter anderem für die Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm, wobei einzelne Horizonte, falls nötig, anteilig in die Berechnungen eingeflossen sind. Für Horizonte ohne Angaben zum Corg-Gehalt war eine Berechnung des C-Vorrates nicht möglich. Bei Profilen mit fehlender Angabe zur Trockenrohddichte einzelner Horizonte erfolgte zunächst deren Einstufung als „unvollständig“.

Die 615 Profile, bei denen über alle Horizonte die Informationen vollständig vorhanden und mit Analysewerten untersetzt waren, wurden als Qualität-1-Profile eingestuft. Bei 187 Profilen lagen für einzelne Horizonte alle benötigten Daten vor, bei einigen Horizonten fehlten allerdings Angaben zur Trockenrohddichte. Für diese Profile wurde eine Tiefenallokation durchgeführt und die Angabe der Trockenrohddichte aus dem jeweils überlagernden Horizont übernommen (Ausnahme: wenn die TRD des 1. Horizontes fehlte, wurde die TRD aus dem darunterliegenden Horizont übertragen). Diese Profile wurden der Qualität 2 zugeordnet. Demzufolge konnten insgesamt 802 Profile den Qualitäten 1 & 2 zugerechnet werden.

Weiterhin gab es Profile, für deren Horizonte keinerlei Angaben zur Trockenrohddichte vorlagen. Hier wurde die Trockenrohddichte mit Hilfe der Pedotransferfunktionen nach HOLLIS et al. (2012) berechnet (vgl. Kapitel 4.2). Grundlage zur Durchführung der Berechnung ist das Vorliegen einer horizontbezogenen Körnungsanalyse. Profile, bei denen für jeden Horizont eine Körnungsanalyse existierte, wurden als Qualität 3 eingestuft (Anzahl: 1.704).

Bei den 978 Qualität-4-Profilen fehlten Körnungsanalysen einzelner Horizonte. Nach genauerer Prüfung konnten diese Profile aber als vollständig deklariert werden, da für die zur Vorratsberechnung herangezogenen Horizonte alle benötigten Eingangsdaten vorlagen. Angaben zum C_{org} -Gehalt fehlten zu meist bei Untergrundhorizonten (C-Horizonten) oder die Horizonte waren in der Profilbeschreibung des FIS-Boden als humusfrei (h_0) gekennzeichnet. Diese Horizonte gingen nicht in die unmittelbare Vorratsberechnung ein. Folglich war auch keine Ableitung der TRD-Werte für diese erforderlich. Sie konnten daher vernachlässigt werden.

25 Profilen wurde die Qualität 5 zugewiesen, Hier lagen zwar C_{org} -Gehalte zu den Horizonten vor, jedoch fehlten die zur Ableitung der TRD erforderlichen Körnungsanalysen. Es erfolgte eine Ergänzung bzw. Übernahme der Körnungsanalysen überlagernder Horizonte in Form einer Tiefenallokation.

Bei weiteren 12 Profilen lagen Informationen zu den Körnungen nur bis zu einer Tiefe von 0,6 m vor. Für tiefer gelegene Horizonte wurden die Körnungsanalysen des darüber liegenden Horizontes bis 1 m Tiefe übernommen und die Profile als Qualität 6 eingestuft.

Zusätzlich wurden die 272 Profile der Bodenzustandserhebung unter Wald (BZE Wald) in die Ableitung der C-Vorräte einbezogen. Für diese lagen bereits tiefenstufenbezogene Vorratsergebnisse vor.

Nach Abschluss der Datenaufbereitungen lagen somit 3.521 Profile des FIS-Boden für C-Vorratsberechnungen vor. Einschließlich der 272 Vorratsergebnisse der Bodenzustandserhebung des Sachsenforsts standen insgesamt 3.793 Profilergebnisse zur Übertragung auf die Polygone der BK50 zur Verfügung.

Den einzelnen Ansätzen wurden entsprechend den in die Vorratsberechnung eingehenden Daten unterschiedliche Qualitäten zugeordnet. Die Berechnungen der Qualitäten Q1 bis Q4 beruhen auf vorliegenden Analyseergebnisse zum C_{org} -Gehalt sowie zur Körnung. Einen Überblick über die eingehenden Bodenprofile und deren sich aus der Datenaufbereitung ergebenden Einteilung in Qualitätsstufen liefert Tabelle 7. Die Verteilung der Profilstandorte mit Vorratsberechnungen über Sachsen zeigt Abbildung 9.

Tabelle 7: Bodenprofile für Vorratsberechnungen und Einteilung in Qualitätsstufen.

Qualität/Quelle	Anzahl	Bemerkung
Q1	615	Profile mit Analysen der TRD (vollständig über alle Horizonte)
Q2	187	Profile mit Analysen zur TRD aber fehlender TRD in einzelnen Horizonten → Tiefenallokation durchgeführt
Q3	1.704	Profile mit vollständigen Körnungsanalysen, TRD nach HOLLIS et al. (2012) berechnet
Q4	978	Profile bei denen Körnungsanalysen für alle relevanten Horizonte vorhanden waren → Berechnung der TRD nach HOLLIS et al. (2012)
Q5	25	Profile mit Horizonten ohne Körnungsanalyse, aber Ergänzung durch Übernahme der Werte darüber liegender Horizonte → Berechnung der TRD nach HOLLIS et al. (2012)
Q6	12	Profile mit Körnungsanalyse bis mind. 0,60 m Tiefe → auf 1 m Tiefe verlängert (Wert übernommen) → Berechnung der TRD nach HOLLIS et al. (2012)
BZE Forst	272	Profile, die aus der BZE Forst übernommen wurden, Profile bis 0,9 m Tiefe → auf 1 m Tiefe verlängert (Wert übernommen)
Summe	3.793	

Mit ansteigender Qualitätsstufe treten bei den in die Vorratsberechnung eingehenden Bodenprofilen zunehmend Unsicherheiten auf. Alle ausgewiesenen Qualitätsstufen werden aber dennoch als geeignet zur Ableitung der C-Vorräte eingeschätzt. Auf eine Einbeziehung der Kartiererergebnisse wurde aufgrund der hier deutlich geringeren Datenqualität verzichtet (vgl. Kapitel 4.1).

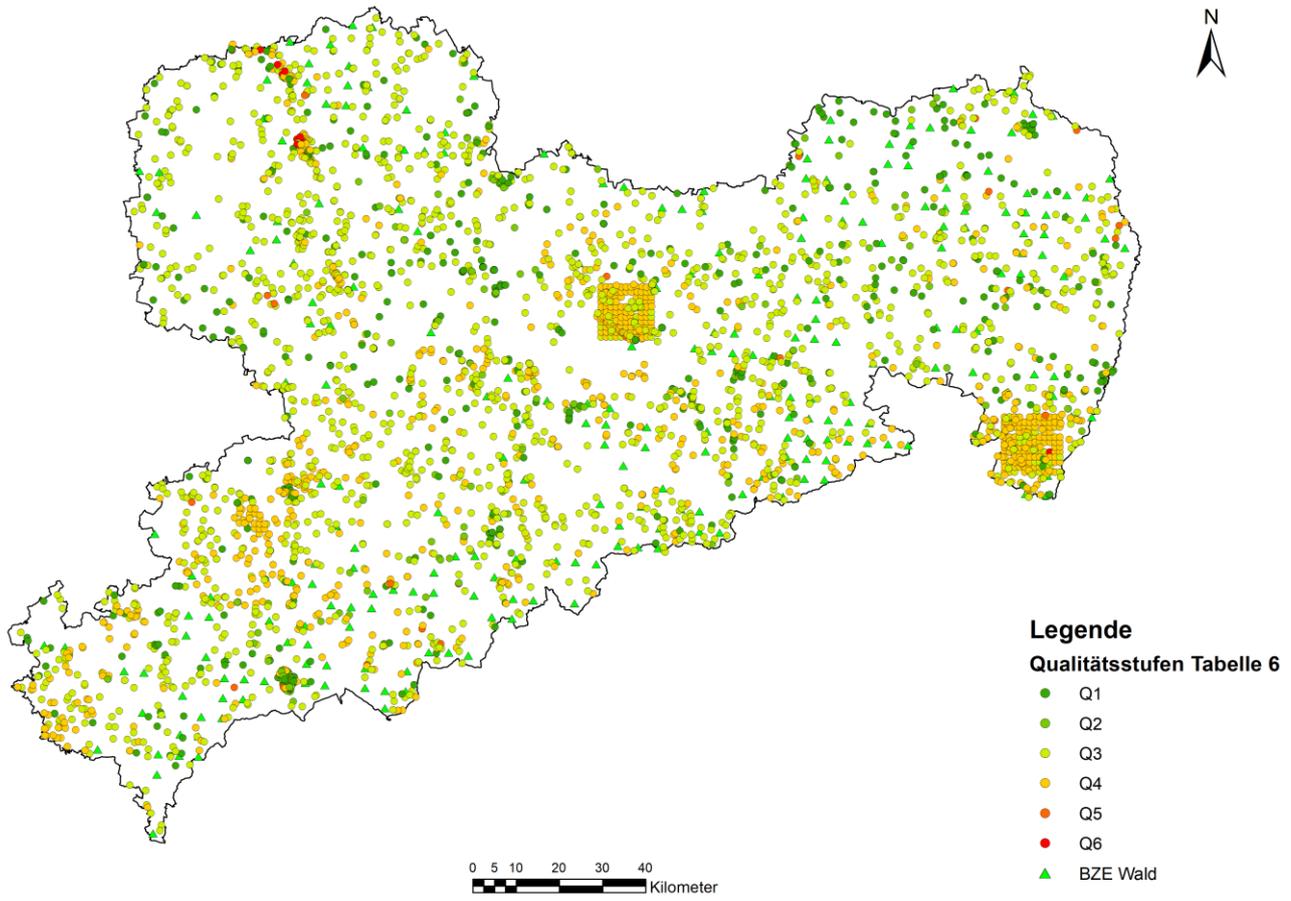


Abbildung 9: Profilstandorte mit Vorratsberechnungen (n = 3.793).

5 Ableitung der Kohlenstoffvorräte Sachsens

5.1 Erste Abschätzung der C-Vorräte auf Basis der Leitprofile der BK50

Die BK50 stellt die Ergebnisse der bodenkundlichen Landesaufnahme für den Maßstab 1:50.000 dar. In der BK50 sind die Bodenformengesellschaften Sachsens (Leit- und Begleitbodenformen) abgegrenzt und jeweils Bodentyp und Substrattyp benannt. Die detaillierte Horizontabfolge der Leitbodenformen wird mit charakteristischen Bodenparametern beschrieben wie z. B. Horizontsymbolen, Substraten, Bodenarten, Grobbodenanteilen, Carbonatstufen, Humusstufen und bodenhydrologischen Kennwerten. In der seit 2020 vorliegenden Fassung sind bei den Leitprofilen laboranalytisch bestimmte Parameter berücksichtigt. Zudem erfolgte ein Abgleich zwischen Feld- und Labordaten (BRÄUNIG 2020).

Die BK50 unterteilt die Böden Sachsens in 1133 Bodengesellschaften gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5). Zu den Leitbodenformen stehen zusätzlich bodensystematische Beschreibungen und Bodenkennwerte zu 4709 Bodenhorizonten zur Verfügung.

Um zu einer ersten Abschätzung zu gelangen, wurden die Kohlenstoffvorräte für die Legendeneinheiten (Leitprofile) der BK50 abgeleitet. Die zur Vorratsberechnung benötigten Parameter (vergl. Kapitel 0) wurden der Generallegende der BK50 entnommen, die in Form einer Excel-Tabelle vorliegt. Es handelt sich dabei um die horizontbezogenen Kennwerte aus den Datenfeldern:

- Horizontmächtigkeit (MAE) abgeleitet aus OTIEF und UTIEF
- Humusstufe (HUMUS)
- Stufe Trockenrohddichte (TRD_ST)
- Skelettvolumen in % (SKV)

Da in der Generallegende für den Humusgehalt und die Trockenrohddichte (TRD) lediglich Stufenangaben vorliegen, erfolgte vorab eine Wertzuordnung, die aus nachfolgender Tabelle 8 ersichtlich ist.

Tabelle 8: Zuordnung Humusstufen und TRD-Stufen der Generallegende BK50.

Stufe	Humus in %	TRD-Stufe	TRD in g/m ³
h0	0,0	td0	0,9
h1	0,5	td1	1,1
h2	1,5	td2	1,3
h3	3,0	td3	1,5
h4	6,0	td4	1,7
h5	11,5	td5	1,9
h6	22,5		
h7	35,0		

Entsprechend der in Kapitel 3 beschriebenen methodischen Vorgehensweise wurden die C-Vorräte der BK50-Legendeneinheiten berechnet. In Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Vorratswerte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm ohne Berücksichtigung der organischen Auflagen dargestellt.

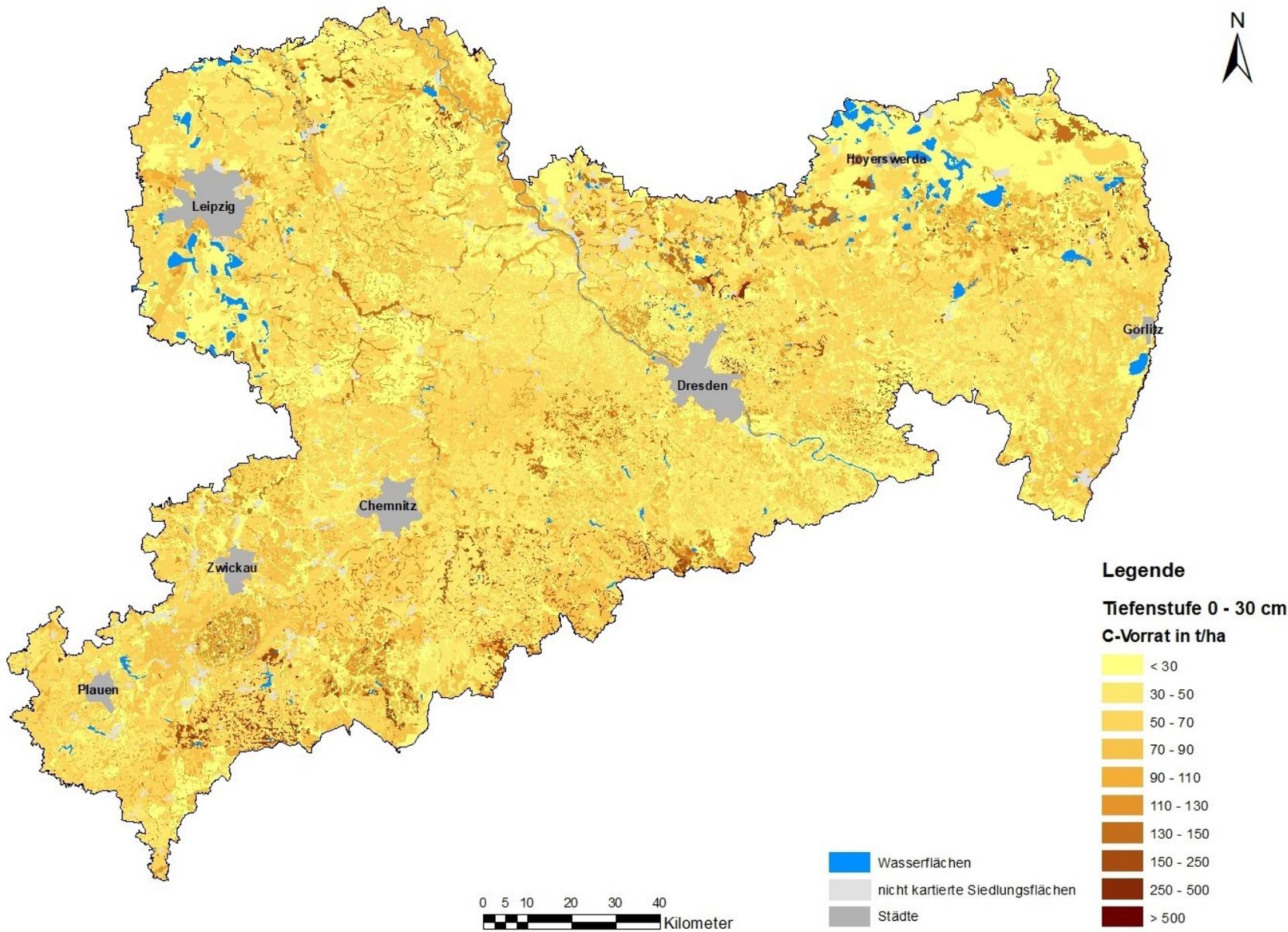


Abbildung 10: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 0-30 cm.

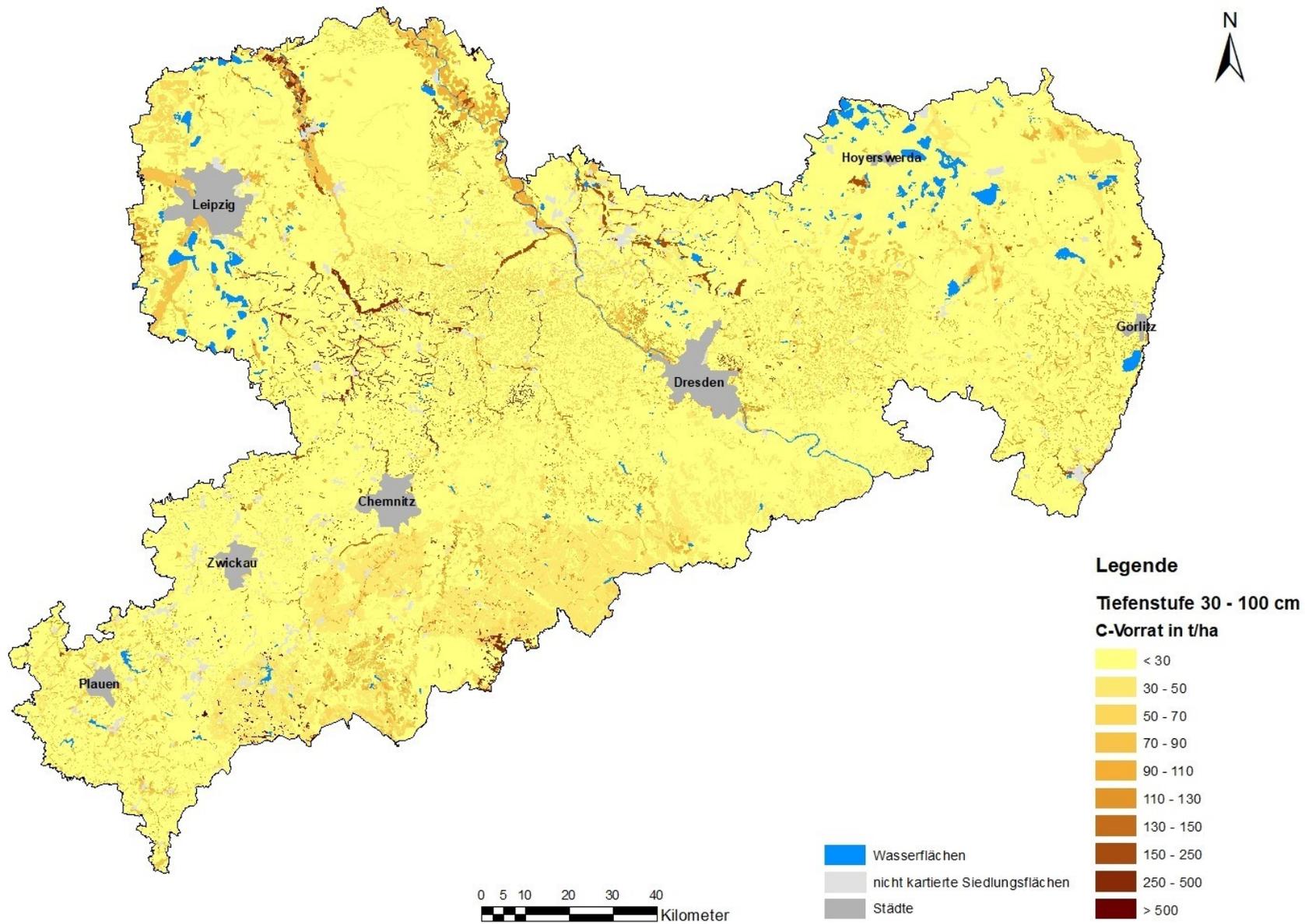


Abbildung 11: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 30-100 cm.

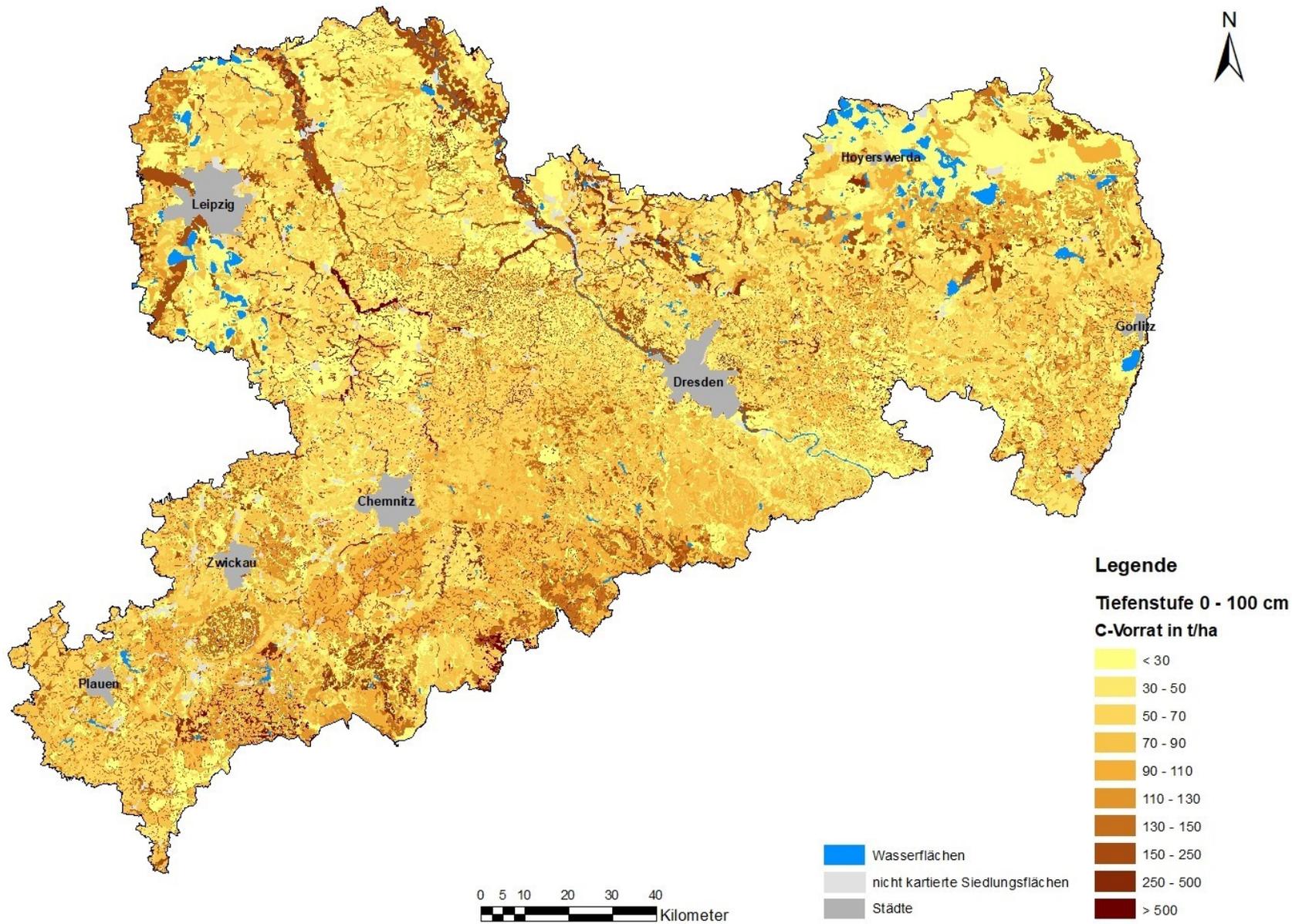


Abbildung 12: Erste Abschätzung der Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Leitprofile der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm.

5.2 Übertragung der Vorratsergebnisse auf die Polygone der BK50

Nach einer ersten Abschätzung der C-Vorräte auf Basis der Leitprofile der BK50 (Kapitel 5.1) erfolgte die eigentliche Herleitung der C-Vorratskarten Sachsens. Als geometrische Grundlage zur Darstellung der berechneten Vorratsergebnisse dienten die Polygone der BK50 Sachsens. Erst durch die Übertragung der Punktdaten in die Fläche wird eine flächenhafte Darstellung und Auswertung der Kohlenstoffvorräte Sachsens ermöglicht. Die Regionalisierung der Vorratsergebnisse erfolgte unter Nutzung eines geographischen Informationssystems (GIS).

Nachdem die profilbezogenen Vorräte für die jeweiligen Tiefenstufen vorlagen, erfolgte eine Verschneidung dieser Profile mit den ca. 62.600 Polygonen der Bodenkarte BK50 per GIS. Berücksichtigt wurden sowohl die 3.521 FIS-Profile der Qualitätsstufen Q1 bis Q6, als auch die 272 BZE-Profile des Sachsenforst (vgl. Kapitel 4). Für Letztere lagen nur C-Vorräte für Mineralbodenhorizonte bis zu einer Tiefe von 90 cm vor. Hier erfolgte eine Verlängerung des Profils bis in 100 cm Tiefe ohne zusätzliche Vorratsberechnung. Es wurde davon ausgegangen, dass in einer Tiefe von 90-100 cm nur noch sehr geringe Humusgehalte und somit auch geringe Humusvorräte vorliegen. Unberücksichtigt blieben Profile, die außerhalb von Sachsen bzw. des BK50-Umrisses lagen. Letztlich konnte bei der Regionalisierung auf die Vorratsergebnisse von 3.793 Profilen zurückgegriffen werden.

Für die Übertragung der Punktdaten in die Fläche wurden die Geometrien der BK50 verwendet. Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden verschiedene Ansätze verfolgt und sich letztlich für eine direkte Übertragung der Punktdaten (C-Vorräte) auf die Polygone der BK50 über eine Mittelwertbildung je Legendeneinheit entschieden, um auch der Variabilität der Legendeneinheiten, ausgedrückt in Leit- und Begleitböden, gerecht zu werden.

Für jede Legendeneinheit der BK50 wurde ein mittlerer C-Vorrat bezogen auf die Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm abgeleitet. Die mittleren C-Vorratswerte der Legendeneinheiten wurden anschließend auf Polygone mit gleicher Information übertragen und kartographisch dargestellt. Bei Legendeneinheiten, für die keine Profile mit vollständigen Analysendaten vorlagen, mussten die C-Vorratswerte des Leitprofils der BK50-Legendeneinheit übernommen werden (siehe Kapitel 5.1). Dies betraf insgesamt 142 Legendeneinheiten die jedoch nur eine Gesamtfläche von ca. 54.250 ha ausmachen (entspricht ca. 3 % der Landesfläche Sachsens).

Polygone, die laut BK50 den Nutzungen Siedlung oder Gewässer zugeordnet waren (Legendenummer 8888 für Siedlung und 9999 für Gewässer), blieben bei der C-Vorratsberechnung unberücksichtigt.

Die abgeleiteten organischen Kohlenstoffvorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm können den Abbildungen 13 bis 16 entnommen werden. Die organischen Auflagehorizonte unter Wald wurden bei der Darstellung nicht berücksichtigt.

Das Verteilungsmuster lässt sich auf unterschiedliche Faktoren, wie z. B. Vernässung (Hydromorphie), Substrateigenschaften und Landnutzungsmuster zurückführen. So lassen sich vor allem bei der Darstellung der Tiefenstufe 0-100 cm neben den Auenbereichen im nördlichen Teil von Sachsen auch Teile des Erzgebirges mit ausgedehnten Wäldern und Moorkommen als vorratsreichere Regionen ausmachen. Geringe C-Vorräte sind dagegen im Gebiet der zumeist sandigen Böden der nördlichen Oberlausitz ausgewiesen (Region um Weißwasser).

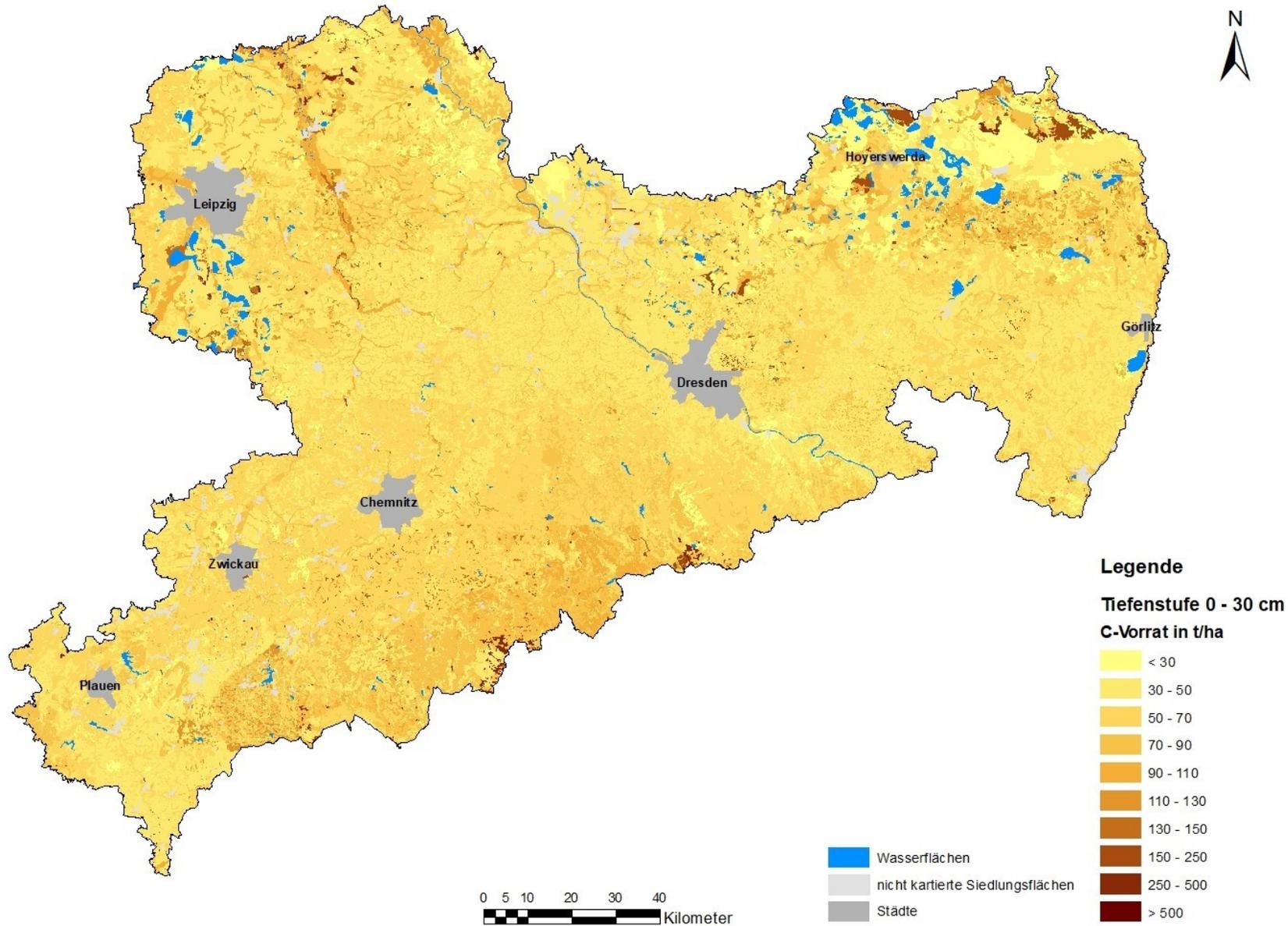


Abbildung 13: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-30 cm.

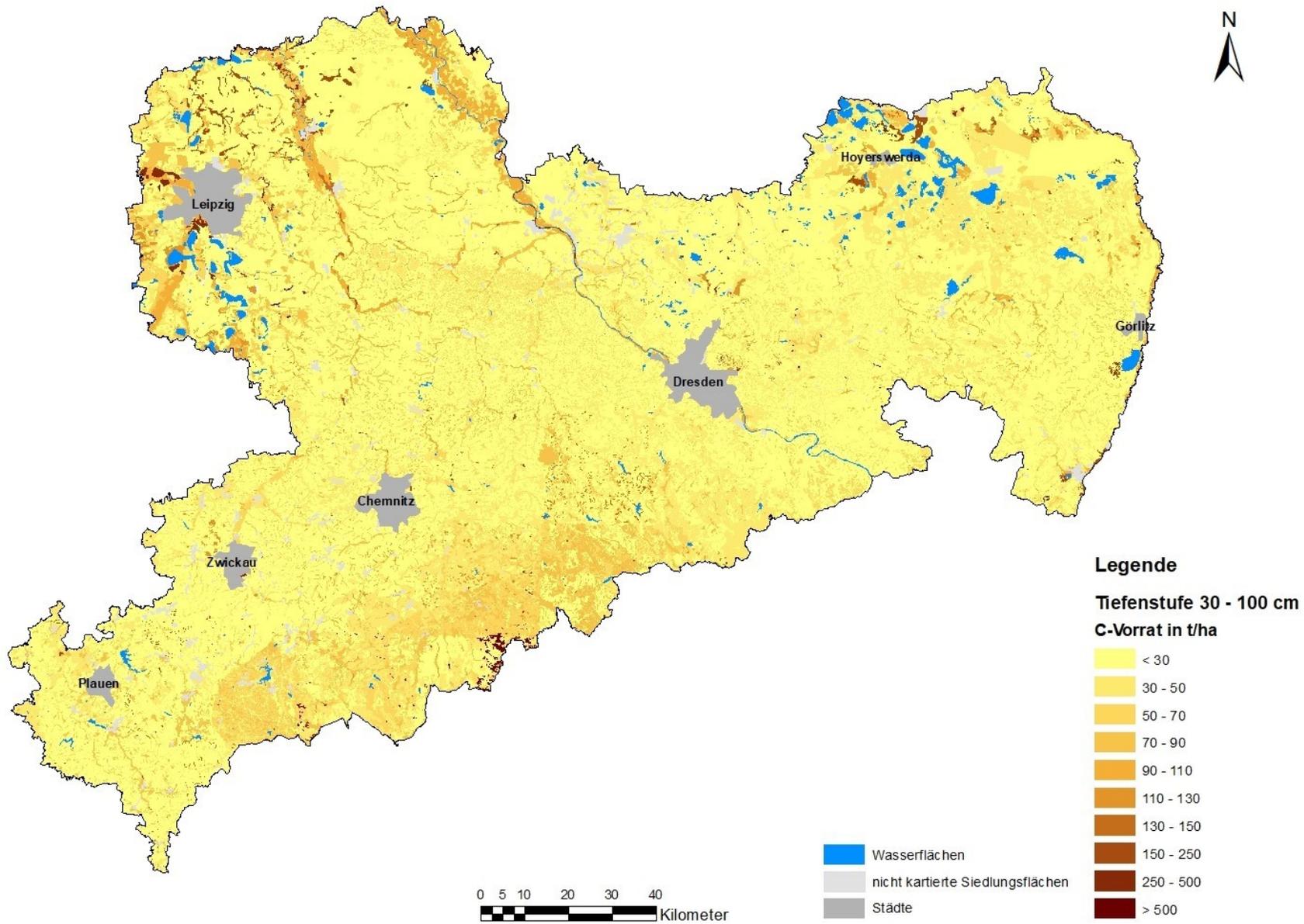


Abbildung 14: Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 30-100 cm.

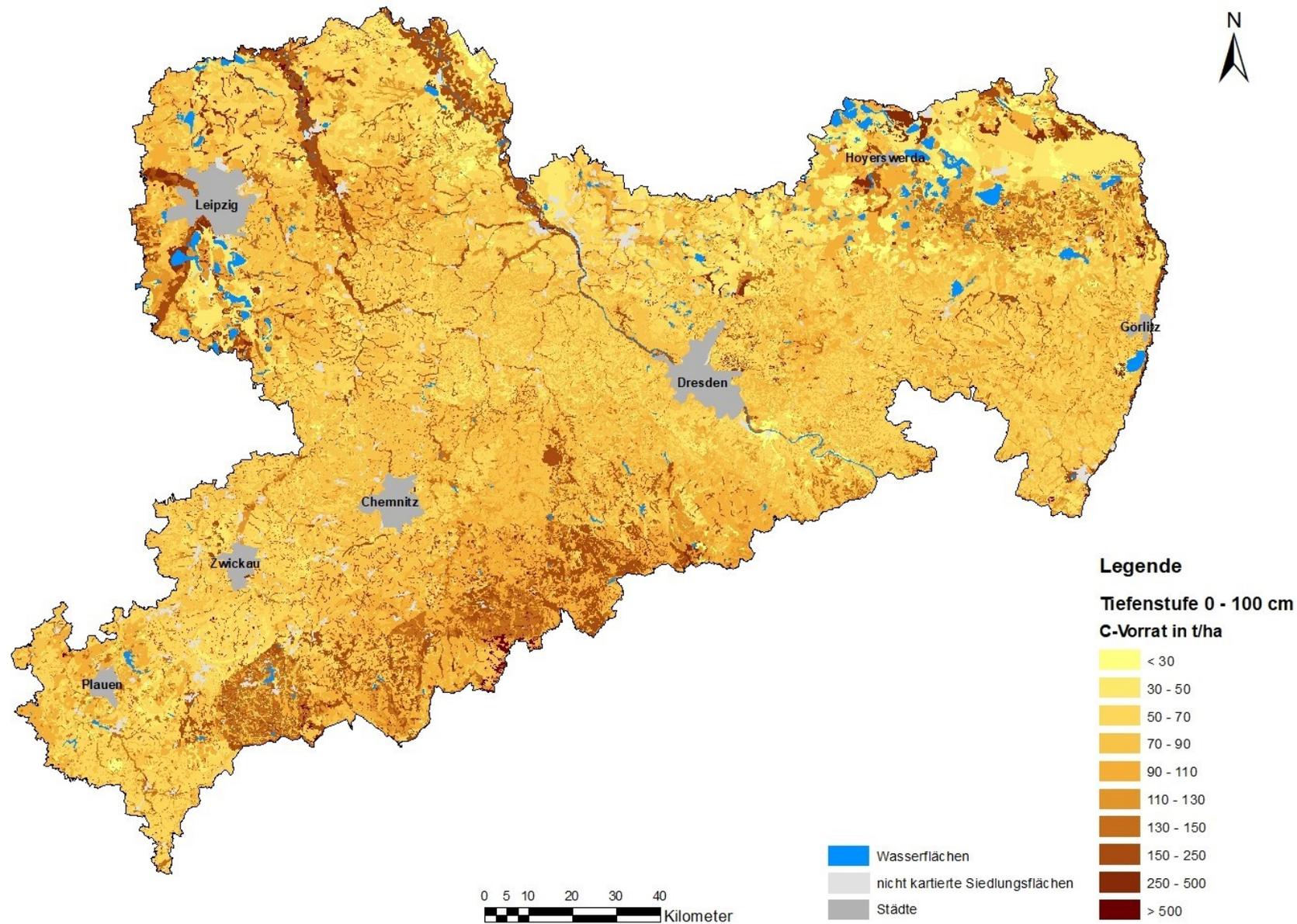


Abbildung 15: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm.

5.3 Kohlenstoffvorräte in den Böden Sachsens

Auf Basis der in Kapitel 5.2 dargelegten Übertragung in die Fläche wurden anschließend Vorratsberechnungen, bezogen auf die Landesfläche Sachsens, durchgeführt. Um die flächenbezogenen Vorräte berechnen zu können, mussten die in t/ha vorliegenden Vorratsergebnisse mit den Flächengrößen der BK50-Polygone multipliziert werden. Auf diese Weise kann der Kohlenstoffvorrat für eine Fläche nach Tiefenstufen differenziert ausgegeben werden.

Die Ergebnisse der 3 Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm sind in Tabelle 9 zusammengestellt. In der Tabelle sind zudem die Berechnungsergebnisse der ersten Abschätzung auf Basis der Legendeneinheiten (Leitprofile) der BK50 (Kapitel 5.1) mit enthalten.

Tabelle 9: Berechnete C-Vorräte sächsischer Böden (ohne org. Auflagen unter Wald) in den Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm.

Datenbestand	Vorrat 0-30 cm [1.000 t]	Vorrat 30-100 cm [1.000 t]	Vorrat 0-100 cm [1.000 t]
Übertragung C-Vorräte auf die Legendeneinheiten	99.876,0	60.567,1	160.443,1
Leitprofile der BK50 (erste Abschätzung)	97.241,7	42.368,5	139.610,2

Vergleicht man die Vorratsangaben in Tabelle 9, so lässt sich festhalten, dass sich die errechneten C-Vorräte in Tonnen je nach Datengrundlage mehr oder weniger unterscheiden. Bei Übertragung der Profilergebnisse auf die Polygone der BK50 ergeben sich für die Tiefenstufe 0-30 cm Vorräte in Höhe von ca. 99,88 Mio. Tonnen. Die auf Basis der Leitprofilangaben der BK50 berechneten Vorräte liegen mit 97,24 Mio. Tonnen nur unwesentlich (ca. 2,5 %) unterhalb dieses Vorratswertes. Deutlich größere Abweichungen ergeben sich jedoch bei Betrachtung der Tiefenstufe 0-100 cm bzw. 30-100 cm. Hier unterscheiden sich die Vorratswerte um ca. 13 % (0-100 cm) bzw. um ca. 30 % (30-100 cm). Die sich absolute ergebende Differenz zwischen den beiden Ansätzen kann mit ca. 20 Mio. Tonnen angegeben werden, die im Wesentlichen auf die Vorratswerte des Unterbodens (Tiefenstufe 30-100 cm) zurückzuführen ist.

In Rahmen einer bereits im Jahr 2011 durchgeführten Untersuchung des LfULG (BARTH et al. 2011) wurden am Beispiel von ausgewählten Dauerbeobachtungsflächen die Kohlenstoff- bzw. Humusvorräte der Böden Sachsens abgeleitet. Grundlage waren auch hier die Daten des FIS-Boden. Gemäß der damaligen Untersuchung sind in den Böden Sachsens rund 152 Mio. t Kohlenstoff gespeichert. Die Werte bezogen sich laut Originaldaten auf eine Tiefe von 0 bis 60 cm unter Berücksichtigung der organischen Auflagen unter Wald. Die aktuell für Sachsen abgeleiteten Kohlenstoffvorräte der Tiefenstufe 0-60 cm

inkl. organischer Auflagen (siehe Kapitel 5.5) können mit ca. 157 Mio. Tonnen angegeben werden. Sie liegen nur geringfügig (3 %) über den Werten, die in 2011 abgeleitet wurden.

5.4 Kohlenstoffvorräte in den Torfen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nässtandorte (SIMON)

Moore und organische Nässtandorte sind von besonderer Bedeutung für den Kohlenstoffhaushalt. So findet man gemäß BK50 Hoch- und Niedermoore, Erd- und Mulmmoore sowie Moorgleye verbreitet in Sachsen vor. Die Polygone der BK50 decken jedoch maßstabsbedingt nicht alle Moorflächen ab, die in Sachsen bekannt sind. Aus dem sächsischen Informationssystem für Moore und organische Nässtandorte (SIMON) können zusätzlich ca. 25.500 ha Moor-Verbreitungsflächen mit Angaben zur Torfmächtigkeit entnommen werden, die sich nicht mit der in der BK50 dargestellten Torfverbreitung decken.

Je nach Kartierungszweck und Methodik wurden Moore und Nässtandorte in unterschiedlichen Kartenwerken, Maßstäben und Kartierungsgrenzen erfasst und dargestellt. Zur möglichst vollständigen Erfassung im SIMON wurden die Moorflächen aus einem Verschnitt digital vorliegender Daten als Maximalumriss auf Basis nachfolgend aufgelisteter Karten bzw. Datenquellen abgeleitet:

- Geologische Karte im Maßstab 1 : 25.000 (GK 25),
- Geologische Karte im Maßstab 1 : 50.000 (Karten der eiszeitlich bedeckten Gebiete (GK 50dig) und Geologische Karte Erzgebirge/ Vogtland (GK 50),
- Bodenkonzeptkarte im Maßstab 1 : 25.000 (BKkonz).
- Informationssystem Sächsische Natura-2000-Datenbank (IS SaND),
- Selektive Biotopkartierung (2. Durchgang) SBK.

Zur Vorratsberechnung sind neben der flächenmäßigen Verbreitung der Moore und Nässtandorte aber auch Informationen zur Mächtigkeit der anstehenden Torfe erforderlich. Zur Abgrenzung der Flächen hinsichtlich ihrer Torfmächtigkeit wurde im SIMON die sachsenweit vorliegende Bodenkonzeptkarte 1 : 25.000 (BKkonz) herangezogen. Folgende Klassifizierung liegt vor:

- Torfkerne (Torf > 70 cm),
- bodenkundliche Moorflächen mit flacher Torfauflage (Torf 30 cm bis 70 cm),
- organische Nassstandorte (Torf < 30 cm) und
- vegetationskundlicher Nassstandort (ohne kartierte Torfauflage).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die BKkonz (Maßstab 1 : 25.000) bereits zu Beginn der 1990er Jahre aus der Kombination der forstlichen Standortkartierung (FSK, Maßstab 1 : 10.000) und der landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK, Maßstab 1 : 100.000) hervorgegangen ist und es sich daher um keine aktuelle Datengrundlage handelt. Infolge der Ableitung der Moorkomplexe und der Torfkerne aus vorhandenen Kartierungen entsprechen die Abgrenzungen auch nicht immer den realen Gegebenheiten vor Ort. Kartografische Fehler wie Lageverschiebungen, unterschiedliche Georeferenzierungen sowie unterschiedliche Kartiermaßstäbe und -grenzen, aber auch fachliche und zeitliche Faktoren sind hier von Bedeutung. Neben ungenauer/fehlerhafter Abgrenzungen bei der Kartierung kann auch Torfschwund infolge von Entwässerung zu einer Verringerung der Torffläche und -mächtigkeit seit der Erstaufnahme geführt haben. Zudem sind Übersetzungsfehler bei den Mooren der BKkonz bekannt, die noch einer Korrektur bedürfen und bei der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten.

Die Torfmächtigkeit im SIMON ist, wie oben beschrieben, in 3 Klassen unterteilt: < 0,3 m; 0,3 bis 0,7 m und > 0,7 m. Bei Vorgabemittlerer Torfmächtigkeiten (0,15 m / 0,5 m / 0,9 m) lassen sich für die Torfverbreitungsflächen des Moorinformationssystems flächenbezogene C-Vorräte abschätzen. Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Zuordnung der Torfflächen zu Hoch- oder Niedermoorbildungen erfolgte über die im SIMON vorliegenden Informationen der Bodenkonzeptkarte 1 : 25.000 (BKKonz). Flächen, die nicht in der BKKonz berücksichtigt sind und die Mächtigkeiten > 0,3 m aufwiesen, wurde der Typ Niedermoor (HN) zugewiesen. Bei Mächtigkeiten < 0,3 m wurden die Flächen als Anmoorstandorte (AMO) betrachtet.
- Der C_{org}-Gehalt der Moore/Torfe wird wie folgt eingeschätzt:
 HH; HN; HU: 30,0 % (Mittelwert vorliegender C_{org}-Gehalte > 17,5 % [h7]; n = 160)
 AMO: 11,5 % (Mittelwert vorliegender C_{org}-Gehalte > 8,7 bis < 17,5 % [h6]; n = 349)
- Für Niedermoor- und Übergangsmoore wird eine Trockenrohddichte von 0,25 g/m³, für Hochmoorbildungen von 0,15 g/cm³ angesetzt. Die Werte wurden ebenfalls aus den vorliegenden Analysen des FIS-Boden-Datenbestandes abgeleitet.
 Für anmoorige Böden lässt sich eine mittlere Trockenrohddichte von 0,80 g/m³ berechnen.
- Es wurde davon ausgegangen, dass kein Bodenskelett vorhanden ist. Der Korrekturfaktor für das Skelettvolumen (SKV) wird auf 1,0 festgesetzt.

Auf der Grundlage dieser Annahmen konnten für alle Torfverbreitungsflächen des SIMON C-Vorräte abgeleitet werden. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Tabelle 10 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 10: C-Vorratsberechnung für die Flächen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nasstandorte (SIMON).

Datenbestand	Kurz	Fläche in ha	Vorrat [1.000 t]	Vorrat [t/ha]	Anteil% Landesfläche
Anmoorige Böden	AMO	8.080	1.115,4	138,0	0,44
Hochmoor	HHn	5.450	677,2	124,3	0,30
Niedermoor	HNn	10.630	2.577,6	242,5	0,58
Übergangsmoor	HNu	1.300	183,2	140,9	0,07
Summe		25.460	4.553,4	178,8	1,39

Durch Einbeziehung der Daten des Moorinformationssystems SIMON können die in Sachsen verbreiteten und detailliert erfassten organischen Böden ergänzend bei den Vorratsberechnungen berücksichtigt werden. In Summe ergeben sich für die nicht im Moorverbreitungsgebiet der BK50 liegenden Flächen, die Angaben zur Torfmächtigkeit aufweisen, zusätzliche Kohlenstoffvorräte in Höhe von ca. 4,5 Mio. Tonnen. Bei einem Anteil von ca. 1,4 % an der Landesfläche entspricht dies im Mittel einem C-Vorrat von 179 t/ha.

Abbildung 16 zeigt die Verteilung der berücksichtigten Moor- und Torfverbreitungsflächen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte SIMON. Neben der Lage der Flächen können der Abbildung auch die klassifizierten C-Vorräte in t/ha entnommen werden.

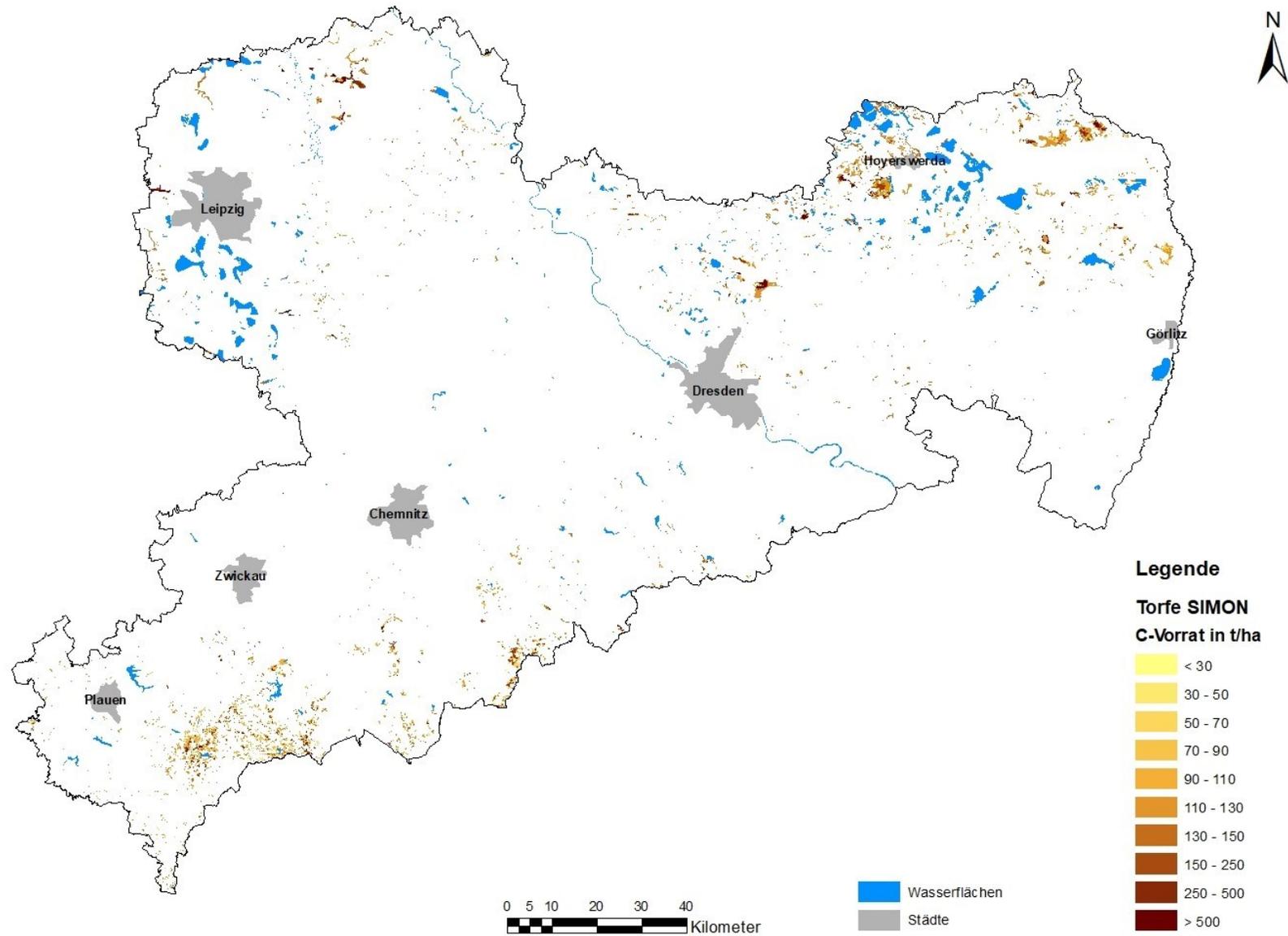


Abbildung 16: Kohlenstoffvorräte (ohne org. Auflagen) in t/ha der Moor- und Torfverbreitungsflächen des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nasstandorte (SIMON).

5.5 Kohlenstoffvorräte in den organischen Auflagehorizonten

Aufgrund der nicht ausreichenden Datenlage konnten die im FIS-Boden vorhandenen organischen Humusaufgaben der Böden unter forstlicher Nutzung nicht direkt in die Vorratsberechnungen einbezogen werden. Flächendeckende Informationen liegen derzeit nicht vor, so dass eine gesicherte Berechnung von C-Vorräten in den Auflagehorizonten für ganz Sachsen nicht möglich war. Auf Grundlage der vorhandenen Daten kann lediglich eine Abschätzung der Vorratsmengen erfolgen.

Die mittleren Kohlenstoffgehalte der Auflagehorizonte schwanken in Auswertung der vorliegenden Analyseergebnisse zwischen ca. 25 und 43 %. Im Mittel lässt sich aus den ca. 1.600 Analysen der Auflagen ein C_{org} -Gehalt von 30,18 % ableiten.

Trockenrohdichten der Auflagehorizonte wurden nur im Rahmen zweier räumlich begrenzter Projekte ermittelt. Aus den 155 vorliegenden Datensätzen ergibt sich eine mittlere TRD von $0,153 \text{ g/cm}^3$.

Auf Basis der abgeleiteten Mittelwerte ergibt sich unter Vorgabe einer mittleren Mächtigkeit der Auflage von 5 cm rechnerisch ein Gesamtvorrat von ca. 18.690.300 t bezogen auf die gesamte Waldfläche Sachsens (519.820 ha). Dies entspricht einem flächenbezogenen Kohlenstoffvorrat von 35,96 t/ha.

Vergleicht man das Ergebnis der Vorratsabschätzung für die Auflagen der sächsischen Wälder mit dem in ZIRLEWAGEN (2016) angegebenen Vorratswert, so stellt sich eine sehr gute Übereinstimmung ein. Gemäß dem Berechnungsansatz von Zirlewagen sind rund 37 t/ha bzw. 29 % der für die Wälder Sachsens berechneten Vorräte in der Humusaufgabe gebunden. Bei einer Größe der sächsischen Waldfläche von ca. 519.820 ha ergibt sich daraus ein Gesamtvorrat von ca. 19.233.400 t. Im Vergleich zur vorliegenden Einschätzung auf Basis der Analysendaten des FIS-Boden liegt dieser Wert lediglich geringfügig (3 %) darüber.

Mit Blick auf einen Vergleich der C-Vorräte zwischen den wesentlichen Landnutzungsformen Acker, Grünland und Wald ist der Vorrat der organischen Auflage unbedingt mit einzubeziehen. Die Kohlenstoffvorräte der Böden Sachsens in der Tiefenstufe 0-100 cm inklusive der Vorräte der organischen Auflagehorizonte unter Waldnutzung sind in Abbildung 17 ersichtlich. Diese Karte bildet daher die Vorräte sowohl im Hinblick auf die Bodeneigenschaften, als auch die Landnutzungsunterschiede zwischen landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Nutzung ab.

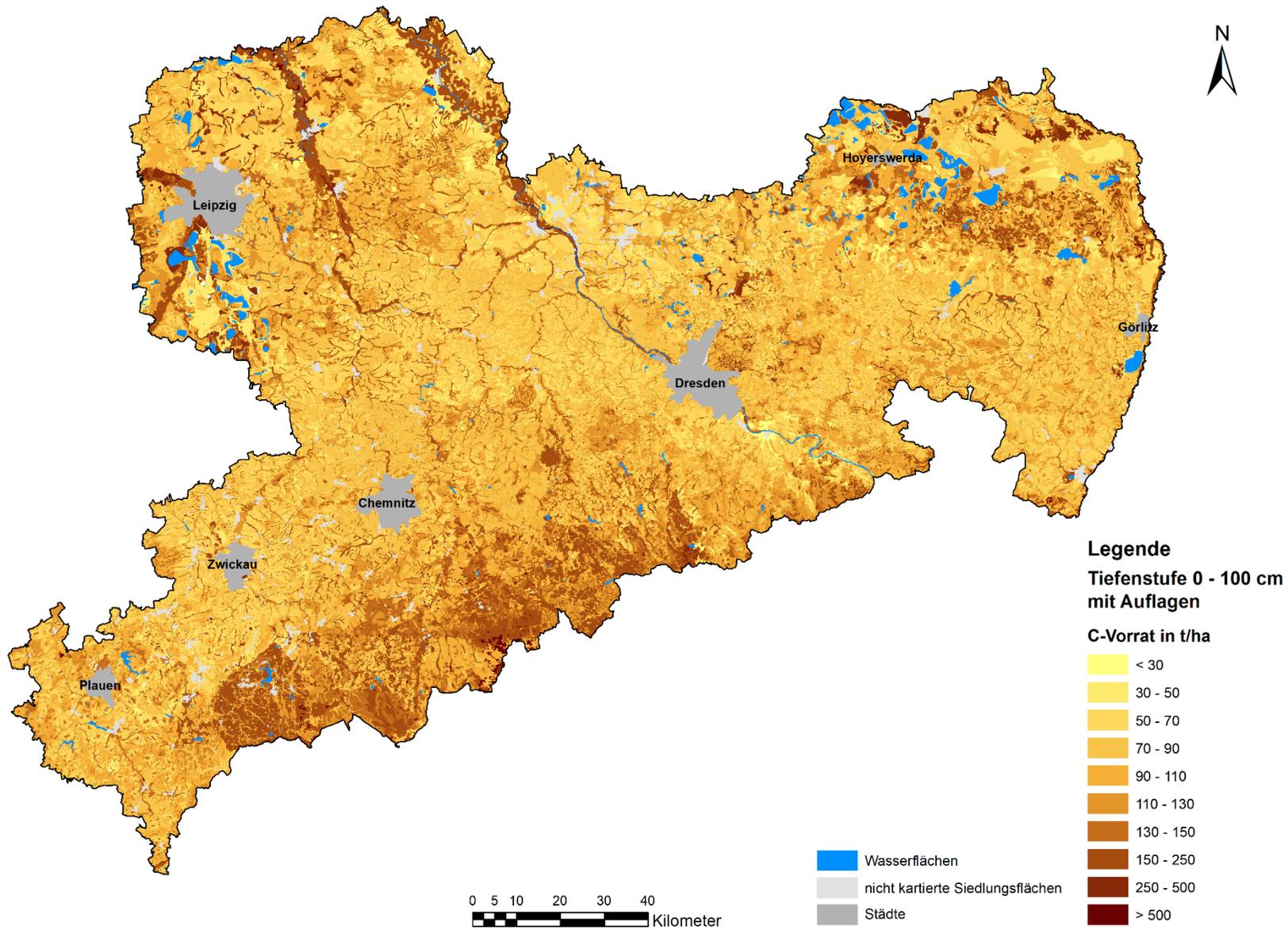


Abbildung 17: Kohlenstoffvorräte in t/ha auf Basis der Legendeneinheiten der BK50 – Tiefenstufe 0-100 cm (inkl. Auflagehorizonte).

5.6 Gesamt-Kohlenstoffvorräte Sachsens

Der gesamte mittlere Kohlenstoffvorrat der sächsischen Böden, betrachtet bis in eine Tiefe von 1 m, beläuft sich auf ca. 160 Mio. Tonnen (ohne org. Auflagen) bzw. ca. 180 Mio. Tonnen mit Einbezug der organischen Auflagen bei forstlicher Nutzung. Davon entfallen auf die im einzelnen ausgewiesenen Tiefenstufen bzw. Datenbestände:

- C-Vorräte organische Auflagen (im Mittel 5 cm): 18,69 Mio. Tonnen
- C-Vorräte 0-30 cm: 99,88 Mio. Tonnen
- C-Vorräte 30-100 cm: 60,57 Mio. Tonnen
- C-Vorräte 0-100 cm: 160,44 Mio. Tonnen

Der Gesamtvorrat an organischem Bodenkohlenstoff in der Tiefenstufe 0-30 cm (Oberböden) kann mit ca. 62 % angegeben werden. Mit zirka 38 % befindet sich mehr als ein Drittel der organischen Kohlenstoffvorräte im Unterboden der sächsischen Mineralböden (Tiefenstufe 30-100 cm). Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangte auch das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz in Auswertung der ersten deutschlandweiten Inventur landwirtschaftlicher Böden: Für die Tiefenstufe 30-100 cm wurde ein Gesamtvorrat an organischem Bodenkohlenstoff von 35 % angeführt (DON 2018).

Durch die ergänzende Auswertung der vorliegenden Daten des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte (SIMON) konnten zusätzlich zum Datenbestand der BK 50 folgende C-Vorräte abgeleitet werden:

- Zusätzliche C-Vorräte Moore SIMON: 4,55 Mio. Tonnen

Die Summe aller für Sachsen bilanzierter C-Vorräte (org. Auflagen + Böden 0-100 cm + nicht in der BK 50 erfasste Moore) lässt sich abschließend mit ca. 184 Mio. Tonnen angeben. Da ein Gramm Kohlenstoff 3,67 g CO₂ gleichzusetzen ist, entspricht dies einem Äquivalent von ca. 675 Mio. Tonnen CO₂.

6 Bilanzierungen

6.1 Kohlenstoffvorräte auf Basis bodensystematischer Einheiten

Die in der BK50 ausgewiesenen 1.133 Legendeneinheiten können anhand des jeweils dominierenden Leitbodentyps einer bodensystematischen Abteilung zugeordnet werden. Die Abteilungen werden entsprechend des vorherrschenden Wasserregimes unterschieden in terrestrische Böden (Landböden, vorwiegend abwärtsgerichtete Wasserbewegung), semiterrestrische Böden (Grundwasserböden, Wasserbewegung vorwiegend horizontal), Moore sowie semisubhydrische / subhydrische Böden (Unterswasserböden), wobei letztere in Sachsen keine bzw. nur eine nachgeordnete Rolle spielen.

In Tabelle 11 sind die sich für die Bodenabteilungen ergebenden Kohlenstoffvorräte nach Zuordnung der Legendeneinheiten der BK50 zusammengestellt. Nicht berücksichtigt wurden dabei die in der BK50 ausgewiesenen Siedlungs- oder Gewässerflächen (Legendenummer 8888 und 9999).

Tabelle 11: Kohlenstoffvorräte nach Bodenwasserhaushalt (Einteilung in Bodenabteilungen).

			C-Vorrat		C-Vorrat		C-Vorrat	
			0-30 cm	30-100 cm	0-100 cm	0-100 cm		
Bodenabteilung	Fläche[ha]	Flächenanteil [%]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]
Terrestrisch	1.509.355	81,9	77.837,7	51,6	43.152,5	28,6	120.990,2	80,2
Semiterrestrisch	259.444	14,1	20.217,4	77,9	15.280,7	58,9	35.498,0	136,8
Moore	8.701	0,5	1.820,9	209,3	2.134,0	245,3	3.954,9	454,5
Summe	1.777.500	96,5	99.876,0		60.567,2		160.443,1	

Die Legendeneinheit der terrestrischen Böden macht mit 81,9 % den weitaus größten Flächenanteil der BK50 aus, gefolgt von den Legendeneinheiten mit semiterrestrischen Böden mit 14,1 % und den Mooren mit 0,5 %. Das vorherrschende Wasserregime beeinflusst maßgeblich die vorhandene Menge an Kohlenstoff im Boden. Dementsprechend liegt der Kohlenstoffvorrat bei den Moorböden mit ca. 454 t/ha am höchsten, gefolgt von den semiterrestrischen (ca. 136 t/ha) und den terrestrischen Böden (ca. 80 t/ha).

Tabelle 12 enthält eine Zusammenstellung der Kohlenstoffvorräte, wie sie sich für die Leitbodentypen der BK50-Legendeneinheiten ergeben. Die Zuordnung der Legendeneinheiten zu den Bodentypen erfolgte unter Berücksichtigung von Subtypen und Varietäten. Die höchsten und geringsten Kohlenstoffvorräte in t/ha der jeweiligen Tiefenstufe sind markiert (grün: höchste C-Vorräte; rot: geringste C-Vorräte). Terrestrische Böden sind gelb, semiterrestrische Böden blau und Moorböden sind beige hinterlegt.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Kohlenstoffvorräte der Legendeneinheiten der BK50 anhand des dominierenden Bodentyps. Die Bodentypen mit den höchsten und niedrigsten C-Vorräten sind jeweils markiert (grün: höchster C-Vorrat; rot: niedrigster C-Vorrat).

Bodentyp	Fläche [ha]	Flächenanteil [%]	C-Vorrat 0-30 cm		C-Vorrat 30-100 cm		C-Vorrat 0-100 cm	
			[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]
PP (Podsol)	104.807	5,7	5.532,9	52,8	3.309,1	31,6	8.842,0	84,4
FF (Felshumusboden)	1.867	0,1	66,9	35,8	25,5	13,7	92,4	49,5
FS (Skeletthumus-boden)	233	0,01	7,7	33,1	11,0	47,2	18,7	80,3
OL (Lockersyrosem)	40.147	2,2	1.375,7	34,3	1.623,2	40,4	2.999,0	74,7
RN (Ranker)	6.951	0,4	323,2	46,5	93,8	13,5	417,0	60,0
RQ (Regosol)	195.182	10,6	9.892,0	50,7	7.088,6	36,3	16.980,5	87,0
RZ (Rendzina)	5.911	0,3	485,7	82,2	536,9	90,8	1.022,6	173,0
TT (Tschernosem)	8.130	0,4	480,3	59,1	400,0	49,2	880,2	108,3
DD (Pelosol)	21	0,001	1,1	52,9	0,4	18,2	1,5	71,2
BB (Braunerde)	484.621	26,3	24.277,1	50,1	11.141,7	23,0	35.418,8	73,1
LL (Parabraunerde)	234.419	12,7	10.789,6	46,0	4.745,0	20,2	15.534,6	66,3
LF (Fahlerde)	31.209	1,7	1.477,2	47,3	785,5	25,2	2.262,8	72,5
SS (Pseudogley)	271.157	14,7	15.511,9	57,2	6.748,2	24,9	22.260,1	82,1
SG (Stagnogley)	9.251	0,5	642,6	69,5	309,7	33,5	952,3	102,9
XX (Reduktosol)	136	0,01	4,3	31,6	1,2	8,6	5,5	40,2
YK (Kolluvisol)	87.965	4,8	5.169,4	58,8	4.610,1	52,4	9.779,6	111,2
YO (Hortisol)	24.833	1,3	1.619,0	65,2	1.630,3	65,7	3.249,3	130,8
YU (Treposol)	2.516	0,1	181,0	71,9	92,3	36,7	273,3	108,6
AQ (Paternia)	753	0,04	102,0	135,5	175,4	233,0	277,5	368,5
AT (Tschernitza)	36	0,002	2,4	67,3	2,1	59,0	4,5	126,4
AB (Vega)	62.828	3,4	5.292,7	84,2	5.535,5	88,1	10.828,2	172,3
GG (Gley)	185.169	10,0	13.469,2	72,7	8.754,9	47,3	22.224,1	120,0
GH (Moorgley)	6.394	0,3	897,3	140,3	572,8	89,6	1.470,2	229,9
GM (Anmoorgley)	2.890	0,2	382,3	132,3	157,2	54,4	539,6	186,7
GN (Nassgley)	1.376	0,1	71,4	51,9	82,7	60,1	154,1	112,0
HH (Hochmoor)	1.800	0,1	426,2	236,8	565,2	314,1	991,4	550,9
KV (Erdniedermoor, basenreich)	3.819	0,2	959,7	251,3	1.203,1	315,0	2.162,8	566,4
KH (Erdhochmoor)	12	0,001	2,9	250,0	5,7	494,0	8,6	744,0
KM (Mulmniedermoor)	3.071	0,2	432,0	140,7	360,0	117,2	792,0	257,9

Die höchsten Vorratswerte ergeben sich für die Moorböden Sachsens. In den Hochmooren, Erdhochmooren sowie Erdniedermooren sind in der Tiefenstufe 0-100 cm jeweils über 550 t/ha organischer Kohlenstoff gespeichert. Das Maximum mit annähernd 750 t/ha wurde für die Erdhochmoore ermittelt. Die Bodentypen weisen zwar die höchsten Vorratswerte auf, machen jedoch lediglich ca. 0,3 % der Fläche Sachsens aus. Größere C-Vorräte ergaben sich zudem für die semiterrestrischen Auenböden und hier insbesondere für den Bodentyp Paternia. In der Tiefenstufe 0-100 cm sind dort ca. 370 t/ha an organischem Kohlenstoff gespeichert.

Die geringsten C-Vorräte weisen die O/C-Böden (Felshumusboden und Skeletthumusboden), die zu den terrestrischen Rohböden zählenden Lockersyroseme sowie die im Bereich der Deponien anstehenden Reduktosole auf. Hier werden in der Tiefenstufe 0-100 cm im Maximum C-Vorratswerte von 50 t/ha erreicht. Der Flächenanteil dieser Böden beträgt ca. 2,3 %.

Den flächenmäßig größten Anteil machen die Braunerden mit 484.621 ha aus. Sie nehmen ca. 26 % der sächsischen Landesfläche ein. Im obersten Meter sind im Mittel dort aber nur ca. 73 t/ha organischer Kohlenstoff gespeichert.

6.2 Kohlenstoffvorräte nach Nutzungsart

Um eine flächengewichtete Aussage über die nutzungsdifferenzierten C-Vorräte in Sachsen bzw. die Fläche der BK50 treffen zu können, wurde die erstellte C-Vorratskarte mit der Landnutzung verschnitten. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zum einen wurden die Flächendaten des Sachsenforstes (Forstgrunddaten mit Stand Oktober 2023) und die Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS), aus dem die Grünland- und Ackernutzung des Jahres 2022 entnommen werden kann, miteinander kombiniert. Die sich daraus ergebende Karte mit der räumlichen Verteilung der Hauptlandnutzungen zeigt Abbildung 18.

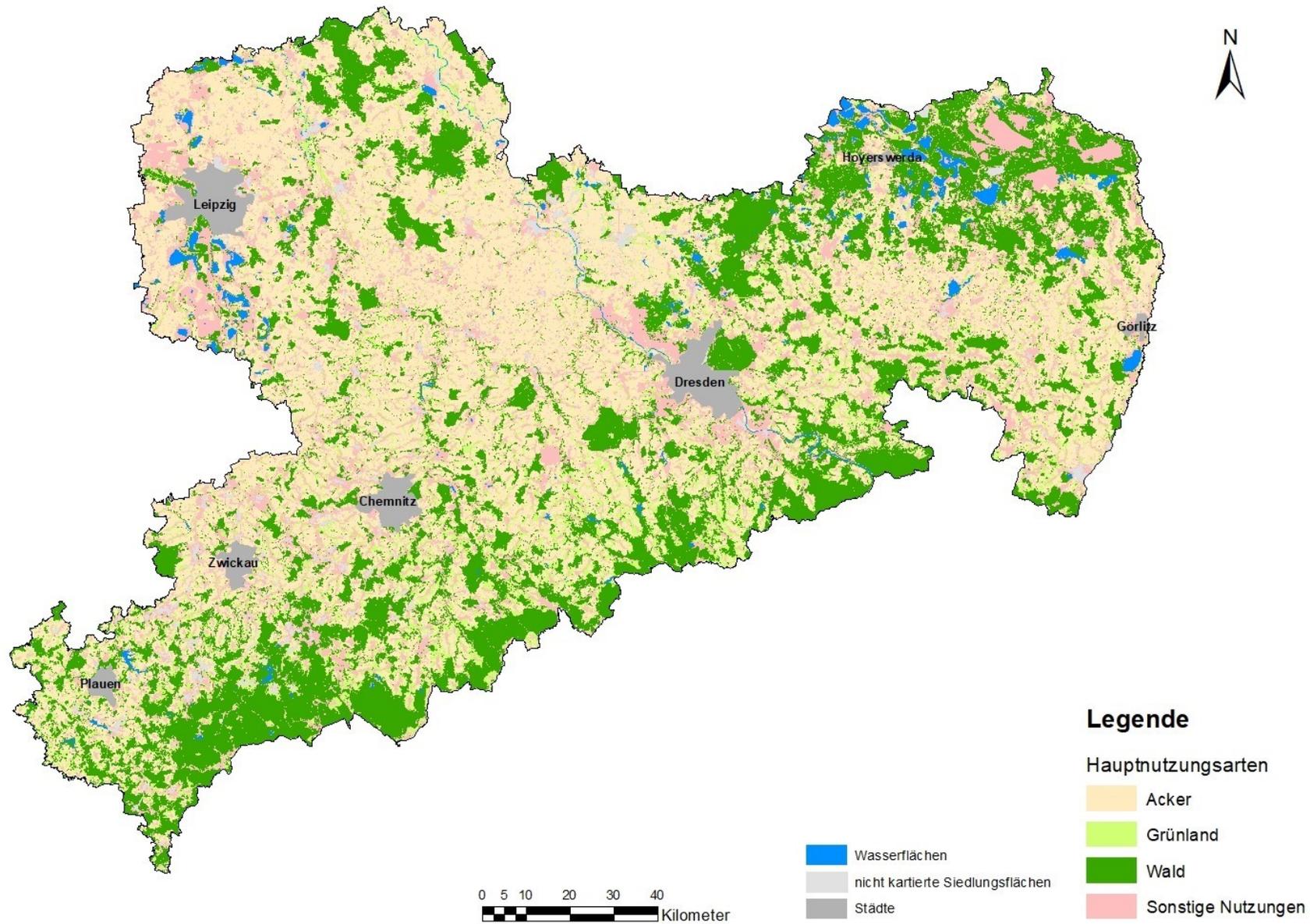


Abbildung 18: Karte mit der räumlichen Verteilung der Hauptlandnutzungen.

Als Vergleich wurden zudem die Satellitendaten von Corine Landcover aus dem Jahr 2018 einbezogen. Folgende in Tabelle 13 angeführte Corine-Landcover-Klassen wurden zur Zuordnung der Bodennutzung herangezogen:

Tabelle 13: Genutzte Zuordnung der CLC-Klassen.

Nutzungskategorie	CLC-Code	CLC-Klassenname
Acker	211	Nicht bewässertes Ackerland
Grünland	222	Obst- und Beerenobstbestände
	231	Wiesen und Weiden
	321	Natürliches Grünland
Wald	311	Laubwälder
	312	Nadelwälder
	313	Mischwälder

Grundsätzlich wurden bei beiden Ansätzen die Nutzungen Acker, Grünland und Wald selektiert und mit der C-Vorratskarte verschnitten. Für die Polygone der jeweiligen Nutzungsart wurde durch Multiplikation der Flächengröße mit dem ausgewiesenen C-Vorrat in Tonnen/Hektar der flächenbezogene C-Vorrat des jeweiligen Polygons in Tonnen berechnet, die Werte anschließend aufsummiert und eine Gesamtvorratsmenge für die Nutzungen Acker, Grünland und Wald (ohne org. Auflagen) ausgegeben. Der Vorrat für die Nutzungsform „Sonstige“ ergab sich aus der Differenz des Gesamtvorrates der Landesfläche Sachsens (Umring der BK50) abzüglich des Gesamtvorrates der Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald.

Für die Tiefenstufe 0-30 cm und 0-100 cm (ohne org. Auflagen) wurden zunächst die berechneten C-Vorräte der beiden Ansätze verglichen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Vergleich der Ergebnisse der Verschneidung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen).

	Landbedeckung nach:					
	Corine LC	InVeKoS & SN Forst	Corine LC	InVeKoS & SN Forst	Corine LC	InVeKoS & SN Forst
Nutzung	Fläche [ha]		C-Vorrat 0-30 cm [1.000 t]		C-Vorrat 0-100 cm [1.000 t]	
Acker	744.141	709.497	39.956,3	38.094,4	61.829,2	58.773,4
Grünland	269.521	189.648	16.796,4	11.998,2	28.036,4	19.803,3
Wald	510.037	514.375	29.537,2	29.742,8	46.921,6	47.437,1
Sonstige	253.800	363.980	13.586,2	20.040,6	23.655,9	34.429,3
Siedlung & Ge- wässer	65.766		-	-	-	-
Sachsen (gesamt)	1.843.266		99.876,0		160.443,1	

Die Hauptunterschiede für die einbezogene Fläche beider Ansätze ergeben sich bei den Nutzungsarten Grünland und Sonstige, was sich in den deutlichen Unterschieden beim C-Vorrat der Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm dieser Nutzungen niederschlägt. Für die Nutzungen Acker und Wald lassen sich mit beiden Ansätzen dagegen sehr ähnliche C-Vorräte ableiten.

Da es sich bei den Sachsenforst- und InVeKoS-Daten um aktuellere Datenbestände handelt, wurde dieser Ansatz favorisiert und die auf Basis dieser Daten ausgewiesenen Hauptbodennutzungen in die weitere Auswertung einbezogen. Die sich für die betrachteten Tiefenstufen ableitbaren Kohlenstoffvorräte sind in nachfolgender Tabelle 15 zusammengestellt. In Klammern steht der jeweilige Anteil an der Gesamtfläche bzw. des Gesamtkohlenstoffs.

Tabelle 15: Kohlenstoffvorräte differenziert nach Nutzung für Sachsen (Grundlage BK50, Nutzung von Sachsenforst und InVeKoS Daten).

Nutzung	Fläche [ha]	C-Vorrat+ 5 cm (Mittel) org. Auflage [1.000 t]	C-Vorrat 0-30 cm [1.000 t]	C-Vorrat 30-100 cm [1.000 t]	C-Vorrat 0-100 cm [1.000 t]	C-Vorrat 0-100 cm + 5 cm org. Auflage [1.000 t]
Acker	709.497 (38,5 %)	-	38.094,4 (38,1 %)	20.679,0 (34,1 %)	58.773,4 (36,6 %)	58.773,4
Grünland	189.648 (10,3 %)	-	11.998,2 (12,0 %)	7.805,2 (12,9 %)	19.803,3 (12,3 %)	19.803,3
Wald	514.375 (27,9 %)	18.690	29.742,8 (29,8 %)	17.694,2 (29,2 %)	47.437,1 (29,6 %)	66.127,1
Sonstiges	363.980 (19,7 %)	-	20.040,6 (20,1 %)	14.388,7 (23,8 %)	34.429,3 (21,5 %)	34.429,3
Siedlung & Gewässer	65.766 (3,6 %)	-	-	-	-	-
Sachsen (gesamt)	1.843.266	18.690,0	99.876,0	60.567,1	160.443,1	179.133,1

Bezogen auf die Fläche Sachsens (Umring der BK50) ergibt sich für die Tiefenstufe 0-30 cm ein Gesamt-vorrat von 99.876.000 t. Für die Tiefenstufe 0-100 cm wurde ein C-Vorrat von 160.443.100 t ermittelt (vgl. Kapitel 5.3). Bezieht man auch die organischen Auflagen unter forstlicher Nutzung mit ein, erhöht sich der Vorrat auf insgesamt 179.133.100 t.

Die größte Fläche in Sachsen wird von der Nutzungsform Acker mit einem Flächenanteil von 38,5 % eingenommen, gefolgt von Wald mit ca. 28 % und den sonstigen Nutzungen mit ca. 20 %. Den geringsten Flächenanteil macht das Grünland mit ca. 10 % aus. Analog zur Flächennutzung ergeben sich ähnliche Anteile bei Betrachtung des Kohlenstoffvorrates in den jeweiligen Tiefenstufen, jedoch nur ohne Einbezug der organischen Auflagen. Bezieht man diese mit ein, befindet sich der größte Teil der C-Vorräte in den Waldstandorten, gefolgt von den Ackerstandorten, den sonstigen Nutzungen sowie den Grünlandflächen.

Vergleicht man die aktuell abgeleiteten Vorratswerte mit den Ergebnissen der LfULG-Untersuchung aus dem Jahr 2011 (BARTH et al. 2011) ergeben sich bei den Vorratswerten vergleichbare Größenordnungen. Bei BARTH et al. (2011) erfolgte damals eine Auswertung für die Tiefenstufe 0-60 cm. Für Ackerböden, die 2011 ebenfalls eine Fläche von ca. 39 % einnahmen, wurde ein Vorrat von 55 Mio. t Kohlenstoff abgeleitet und damit ca. 4 Mio. t (ca. 7 %) mehr als bei der aktuellen Einschätzung (unter Betrachtung der Tie-

fenstufe 0-60 cm). Für die Grünlandböden (10 % der Fläche) wurde bei BARTH et al. (2011), ein Kohlenstoffvorrat von ca. 16 Mio. t angegeben. Dieser Wert liegt ca. 5% unter dem aktuell prognostizierten Vorratswert für Grünland (16,8 Mio. t) der Tiefenstufe 0-60 cm.

Deutlich größer ist die Differenz bei Betrachtung der Waldböden. In der Untersuchung von 2011 wurden für die Waldböden C-Vorräte in Höhe von 77 Mio. t bei vergleichbarem Flächenanteil (28 %) festgestellt. Der aktuell abgeleitete Vorratswert für die Waldböden der Tiefenstufe 0-60 cm, unter Berücksichtigung der organischen Auflagehorizonte, liegt bei ca. 66 Mio. t und damit um etwa 14 % unterhalb des Vorratswertes von 2011.

Neben der Berechnung der C-Vorräte in Tonnen erfolgte zudem eine flächengewichtete Berechnung der C-Vorräte in t/ha nach der Landnutzung (Division des ermitteltes C-Vorrates in t durch die Fläche der jeweiligen Nutzungsform). Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 gezeigt und in Tabelle 16 zusammengestellt. Sowohl in der Abbildung als auch bei der tabellarischen Zusammenstellung sind ergänzend auch die gemäß Kapitel 5.5 abgeleiteten Vorräte der organischen Auflagehorizonte unter Wald berücksichtigt.

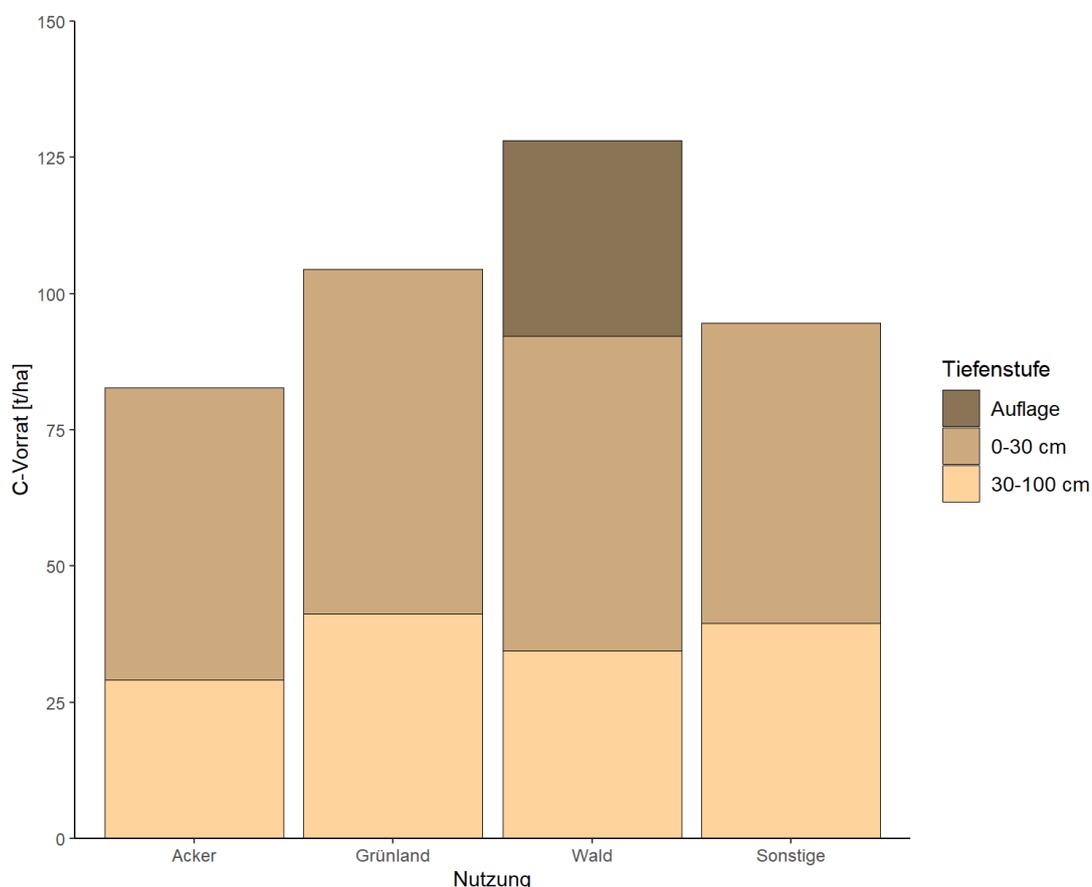


Abbildung 19: Mittlere flächengewichtete C-Vorräte nach einer Nutzungsdifferenzierung in den Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und der Auflage für die Nutzung Wald.

Tabelle 16: Flächengewichteter mittlerer C-Vorrat der jeweiligen Nutzungsart und Tiefenstufe.

Nutzung	C-Vorrat Auflage [t/ha]	C-Vorrat		
		0-30 cm [t/ha]	30-100 cm [t/ha]	0-100 cm [t/ha]
Acker		53,7	29,1	82,8
Grünland		63,3	41,2	104,4
Wald	36,0	57,8	34,4	92,2
Sonstiges		55,1	39,5	94,6

Unter Berücksichtigung der organischen Auflagehorizonte sind in den Böden der sächsischen Wälder (Tiefenstufe 0-100 cm) mit 128,6 t/ha die höchsten Kohlenstoffvorräte gespeichert. Es folgen Grünland mit 104,4 t/ha und sonstige Nutzungen (94,6 t/ha). Ackerflächen weisen für die Tiefenstufe 0-100 cm mit 82,8 t/ha die geringsten C-Vorräte auf.

Betrachtet man den flächengewichteten mittleren C-Vorrat für die jeweilige Nutzungsform, im Vergleich zu den auf Grundlage der Punktdaten berechneten mittleren C-Vorräten (siehe Tabelle 22, Kapitel 8.2.1), so ergibt sich insbesondere für die Nutzung Grünland ein deutlicher Unterschied bei den jeweiligen Tiefenstufen. Für die Nutzung Grünland und die Tiefenstufe 0-30 cm liegt der Mittelwert der Punktdaten bei 80,6 t/ha, wohingegen der flächengewichtete Mittelwert nur mit 63,3 t/ha angegeben werden kann. In der Tiefenstufe 0-100 cm beträgt der Unterschied ca. 38 t/ha (Mittelwert der Punktdaten: 142,6 t/ha und flächengewichteter Mittelwert: 104,4 t/ha).

Auch bei den sonstigen Nutzungen kann eine größere Differenz beobachtet werden. Hier liegt der Mittelwert der Punktdaten in der Tiefenstufe 0-30 cm bei 68,0 t/ha und der flächengewichtete Mittelwert bei 55,1 t/ha. Für die Tiefenstufe 0-100 cm ergibt sich eine Diskrepanz von ca. 47 t/ha (Mittelwert der Punktdaten: 141,3 t/ha und flächengewichteter Mittelwert: 94,6 t/ha).

Bei den Nutzungen Acker und Wald liegen die Mittelwerte der Punktdaten und die flächengewichteten Mittelwerte für die unterschiedlichen Tiefenstufen jeweils sehr nah beieinander.

Der Unterschied für die Nutzung Grünland kann u.a. damit erklärt werden, dass nur ca. 60 % der als Grünland bei der Bodenansprache ausgewiesenen Punkte tatsächlich auf den im InVeKoS ausgewiesenen Grünlandflächen liegen. Teilweise liegen die Bodenansprachen der betrachteten Datenpunkte längere Zeit zurück (älteste Daten von 1991), wohingegen die InVeKoS-Daten aus dem Jahr 2022 stammen und somit auch aktuellere Nutzungsänderungen berücksichtigen.

Bei den als Acker ausgewiesenen Punkten liegen ca. 80 % auf den entsprechenden InVeKoS-Flächen. Bei der Nutzung Wald befinden sich ca. 90 % der Punkte auf den Waldflächen des Sachsenforsts.

In den Abbildungen 19 bis 22 sind die für die Tiefenstufe 0-100 cm berechneten C-Vorräte der sächsischen Mineralböden differenziert nach Nutzungsarten dargestellt. Aus Abbildung 24 können die organischen Kohlenstoffvorräte der Wälder, Tiefenstufe 0-100 cm, unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.5 abgeleiteten Vorräte der organischen Auflagehorizonte entnommen werden.

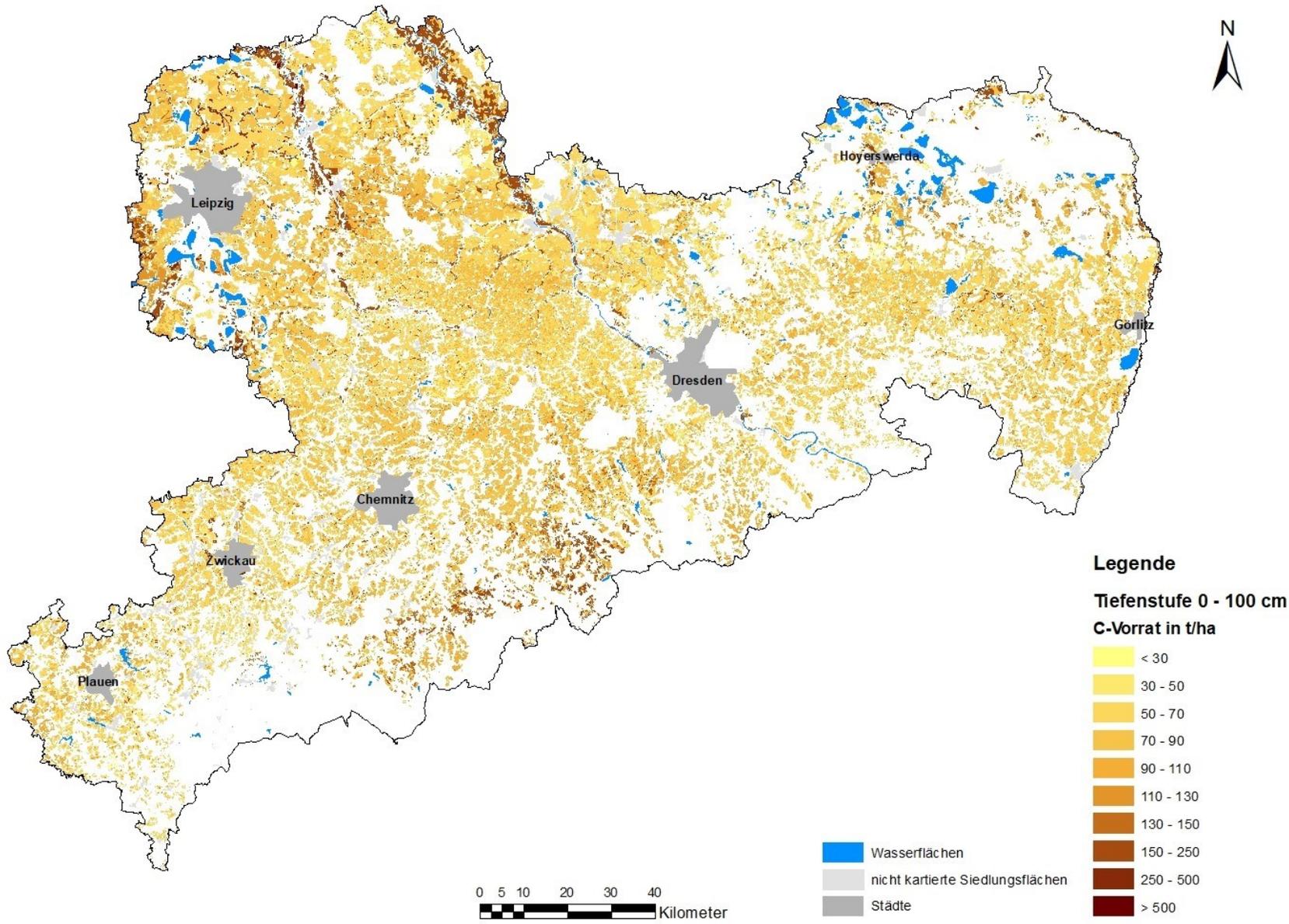


Abbildung 20: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Ackernutzung – Tiefenstufe 0-100 cm.

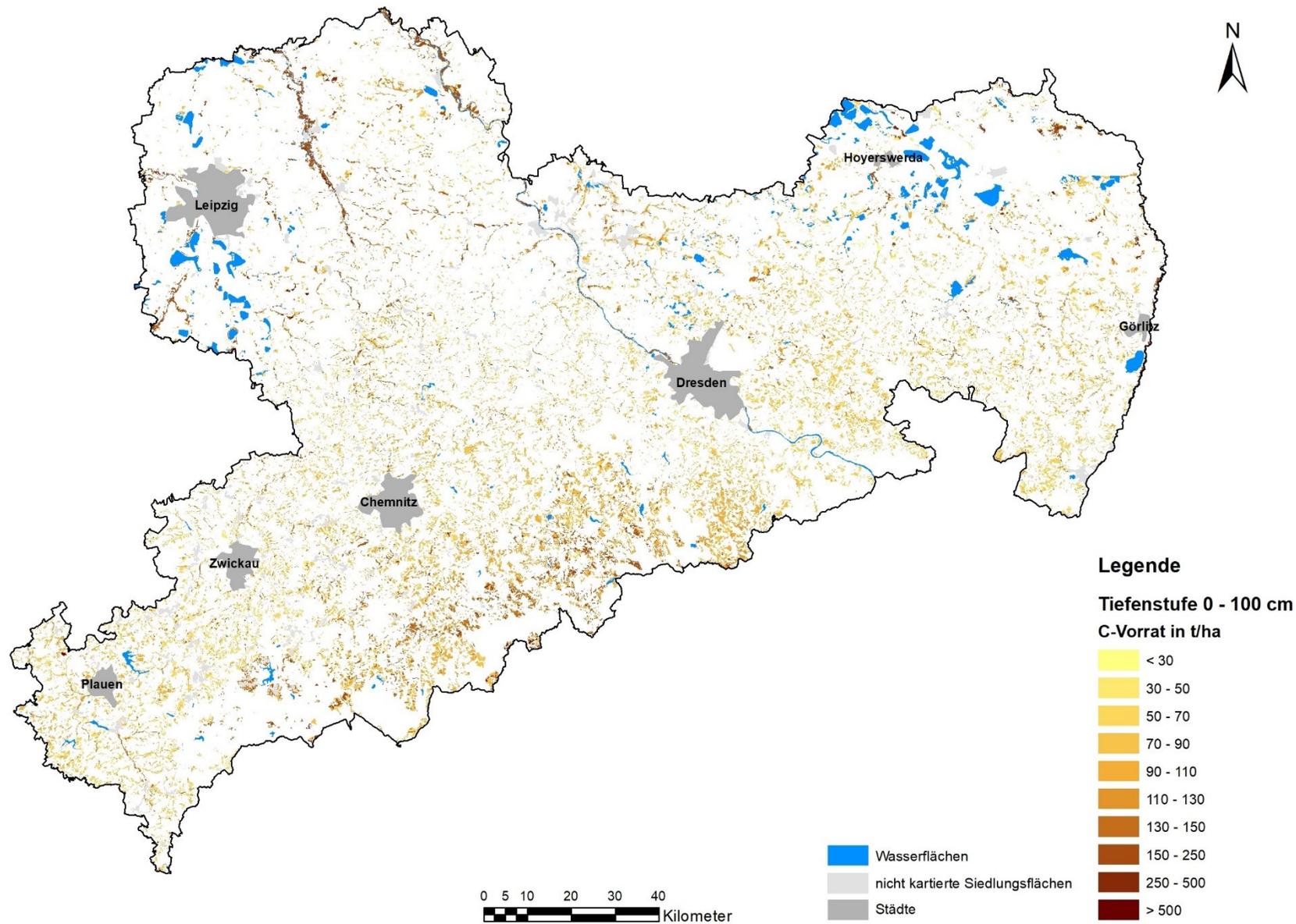


Abbildung 21: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Grünlandnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm.

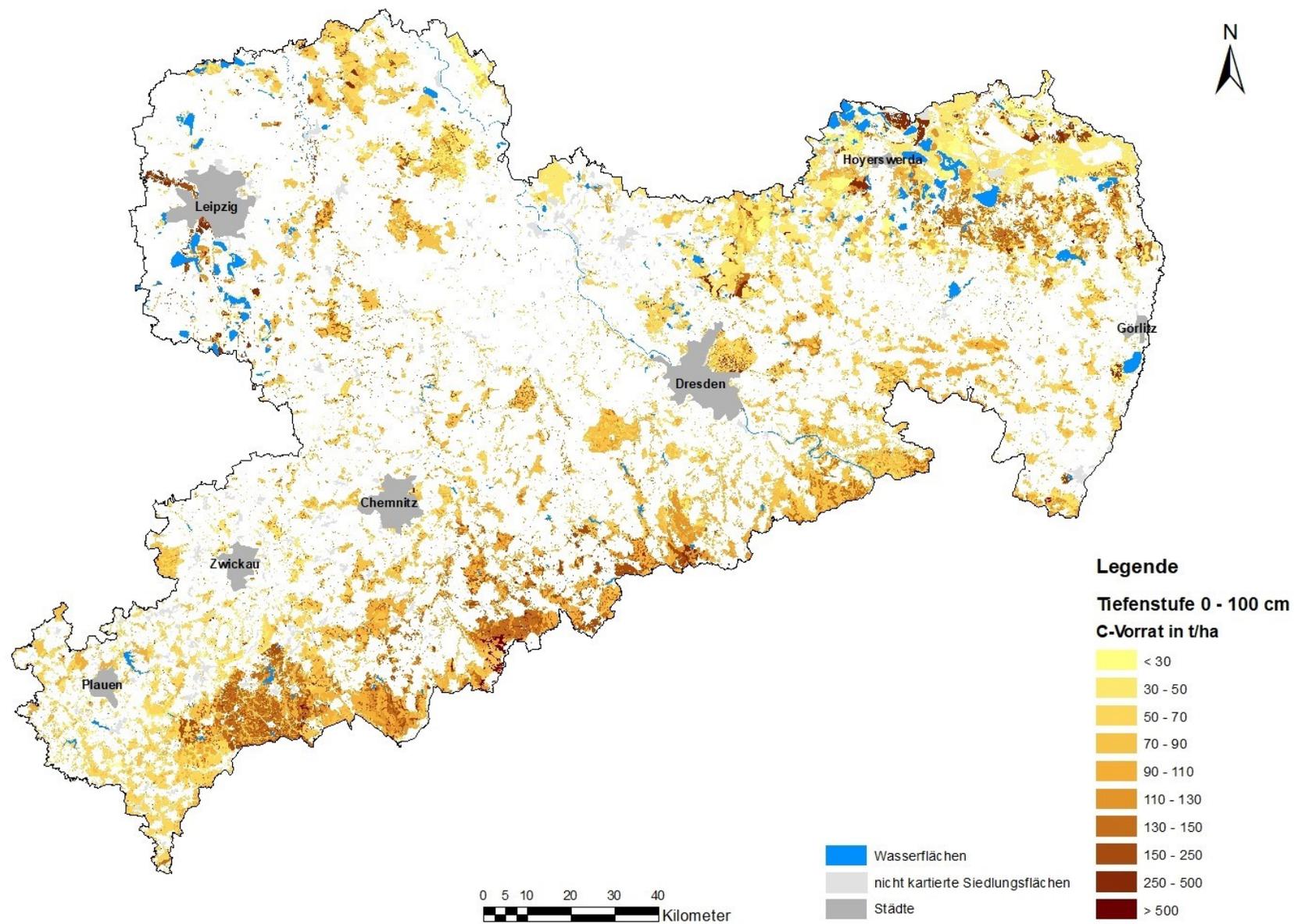


Abbildung 22: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Waldnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm (ohne Auflagehorizonte).

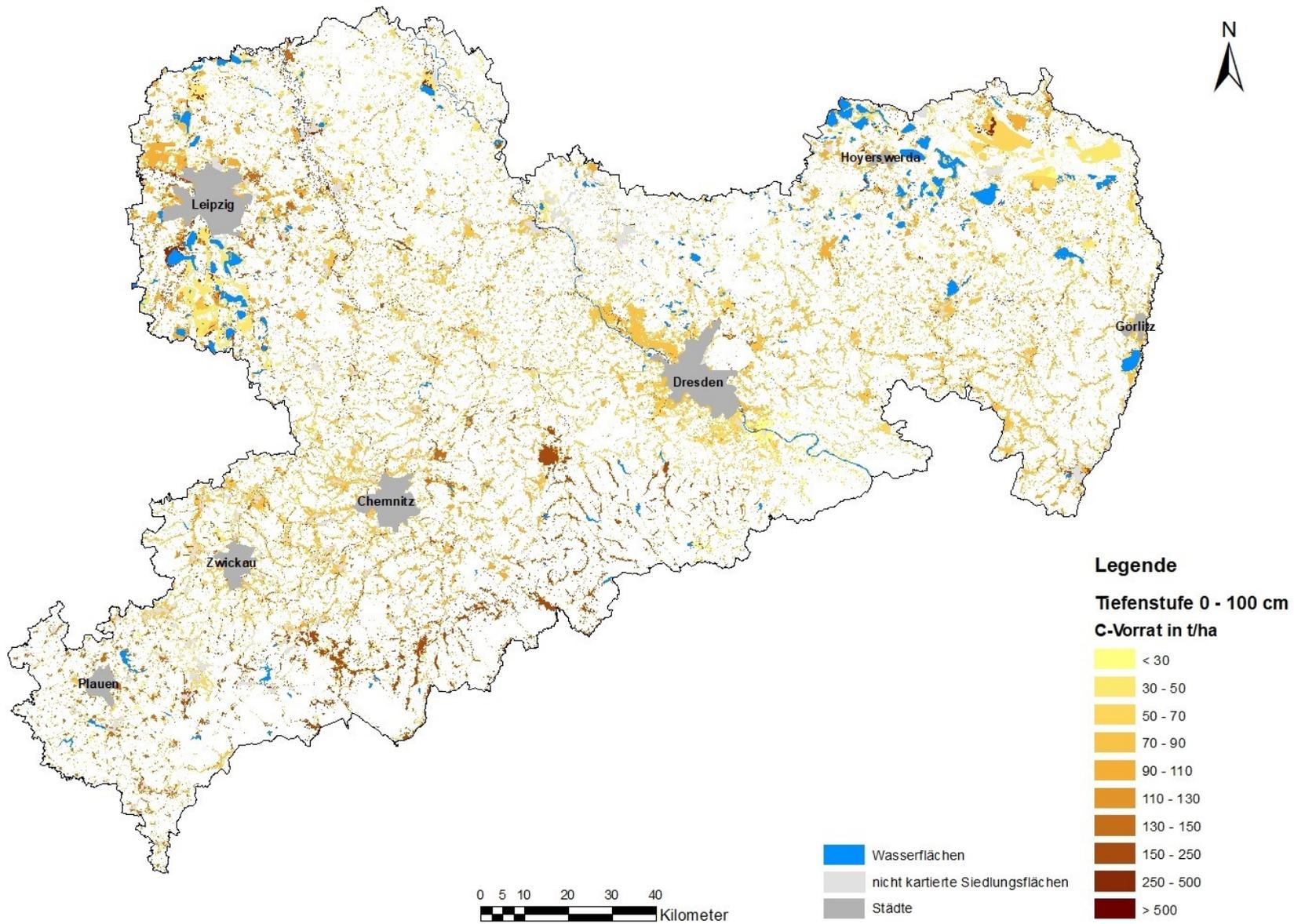


Abbildung 23: C-Vorräte der Böden Sachsens sonstige Nutzungen – Tiefenstufe 0-100 cm.

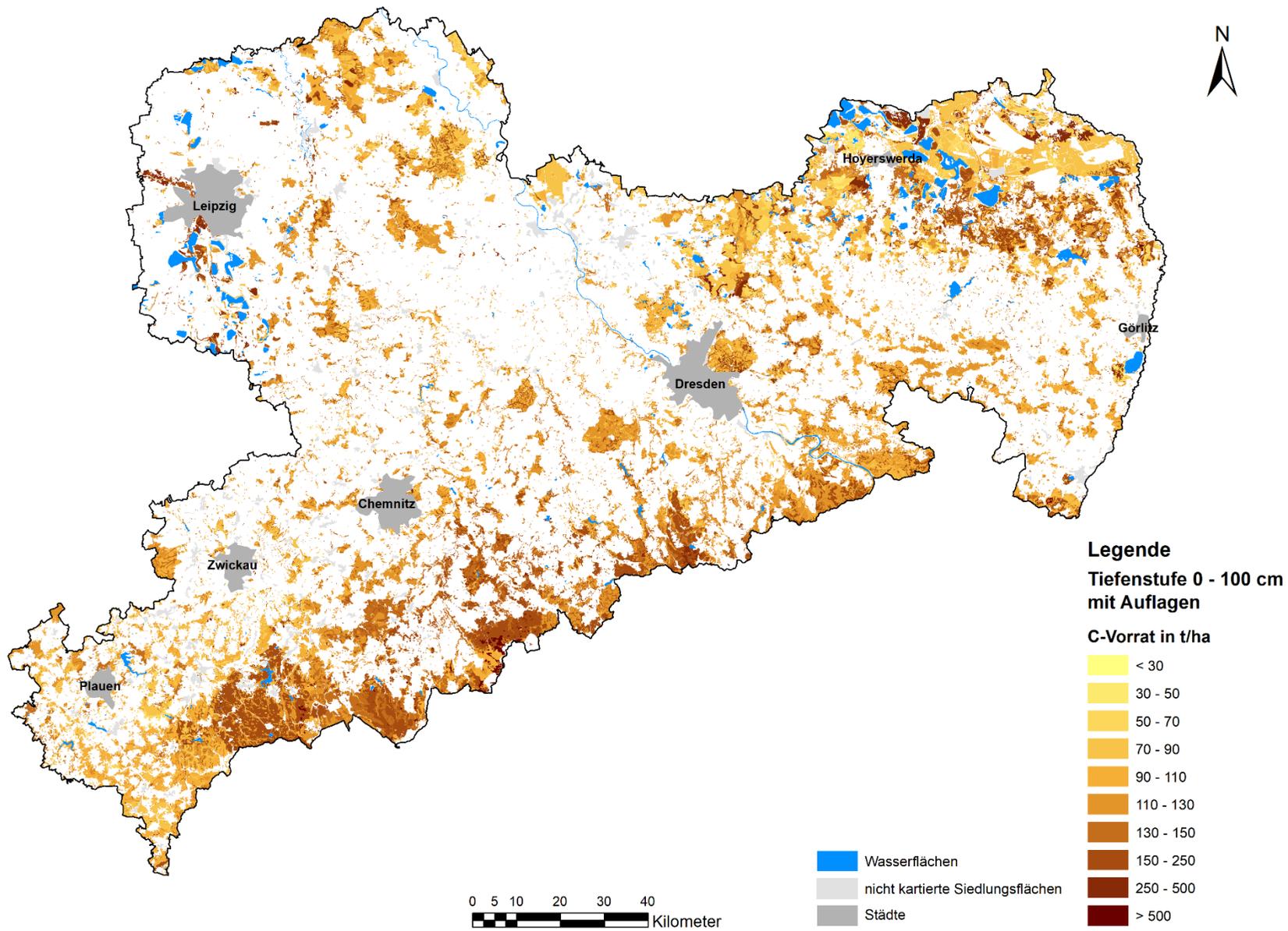


Abbildung 24: C-Vorräte der Böden Sachsens unter Waldnutzung – Tiefenstufe 0-100 cm (inkl. Auflagehorizonte).

6.3 Kohlenstoffvorräte in den Bodenregionen und Bodenlandschaften Sachsens

Die Übertragung der Punktdaten in die Fläche ermöglicht auch eine regionale Auswertung der Kohlenstoffvorräte. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse wurden die Kohlenstoffvorräte der Bodenregionen (BR) sowie der Bodenlandschaften (BL) Sachsens abgeleitet. Die Kohlenstoffvorräte der organischen Auflagen unter Waldnutzung konnten aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 5.5).

Bodenregionen sind überregionale Bodeneinheiten, die einen Zusammenschluss mehrerer Bodenlandschaften darstellen. Ihre Verbreitung wird maßgeblich durch das vorhandene geologische Ausgangsmaterial sowie Relief und Wasserverhältnisse bestimmt. Die räumliche Lage der Bodenregionen in Sachsen zeigt Abbildung 25. Die größte Fläche nimmt die Bodenregion der Löss- und Sandlösslandschaften ein, gefolgt von der Bodenregion der Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Magmatiten und Metamorphiten sowie der Bodenregion der Altmoränenlandschaft. Mit deutlich geringerem Flächenanteil folgen die Bodenregion der Berg- und Hügelländer mit hohem Ton- und Schluffanteil, die Bodenregion der Überregionale Flusslandschaften und die Bodenregion der Berg- und Hügelländer mit hohem Sandsteinanteil.

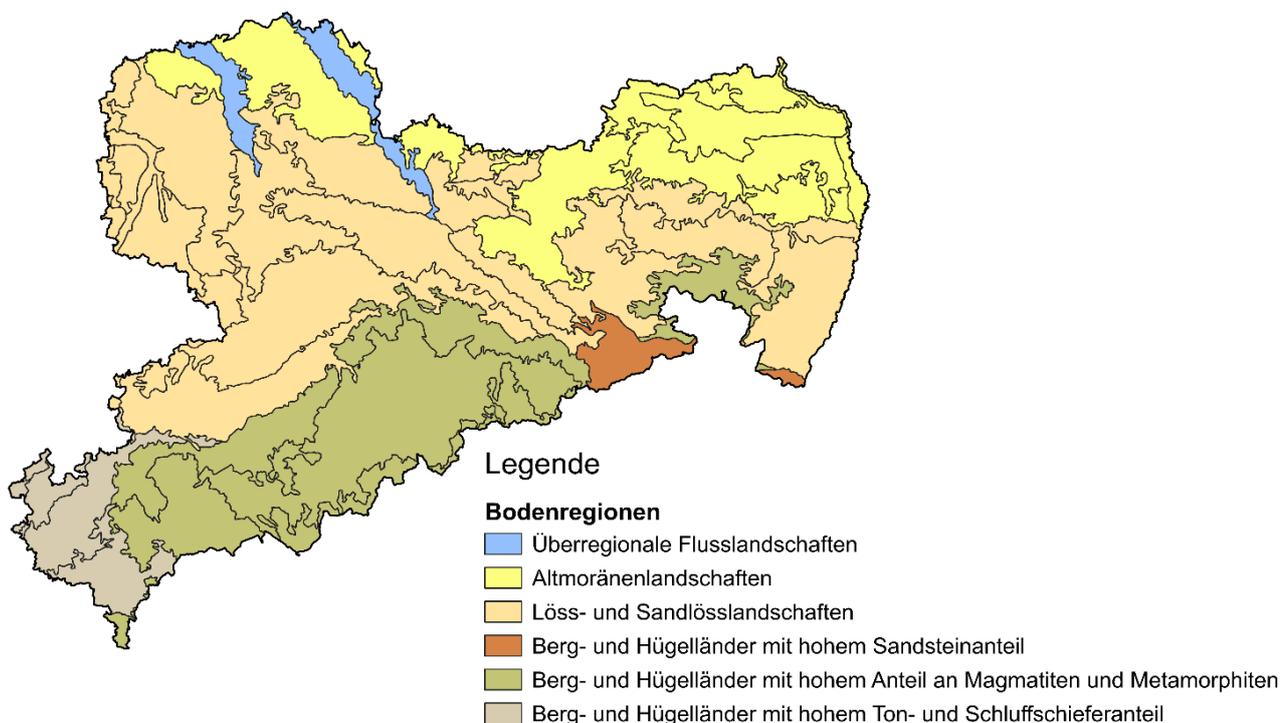


Abbildung 25: Überblick über die sächsischen Bodenregionen. Die Bodenregionen bestehen aus unterschiedlichen Bodenlandschaften.

Aus den vorliegenden Vorratsberechnungen (vgl. Kapitel 5.3) lassen sich die in Tabelle 17 angeführten Kohlenstoffgehalte der Bodenregionen ableiten.

Tabelle 17: Kohlenstoffgehalte der Bodenregionen in Sachsen. Die Bodenregion mit dem höchsten und niedrigsten C-Vorrat (ohne org. Auflagen) in t/ha ist jeweils markiert (grün: höchster C-Vorrat; rot: niedrigster C-Vorrat).

BR Nr.	Bodenregion	Fläche [1.000 ha]	Flächenanteil [%]	C-Vorrat 0-30 cm		C-Vorrat 30-100 cm		C-Vorrat 0-100 cm	
				[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]
2	Überregionale Flusslandschaften	49,3	2,7	3,5	70,2	3,0	60,9	6,5	131,1
4	Altmoränenlandschaften	371,4	20,2	19,0	51,2	10,3	27,8	29,4	79,1
6	Löss- und Sandlösslandschaften	846,6	45,9	42,9	50,7	26,2	30,9	69,1	81,6
9	Berg- und Hügelländer mit hohem Sandsteinanteil	32,7	1,8	1,7	51,4	0,9	27,8	2,6	79,2
10	Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Magmatiten und Metamorphiten	443,0	24,0	27,8	62,9	17,5	39,4	45,3	102,3
11	Berg- und Hügelländer mit hohem Ton- und Schluffschieferanteil	99,8	5,4	4,9	49,2	2,6	26,5	7,6	75,7
	Summe	1.842,7		99,8		60,5		160,4	

Die höchsten C-Vorräte aller drei Tiefenstufen ergeben sich in der von Auenböden dominierten Bodenregion der überregionalen Flusslandschaften. Für die Tiefenstufe 0-30 cm lässt sich ein Wert von ca. 70 t/ha ableiten, für die Tiefenstufe 0-100 cm ca. 130 t/ha. Die geringsten C-Vorräte in t/ha wurden für die Bodenregion der Berg- und Hügelländer mit hohem Ton- und Schluffschieferanteil berechnet (ca. 49 t/ha in der Tiefenstufe 0-30 cm bzw. ca. 76 t/ha in der Tiefenstufe 0-100 cm).

Ergänzend erfolgte zudem eine Ableitung der C-Vorräte für die Sächsischen Bodenlandschaften (BL). Als Bodenlandschaft werden Flächen bezeichnet, die den Leitbodentyp mit dem Landschaftscharakter verknüpfen. Die hier vorzufindenden Böden zeichnen sich durch eine ähnliche Genese aus. Die zusammengefassten Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 18 zusammengestellt.

Tabelle 18: Kohlenstoffvorräte der sächsischen Bodenlandschaften. Die Bodenlandschaft mit dem höchsten und niedrigsten C-Vorrat (ohne org. Auflagen) in t/ha ist jeweils markiert (grün: höchster C-Vorrat; rot: niedrigster C-Vorrat).

Leg. Nr.	Bodenlandschaft	Fläche [1.000 ha]	Flä- chen- anteil [%]	C-Vorrat 0-30 cm		C-Vorrat 30-100 cm		C-Vorrat 0-100 cm	
				[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]
02.1.1	Riesa-Torgauer Elbtal	29,3	1,6	1.881,2	64,2	1.759,2	60,1	3.640,4	124,3
02.1.2	Tal der Vereinigten Mulde	20,0	1,1	1.576,6	78,8	1.241,9	62,1	2.818,5	140,9
04.1.1	Düben-Dahlener Heide	81,2	4,4	4.128,2	50,8	2.080,4	25,6	6.208,6	76,4
04.1.2	Niederlausitzer Grenz- wall	17,3	0,9	1.167,6	67,3	594,1	34,3	1.761,7	101,6
04.3.1	Westlausitzer Heide- und Kuppenlandschaft	76,2	4,1	3.743,9	49,1	1.837,7	24,1	5.581,6	73,2
04.3.2	Muskauer Heide	47,2	2,6	1.664,7	35,3	1.253,8	26,6	2.918,5	61,9
04.3.3	Nieskyer Platten	25,4	1,4	1.327,4	52,3	642,1	25,3	1.969,4	77,5
04.5.1	Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung	24,8	1,3	1.093,8	44,1	681,9	27,5	1.775,7	71,6
04.5.2	Senftenberger Heide- und Seengebiet	22,9	1,2	1.132,4	49,4	651,0	28,4	1.783,4	77,8
04.5.3	Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft	65,2	3,5	4.096,8	62,8	2.190,1	33,6	6.286,9	96,4
04.5.4	Rothenburger Neissetal und Muskauer Durch- bruch	11,1	0,6	674,8	60,9	408,5	36,9	1.083,4	97,7
06.2.1	Leipziger Lössstiefland	95,7	5,2	4.874,9	51,0	3.682,3	38,5	8.557,2	89,5
06.2.2	Nordsächsisches Löss- stief- und Plattenland	57,1	3,1	2.984,3	52,3	1.489,3	26,1	4.473,5	78,4
06.2.3	Grossenhainer Lössstief- land	32,3	1,8	1.436,8	44,4	686,1	21,2	2.122,9	65,7
06.2.4	Grossenhainer Rödertal	8,2	0,4	389,5	47,8	222,0	27,2	611,5	75,0
06.2.5	Hallesches Lössstiefland	14,4	0,8	781,2	54,4	699,4	48,7	1.480,5	103,2
06.2.6	Weissenfelder Lössstiefland	3,4	0,2	198,0	57,6	136,5	39,7	334,5	97,3
06.2.7	Elster-Luppe Auen	12,6	0,7	858,8	68,3	1.170,1	93,1	2.028,9	161,4
06.2.8	Bornaer Lössstiefland	31,8	1,7	1.706,5	53,7	1.441,5	45,3	3.147,9	99,0
06.3.1	Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland	60,4	3,3	3.582,9	59,3	1.887,2	31,2	5.470,1	90,6
06.3.2	Mittelsächsisches Lösshügelland	75,0	4,1	3.438,7	45,8	2.175,0	29,0	5.613,8	74,8
06.3.3	Mulde-Lösshügelland	121,5	6,6	6.337,7	52,2	3.386,6	27,9	9.724,3	80,0

Leg. Nr.	Bodenlandschaft	Fläche [1.000 ha]	Flä- chen- anteil [%]	C-Vorrat 0-30 cm		C-Vorrat 30-100 cm		C-Vorrat 0-100 cm	
				[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]	[1.000 t]	[t/ha]
06.3.4	Vorerzgebirgisches Becken	77,2	4,2	3.751,2	48,6	2.117,4	27,4	5.868,6	76,0
06.3.5	Dresdener Elbtalweitung	23,4	1,3	1.061,0	45,3	668,9	28,6	1.729,9	73,9
06.3.6	Westlausitzer Lösshügelland	63,4	3,4	3.208,7	50,6	1.680,7	26,5	4.889,4	77,2
06.3.7	Oberlausitzer Tiefelandrand	35,8	1,9	1.728,2	48,3	907,8	25,4	2.636,0	73,6
06.3.8	Bautzener Lösshügelland	44,7	2,4	2.143,6	47,9	1.279,4	28,6	3.423,0	76,6
06.3.9	Oberlausitzer Lösshügelland	68,7	3,7	3.375,0	49,1	1.927,0	28,1	5.302,1	77,2
06.3.10	Zeit-Altenerburger Lösshügelland	19,9	1,1	1.003,3	50,4	576,7	29,0	1.580,0	79,4
06.3.11	Ronneburger Lösshügelland	1,2	0,1	59,9	49,5	43,7	36,1	103,6	85,5
09.1.1	Elbsandsteingebirge	29,6	1,6	1.513,9	51,1	782,8	26,4	2.296,7	77,5
09.1.2	Zittauer Gebirge	3,0	0,2	166,5	54,9	125,1	41,2	291,6	96,1
10.2.1	Erzgebirgskamm und obere Lagen	44,9	2,4	3.550,5	79,1	2.680,4	59,7	6.230,9	138,8
10.2.2	Höheres Westerzgebirge	58,9	3,2	3.682,9	62,6	2.490,2	42,3	6.173,1	104,9
10.2.3	Östliches Fichtelgebirge	4,5	0,2	244,3	54,9	129,6	29,1	373,9	84,0
10.2.4	Westlicher Erzgebirgsnordrand	58,6	3,2	3.272,2	55,8	1.658,3	28,3	4.930,5	84,1
10.2.5	Erzgebirgsnord- abdachung	187,5	10,2	12.296,8	65,6	8.049,0	42,9	20.345,8	108,5
10.2.6	Östlicher Erzgebirgsnordrand	53,6	2,9	2.958,7	55,2	1.546,7	28,9	4.505,3	84,1
10.2.7	Oberlausitzer Bergland	35,0	1,9	1.840,2	52,5	915,5	26,1	2.755,7	78,6
11.1.1	Vogtländisches Kuppenland	47,9	2,6	2.437,3	50,9	1.299,7	27,2	3.737,0	78,1
11.1.2	Elstergebirge	35,3	1,9	1.646,8	46,7	838,6	23,8	2.485,4	70,5
11.1.3	Mehltheuer Hochfläche	12,3	0,7	615,3	50,1	383,9	31,3	999,2	81,4
11.1.4	Thüringer Schiefergebirge	4,4	0,2	210,3	47,7	124,0	28,1	334,4	75,8
Summe		1.842,7		99.843,4		60.542,0		160.385,4	

Der geringste C-Vorrat mit ca. 35 t/ha bei der Tiefenstufe 0-30 cm ergibt sich für die Bodenlandschaft „Muskauer Heide“. Hier dominieren arme und trockene Sandböden mit dem vorherrschenden Bodentyp Podsol. Die höchsten C-Vorräte mit ca. 79 t/ha in der Tiefenstufe 0-30 cm wurden für die Bodenlandschaft „Erzgebirgskamm und obere Lagen“ ermittelt. In dieser Region gibt es fast ausschließlich die Nutzungsform Wald und es finden sich vermehrt Moorböden bzw. Torfbildungen vor, die von besonderer Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff sind. Die Vorräte der organischen Auflagen unter Wald müssen hier zusätzlich mitgedacht werden, da diese keinen Eingang in die Berechnungen auf Ebene der Bodenlandschaften gefunden haben.

Bei Betrachtung der Tiefenstufe 0-100 cm sind die geringsten C-Vorräte mit ca. 62 t/ha ebenfalls in den zumeist sandigen Böden der Bodenlandschaft „Muskauer Heide“ gespeichert. Zu den bedeutendsten Regionen für die Kohlenstoffspeicherung zählen dagegen die Bodenlandschaften der Auen, in denen Grundwasser beeinflusste Böden dominieren. So konnte für die Bodenlandschaft der „Elster-Luppe Auen“ mit ca. 161 t/ha der höchste C-Vorrat der Tiefenstufe 0-100 cm ermittelt werden. Die besondere Bedeutung der Auen für die Kohlenstoffspeicherung belegen auch die für die Tiefenstufe 0-100 cm errechneten C-Vorräte der Bodenlandschaften „Tal der Vereinigten Mulde“ (ca. 141 t/ha) und „Riesa-Torgauer Elbtal“ (ca. 124 t/ha). Neben den höchsten Vorräten in der Tiefenstufe 0-30 cm weisen die Böden der stark bewaldeten, durch Moore und Torfbildungen geprägten Bodenlandschaft „Erzgebirgskamm und obere Lagen“ mit ca. 139 t/ha auch hohe Kohlenstoffvorräte in der Tiefenstufe 0-100 cm auf. Auch hier sind die Vorräte der organischen Auflagen separat zu berücksichtigen.

Der höchste C-Vorrat der Tiefenstufe 30-100 cm ergibt sich mit ca. 93 t/ha für die Bodenlandschaft der „Elster-Luppe Auen“. Den geringsten C-Vorrat mit ca. 21 t/ha weist die Bodenlandschaft „Grossenhainer Lössstiefland“ auf. In dieser Region dominieren Braunerden unter Ackernutzung. Die C_{org} -Gehalte der Böden sind dort aber als gering einzuschätzen (schwach humose Böden).

Generell höhere C-Vorräte lassen sich auch im Verbreitungsgebiet der Tschernoseme (Hallesches, Weißenfelser und Bornaer Lössstiefland) und großflächiger Kolluvien (Hallesches Lössstiefland) ableiten. Neben den Moor- und Auenstandorten sollten in Zukunft auch diese Standorte zum Erhalt wichtiger Kohlenstoffspeicherstätten besonders geschützt werden.

7 Kohlenstoffgehalt in den Oberböden Sachsens

Insgesamt standen zur Betrachtung der Oberböden Kohlenstoffanalysen von 10.264 räumlich exakt verorteten Standorten zur Verfügung (siehe Kapitel 2). Es handelt sich dabei um Daten des FIS-Boden (9.222 Standorte), der landwirtschaftlichen Dauertestflächen (763 Standorte) sowie der Bodenzustandserhebung (BZE Wald) des Sachsenforstes (279 Standorte). Die flächenhafte Verteilung der Standorte über Sachsen, klassifiziert nach dem C_{org} -Gehalt im Oberboden gemäß den Humusstufen der KA5, ist Abbildung 26 zu entnehmen.

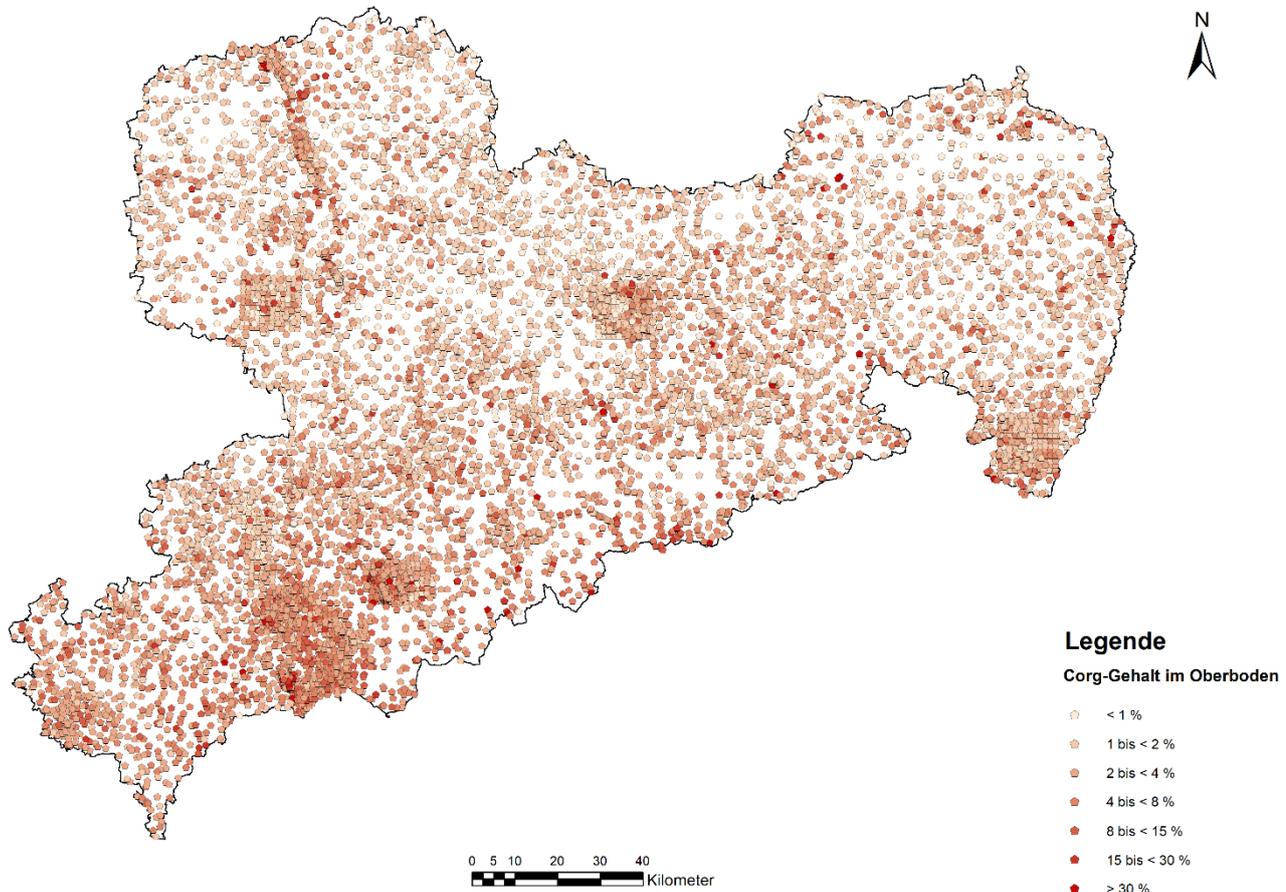


Abbildung 26: C_{org}-Gehalte im Oberboden sächsischer Böden – Punktdarstellung (ohne org. Auflagen).

Wie bereits in Kapitel 4 dargelegt war es nicht möglich alle vorliegenden Oberbodenanalysen zur Ableitung von C-Vorräten für die Tiefenstufe 0-30 cm heranzuziehen. Die im FIS-Boden vorliegenden Daten decken nicht immer die gesamte Tiefenstufe ab. Daten zu Trockenrohdichten bzw. Körnungsanalysen sind nur teilweise vorhanden. Zudem liegen die C_{org} -Analysen der landwirtschaftlichen Dauerbeobachtungsflächen nur für die Tiefenstufe 0-20 cm vor. Angaben zur Trockenrohdichte und zum Skelettvolumen fehlen komplett. Einzig der BZE-Datenbestand des Sachsenforstes liegt komplett vor und kann ohne Einschränkungen zur Vorratsdarstellung genutzt werden.

Zwar konnten nicht alle für die Oberböden Sachsens vorliegenden Kohlenstoffanalysen zur Ableitung von C-Vorräten genutzt werden, aufgrund der relativ guten Verteilung über Sachsen lassen sich die Daten aber zur flächenhaften Darstellung der mittleren C_{org} -Gehalte im Oberboden heranziehen.

Zur Übertragung mittlerer Kohlenstoffgehalte auf die Polygone der BK50 wurde sich des gleichen Ansatzes wie bei der Übertragung der C-Vorräte bedient. Per GIS erfolgte zunächst eine Verschneidung der als Punktdaten vorliegenden Kohlenstoffanalysen mit den Polygonen der BK50. Um der Variabilität der Legendeneinheiten, ausgedrückt in Leit- und Begleitböden, gerecht zu werden, wurde auf Basis der übertragenen Daten für jede Legendeneinheit der BK50 ein mittlerer C_{org} -Gehalt abgeleitet und anschließend auf Polygone mit gleicher Information übertragen.

Bei 83 der insgesamt 1.133 Legendeneinheiten der BK50 konnte kein mittlerer C_{org} -Gehalt zugewiesen werden. Davon Betroffen war gerade einmal 0,01 % der Landesfläche (ca. 210 ha). Zur Vervollständigung der Datenlücken wurde für die noch fehlenden Legendeneinheiten, die im FIS-Boden recherchierbaren C_{org} -Analysendaten der BK50-Leitprofile herangezogen.

Polygone, die laut BK50 den Nutzungen Siedlung oder Gewässer zugeordnet waren (Legendenummer 8888 für Siedlung und 9999 für Gewässer), blieben wie schon bei der Darstellung der C-Vorräte unberücksichtigt.

Der Blick auf Abbildung 27 lässt erkennen, dass der überwiegende Teil der Böden den Kohlenstoff-Gehaltsstufen 2 und 3 zugehörig sind (entspricht den Humusstufen h2 und h3 nach KA5). Deutlich erkennbar sind die in der Regel höheren C_{org} -Gehalte, die in den Auen sowie in den Böden der kleineren Tälchen anzutreffen sind. Aber auch die im Erzgebirge und der Lausitz verbreiteten Moorbildungen und die in Nordsachsen verbreiteten Moorgleye lassen sich gut ausmachen.

Wie Abbildung 27 zeigt, geht mit zunehmender Höhenlage auch ein Anstieg der C_{org} -Gehalte im Oberboden einher. Hier sei auf die statistische Auswertung der C_{org} -Gehalte im Oberboden im Kapitel 8.1.1 verwiesen. Alle vorliegenden Oberbodenanalysen wurden auch zur statistischen Prüfung des Zusammenhangs zwischen dem Kohlenstoffgehalt im Oberboden und den klimatischen Bedingungen herangezogen.

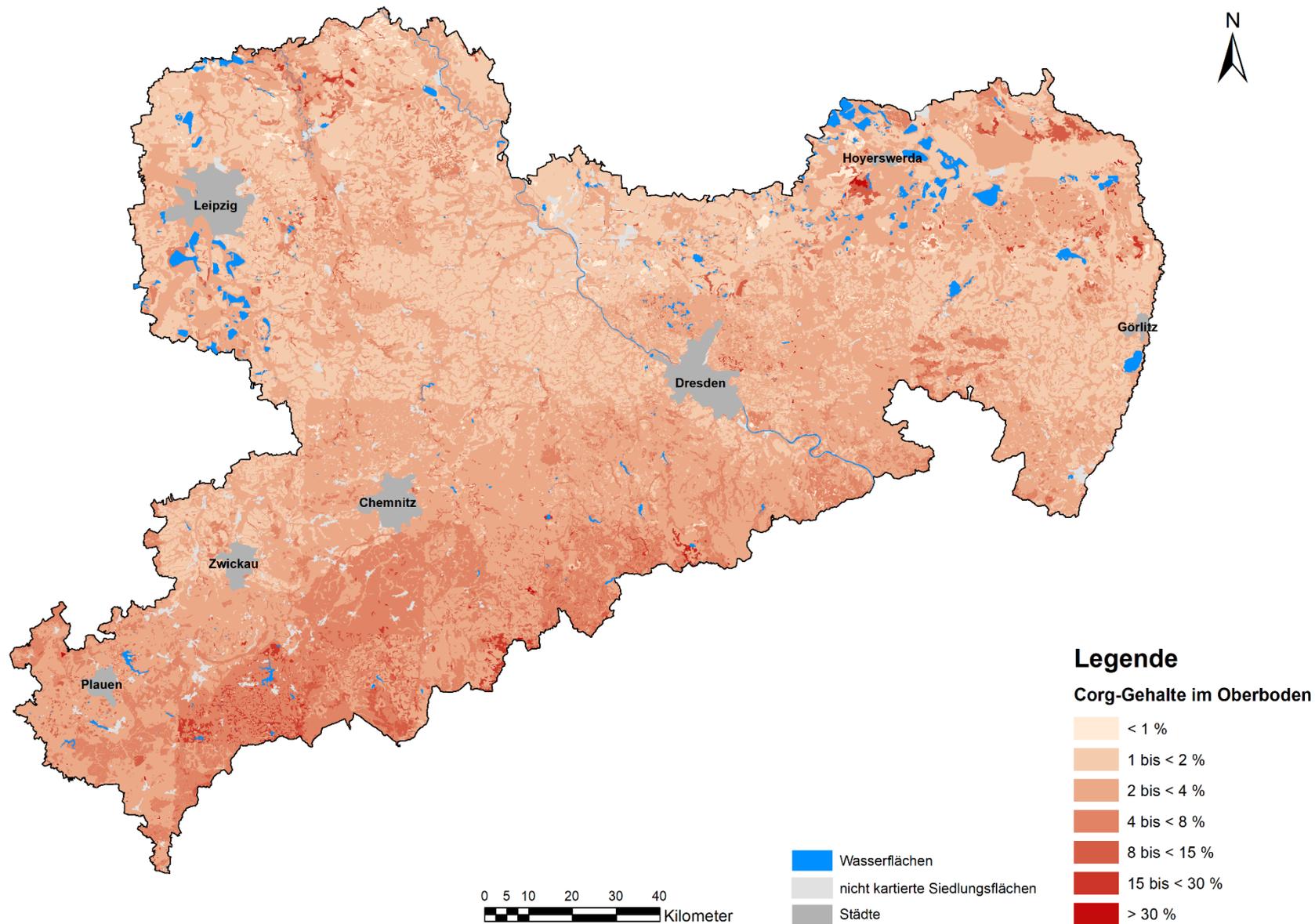


Abbildung 27: Mittlere C_{org} -Gehalte im Oberboden sächsischer Böden – Flächendarstellung (ohne org. Auflagen).

8 Statistische Auswertung

Zur Charakterisierung der Daten können als statistische Lageparameter sowohl der Mittelwert als auch der Median herangezogen werden. Der Mittelwert kann starker Verzerrung durch das Vorhandensein von Ausreißern unterliegen, während der Median von Ausreißern unbeeinflusst bleibt. Von Natur aus weisen vor allem Auenböden und Moore hohe bis sehr hohe C_{org} -Gehalte auf. Um die natürliche Schwankungsbreite der C_{org} -Gehalte besser berücksichtigen zu können, wurde sowohl bei der statistischen Auswertung der C_{org} -Daten als auch bei den Vorratsberechnungen der Mittelwert als bevorzugter Lageparameter herangezogen. Nicht erklärbare Extremwerte wurden jedoch nach eingehender Prüfung im Vorfeld der Berechnungen eliminiert.

Mit Hilfe der Pearson-Korrelation lässt sich die lineare Abhängigkeit zweier Variablen prüfen, d. h., ob es zu einer gleichmäßigen Zunahme/Abnahme der einen Variable kommt, wenn die andere Variable ebenfalls zu- oder abnimmt. Voraussetzung ist, dass die genutzten Variablen normalverteilt sind. Letzteres lässt sich mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüfen. Zu beachten ist, dass der Pearson-Korrelationskoeffizient durch Ausreißer stark beeinflusst wird.

Alternativ bietet sich die Spearman-Korrelation an, mit deren Hilfe die monotone Beziehung zweier Variablen getestet werden kann. Bei dieser wird geprüft, inwieweit sich die eine Variable in Abhängigkeit der anderen ändert, allerdings nicht zwangsläufig mit einer konstanten Rate.

Die Erstellung eines Streudiagramms kann erste Anhaltspunkte über einen möglichen Zusammenhang zweier Variablen liefern und es lässt sich visuell beurteilen, ob eine Korrelation vorliegt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt Aufschluss über die Güte einer linearen Regression bzw. darüber, wie gut sich die abhängige Variable durch die unabhängige(n) Variable(n) vorhersagen lässt.

Mittels eines Korrelationstests kann der Korrelationskoeffizient (Wert zwischen -1 und +1) ausgegeben werden und es lässt sich zusätzlich überprüfen, ob eine von 0 signifikant verschiedene Korrelation vorliegt. Grundsätzlich spricht man nach der Definition von COHEN (1988) bei einem Korrelationskoeffizienten von $< 0,1$ von einer geringen Korrelation, ab 0,3 bis 0,5 von einer mittleren Korrelation und ab 0,5 von einer hohen Korrelation.

Da in den Datenbeständen auch Ausreißer vorhanden sind, wurde neben dem Pearson-Korrelationskoeffizienten auch der Spearman-Korrelationskoeffizient ermittelt, sowie auf Signifikanz der Korrelation geprüft. Für die Korrelationstests wurde ein Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) festgelegt.

Alle statistischen Auswertungen der Daten wurden mit dem Programm „R“ durchgeführt.

8.1 Statistische Auswertung der C_{org}-Gehalte im Oberboden

Die statistische Auswertung der C_{org}-Gehalte im Oberboden erfolgte auf Grundlage aller zur Verfügung stehender Datensätze der landwirtschaftlichen Dauertestflächen, der BZE Wald und des FIS Bodens (10.264 Profile).

Um die Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes von den in Sachsen vorherrschenden klimatischen Bedingungen zu prüfen, wurden Korrelationsanalysen durchgeführt. Jedem Standort wurde neben der Höhenlage (Datenbank FIS Boden, ergänzt über DGM1) jeweils ein mittlerer jährlicher Niederschlagswert, die Jahresdurchschnittstemperatur sowie eine mittlere klimatische Wasserbilanz zugewiesen. Die Daten wurden dem Regionalen Klimainformationssystem ReKIS-Expert entnommen, der zentralen Plattform zur Bereitstellung von Daten und aufbereiteten Klimainformationen für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Dabei handelt es sich um Jahresmittelwerte aus dem Zeitraum 1991 bis 2020. Die in Form von Rasterdaten vorliegenden Werte wurden mit Hilfe von GIS-Tools aufbereitet und jeweils in eine Shape-Datei überführt. Anschließend erfolgte das schrittweise Verschneiden der Punktdaten mit den „Raster-Shapes“ der Klimadaten im GIS.

8.1.1 Höhenlage und Bodennutzung

Zunächst wurde ein Streudiagramm über alle Bodenprofile, für den Parameter „Höhe“, erstellt (siehe Abbildung 28). Der Pearson-Korrelationskoeffizient lag bei 0,313, der Spearman-Korrelationskoeffizient bei 0,437. Gemäß dem mit der Statistik Software R durchgeführten Korrelationstest lag damit bereits eine signifikante Korrelation vor, auch wenn die Daten eine große Streuung zeigten.

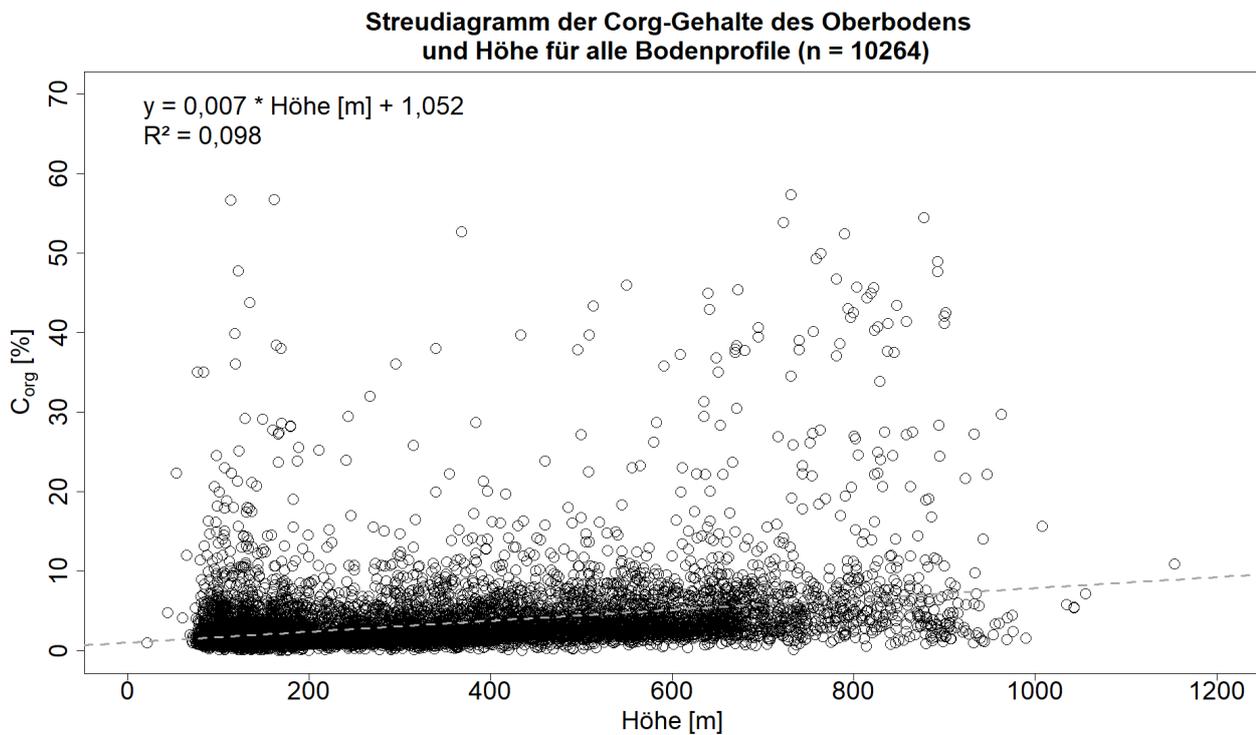


Abbildung 28: Streudiagramm von C_{org} und Höhe für alle Aufschlüsse.

Anschließend wurden die Daten nach den Hauptnutzungstypen Acker, Grünland, Wald und Sonstige differenziert und ausgewertet. Dabei handelt es sich um die am Standort im Zuge der Felddaufnahme ausgewiesenen Nutzungen, die den oben angeführten Hauptnutzungstypen zugeordnet wurden. Die Verteilung der C_{org}-Werte auf die verschiedenen Hauptnutzungstypen, einschließlich ausgewählter statistischer Kennwerte, ist nachfolgender Abbildung 29 bzw. Tabelle 19 zu entnehmen.

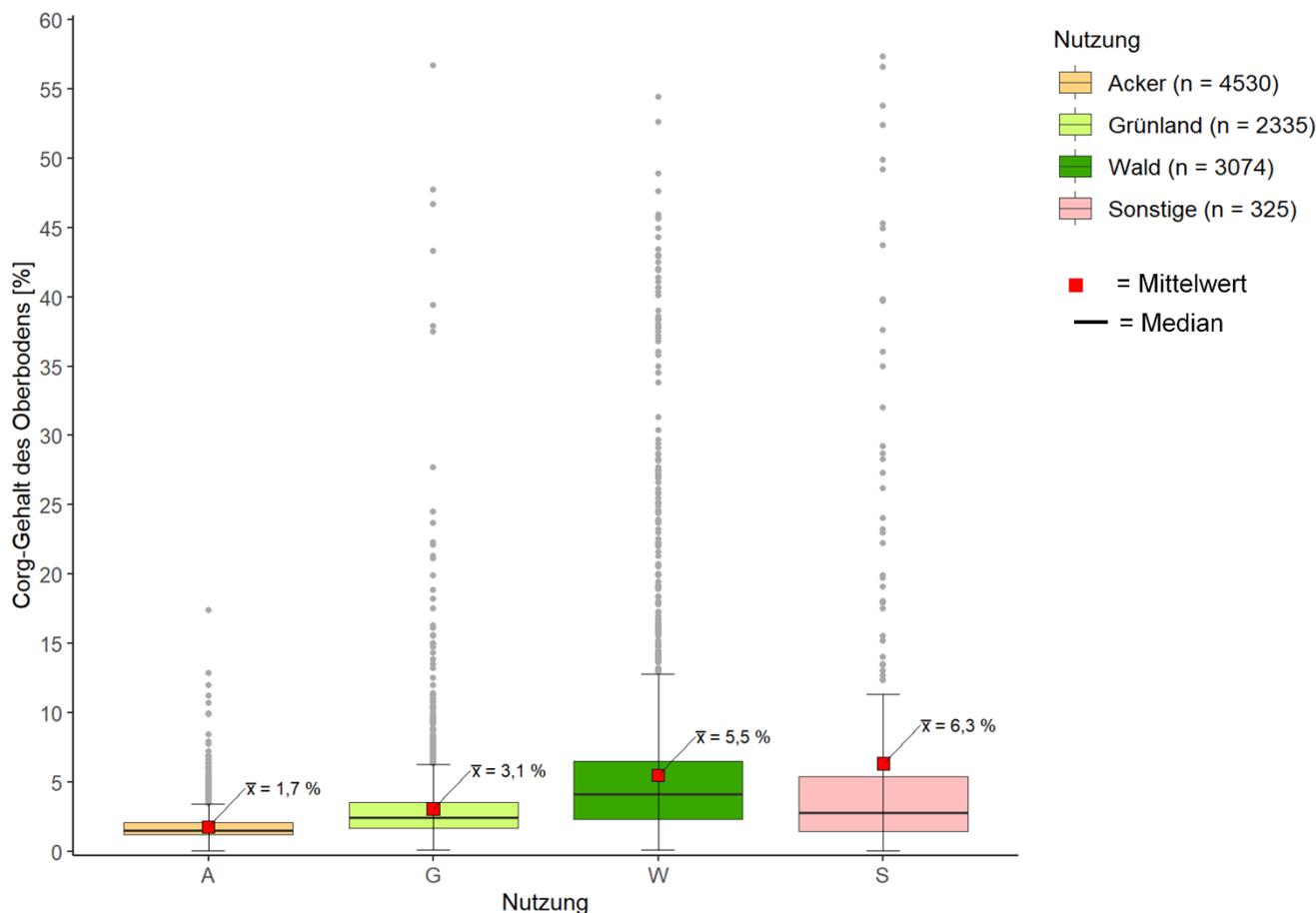


Abbildung 29: Verteilung der C_{org} -Werte des Oberbodens für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung.

Tabelle 19: Statistische Kennwerte der C_{org} -Werte des Oberbodens für unterschiedliche Hauptnutzungstypen (alle Punktdaten).

	Acker	Grünland	Wald	Sonstige
Anzahl Datenpunkte	4.530	2.335	3.074	325
Mittelwert C_{org} [%]	1,7	3,1	5,5	6,3
Median C_{org} [%]	1,5	2,5	4,1	2,8
Min C_{org} [%]	0,03	0,12	0,08	0,05
Max C_{org} [%]	17,4	56,7	54,4	57,3
SD C_{org} [%]	0,93	3,23	5,91	10,4
Variationskoeffizient [%]	53,4	105	108	164

Im Allgemeinen lag der Mittelwert des C_{org} -Gehaltes im Oberboden für den Hauptnutzungstyp Sonstige mit 6,3 % am höchsten, gefolgt von den Nutzungen Wald mit 5,5 %, Grünland mit 3,1 % und Acker mit 1,7 %. Eine große Differenz ergibt sich beim Vergleich von Mittelwert und Median für die Nutzung Sonstige. Hier ist der Median des C_{org} -Gehaltes mit 2,8 % mehr als halb so gering wie der Mittelwert. Dem entsprechend liegt beim Hauptnutzungstyp Sonstige auch die größte Streuung vor, wie der vergleichsweise hohe Variationskoeffizient, als Maß für die relative Streuung, belegt.

Auch für die Nutzung Wald ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Median und Mittelwert von 1,4 %. Im Vergleich zu den Nutzungen Acker und Grünland streuen die ermittelten C_{org} -Gehalte des Oberbodens für Standorte unter Wald oder sonstiger Nutzung deutlich stärker. Es gibt insbesondere mehr Standorte mit sehr hohem C_{org} -Gehalt im Oberboden (siehe Abbildung 29).

Die Ackerböden zeigen die geringste Streuung. Die Differenz zwischen Mittelwert und Median beträgt lediglich 2 %, der Variationskoeffizient ist deutlich geringer als bei den anderen Nutzungen.

Durch die Nutzungsdifferenzierung ergaben sich Streudiagramme mit deutlich besser erkennbarer Korrelation zwischen C_{org} -Gehalt im Oberboden und der Höhenlage. Dies wird nachfolgend am Beispiel der Ackernutzung aufgezeigt (Abbildung 30). Der Pearson-Korrelationskoeffizient lag bei 0,400 und der Spearman-Korrelationskoeffizient bei 0,451.

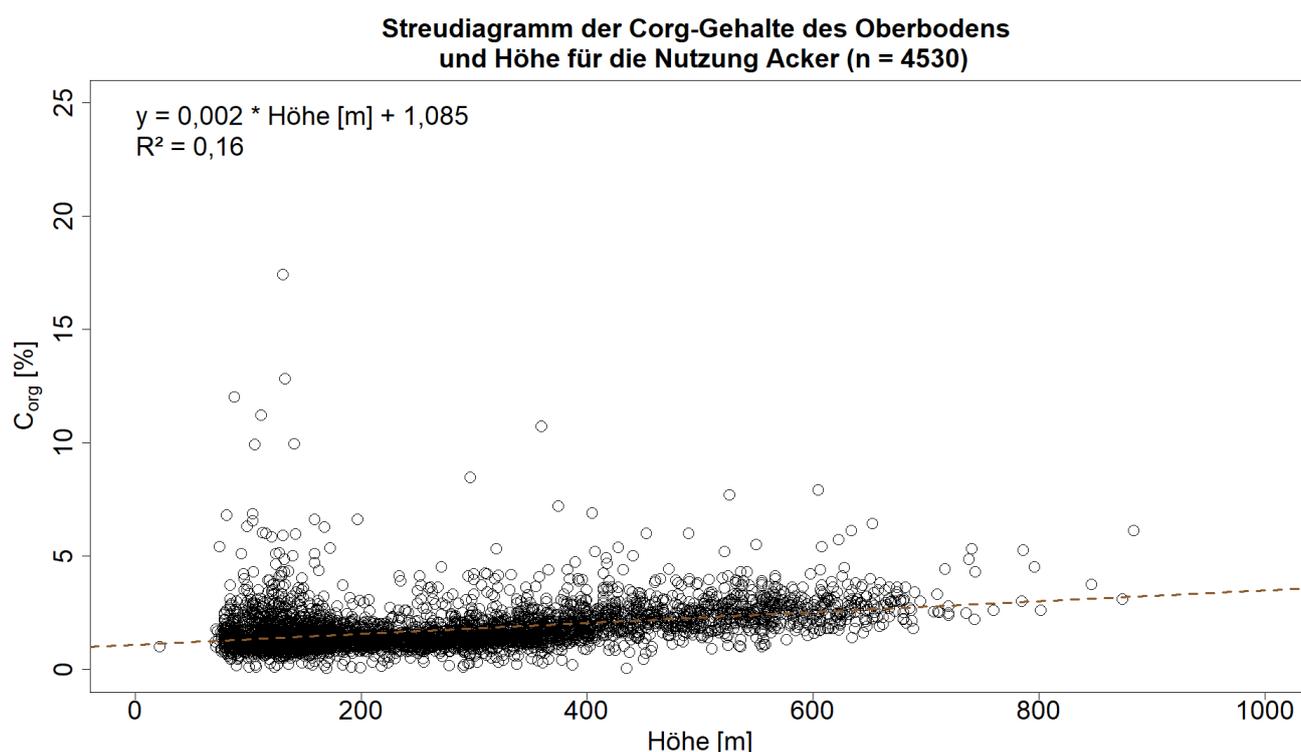


Abbildung 30: Streudiagramm von C_{org} (Oberboden) und Höhe für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung „Acker“.

8.1.2 Bodentyp Braunerde

Zur Berücksichtigung bodengenetischer Einflüsse wurden zudem ausgewählte Bodentypen betrachtet. Die Differenzierung nach Bodentypen (einschließlich Subtypen und Varietäten) lieferte noch höhere Korrelationen der Variablen. Nachfolgend sind beispielhaft die Ergebnisse der statistischen Auswertung für den Bodentyp Braunerde zusammengestellt, für die mit insgesamt 3.421 Standorten die meisten Datenpunkte vorliegen.

In Abbildung 31 ist die Verteilung der C_{org} -Werte für alle Aufschlüsse des Bodentyps Braunerde differenziert nach der Hauptnutzungstyp in Form von Boxplots dargestellt. Die statistischen Kennwerte sind aus Tabelle 20 ersichtlich.

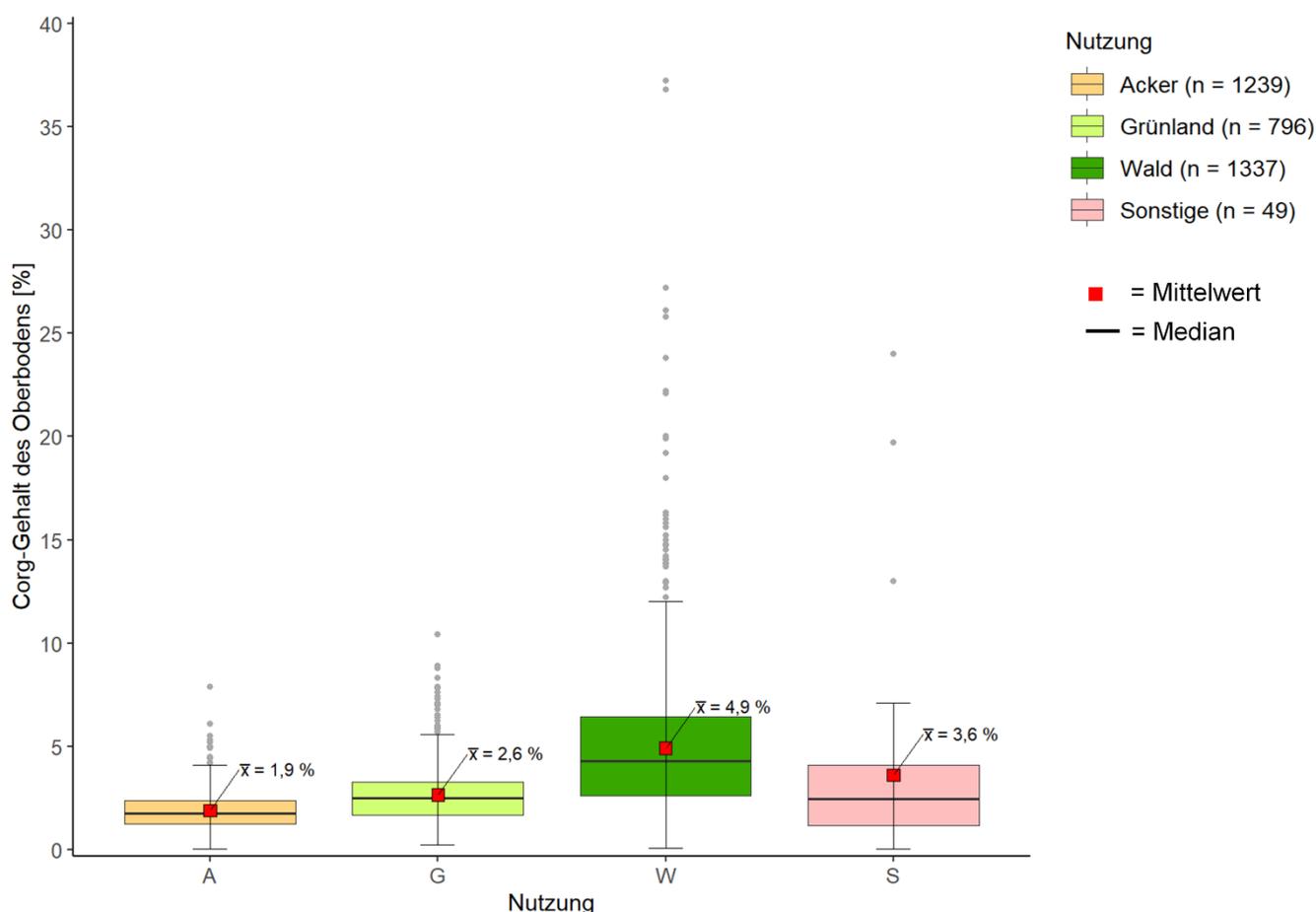


Abbildung 31: Verteilung der C_{org} -Werte im Oberboden für alle Aufschlüsse des Bodentyps Braunerde (inkl. Subtypen & Varietäten) differenziert nach Nutzung.

Tabelle 20: Statistische Kennwerte der C_{org}-Werte im Oberboden für den Bodentyp Braunerde und die unterschiedlichen Hauptnutzungstypen.

	Acker	Grünland	Wald	Sonstige
Anzahl Datenpunkte	1.239	796	1.337	49
Mittelwert C_{org} [%]	1,9	2,6	4,9	3,6
Median C_{org} [%]	1,8	2,5	4,3	2,5
Min C_{org} [%]	0,03	0,23	0,1	0,05
Max C_{org} [%]	7,9	10,4	37,2	24,0
SD C_{org} [%]	0,85	1,34	3,49	4,45
Variationskoeffizient [%]	45,2	50,6	71,0	123

Bei alleiniger Betrachtung der Braunerden ergibt sich ein etwas anderes Bild. Die Abweichungen zwischen den Mittelwerten und Medianen sind deutlich geringer als bei Einbeziehung des Gesamtdatenbestandes (vgl. Tabelle 19). Bei Acker- und Grünlandnutzung, aber auch unter Wald, ergibt sich eine geringere Streuung der Werte. Die höchste Streuung weist auch hier der Hauptnutzungstyp Sonstige auf. Die Differenz zwischen Mittelwert und Median beträgt immer noch 1,1 %.

Abbildung 32 zeigt am Beispiel der Braunerden unter Ackernutzung den Zusammenhang zwischen den C_{org}-gehalten und ausgewählten Klimaparametern. Neben der Höhenlage sind in Abbildung 32 auch die Parameter Temperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz berücksichtigt.

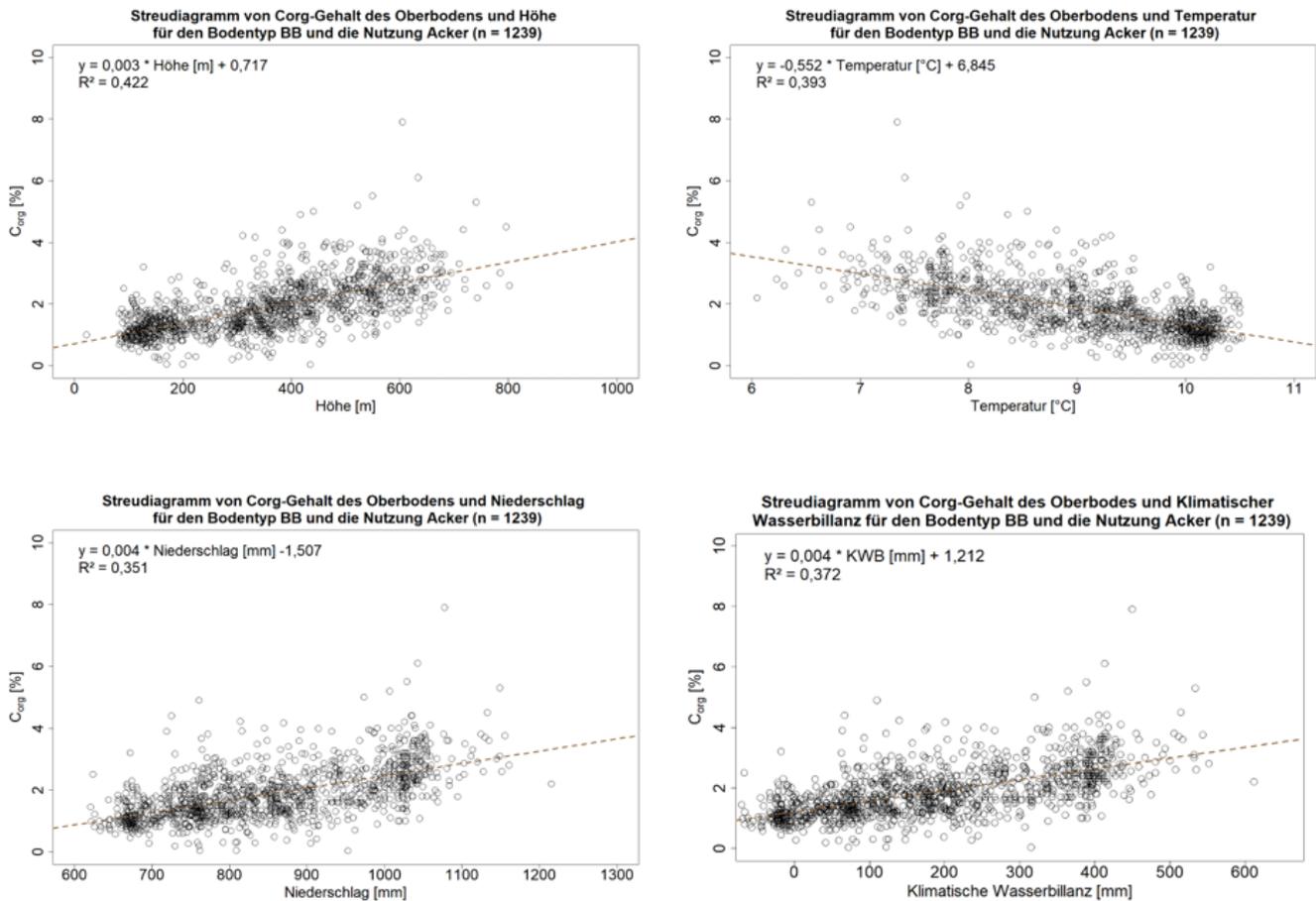


Abbildung 32: Streudiagramm von C_{org} -Gehalt im Oberboden und Höhe für den Bodentyp Braunerde und die Nutzung Acker.

Es ergeben sich jeweils deutliche Abhängigkeiten des C_{org} -Gehalts von den betrachteten Klimaparametern, wobei zwischen C_{org} -Gehalt und Niederschlag sowie der Höhenlage eine positive Korrelation besteht, zwischen C_{org} -Gehalt und der Temperatur dagegen eine negative Korrelation.

Mit zunehmender Höhenlage sowie höheren durchschnittlichen Jahresniederschlägen steigen die C_{org} -Werte im Oberboden tendenziell an (Bergland). Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt auch die Betrachtung der Jahresdurchschnittstemperaturen. So wurden bei den überwiegend dem Bergland zuzuordnenden Standorten mit geringerer Jahresdurchschnittstemperatur in der Regel höhere C_{org} -Werte im Oberboden festgestellt als dies bei Standorten mit höheren Jahresdurchschnittstemperaturen (Tief-land) der Fall war.

Somit wird auch das Ergebnis der in Kapitel 7 vorgenommenen Übertragung der punktbezogenen Kohlenstoffgehalte auf die Polygone der BK50 statistisch bestätigt. Mit zunehmender Höhenlage geht ein Anstieg der C_{org} -Gehalte im Oberboden einher, wie auch in Abbildung 26 ersichtlich.

Tabelle 21 enthält zusammengefasst die Ergebnisse ausgewählter Korrelationsanalysen. In der Tabelle sind die Korrelationskoeffizienten für den Bodentyp Braunerde und die Nutzungen Acker und Grünland zusammengestellt. Zusätzlich zu den Parametern Höhe, Niederschlag und Temperatur wird auch die Klimatische Wasserbilanz berücksichtigt.

Tabelle 21: Ergebnisse der Korrelationsanalysen des C_{org} -Gehaltes des Oberbodens für den Bodentyp Braunerde (BB) und die Nutzungen Acker (n = 1.239) und Grünland (n = 796).

Parameter	Differenzierung nach	R ²	Pearson-Korrelationskoeffizient	Spearman-Korrelationskoeffizient	Signifikante Korrelation
C_{org} & Höhe	BB & Acker	0,422	0,650	0,697	ja
	BB & Grünland	0,262	0,512	0,563	ja
C_{org} & Niederschlag	BB & Acker	0,393	0,593	0,616	ja
	BB & Grünland	0,222	0,471	0,533	ja
C_{org} & Temperatur	BB & Acker	0,351	-0,627	-0,659	ja
	BB & Grünland	0,257	-0,507	-0,565	ja
C_{org} & KWB	BB & Acker	0,372	0,610	0,637	ja
	BB & Grünland	0,233	0,483	0,548	ja

Alle überprüften Abhängigkeiten waren signifikant und laut der Einteilung nach COHEN (1988) lag in den meisten Fällen eine hohe Korrelation vor.

Die Korrelationsanalysen zeigen, dass der C_{org} -Gehalt des Oberbodens in Abhängigkeit zu den Parametern Höhe, Niederschlag, Temperatur und klimatische Wasserbilanz steht. Für andere getestete Bodentypen und Nutzungen fielen die Korrelationen weniger deutlich aus, womöglich aufgrund der geringeren Datenbasis. Dennoch konnten auch für andere Nutzungen und Bodentypen mit den entsprechenden Parametern Abhängigkeiten nachgewiesen werden.

8.1.3 Jahresniederschläge

Zur differenzierteren Betrachtung der Jahresniederschläge erfolgte abschließend eine Klassifikation der Daten in 5 Niederschlagsstufen. Die Verteilung der Daten auf die einzelnen Stufen kann nachfolgenden Boxplots (Abbildung 33) entnommen werden.

Auch Abbildung 33 zeigt noch einmal die deutliche Abhängigkeit der C_{org} -Gehalte im Oberboden von der Höhe der Jahresniederschläge, wie auch schon am Beispiel der Braunerde dargelegt wurde (siehe Kapitel 8.1.2). Mit Zunahme der Jahresniederschläge geht ausgehend von Stufe 1 (600-700 mm) bis Stufe 5 (≥ 1.000 mm) sowohl ein Anstieg des Mittelwertes als auch des Medians einher.

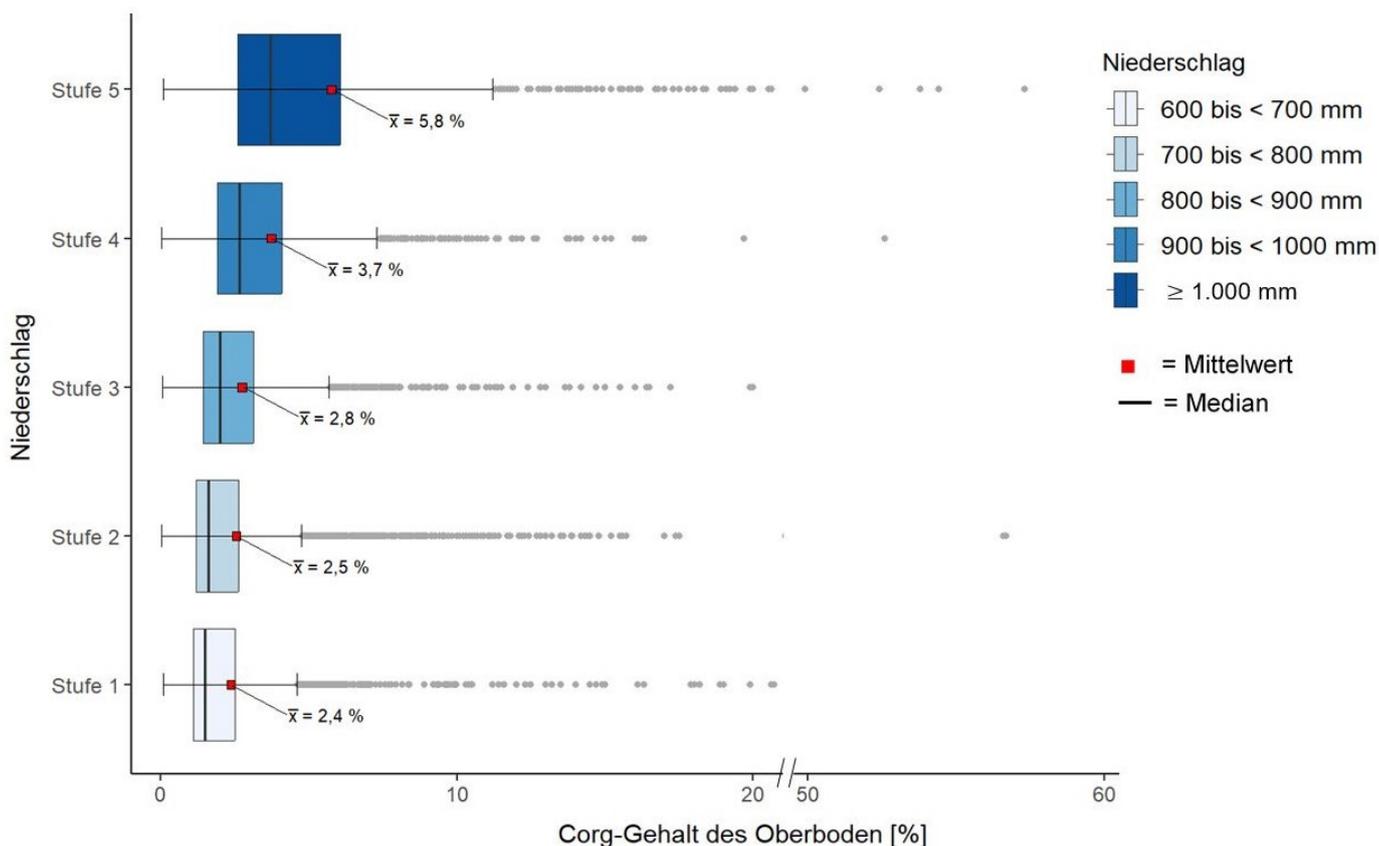


Abbildung 33: Einteilung der C_{org} -Gehalte im Oberboden in die standortbezogenen Niederschlagsstufen und Darstellung in Boxplots.

8.2 Statistische Auswertung der C-Vorratsberechnungen (ohne org. Auflagen)

Die statistische Auswertung der C-Vorratsberechnungen erfolgte unter Nutzung aller 3.793 in die Vorratsberechnungen eingehender Profile, unterschieden nach den Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm. Bei der Nutzung handelt es sich um die standortkonkreten Bodennutzungen, die im Zuge der Bodenkartierung aufgenommen wurden. Diese wurden den 4 Hauptnutzungskategorien zugeordnet.

Der Anteil an Wald-Profilen mit Analysendaten zur organischen Auflage lag unter 25%. Nur bei einigen wenigen Profilen waren die zur Ableitung der C-Vorräte erforderlichen Trockenrohdichten vorhanden. Aufgrund der unzureichenden Datenlage, konnten die organischen Auflagehorizonte nicht bei den C-Vorratsberechnungen und somit auch nicht bei der nachfolgend dargestellten statistischen Auswertung berücksichtigt werden.

8.2.1 Bodennutzung

In nachfolgende Abbildung 34 ist der nutzungsbezogene Mittelwert der C-Vorräte für die Tiefenstufen 0-30 cm und 30-100 cm einander gegenübergestellt. Die konkreten Zahlen sind in Tabelle 22 zusammengestellt.

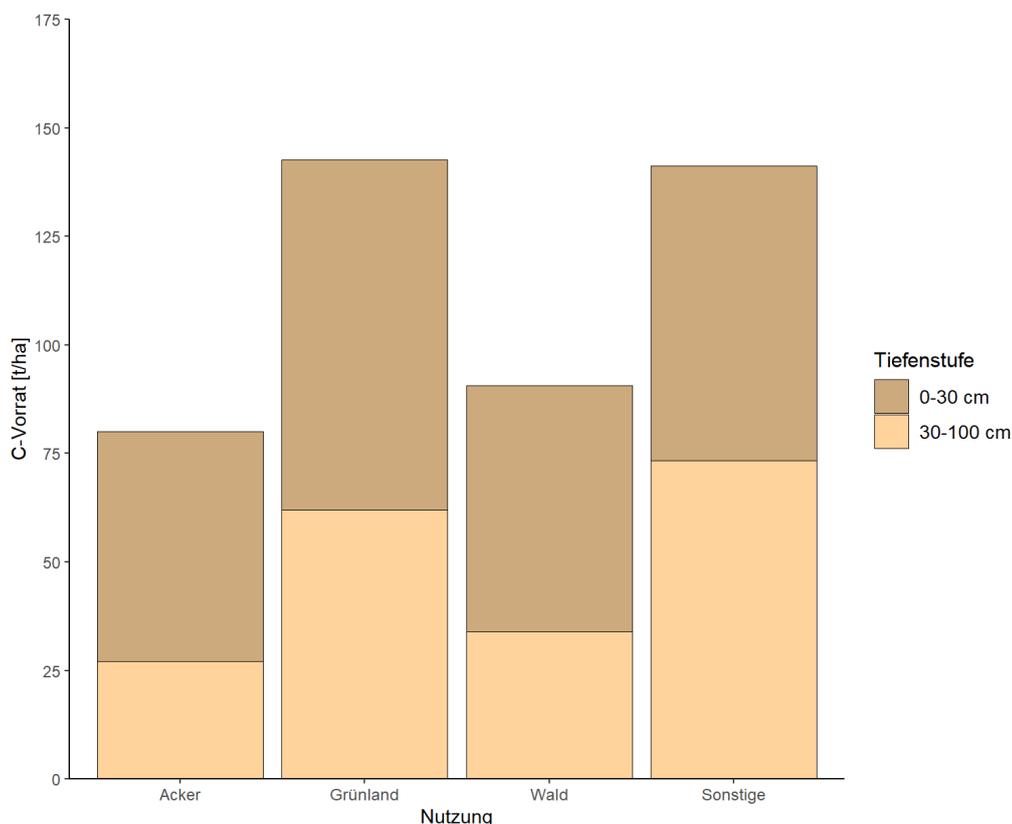


Abbildung 34: Mittlere C-Vorräte in den Tiefenstufen 0-30 cm und 30-100 cm nach Nutzung ohne Berücksichtigung der organischen Auflagen unter Wald.

Tabelle 22: Zusammenstellung des mittleren C-Vorrates der Bodenprofile ohne Berücksichtigung der organischen Auflagen unter Wald.

	Anzahl Datenpunkte	Mittlerer C-Vorrat [t/ha]		
		0-30 cm	30-100 cm	0-100 cm
Alle Daten	3.793	60,7	39,0	99,7
Acker	1.394	53,0	27,1	80,0
Grünland	767	80,6	61,9	142,6
Wald	1.444	56,6*	34,0	90,6*
Sonstige	188	68,0	73,3	141,3

* ohne organische Auflagen

Der Blick auf Tabelle 22 zeigt, dass die C-Vorratswerte der sächsischen Böden deutlich von der Bodennutzung beeinflusst werden. Dies lässt insbesondere der Vergleich der Vorratswerte von Grünland und Ackerböden erkennen. Der mittlere C-Vorrat für Grünland erscheint mit 80,6 t/ha am höchsten, jedoch nur, da die organischen Auflagen in die Berechnung nicht einbezogen wurden. Werden diese mit einbezogen, ist der mittlere C-Vorrat unter forstlicher Nutzung am höchsten. Zwischen Acker- und Grünlandnutzung ergibt sich eine Differenz von fast 30 t/ha. Dieser Unterschied dürfte auf die vermehrte Nutzung vernässter Standorte als Grünland zurückzuführen sein. Zu einer vergleichbaren Einschätzung gelangten auch MÖLLER & KENNEPOHL (2014) bei der Untersuchung niedersächsischer Böden.

Auch im Unterboden (Tiefenstufe 30-100 cm) wird in den Grünlandböden doppelt so viel Kohlenstoff bevorratet wie unter Ackernutzung. Dies dürfte ebenfalls von der Standortwahl abhängig sein. Grünlandböden sind vor allem in den Auen weit verbreitet, in deren Sedimenten in der Regel höhere Kohlenstoffgehalte nachgewiesen werden können. Zudem ist der Kohlenstoffabbau auf vernässten Standorten gehemmt, was ebenfalls zu höheren C-Vorräten bei den als Grünland genutzten Standorten führt.

Betrachtet man den Unterboden (30-100 cm), so ist der C-Vorrat bei den sonstigen Nutzungen am höchsten, gefolgt von Grünland, Wald und Acker. In der Tiefenstufe 0-100 cm, ist der mittlere C-Vorrat (ohne org. Auflagen) beim Grünland mit ca. 143 t/ha am höchsten, dicht gefolgt von der Nutzungsform Sonstige mit ca. 141 t/ha; die C-Vorräte der Waldböden Sachsens weisen hierbei ein vergleichbares Niveau wie die Ackerböden auf.

Die Verteilung der Daten für die unterschiedlichen Nutzungstypen ist nachfolgend (Abbildung 35) für die Tiefenstufe 0-30 cm (Abbildung 35) und 0-100 cm (Abbildung 36) in Form von Boxplots dargestellt. In beiden Diagrammen zeigt sich bei den Grünland-, Wald- und sonstigen Standorten, im Vergleich zu

den Ackerstandorten, eine deutliche größere Streuung der Daten. Ein Grund hierfür, dürfte das vermehrte Vorkommen von Böden mit höheren C-Vorräten (z.B. Moore, Anmoore, Auen) unter den genannten Nutzungen sein.

Die größte Streuung sowohl im Oberboden (Tiefenstufe 0-30 cm) als auch bei Betrachtung des gesamten Profils (Tiefenstufe 0-100 cm), tritt bei der Nutzung Sonstige auf. Die Streuung erklärt sich durch die vielfältigen Nutzungsarten, die hier zusammengefasst sind. Neben Brachflächen und Ödland sind dieser Kategorie u.a. auch Siedlungsflächen, Deponien, Abbau- und Abtragungsflächen sowie Verkehrsflächen zugeordnet.

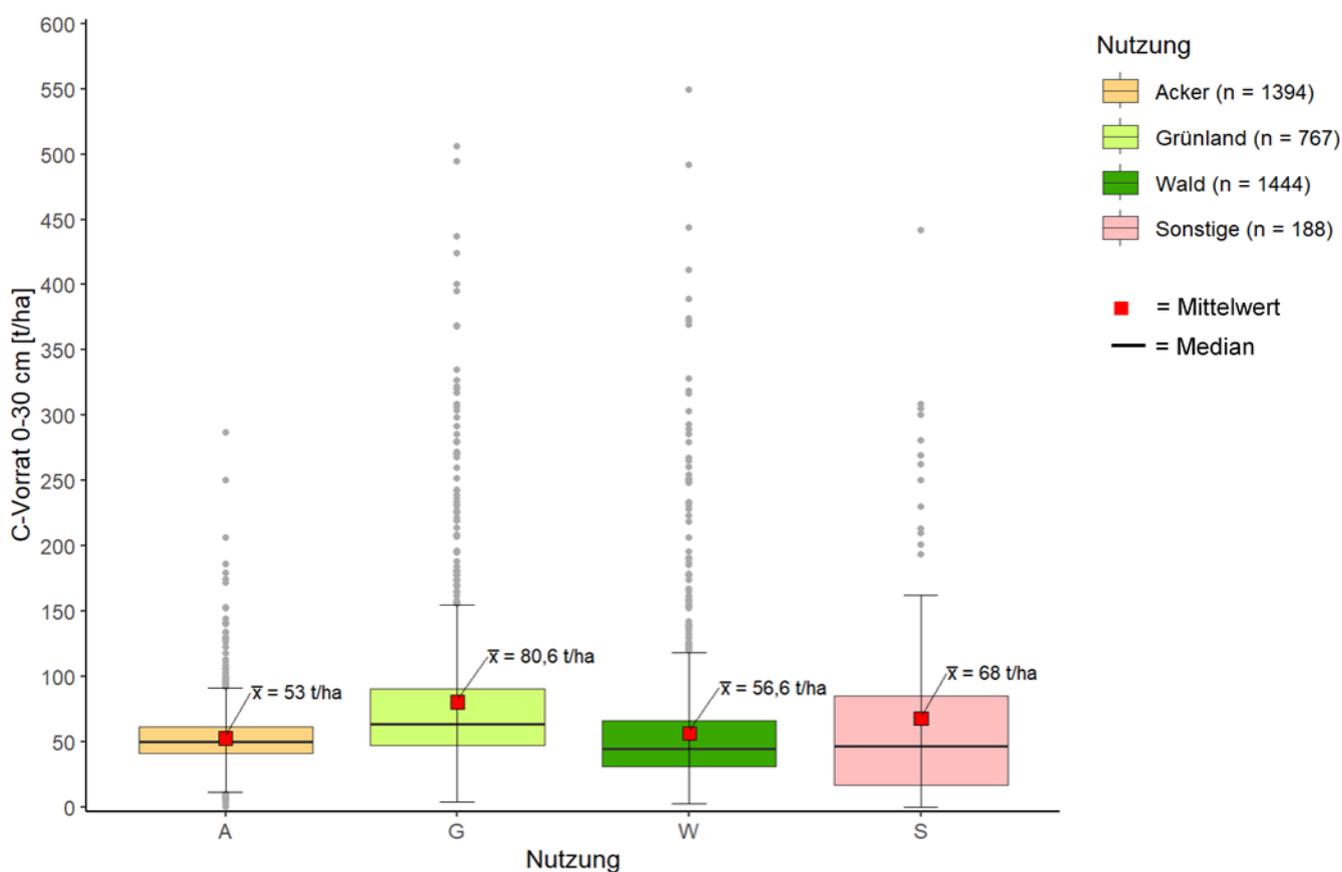


Abbildung 35: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung für die Tiefenstufe 0-30 cm.

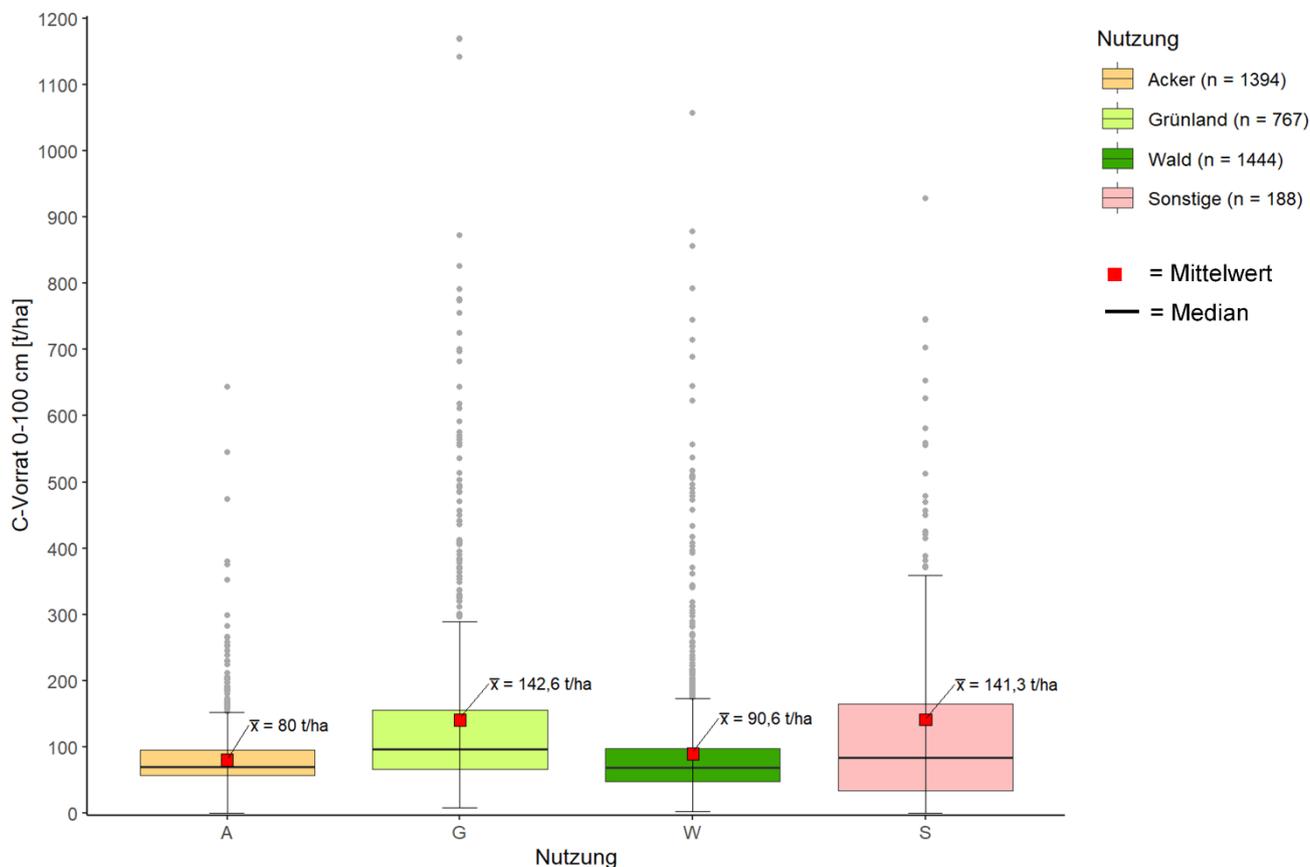


Abbildung 36: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) für alle Aufschlüsse differenziert nach Nutzung für die Tiefenstufe 0-100 cm.

Für die Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm erfolgte zudem eine Differenzierung nach dem Bodentyp unter Berücksichtigung von Subtypen & Varietäten. Zu beachten ist, dass für die 272 Standorte der Bodenzustandserhebung unter Wald keine Information zum Bodentyp vorlag und diese demzufolge bei der Auswertung nach dem Bodentyp nicht berücksichtigt werden konnten. In die Auswertung einbezogen wurden nur ausgewählte Bodentypen, für die im Minimum 200 Datenpunkte vorlagen.

Die Boxplots mit der Verteilung der C-Vorräte nach Bodentypen sind in Abbildung 37 (0-30 cm) und Abbildung 38 (0-100 cm) zusammengestellt.

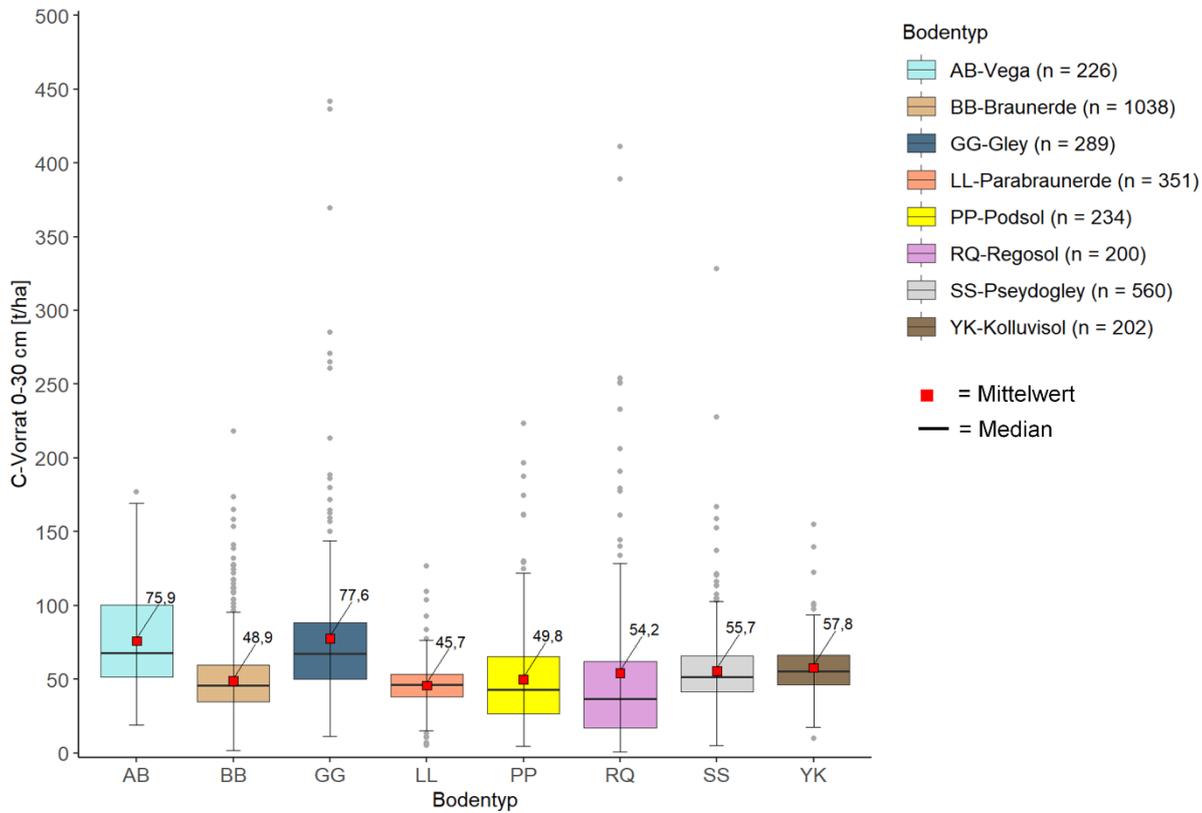


Abbildung 37: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) nach Bodentypen (inkl. Subtypen & Varietäten) in der Tiefenstufe 0-30 cm.

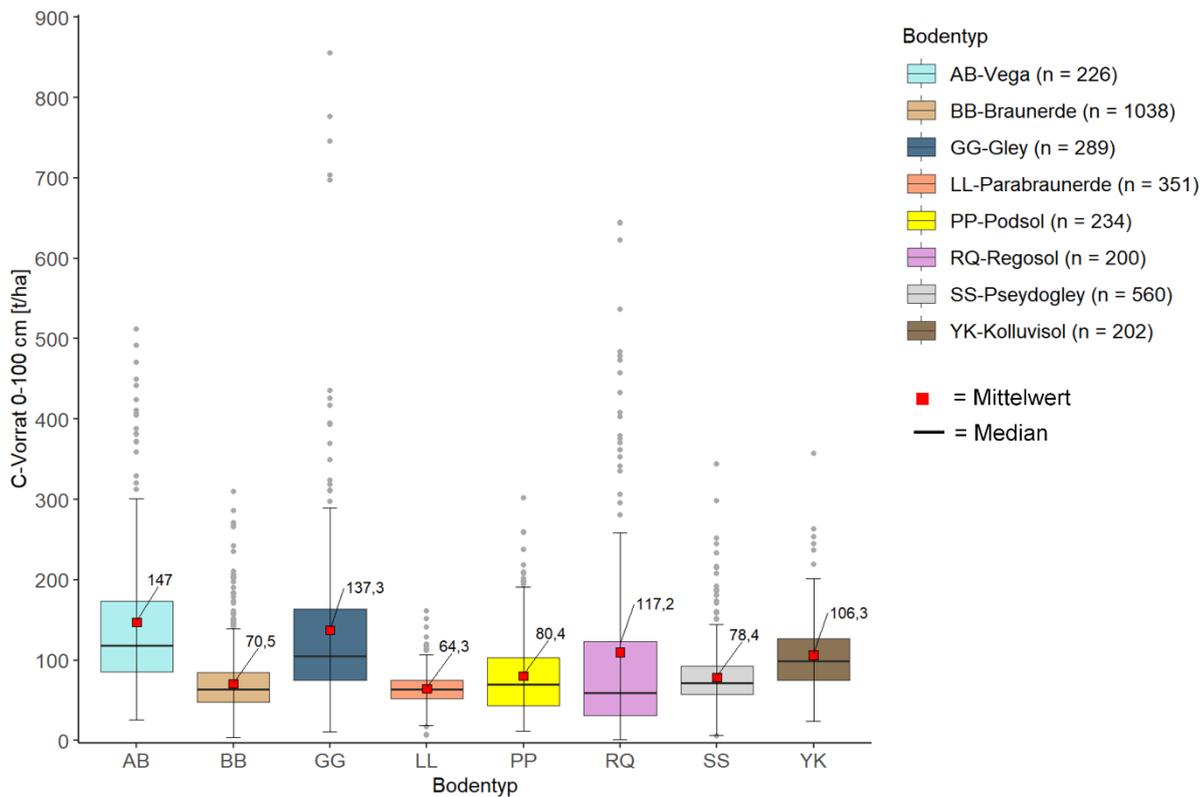


Abbildung 38: Verteilung der C-Vorräte (ohne org. Auflagen) nach Bodentypen (inkl. Subtypen & Varietäten) in der Tiefenstufe 0-100 cm.

Die höchsten C-Vorräte ergeben sich für die Bodentypen Vega (AB) und Gley (GG). Diese von Wasser beeinflussten semiterrestrischen Böden haben eine große Bedeutung für die Speicherung von organischem Kohlenstoff und zeichnen sich generell durch höhere C-Vorräte aus. Da die Bodenporen zeitweise oder permanent mit Wasser gefüllt sind, herrscht Sauerstoffmangel (reduzierende Bedingungen), wodurch die Mineralisation der organischen Substanz deutlich verlangsamt wird und sich Kohlenstoff im Boden anreichern kann.

Die geringsten C-Vorräte wurden für die oftmals unter Ackernutzung befindlichen Braunerden (BB) und Parabraunerden (LL) ermittelt. Beide Bodentypen weisen auch die kleinste Streuung der Werte auf.

Zusätzlich erfolgte eine Differenzierung der Bodenprofile nach Nutzung und Bodentyp. Die berechneten Vorratsmittelwerte sind in Tabelle 23 zusammengestellt. Für die grau hinterlegten Zelleneinträge lagen weniger als 20 Datenpunkte vor. Organische Auflagen unter Wald wurden bei der Zusammenstellung nicht berücksichtigt.

Tabelle 23: Zusammenstellung der mittleren C-Vorräte (ohne org. Auflagen) der Aufschlüsse für unterschiedliche Nutzungen, Tiefenstufen und Bodentypen (grau hinterlegt < 20 Datenpunkte).

		C-Vorrat nach Nutzung [t/ha]							
		Acker		Grünland		Wald *		Sonstige	
Bodentyp	Tiefenstufe	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm	0-30 cm	0-100 cm
	AB (Vega)		61,6	105,7	80,1	157,6	78,5	152,5	100,8
BB (Braunerde)		49,7	67,6	54,6	75,5	46,4	70,6	45,3	77,7
GG (Gley)		67,4	104,8	80,1	148,1	80,7	134,7	88,3	187,3
LL (Parabraunerde)		46,2	64,7	52,2	71,7	40,8	59,4	27,1	46,1
PP (Podsol)		69,8	99,9	84,9	113,4	46,9	77,7	11,8	29,5
RQ (Regosol)		64,6	120,1	54,2	98,3	65,7	160,2	30,2	66,1
SS (Pseudogley)		52,1	73,0	63,1	85,7	58,9	85,7	30,9	85,7
YK (Kolluvisol)		56,5	102,5	64,0	124,4	48,4	87,1	66,8	114,7

* ohne organische Auflagen

Auch bei Nutzungsdifferenzierung ergibt sich ein vergleichbares Bild. Die höchsten C-Vorräte sind unabhängig von ihrer Nutzung in den Veges (AB) und Gleyen (GG) gespeichert. Auffällig sind jedoch die Regosole (RQ), die unter Acker- und Waldnutzung mit 120,1 t/ha bzw. 160,2 t/ha die höchsten C-Vorräte

der Tiefenstufe 0-100 cm aufweisen. Ein Grund der dazu beiträgt, dürfte ihr Vorkommen in den sächsischen Braunkohlerevieren sein. In den rekultivierten Böden der Tagebaue sind oftmals Braunkohlereste enthalten, die zu höheren C_{org} -Gehalten und damit höheren C-Vorräten führen. Auch Kolluvisole (YK) aus verlagertem humosem Bodenmaterial bevorraten unter Acker- bzw. Grünlandnutzung mit 102,6 t/ha bzw. 124,4 t/ha größere Mengen an Kohlenstoff.

Für Braunerden (BB) und Parabraunerden (LL) ergibt sich auch bei Berücksichtigung der Nutzung keine signifikante Differenzierung. Beide weisen bei allen 4 Nutzungen mit die geringsten C-Vorräte auf.

Für den Nutzungstyp Sonstige lagen bei den Bodentypen Parabraunerde (LL), Podsol (PP), Pseudogley (SS) und Kolluvisol (YK) nur wenige Datenpunkte vor, sodass hier nur eingeschränkte Aussagen möglich sind. Gleiches gilt für die Nutzung Wald und die Bodentypen Vega (AB) und Kolluvisol (YK) sowie die Nutzung Acker und Grünland und den Bodentyp Podsol (PP).

8.2.2 Höhenlage und klimatische Einflussfaktoren

Um die Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes von den in Sachsen vorherrschenden klimatischen Bedingungen zu untersuchen wurden analog zu den Auswertungen der C_{org} -Gehalte des Oberbodens beispielhaft auch Korrelationen zwischen den abgeleiteten C-Vorräten und den Parametern Jahresniederschlag, Jahresdurchschnittstemperatur, Klimatische Wasserbilanz sowie der Höhenlage der Standorte berechnet.

Nachfolgende Abbildung 39 zeigt den Zusammenhang zwischen dem C-Vorrat der Tiefenstufe 0-30 cm und der Höhenlage am Beispiel der Nutzung Acker.

Streudiagramm von C-Vorrat der Tiefenstufe 0-30 cm und Höhe für die Nutzung Acker (n = 1394)

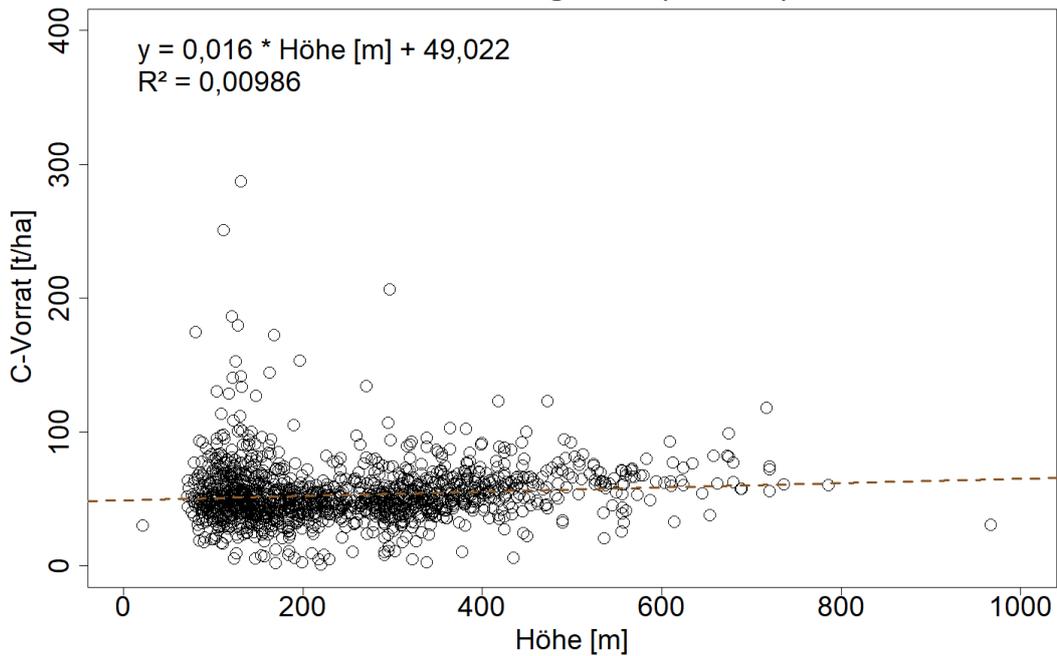


Abbildung 39: Streudiagramm von C-Vorrat und Höhe für die Nutzung Acker.

Der Pearson-Korrelationskoeffizient lag bei 0,09 und der Spearman-Korrelationskoeffizient bei 0,14. Durch eine zusätzliche Einschränkung nach dem Bodentyp ergab sich am Beispiel der Braunerde (BB) folgendes in Abbildung 40 ersichtliche Streudiagramm.

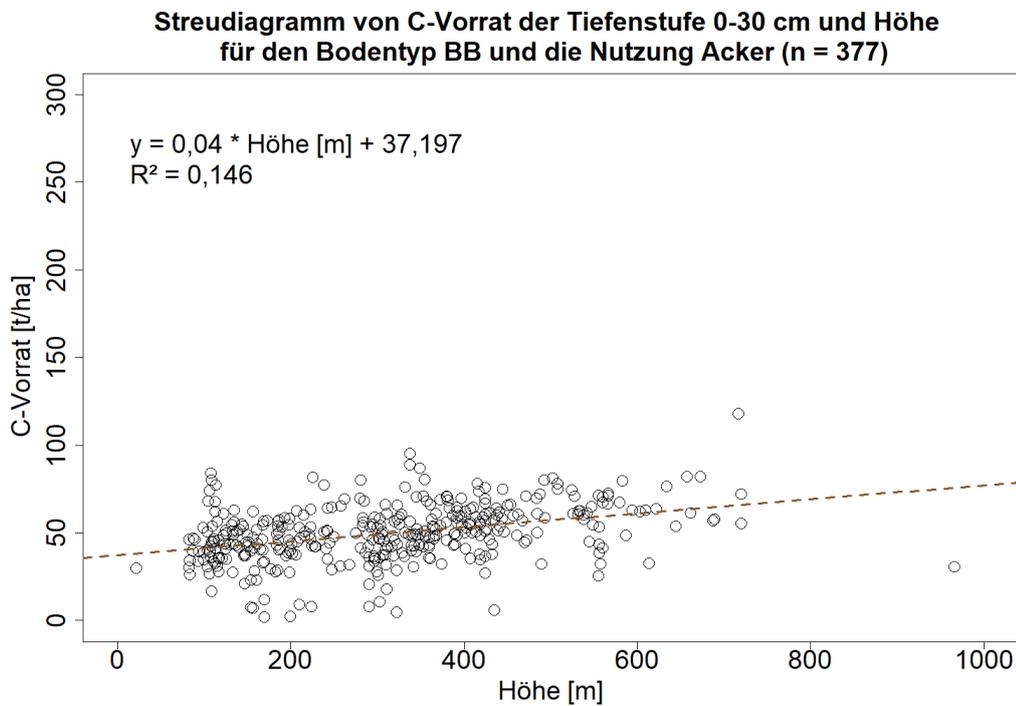


Abbildung 40: Streudiagramm von C-Vorrat und Höhe für den Bodentyp Braunerde und die Nutzung Acker.

Hierbei lag der Pearson-Korrelationskoeffizient bei 0,38 und der Spearman-Korrelationskoeffizient bei 0,41, was auf einen deutlich besseren Zusammenhang bei Differenzierung nach dem Bodentyp hinweist.

Weitere Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen C-Vorrat der Tiefenstufe 0-30 cm und den klimatischen Parametern für die Nutzungen Acker und Grünland und den Bodentyp Braunerde sind in Tabelle 24 zusammengestellt.

Tabelle 24: Ergebnisse der Korrelationsanalysen des C-Vorrates der Tiefenstufe 0-30 cm für den Bodentyp Braunerde (BB) und die Nutzungen Acker (n = 377) und Grünland (n = 167).

Parameter	Differenzierung nach	R ²	Pearson-Korrelationskoeffizient	Spearman-Korrelationskoeffizient	Signifikante Korrelation
C-Vorrat (0-30 cm) & Höhe	BB & Acker	0,146	0,382	0,414	ja
	BB & Grünland	0,117	0,342	0,304	ja
C-Vorrat (0-30 cm) & Niederschlag	BB & Acker	0,122	0,349	0,369	ja
	BB & Grünland	0,067	0,259	0,234	ja
C-Vorrat (0-30 cm) & Temperatur	BB & Acker	0,128	-0,358	-0,365	ja
	BB & Grünland	0,105	-0,324	-0,310	ja
C-Vorrat (0-30 cm) & Klimatische Wasserbilanz	BB & Acker	0,132	0,363	0,387	ja
	BB & Grünland	0,076	0,276	0,261	ja

Zwar konnten auch hier signifikante Korrelationen festgestellt werden, diese waren aber bei allen Parametern geringer als es für den C_{org}-Gehalt der Fall war. Von ihrer Aussage her, sind die Ergebnisse aber vergleichbar mit der Auswertung der Kohlenstoffgehalte des Oberbodens (siehe Kapitel 8.1, Tabelle 21). Es lassen sich analoge Abhängigkeiten der C-Vorräte von den betrachteten Klimaparametern nachweisen, wobei auch hier zwischen C-Vorrat und Niederschlag sowie der Höhenlage und der klimatischen Wasserbilanz eine positive Korrelation besteht. Eine negative Korrelation besteht zwischen den C-Vorratswerten und der Temperatur.

Neben der hier deutlich geringeren Anzahl an Datenpunkten fließen außer den C_{org}-Gehalten auch die Trockenrohichte und das Skelettvolumen in die Vorratsberechnungen ein, die das Ergebnis der Korrelationsanalysen entsprechend beeinflussen.

9 Vergleich mit Daten anderer Bundesländer

Im Verlauf des Vorhabens wurden mehrere Publikationen und Berichte zum Thema Kohlenstoffvorräte auf Bundes- und Länderebene recherchiert und ausgewertet. Es wurden die Ansätze folgender Bundesländer / Institutionen, die bereits eine Darstellung von C-Vorräten zum Thema hatten, berücksichtigt:

- Berlin
- Brandenburg
- Baden-Württemberg
- Bayern
- Hessen
- Niedersachsen
- Rheinland-Pfalz
- Sachsen-Anhalt
- Thünen-Institut für Waldökosysteme Eberswalde
- Thüringen

Eine Übersicht zu den Vorgehensweisen und den angewandten Methoden der in die Betrachtung einbezogenen Bundesländer und Institutionen ist im Anhang 1 zusammengestellt. Anhang 2 enthält eine kurze Zusammenfassung des jeweils gewählten Ansatzes ausgewählter Bundesländer.

In nachfolgender Tabelle 25 sind die aus der Literatur entnommenen Ergebnisse der Vorratsberechnungen ausgewählter Bundesländer im Vergleich zu den für Sachsen ermittelten Vorratswerten zusammengestellt. Aufgeführt sind flächengewichtete Mittelwerte in t/ha unterschieden nach Tiefenstufen und den Hauptnutzungstypen Acker, Grünland, Wald und Sonstige.

Tabelle 25: Vergleich von Daten zum Kohlenstoffvorrat (i.d.R. ohne org. Auflagen) für unterschiedliche Bundesländer (Auswahl). Zusammenstellung erfolgte in Anlehnung an WIESNER und SAUER 2021.

			C-Vorrat [t/ha]				
Bundesland	Nutzung	Auflage	0-30 cm	30-100 cm	0-100 cm	Anmerkung	Quelle
Sachsen	Acker	-	54	29	83	-	dieser Bericht
Rheinland-Pfalz		-	52	24	76	-	WIESNER und SAUER 2021
Baden-Württemberg		-	66	32	98	-	WALDMANN und WEINZIERL 2015
Berlin		-	-	-	73	-	KLINGENFUß et al. 2019, 2020
Bayern		-	-	-	92	-	SPÖRLEIN et al. 2014
Sachsen-Anhalt		-	-	-	102	-	WANSA und HARTMANN 2014
Sachsen	Grünland	-	63	41	104	inkl. Moorflächen	dieser Bericht
Rheinland-Pfalz		-	64	22	86	inkl. Moorflächen	WIESNER und Sauer 2021
Baden-Württemberg		-	92	45	137	inkl. Moorflächen	WALDMANN und WEINZIERL 2015
Baden-Württemberg		-	81	34	115	exkl. Moorflächen	WALDMANN und WEINZIERL 2015
Sachsen	Wald	36	58	34	92	ohne org. Auflage	dieser Bericht
Rheinland-Pfalz		15	62	26	87	-	WIESNER und SAUER 2021
Berlin		-	-	-	93	-	KLINGENFUß et al. 2019, 2020
Bayern		-	-	-	98	-	Spörlein et al. 2014
Baden-Württemberg		-	75	26	101	inkl. Auflagehumus	WALDMANN und WEINZIERL 2015
Sachsen	Sonstige	-	55	39	94	-	dieser Bericht
Rheinland-Pfalz		-	52	34	86	-	WIESNER und SAUER 2021
Bayern		-	-	-	107	-	SPÖRLEIN et al. 2014

Der Ländervergleich zeigt, dass die für Sachsen ermittelten Vorratswerte der unterschiedlichen Landnutzungen bei allen drei Tiefenstufen in einem vergleichbaren Niveau liegen. Dies trifft im Besonderen auf die Ergebnisse von Rheinland-Pfalz (WIESNER und SAUER 2021) zu. Bei detaillierter Betrachtung lassen sich jedoch einige Unterschiede erkennen. Vor allem für Baden-Württemberg wurden bei allen Nutzungen deutlich höhere Werte berechnet, was vermutlich auf die methodische Herangehensweise zurückzuführen ist. Im Unterschied zu den übrigen Bundesländern, bei denen in der Regel eine klassische Ableitung der C-Vorräte mit Hilfe des C_{org} -Gehalts, der Trockenrohddichte bzw. der Lagerungsdichte, dem Skelettvolumen und der Horizontmächtigkeit erfolgte, wurden die C-Vorratswerte für Baden-Württemberg per multipler linearer Regressionen unter Einbeziehung von Klimaparametern und Reliefparametern abgeleitet (WALDMANN und WEINZIERL 2015).

Im Vergleich zu Bayern (Acker, Grünland und Wald) und Sachsen-Anhalt (Acker) ergaben die für Sachsen durchgeführten Berechnungen, bezogen auf die Tiefenstufe 0-100 cm, etwas geringere C-Vorratswerte. Höhere Vorratswerte wurden dagegen für die Auflagen der Waldböden im Vergleich zu Rheinland-Pfalz eingeschätzt. Bei den sonstigen Nutzungen liegt Sachsen leicht über den Werten von Rheinland-Pfalz, bei der Tiefenstufe 0-100 cm aber um gut 10 t/ha unter dem für Bayern abgeleiteten Ergebnis.

Wie schon von WIESNER und SAUER 2021 dargelegt, sind die Unterschiede zwischen den Bundesländern zum einen auf die genutzten Berechnungsmethoden und Vorgehensweisen bei der Bestimmung der C-Vorräte und zum anderen auf die jeweils unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten zurückzuführen. Zudem spielen auch die unterschiedlichen Ausgangssubstrate der Böden der verschiedenen Bundesländer eine wesentliche Rolle. Wie in anderen Mittelgebirgsregionen, findet man im Bergland Sachsens häufig flachgründige Böden und/oder skelettreiche Bodensubstrate vor, die infolge der beschränkten Speicherkapazität zu entsprechend geringeren C-Vorräten führen.

In Tabelle 26 sind die für Sachsen abgeleiteten flächenbezogenen C-Vorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm ausgewählten Ergebnissen anderer Bundesländer gegenübergestellt. Für diesen Vergleich wurden ausschließlich die Ergebnisse von Flächenländern herangezogen. Kursiv dargestellt sind die Vergleichswerte der ersten Vorratsabschätzung auf der Grundlage der Leitprofile der BK50 (vgl. Kapitel 5.1).

Tabelle 26: C-Vorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm (ohne org. Auflage) im Ländervergleich.

Bundesland	Landesfläche in ha	Vorrat 0-30 cm [1.000 t]	Vorrat 30-100 cm [1.000 t]	Vorrat 0-100 cm [1.000 t]
Sachsen (dieser Bericht): Übertragung der Profilverräte auf Legendeneinheit	1.843.270	99.880	60.600	160.400
<i>Sachsen (dieser Bericht): Leitprofile BK50</i>	<i>1.843.270</i>	<i>97.200</i>	<i>42.400</i>	<i>144.600</i>
Rheinland-Pfalz (WIESNER UND SAUER 2021)	1.985.800	104.600	43.600	148.200
Baden-Württemberg (WALDMANN UND WEINZIERL 2015)	3.575.000	240.000	102.000	342.000
Hessen (WEGENER 2008)	2.111.500			242.000
Niedersachsen (MÖLLER und KENNEPOHL 2014) *	4.761.400	245.000	200.000	445.000

* = nur Acker und Grünland

Vergleicht man die Vorräte der einzelnen Bundesländer miteinander (Tabelle 26) so zeigt sich auch hier, dass die für Sachsen abgeleiteten C-Vorräte in einer analogen Größenordnung liegen. Eine gute Übereinstimmung ergibt sich vor allem mit den Ergebnissen des nur geringfügig größeren Bundeslandes Rheinland-Pfalz (s.o.). Die Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm werden annähernd gleich eingeschätzt. Eine größere Abweichung ergibt sich jedoch bei der Tiefenstufe 0-100 cm. Hier differieren die Vorräte um ca. 12,2 Mio. Tonnen zugunsten des nur ca. 140 ha kleineren Bundeslandes Sachsen.

Generell lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse für die Tiefenstufe 0-30 cm ableiten. Normiert man die Vorräte der einzelnen Bundesländer auf eine Flächengröße von 1 Mio. Hektar (10.000 km²) liegen die Werte der Bundesländer Sachsen, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen sehr eng beieinander (Tabelle 27). Die maximale Abweichung kann mit 5 % angegeben werden. Auch bei dieser Betrachtung stechen die für Baden-Württemberg abgeleiteten Vorratswerte heraus. In der Tiefenstufe 0-30 cm liegen sie im Mittel um ca. 20 % über denen der anderen Bundesländer.

Tabelle 27: C-Vorräte der Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm im Ländervergleich, Werte bezogen auf einheitliche Fläche von 1.000.000 ha.

Bundesland	Vorrat 0-30 cm [1.000 t]	Vorrat 30-100 cm [1.000 t]	Vorrat 0-100 cm [1.000 t]
Sachsen (dieser Bericht): Übertragung der Profilverräte auf Legendeneinheit	54.187	32.877	87.020
<i>Sachsen (dieser Bericht): Leitprofile BK50</i>	52.733	23.003	78.448
Rheinland-Pfalz (WIESNER UND SAUER 2021)	52.674	21.956	74.630
Baden-Württemberg (WALDMANN UND WEINZIERL 2015)	67.133	28.531	95.664
Hessen (WEGENER 2008)			114.610
Niedersachsen (MÖLLER und KENNEPOHL 2014) *	51.455	42.004	93.460

* = nur Acker und Grünland

Bei den C-Vorräten der Unterböden treten deutlichere Differenzen auf. Diese dürften weitestgehend den unterschiedlichen Berechnungsmethoden, Vorgehensweisen und Bodensubstraten (z. B. Skelettgehalte, Gründigkeit der Böden) der Länder geschuldet sein (s.o.).

Die größte Abweichung ergibt sich im Vergleich zu Hessen. Die in der Literatur angeführten Vorratswerte liegen bei Betrachtung der Tiefenstufe 0-100 cm methodisch bedingt ca. 25 % über den sächsischen Werten. Hier wurden die Bodenkohlenstoffgehalte unter Einsatz einer Tiefenfunktion bis in 1 m Profiltiefe abgeleitet. Zudem wurde die Lagerungsdichte hessischer Waldböden jeweils für standardisierte Bodensäulen modelliert. Bei den Acker- und Grünlandstandorten wurde für das gesamte Profil ein einheitlicher Wert der Lagerungsdichte von 1,2 g/cm³ angenommen.

10 Abschätzung des Untersuchungsbedarfs

Im Ergebnis des Vorhabens lässt sich festhalten, dass durch die begrenzte Anzahl vorliegender Bodenuntersuchungen die Übertragung von Punktinformationen auf nicht oder nur wenig untersuchte Flächen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist.

Die C-Vorräte ließen sich nicht bei allen Legendeneinheiten in ausreichender Vorhersagequalität ableiten. So konnte bei 142 Legendeneinheiten nicht auf profilbezogene Vorratsberechnungen zurückgegriffen werden. Diese machen aber nur eine Gesamtfläche von ca. 54.250 ha aus (entspricht ca. 3 % der Landesfläche Sachsens). Stattdessen mussten die Vorräte dieser Einheiten über die Leitprofilinformationen aus der BK50 abgeleitet werden. Letztere basieren zum Teil zwar ebenfalls auf Analysendaten, beim Skelettvolumen und der Trockenrohdichte musste aber auf Schätzwerte zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 5.1). 342 Legendeneinheiten sind nur mit einem Profil belegt. Diese nehmen ca. 155.640 ha der Landesfläche ein (ca. 8 %). Bei weiteren 420 Legendeneinheiten gehen nur 2 Profile in die Vorratsberechnungen ein. Sie sind über Sachsen verteilt auf einer Fläche von ca. 182.550 ha anzutreffen und entsprechen einer Landesfläche von ca. 10 %. Die Legendeneinheiten für die max. zwei Vorratsprofile vorliegen nehmen insgesamt eine Fläche von ca. 390.000 ha ein, was einem Anteil von ca. 21 % an der Landesfläche Sachsens entspricht. Zudem sollte bei nachfolgenden Betrachtungen den Daten der organischen Auflage bei Böden unter forstlicher Nutzung mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, z.B. mit Blick auf die variable Mächtigkeit und Trockenrohdichte.

Einen Überblick über die Anzahl der nach Datenaufbereitung vollständig vorliegenden Vorratsprofile je Legendeneinheit der BK50 gibt Abbildung 41. Sie zeigt, dass vor allem in Nordsachsen, der Oberlausitz sowie im Bereich des sächsischen Vogtlandes größere Informationslücken vorhanden sind.

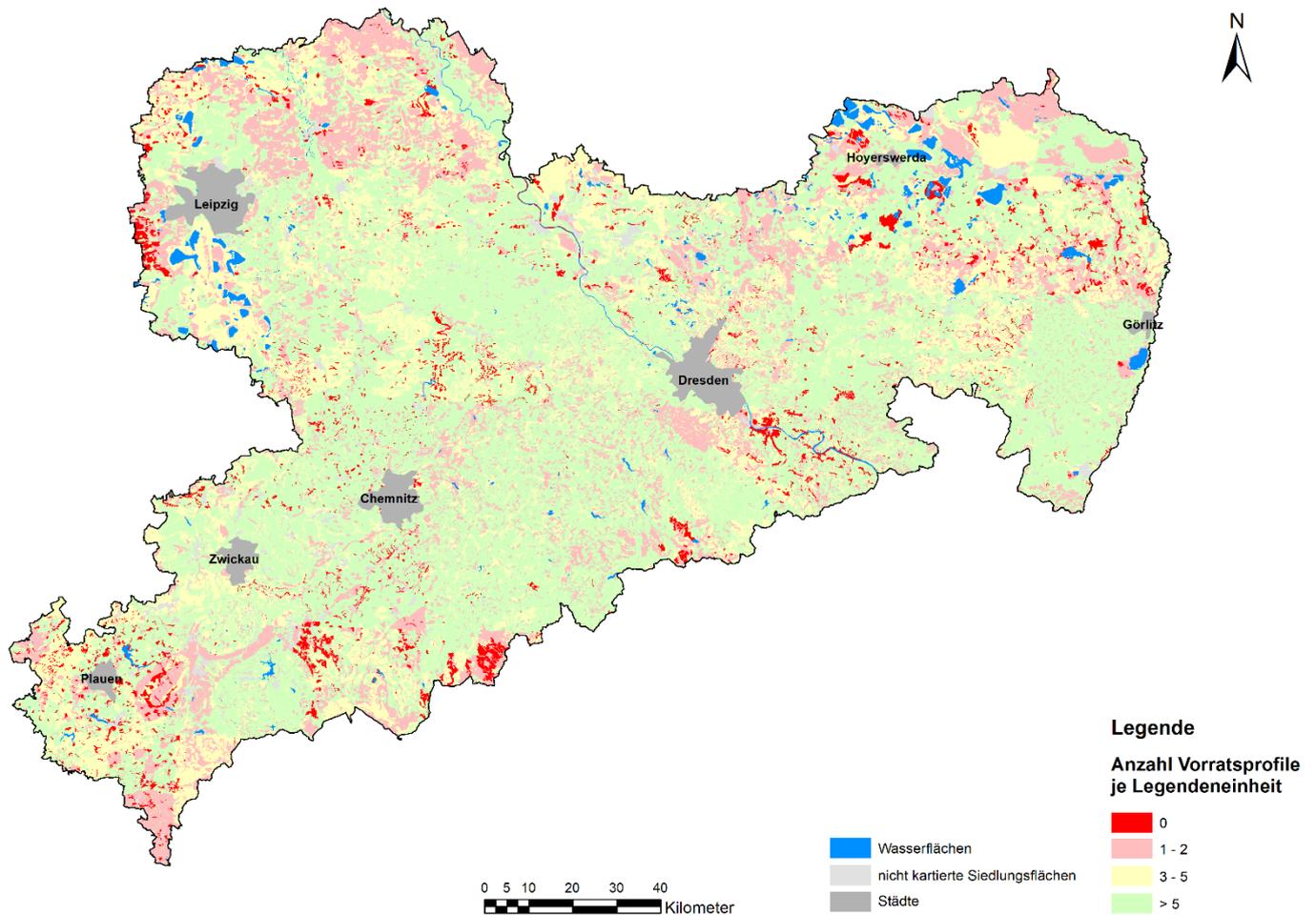


Abbildung 41: Anzahl vollständiger Vorratsprofile je Legendeneinheit der BK50.

Zur Verbesserung der Vorhersagequalität ist eine Erweiterung des vorliegenden Profildatenbestands durch gezielte Bodenaufnahmen und Beprobungen erforderlich. Zu einer ersten Einschätzung des erforderlichen Untersuchungsbedarfs wurde das Interpolationsverfahren Kriging herangezogen, ein geostatistisches Verfahren, das auf Grundlage der im theoretischen Variogramm beschriebenen räumlichen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten schätzt.

Die Interpolation mittels Kriging setzt voraus, dass bei jedem Interpolationsvorgang die notwendigen Parameter für das Verfahren optimal an die Gegebenheiten im Datenbestand angepasst werden. Grundlage eines Kriging-Prozesses ist stets ein experimentelles Semivariogramm, in dem die räumliche Korrelation zwischen den vorhandenen regionalen Variablen in Bezug auf ihre Veränderung bei größerer Entfernung zwischen den einzelnen Messwerten dargestellt wird (KRAUSMANN 2005).

Zur Abschätzung der Flächen mit Untersuchungsbedarf kann die im Zuge des Kriging-Prozesses generierte Schätzfehlerkarte (Standard prediction error maps) herangezogen werden. Mit deren Hilfe lassen sich die Gebiete ermitteln, in denen ein zusätzlicher Datenbedarf besteht. Die Klassifikation der Schätzgüte erfolgte über die Kriging-Varianz.

Um zu einer größeren Annäherung an eine Normalverteilung zu gelangen, erfolgte vorab eine logarithmische Transformation der Daten. Unter Verwendung des Interpolationsverfahrens Kriging wurden die logarithmierten C-Vorräte der Tiefenstufe 0-100 cm zunächst in flächenhafte Informationen mit gleichen C-Vorräten überführt. Im Ergebnis der räumlichen Interpolation der punktförmig vorliegenden Daten wurde eine Karte der geschätzten C-Vorräte und die dazugehörige Schätzfehlerkarte (standard prediction error map) erzeugt. In den Interpolationsvorgang wurden die bei der Vorratsberechnung verwendeten 3.793 Standorte einbezogen.

Die Schätzfehlerkarte mit der in 3 Stufen klassifizierten Darstellung der Schätzgüte (Krige-Varianz) zeigt nachfolgende Abbildung 42.

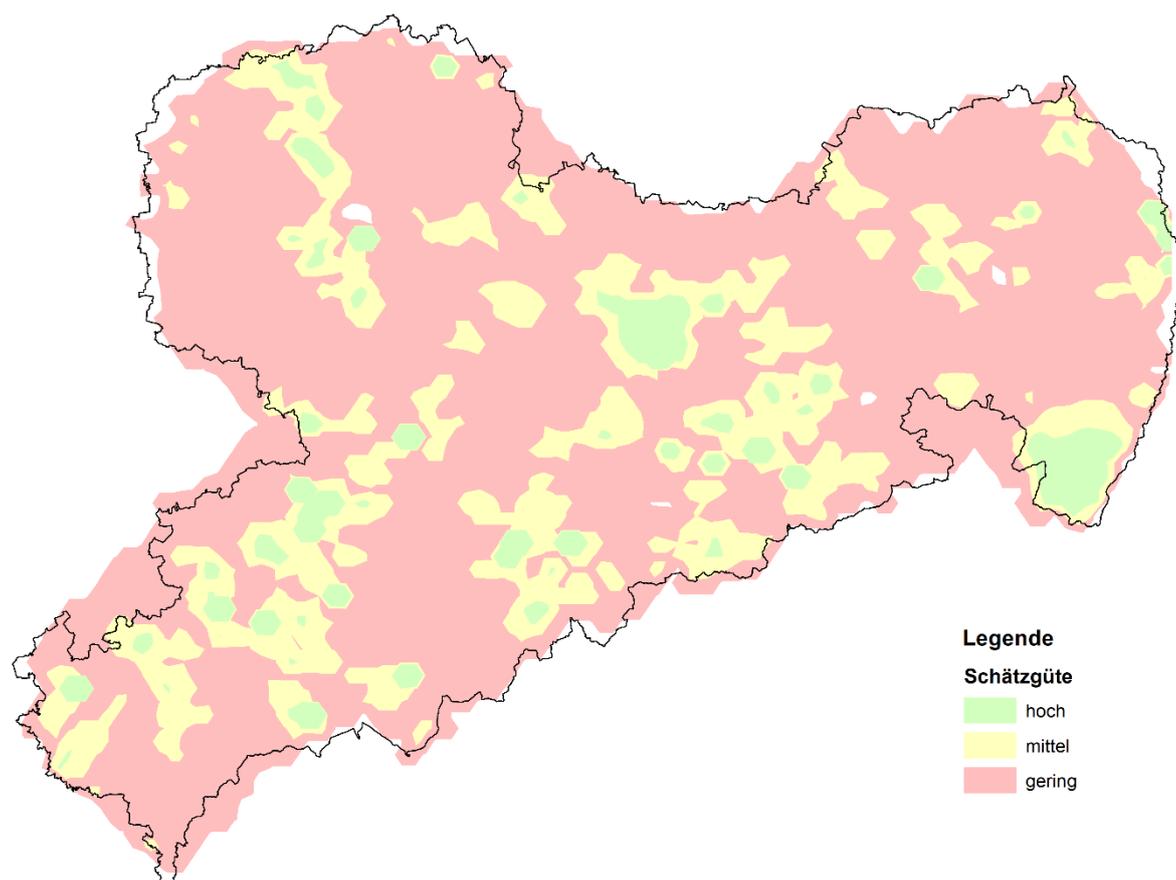


Abbildung 42: Schätzgüte C-Vorräte (Krige-Varianz) Tiefenstufe 0-100 cm.

Der Blick auf die Schätzfehlerkarte zeigt, dass aufgrund der vorliegenden Probandichte im Bereich der Bodenmessnetze Sachsens sowie der größeren Auen vergleichsweise geringe Schätzfehler auftreten. Infolge der hier deutlich besseren Schätzgüte wird eine Verdichtung der Information zur Ableitung von C-Vorräten in diesen Bereichen zunächst als nicht erforderlich angesehen. Dies unterstreicht auch Abbildung 43, in der neben der Schätzgüte auch die 3.793 Standorte der eingehenden Vorratsberechnungen mit dargestellt sind.

Das Ausdünnen der Beprobungsdichte, insbesondere im Umfeld der Messnetze, geht mit einem Anstieg des Schätzfehlers und damit einem Rückgang der Schätzgüte einher. Hiervon sind weite Teile Sachsens betroffen. Für die in Abbildung 42 rot gekennzeichneten Regionen lässt sich somit ein Bedarf zusätzlicher Daten zur Optimierung der Vorratsberechnungen ableiten.

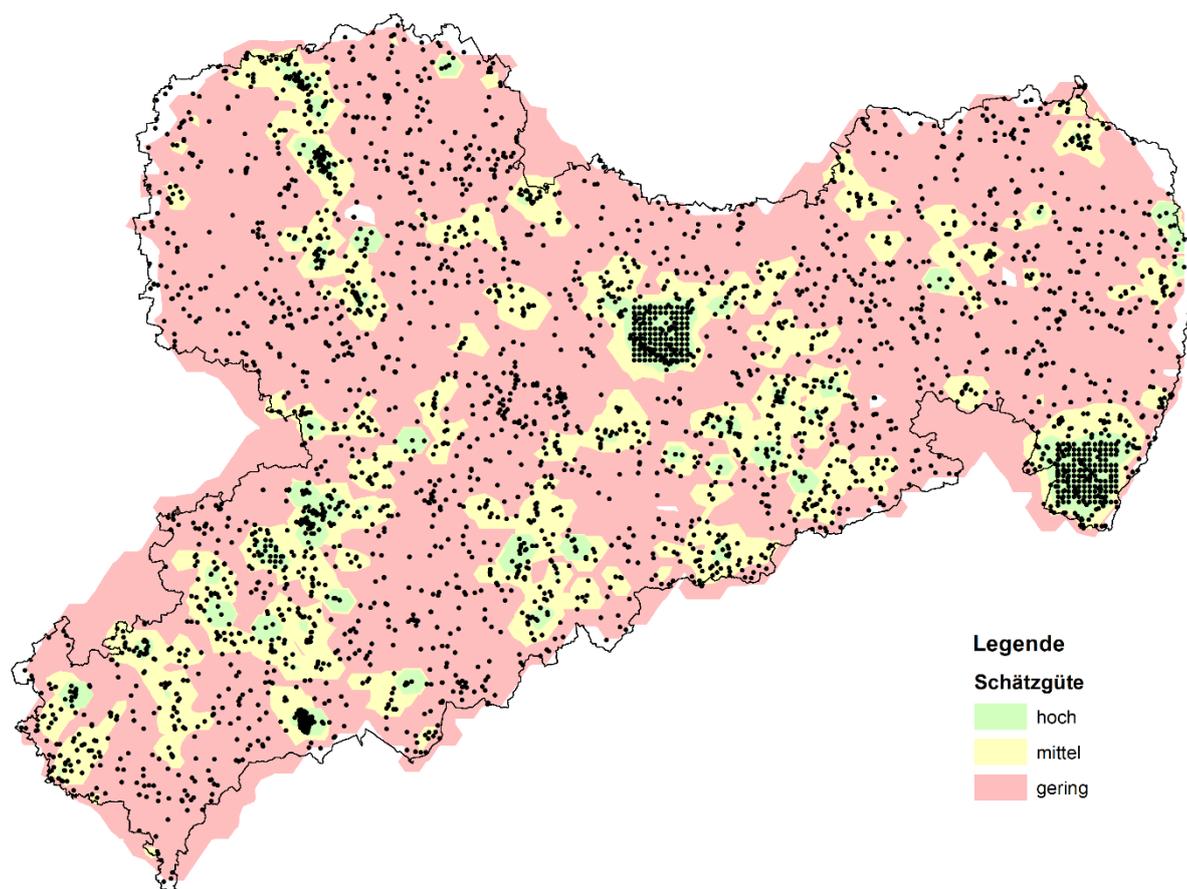


Abbildung 43: Schätzgüte C-Vorräte (Krige-Varianz) Tiefenstufe 0-100 cm mit Standorten vorliegender Vorratsberechnungen.

Ergänzend zu der Betrachtung der C-Vorräte wurde auch eine Schätzfehlerkarte für den C_{org}-Gehalt im Oberboden erstellt. Beim Kriging-Prozess wurden die 10.264 vorliegenden C_{org}-Analysen berücksichtigt. Die klassifizierte Darstellung der Schätzgüte zum C_{org}-Gehalt (Krige-Varianz) zeigt folgende Abbildung 44.

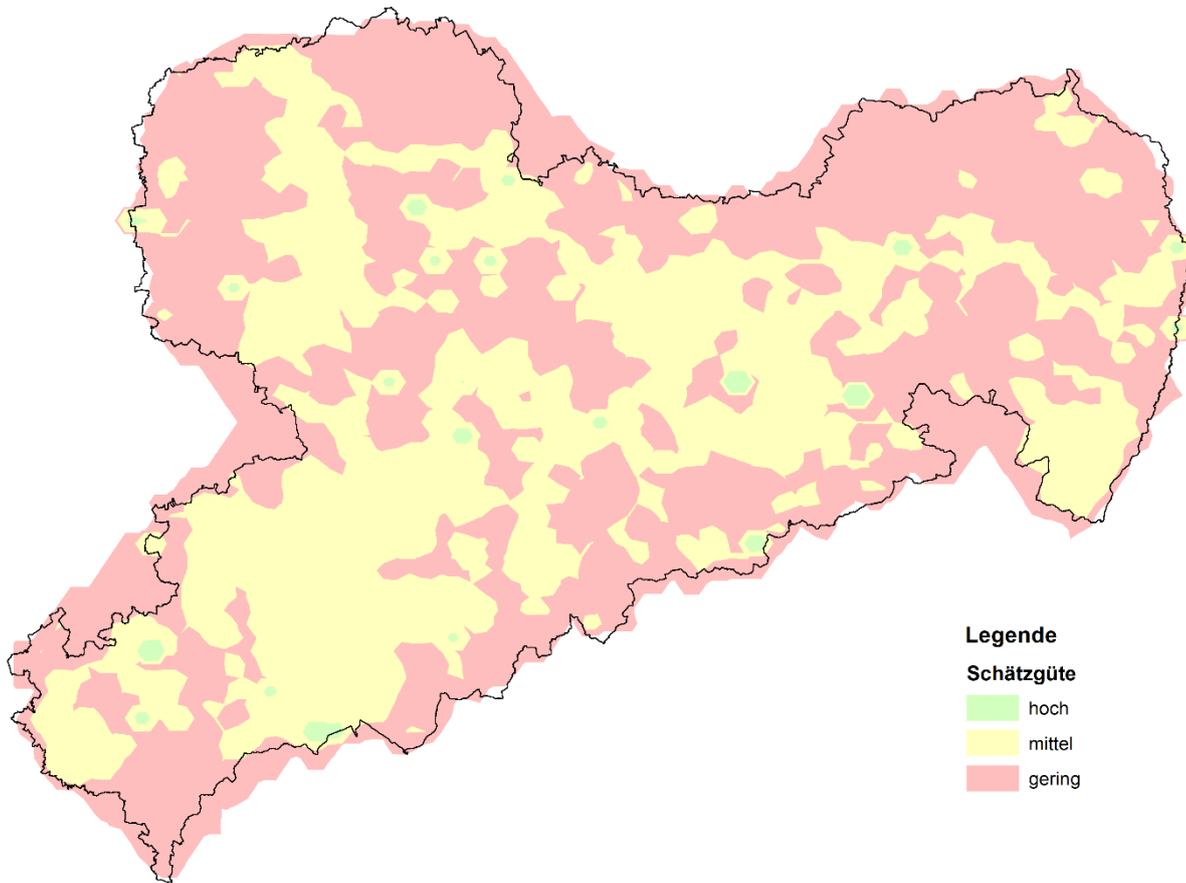


Abbildung 44: Schätzungsgüte C_{org} -Gehalte im Oberboden (Kriging-Varianz).

Entsprechend der besseren Datenlage ergeben sich für die C_{org} -Gehalte deutlich weniger rote Flächen mit geringer Schätzungsgüte. Auch hier sind es vor allem die Bodenmessnetze und die Auen für die mittlere Schätzungsgüte abgeleitet werden konnten. Für größere Gebiete, insbesondere im Norden und Osten von Sachsen, muss die Datenlage auch bezüglich der C_{org} -Gehalte als nicht ausreichend eingeschätzt werden.

11 Vorstudie zur Erfassung von Bodenkohlenstoff mittels Satellitendaten

Ergänzend zum FuE-Vorhaben wurde vom LfULG ein Werkvertrag zur satellitengestützten Erfassung von organischem Bodenkohlenstoff in Auftrag gegeben. Die Arbeiten wurden durch die SEQANA Softwareentwicklung Berlin, einem innovativen B2B-Start-up, das auf die satellitengestützte Überwachung von organischem Kohlenstoff im Boden (SOC) spezialisiert ist, durchgeführt.

Ziel des Ansatzes von SEQANA war die testweise flächenbezogene Darstellung und Ergebnisinterpretation zur Höhe des Bodenkohlenstoffs mit Hilfe von Daten und Methoden der Fernerkundung.

Im Rahmen der Vorstudie zur Erfassung von Bodenkohlenstoff mittels Satellitendaten wurden ebenfalls Boden-Kohlenstoff-Karten für Sachsen unter Nutzung eines Machine-Learning-Modells erstellt (PHILLIPS ET AL. 2023). Als Datengrundlage dienten im Wesentlichen die gleichen Datenbestände, die auch im vorliegenden Bericht verwendet wurden, mit dem Unterschied, dass bei SEQANA nur Bodendaten, die nach dem Jahr 2000 erhoben wurden, eingeflossen sind. Neben den Ausgangsdaten des FIS-Boden (C_{org} -Gehalte etc.) wurden zudem die Ergebnisse der ersten im FuE-Vorhaben durchgeführten Vorratsberechnungen an SEQANA zur Integration in die Vorstudie übergeben.

Für die Modellbildung des organischen Kohlenstoffs im Boden bzw. zur räumlichen Verknüpfung, wurden neben den Boden- und Landbedeckungsdaten des LfULG unterschiedliche Erdbeobachtungsprädiktoren definiert und Informationen aus verschiedenen Quellen (Landsat-Satellitendaten, digitales Höhenmodell der NASA, globale Bodenkarten) genutzt.

Der Schwerpunkt der Erstellung flächenbezogener Bodenkohlenstoff-Karten (C -Konzentrationen und C -Vorräte) lag auf den Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm (ohne organische Auflagen). Für die Modellbildungen (C_{org} -Gehalte der Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm, sowie C -Vorratsmodell für die Tiefenstufe 0-30 cm) wurden im Vorfeld Daten nach ihren Landnutzungen selektiert. Proben aus Moorböden wurden ausgeschlossen um eine präzise und relevante Analyse zu gewährleisten. Zusätzlich wurden Ausreißer mittels IQR-Methode entfernt. Die Modellbildung erfolgte zudem nur mit Standorten, die als Ackerland oder Grünland deklariert waren. Waldstandorte blieben aufgrund der geringeren Datenqualität und der deutlich schlechteren Datenlage bei der Modellbildung unberücksichtigt.

Die zur Modellbildung selektierten Daten wurden anschließend in Trainings- Tuning und Testdaten aufgeteilt. In den Trainingsdatensatz flossen zusätzlich Daten aus SEQANAS Datenbestand von anderen Standorten aus Deutschland, Tschechien und Polen ein. Die ausgewählten Datenpunkte wurden räumlich mit Prädiktorendaten verknüpft, um ein neuronales Netzwerkmodell zu trainieren.

Die zur jeweiligen Modellbildung genutzten, von Ausreißern bereinigten Daten sind in Tabelle 28 zusammengestellt. Grundsätzlich wurden die im folgenden aufgeführten Werte aus dem Abschlussbericht von SEQANA übernommen und gerundet.

Tabelle 28: Für die Modellbildungen von SEQANA genutzte Eingangsdaten (Ausreißer wurden vorher entfernt, org. Auflagen unter Wald nicht berücksichtigt).

Landnutzung	Modell C _{org} (0–30 cm)		Modell C _{org} (0–100 cm)		Modell C-Vorrat (0–30 cm)	
	Anzahl Punkte	Mittelwert C _{org} [%]	Anzahl Punkte	Mittelwert C _{org} [%]	Anzahl Punkte	Mittelwert C-Vorrat [%]
Ackerland	2.320	1,5	377	0,7	1.031	55,0
Grünland	682	1,9	177	1,2	390	73,0
Wald	-	-	222	1,1	-	-
Gesamt	3.002	1,6	776	0,9	1.421	59,9

Für die gesamte Fläche Sachsens erfolgte mit Hilfe des Machine-Learning-Modells von SEQANA eine Schätzung der C_{org}-Gehalte bzw. C-Vorräte (siehe Tabelle 29). Die Ausgabe erfolgte in Form von prognostizierten Mittelwerten für die jeweilige Tiefenstufe und Nutzung. Für Waldstandorte wurden keine Mittelwerte ausgegeben, allerdings wurden diese Standorte bei der flächenhaften Darstellung mitberücksichtigt.

Tabelle 29: Vorhergesagte C_{org}-Gehalte für die Tiefenstufen 0-30 cm und 0-100 cm für Sachsen (Modellbildung nur mit Ackerland & Grünland-Standorten).

Nutzung	Mittelwert C _{org} (0-30 cm) [%]	Mittelwert C _{org} (0-100 cm) [%]
Gesamtfläche (Alle Nutzungen)	1,86 [1,82 – 1,91]	0,93 [0,86 – 1,00]
Ackerland & Grünland	1,67 [1,63 – 1,71]	0,82 [0,75 – 0,89]
Ackerland	1,54 [1,50 – 1,59]	0,66 [0,62 – 0,70]
Grünland	2,04 [1,91 – 2,18]	1,33 [1,11 – 1,56]

Bezogen auf die Gesamtfläche Sachsens (Alle Nutzungen) wurde für die Tiefenstufe 0-30 cm ein durchschnittlicher C_{org}-Gehalt von 1,86 % und für die Tiefenstufe 0-100 cm ein mittlerer C_{org}-Gehalt von 0,93 % prognostiziert.

Für die Nutzung Acker ergibt sich laut SEQANA ein C_{org}-Wert von 1,54 %. Der im aktuellen Forschungsvorhaben für den Oberboden prognostizierte C_{org}-Gehalt von 1,74 % liegt in einer vergleichbaren Größenordnung. Betrachtet man dagegen die Grünlandnutzung, so ergibt sich hier eine deutliche Abweichung. Der von SEQANA für die Tiefenstufe 0-30 cm abgeleitete C_{org}-Gehalt von 2,04 % ist ca. 35 % geringer als der im vorliegenden FuE-Vorhaben ermittelten C_{org}-Gehalt des Oberbodens von 3,07 %.

Aus Abbildung 45 sind die von SEQANA prognostizierten C_{org} -Gehalte der Tiefenstufe 0-30 cm ersichtlich. Entsprechend der statistischen Auswertung der C_{org} -Punktdaten (Kapitel 8.1) lässt sich auch hier eine Zunahme der C_{org} -Gehalte mit der Höhenlage erkennen.

Für weite Teile Sachsens, insbesondere für die Bereiche nördlich des Erzgebirges bzw. des Zittauer Gebirges wurden relativ einheitliche C-Konzentrationen abgeleitet. Größere Differenzierungen, wie zum Beispiel Auenverläufe oder Moorbildungen, wie sie sich durch eine Mittelwertübertragung auf die Legendeneinheiten ergeben (vgl. Kapitel 7), sind nicht erkennbar.

Die von SEQANA prognostizierten C_{org} -Gehalte liegen deutlich unter den mit Hilfe der Punktdaten abgeleiteten Werten der Legendeneinheiten der BK50 (siehe Kapitel 7). Generell erscheinen die Werte von SEQANA stark gemittelt. Im Maximum wurde für die Böden Sachsens ein C_{org} -Gehalt von ca. 4,3 % ausgewiesen. Eine Höhendifferenzierung ist aber auch hier ersichtlich (vgl. Abbildung 27).

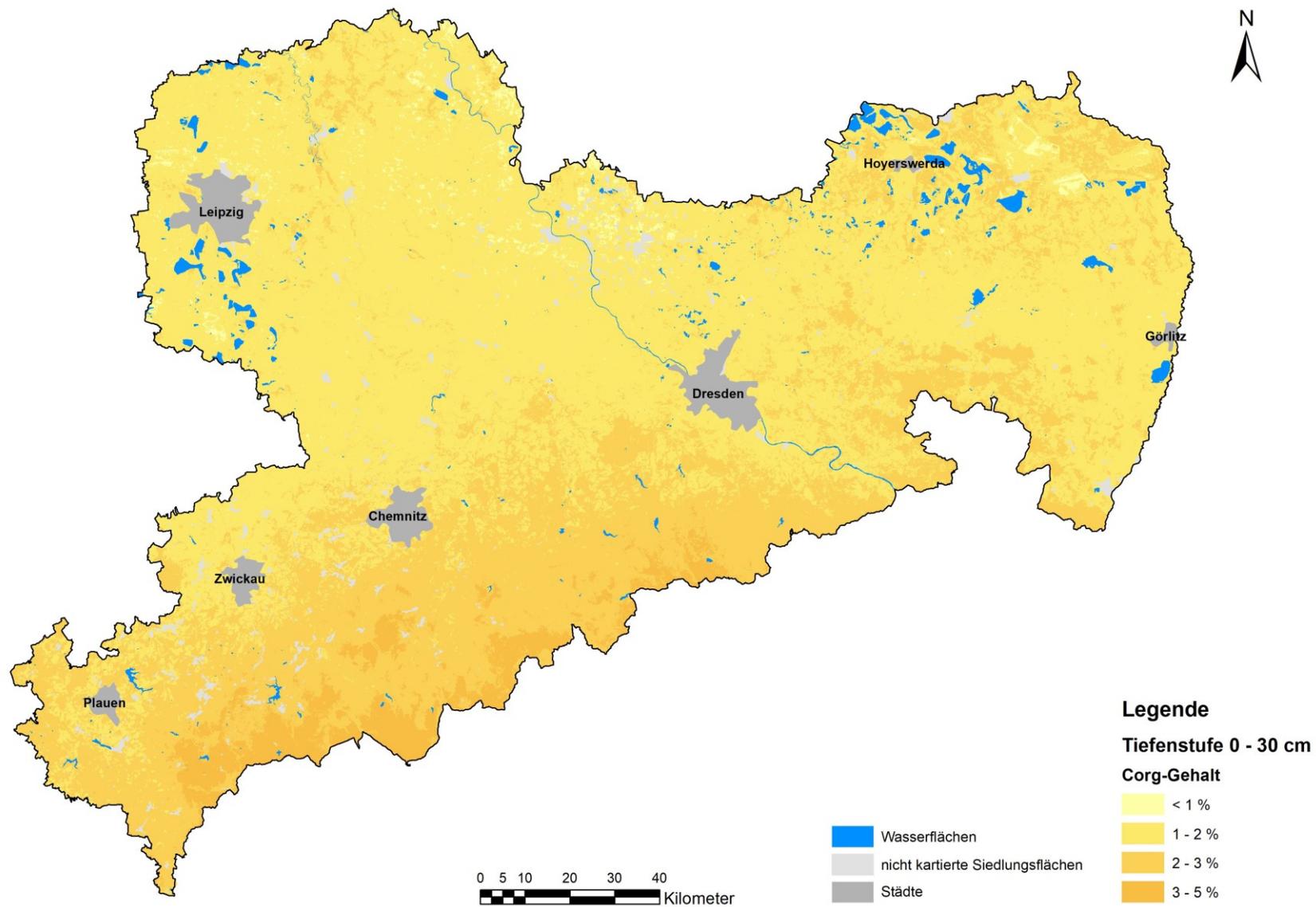


Abbildung 45: Prognostizierte C_{org}-Gehalte der Tiefenstufe 0-30 cm (Modellbildung SEQANA).

Neben den C_{org} -Werten der Tiefenstufe 0-30 cm wurden von SEQANA auf Basis ihrer Modelle auch Vorratswerte prognostiziert. Die von SEQANA vorhergesagten C-Vorräte für die Tiefenstufe 0-30 cm, im Vergleich zu den im Forschungsvorhaben mit Hilfe klassischer Methoden abgeleiteten Vorratswerten, sind einander in Tabelle 30 gegenübergestellt. Eine Darstellung der prognostizierten C-Vorräte, entsprechend der im FuE-Vorhaben genutzten Klassifikation, zeigt Abbildung 46.

Tabelle 30: Vorhergesagte C-Vorräte für die Tiefenstufe 0-30 cm für Sachsen mit dem erstellten Modell von SEQANA und Vergleich mit den in diesem Bericht ermittelten Werten.

Nutzung	SEQANA		Dieser Bericht	
	Mittelwert C-Vorrat (0-30 cm) [t/ha]	Anmerkung	Mittelwert C-Vorrat der Punktdaten (0-30 cm) [t/ha]	Mittelwert C-Vorrat flächengewichtet (0-30 cm) [t/ha]
Gesamtfläche (Alle Nutzungen)	59,7 (inkl. Siedlung, Gewässer, Wald & Sonstige)	Modellbildung nur mit Ackerland & Grünland-Standorten	60,7	56,2 (exkl. Siedlung & Gewässer)
Ackerland & Grünland	58,3		62,8	55,7
Ackerland	52,1		53,0	53,7
Grünland	73,3		80,6	63,3
Wald	-	-	56,6	57,8

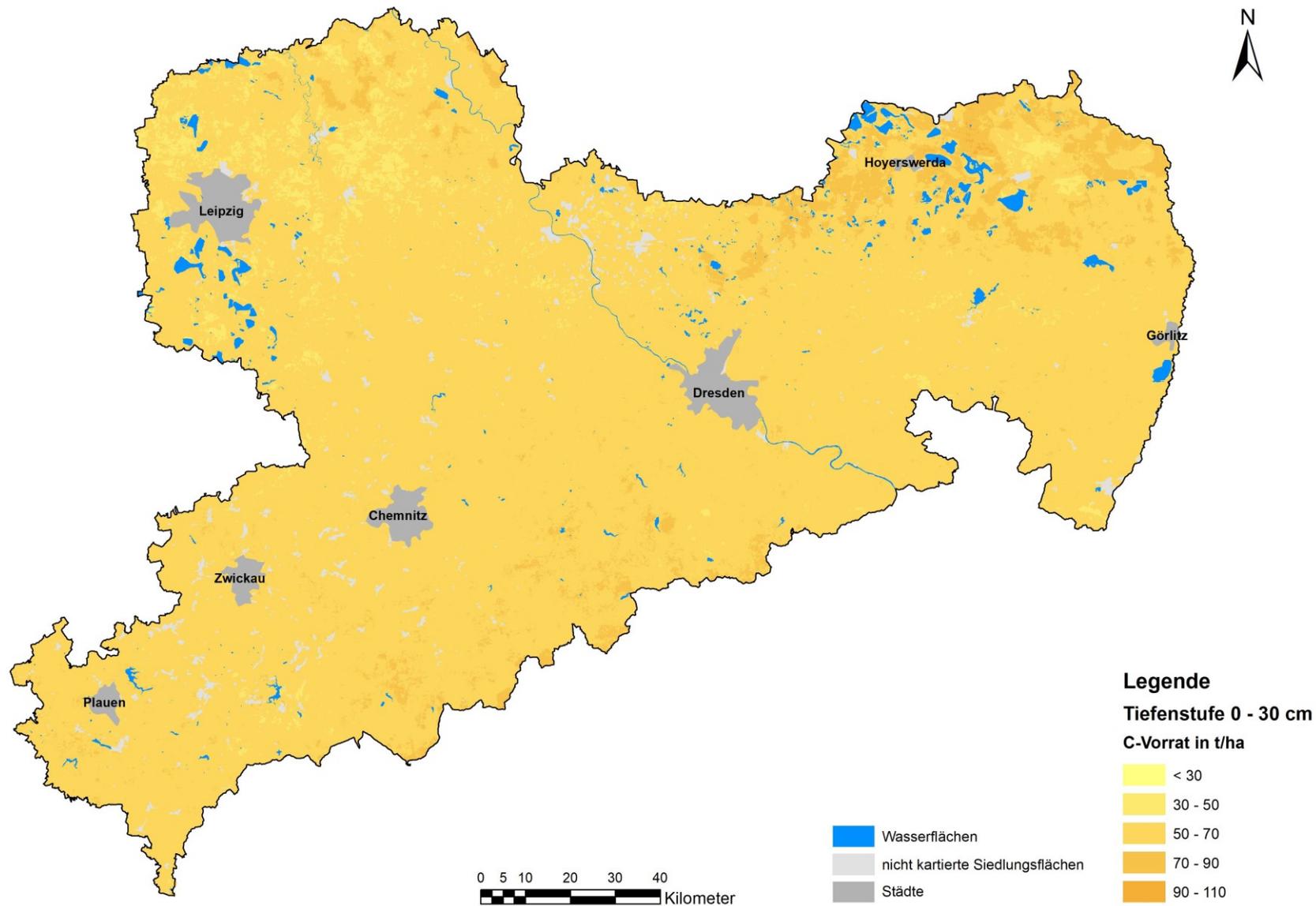


Abbildung 46: Prognostizierte Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm (Modellbildung SEQANA, ohne org. Auflagen).

Mit Hilfe des Modells für den C-Vorrat 0-30 cm Tiefe wurde ein durchschnittlicher C-Vorrat von 59,7 t/ha prognostiziert. Hierbei wurde die Gesamtfläche Sachsens (inklusive Siedlung, Gewässer, Wald & Sonstige) betrachtet.

In die Kartendarstellung für ganz Sachsen flossen bei SEQANA sowohl beim C_{org} -Modell der Tiefenstufe 0-30 cm, als auch beim C-Vorrats-Modell der Tiefenstufe 0-30 cm vorwiegend Daten von Grünland und Ackerstandorten in die Modellbildung mit ein. Die Informationen zu den Waldstandorten stammen laut Auskunft von SEQANA aus dem Trainingsdatensatz, der um Daten aus Deutschland, Tschechien und Polen erweitert wurde. Für das C_{org} -Modell der Tiefenstufe 0-100 cm wurden dagegen sowohl Acker-, Grünland-, als auch Waldstandorte in die Modellbildung einbezogen. Moore blieben bei allen erstellten Modellen außen vor.

Die von SEQANA erstellten Kennwertkarten (C_{org} -Gehalte, C-Vorrat) sind flächendeckend, d. h. es erfolgte auch eine Wertzuweisung bei Siedlungsflächen und Gewässern. Im Gegensatz dazu, wurden diese Flächen bei der klassischen Vorratsberechnung nicht berücksichtigt und somit auch kein C-Vorrat zugewiesen.

Grundsätzlich ist die Darstellung der von SEQANA prognostizierten C-Vorräte von 0-30 cm deutlich weniger differenziert, als es bei der klassischen Vorgehensweise (Kapitel 5.2) der Fall ist. Insbesondere Nassstandorte, wie Moore, Auen, aber auch Waldstandorte sowie einzelne Naturräume, wie das Erzgebirgsvorland und das Bergland, traten bei der kartographischen Darstellung deutlich weniger hervor. Auch wenn Waldstandorte bei der Modellbildung von SEQANA nur über den Trainingsdatensatz berücksichtigt wurden, weisen diese Flächen teilweise höhere C-Vorräte auf und setzen sich farblich von der Umgebung ab.

Für die Tagebauflächen der sächsischen Reviere ergeben sich sowohl bei der Prognose der C_{org} -Gehalte als auch bei den Vorräten, vergleichsweise geringe Werte entsprechen dem oft geringeren bzw. fehlenden Bewuchs. Generell lässt sich festhalten, dass bei der Vorratsprognose der Tiefenstufe 0-30 cm ein Nutzungsbezug erkennbar ist. Höhere C-Vorräte treten oft in den Tallagen bzw. im Bereich der Grünlandflächen des Erzgebirges auf.

Vergleicht man das Ergebnis der C_{org} -Gehalte mit den modellierten C-Vorratswerten, so ergeben sich einige nicht immer eindeutig erklärbare Differenzen. In Abbildung 47 sind die Prognoseergebnisse im Umfeld des nahe der tschechischen Grenze gelegenen Erzgebirgsortes Rübenua dargestellt.

Den bewaldeten Flächen nördlich von Rübenua wurden vergleichsweise hohe C_{org} -Werte zugewiesen (Klasse 3-5 %), jedoch ergaben die Vorratsprognosen geringere Werte als bei den Grünlandflächen im direkten Umfeld von Rübenua, welche lediglich C_{org} -Werte zwischen 2-3 % aufweisen. Dies ist gemäß

SEQANA auf die eingehende Trockenrohdichte zurückzuführen, die unter Waldnutzung scheinbar geringer angesetzt wurde.

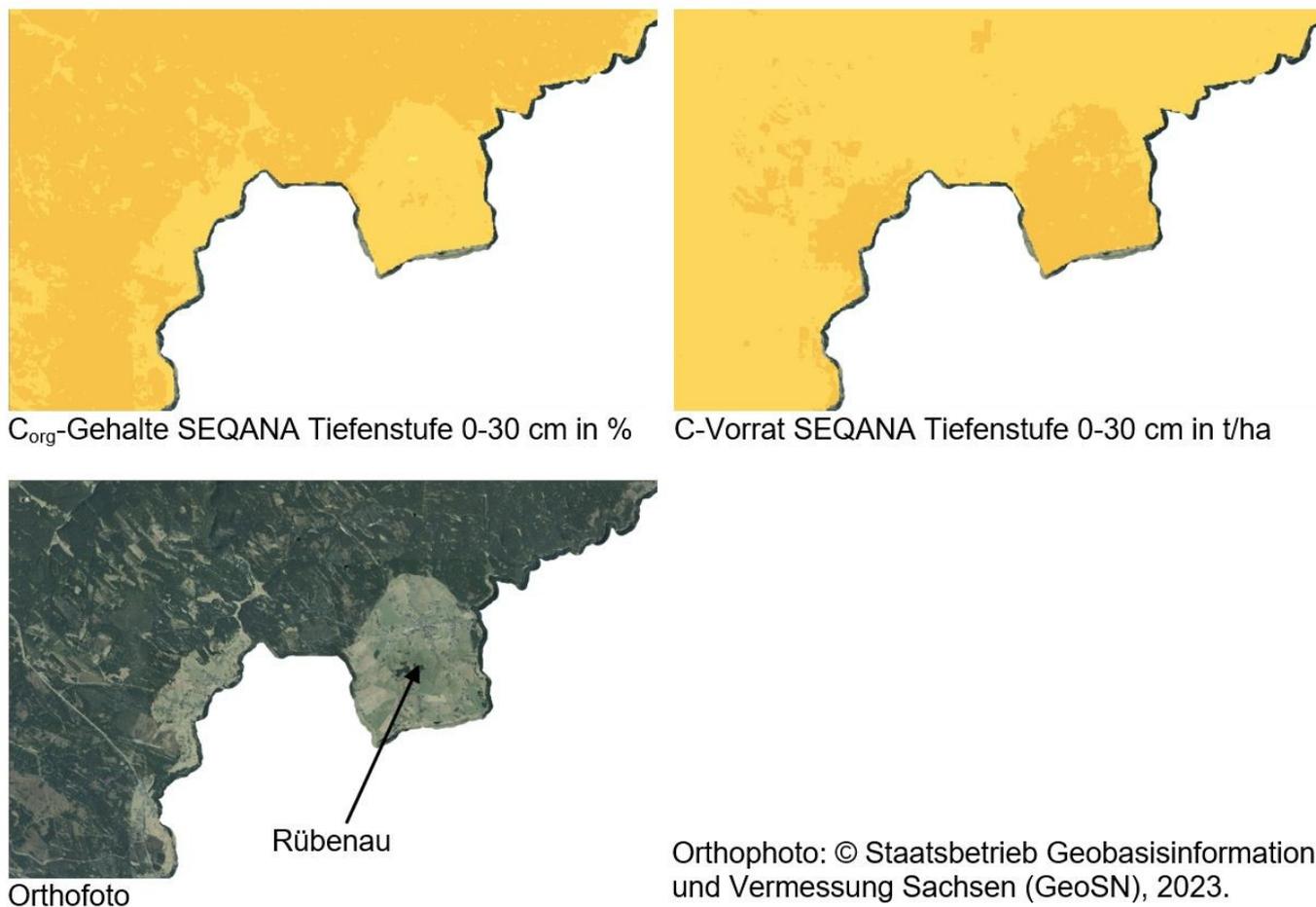
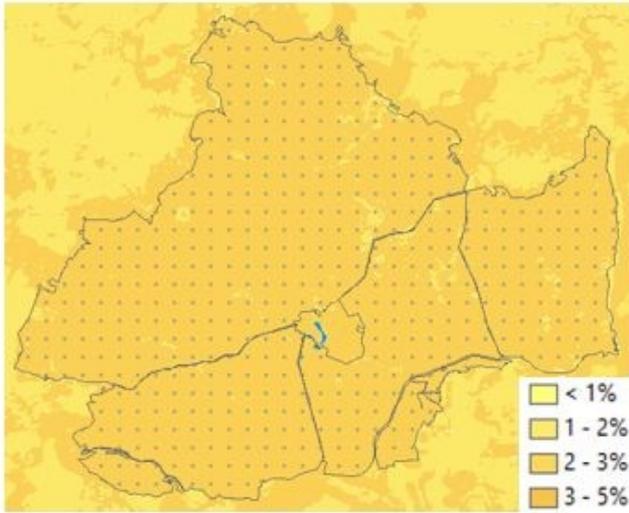


Abbildung 47: Prognostizierte C_{org}-Gehalte und C-Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm im Umfeld von Rübenau (Modellbildung SEQANA – Vergleich G.E.O.S.)

Generell ist ein deutlicher Nutzungseinfluss sichtbar, der dazu führt, dass Wäldern höhere C_{org}-Gehalte zugewiesen werden als den anderen Nutzungsformen. Erkennbar ist dies auch an den sich unverkennbar abzeichnenden Konturen des Tharandter Waldes, der im Vergleich zu seiner Umgebung höhere C_{org}-Gehalte aufweist (Abbildung 48).



C_{org} -Gehalte SEQANA Tiefenstufe 0-30 cm in % Orthofoto Tharandter Wald

Abbildung 48: Prognostizierte C_{org} -Gehalte der Tiefenstufe 0-30 cm im Umfeld von Grillenburg (Tharandter Wald) (Modellbildung SEQANA)

Gemäß der Prognose von SEQANA ergibt sich für ganz Sachsen für die Tiefenstufe 0-30 cm ein C-Vorrat von ca. 110 Mio. Tonnen (ohne org. Auflage). Dieser Wert liegt in einer vergleichbaren Größenordnung wie der im aktuellen FuE-Vorhaben abgeleiteten Wert von ca. 100 Mio. Tonnen. Demzufolge liefern beide Ansätze hinsichtlich der Vorräte in der Tiefenstufe 0-30 cm, trotz unterschiedlicher Herangehensweise, ein vergleichbares Ergebnis. Bei dem von SEQANA genutzten Ansatz ist davon auszugehen, dass der C-Vorrat in einigen Bereichen aufgrund der Nichteinbeziehung von Waldstandorten und Mooren, sowie aufgrund der Ausreißerbereinigung, unterschätzt wird. Im Unterschied zur klassischen Herangehensweise (Kapitel 5.2) wurde von SEQANA allerdings auch Siedlungsflächen und Gewässern ein C-Vorrat zugewiesen der in die Bilanzierung mit eingeht. Es ist davon auszugehen, dass sich beide Fehlerquellen gegenseitig aufheben, so dass die mit beiden Ansätzen abgeleiteten Vorratswerte der Tiefenstufe 0-30 cm zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen.

Fazit:

- Die unter Nutzung von Satellitendaten abgeleiteten C-Vorräte sowie die prognostizierten C_{org} -Gehalte im Oberboden weisen eine deutlich geringere Differenzierung auf, als dies bei der Wertübertragung der Fall ist. Im Falle der C_{org} -Gehalte ergab sich zwar eine nachvollziehbare Höhendifferenzierung, klassische Kohlenstoffsinken wie Moore oder Flussauen lassen sich jedoch nicht abbilden. Die abgeleiteten C-Vorräte sind generell wenig differenziert.
- Generell erscheinen die Werte von SEQANA stark gemittelt. Im Maximum wurde für die Böden Sachsens ein C_{org} -Gehalt von ca. 4,3 % ausgewiesen.
- Die C-Gehalte im Oberboden spiegeln teilweise die Nutzung wider. Dies trifft insbesondere auf die Waldnutzung sowie die vegetationsarmen Tagebauflächen zu.
- Die prognostizierten C-Vorratsergebnisse der Tiefenstufe 0-30 cm gelangen zu einem in Summe vergleichbaren Kohlenstoffvorrat wie bei der herkömmlichen Methodik. Aufgrund der geringen Differenzierung haben die Ergebnisse jedoch nur Übersichtscharakter.
- Die Vorhersage oberflächennaher Kennwerte (hier 0-30 cm) ist nur eingeschränkt möglich. Aussagen zum Kohlenstoffgehalt tieferer Bodenhorizonte sind mit noch größeren Ungenauigkeiten behaftet. Hier stößt das genutzte Machine-Learning-Modell von SEQANA an seine Grenzen.
- Die Prognoseergebnisse von SEQANA beruhen hinsichtlich der bodenkundlichen Eingangsdaten im Wesentlichen auf der gleichen Datenbasis wie bei der klassischen Variante, so dass zwangsläufig ähnliche Vorratsergebnisse zu erwarten waren.
- Die Erfassung von Bodenkohlenstoff unter Nutzung der gebietsspezifischen Eingangsdaten kann nur für eine erste grobe Einschätzung der Vorräte herangezogen werden.
- Die Vorhersage des C_{org} -Wertes der Tiefenstufe 0-100 cm und der C-Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm führt zu keinem ausreichenden Ergebnis.
- Entscheidend ist die Qualität und Quantität der eingehenden Daten. Grundsätzlich werden die Modelle besser, je mehr Eingangsdaten eingehen. Die aktuell erreichte Vorhersagegenauigkeit des angewandten Modells reicht nicht zur Durchführung eines Monitorings aus. Dies trifft aufgrund der nicht ausreichenden Datenlage aber auch auf den im Vorhaben angewendeten klassischen Ansatz der Punktübertragung in die Fläche zu (vgl. Kapitel 12.2).

12 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

12.1 Zusammenfassung

Der weltweit größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff ist der Boden. Durch die Anreicherung und Freisetzung von organischer Substanz, und damit von Kohlenstoff, kommt den Böden eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf zu (KLINGENFUß et al. 2020).

Die Kohlenstoffvorräte sächsischer Böden wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens abgeschätzt und auf Basis der Bodenkarte 1: 50.000 (BK50) regionalisiert. Dadurch lassen sich auch Bodenregionen ausweisen, die aufgrund ihrer Vorräte von besonderer Bedeutung für den Klimawandel sind.

Der methodische Ansatz stützt sich weitestgehend auf die in Sachsen vorliegenden Analysedaten. Nach umfangreicher Datenaufbereitung wurde ein Konzept zur fachlichen Optimierung der Eingangsdaten entwickelt, damit bei den Vorratsberechnungen auf eine größtmögliche Anzahl validierter Standorte zurückgegriffen werden konnte.

Zwar lagen zu vielen Bodenprofilen Sachsens bereits horizontbezogene C_{org} -Werte vor, jedoch stellte sich insbesondere die zur Vorratsberechnung benötigte Trockenrohdichte (TRD) als minimierender Faktor heraus. Zur Ableitung fehlender Trockenrohdichten wurden im Rahmen des Vorhabens die Pedotransferfunktionen nach RINGER et al. (2008) sowie nach HOLLIS et al. (2012) miteinander verglichen. Bei beiden Ansätzen werden die Korngrößenzusammensetzung, die Lagerungsdichteklasse (Schätzwert nach KA5) und der Humusgehalt einbezogen.

Die Validierung der abgeleiteten Trockenrohdichten erfolgte auf Grundlage der im FIS-Boden vorliegenden Analysedaten zur TRD. Sie ergab für die nach HOLLIS et al. (2012) abgeleiteten Trockenrohdichten über alle Daten eine deutlich bessere Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,728 (Pearson). Zudem ist es mit den Pedotransferfunktionen von HOLLIS auch möglich, die Trockenrohdichten organischer Böden abzuleiten, so dass eine einheitliche Vorgehensweise über alle Datenbestände durchführbar war.

Als Korrekturparameter geht der Bodenskelettgehalt in die C-Vorratsberechnung ein. In den wenigsten Fällen liegen Analysedaten vor, die das gesamte Skelettspektrum (Fein-, Mittel-, Grobskelett, Steine) abdecken. In der Regel handelt es sich um subjektive Schätzwerte der Gemengeanteilsklassen nach KA5. Da das Skelettvolumen nicht bei allen zur Verfügung stehenden Feldaufnahmen erfasst war, musste dessen Ableitung über die Informationen zum vorliegenden Feinskelett (FS) und Grobskelett (GS) erfolgen.

Auf Basis des optimierten Datenbestandes konnte für jedes Profil eine horizontbezogene Berechnung der Kohlenstoffvorräte durchgeführt werden, so dass letztlich Vorratsberechnungen von zirka 3.790 Bodenprofilen zur Übertragung auf die Landesfläche Sachsens vorlagen.

Zur Automatisierung der Vorratsberechnungen wurde eine Access-Projektdatenbank aufgebaut, in der alle zur C-Vorratsberechnung benötigten Daten verwaltet werden können. Mit Hilfe der Datenbank können C-Vorräte für die unterschiedlichsten Tiefenstufen, unabhängig von der Horizontierung der Profile, unter Nutzung von SQL-Abfragen und VBA-Modulen berechnet und anschließend per GIS visualisiert werden. Unter Nutzung der Eingangsparameter Kohlenstoffgehalt, Trockenrohdichte, Skelettvolumen und der Horizont bzw. Schichtmächtigkeit wurden unter anderem Kohlenstoffvorräte für die in diesem Bericht dargestellten Tiefenstufen 0–30 cm, 30–100 cm, sowie 0–100 cm berechnet. Die Vorräte für die organische Auflage unter forstlicher Nutzung wurde anhand von Mittelwerten geschätzt.

Für die Übertragung der Punktdaten in die Fläche fanden die Geometrien der BK50 Verwendung. Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden verschiedene Ansätze verfolgt und sich letztlich für eine direkte Übertragung der Punktdaten (C-Vorräte) auf die Polygone der BK50 über eine Mittelwertbildung je Legendeneinheit entschieden, um auch der Variabilität der Legendeneinheiten, ausgedrückt in Leit- und Begleitböden, gerecht zu werden. Durch anschließende Multiplikation der je Legendeneinheit in t/ha vorliegenden Vorräte mit den Flächen der BK50-Polygone wurden flächenbezogene Vorräte abgeleitet.

Die gesamten mittleren Kohlenstoffvorräte der sächsischen Mineralböden, betrachtet bis in eine Tiefe von 1 m, belaufen sich auf ca. 160 Mio. Tonnen. Auf die einzelnen Tiefenstufen bzw. Datenbestände entfallen:

- C-Vorräte organische Auflagen (im Mittel 5 cm): 18,69 Mio. t
- C-Vorräte 0-30 cm: 99,88 Mio. t
- C-Vorräte 30-100 cm: 60,57 Mio. t
- C-Vorräte 0-100 cm: 160,44 Mio. t

Mit zirka 38 % ist mehr als ein Drittel der organischen Kohlenstoffvorräte im Unterboden der sächsischen Mineralböden (Tiefenstufe 30-100 cm) gebunden.

Durch die ergänzende Auswertung der vorliegenden Daten des sächsischen Informationssystems für Moore und organische Nassstandorte (SIMON) konnten zusätzlich folgende C-Vorräte abgeleitet werden:

■ C-Vorräte Moore SIMON: 4,55 Mio. t

Die Summe aller für Sachsen bilanzierter C-Vorräte lässt sich abschließend mit **ca. 184 Mio. Tonnen** angeben. Dies entspricht einem Äquivalent von 680 Mio. Tonnen CO₂.

Die größten Kohlenstoffmengen sind in den Mooren gespeichert. Für die Tiefenstufe 0-100 cm lässt sich über die profilbezogenen Vorratsberechnungen ein mittlerer C-Vorrat von ca. 450 t/ha ableiten. Die höchsten C-Vorräte mit ca. 750 t/ha weisen die Erdhochmoore, gefolgt von den basenreichen Erdniedermooren und Hochmooren (ca. 550 t/ha) auf.

Mit einigem Abstand folgen die semiterrestrischen Böden. Für die Tiefenstufe 0-100 cm wurden im Mittel C-Vorräte von ca. 135 t/ha berechnet. Die höchsten C-Vorräte ergeben sich hier für die Auenböden und im speziellen für die Paternia mit ca. 370 t/ha. Es folgen die Moorgleye mit Vorräten in Höhe von ca. 230 t/ha.

Die geringsten C-Vorräte der Bodenprofile weisen die terrestrischen Böden auf. So wurden für die O/C-Böden (Felshumusboden und Skeletthumusboden), die Lockersyroseme sowie die Reduktosole jeweils C-Vorräte kleiner 50 t/ha ermittelt. In den flächenmäßig am stärksten verbreitetsten Braunerden (ca. 26 % der Landesfläche) sind im Mittel nur ca. 73 t/ha organischer Kohlenstoff gespeichert.

Unter Berücksichtigung der organischen Auflagehorizonte sind in den Böden der sächsischen Wälder (Tiefenstufe 0-100 cm), mit ca. 129 t/ha, die höchsten Kohlenstoffvorräte gespeichert. Es folgen Grünland mit ca. 105 t/ha und die sonstigen Nutzungen mit ca. 95 t/ha. Ackerböden weisen in der Tiefenstufe 0-100 cm mit im Mittel ca. 83 t/ha die geringsten nutzungsbezogenen Vorräte auf.

Zu den bedeutendsten Regionen für die Kohlenstoffspeicherung in Sachsen zählen vor allem die überregionalen Flusslandschaften, in denen grundwasserbeeinflusste Böden dominieren. Die größten C-Vorräte der Tiefenstufe 0-100 cm wurden für die Auen ermittelt. Das Maximum ergab sich für die Bodenlandschaft „Elster-Luppe Auen“ mit C-Vorräten von ca. 161 t/ha. Einen hohen Vorratswert von ca. 139 t/ha in der Tiefenstufe 0-100 cm weist auch die Bodenlandschaft „Erzgebirgskamm und obere Lagen“ auf. In dieser stark bewaldeten und durch Moore und Torfbildungen geprägten Bodenlandschaft wurden zudem die höchsten Vorräte der Tiefenstufe 0-30 cm festgestellt.

12.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ergebnis der durchgeführten Arbeiten unterstreicht die besondere Bedeutung hydromorpher Böden, wie z. B. Moore, als Kohlenstoffsinken im globalen Kohlenstoffkreislauf. Kohlenstoffreiche Böden und hier im Besonderen Moore, sollten daher vor negativen Einflüssen wie Nutzungsänderungen, Bebauung und Versiegelung zukünftig besser geschützt und eine Rekultivierung vorhandener Strukturen gefördert werden.

Die für die sächsischen Böden abgeleiteten Kohlenstoffvorräte können nur als erste Einschätzung angesehen werden. Die vorliegenden Daten reichen nicht aus, um belastbare Ergebnisse ableiten zu können. Zudem ergeben sich größere Unsicherheiten bei der Ermittlung der Kohlenstoffvorräte, da diese zum Teil über Schätzwerte für Lagerungsdichten und Skelettgehalte abgeleitet werden mussten und demzufolge eine methodisch bedingte Ungenauigkeit aufweisen. Die Karten der Kohlenstoffvorräte können somit nur näherungsweise die Realität abbilden.

Im Zuge des Forschungsvorhabens erfolgte die Übertragung analysenbasierter Vorratsberechnungen auf die Legendeneinheiten und damit die Polygone der BK50. Obwohl nur eine eingeschränkte Datenbasis zur Verfügung stand konnten für die Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm flächendeckende Kohlenstoffvorräte für ganz Sachsen abgeleitet und kartographisch dargestellt werden. Für Aussagen zu den Vorräten der organischen Auflagen unter forstlicher Nutzung konnten nur Mittelwerte bzw. mittlere Annahmen getroffen werden; hier wären ergänzende Daten zur Mächtigkeit und Trockenrohddichte von großem Wert, um den erheblichen Beitrag der Auflagen zum Gesamtkohlenstoffvorrat noch deutlicher herauszustellen.

Die C-Vorräte ließen sich nicht bei allen Legendeneinheiten in ausreichender Vorhersagequalität ableiten. Bei 142 der 1.133 Legendeneinheiten konnte nicht auf profilbezogene Vorratsberechnungen zurückgegriffen werden. Weitere 342 Legendeneinheiten sind nur mit einem Vorratsprofil und 420 Legendeneinheiten mit 2 Vorratsprofilen belegt. Legendeneinheiten mit 2 oder weniger Profilen nehmen eine Gesamtfläche von ca. 390.000 ha ein, was ca. 21 % der Landesfläche Sachsens entspricht. Die Schwerpunkte ihres Vorkommens decken sich im Wesentlichen mit den in Abbildung 42 ersichtlichen Flächen geringer Schätzgüte.

Zur Verbesserung der Vorhersagequalität ist eine Erweiterung des vorliegenden Profildatenbestands durch gezielte Bodenaufnahmen und Beprobungen erforderlich. Schwerpunkte zur Informationsverdichtung ergeben sich aus der Schätzfehlerkarte (siehe Kapitel 10). Bei der Analytik sollten insbesondere die zur Vorratsberechnung erforderlichen Parameter C_{org} und die Trockenrohddichte berücksichtigt

werden. Vor allem die Trockenrohdichte stellt zurzeit einen minimierenden Faktor der Vorhersagegenauigkeit dar.

Zur Vermeidung kostenintensiver Stechringuntersuchungen bietet sich die Einbeziehung von Körnungsanalysen an. Über den Ansatz von HOLLIS et al. 2012 können näherungsweise Trockenrohdichten für die einzelnen Horizonte abgeleitet werden (vgl. Kapitel 4.2.).

Eine Nutzung der Bodenansprache im Gelände zur Einschätzung der Trockenrohdichte (Ableitung einer mittleren Körnung über die KA5-Bodenart) ist prinzipiell zwar möglich, jedoch stark mit Fehlern behaftet. Wie die Erfahrung zeigt, variieren die Körnungsansprachen infolge des subjektiven Empfindens der bodenkundlich Kartierenden teilweise deutlich voneinander. Auf eine direkte Einbeziehung der Kartierergebnisse sollte daher besser verzichtet werden.

Moorflächen und organische Nasstandorte spielen eine bedeutende Rolle als Kohlenstoffsinken. Um sie zukünftig besser bei den Vorratsberechnungen berücksichtigen zu können, sollten insbesondere die Daten des SIMON einer Prüfung und Aktualisierung unterzogen werden. Um die Qualität des SIMON-Datenbestandes zu steigern, müssen die ausgewiesenen Torfverbreitungsflächen mit den realen Gegebenheiten vor Ort abgeglichen und die in der BKkonz noch vorhandenen Übersetzungsfehler beseitigt werden. Vor allem in den Bergbaufolgelandschaften Sachsens bedarf die Moorverbreitung einer Überprüfung. Moore und organische Nasstandorte sind oftmals nicht mehr vorhanden, da sie entwässert oder durch den Braunkohleabbau komplett beseitigt wurden bzw. deren ehemalige Standorte bereits wieder rekultiviert sind. Auch Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung können durch die landwirtschaftliche Bearbeitung degradiert oder geschrumpft sein, bis hin zum Komplettverlust.

Aufgrund der automatisierten Umsetzung der Vorratsberechnungen in einer ACCESS-Projektdatenbank, können die Vorratsberechnungen bei zukünftig verbesserter Datenlage mit geringem Aufwand wiederholt werden, so dass eine schrittweise Aktualisierung der C-Vorratskarten erfolgen kann. Dies sollte turnusmäßig im Abstand von 3 bis maximal 5 Jahren durchgeführt werden.

Wie der Vergleich mit den Ergebnissen der von der Firma SEQANA durchgeführten Vorstudie zeigt, braucht eine satellitengestützte Ableitung der C-Vorräte derzeit noch erhebliche Entwicklungsarbeit.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. Auflage, Hannover
- AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (2022): Bodenkundliche Kartieranleitung KA6, Teil B Kennwerte – Stand 18.05.2022.- Vorabzug bereitgestellt vom LfULG
- BARTH, N., KARDEL, K., FORBERG, H. (2011): Bodendauerbeobachtung – Stoffvorratsänderungen im Boden am Beispiel des organischen Kohlenstoffs.- Schriftenreihe Grundwasser-Altlasten-Boden aktuell, Heft 45/2011
- BRÄUNIG, A. (2020): Erläuterung zur BK50 - Bodenkundliche Landesaufnahme Sachsen im Maßstab 1:50.000; Stand 25.05.2020
- BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U., WALLDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). In: GeoBerichte (19).
- BUNDES-BODENSCHUTZGESETZ (BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist
- BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I 2598, 2716) Ersetzt V 2129-32-1 vom 12.7.1999 | 1554
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2021): Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (Hrsg.) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 1. Aufl. Berlin.
- COHEN, J. (1988): Statistical Power Analysis for the behavioral sciences. 2. ed. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- DON, A. (2018): Boden – der unterschätzte Kohlenstoffspeicher; Wissenschaft erleben 2018 /2; Schriftenreihe des Thünen-Institut
- G.E.O.S. INGENIEURGESELLSCHAFT MBH (2022): Wissenschaftliche Studie zur Vorbereitung eines Monitorings der Kohlenstoffspeicherung der Böden relevanter Landnutzungssysteme in Sachsen und ihrer flächenhaften Darstellung (Vorstudie C-Monitoring) - Los 2: Landesweite Abschätzung und Darstellung der C-Vorräte (Zwischenbericht zum 20.11.2022); Tuttendorf
- G.E.O.S. INGENIEURGESELLSCHAFT MBH (2023): Wissenschaftliche Studie zur Vorbereitung eines Monitorings der Kohlenstoffspeicherung der Böden relevanter Landnutzungssysteme in Sachsen und ihrer flächenhaften Darstellung (Vorstudie C-Monitoring) - Los 2: Landesweite Abschätzung und Darstellung der C-Vorräte (Zwischenbericht zum 17.11.2023); Tuttendorf

- GRÜNWALD, T. (2019): Istanalyse C-Bindung Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 46 S., <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32640>
- GRÜNWALD, T., SCHMIDT-COTTA, C., KALBITZ, K. & BERNHOFER, C. (2021): C-Speicherung und -Freisetzung aus Böden unter landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung.- Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 13/2021, 106 S., <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37990>
- HOLLIS, J. M., HANNAM, J., BELLAMY, P. H. (2012): Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. In: European J Soil Science 63 (1), S. 96–109. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x.
- JACOBS, A., FLESSA, H. ET AL. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Hrsg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report, 64).
- KEßLER, K., EDM, F. & DITTRICH, I. (2011): Erstellung eines Fachkonzepts für ein landesweites Informationssystem zur Lage und Verbreitung von Mooren und anderen organischen Nassstandorten (SIMON).- Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 14/2011, 90 S.
- KLINGENFUß, C., FELL, H., THRUM, T., KLEIN, D.-P. ET AL. (2019): Natürliche Kohlenstoffspeicher in Berlin. Ergebnisse des Forschungsprojektes NatKoS. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin.
- KLINGENFUß, C., FELL, H., THRUM, T., KLEIN, D.-P. ., KLEMM, J. & ZEITZ, J. (2020): Entwicklung eines Planungsinstrumentes für das CO₂-Management der natürlichen Kohlenstoffspeicher Berlins (NatKoS). 2., korrigierte und ergänzte Version. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin.
- LBEG NIEDERSACHSEN (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz; GeoBerichte 19
- MÖLLER, A. & KENNEPOHL, A. (2014): Abschätzung von CO₂-Emissionen und -Retentionen durch Landnutzungsänderungen anhand regionalisierter Kohlenstoffvorräte auf landwirtschaftlich genutzten Böden Niedersachsens. – GeoBerichte 27: 76 S., Hannover (LBEG).
- OPENAGRAR (2020): Erste Bodenzustandserhebung Landwirtschaft – Kerndatensatz.- Download von Internetseite https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00054877
- PHILLIPS, C., SCHARWÄCHTE, E., SÖTHE, M., KREMERS, J. (2023): Abschlussbericht der Vorstudie zur Erfassung von Bodenkohlenstoff mittels Satellitendaten. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- RENGER, M., KAUPENJOHANN, M., WESSOLEK, G. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis.- Bodenökologie und Bodengenese Heft 40, Technische Universität Berlin

- RENGER, M., BOHNE, M., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2009):
Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung
bodenphysikalischer Kennwerte. In: Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren
für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese (40), S. 5–51.
- RIEK, W., WOLFF, B., HÖLZER, W., DREXLER, R., HOLZHAUSEN, M. (2006): Evaluierung von Verfahren zur
Erfassung des Grobbodenanteils von Waldböden - Erarbeitung von Empfehlungen für die
Anwendung dieser Verfahren im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald – Endbericht im
Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2010): Fachinformationssystem Boden
- Datenfelder und Schlüsselreferenzen.- Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2017): Fachinformationssystem Boden
- UBODEN.net Benutzerhandbuch.- Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft
und Geologie
- SAUER, T. & WIESNER, T. (2021): Berechnung der Bodenkohlenstoffvorräte auf Basis der
Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD50).- Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz, Heft 4; Hg. v.
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB)
- SAUER, T., DEHNER, U., WIESNER, T., SAUER, S., GOLDSCHMITT, M. & SPIES, E.-D. (2013): Auswirkungen des
Klimawandels auf die Ressource Boden in Rheinland-Pfalz. – Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum
für Klimawandelfolgen [Hrsg.]: Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und
Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 1, Modul Boden (Teil I
Bodenkohlenstoff) 43 S
- SPÖRLEIN, P., GEUB, U., HANGEN, E., REISCHL, A., SCHILLING, B., PRINZ, R. (2014): Der Humuskörper bayerischer
Böden im Klimawandel. Auswirkungen und Potenziale. Abschlussbericht zum Projekt. Hg. v.
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- STAATSBETRIEB SACHSENFORST (2019): Die Kohlenstoffbilanz des sächsischen Waldes 2002-2012.
Kurzfassung. Online verfügbar: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34682>
- SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG BERLIN (2018): Umweltatlas Berlin; Begleittext 01.06
Bodenkundliche Kennwerte; Berlin
- WALDMANN, F. & WEINZIERL, W. (2014): Organische Kohlenstoffvorräte der Böden Baden-Württembergs in
Abhängigkeit von Bodentyp, Bodenart, Klima und Landnutzung. - Reihe KLIMOPASS-Berichte;
LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

- WALDMANN, F. & WEINZIERL, W. (2015): Organische Kohlenstoffvorräte der Böden in Baden-Württemberg.- Hrsg. v. Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau; LGRB-Fachbericht 2015/1. https://produkte.lgrb-bw.de/docPool/c385_data.pdf
- WANSA, S., HARTMANN, K.-J. (2014): Bodenbericht Sachsen-Anhalt 2014. Grundlagen, Parameter und Hintergrundwerte. Hg. v. Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt. Halle (Mitteilungen zur Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt, 18).
- WIESMEIER, M. (2014): Der Humuskörper bayerischer Böden im Klimawandel - Auswirkungen und Potenziale.- Bayerisches Landesamt für Umwelt; Abschlussbericht zum Projekt; Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.
- ZIRLEWAGEN, D. (2016): Regionalisierung bodenchemischer Daten der zweiten Bodenzustandserfassung (BZE) in Sachsen anhand von 281 Standorten (Grundnetz und Verdichtung; unveröffentlichter Bericht vom 03.06.2016)

A 1 Tabelle Zusammenstellung der Vorgehensweise einzelner Bundesländer und Institutionen zur Abschätzung der C-Vorräte

Tabelle A 1: Zusammenstellung der Vorgehensweise einzelner Bundesländer und Institutionen zur Abschätzung der C-Vorräte

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Baden-Württemberg	(WALDMANN UND WEINZIERL 2015)	<p>0 bis 30cm: Multiple Lineare Regressionen, beides folgende Parameter einfließen: A: Tiefe unter Flur (nur bei Grünland & Wald) [cm] B: Mittlerer Jahresniederschlag [mm] C: Mittlere Jahrestemperatur [°C] D: Ton [%] E: Sand [%] F: Hangneigung [%] G: Exposition [Grad] H: Reliefposition [dimensionslos]</p> <p>30 bis 100 cm: Nutzung von Tiefenfunktionen</p> <p>→ Für die weiteren Nutzungsformen wurde mit mittleren Ackerwerten gerechnet bzw. für Verkehr & Gewässer jeweils C-Vorratswerte von 0 angenommen</p>	<p>Auswertung verschiedener Bodendaten unterschiedl. Quellen zur Ermittlung der C_{org}-Nutzung multipler linearer Regressionen bis 30 cm Tiefe, unterhalb 30 cm wurden einfache Tiefenfunktionen genutzt</p>	<p>Bodenzustands-erhebung, verschiedene Bodendatenbanken; BK 50, BÜK 200</p>	<p>Tiefe unter Flur, Mittlerer Jahresniederschlag, mittlere Jahrestemperatur, Tongehalt, Sandgehalt, Hangneigung, Exposition, Reliefposition => eingehende Parameter hängen von Bodenart ab; ergänzend: C_{org}, Trockenrohdichte, Skelett</p>	<p>0-30, 0-70, 0-100</p>	2015	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB)	<p>ohne Maßstab, Darstellung im 50 m Raster</p>	<p>Primär: Acker, Grünland, Wald Für Gesamtvorratsberechnungen: Rebland, Siedlungen, Verkehr und Gewässer</p>	

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Bayern	(SPÖRLEIN et al. 2014)	$C_{org(hz)} = \sum_{i=1}^{hz} C_{org,i} \cdot LD_i \cdot h_i \cdot \left(1 - \frac{SK_i}{100}\right)$ <p> $C_{org(hz)}$ Organischer Kohlenstoffgehalt (kumulativ für alle Horizonte i) $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ $C_{org,i}$ Organischer Kohlenstoffgehalt des Horizontes i $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ LD_i Lagerungsdichte $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ h_i Horizontmächtigkeit [cm] SK_i Volumetrischer Grobbodenanteil [%] </p>	Erstellung einer SOC-Karte (soil organic carbon) für Bayern	Bodenprofile aus Bohrstöcken; Random Forest Model für SOC-Vorratskarte	C_{org} , Lagerungsdichte, Skelett, Horizontmächtigkeit	keine - es erfolgte horizontbasierte Auswertung		LfU Bayern	200 m Auflösung	Acker, Grünland, Forst, Sonstige, Moore	Random Forest Model: Hangneigung, Niederschlag
Berlin	(KLINGENFUß et al. 2019, 2020)	<p>Regionalisierung der C-Vorräte differenziert nach Nutzung bis in 1 m Tiefe berechnet</p> <p>Für mineralische Horizonte:</p> $C_{V(min. Horizont)} = \left(\frac{C_{org}}{100} \cdot TRD_{FB} \cdot M \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right)\right) \cdot 10$ <p> $C_{V(min. Horizont)}$ Kohlenstoffspeicher in mineralischen Horizonten $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ TRD_{FB} Trockenrohddichte des Feinbodens $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$ G Volumetrischer Grobbodenanteil [%] M Horizontmächtigkeit [cm] </p>	Schaffung Datenbasis, sowie Zusammenstellung der Daten für Berlin- Untersuchungen der Böden und Vegetation-Ziel: Management der CO ₂ -Speicher in Berlin - Erhaltung CO ₂ -Speicher und dauerhafte Festlegung CO ₂	Laboranalysen, KA 5 Ansprachen	Organischer Kohlenstoffgehalt, TRD Skelettgehalt, Horizontmächtigkeit	0-30, 30-100, 0-100	2016-2019	Auftraggeber: Bundesland Berlin Durchführung: Humboldt Universität zu Berlin		Siedlung, Park, Kleingarten, Straße, Forst, Moore und Landwirtschaft	C-Gehalte von Vegetation, Totholz

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Brandenburg	(RIEK und Russ 2019)		Ziel Gewinnung von Informationen zum Waldzustand und zur Waldentwicklung	Standorte der BZE-2- und BZE-2a Stichproben im 8 x 8-km-Raster (BZE-2a)		0-90 cm + Humusaufgabe	1992/93 (BZE1), Wiederholungsinventur 2006-2011 (BZE-2). 2009-2011 Bodenzustandserfassung (BZE-2a).				

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges							
Hessen	(MOLDENHAUER 2005; WEGENER 2008)	<p>Bestimmung der C-Vorräte mit Daten der Bodenzustandskarte des HLUG, Nutzung von Potenzfunktion, um Bodenkohlenstoffgehalte bis 1 m Profiltiefe modellieren zu können</p> <p>Außerdem Bestimmung der Lagerungsdichte/Trockenraumgewicht mit Tiefenfunktion oder Annahme von Durchschnittwert Funktionen nach Moldenhauer für C_{org} & LD, 2005:</p> $\begin{array}{l} \text{Agrarflächen} \quad y = f(14,049 \cdot x^{-0,8078}) \\ \text{Waldflächen} \quad y = f(15,049 \cdot x^{-0,8811}) \end{array} \quad y = f(0,2038 \cdot \ln(x) + 0,7516)$ <table border="0"> <tr> <td>x</td> <td>Tiefe [cm]</td> <td>x</td> <td>Tiefe [cm]</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>Organischer Kohlenstoffgehalt [%]</td> <td>y</td> <td>Lagerungsdichte $\left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3}\right]$</td> </tr> </table> <p>Lagerungsdichteformel nur für Waldböden genutzt; für Acker/Grünlandböden wurde für das gesamte Profil ein Wert von 1,2 g/cm³ angenommen (Durchschnittswert)</p> <p>Berechnungsformel für C-Vorräte fehlt</p>	x	Tiefe [cm]	x	Tiefe [cm]	y	Organischer Kohlenstoffgehalt [%]	y	Lagerungsdichte $\left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3}\right]$	CO ₂ -Freisetzung von hessischen Böden unter Einfluss des Klimawandels untersuchen, C-Vorrat wurde durch MOLDENHAUER 2005 für hessische Böden berechnet und Bericht baut auf diesen Werten auf	Daten aus Bodenzustandskarte des HLUG ausgewertet, Dauerbeobachtungsflächen Agrarflächen n=747 Wald n=325	Berechnung von C _{org} über Tiefe Berechnung der LD über Tiefe Keine Formel zur Berechnung C-Vorrat	keine Einteilung in Tiefenstufen, sondern Streuauflage, Organ. Auflage, Oberboden, Unterboden bis 1 m Tiefe	nicht bekannt, da kein Zugriff auf Originalliteratur	Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) Auftragnehmer: AGROFOR Consulting	Wald, Grünland, Acker	
x	Tiefe [cm]	x	Tiefe [cm]															
y	Organischer Kohlenstoffgehalt [%]	y	Lagerungsdichte $\left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3}\right]$															

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Niedersachsen	(MÖLLER und KENNEPOHL 2014)	$C_V = TRD \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot C_{org}[\%] \cdot HZM [cm] \cdot (1 - SV [Vol. - \%])$ <p> <i>C_V</i> Feinbodenvorrat <i>TRD</i> Trockenrohddichte <i>C_{org}</i> Organischer Kohlenstoffgehalt <i>HZM</i> Horizontmächtigkeit <i>SV</i> Skelettvolumen </p> <p>TRD nach Renger et al. 2009 TRD für mineralische Böden: Regressionsgleichung nach Schäfer 2002</p>	Bodenkohlenstoffmodell entwickelt: gemessene Kohlenstoffgehalte aus Profildaten (Niedersächsisches Bodensystem NIBIS) wurden horizontbezogen den Leitprofilen der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:50 000 (BÜK50) zugewiesen	BÜK50, Leitprofile in Dauerbeobachtungsflächen, Kohlenstoffdatenbank NIBIS, Dauerbeobachtungsflächen für Validierung (Laboranalysen, KA 5 Ansprachen)	C _{org} (aus Datenbank), Trockenrohddichte und Skelettkohlenstoffgehalt durch Herleitung bzw. Abschätzung, Horizontmächtigkeit	0-30, 30-60, 60-100, 100-200	2014	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie	1:50.000	Landwirtschaftlich genutzte Flächen: Acker, Grünland	verschiedene Differenzierungsmerkmale wie Klima etc. genutzt

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Rheinland-Pfalz	(WIESNER 2021)	<p>Zunächst Berechnung des Feinbodenanteils, anschließend Berechnung des C_{org} auf Grundlage Feinbodenanteils und Humusgehalts (Werte aus Horizontdaten der BDF50-Leitbodenformen in klassifizierter Form)</p> $FBV = TRDFB \cdot d \cdot (100 - VGB)$ <p>FBV Feinbodenvorrat TRDFB Trockenrohddichte Feinboden d Mächtigkeit des Horizontes VGB Volumen Grobboden</p> <p>Mineralbodenhorizonte $C_{org} [\text{Masse} - \%] = \frac{\text{Humus} [\text{Masse} - \%]}{1,724}$ Organische Horizonte $C_{org} [\text{Masse} - \%] = \frac{\text{Humus} [\text{Masse} - \%]}{2}$</p> <p>Die Kohlenstoffvorräte C_V berechneten sich:</p> $C_V = \frac{FBV \cdot C_{org} [\text{Masse} - \%]}{100}$	organische Kohlenstoffgehalte bestimmt auf Basis der Bodenflächendaten 1:50.000 für Rheinland-Pfalz	Laboranalysen, KA5 Ansprachen Datengrundlage: Bodenflächendaten (BFD50) 1:50.000	Humusgehalt nach KA 5, C_{org} (aus Humusgehalt berechnet), Trockenrohddichte; Mächtigkeit des Horizontes	0-30, 30-100	2021	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB)	Bodenkarten im Maßstab 1:50.000 für die Tiefenstufen 0-30 cm mit und ohne Humusauflage, 30-100 cm und 0-100 cm mit und ohne Humusauflage	Nutzungen: Acker, Grünland, Wald und Sonderkultur (vorwiegend Weinbau).	CORINE Landnutzungs-klassen Bodennutzungs-gesellschaften
Sachsen-Anhalt	(WANSA und HARTMANN 2014)	$C_V = \sum_i \left(\frac{TRD_i \cdot Hm_i \cdot Hg_i \cdot (100 - Sg_i)}{1,72 \cdot 100} \right)$ <p>C_V C-Vorrat $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$ i Anzahl der Bodenhorizonte eines Profils, die in die Berechnung eingeht TRD Trockenrohddichte $\left[\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]$ Hm Horizontmächtigkeit [dm] Hg Humusgehalt [%] Sg Skelettgehalt [%]</p>	Erstellung einer vorläufigen Bodenkarte für den Maßstab 1:50.000 und Erstellung einer einheitlichen Legende + Zusammenführung verschiedener Karten	Profildatenbank (SABO, KA5 Zuweisungen)	C_{org} -Gehalt, TRD, Horizontmächtigkeit, Humusgehalt, Skelettgehalt	0-100	2014	Landesamt für Geologie und Bergwesen	1:50.000 für 1m Tiefe (Mineralboden)	Acker, Grünland, Wald	CORINE Landcover genutzt

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Thünen Institut für Waldökosysteme Eberswalde	(JACOBS et al. 2018)	Zunächst Berechnung des Feinbodenvorrats (je nach Probenahmeverfahren wurden individuelle Gleichungen genutzt) $C_V = FBV$ $C_{org} = \frac{\text{Organischer Kohlenstoffgehalt} \left[\frac{t}{ha} \right]}{\text{Organischer Kohlenstoffgehalt} [\%]}$ $FBV = \frac{\text{Feinbodenvorrat} \left[\frac{t}{ha} \right]}{\text{Organischer Kohlenstoffgehalt} [\%]}$	Bodenzustandserhebung - Bundesweit konsistente Datenbasis für C_{org} in landwirtschaftlich genutzten Böden, Betrachtung des Einflusses der Nutzungsdaten/ Landschaftsänderungen etc.	Bodenprofile + Bohrstöcke im Raster von 8x8 km in Deutschland Labordaten und KA5	Feinbodenvorrat, C_{org} -Gehalt	0-30, 30-100, 0-100	2008 (Planung begonnen) - 2018 (Datensatz vollständig)	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) - beauftragte Thünen Institut für Agrarklimaschutz	C_{org} -Gehalte: für 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm (für verschiedene Nutzungen) C-Vorrat für 0-30 cm (landw. Nutzung, erstellt mit Random Forest Modell)	Hauptsächlich: Acker, Dauergrünland für C-Gehalt-Karten auch Sonderkultur	Random Forest Modell: z.B. Parameter Sand \Rightarrow Einflussgrößen - Bodengroßlandschaft, Höhenlage, Leitbodenassoziation, geologische Einheit

Bundesland / Institution	Referenz	Berechnungsgrundlage C-Vorrat	Zielstellung der Referenz	genutzte Bodendaten	Verwendete Parameter	Tiefenstufen [cm]	Zeitpunkt der Untersuchung	Institution	Maßstabsebene Karten	Nutzungsbezug	Sonstiges
Thüringen	(WIRTH et al. 2004)	$C_s = V \cdot \left(\frac{1 - V_s}{V} \right) \cdot LD_{FB} \cdot C_{\%FB}$ <p> C_s C-Vorrat V Bezugsvolumen V_s Volumen des Skeletts LD_{FB} Lagerungsdichte des Feinbodens $C_{\%FB}$ C-Konzentration des Feinbodens </p>	In der ersten Phase des Projektes standen die Berechnung von C-Vorräten und -Flüssen in Thüringer Wäldern und die Bestimmung der Unsicherheiten dieser Berechnungen im Vordergrund Modelle und Algorithmen zur C-Bilanzierung von Waldbeständen entwickelt	Bodeninventuren: Ökologische Waldbodenzustandskontrolle (ÖWK) Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) - Waldbodenbeobachtungsflächen Waldmessstationen	C-Vorrat berechnet mit: Bezugsvolumen, Skelettvolumen, Lagerungsdichte FB, C_{org} Feinboden	0-60 cm (Mineralboden) Auflage	2001 Neubeprobung von 30 BZE-Profilen Abschlussbericht 1. Projektphase 2004	Bundesministerium für Bildung und Forschung Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena Mit Hilfe von: Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei	C-Vorrat in Tiefe 0-60 cm und Organische Auflage keine Angabe zum Maßstab	Forst, Laub und Nadelwald	Prädiktoren für Regionalisierung: Baumart, Substratgruppe, Bestandsalter, Geländeneigung, Trophiestufe, Feuchtestufe, Höhe ü.NN, Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur

A 2 Zusammenfassung der Ansätze ausgewählter Bundesländer

Baden-Württemberg (Waldmann und Weinzierl 2015)

Zur Erstellung einer landesweiten Übersichtskarte für die Kohlenstoffvorräte in Baden-Württemberg wurden 2015 durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) verschiedene Bodendaten unterschiedlicher Bezugsquellen miteinander kombiniert. Es standen Daten von 7.489 Standorten zur Verfügung, wobei sich der Umfang der Messdaten der Standorte teils deutlich unterschied. Für viele Standorte waren die Angaben zu C_{org} , der Trockenrohichte und dem Bodenskelett fehlend oder unvollständig. Da eine Berechnung der Kohlenstoffvorräte für möglichst viele Standorte vorgenommen werden sollte, erfolgte die Berechnung für Standorte bzw. Horizonte ohne die entsprechenden Analysewerte auf Grundlage von multiplen linearen Regressionen für die Tiefe 0-30 cm. Hierbei erfolgte für die Nutzungen Acker, Grünland und Wald, sowie für verschiedene Bodentypen/Bodentypengruppen eine Differenzierung. In die Regressionsgleichungen flossen folgende Parameter/Prädiktoren ein: Tiefe unter Flur (nur bei Grünland und Wald), Mittlerer Jahresniederschlag, Mittlere Jahrestemperatur, Tongehalt, Sandgehalt, Hangneigung, Exposition und die Reliefposition. Die Prädiktoren incl. der Landnutzung wurden in einem 50 m Raster erhoben und die entsprechenden Bodendaten (Bodentyp, Tongehalt, Sandgehalt, Skelettgehalt) der BK50 entnommen. Für jedes Raster wurde der C-Vorrat als nutzungsbezogener Mittelwert je ha ausgegeben.

Für eine Tiefe von 30-100 cm wurde keine klimatische Standortdifferenzierung vorgenommen und einfache Tiefenfunktionen für die Berechnung der C-Vorräte für unterschiedliche Nutzung und Bodentypengruppen genutzt. Einen Sonderfall stellten Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden dar, für die von vornherein der C-Vorrat für das gesamte Profil bis 1 m Tiefe mit Hilfe tiefenbezogener Gleichungen ermittelt wurde.

Schlussendlich wurden die C-Vorräte für die Nutzungen Acker, Grünland und Wald in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-70 cm und 0-100 cm angegeben und in verschiedenen Karten dargestellt. Zusätzlich wurden die Nutzungsformen Rebland, Siedlungen, Verkehr und Gewässer für die Berechnung der gesamten Kohlenstoffvorräte Baden-Württembergs mit einbezogen.

Bayern (Spörlein et al. 2014)

Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt (LfU) Bayern wurden verfügbare Daten verschiedener Beprobungskampagnen und Dauerbeobachtungsflächen zusammengestellt, um einen Datensatz zur Berechnung der organischen C-Vorräte zu erhalten. Dazu wurden nur Standorte ausgewählt, bei denen Bodenprofile horizontweise bis zu einer Tiefe von 1 m (bzw. bis zum Ausgangsgestein) beprobt und Werte für den organischen C-Gehalt (analytisch bestimmt), die Lagerungsdichte und dem Skelettgehalt vorlagen. Schlussendlich erfüllten 1460 Standorte mit unterschiedlicher Nutzung die besagten Kriterien.

$$C_{org(hz)} = \sum_i^{hz} C_{org_i} \cdot LD_i \cdot h_i \cdot \left(1 - \frac{SK_i}{100}\right) \quad (8)$$

$C_{org(hz)}$ Organischer Kohlenstoffgehalt (kumulativ für alle Horizonte i) $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$

C_{org_i} Organischer Kohlenstoffgehalt des Horizontes i $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$

LD_i Lagerungsdichte $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

h_i Horizontmächtigkeit [cm]

SK_i Volumetrischer Grobbodenanteil [%]

Die Berechnung der C-Vorräte erfolgte für die Nutzungen Acker, Grünland, Forst, Sonstige und Moore, wobei die Berechnung auf einer horizontbasierten Auswertung bis 1 m Tiefe erfolgte. Außerdem wurden die SOC-Vorräte für die Leitbodenassoziationen, sowie für verschiedene Bodenklassen berechnet. Die Regionalisierung der C-Vorräte für Bayern erfolgte unter Nutzung des geostatistischen Modells „Random Forest“.

Berlin (Klingenuß et al. 2019, 2020)

Im Zuge des Forschungsprojekts NatKoS (2016 – 2019) wurde im Auftrag des Bundeslandes Berlin an der Humboldt-Universität zu Berlin die C-Speicher der Böden und Vegetation von Berlin systematisch und räumlich differenziert untersucht. Basierend auf der Bodentypenkarte (SENSTADTWOHN 2014a) wurden die flächenrelevanten Nutzungstypen für Berlin ermittelt, wobei die bodenkundliche Standortaufnahme nach KA5 in der Regel bis in eine Tiefe von 120 cm stattfand. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden 235 Bodenprofilaufnahmen vorgenommen und bei etwa einem Drittel alle Horizonte im Profil alle relevanten Parameter im Labor analysiert.

Die Berechnung des C-Vorrats für alle mineralischen Horizonte erfolgte nachfolgender Gleichung:

$$C_{V(\text{min. Horizont})} = \left(\frac{C_{org}}{100} \cdot TRD_{FB} \cdot M \cdot \left(1 - \frac{G}{100} \right) \right) \cdot 10 \quad (7)$$

C_{org}	Organischer Kohlenstoffgehalt $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$
$C_{V(\text{min. Horizont})}$	Kohlenstoffspeicher in mineralischen Horizonten $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$
TRD_{FB}	Trockenrohichte des Feinbodens $\left[\frac{\text{g}}{\text{dm}^3} \right]$
G	Volumetrischer Grobbodengehalt [%]
M	Horizontmächtigkeit [cm]
Sg	Skelettgehalt [%]

Waren nicht alle Parameter zur Berechnung des C-Vorrats im Datensatz enthalten, wurden diese auf Grundlage von Pedotransferfunktionen aus anderen Bodenmerkmalen berechnet. Die Regionalisierung der C-Vorräte im Boden erfolgte bis in eine Tiefe von 100 cm nach Nutzungsdifferenzierung. Folgende Nutzungstypen wurden berücksichtigt: Siedlung, Park, Kleingarten, Straße, Forst, Moore und Landwirtschaft. Die Berechnung der C-Vorräte fand in den Tiefenintervallen 0-30 cm, 30 -100 cm und 0-100 cm statt. Letztendlich resultierten Bodenkarten der C-Vorräte bis 1 m Tiefe im Verhältnis 1:5.000, die 87 % der Fläche Berlins abdecken.

Hessen (Moldenhauer 2005)

Für das Bundesland Hessen erfolgte die Abschätzung der C-Vorräte in Abhängigkeit der Nutzungsarten Acker, Wald und Grünland bis zu 1 m Tiefe. Als Grundlage hierfür wurden Daten des Bodenzustandskatasters des HLUG ausgewertet. Hierzu wurden tiefenabhängige Berechnungen der organischen Kohlenstoffgehalte basierend auf Moldenhauer 2005 durchgeführt. So wurden unter Einsatz einer Tiefenfunktion die Bodenkohlenstoffgehalte bis 1 m Profiltiefe sowie die Lagerungsdichte hessischer Waldböden jeweils für standardisierte Bodensäulen modelliert.

$$\text{Agrarflächen } y = f(14,049 \cdot x^{-0,9078})$$

$$\text{Waldflächen } y = f(15,049 \cdot x^{-0,8811})$$

x Tiefe [cm]

y Organischer Kohlenstoffgehalt [%]

Für die Berechnung der Lagerungsdichte für Waldböden wurde folgende Funktion genutzt (Datengrundlage HOCKE 1995):

$$y = f(0,2038 \cdot \ln(x) + 0,7516)$$

x Tiefe [cm]

y Lagerungsdichte $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Für Acker- und Grünlandböden wurde hingegen ein einheitlicher Wert von $1,2 \frac{g}{cm^3}$ angenommen (AMELUNG et al. 2018)

Niedersachsen (Möller und Kennepohl 2014)

In Niedersachsen wurde 2014 vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie ein Bodenkohlenstoffmodell entwickelt. Dazu wurde unter Nutzung des niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS) zunächst ein Mindestdatensatz von Bodenprofilen mit bekannten, analytisch bestimmten Kohlenstoffgehalten definiert. Dieser Datensatz wurde anschließend mit den Leitprofilen der BÜK50 harmonisiert und es erfolgte eine Zuweisung der C-Gehalte aus den gemessenen Labordaten der NIBIS zu den Horizonten der Leitprofile. Im Anschluss wurde eine Validierung der hergeleiteten Kohlenstoffgehalte für die Leitprofile unter Abgleich mit den Kohlenstoffgehalten vergleichbarer Profile von Bodendauerbeobachtungsflächen durchgeführt. In die Berechnung der Kohlenstoffvorräte flossen die Parameter Trockenrohdichte, Kohlenstoffgehalt, Horizontmächtigkeit und der Skelettgehalt ein. Die Trockenrohdichten wurden aus den in den Leitprofilen hinterlegten Lagerungsdichten nach RENGGER ET AL. (2009) berechnet. Für Horizonte, für die keine Lagerungsdichte angegeben war, wurde jeweils der Wert des überlagerten Horizonts übernommen. Für organische Böden wurde unter Nutzung einer Regressionsgleichung nach SCHÄFER (2002) aus dem Substanzvolumen auf die Trockenrohdichte geschlossen. Zur Ermittlung der Skelettgehalte wurden Daten der NIBIS-Datenbank ausgewertet, um einen mittleren Skelettgehalt für die Schätzungsklassen nach KA5 anzugeben. Die Berechnung der C-Vorräte erfolgte für die Tiefenstufen 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm und 100-200 cm.

$$C_V = TRD \left[\frac{g}{cm^3}\right] \cdot C_{org}[\%] \cdot HZM [cm] \cdot (1 - SV [Vol. -\%])$$

C_V Feinbodenvorrat

TRD Trockenrohdichte

C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt

HZM Horizontmächtigkeit

SV Skelettvolumen

Die Berechnung der C-Vorräte wurde dabei zunächst in 1cm-Schritten vorgenommen und anschließend mit der anteiligen Mächtigkeit der Horizonte an den Tiefenstufen multipliziert. Abschließend wurden die regionalisierten Leitprofile den Flächeneinheiten der BÜK50 zugeordnet. Zusätzlich erfolgte eine

Unterscheidung nach den Nutzungsarten Ackerland und Grünland. Schlussendlich wurden die regionalisierten Kohlenstoffvorräte für landwirtschaftlich genutzte Flächen in Karten im Maßstab 1:80.000 und für verschiedene Tiefenstufen dargestellt.

Rheinland-Pfalz (Wiesner & Sauer 2021)

Durch das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) wurde 2021 für die Böden im Bundesland Rheinland-Pfalz die Bodenkohlenstoffvorräte auf Basis der Bodenflächendaten 1:50.000 (BDF50) ermittelt. Dazu wurden die Analysewerte von Punktdaten von Bodenprofilen aus dem Bodenformenarchiv (BoFA) des LGB genutzt und vom Punkt in die Fläche übertragen.

Für die Ermittlung der organischen Kohlenstoffvorräte musste zunächst der Feinbodenvorrat berechnet werden. Dazu waren Angaben zur Trockenrohddichte und dem Grobbodenanteil notwendig.

$$FBV = TRDFB \cdot d \cdot (100 - VGB) \quad (2)$$

<i>FBV</i>	<i>Feinbodenvorrat</i>
<i>TRDFB</i>	<i>Trockenrohddichte Feinboden</i>
<i>d</i>	<i>Mächtigkeit des Horizontes</i>
<i>VGB</i>	<i>Volumen Grobboden</i>

Die Trockenrohddichten waren für die Horizonte der BDF50-Leitbodenformen in klassifizierter Form hinterlegt, wobei die Einteilung der Klassen der KA5 folgte. Mit Ausnahme der Klasse 1 wurden für die Klassen die Klassenmittel für die Berechnung genutzt. Der Grobbodenanteil war ebenfalls in den BDF50 in klassifizierter Form nach KA5 hinterlegt, allerdings erfolgte gegenüber der KA5 eine weitere Differenzierung der einzelnen Klassen in verfeinerte Klassenmittel.

Weiterhin war der Humusgehalt ein entscheidender Faktor für die Berechnung der C-Vorräte. Grundlage bildeten hier ebenfalls die nach KA5 in der BDF50 hinterlegten Humusklassen. Analog zum Grobbodenanteil waren die Humusgehalte in der BDF50 ebenfalls in verfeinerten Klassenmitteln differenziert. Auf Grundlage der Humusgehalte wurde der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) in den Horizonten berechnet.

Mineralbodenhorizonte	$C_{org} [Masse - \%] = \frac{Humus [Masse - \%]}{1,724} \quad (3)$
-----------------------	---------------------------------------------------------------------

Organische Horizonte

$$C_{org} [Masse - \%] = \frac{Humus [Masse - \%]}{2} \quad (4)$$

Die Kohlenstoffvorräte C_V berechneten sich:

$$C_V = \frac{FBV \cdot C_{org} [Masse - \%]}{100} \quad (5)$$

Die Berechnung erfolgte für die Tiefenstufen 0-30 cm und 30-100 cm, wobei einzelne Horizonte, falls nötig, anteilig in die Berechnungen eingeflossen sind.

Die Auswertung der organischen Kohlenstoffvorräte erfolgte anhand der landnutzungsbezogenen Leitbodenformen der BDF50 für die Nutzungen Acker, Grünland, Wald und Sonderkultur (vorwiegend Weinbau). Dazu wurden die Polygone der BDF50 mit den Polygonen der Landnutzung nach CORINE Landcover (2012, UBA 2015) miteinander verschnitten. Zusätzlich erfolgte eine Auswertung der Kohlenstoffvorräte in Abhängigkeit der Bodentypen.

Schlussendlich resultierten verschiedenen Bodenkarten im Maßstab 1:50.000 für die Tiefenstufen 0-30 cm mit und ohne Humusaufgabe, 30-100 cm und 0-100 cm mit und ohne Humusaufgabe.

Sachsen-Anhalt (Wansa und Hartmann 2014)

Für das Bundesland Sachsen-Anhalt wurde 2014 durch das Landesamt für Geologie und Bergwesen durch Zusammenführung verschiedener Bodenkarten eine vorläufige Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (VBK50) mit einheitlicher Legende erstellt. Ausgehend von der Profildatenbank (SABO-P; KA5 Zuweisungen), in der Bodenprofile und häufig analysierte Horizonte zusammengefasst sind, wurden Substrat-Horizont-Gruppen gebildet. Bei diesem Konzept wird davon ausgegangen, dass bodenphysikalische und chemische Eigenschaften durch Substrat (Bodenart und Ausgangsgestein) und Horizontmerkmale bestimmt sind. Aus Einzelmessungen verschiedener Parameter wurden statistische Grundgesamtheiten gebildet, die sich auf Bodenart, Ausgangssubstrat und die Horizonte beziehen. Die parameterbezogenen statistischen Kenngrößen der Substrat-Horizont-Gruppen wurden den Horizonten der Standardprofile einzelner Bodenformen zugewiesen. Zusätzlich erfolgte eine Nutzungsdifferenzierung der Standardprofile unter Nutzung von CORINE Landcover 2000 bzw. CIR-luftbildgestützten Biotop- und Nutzungstypenkartierungen des Landes Sachsen-Anhalts.

Ausgehend von den nutzungsdifferenzierten Standardprofilen und der Übertragung der CIR-Landnutzungstypen auf die BK50 war es möglich, den Kohlenstoffvorrat im Mineralboden bis 1 m Tiefe darzustellen. Die Berechnung der Kohlenstoffvorräte der nutzungsdifferenzierten Profile der Horizontdatenbank beruhte auf folgender Formel:

$$C_{org} = \sum_i \left(\frac{TRD_i \cdot Hm_i \cdot Hg_i \cdot (100 - Sg_i)}{1,72 \cdot 100} \right) \quad (6)$$

C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt $\left[\frac{kg}{m^2} \right]$

i Anzahl der Bodenhorizonte eines Profils, die in die Berechnung eingeht

TRD Trockenrohdichte $\left[\frac{kg}{dm^3} \right]$

Hm Horizontmächtigkeit [dm]

Hg Humusgehalt [%]

Sg Skelettgehalt [%]

Die Bodenkohlenstoff-Vorräte wurden Bezug nehmend auf die Nutzungen: Acker, Grünland und Wald, sowie für verschiedene Bodentypen berechnet. Zusätzlich wurde eine Differenzierung nach dem Bodenwasserhaushalt vorgenommen. Die Darstellung der C-Vorräte im Mineralboden bis 1 m Tiefe erfolgte im Maßstab 1:50.000.

Thüringen (Wirth et al. 2004)

Im Bundesland Thüringen wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena ein Forschungsprojekt zur Erfassung der C-Vorräte- und Flüsse in den Wäldern Thüringens durchgeführt (Abschlussbericht 1. Projektphase: 2004). Hierbei wurden unter anderem die C-Vorräte im Mineralboden und der organischen Auflage erfasst. Zunächst erfolgte der Aufbau einer Datenbank basierend auf vier verschiedenen Bodeninventuren der Ökologische Waldbodenzustandskontrolle (ÖWK) und der Bodenzustandserhebung Wald (BZE). Durch Abgleich der Daten zwischen ÖWK und BZE wurde eine große Diskrepanz bei einigen Parametern festgestellt, weshalb zusätzlich eine Nachbeprobung von 30 BZE-Standorten stattfand. Mit Hilfe von Regionalisierungsfunktionen unter Nutzung verschiedener Prädiktoren (Substratgruppe, Höhenstufe, Neigung) wurden die erhobenen Punktdaten in die Fläche übertragen.

Die Berechnung des C-Vorrats erfolgte nach:

$$C_S = V \cdot \left(\frac{1 - V_S}{V} \right) \cdot LD_{FB} \cdot C_{\%FB}$$

C_s C-Vorrat
 V Bezugsvolumen
 V_s Volumen des Skeletts
 LD_{FB} Lagerungsdichte des Feinbodens
 $C_{\%FB}$ C-Konzentration des Feinbodens

Die C-Vorratsberechnungen erfolgten getrennt nach den Artengruppen Nadelbaum und Laubbaum, sowie nach verschiedene Substratgruppen und Modell-Höhenstufen in der Tiefe 0-60 cm. Letztendlich resultierte jeweils eine Karte mit den C-Vorräten im Mineralboden bis 60 cm Tiefe und für die organische Auflage im Maßstab 1:100.000.

Deutschland – Bodenzustandserhebung – Landwirtschaft (Jacobs et al. 2018)

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft beauftragte das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz im Zeitraum 2008-2018 eine bundesweit konsistente Datenbasis für die C-Vorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden in Form einer Bodenzustandserhebung – Landwirtschaft (BZE-LW) zu schaffen. Diese BZE beruht auf der deutschlandweiten Beprobung landwirtschaftlich genutzter Böden nach KA5 in einem Raster von 8 x 8 km, wodurch sich 3.104 Beprobungspunkte ergaben. Aus datenschutzrechtlichen Gründen liegen die im Internet publizierten Daten nur verschleiert vor, und können somit bei Lageabweichungen von bis zu 4 km nicht für Auswertungen genutzt werden.

Eine Berechnung der C-Vorräte erfolgte für die Tiefenstufen 0-30 cm und 30-100 cm, sowie für das gesamte Profil (0-100 cm). Eine Differenzierung für den C-Gehalt erfolgte nach den Nutzungsformen Acker, Dauergrünland und Sonderkultur. Mineralische Böden und Moor/Moor-ähnliche Böden wurden dabei getrennt betrachtet.

Für Standorte, für die keine Trockenrohddichte bestimmbar war, wurde diese über eine Pedotransferfunktion nach RENGGER et al. (2009) ermittelt. Die Lagerungsdichte wurde im Rahmen der Standortaufnahme nach KA5 erhoben und mit dem entsprechenden Humusfaktor zur Korrektur genutzt. Die Feinbodenvorräte wurden je nach genutztem Probenahmeverfahren unterschiedlich berechnet. Der C-Vorrat berechnete sich folgendermaßen:

$$C_V = FBV \cdot C_{org}$$

C_V Organischer Kohlenstoffgehalt $\left[\frac{t}{ha} \right]$

C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt [%]

FBV Feinbodenvorrat $\left[\frac{t}{ha} \right]$

Die C-Vorratsberechnung erfolgte für Acker und Dauergrünland vergleichend für verschiedene Bodenklassen, sowie für unterschiedliche Bodenregionen. Für den C_{org} -Gehalt resultierten Bodenkarten im Maßstab 1:200.000 für die Tiefenstufen 0-30 cm, 30-100 cm und 0-100 cm mit Differenzierung nach Acker, Dauergrünland und Sonderkultur.

Zusätzlich resultierte eine Karte mit dem regionalisierten C-Vorrat für die Tiefe 0-30 cm in landwirtschaftlich genutzten Böden. Diese Karte wurde unter Nutzung des Random Forest Verfahren erstellt, indem die folgenden wichtigsten Einflussgrößen für Ackerland berücksichtigt wurden: Gehalt an Sand und Ton, C:N-Verhältnis, N-Eintrag 2007. Für Dauergrünland flossen nachfolgende Einflussgrößen maßgeblich ein: Tongehalt, C:N-Verhältnis, Höhenlage, Hangneigung.

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0; Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: Poststelle@lfulg.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Volker Scherer, Miriam Kreher
Schwarze Kiefern 2, 09633 Halsbrücke
Telefon: 03731 369-329; Telefax: 03731 369-200
E-Mail: v.scherer@geosfreiberg.de

Redaktion

Raphael Benning
Abteilung Wasser, Boden, Kreislaufwirtschaft, Referat Boden, Altlasten
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 294-2819
E-Mail: Raphael.Benning@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Volker Scherer (Titelseite)

Redaktionsschluss

27.02.2025

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de