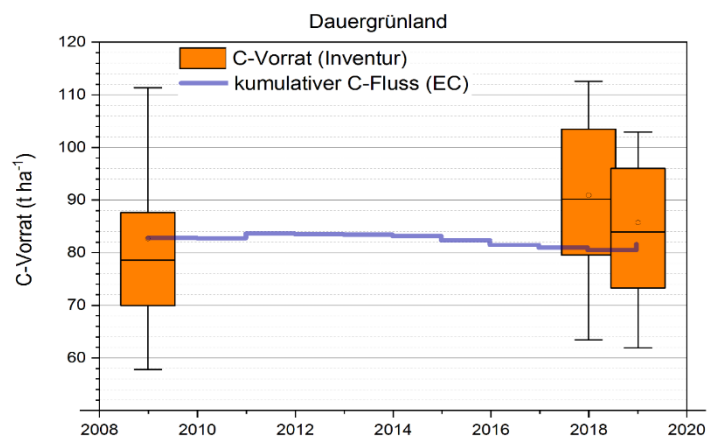


Kohlenstoffbindung in Böden

Schriftenreihe, Heft 13/2021



C-Speicherung und -Freisetzung aus Böden unter landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung

Thomas Grünwald, Claudia Schmidt-Cotta, Karsten Kalbitz, Christian Bernhofer

Inhalt

1	Stand des Monitorings von Kohlenstoff-vorräten und CO₂-Flüssen in sächsischen Ökosystemen	11
2	Kohlenstoffvorräte in Sachsen	14
2.1	Bodendauerbeobachtungsflächen.....	14
2.2	Dauertestflächen.....	21
2.3	Bodenzustandserhebung und Bundeswaldinventur.....	24
2.4	Regionalisierung der sächsischen C-Vorräte.....	24
3	Atmosphärische CO₂-Flüsse in Sachsen	28
3.1	Monitoring an sächsischen ICOS-Standorten.....	28
3.2	Eddy-Kovarianz-Messungen	29
4	Messkampagnen an ICOS-Standorten.....	36
4.1	Bestimmung der Kohlenstoffvorräte im Boden	36
4.1.1	Beprobungen im Gelände	36
4.1.2	Laboranalytik.....	41
4.1.3	Berechnungen.....	41
4.2	Ergebnisse und Diskussion der Bodeninventuren	45
4.2.1	Standort Klingenberg (Acker)	45
4.2.2	Standort Grillenburg (Grünland)	52
4.2.3	Standort Tharandt (Forst).....	61
4.3	Allometrische Beziehungen am Standort Tharandt.....	68
4.4	Vergleichende Betrachtung von Inventuren, EC-Messungen und Emissionsfaktoren.....	69
5	Zusammenfassung und Ausblick	74
	Literaturverzeichnis	76
	Anhang	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Histogramm verfügbarer C-Vorräte bis 60 cm Tiefe an sächsischen BDF (1995 – 2017) auf Mineralböden	18
Abbildung 2:	Verteilung (Boxplots) der jährlichen C-Vorräte bis 60 cm für alle jeweils verfügbaren BDF (1995 – 2017).	18
Abbildung 3:	C-Vorratsänderungen für verschiedene Bezugszeiträume an den jeweils verfügbaren BDF mit maximalem C-Vorrat von 130 t ha^{-1}	19
Abbildung 4:	C-Vorräte an 5 BDF, die C-Vorräte größer als 130 t ha^{-1} aufweisen und deren Änderungstendenzen	21
Abbildung 5:	Histogramm der C-Vorräte bis 30 cm Tiefe an sächsischen DTF (1997 – 2017).	22
Abbildung 6:	Verteilung (Boxplots) der jährlichen C-Vorräte bis 30 cm für alle jeweils verfügbaren DTF (1997 – 2017).	22
Abbildung 7:	Trend der C-Vorratsänderungen auf Basis von 5 Beprobungen (1997, 2000, 2004, 2009, 2015) an 51 DTF (oben), an 15 DTF mit je mindestens 4 Stallmistgaben (Mitte) und an 18 DTF mit je mindestens 11 Winterungen (unten).	23
Abbildung 8:	Abhängigkeit der C-Vorräte an den BDF (2017) von Höhenlage, mittlerem Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur.	25
Abbildung 9:	Mittlerer C-Vorrat (2017) der in den jeweiligen Bodengroßlandschaften liegenden BDF. 26	
Abbildung 10:	Mittlere C-Vorräte der Landnutzungen Forst (BZE 2006, 2012, 2014), Grünland (BDF 2017) und Acker (BDF 2017, DTF 1997 – 2017) in Sachsen.....	27
Abbildung 11:	Kumulative Bilanzen und mittelfristige Trends der Netto-CO ₂ -Senke (oben) und Verdunstung (unten) verschiedener Landnutzungen in Ostdeutschland 2010 – 2019.....	30
Abbildung 12:	Kumulative Nettoökosystemproduktivität (NEP, positiv: CO ₂ -Senke) und Nettobiomproduktivität (NBP, negativ: CO ₂ -Quelle) sowie deren mittel fristige Trends am ICOS Ackerstandort Klingenberg im Zeitraum 2005 – 2019.....	31
Abbildung 13:	Kumulative Nettoökosystemproduktivität (NEP) von 8 Winterungen und 7 Sommerungen am ICOS Ackerstandort Klingenberg sowie deren mittelfristige Trends im Zeitraum 2005 – 2019.	32
Abbildung 14:	Kumulative Nettobiomproduktivität (NBP) am ICOS Ackerstandort Klingenberg im Zeitraum 2005 – 2019 sowie mittelfristige Trends in Abhängigkeit von organischer Düngung.	33
Abbildung 15:	Tageswerte von Nettoökosystemproduktivität NEP, Ökosystematmung TER und Lufttemperatur für den Zeitraum März – April der Jahre 2007, 2008, 2012, 2013 und 2019 am ICOS Ackerstandort Klingenberg.....	34
Abbildung 16:	Nettoökosystemproduktivität NEP und Ökosystematmung TER sowie Lufttemperatur für den Zeitraum Oktober – November der Jahre 2006, 2007, 2011 und 2012 am ICOS Ackerstandort Klingenberg.	35
Abbildung 17:	Beprobungsraster der ICOS Standorte Klingenberg und Grillenburg.	38
Abbildung 18:	Beprobungsraster des ICOS Standorts Tharandt.	39
Abbildung 19:	Methode der Profilbeprobung in skelettreichen Böden (ICOS Standort Tharandt).....	40
Abbildung 20:	Schema zur Berechnung äquivalenter Bodenmassen mit 2019er Bodenmassen (ESM) als Bezugsgröße.....	43
Abbildung 21:	Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Klingenberg aufgeschlüsselt nach Beprobung und nach Horizontgruppe und Beprobung.....	47

Abbildung 22: Variationskoeffizienten pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat in $t\ ha^{-1}$ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in $g\ cm^{-3}$ (Lagerungsdichte), Kohlenstoffgehalt (C-Gehalt) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelettgehalt) für den ICOS Standort Klingenberg.....	49
Abbildung 23: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Grillenburg aufgeschlüsselt nach Beprobungsjahr und -methode.....	53
Abbildung 24: Variationskoeffizienten (Standardabweichung/Mittelwert*100) pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat in $t\ ha^{-1}$ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in $g\ cm^{-3}$ (Lagerungsdichte), Kohlenstoffgehalt (C-Gehalt) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelettgehalt) für den ICOS Standort Grillenburg.....	55
Abbildung 25: Differenz der C-Vorräte in $t\ ha^{-1}$ zwischen den Beprobungen 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern sowie 2019_Grube und 2019_Bohrkern pro Profil für den Standort Grillenburg.....	58
Abbildung 26: Anteil (%) des Oberbodens am gesamten C-Vorrat pro Beprobung.....	60
Abbildung 27: Kohlenstoffvorräte in $t\ ha^{-1}$ für den ICOS Standort Tharandt pro Beprobungsjahr und pro Beprobungsjahr und Horizontgruppe.....	63
Abbildung 28: Betrachtung der Humusvorräte pro Auflagehorizont nach Mikrorelieftypen.....	66
Abbildung 29: Kohlenstoffvorräte, Humusvorräte und C-Gehalte pro Beprobungsjahr und Auflagehorizont (L+Of und Oh) für den ICOS Standort Tharandt.....	67
Abbildung 30: Brusthöhendurchmesser BHD und oberirdischer trockener Biomassevorrat AGB bzw. oberirdischer C-Vorrat AGB_C von vier im September 2020 geernteten Bäumen am Standort DE-Tha sowie deren Abhängigkeiten.....	68
Abbildung 31: Räumliche Variabilität (Boxplots) der Boden-C-Vorräte 2009, 2018 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse nach EC-Methode zwischen 2009 und 2019.....	70
Abbildung 32: C-Vorräte in Boden und oberirdischer Biomasse der Fichten 2007 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse nach EC-Methode zwischen 2007 und 2019.....	71
Abbildung 33: Räumliche Variabilität (Boxplots) der Boden-C-Vorräte 2009, 2018 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse nach EC-Methode zwischen 2009 und 2019.....	71

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A 1: Profildaten für den Standort Klingenberg.....	83
Abbildung A 2: Profildaten für den Standort Grillenburg.....	84
Abbildung A 3: Profildaten für den Standort Tharandt.....	86
Abbildung A 4: Fotos der Bohrkerne am Standort Klingenberg.....	87
Abbildung A 5: Fotos der Bohrkerne am Standort Grillenburg.....	88
Abbildung A 6: 3D-Visualisierung der bilinearen Interpolation der Horizontmächtigkeit von 49 Messpunkten in 10 cm-Abständen auf 4900 Punkte in 1 cm-Abständen und schematische Veranschaulichung und Beschreibung der Volumenberechnung durch Addition der Mächtigkeitswerte.....	89
Abbildung A 7: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Klingenberg.....	90
Abbildung A 8: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Grillenburg.....	92
Abbildung A 9: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Tharandt.....	94

Abbildung A 10: Analyseplots der Regressionen für den Vergleich der Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern am Standort Grillenburg. Analyseplots pro Horizontgruppe.	95
Abbildung A 11: Analyseplots der Regressionen für den Vergleich der Beprobungen 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern am Standort Grillenburg. Analyseplots pro Horizontgruppe.	97
Abbildung A 12: Komponenten des Monitorings von Veränderungen des C-Vorrats in sächsischen Ökosystemen auf Basis von Inventuren, Flussmessungen und Fernerkundung und deren potentielle Anknüpfungspunkte zur Erstellung von Datenprodukten	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rohdaten zur C-Vorratsberechnung am Beispiel der BDF Bauda 1995.....	14
Tabelle 2: Rohdaten zur C-Vorratsberechnung am Beispiel der BDF Belgern 2006.....	14
Tabelle 3: Beprobungstermine an den BDF)	16
Tabelle 4: Mittlere jährliche Vorratsänderungen für vier Bezugszeiträume an BDF mit maximalem C-Vorrat von 130 t ha^{-1}	19
Tabelle 5: Mittlere Lagerungsdichten und C_{org} -Gehalte bis 60 cm von BDF mit C-Vorräten größer als 130 t ha^{-1}	20
Tabelle 6: Vorratsänderungen von BDF mit C-Vorräten größer als 130 t ha^{-1}	20
Tabelle 7: C-Vorräte im Boden verschiedener Landnutzungen in Sachsen.....	26
Tabelle 8: Nettoökosystemproduktivität NEP und Ökosystematmung TER sowie Lufttemperatur T_L für den Zeitraum März – April (vor Sommerungen) am ICOS Ackerstandort Klingenberg.....	34
Tabelle 9: Tageswerte von Nettoökosystemproduktivität NEP, Ökosystematmung TER und Lufttemperatur T_L für den Zeitraum Oktober – November am ICOS Ackerstandort Klingenberg	35
Tabelle 10: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Klingenberg pro Beprobung mit Stichprobenumfang, Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Standardfehler des Mittelwerts und 1. und 3. Quartil	46
Tabelle 11: Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizient pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens, Kohlenstoffgehalt und Skelettanteil für den ICOS Standort Klingenberg	50
Tabelle 12: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen pro Horizontgruppe.....	51
Tabelle 13: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Grillenburg pro Beprobung mit Stichprobenumfang, Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Standardfehler des Mittelwerts und 1. und 3. Quartil	53
Tabelle 14: Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizient pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens, Kohlenstoffgehalt und Skelettanteil für den ICOS Standort Grillenburg	56
Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen pro Horizontgruppe für den Vergleich der Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern, sowie 2019_Bohrkern und 2009_Bohrkern am Standort Grillenburg.	59
Tabelle 16: Kohlenstoffvorräte in t ha^{-1} am ICOS Standort Tharandt pro Beprobungsjahr mit Stichprobenumfang, Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Standardfehler des Mittelwerts und 1. und 3. Quartil.....	62

Tabelle 17: Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizient pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat und die erklärenden Variablen Kohlenstoffgehalt, Humusvorrat, Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettanteil für den ICOS Standort Tharandt.....	64
Tabelle 18: Emissionsfaktoren für verschiedene Landnutzungen und Kompartimente des nationalen Inventarberichts, für Sachsen und für ICOS-Standorte in Sachsen	72

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1: Horizontgrenzen der Profilsprache 2019 für die Standorte Klingenberg und Grillenburg	82
Tabelle A 2: Horizontbezeichnungen und -Grenzen für den Standort Tharandt.	85
Tabelle A 3: Bezugsjahre der Inventuren des Bodenkohlenstoffs vor 2020 und Vorschlag für einen synchronisierten 5/15-jährigen Beprobungsrhythmus nach 2020	102
Tabelle A 4: Kostenschätzungen zum Monitoringkonzept.....	105

Abkürzungsverzeichnis

AGB	Above-ground biomass (oberirdische Biomasse)
AGB_C	C-Vorrat in der oberirdischen Biomasse
BD	Bulk Density (Lagerungsdichte)
BDF	Bodendauerbeobachtungsfläche
BGL	Bodengroßlandschaft
BHD	Brusthöhendurchmesser
BWI	Bundeswaldinventur
BZE	Bodenzustandserhebung
C	Kohlenstoff
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _v (z)	C-Vorrat der Schicht z
d	Mächtigkeit
D	Dichte
DTF	Dauertestfläche
EC	Eddy Kovarianz
EF	Emissionsfaktor
EKP	Energie- und Klimaprogramm
ESM	Equivalent Soil Mass (äquivalente Bodenmasse)
FB	Feinboden
FBV	Feinbodenvorrat
GB	Grobboden
H	Horizont
ICOS	Integrated Carbon Observation System
ICP	International Co-operative Programme
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
M	Masse
M _{add}	Massendifferenz
NBP	Nettobiomproduktivität, C-Bilanz eines Ökosystems inkl. lateraler C-Flüsse (C-Import, C-Export), positive Werte: CO ₂ -Senke
NEP	Nettoökosystemproduktivität (atmosphärischer CO ₂ -Austausch), positive Werte: CO ₂ -Senke
OTIEF	Obergrenze des Bodenhorizonts
S	Skelettgehalt
SM	Soil Mass (Bodenmasse)
T _{add}	zusätzliche Horizontmächtigkeit
TER	Ökosystematmung
THG	Treibhausgas(e)
T _L	Lufttemperatur

TRD	Trockenrohdichte
UTIEF	Untergrenze des Bodenhorizonts
V	Volumen
Δz	Horizontmächtigkeit
σ_t	Lagerungsdichte

Abkürzungsverzeichnis für Bodenhorizonte

Aeh	mineralischer Oberbodenhorizont, Bleichung, Auswaschung von Huminstoffen und Eisen, humos
Ael	mineralischer Oberbodenhorizont, Ton-Humus-Verarmung, Sauerbleichung
Ah	mineralischer Oberbodenhorizont, humos (< 30 Masse-%, Humus)
Ahe	mineralischer Oberbodenhorizont, humos (bis zu 30 Masse-%), Humuseinwaschung und Bleichung
Al	mineralischer Oberbodenhorizont, tonverarmt
aM	Mineralbodenhorizont, des Braunauenbodens (Auendynamik)
Ap	mineralischer Oberbodenhorizont, durch Bodenbearbeitung (pflügen) geprägt
Bt	mineralischer Unterbodenhorizont, Tonanreicherungshorizont
Bv	mineralischer Unterbodenhorizont,
Cv	mineralischer Untergrund, schwach verwittert
Go	Mineralbodenhorizont, mit Grundwassereinfluss, oxidiert
Gor	Mineralbodenhorizont mit Grundwassereinfluss, oxidiert, reduziert
Gr	Mineralbodenhorizont mit Grundwassereinfluss, reduziert
Gro	Mineralbodenhorizont, mit Grundwassereinfluss, oxidiert, teilweise reduziert
ilCv	aus Silikat- und/oder Kieselgestein, aus mit Spaten grabbaren Gestein, mineralischer Untergrundhorizont, verwittert
jM	Mineralbodenhorizont, durch Bodenbearbeitung umgelagert (angeschwemmt)
L	organischer Auflagehorizont aus wenig zersetzter Streu
Of	organischer Auflagehorizont, 10–70 Vol.-% organische Feinsubstanz fermentiert
Oh	organischer Auflagehorizont, Humus überwiegt
rAp	reliktischer mineralischer Oberbodenhorizont, durch Bodenbearbeitung (pflügen) geprägt
rGr	reliktischer Mineralbodenhorizont mit Grundwassereinfluss, reduziert
Sd	Mineralbodenhorizont, Stauwassersohle
Sdw	Mineralbodenhorizont, stauwasserstauend bis stauwasserleitend
Sew	Mineralbodenhorizont, stauwasserleitend, naßgebleicht und sequioxidverarmt
Sw	Mineralbodenhorizont, Stauwasserleiter
Swd	Mineralbodenhorizont, stauwasserleitend bis stauwasserstauend
-	Übergangshorizont: 2 oder 3 bodenbildende Prozesse durchdringen sich, z. B. Sw-rAp
+	Verzahnungshorizont: Bereiche zwischen 2 oder 3 Horizonten, in denen Merkmale des hangenden und des liegenden Horizontes nebeneinander vorkommen, z. B. L+Of
°	überprägter fossiler oder reliktischer Horizont

1 Stand des Monitorings von Kohlenstoff-vorräten und CO₂-Flüssen in sächsischen Ökosystemen

Kohlenstoffbilanzierungen terrestrischer Ökosysteme erfordern eine angemessene räumliche und zeitliche Auflösung, um Änderungen des langfristig gespeicherten Kohlenstoffs feststellen zu können. Methodisch ist eine Kombination verschiedener Erhebungen sinnvoll, um den Kohlenstoffhaushalt mittels unabhängiger Bestimmungen überprüfen und Unsicherheiten abschätzen zu können (Grünwald, 2019). Die Beobachtung zeitlicher Änderungen der Kohlenstoffgehalte und der Senken und Quellen von Treibhausgasen (THG) basiert häufig auf Direktmessungen (insbes. mikrometeorologische Messungen und Inventuren in Boden und Biomasse), Landnutzungsdaten, Informationen zum Management (Düngung, Ernte) und Fernerkundungsdaten. Die Bestimmungsmethoden unterscheiden sich bezüglich Genauigkeit, räumlicher Repräsentativität, zeitlicher Auflösung und Anwendungsbereich (Grünwald, 2019). Das Monitoring stützt sich weitgehend auf Messergebnisse. Die Anwendung von Lückenfüllungs- und Interpolationsverfahren, Modellierungen und Projektionen sowie die Nutzung von Emissionsfaktoren (Strogies und Gniffke, 2019) und regionalisierten Datenprodukten kann darauf aufbauend zur Erstellung und Überprüfung von THG-Bilanzen und C-Senken erfolgen. Demzufolge ist zunächst zu unterscheiden zwischen der Erarbeitung und Umsetzung von Monitoringkonzepten und der darauf aufbauenden Erstellung von C-Bilanzen.

Kohlenstoffinventuren sind ein wichtiges Instrument zur langfristigen systematischen Erfassung und Quantifizierung von C-Vorräten und Vorratsänderungen in verschiedenen Ökosystemkompartimenten (Boden, Biomasse) (Arrouays et al., 2018; Schrumpf et al., 2011). Je nach räumlicher und zeitlicher Auflösung der Stichprobe können Inventuren statistisch gesicherte Aussagen für größere Gebiete ermöglichen. Voraussetzung dafür ist ein standardisiertes und konsistentes Vorgehen hinsichtlich Probenahme (Entnahmestellen, Entnahmeverfahren, Zeitpunkt), Probenanalyse (Genauigkeit) und Berechnungsverfahren. Eine Änderung der C-Vorräte kann nicht bezüglich CO₂- und CH₄-Flüssen partitioniert werden. Mit Ausnahme von organischen Nassstandorten sind jedoch der CO₂-Austausch und das Management die Hauptursache für C-Vorratsänderungen. Inventuren an den Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF, Barth et al., 2000) und im Rahmen von Bodenzustandserhebung im Wald (BZE; Raben et al., 2004; Jacob et al. 2018; Wellbrock et al. 2018; Flessa et al., 2018) und Bundeswaldinventur (BWI; FAO, 2010) erfolgen gemäß bundesweiter Vorgaben (SAG Bodenschutz 1991, BML 1990; BMEL 2006) oder europäischer Programme (ICP Forests). Für die sächsischen BDF haben Tannert et al. (2019) Humussalden berechnet, die zeigen, dass langfristig mit einem Abbau der organischen Substanz gerechnet werden muss. In Baden-Württemberg erklärten statistische Zusammenhänge zwischen organischem C-Gehalt (C_{org}) und verschiedenen Prädiktoren wie Tongehalt, Niederschlag und Temperatur 1/5 bis 2/3 der Varianz der C_{org}-Gehalte verschiedener Bodentypen und Landnutzungen (Waldmann und Weinzierl, 2014). Diese wurden für Regionalisierungen der C_{org}-Gehalte und C-Vorräte genutzt.

Die Anwendung mikrometeorologischer Messverfahren ist aufwändig und erfordert entsprechende Kenntnisse und experimentelle Erfahrung. Dieses Monitoring kann wegen des Investitionsbedarfs und des Betreuungsaufwandes nur an repräsentativen Intensivmessflächen realisiert werden. Weltweit hat sich in den letzten 20 Jahren die Eddy-Kovarianz (EC)-Methode durchgesetzt, denn sie ermöglicht direkte, kontinuierliche, zeitlich hoch aufgelöste und zerstörungsfreie Messungen des atmosphärischen Austauschs verschiedener Treibhausgas- und Wärmeflüsse räumlich integrierend über Ökosystemen. Erfasst werden kann nur der dem atmosphärischen Austausch unterliegende Transport. Für eine den Boden- und Biomasseinventuren vergleichbare Bilanz müssen externe Daten zum Kohlenstoffimport und -export einbezogen werden. Ergänzt werden EC-Messungen durch Messungen von Strahlungskomponenten, Temperatur, Feuchte, Niederschlag

sowie Boden- und Bestandesmessungen. Oftmals liegen auch Informationen zum Management (z. B. Ernte, Düngung, Holznutzung) vor. Bilanzierungen insbesondere des CO₂-Haushalts auf verschiedenen Zeitskalen sind u. a. Grundlage für die Validierung von Modellen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre und von Fernerkundungsdaten. Kontinuierlich werden THG-Flüsse in Deutschland und Europa standardisiert an repräsentativen Landnutzungen gemessen (ICOS, 2020). Daraus abgeleitete Datenprodukte wie CO₂-Quellen und -Senken sind über das ICOS Carbon Portal (<https://www.icos-cp.eu/>) für unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen verfügbar. ICOS als regionales europäisches Netzwerk ist Teil des globalen FLUXNET, welches auf Basis harmonisierter Auswertungen Daten zum Kohlenstoff-, Wasser-, Strahlungs- und Energiehaushalt in verschiedener zeitlicher Auflösung für Ökosystemstationen zur Verfügung stellt (FLUXNET 2015 Datensatz¹). Im Rahmen des FLUXNET-Programms (Baldocchi et al. 2001, Pastorello et al., 2020) sind inzwischen Daten von weltweit 914 EC-Stationen frei verfügbar (Stand 2017), davon 5 in Sachsen.

Messungen des Gasaustauschs mittels Kammern können als Terminmessung oder automatisiert (quasi-kontinuierlich) an verschiedenen Kompartimenten im Ökosystem (z. B. Boden, Blatt, Pflanze) erfolgen. Da im Gegensatz zur EC-Methode keine Hochfrequenzmessungen der THG-Konzentrationen erforderlich sind, wird dieses Verfahren schon länger auch für die THG Methan (CH₄) und Lachgas (trivial für Distickstoffmonoxid, N₂O) eingesetzt. Kammermessungen sind geeignet für kurze Bestände. Sie tragen zum Prozessverständnis bei, da eine Trennung des THG-Austauschs zwischen Boden und Pflanze erfolgen kann. Auch kann zwischen Netto- und Atmungsflüssen unterschieden werden. Schwierig gestaltet sich bei Terminmessungen die zeitliche Interpolation. Die räumliche Repräsentativität ist durch Größe und Anzahl der Kammern beschränkt. Diese Methode wurde in Sachsen bisher nicht regelmäßig, sondern nur im Rahmen von Messkampagnen eingesetzt (Oertel, 2017).

Basierend auf Daten von Erdbeobachtungssatelliten der NASA (Satelliten Landsat 7/8) und der ESA (Sentinel) sind Ökosystemvariablen, Vegetationsindizes und Landnutzungen über den United States Geological Survey (USGS, <http://glovis.usgs.gov/>) beziehungsweise den Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) verfügbar, z. B. Variablen zur Ökosystemproduktion (GPP, NPP) mit einer räumlichen Auflösung von 500 m als 8-Tage-Mittelwerte seit Februar 2000 (Terra MODIS Datensatz, Running et al., 2015). Obwohl die zeitliche und räumliche Dynamik der pflanzlichen Produktion gut darstellbar ist, müssten für die Bestimmung der Nettoökosystemproduktion Annahmen zur heterotrophen Atmung getroffen werden. Diese Datenprodukte eignen sich zur Validierung von Intensivmessungen und können zur Regionalisierung verwendet werden, haben aber hinsichtlich langfristiger Kohlenstoffspeicheränderungen eher den Charakter einer Zusatzinformation. Fernerkundungstechniken können aber auch zur Erfassung des organischen C-Gehaltes eingesetzt werden (Angelopoulou et al., 2019). Entsprechende Ansätze wurden nach Kenntnis der Autoren bisher in Sachsen nicht getestet.

Das Monitoring von C-Vorräten und -Vorratsänderungen terrestrischer Ökosysteme kann kontinuierlich an ausgewählten/repräsentativen Intensivmessstandorten oder diskontinuierlich an Beobachtungspunkten (Stichprobenraster) erfolgen. Beide Vorgehensweisen erfordern die Anwendung standardisierter Verfahren für Messung, Probenahme und Nachbearbeitung, um Repräsentativität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die jeweils betrachteten Kompartimente Boden, Biomasse und Ökosystem gewährleisten zu können. Die räumliche Verteilung der Messstandorte sollte sich an der Bedeutung und dem Vorkommen der jeweiligen Landnutzung sowie am messtechnischen Aufwand orientieren. Die zeitliche Auflösung der dis-

¹ <http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>

kontinuierlichen Beobachtungen ist abhängig von der Dynamik der C-Vorratsänderungen und sollte dem gewünschten Bilanzierungszeitraum entsprechen. Die stichprobenartigen Inventuren von SBS (BZE und BWI) und LfULG (BDF, DTF), die für die jeweilige Landnutzung in einem regelmäßigen Raster erfolgen, sind räumlich gut für Bilanzierungen der sächsischen C-Vorräte geeignet. Standardisierungen sollten insbesondere für das Kompartiment Boden hinsichtlich zeitlicher Abfolge und vertikaler Auflösung der Probenahmen angestrebt werden.

2 Kohlenstoffvorräte in Sachsen

2.1 Bodendauerbeobachtungsflächen

Ergebnisse von Beprobungen an 60 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) wurden vom LfULG (Referat 42) für den Zeitraum 1995 – 2017 zur Verfügung gestellt. Dies sind horizontbezogene Angaben zu Lagerungsdichte, Skelett- und C_{org} -Gehalten. Dabei variieren sowohl die Anzahl und Mächtigkeit der Horizonte als auch die Beprobungstiefen. In der Regel sind nicht an allen BDF zu allen Terminen in allen Horizonten die genannten Variablen verfügbar.

Die berechneten C-Vorräte beziehen sich an allen BDF auf eine einheitliche Schichtdicke von 60 cm. Genutzt wurden die jeweiligen standortspezifischen Horizonteinteilungen (s. Bsp. Tabelle 1, 2).

Tabelle 1: Rohdaten zur C-Vorratsberechnung am Beispiel der BDF Bauda 1995

Jahr	UTIEF cm	OTIEF cm	HORIZ	Probe-nummer	Corg %	Skelett %	Lagerungsdichte g/cm ³
1995	23	0	Ap	L09E096495	0,8	0,4	1,5
	41	23	AI	L09E090495	0,1	0,3	1,6
	53	41	II Bt+AI	L09E097395	0,1	8,7	1,7
	73	53	II Sdw -Bt	L09E092295	0,1	0,3	1,7
	115	73	IV rGo-iiCv	L09E095295	<0,1	0,0	
	130	115	V iiCv-rGo	L09E097895	<0,1	28,2	
	160	130	VI rGo	L09E097695	<0,1	10,1	

Tabelle 2: Rohdaten zur C-Vorratsberechnung am Beispiel der BDF Belgern 2006

Jahr	UTIEF cm	OTIEF cm	HORIZ	Probe-nummer	Corg %	Skelett %	Lagerungsdichte g/cm ³
2006	15	0	Ap	L02E837306	1.2	0.6	1.5
	32	15	rAp				
	50	32	aM	L02E837506	0.5	0.0	1.5
	85	50	II aM				
	102	85					
	120	102	III aM	L02E837706	0.5	0.0	1.3
	150	120	IV Go-aM				

Die C-Vorratsberechnung erfolgte für jeden Horizont:

$$C_v(z) = C_{org} \sigma_t \Delta z \left(1 - \frac{S}{100}\right) \quad (1)$$

mit $C_v(z)$ – C-Vorrat der betrachteten Schicht (t ha⁻¹)

C_{org} – org. C-Gehalt (%)

σ_t – Lagerungsdichte (g cm⁻³)

Δz – Horizontmächtigkeit (cm)

S – Skelettgehalt (%).

Die Summe der C-Vorräte aller Horizonte bis 60 cm ist der C-Vorrat der BDF zum jeweiligen Bezugszeitpunkt. Der bezüglich 60 cm tiefste Horizont geht gewichtet in die Aufsummierung der Teilvorräte ein, wenn deren Untergrenze unterhalb von 60 cm liegt. Liegt für einen Horizont bis 60 cm Tiefe kein organischer C-Gehalt vor, wird kein Vorrat berechnet. Für Lagerungsdichte und Skelettgehalt wurden Mittelwerte aller verfügbaren Beprobungstermine des jeweiligen Horizonts verwendet, da diese beiden Variablen nicht mit der gleichen Häufigkeit vorliegen wie der organische C-Gehalt. Mit horizontspezifisch konstanten Lagerungsdichten und Skelettgehalten ist der organische C-Gehalt die bestimmende Variable für C-Vorratsänderungen. Die Beprobungstermine an den BDF unterscheiden sich hinsichtlich Erst- und Wiederholungsbeprobungen. Auch die Anzahl der Beprobungen schwankt stark von 1 bis 13 (Tabelle 3).

Tabelle 3: Beprobungstermine an den BDF (2013 HW: außerplanmäßige Beprobung nach Hochwasser 2013)

BDF	Jahr	Datum	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2004	2005	2006	2008	2009	2011	2012	2013	2013 HW	2014	2015	2016	2017
1 Langenreichenbach	2001	17.10.01									1B				1			2							3
2 Belgern	1995	15.09.95			1B					1		2			3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
3 Melpitz	2000	14.07.00								1B					1			2							3
4 Nauwalde	2001	16.10.01									1B				1			2							3
5 Lampersdorf	2001	16.10.01									1B				1			2							3
6 Priesteblich	2000	15.11.00								1B					1			2							3
7 Kollau	1998	21.01.98						1B					1			2			3	4	5	6	7		
8 Wermsdorf	2000	16.11.00								1B					1			2							3
9 Bauda	1995	29.08.95			1B					1					2			3							4
10 Großenhain	2000	10.10.00								1B					1			2							3
11 Böhla	2001	18.10.01									1B				1			2							3
12 Lippen	2001	30.10.01									1B				1			2							3
13 Weißkeißel	2000	09.11.00								1B					1			2							3
14 Spohla	2001	20.04.01									1B				1			2			3		4		5
15 Kreba-Neudorf	2001	17.09.01									1B				1			2			3		4		5
16 Niesky	2000	08.11.00								1B					1			2							3
17 Köllitsch	2015	12.03.15																						1B	1
18 Schweta	1998	20.01.98						1B					1				2					3			4
19 Salzenforst	1995	05.10.95			1B					1					2			3							4
20 Malschwitz	2001	20.09.01									1B				1			2			3				4
21 Mückenhain	1998	01.04.98						1B					1				2					3			4
22 Kitzen	1995	15.11.95			1B					1					2			3							4
23 Ehrenfriedersdorf	2002	06.02.02									1B					1				2					3
24 Schmorren	2000	12.10.00								1B					1	2		3							
25 Krögis	1994	22.09.94			1B					1					2			3							4
26 Radeburg	1998	01.04.98						1B					1				2						3		4
27 Neuhilbersdorf	2005/06	08.12.05												1B		1	2	3	4	5	6	7	8		9
28 Noßwitz	2002	13.12.02										1B				1									2
29 Naundorf	1999	18.03.99							1B							1									2
30 Niederwartha	2001	21.09.01									1B	1			2	3	4	5	6	7	8	9	10		11

Für einzelne BDF können Vorratsänderungen je nach Beprobungsterminen für unterschiedlich lange Zeiträume angegeben werden. Die meisten BDF wurden 2017 beprobt (53), gefolgt von 2011 (39), 2006 (32) und 2000 (19). 1995 wurden nur 7 BDF (erstmalig) beprobt. Ein Histogramm aller verfügbaren C-Vorräte bis 60 cm Tiefe (1995 – 2017) der sächsischen BDF zeigt Abbildung 1.

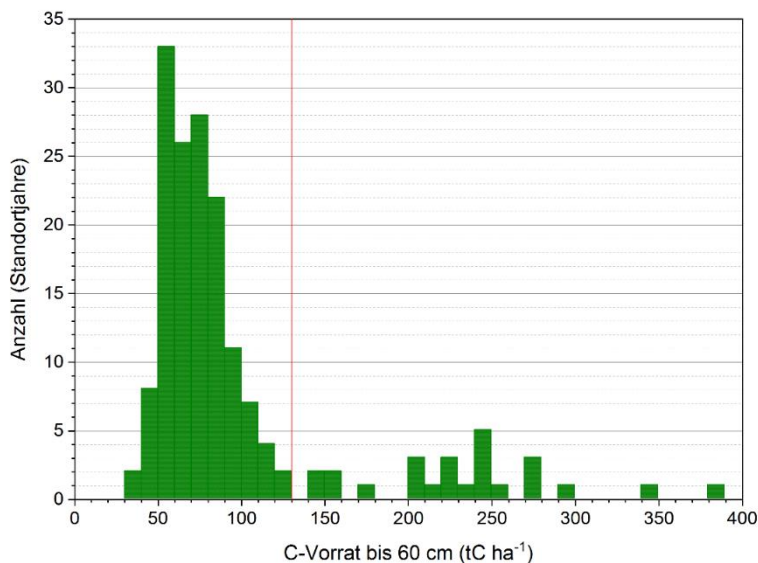


Abbildung 1: Histogramm verfügbarer C-Vorräte bis 60 cm Tiefe an sächsischen BDF (1995 – 2017) auf Mineralböden (Vorräte > 130 t ha⁻¹ werden separat betrachtet) (168 Standortjahre)

Maximale C-Vorräte von 130 t ha⁻¹ treten an 55 von 60 BDF auf. Deswegen sind in Abbildung 2 jährliche Verteilungen der C-Vorräte bis 130 t ha⁻¹ für alle jeweils verfügbaren BDF im Zeitraum 1995 – 2017 dargestellt.

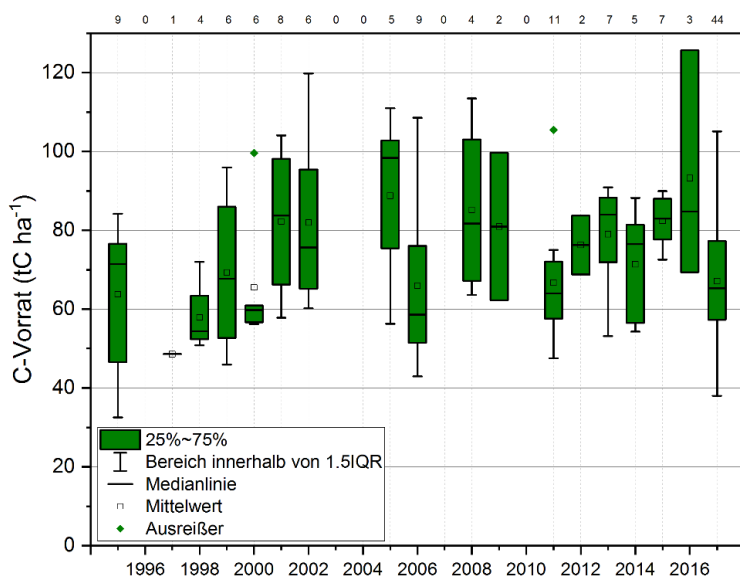


Abbildung 2: Verteilung (Boxplots) der jährlichen C-Vorräte bis 60 cm (zugelassenes Maximum 130 t ha⁻¹) für alle jeweils verfügbaren BDF (1995 – 2017).; (oben: Anzahl der beprobten BDF)

Statistische Analysen von C-Vorräten und -Änderungen für die BDF in Sachsen erfordern einheitliche Bezugszeiträume, was die Datenverfügbarkeit einschränkt. So verringert sich die Anzahl der für Berechnungen mittlerer Vorratsänderungen zur Verfügung stehenden BDF je früher das Startjahr gewählt wird. Abbildung 3 zeigt für verschiedene Bezugszeiträume (1995 – 2017, 2000 – 2017, 2006 – 2017, 2011 – 2017) die mittleren C-Vorratsänderungen an den jeweils verfügbaren BDF (aufsteigend sortiert). Für verschiedene Zeiträume zeigt Tabelle 4 die mittleren jährlichen Vorratsänderungen.

Tabelle 4: Mittlere jährliche Vorratsänderungen für vier Bezugszeiträume an BDF mit maximalem C-Vorrat von 130 t ha⁻¹

Zeitraum	Vorratsänderung ± σ (tC ha ⁻¹ a ⁻¹)	Anzahl BDF
1995 - 2017	+0.36 ± 0.50	9
2000 - 2017	-0.65 ± 1.52	6
2006 - 2017	-0.04 ± 2.38	9
2011 - 2017	-0.82 ± 1.91	11

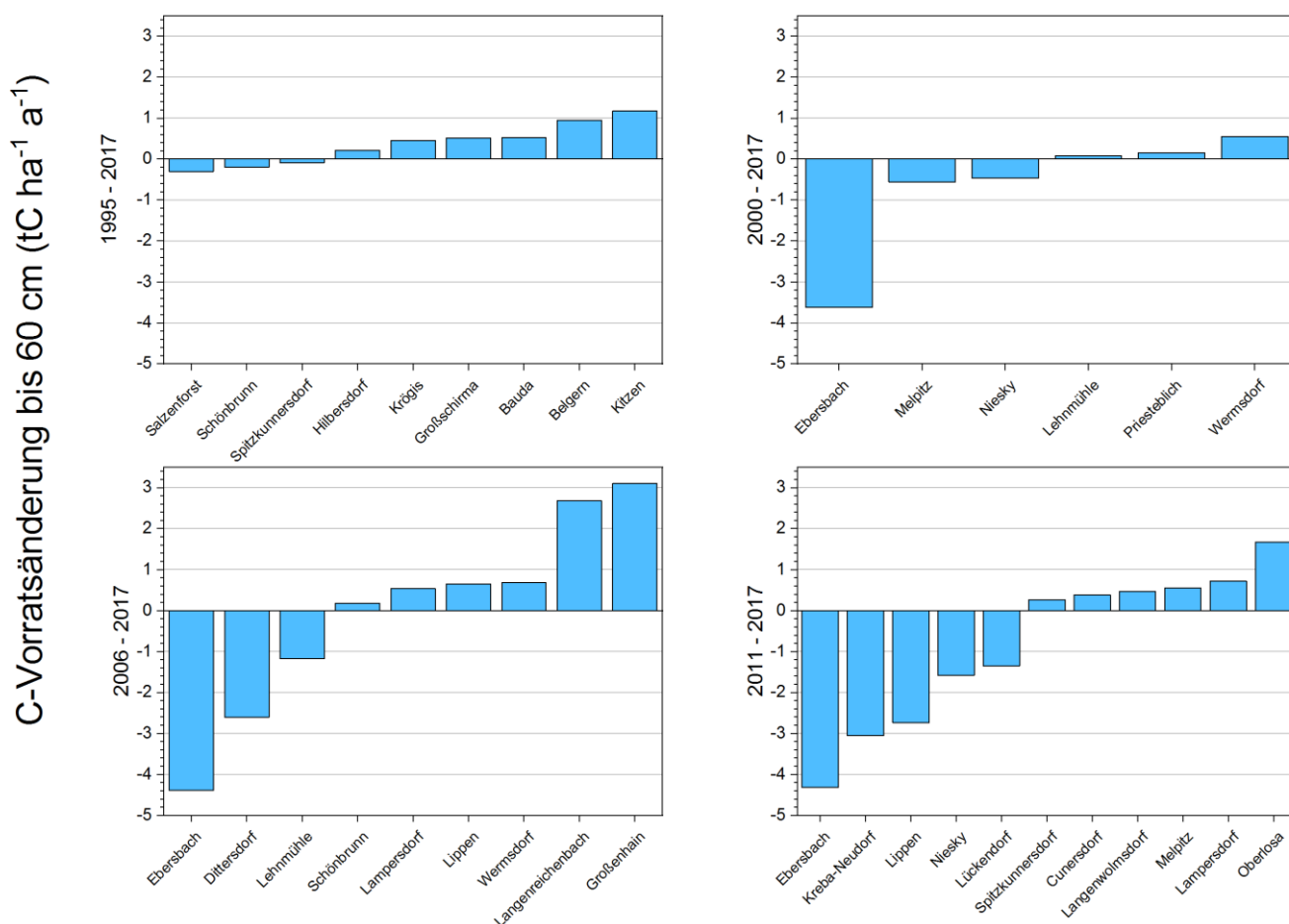


Abbildung 3: C-Vorratsänderungen für verschiedene Bezugszeiträume an den jeweils verfügbaren BDF (aufsteigend sortiert) mit maximalem C-Vorrat von 130 t ha⁻¹

Die (nicht signifikanten) mittleren zeitlichen Änderungen der C-Vorräte sind ab 2000 negativ, nur im Zeitraum 1995 – 2017 gab es eine (nicht signifikante) Vorratszunahme.

Zum Vergleich zeigen die mit den C-Vorratsänderungen im Boden vergleichbaren C-Bilanzen aus den EC-Messungen für den Ackerstandort Klingenberg C-Verluste im Zeitraum 2005 – 2019 von $-1,4 \pm 2,3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (nicht signifikant). Das Dauergrünland Grillenburg ist mit $-0,1 \pm 0,5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (signifikant) C-neutral.

C-Vorräte größer als 130 t ha^{-1} treten an 5 von 60 BDF auf. Diese weisen insbesondere hohe C_{org} -Gehalte auf. Mittlere Lagerungsdichten und organische C-Gehalte dieser 5 BDF sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Mittlere Lagerungsdichten und C_{org} -Gehalte bis 60 cm von BDF mit C-Vorräten größer als 130 t ha^{-1}

BDF	$\sigma \text{ (g m}^{-3}\text{)}$	Corg (%)	max. Corg (%)
Colditz	1.1	5.0	7.4
Mückenhain	1.6	1.6	2.4
Neuhilbersdorf	1.2	2.8	5.7
Niederwartha	1.1	3.8	4.5
Weißkeißel	1.3	2.2	9.5

Die Vorratsänderungen an diesen BDF mit hohen C-Vorräten sind für individuelle Bezugszeiträume in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Vorratsänderungen von BDF mit C-Vorräten größer als 130 t ha^{-1}

BDF	Zeitraum	Vorratsänderung ($\text{tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)
Neuhilbersdorf	2005 - 2017	-7.59
Colditz	1998 - 2017	-3.74
Niederwartha	2001 - 2017	-1.27
Weißkeißel	2000 - 2017	+1.33
Mückenhain	1998 - 2017	+3.05

Teilweise schwanken die Vorräte erheblich (Abbildung 4), so dass neben tatsächlichen zeitlichen Änderungen (inter- und intraannuelle Variabilität) auch andere Erklärungen wie Inkonsistenzen bei der Probenahme und -behandlung oder Managementeffekte in Frage kommen.

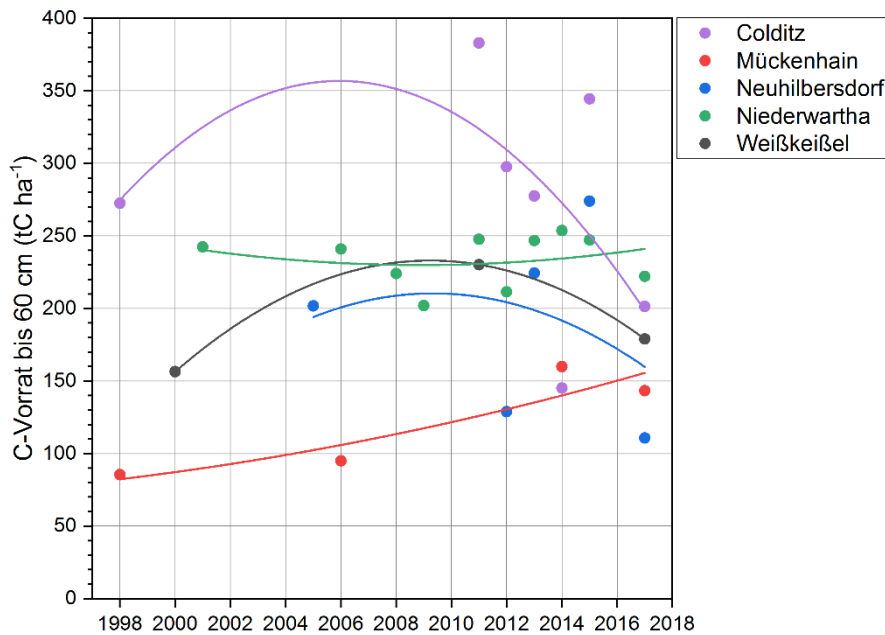


Abbildung 4: C-Vorräte an 5 BDF, die C-Vorräte größer als 130 t ha⁻¹ aufweisen und deren Änderungstendenzen

2.2 Dauertestflächen

Dauertestflächen (DTF) wurden 1990 als Nitratmessnetz vom LfULG eingerichtet. Das Messnetz umfasst 857 fest eingemessene Flächen auf landwirtschaftlichen Praxisschlägen. Obwohl der Fokus auf der Analyse des mineralischen Stickstoffgehaltes liegt, wurden in mehrjährigem Abstand bisher auch Kohlenstoffgehalte an Bodenproben aus 0 – 30 cm Tiefe gemessen. Wegen fehlender Bestimmung der Lagerungsdichten und Skelettgehalte, ist eine Berechnung der C-Vorräte daher nur unter grob vereinfachenden Annahmen und nur bis zu einer Tiefe von 30 cm möglich. Die C-Vorratsberechnung erfolgte auf Basis der gemessenen Humusgehalte und der Verwendung einer konstanten Lagerungsdichte (ohne Skelettgehalt):

$$C_v = HU / 1.72 \cdot \sigma_t \cdot \Delta z \quad (2)$$

mit C_v – C-Vorrat bis 30 cm Tiefe (t ha⁻¹)

HU – Humusgehalt (%)

C_{org} – org. C-Gehalt (%), $C_{org} = HU / 1.72$

σ_t – konst. Lagerungsdichte (1.4 g cm⁻³)

Δz – konst. Horizontmächtigkeit (30 cm).

Das Histogramm der so berechneten C-Vorräte bis 30 cm Tiefe (1997 – 2017) an den sächsischen DTF zeigt Abbildung 5. Minimum, Median und Maximum betragen 10 t ha⁻¹, 61 t ha⁻¹ bzw. 224 t ha⁻¹. Jährliche Verteilungen der C-Vorräte für alle jeweils verfügbaren DTF im Zeitraum 1997 – 2017 sind in Abbildung 6 dargestellt.

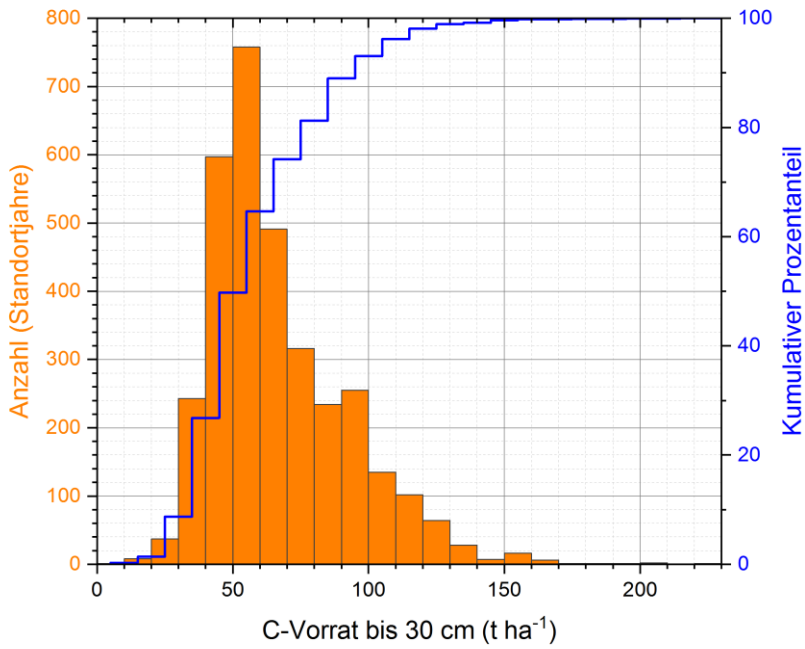


Abbildung 5: Histogramm der C-Vorräte bis 30 cm Tiefe an sächsischen DTF (1997 – 2017).; (3305 Standortjahre an 857 DTF)

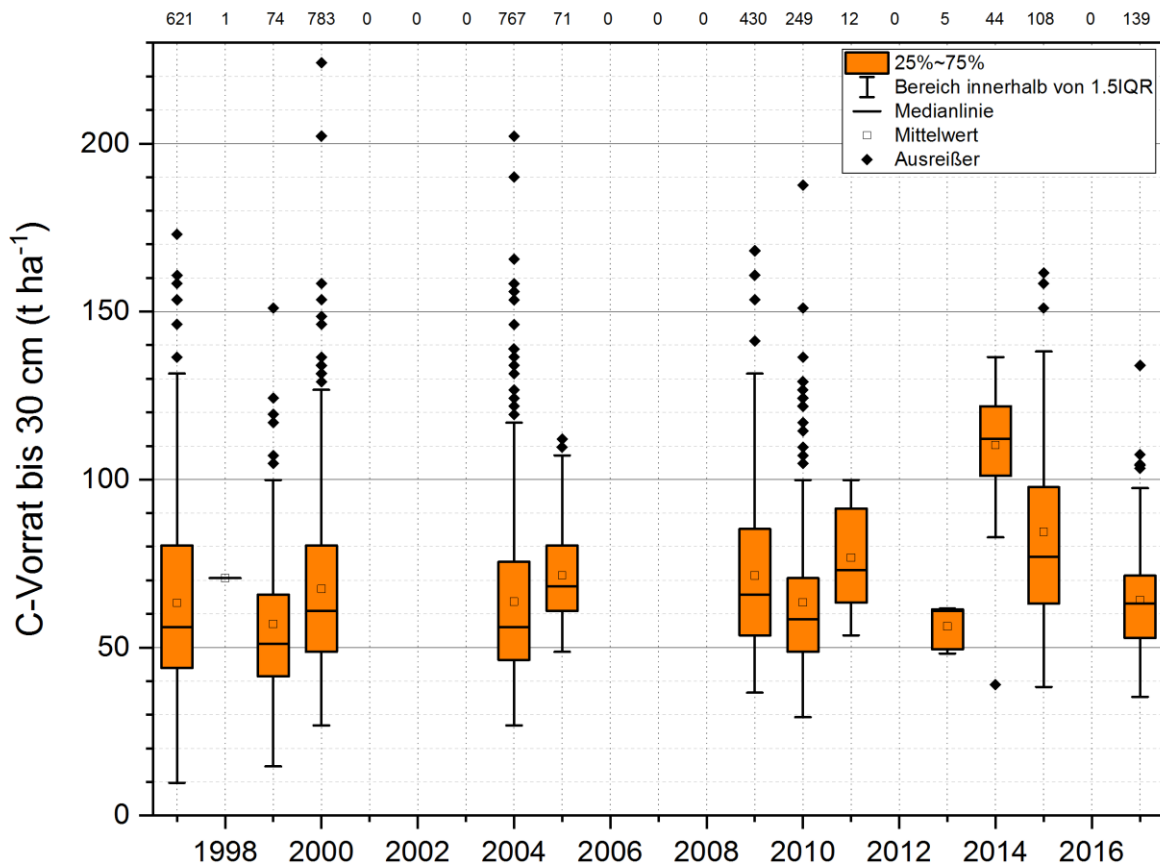


Abbildung 6: Verteilung (Boxplots) der jährlichen C-Vorräte bis 30 cm für alle jeweils verfügbaren DTF (1997 – 2017).; (oben: Anzahl der beprobten DTF)

Humusgehalte wurden an den DTF insbesondere in den Jahren 1997, 2000, 2004, 2009 und 2015 bestimmt. An 51 DTF liegen Humusgehalte und berechnete C-Vorräte für jedes dieser 5 Jahre vor. Der daraus ermittelte zeitliche Trend zeigt zwischen 1997 und 2015 eine Zunahme des mittleren C-Vorrates an diesen DTF von $6,5 \text{ t ha}^{-1}$ ($0,34 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Abbildung 7). Eine Differenzierung dieser DTF bezüglich der Bewirtschaftung (Abbildung 7) zeigt höhere Zunahmen des C-Vorrates, wenn z. B. mindestens 4 Stallmistgaben erfolgten ($+15 \text{ t ha}^{-1}$ bzw. $0,79 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an 15 DTF) oder wenn z. B. mindestens 11 Winterungen angebaut wurden ($+14 \text{ t ha}^{-1}$ bzw. $0,74 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an 18 DTF). Obwohl diese Vorratszunahmen nicht signifikant sind, zeigt sich hier ein positiver Effekt von organischer Düngung und kurzer Brachezeit auf den C-Vorrat im Oberboden.

Eine Anpassung des Monitorings an den DTF (s. Anlage 2) würde es ermöglichen, C-Vorräte im Boden analog zu den BDF zu berechnen. Eine entsprechend vergrößerte Stichprobe erhöht die Chance, signifikante Änderungen des Boden-C-Vorrats in Sachsen zu ermitteln.

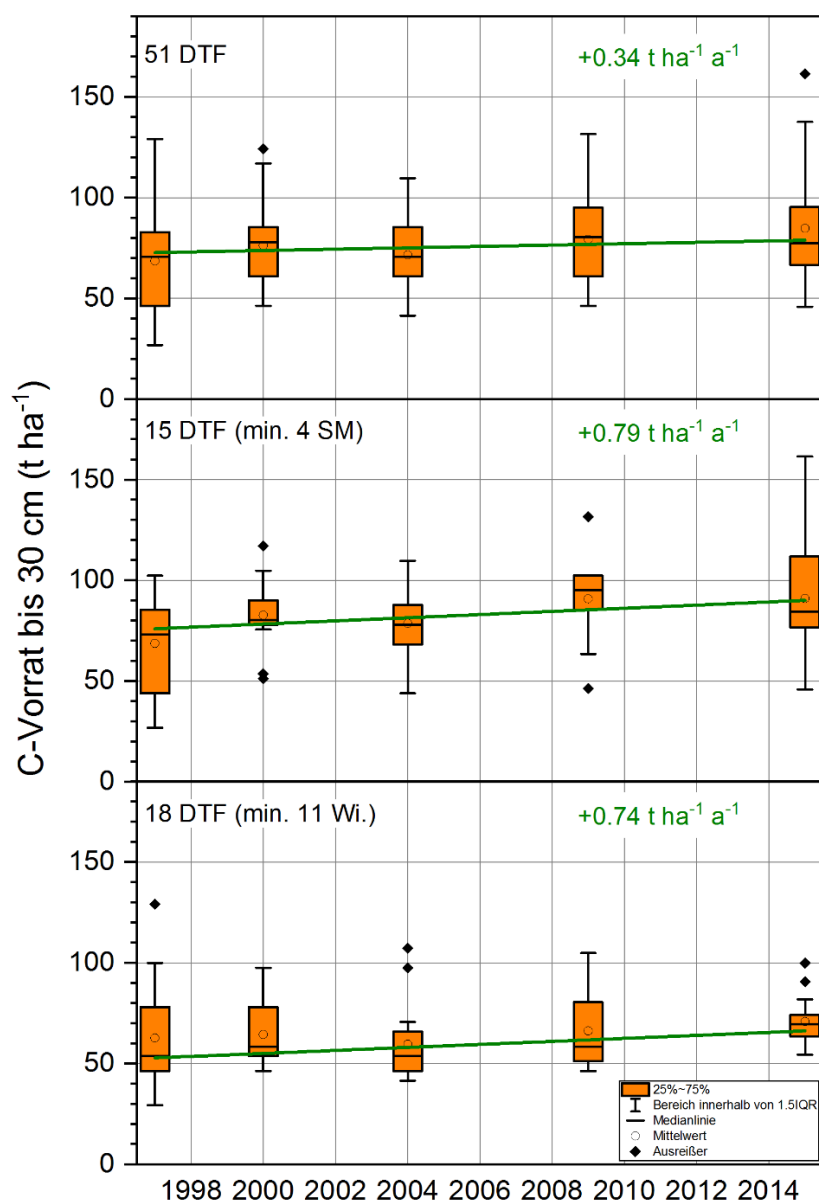


Abbildung 7: Trend der C-Vorratsänderungen auf Basis von 5 Beprobungen (1997, 2000, 2004, 2009, 2015) an 51 DTF (oben), an 15 DTF mit je mindestens 4 Stallmistgaben (Mitte) und an 18 DTF mit je mindestens 11 Winterungen (unten).

2.3 Bodenzustandserhebung und Bundeswaldinventur

Das forstliche Umweltmonitoring in Sachsen ist Teil eines europäischen Messnetzes (ICP Forests), welches aus regelmäßig beobachteten Level I Standorten und forstlichen Dauerbeobachtungsflächen (Level II) besteht. Die Inventuren der C-Speicher im Wald erfassen die Kompartimente Baumbiomasse, Verjüngung, Bodenvegetation (jeweils ober- und unterirdisch) und Totholz auf Grundlage der BWI sowie C-Gehalte von Humusaufgabe und Mineralboden auf Grundlage der BZE und beziehen sich auf den Gesamtwald von Sachsen (ohne organische Nassstandorte). Die Kohlenstoffbilanz der sächsischen Wälder wurde auf Basis der BWI 2 und BWI 3 sowie der BZE 1 und BZE 2 erstellt (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019). Demnach erhöhte sich der C-Speicher im sächsischen Wald zwischen 2002 und 2012 jährlich um durchschnittlich $2,1 \text{ C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (davon unterirdisch $0,58 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Der C-Vorrat im sächsischen Wald betrug 2012 $224,5 \text{ tC ha}^{-1}$, davon 63 % im unterirdischen Speicher (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019). Neben diesen Änderungen in den forstlichen Ökosystemen wurden auch der langfristige Holzproduktspeicher und Substitutionseffekte als CO_2 -Senke in der Bilanz berücksichtigt und deren künftige Entwicklung geschätzt. Insbesondere der Ersatz fossiler Energieträger könnte in Zukunft ein erhebliches CO_2 -Senkenpotential darstellen (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019). Eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit von temporären Einbrüchen der Senkenleistung des Waldspeichers durch abiotische und biotische Schadfaktoren besteht insbesondere in Fichten- und Kiefernforsten (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019).

2.4 Regionalisierung der sächsischen C-Vorräte

Eine räumliche Extrapolation von C_{org} -Gehalten oder C-Vorräten an BDF und / oder DTF kann grundsätzlich auf Basis von (multiplen) Regressionen für verschiedene Bodentypen erfolgen (Waldmann und Weinzierl, 2014). Kohlenstoffvorräte im Waldboden wurden für Sachsen räumlich repräsentativ im Rahmen der BZE ermittelt (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019). Zuverlässige Berechnungen von C-Vorräten außerhalb der forstlichen Landnutzung liegen für Sachsen nur an den BDF vor. Der Stichprobenumfang für die Tiefenstufe 0 - 60 cm beträgt 168 für den Zeitraum 1995 bis 2017, wovon die meisten Messungen (49) 2017 durchgeführt wurden. Für die Erstellung von linearen Regressionen zwischen C-Vorräten und Höhenlage, Niederschlag bzw. Temperatur wurde das Stichjahr 2017 verwendet (Abbildung 8). Die C-Vorräte zeigen eine geringe, nicht signifikante Abnahme mit der Höhenlage und dem mittleren Niederschlag sowie eine geringe, nicht signifikante Zunahme mit der mittleren Temperatur. Diese ungewöhnlichen Abhängigkeiten werden im Wesentlichen durch drei Standorte mit C-Vorräten größer als 150 tC ha^{-1} verursacht, die die Regression dominieren. Ohne diese Standorte zeigen die C-Vorräte keine Abhängigkeit zu den genannten Variablen, so dass eine Regionalisierung der sächsischen C-Vorräte auf dieser Basis unrealistisch wäre. Gleiches gilt für die C_{org} -Gehalte der BDF (für die DTF lagen keine Angaben zu Höhenlage, Niederschlag und Temperatur vor). Zudem ist die räumliche Streuung sowohl der C-Vorräte als auch der Vorratsänderungen hoch, so dass eine Abschätzung des sächsischen C-Vorrates auf dieser Basis wenig verlässlich wäre.

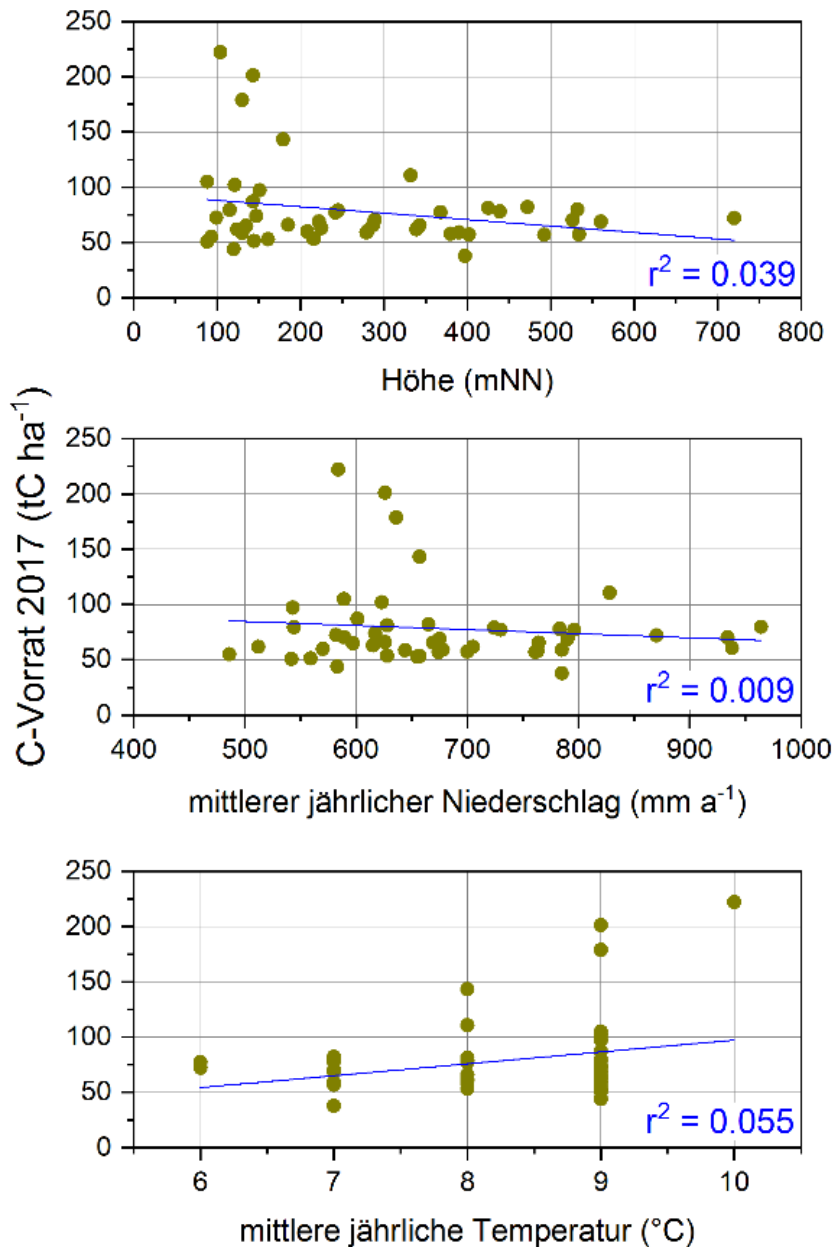


Abbildung 8: Abhängigkeit der C-Vorräte an den BDF (2017) von Höhenlage, mittlerem Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur.

Eine Klassifizierung der BDF bezüglich der Bodengroßlandschaften (BGL) zeigt, dass höhere C-Vorräte ($> 100 \text{ tC ha}^{-1}$) in den Auen und Niederterrassen sowie der BGL Sander und trockene Talsande vorkommen. Niedrige Vorräte ($< 60 \text{ tC ha}^{-1}$) weisen die Bergbaufolgelandschaften sowie die BGL Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet auf (Abbildung 9). Die räumliche Verteilung der BDF in den BGL ist jedoch unterschiedlich und nicht repräsentativ. So standen z. B. für die BGL Sander und trockene Talsande nur drei BDF mit C-Vorräten zwischen 53 tC ha^{-1} und 179 tC ha^{-1} zu Verfügung.

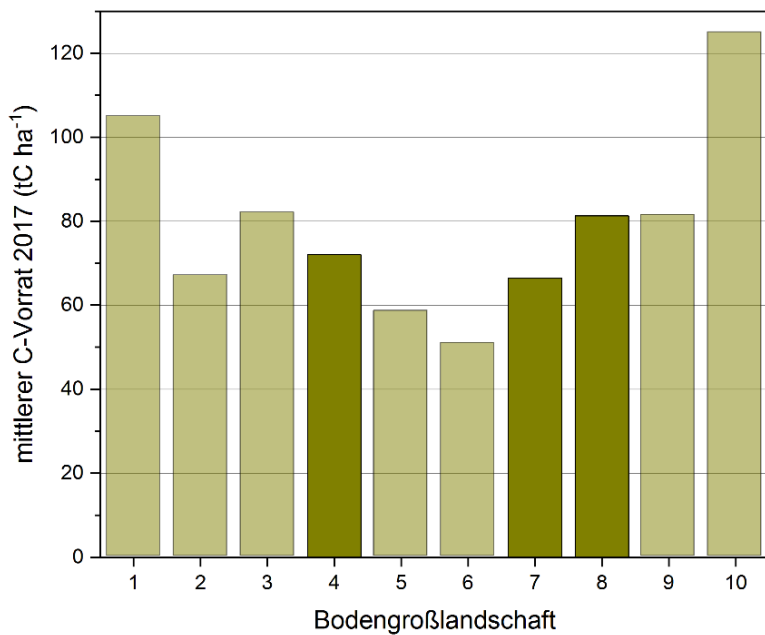


Abbildung 9: Mittlerer C-Vorrat (2017) der in den jeweiligen Bodengroßlandschaften liegenden BDF.; (hell: Anzahl der BDF < 5, dunkel: Anzahl der BDF > 5) mit BGL 1 - Auen und Niederterrassen, 2 - Berg- und Hügelländer aus Sandstein, 3 - Berg- und Hügelländer aus Ton- und Schluffschiefern, 4 - Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an sauren bis intermediären Magmatiten und Metamorphiten, 5 - Bergbaufolgelandschaften, 6 - Grundmoränenplatten und Endmoränen im Altmoränengebiet, 7 – Lössböden, 8 - Lösslandschaften des Berglandes, 9 - Niederungen und Urstromtäler des Altmoränengebietes, 10 - Sander und trockene Talsande

Bezüglich der Landnutzungen speichert der sächsische Waldboden mit 114 bis 123 tC ha⁻¹ (2006 – 2014) fast doppelt so viel Kohlenstoff wie der ackerbaulich genutzte Boden (56 bis 69 tC ha⁻¹, 1997 – 2017). Im Boden der Landnutzung Dauergrünland waren 2017 110 tC ha⁻¹ gespeichert, wobei diese Vorräte deutlich stärker streuen als die der anderen Landnutzungen (Abbildung 10). Die Boden-C-Vorräte im Wald und auf Äckern blieben weitgehend stabil. Dabei sind die Unterschiede des im Ackerboden gespeicherten C im Jahr 2017 zwischen BDF (69 tC ha⁻¹) und DTF (63 tC ha⁻¹) gering. Mit den Flächen der jeweiligen Landnutzung (Tabelle 7) ergibt sich daraus für Sachsen ein C-Vorrat in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden von 126,1 Mio tC (2014 – 2017).

Tabelle 7: C-Vorräte im Boden verschiedener Landnutzungen in Sachsen

Landnutzung	C-Vorrat (tC ha ⁻¹)	Fläche (ha) ¹	C-Vorrat Sachsen (Mio tC)
Wald	120	495199	59,4
Acker	65	703711	45,7
Dauergrünland	110	191254	21,0

¹ Quelle: Statistisches Landesamt Sachsen, 2019

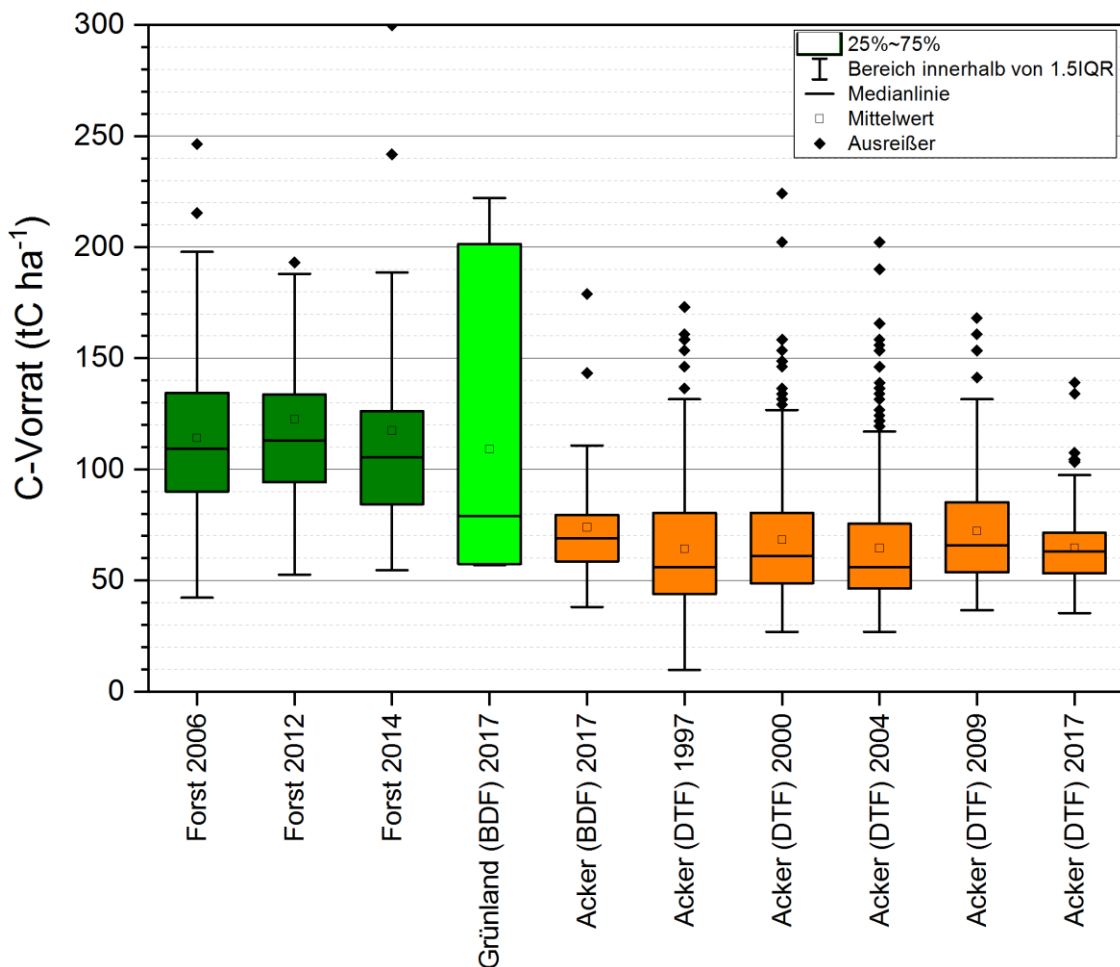


Abbildung 10: Mittlere C-Vorräte der Landnutzungen Forst (BZE 2006, 2012, 2014), Grünland (BDF 2017) und Acker (BDF 2017, DTF 1997 – 2017) in Sachsen

Grundsätzlich sind die Stichprobenumfänge sowohl für die C-Vorräte als auch die C_{org} -Gehalte zu gering, um signifikante bodentypabhängige Regressionen mit klimatischen Variablen ermitteln zu können. Dies liegt u. a. an der zeitlichen Verteilung der Probenahmen (BDF, DTF) auf verschiedene Stichjahre. Weiterhin ist die Streuung von C-Vorräten und C-Vorratsänderungen im Allgemeinen groß, so dass eine räumliche Extrapolation hinsichtlich der sächsischen C-Vorräte mit hohen Unsicherheiten verbunden wäre.

3 Atmosphärische CO₂-Flüsse in Sachsen

3.1 Monitoring an sächsischen ICOS-Standorten

Von den fünf sächsischen Messstandorten mit Eddy-Kovarianz-Messtechnik in Verantwortung der TU Dresden sind drei Standorte Teil der europäischen Forschungsinfrastruktur ICOS (Integrated Carbon Observation System). Diese sind der Ackerstandort Klingenberg, das Dauergrünland Grillenburg und die Ankerstation Tharandter Wald. Sachsen leistet damit einen erheblichen Beitrag zur deutschen Ökosystembeobachtung (3 von 18 Standorten) im Rahmen von ICOS.

Im Ökosystem-Messprogramm von ICOS werden Dauerbeobachtungen zum Spurengasaustausch zwischen verschiedenen Ökosystemen und der Atmosphäre durchgeführt, welche durch Messungen meteorologischer Variablen, Beobachtungen von Teilkomponenten des Kohlenstoffhaushalts (u. a. Blattflächenindex, Streufall, Zuwachs, Bodenatmung) und regelmäßige Inventuren des Kohlenstoffvorrates in Boden und Biomasse ergänzt werden. Dazu wurden und werden umfangreiche Standardisierungen des langfristigen Messprogramms durchgeführt. Diese beziehen sich auf:

- die Konfiguration der EC-Messungen,
- Messungen von Speicheränderungen,
- Kammermessungen (Bodenatmung),
- Messungen meteorologischer Variablen und kontinuierliche Bodenmessungen,
- Boden- und Pflanzenprobenahme,
- Design von Messplots zur Inventur der oberirdischen Biomasse,
- phänologische Beobachtungen,
- Prozessierung der Rohdaten,
- die Erfassung von Metadaten (z.B. Management).

Im Folgenden werden die sächsischen ICOS-Standorte kurz charakterisiert:

Tharandt

Die Ankerstation Tharandter Wald (50°57'49"N, 13°34'01"E, 385 m ü.NN) befindet sich in einem Altlichtenbestand südwestlich von Dresden. Hier wird seit 1996 kontinuierlich u. a. der CO₂-Austausch zwischen Wald und Atmosphäre und die Verdunstung gemessen (längste derartige Zeitreihe Deutschlands). Der Fichtenbestand im Tharandter Wald ist 133 Jahre alt (2020) und hat eine mittlere Höhe von 31 m. Im Einflussbereich der Messungen befinden sich 87 % immergrüner Nadelwald (72 % Gemeine Fichte) und 13 % laubabwerfender Wald (10 % Lärche). Dieser Standort wird seit 1811 bewirtschaftet (u. a. Auflichtungen, Pflanzungen, Kalkungen). Die laufenden Maßnahmen zum Waldumbau (u. a. Pflanzungen von Buche und Weißtanne) haben zum Ziel, den derzeit dominierenden Anteil der Fichte zugunsten eines Mischwaldes zu reduzieren. Die letzten größeren Auflichtungen erfolgten 2002 (Entnahme von 60 m³ ha⁻¹), 2011 und 2016 (jeweils 53 m³ ha⁻¹).

Die Station ist u. a. mit EC-Messtechnik ausgestattet. Dies sind Ultraschallanemometer zur Messung der drei Windgeschwindigkeitskomponenten sowie der Temperatur und Gasanalytoren für die Messung der CO₂- und Wasserdampfkonzentration. Die Geräte liefern die zur Anwendung der EC-Technik erforderliche Messfrequenz von 20 Hz. Ergänzt werden diese durch Messungen der Strahlungskomponenten, Luftfeuchte und -temperatur, Niederschlag sowie Boden- und Bestandesmessungen.

Die durchschnittliche CO₂-Senke (Netto-Ökosystem-Produktivität) beträgt 4,3 tC ha⁻¹ a⁻¹ (1997 – 2019). Im Trockenjahr 2018 sank diese auf 3,3 tC ha⁻¹ a⁻¹. Mittlere Jahressummen von Verdunstung und Niederschlag sind 478 mm a⁻¹ bzw. 840 mm a⁻¹ (1997 – 2019). Die entsprechenden Werte 2018 betragen 443 mm bzw. 517 mm. Die CO₂-Konzentration stieg von 376 ppm (1997) auf 421 ppm (2019).

Klingenberg

Im Erzgebirgsvorland befindet sich die Ackerstation Klingenberg (50°53'34"N, 13°31'21"E, 478 m ü.NN). Der Acker wird seit 1975 intensiv landwirtschaftlich genutzt mit einer 5-jährigen Fruchtfolge von Raps, Winterweizen, Mais, Sommergerste und Wintergerste. Der Kohlenstoffvorrat im Boden (0-60 cm Tiefe) beträgt 97 tC ha⁻¹ (2007).

Die Station ist seit 2004 mit EC-Messtechnik ausgestattet. Messungen mehrerer Strahlungskomponenten, Luftfeuchte und -temperatur, Niederschlag sowie Boden- und Bestandesmessungen sind ebenso verfügbar wie Informationen zur Bewirtschaftung durch die Colmnitzer Agrargenossenschaft.

Die durchschnittliche CO₂-Senke (Netto-Ökosystem-Produktivität) beträgt 0,7 tC ha⁻¹ a⁻¹ (2005 – 2019). Mittlere Jahressummen von Verdunstung und Niederschlag sind 495 mm a⁻¹ bzw. 766 mm a⁻¹ (2005 – 2019).

Grillenburg

In Zentralsachsen befindet sich die Grasstation Grillenburg (50°57'04"N, 13°30'50"E, 385 m ü.NN), wo seit 2003 EC-Messungen stattfinden. Das Dauergrünland ist seit 1987 ungedüngt und wird extensiv genutzt (1 – 3 Mahdtermine pro Jahr, gelegentliche Beweidung durch Kühe, Schafe und Pferde im Herbst). Der Kohlenstoffvorrat im Boden (0-60 cm Tiefe) beträgt 72,7 tC ha⁻¹ (2008).

Messungen mehrerer Strahlungskomponenten, Luftfeuchte und -temperatur, Niederschlag sowie Boden- und Bestandesmessungen sind ebenso verfügbar wie Informationen zur Bewirtschaftung durch die Colmnitzer Agrargenossenschaft.

Die durchschnittliche CO₂-Senke (Netto-Ökosystem-Produktivität) beträgt 0,9 tC ha⁻¹ a⁻¹ (2005 – 2019). Mittlere Jahressummen von Verdunstung und Niederschlag sind 606 mm a⁻¹ bzw. 901 mm a⁻¹ (2005 – 2019).

3.2 Eddy-Kovarianz-Messungen

Parallelmessungen des CO₂-Austausches verschiedener Pflanzenbestände mit der Atmosphäre erlauben eine zeitlich hoch aufgelöste Quantifizierung von CO₂-Senken und -Quellen terrestrischer Ökosysteme. Voraussetzung für solche Bilanzierungen als auch die Erfassung von Ökosystemreaktionen auf Witterungseinflüsse und das Landnutzungsmanagement ist ein langfristiges, kontinuierliches Monitoring. Im Zeitraum 2010 bis 2019 zeigten die fünf sächsischen Standorte sowie drei weitere Standorte in Ostdeutschland mit EC-Messtechnik deutliche Unterschiede der mittelfristigen Trends der Netto-CO₂-Senke (Abbildung 11). Waldbestände mittleren Alters sind deutliche CO₂-Senken im Bereich 10 – 20 tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Die sächsischen Fichtenbestände binden durchschnittlich 17 tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹ (Tharandter Wald) bzw. 12 tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹ (Osterzgebirge). Ein Eichenjungbestand, der auf einer Windwurffläche (Kyrill 2007) gepflanzt wurde, war bis 2017 eine deutliche Netto-CO₂-Quelle von 14 tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Der aufwachsende Bestand ist seit 2018 (11 Jahre nach der Störung) wieder eine Netto-CO₂-Senke von 6 tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹. Dies illustriert die hohe Variabilität des CO₂-Haushaltes gestörter Ökosysteme.

Dagegen ist die Verdunstung in deutlich geringerem Maß vegetations- und witterungsabhängig (Abbildung 11). Die jährlichen Summen an acht Standorten in Ostdeutschland liegen in den Jahren 2010 - 2019 zwischen 450 mm (Fichtenbestand im Osterzgebirge) und 640 mm (Feuchtgebiet in Vorpommern).

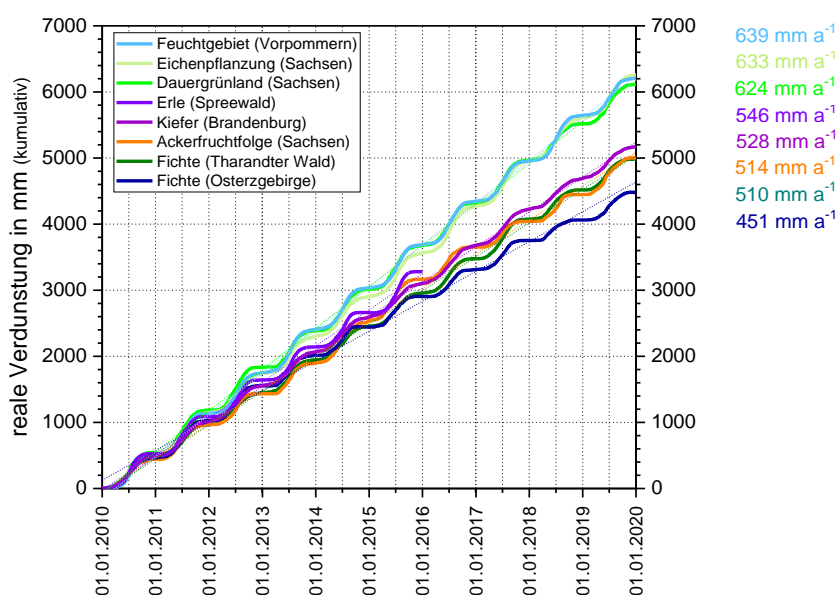
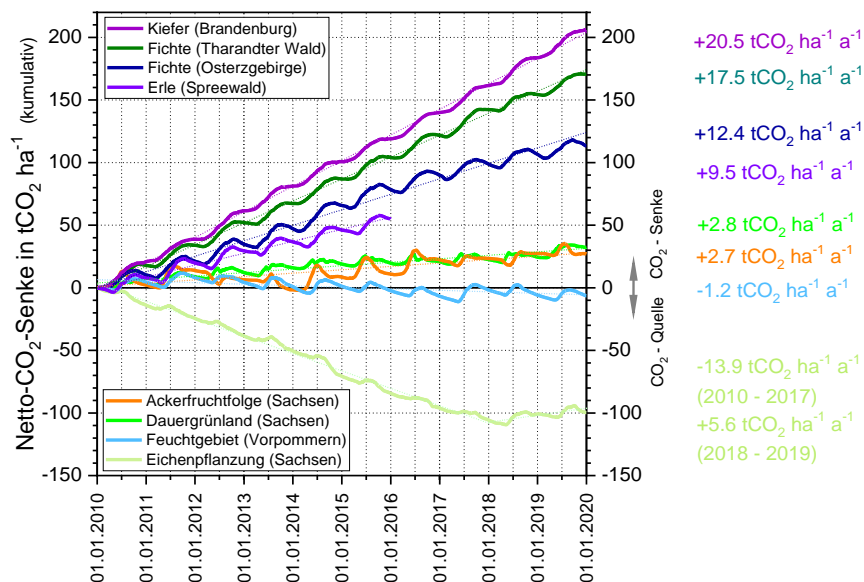


Abbildung 11: Kumulative Bilanzen und mittelfristige Trends der Netto-CO₂-Senke (oben) und Verdunstung (unten) verschiedener Landnutzungen in Ostdeutschland 2010 – 2019

Das Management ackerbaulicher Landnutzung hat einen erheblichen Einfluss auf die C-Bilanz solcher Standorte. Kontinuierliche Messungen des atmosphärischen CO₂-Austausches am ICOS-Standort Klingenberg und Bewirtschaftungsdaten der Agrargenossenschaft ermöglichen die quantitative Beurteilung des Einflusses landwirtschaftlicher Bewirtschaftung (z. B. organische Düngung, Bodenbearbeitung) auf die C-Bilanz. Der konventionell bewirtschaftete Standort Klingenberg mit 5-jähriger Fruchtfolge war im Zeitraum 2005 – 2019 bezüglich der Nettoökosystemproduktivität (NEP) eine mittlere CO₂-Senke von 0,7 tC ha⁻¹ a⁻¹ (Abbildung 12). Eine separate Bilanzierung von Winterungen und Sommerungen (ohne Zwischenfrucht) zeigt jedoch deutliche NEP-Differenzen. So waren Kalenderjahre mit Winterungen eine durchschnittliche CO₂-Senke von 1,8 tC ha⁻¹ a⁻¹, während Kalenderjahre mit Sommerungen durchschnittlich 0,7 tC ha⁻¹ a⁻¹ an die Atmosphäre abgaben (Abbildung 13).

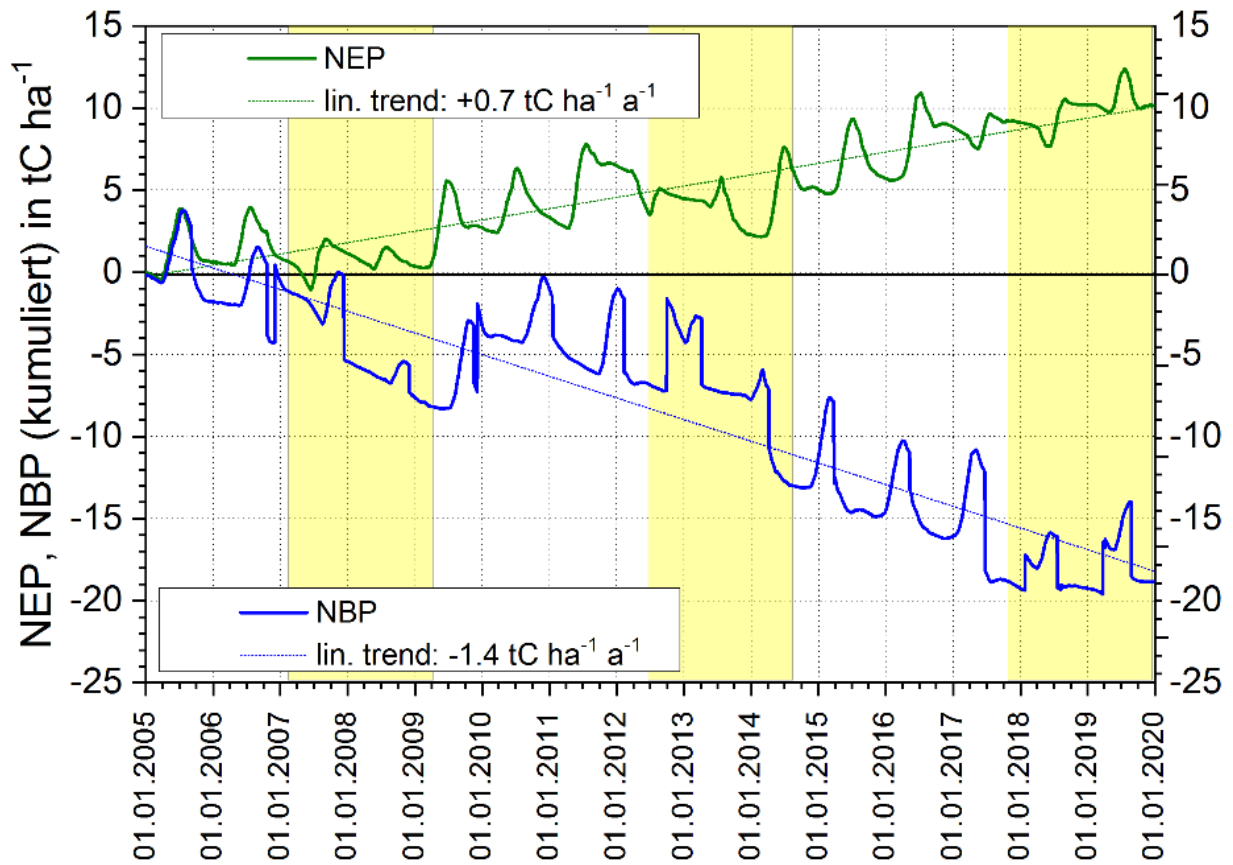
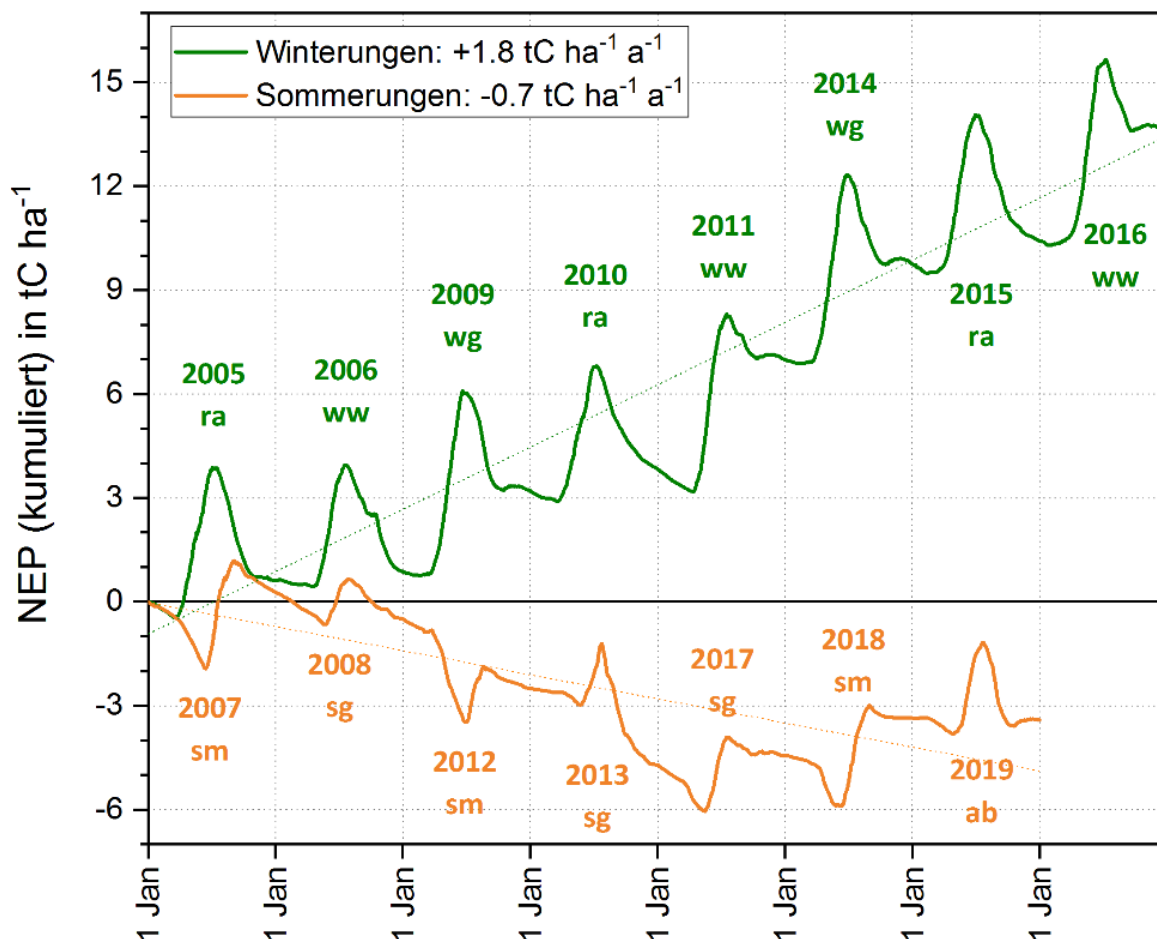


Abbildung 12: Kumulative Nettoökosystemproduktivität (NEP, positiv: CO₂-Senke) und Netto-biomproduktivität (NBP, negativ: CO₂-Quelle) sowie deren mittel fristige Trends am ICOS Ackerstandort Klingenberg im Zeitraum 2005 – 2019.(gelb markiert: Sommerungen)

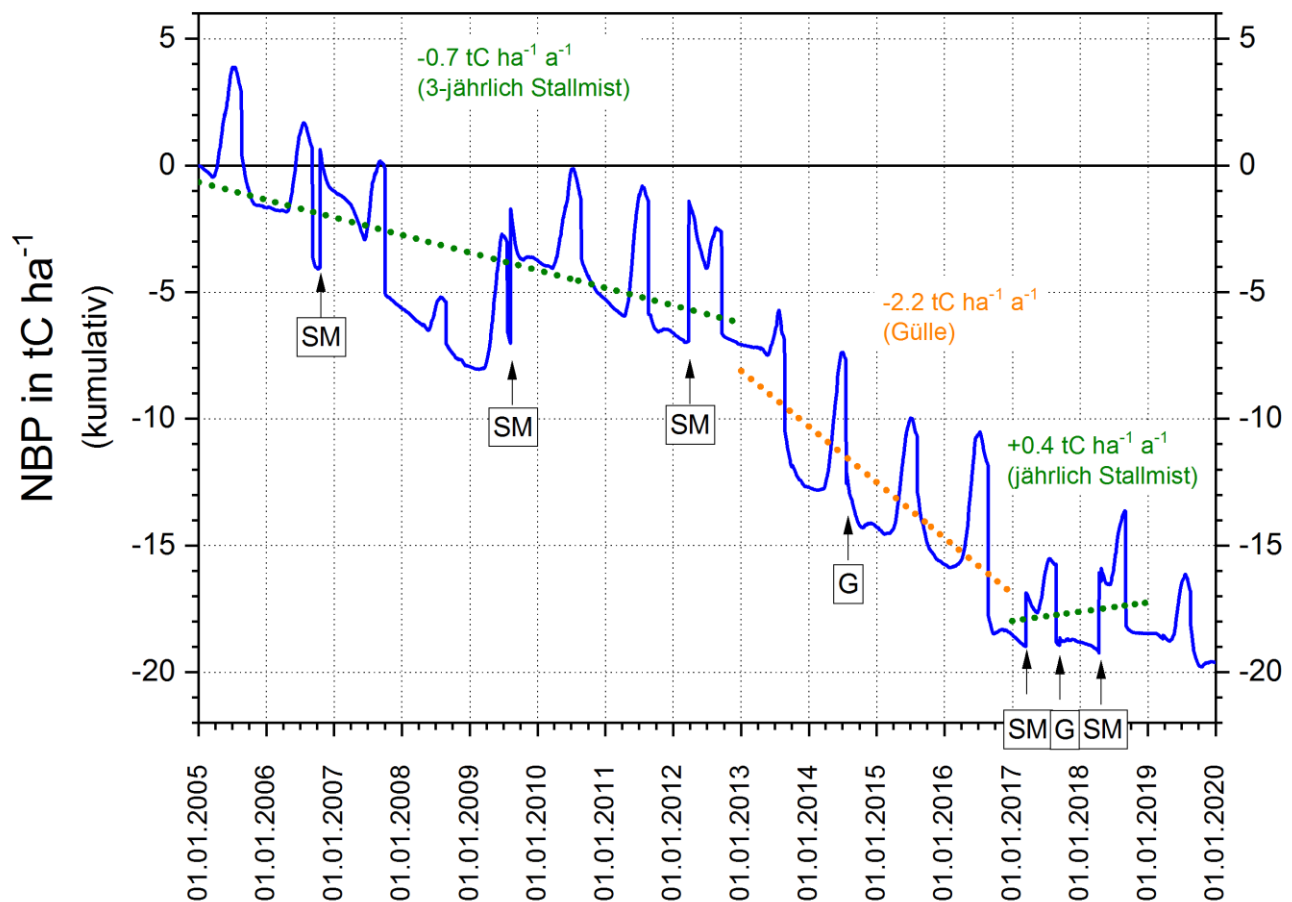


Legende: ra – Raps, ww – Winterweizen, wg – Wintergerste, sm – Silomais, sg – Sommergerste, ab – Ackerbohne

Abbildung 13: Kumulative Nettoökosystemproduktivität (NEP) von 8 Winterungen und 7 Sommerungen am ICOS Ackerstandort Klingenberg sowie deren mittelfristige Trends im Zeitraum 2005 – 2019.

Werden C-Importe (Stallmist, Gülle, Saatgut, Kalkung) und C-Exporte (Korn, Stroh, Heu) in der C-Bilanz berücksichtigt (Nettobiomproduktivität NBP), ist der Ackerstandort Klingenberg eine CO₂-Quelle von durchschnittlich 1,4 tC ha⁻¹ a⁻¹ (Abbildung 12). Der entsprechende Werte der CO₂-Quelle des Dauergrünlandes Grillenburg beträgt dagegen nur 0,1 tC ha⁻¹ a⁻¹.

Eine differenzierte Betrachtung des Einflusses der C-Importe auf das NBP des Ackerstandortes Klingenberg zeigt die erheblichen kurzfristigen Auswirkungen des Managements. Im Zeitraum 2013 – 2016 fand keine Stallmistdüngung statt mit der Folge, dass der Acker eine deutliche CO₂-Quelle von 2,2 tC ha⁻¹ a⁻¹ war. Dagegen konnte die Gabe von Stallmist in jedem dritten Jahr (2005 – 2012) die CO₂-Quelle auf 0,7 tC ha⁻¹ a⁻¹ reduzieren. Bei jährlicher Stallmistdüngung (2017 – 2018) war eine geringe CO₂-Senke von 0,4 tC ha⁻¹ a⁻¹ zu verzeichnen (Abbildung 14).



Legende: SM – Stallmist, G – Gülle

Abbildung 14: Kumulative Nettobiomproduktivität (NBP) am ICOS Ackerstandort Klingenberg im Zeitraum 2005 – 2019 sowie mittelfristige Trends in Abhängigkeit von organischer Düngung.

Ein weiterer Aspekt ackerbaulicher Landnutzung ist die Bodenbearbeitung. Am Standort Klingenberg wird generell eine konservierende Bodenbearbeitung mittels Scheibenegge durchgeführt. Eine wendende Bodenbearbeitung gab es an diesem Standort im Zeitraum 2004 – 2019 nur im März 2019 und im Oktober 2006 (kombiniert mit Stallmistdüngung) jeweils vor Sommerungen (Ackerbohne 2019, Mais 2007). Für die Beurteilung des Pflügens auf die C-Bilanz wurden jeweils der Monat des Pflügens und der Folgemonat mit den entsprechenden Zeiträumen anderer Jahre verglichen (ebenfalls vor Sommerungen). Tageswerte von Nettoökosystemproduktivität (NEP), Ökosystematmung (TER) und Lufttemperatur für den Frühjahrszeitraum März bis April der Jahre 2007, 2008, 2012, 2013 und 2019 zeigt Abbildung 15. Kohlenstoffbilanzen und mittlere Temperaturen enthält Tabelle 8. Für diesen Frühjahrszeitraum beträgt die mittlere Nettoökosystemproduktivität für Jahre ohne Pflügen (stattdessen Einsatz der Scheibenegge) und ohne Stallmistdüngung (2007, 2008, 2013) $-0,4 \text{ tC ha}^{-1}$ (CO_2 -Freisetzung), für 2019 (Pflügen) $-0,4 \text{ tC ha}^{-1}$ und für 2012 (Stallmist) $-1,0 \text{ tC ha}^{-1}$. Basierend auf diesem Datenmaterial unterscheiden sich wendende Bodenbearbeitung (Pflug) und konservierende Bodenbearbeitung (Egge) kurzfristig wenig hinsichtlich der C-Freisetzung. In stärkerem Maß wird CO_2 durch Stallmistdüngung freigesetzt (Veratmung organischen Materials). Dieser CO_2 -Abgabe steht jedoch ein deutlich größerer C-Import durch die organische Düngung gegenüber (positiver Einfluss auf das NBP).

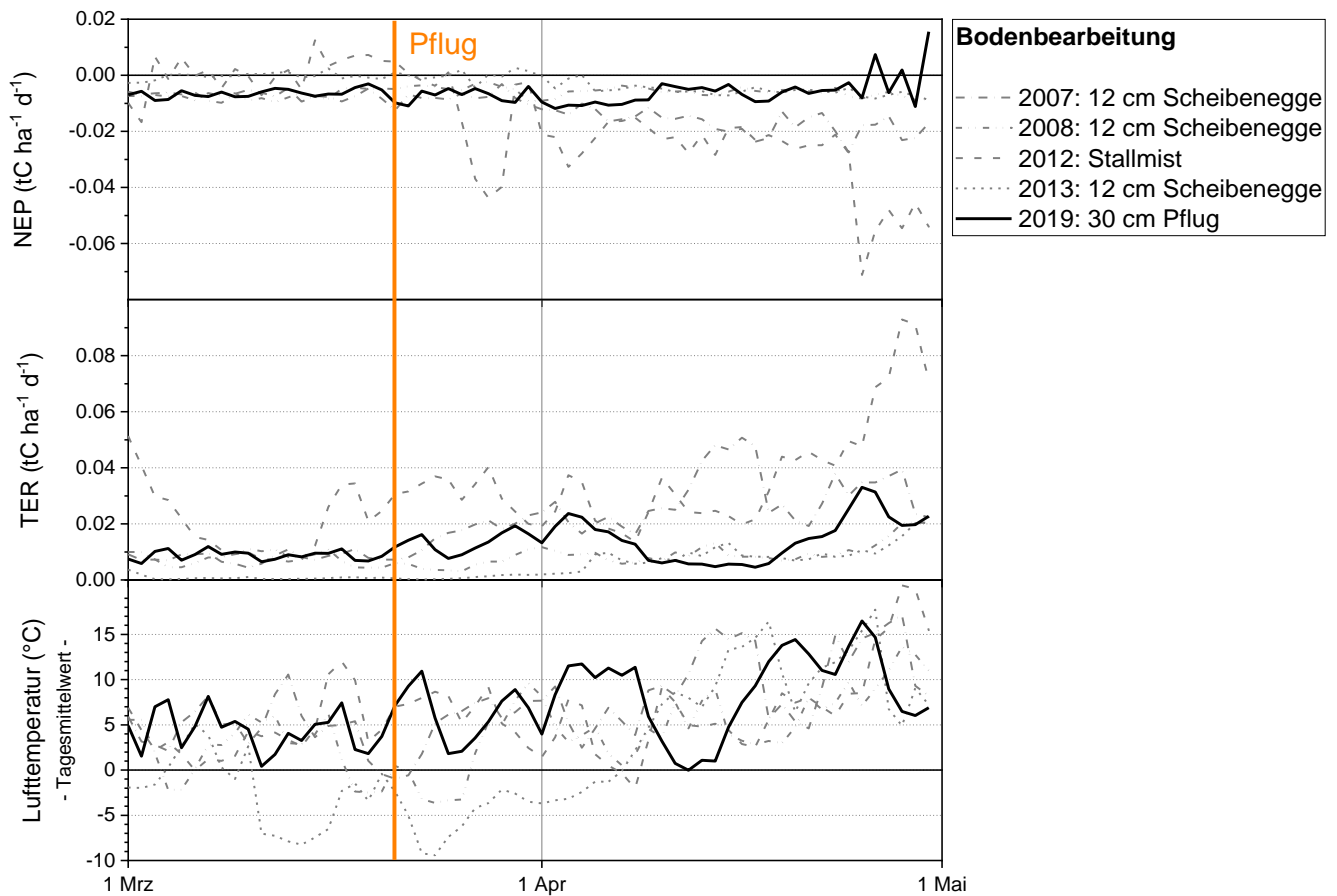


Abbildung 15: Tageswerte von Nettoökosystemproduktivität NEP, Ökosystematmung TER und Lufttemperatur für den Zeitraum März – April der Jahre 2007, 2008, 2012, 2013 und 2019 am ICOS Ackerstandort Klingenberg.

Tabelle 8: Nettoökosystemproduktivität NEP und Ökosystematmung TER sowie Lufttemperatur T_L für den Zeitraum März – April (vor Sommerungen) am ICOS Ackerstandort Klingenberg

Jahr	Bewirtschaftung	NEP ($tC\ ha^{-1}$)	TER ($tC\ ha^{-1}$)	T_L ($^{\circ}C$)
2007	Scheibenegge (12 cm)	-0.73	1.23	7.3
2008	Scheibenegge (12 cm)	-0.38	0.53	4.0
2012	Stallmist	-1.00	1.91	6.0
2013	Scheibenegge (12 cm)	-0.17	0.29	1.9
2019	Pflug (30 cm)	-0.40	0.90	6.8

Für den Herbstzeitraum ist eine separate Betrachtung des Einflusses des Pflügens wegen der zeitgleichen organischen Düngung nicht möglich. Auch hier zeigt sich die erhebliche kurzfristige Freisetzung eines Teils des im Stallmist gebundenen Kohlenstoffs (Abbildung 16; Tabelle 9).

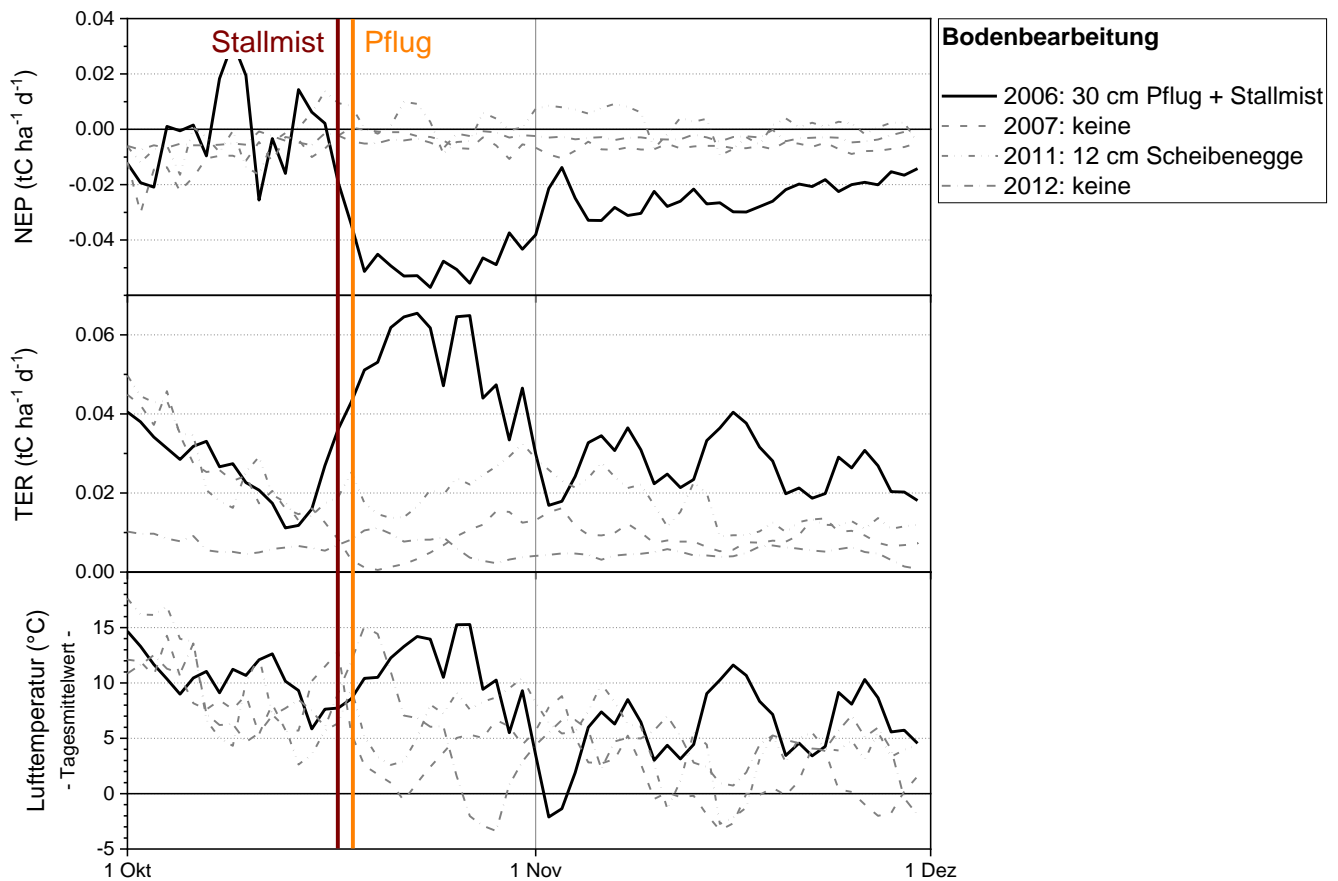


Abbildung 16: Nettoökosystemproduktivität NEP und Ökosystematmung TER sowie Lufttemperatur für den Zeitraum Oktober – November der Jahre 2006, 2007, 2011 und 2012 am ICOS Ackerstandort Klingenberg.

Tabelle 9: Tageswerte von Nettoökosystemproduktivität NEP, Ökosystematmung TER und Lufttemperatur T_L für den Zeitraum Oktober – November (vor Sommerungen im Folgejahr) am ICOS Ackerstandort Klingenberg

Jahr	Bewirtschaftung	NEP (tC ha ⁻¹)	TER (tC ha ⁻¹)	T_L (°C)
2006	Pflug (30 cm) + Stallmist	-1.43	2.01	8.4
2007	-	-0.45	0.81	4.1
2011	Scheibenegge (12 cm)	0.02	1.25	6.3
2012	-	-0.22	0.35	5.7

Von den mittels EC-Technik langfristig beobachteten Ökosystemen zeigt die ackerbauliche Landnutzung die am stärksten zeitlich variable C-Bilanz. Dort könnte z. B. eine Reduzierung des Anteils der Sommerungen in der Fruchtfolge von 40 % auf 20 % eine zusätzliche C-Bindung von 2,5 tC ha⁻¹ a⁻¹ auslösen. Organische Düngungen mit Stallmist in jedem dritten Jahr führen neben der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit zu einer zusätzlichen Festlegung von Kohlenstoff (1,5 tC ha⁻¹ a⁻¹) im Vergleich zu keiner organischen Düngung oder der Gabe von Gülle. Somit hat das landwirtschaftliche Management kurzfristiges Potential zur Verringerung oder Vermeidung der relativ hohen mittleren CO₂-Quelle von 1,4 tC ha⁻¹ a⁻¹ an diesem Standort.

4 Messkampagnen an ICOS-Standorten

4.1 Bestimmung der Kohlenstoffvorräte im Boden

4.1.1 Beprobungen im Gelände

Profilbeprobung mittels Stechzylindern

Die Standorte Klingenberg und Grillenburg wurden im Herbst 2018 und im Frühjahr 2019 beprobt. Die Beprobungsraster lehnen sich an die Beprobungen von 2007 – 2009 an und bilden den Einzugsbereich der EC Messungen ab. Am Standort Grillenburg wurden insgesamt 22 Profile beprobt, am Standort Klingenberg 15 Profile (siehe Abbildung 17). Der Abstand zwischen den Gruben beträgt am Standort Klingenberg 40 m, womit die repräsentierte Fläche 1,28 ha beträgt. Am Standort Grillenburg liegen die Abstände bei 20 m, die repräsentierte Fläche beträgt damit 0,6 ha.

Es wurden pro Horizont drei ungestörte Proben mittels Stechzylinder (100 cm³) und eine gestörte Probe entnommen. In manchen Horizonten der Ackerfläche (Klingenberg) war es aufgrund des Skelettgehalts nicht möglich, drei Stechzylinderproben zu entnehmen. In diesen Fällen wurden nur zwei oder eine Probe entnommen. Die Entnahmetiefen der einzelnen Stechzylinder im Horizont wurden dokumentiert.

Die ungestörten Proben wurden gemäß Vorschrift A2.8 des Handbuchs der Forstlichen Analytik (HFA) gewogen, bei 105 °C getrocknet, erneut gewogen und dann durch 2 mm gesiebt. Der Siebrückstand (Bodenskelett) wurde gewaschen, getrocknet und gewogen. Aus der Differenz des Gesamtgewichts und des Skelettgewichts wurde so die Masse des Feinbodens im Stechzylinder berechnet. Die gestörten Proben wurden bei 40 °C getrocknet und durch 2 mm gesiebt (GAFA, 2014).

Die Profilbeschreibungen (Fachinformationssystem-Boden – Aufnahmeintensität F, (Benning et al., 2019)) und die Probenahme 2019 fanden auf der Ackerfläche zwischen 18.03.2019 und 20.03.2019 statt. Die Profilansprachen am Standort Klingenberg wurden gemäß den Absprachen vom Projekttreffen am 15.03.2019 von einem externen Auftragnehmer durchgeführt. Die Profile der Grünlandfläche Grillenburg wurden vom 27.3 bis 2.4. 2019 angesprochen und vom 3.4. bis 4.4.2019 beprobt. 2018 fand die Beprobung in Grillenburg vom 7.11. bis 22.11. und in Klingenberg vom 27.11. bis 4.12 statt.

Bohrkernsondierung

Auf den Flächen Klingenberg (16.4. bis 18.4.2019) und Grillenburg (9.4. bis 11.4.2019) wurden, in unmittelbarer Nähe zu den Profilen, Bohrkern mittels Rammkernsondierung bis 60 cm Tiefe entnommen. Dies geschah in ca. 2 m Abstand (Klingenberg) bzw. 1 m Abstand (Grillenburg) im 45° Winkel zur Profilwand. In Klingenberg musste dies etwas zeitversetzt zur Profilbeprobung geschehen, da im direkten Anschluss an die Profilbeprobung die Fläche gepflügt wurde. Der Innendurchmesser des Bohrers betrug 8,5 cm und die Bohrung wurde mit dem Bohrhammer Typ *Atlas Copco Cobra TT Benzinhammer* durchgeführt. Für die spätere Korrektur von Stauchungs- und Streckungsprozessen wurden alle Lochtiefen und Bohrkernlängen gemessen. Die Bohrkern wurden vor Ort in Anlehnung an die Profilansprachen in Horizonte für die spätere Aufbereitung im Labor unterteilt und die Teilkern einzeln in Tüten verpackt. Die Zwischenlagerung fand im Kühlraum bei +7 °C statt.

Im Labor wurden die Bohrkernkerne zuerst gewogen und anschließend bereinigt, indem an Bohrkernen der Unterbodenhorizonte das verschleppte Oberbodenmaterial vorsichtig abgekratzt wurde. Das abgekratzte Material wurde aufgefangen und zusammen mit weiterem krümeligem Material der Probe getrennt vom Bohrkern behandelt. Dies beinhaltete das Trocknen bei 40 °C, Wiegen und Sieben (2 mm), sowie das Waschen, Trocknen und Wiegen des Siebrückstandes. Die bereinigten Bohrkernkerne wurden angefeuchtet und vorsichtig zerkleinert, dann bei 40 °C getrocknet und gewogen. An einem Aliquot (ca. 150 g) wurde der Wassergehalt nach HFA 2.1 (Trocknung bei 105 °C) bestimmt. Aliquot und restliche Probe wurden jeweils durch ein 2 mm Sieb gesiebt und der Siebrückstand gewaschen, getrocknet und gewogen. Für die Kohlenstoffanalyse wurde eine Probe des bei 40 °C getrockneten und gesiebten Feinbodens entnommen.

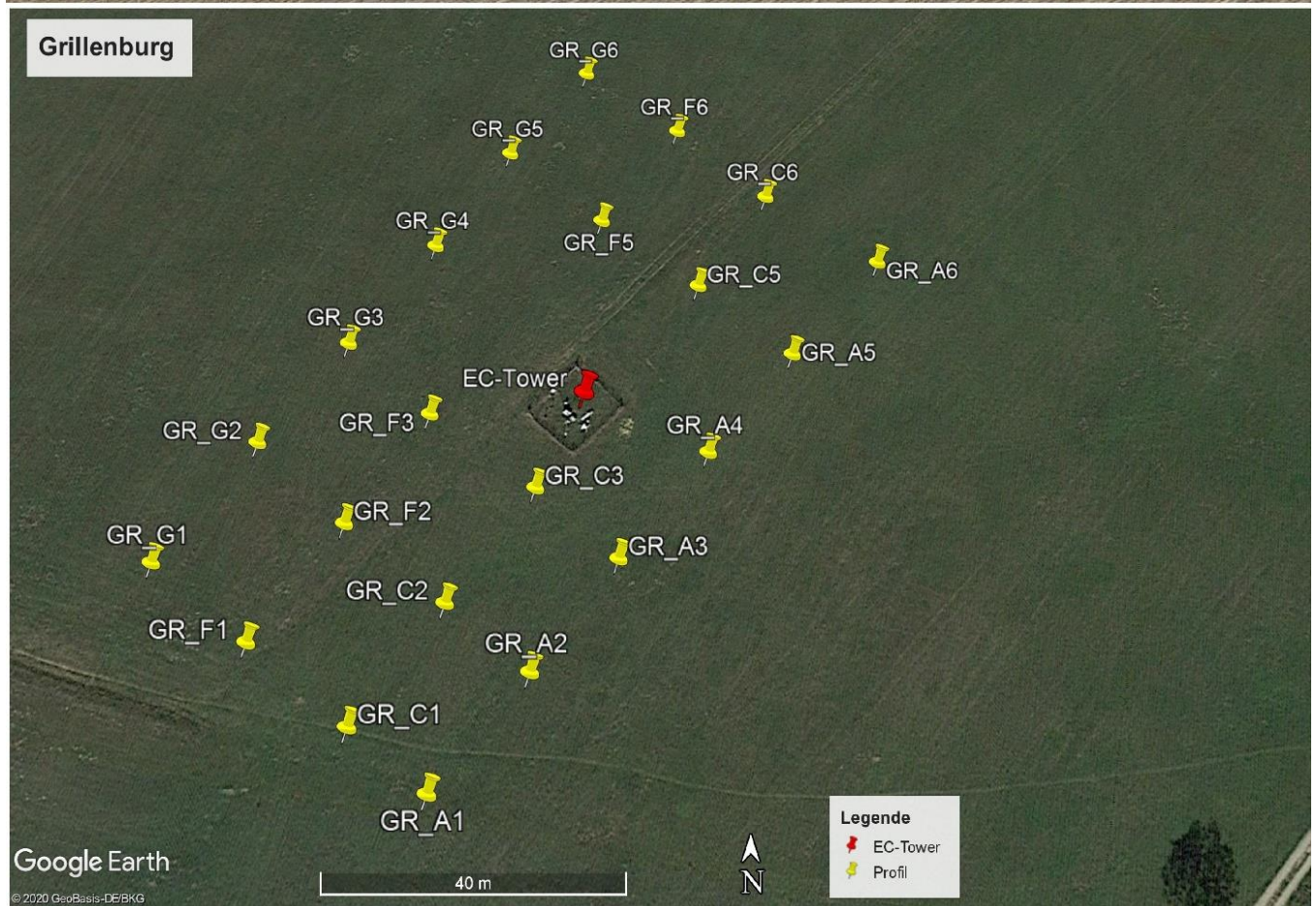
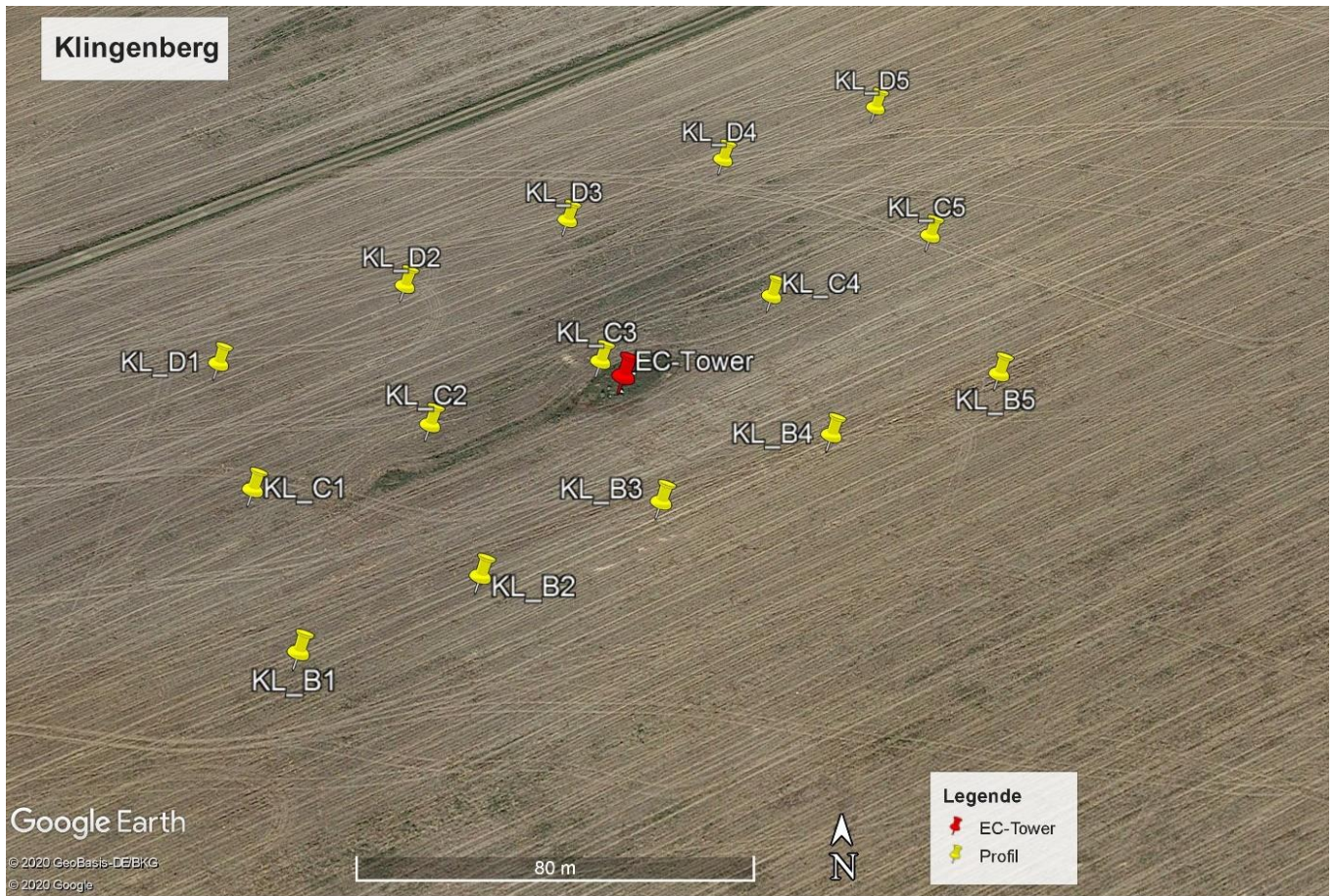
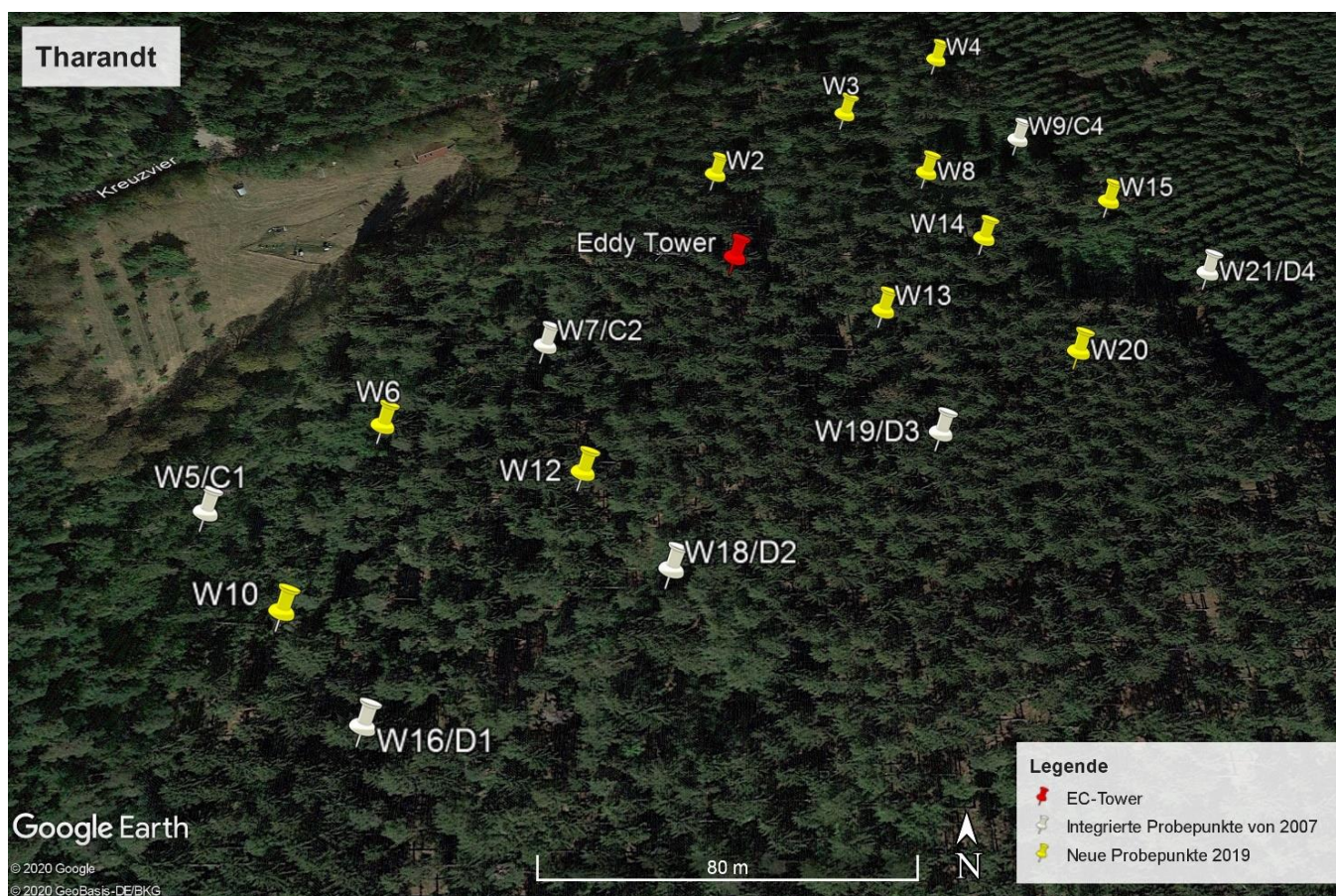


Abbildung 17: Beprobungsraster der ICOS Standorte Klingenberg (oben) und Grillenburg (unten).

Profilbeprobung in skelettreichen Böden

Auf der forstlich genutzten Fläche (Tharandt) wurde aufgrund des hohen Skelettanteils eine quantitative Erfassung der Bodenmengen auf einer Fläche von 0,49 m² durchgeführt (Hamburg et al., 2019), um eine repräsentative Schätzung des Skelettgehalts und damit auch der Lagerungsdichte des Feinbodens zu ermöglichen. Die Geländearbeiten wurden im Zeitraum vom 29.4. bis 24.6.2019 durchgeführt. Die Profilansprachen fanden danach vom 1.8. bis 8.8.2019 statt. Auf Grundlage des Beprobungsrasters von 2007 wurden 18 Profilpunkte definiert. Dabei wurde das 80 m x 80 m Raster von 2007 teilweise verdichtet, die Gesamtfläche aber verringert (2,88 ha), sodass sieben der Beprobungspunkte von 2007 in das aktuelle Beprobungsraster integriert werden konnten (Abbildung 18).



Legende: Die weißen Symbole mit doppelter Beschriftung (Bsp. W7/C2) zeigen die integrierten Punkt von 2007 an.
Gelbe Symbole zeigen die 2019 neu definierten Beprobungspunkte an.

Abbildung 18: Beprobungsraster des ICOS Standorts Tharandt.

An jedem Beprobungspunkt wurde für eine 70 cm x 70 cm (0,49 m²) große Fläche mit Hilfe eines in Waage gelegten Holzrahmens mit 49 Gitterpunkten die Geländeoberkante eingemessen und die Lage des Rahmens mit dünnen Stäben markiert. In der Mitte dieser Fläche wurde dann ein Stechrahmen (30 cm x 30 cm) für die Beprobung der organischen Auflagehorizonte genutzt (Abbildung 19a). Das gesamte Material der Stechrahmenfläche wurde für die weitere Bearbeitung im Labor in Tüten gepackt. Die Auflagehorizonte L und Of wurden dabei gemeinsam, Oh einzeln beprobt. Die Tiefe der Horizontgrenzen der organischen Auflage wurde mit Hilfe des Holzrahmens an 16 Punkten (10 cm Abstände) bestimmt (Abbildung 19b).

Nach der Beprobung des Oh-Horizonts wurde die gesamte 0,49 m² Fläche bis auf die Grenze zwischen Oh und Mineralboden abgegraben (Abbildung 19c). Die Horizontgrenze wurde dann an allen 49 Gitterpunkten eingemessen bevor mit dem Abtragen des obersten Mineralbodenhorizontes begonnen wurde. Darauf-

folgende Horizontgrenzen wurden anhand von Farbänderungen oder Substratänderungen ausgewiesen und jeweils mithilfe des Rahmens eingemessen. Die Mineralbodenhorizonte wurden durch vorsichtiges Schaben und Kratzen mithilfe von Handschaufeln abgetragen. Der Aushub wurde pro Horizont komplett gewogen und auf einer Plane gesammelt. Dieses Verfahren wurde bis zu einer Tiefe von 60 cm unter Geländeoberkante durchgeführt.



Abbildung 19: Methode der Profilbeprobung in skelettreichen Böden (ICOS Standort Tharandt).
(a) Einmessen der Geländeoberkante und der Horizontgrenzen mit Hilfe des Messrahmens
(b, c) Aufteilen des gewogenen Aushubs eines Horizontes in Aliquote
(d) Sieben zweier Aliquote pro Horizont
(e) Beprobung der organischen Auflage mittels Stechrahmens;
Fotos: C. Schmidt-Cotta

Für die weitere Behandlung wurde der Aushub in vier bis sechs Aliquote geteilt (siehe Abbildung 19d), von denen zwei vollständig gesiebt wurden (Abbildung 19e). Der Siebrückstand wurde gewogen, wobei Skelett und Grobwurzeln (> 2 mm Durchmesser) einzeln erfasst wurden. Das Feinbodenmaterial aus den beiden Aliquoten wurde durchmischt und anschließend beprobt. Feuchtes Bodenmaterial konnte nicht direkt im Gelände gesiebt werden. In diesen Fällen wurden die Aliquote in Eimern gewogen, beschriftet und im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet, anschließend gesiebt und der Siebrückstand gewaschen, getrocknet und gewogen (Skelett und Grobwurzeln getrennt). Die Feinbodenproben wurden ebenfalls bei 40 °C getrocknet und anschließend für die Kohlenstoffbestimmung beprobt. Insgesamt wurden so ca. 7,9 t Boden bewegt. Nach Abschluss der Beprobung wurde in den entstandenen Bodengruben jeweils eine Profilwand gemäß Fachinformationssystem Boden (Aufnahmeintensität F) angesprochen (Benning et al., 2019).

Während der Wiederholungsbeprobung im Frühjahr 2020 (16.3. – 18.3.2020) wurde an den offenen Gruben für jeden Mineralbodenhorizont eine gestörte Probe für die Elementaranalyse und pH-Messung entnommen. Die bodenphysikalischen Daten wurden aus der detaillierten Beprobung 2019 übernommen. Die organische Auflage wurde mittels Stechrahmen in unmittelbarer Nähe zur Profilwand entnommen. Dies geschah in ca. 1-2 m Abstand im 45° Winkel zur Profilwand.

4.1.2 Laboranalytik

An allen Feinbodenproben und gemahlene Proben der organischen Auflage wurden an einer Suspension aus 10 g Boden in 25 ml 0,01 M CaCl₂-Lösung pH-Messungen mittels eines pH-Meters MP220/225 (Messgenauigkeit +/- 0,01 pH, mit Temperaturkompensation) durchgeführt. Für die organische Auflage wurden 2,5 g Auflagematerial in 50 ml Kalziumchloridlösung suspendiert.

Zur Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes des Feinbodens wurden die Proben in einer Scheibenschwingmühle gemahlen und mittels Elementaranalyse (Elementar - Vario EL Cube) gemessen. Für die Beprobung 2018 wurde in dreifacher Wiederholung gemessen. Die Variation dieser Wiederholungsmessungen lag bei 1 %, sodass danach die C-Bestimmungen in international üblicher Doppelbestimmung durchgeführt wurden.

Mittels Tauchwägung nach HFA (2014, Anlage A1) wurde die Dichte der Skelettproben der drei Standorte bestimmt. Für die Standorte Klingenberg und Grillenburg wurde jeweils ein Mittelwert gebildet. Da am Standort Tharandt zwei unterschiedliche Gesteine vorliegen (Sandstein und Rhyolith), wurde pro Gestein ein Dichte-Mittelwert berechnet und jedem Profil das vorliegende Gestein zugeordnet.

4.1.3 Berechnungen

Einbezug der Daten von 2007-2009

In den Jahren 2007 (Tharandt) und 2009 (Grillenburg und Klingenberg) wurden vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena an den drei Standorten Bodenbeprobungen und Vorratsberechnungen durchgeführt. Diese Daten standen zur Verfügung und wurden soweit möglich in die Auswertung integriert. Hierbei wurden auf Grundlage der Laboranalysen von 2009 (Probenvolumen, Skelettgewicht, Feinbodengewicht, Kohlenstoffgehalt) die Berechnungen der Lagerungsdichte des Feinbodens und die Vorratsberechnung neu durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit den neu erhobenen Daten und den Berechnungen gemäß BZE-2-Vorgabe sicher zu stellen. Für den Standort Tharandt sind die Daten aus der Beprobung 2007 sehr unvollständig und umfassten hauptsächlich die Humusaufgabe einzelner Beprobungspunkte.

Berechnung von Lagerungsdichte des Feinbodens, Feinbodenvorrat und Kohlenstoffvorrat

Die Lagerungsdichte des Feinbodens und der Feinbodenvorrat wurden für alle Proben horizontweise gemäß HFA A2.8 unter Berücksichtigung des Grobbodens berechnet:

$$TRD_{FB} = \frac{M_{FB}}{V_{ges} - \frac{M_{GB}}{D_{GB}}} \quad (3)$$

$$FBV = TRD_{FB} * d * 100 * \left(1 - \frac{V_{GB}}{V_{ges}}\right) \quad (4)$$

mit TRD_{FB} – Lagerungsdichte des Feinbodens (g cm^{-3})

M_{FB} – Masse des Feinbodens der ungestörten Probe (g)

V_{ges} – Gesamtvolumen der ungestörten Probe (cm^3)

M_{GB} – Masse des Grobbodens in der ungestörten Probe (g)

D_{GB} – Dichte des Grobbodens (g cm^{-3})

FBV – Feinbodenvorrat (t ha^{-1})

d – Mächtigkeit des Horizonts (cm)

V_{GB} – Volumen des Grobbodens in der ungestörten Probe (cm^3).

Für die quantitative Beprobung der skelettreichen Böden (Standort Tharandt) mussten einige Berechnungsschritte vorangestellt werden, um die Lagerungsdichte des Feinbodens, sowie den Feinboden- und Kohlenstoffvorrat berechnen zu können. Für die Horizontmächtigkeit wurden die Mächtigkeitswerte aus den Gittermessungen ($n = 49$) gemittelt. Die Masse des Feinbodens (M_{FB}) und des Grobbodens (M_{GB}) eines Horizonts wurde mittels Multiplikation des Fein- bzw. Grobbodenanteils der Aliquote mit der Masse des Gesamtaushubs berechnet. Des Weiteren wurden die Grobwurzeln für die Berechnungen mitberücksichtigt und analog zu Fein- und Grobbodenmasse bestimmt. Die Dichte der Grobwurzeln wurde mit $0,23 \text{ g cm}^{-3}$ gemäß Gebauer und Martinkova (2005) angenommen. Das Volumen des Horizonts (V_{ges}) wurde mittels der Mächtigkeitswerte aus den Gittermessungen bestimmt. Hierfür wurden die 49 Messpunkte auf 4900 Punkte verdichtet und mittels einer bilinearen Interpolation jedem Messpunkt ein interpolierter Mächtigkeitswert zugeordnet. Das Volumen ergab sich dann durch die Addition der Mächtigkeitswerte. Details zur Volumenberechnung sind in Anlage A1 nachzulesen.

Prinzip äquivalenter Bodenmassen

Gemäß dem Protokollbeschluss vom 15.3.2019 wurde pro Standort und Profil das Prinzip äquivalenter Bodenmassen (Equivalent Soil Masses – ESM) horizontweise angewendet, um die C-Vorräte der verschiedenen Beprobungen miteinander vergleichen zu können.

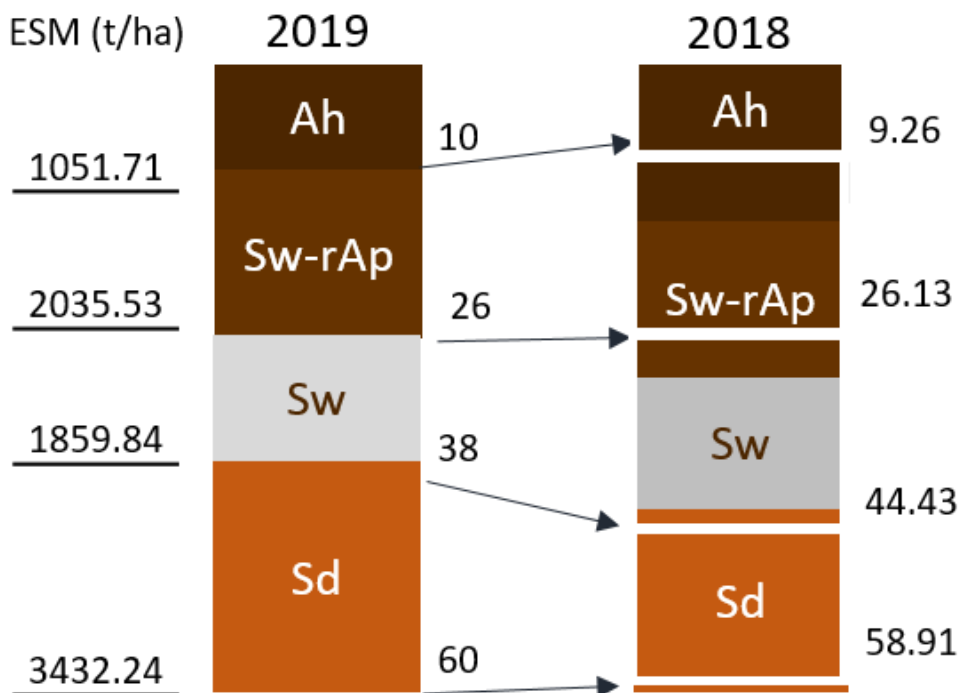


Abbildung 20: Schema zur Berechnung äquivalenter Bodenmassen mit 2019er Bodenmassen (ESM) als Bezugsgröße. Farbunterschiede geben Horizontgrenzen der jwlg. Aufnahme an, Pfeile zeigen die berechneten Tiefengrenzen (rechts) der äquivalenten Bodenmassen an.

Dabei wurde in Anlehnung an Ellert und Bettany (1995) vorgegangen und die Feinbodenmassen der Beprobung 2019 als Standard gesetzt. In Abbildung 20 wird das Vorgehen schematisch verdeutlicht. Um die erhobenen Feinbodenmassen eines Vergleichsjahres auf die Standardmassen umzurechnen, wurde nach Ellert und Bettany (1995) eine „zusätzliche Horizontmächtigkeit“ mit den bodenphysikalischen Parametern des darunterliegenden Horizontes berechnet. Diese Formel wurde um die Berücksichtigung des Skelettgehalts ergänzt (Formel 5). Der Kohlenstoffvorrat wurde dann gemäß Formel 6 unter Einbezug der Kohlenstoffgehalte aller beteiligten Horizonte berechnet. Für die Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens, Skelettgehalt und Kohlenstoffgehalt wurden pro Horizont gewichtete Mittel für die Vergleichsbeprobungen berechnet. Dabei wurde die Gewichtung anhand der anteiligen Feinbodenmassen der einfließenden Horizonte durchgeführt.

$$T_{add}(H1) = \frac{ESM(H1) - SM(H1)}{TRD_{FB}(H2) * 100 * (1 - Vol\%_{GB}(H2))} \quad (5)$$

$$C - \text{Vorrat}(H1) = SM(H1) * C(H1) + (ESM(H1) - SM(H1)) * C(H2) \quad (6)$$

mit $T_{add}(H1)$ – Zusätzliche Bodentiefe für das Erreichen von äquivalenten Bodenmassen

ESM – definierter Standard-Feinbodenvorrat in $t \text{ ha}^{-1}$ (2019_Grube)

SM – Bodenmasse der Vergleichsbeprobung in $t \text{ ha}^{-1}$

H1 – Erster Horizont

H2 – Zweiter Horizont

TRD_{FB} – Lagerungsdichte des Feinbodens in $g \text{ cm}^{-3}$

$Vol\%_{GB}$ – Skelettgehalt in Volumen-%

C – Kohlenstoffgehalt ($g \text{ g}^{-1}$).

Definition von Horizontgruppen

Für die horizontweise Betrachtung von Kohlenstoffvorräten und deren Berechnungsgrößen wurden Horizontgruppen definiert, um pro Standort unterschiedliche Horizonte, die in ähnlichen Tiefenstufen gefunden wurden, zusammenfassen zu können. Die Horizontgruppen wurden anhand von Horizontsymbol und unterer Horizontgrenze definiert. Dabei steht am Standort Klingenberg „Ap“ für alle Pflughorizonte, „rAp“ für relik-tische Pflughorizonte, „UB1“ für Unterbodenhorizonte bis 45 cm Tiefe und „UB2“ für Unterbodenhorizonte bis 60 cm Tiefe. Für den Standort Grillenburg beschreibt die Horizontgruppe „Ah“ alle Ah-Horizonte. „Sw-rAp“ fasst die Horizontsymbole Sw-rAp, rAp, und rAp-Sw zusammen. Die Gruppe „Sw“ steht für Sw-Horizonte oder Übergangshorizonte (Swd und Sdw) bis 50 cm Horizontuntergrenze. Die Gruppe „Sd“ umfasst alle Sd-Horizonte, sowie Übergangshorizonte mit der unteren Horizontgrenze größer 50 cm. Am Standort Tharandt beschränkt sich die Einteilung der Horizontgruppen auf die Horizontsymbole und deren Zugehörigkeit zu organischer Auflage („Humus“), Oberboden oder Unterboden.

Statistische Analysen

Alle Berechnungen und Analysen erfolgten mit der Software R, Version 4.0.2 (R Core Team, 2020). Deskriptive Statistik und Visualisierung der C-Vorräte wurde für alle Beprobungen und Standorte durchgeführt. Um den Einfluss der Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte des Feinbodens, Skelettgehalt, Mächtigkeit des Horizonts und pH-Wert auf die Variabilität des C-Vorrats innerhalb einer Beprobung abzuschätzen, wurden multiple lineare Regressionsanalysen pro Standort und Horizontgruppe für die Beprobung 2019_Grube berechnet. Für die Zielgröße C-Vorrat wurde der natürliche Logarithmus berechnet. Die erklärenden Variablen wurden zentriert, wobei von jeder Beobachtung der jeweilige Mittelwert der Variablen subtrahiert wurde. Die Modellauswahl lief über schrittweise Vereinfachung und Überprüfen der Modellvoraussetzungen (Normalverteilung und Varianzhomogenität der Residuen).

Unterschiede in den C-Vorräten zwischen den Beprobungen wurden pro Standort mittels paarweiser t-Tests für verbundene Stichproben auf statistische Signifikanz untersucht. Dabei wurde das Signifikanzniveau bei 0,05 (und 0,1) definiert und die p-Werte nach der Bonferroni-Methode korrigiert. Unterschiede zwischen C-Vorräten einzelner Horizontgruppen wurden für normalverteilte Daten mittels einfachem t-Test für verbun-

dene Stichproben durchgeführt. Bei nicht normalverteilten Daten wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben gewählt. Für den Standort Grillenburg wurden statistisch signifikante Unterschiede im C-Vorrat zwischen einzelnen Beprobungen mit Hilfe multipler linearer Regressionsanalyse auf den Einfluss der Unterschiede der Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettgehalt untersucht. Dabei wurde für die Zielgröße die Differenz der natürlichen Logarithmen des C-Vorräte definiert. Modellauswahl und Überprüfung lief wie weiter oben im Absatz beschrieben.

4.2 Ergebnisse und Diskussion der Bodeninventuren

4.2.1 Standort Klingenberg (Acker)

Profilansprachen

Am Standort Klingenberg wurde an allen Profilen Pseudovergleyung als dominanter pedogenetischer Prozess ausgewiesen. Hydromorphiemerkmale sind unterhalb des rezenten Ap-Horizontes (\emptyset -Tiefe 17,4 cm) bis in 60 cm Tiefe vorhanden. Die räumliche Variabilität der Profile am Standort Klingenberg ist groß. Ungefähr in der Mitte der beprobten Fläche, in einer schwach ausgeprägten Mulde am Hang, liegt in ca. 25 – 30 cm Tiefe eine Tonschicht vor, die in den Profilen C4, C3 und D3 gefunden wurde. Am Profil B4 wurden, neben Pseudovergleyung, Merkmale einer Lessivierung gefunden und die Horizontfolge Ap/Al-Sw/IIBt-Sd/IIISd ausgewiesen. An neun Horizonten wurde in 50 – 60 cm Tiefe der Einfluss von Grundwasserschwankungen festgestellt und untergeordnet in die Horizontbezeichnung übernommen (z. B. Go-Sd). Neben der bereits erwähnten Ausprägung des rezenten Pflughorizontes konnten weitere anthropogen verursachte (Über-) Prägungen festgestellt werden: Das Profil B5 war unterhalb des Ap-Horizontes bis in ca. 40 cm Tiefe durchgehend gestört und es wurde ein Kolluvialhorizont (jM) ausgewiesen. Beim Profil B1 lagen Teile eines zugeschütteten Drainagegrabens in der Profilwand. Hier bezieht sich die Profilbeschreibung auf den ungestörten Teil der Profilwand. An acht Profilen wurde bis in ca. 25 cm Tiefe ein reliktscher Ap-Horizont angesprochen. Die Digitale Bodenkarte Sachsens (1:50.000) gibt für den Standort die Leitbodenform „Pseudogley-Braunerde aus periglaziärem Schutt führendem Lehm über periglaziärem Schuttlehm (Gneis; Rhyolith)“ an. In Anbetracht der hohen räumlichen Variabilität des Standortes und der räumlichen Auflösung der Leitbodenformen der Bodenkarte stellen die Profilansprachen, mit der Pseudovergleyung als dominantem Prozess, keinen Widerspruch zur Karte dar. Profil- und Bohrkernfotos der Beprobung 2019 befinden sich in Anlage A1.

Kohlenstoffvorräte und deren räumliche Variabilität

Die mittleren Kohlenstoffvorräte in äquivalenten Bodenmassen der verschiedenen Beprobungen am Standort Klingenberg (siehe Tabelle 10) liegen zwischen $92,5 \text{ t ha}^{-1}$ (2009_Bohrkern) und $108,8 \text{ t ha}^{-1}$ (2019_Bohrkern). Im Vergleich mit den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung in der Landwirtschaft (BZE-LW; Jacobs et al., 2018) liegt der Standort in der Größenordnung des gesamtdeutschen Mittelwerts für Ackerböden von 101 t ha^{-1} (in 0 – 100 cm Bodentiefe). Dieser Wert beinhaltet auch Moor- und moorähnliche Ackerböden. Die Bodenklassen Stauwasserböden und terrestrische anthropogene Böden der BZE-Auswertung könnten ebenfalls Vergleichswerte liefern. Hier liegen die Mittelwerte bei ca. 75 t ha^{-1} C-Vorrat für Stauwasserböden und bei ca. 125 t ha^{-1} für terrestrisch anthropogene Böden. Für die BZE-Punkte in der Gegend des Standorts Klingenberg sind die C-Vorräte in 0 – 100 cm Bodentiefe lediglich mit $50 – 70 \text{ t ha}^{-1}$ angegeben, in Richtung Erzgebirge mit $70 – 90 \text{ t ha}^{-1}$ (Jacobs et al., 2018). Die C-Vorräte in 0 – 60 cm Bodentiefe liegen am Standort Klingenberg also bereits an der Obergrenze der BZE-Ergebnisse, die sich auf 0 – 100 cm Bodentiefe beziehen. In Abbildung 21a sind Boxplots der C-Vorräte nach Beprobungsjahr und -methode und in Abbildung 21b nach Horizontgruppe und Beprobung abgebildet. Tabelle 10 umfasst die

deskriptive Zusammenfassung der vier Beprobungen. Die vertikale Verteilung (Abbildung 21b) der C-Vorräte an den Profilen zeigt, dass mit 57 t ha⁻¹ (2009_Bohrkern) bis 69,5 t ha⁻¹ (2019_Grube) der meiste organische Kohlenstoff im Pflughorizont (Ap) gespeichert wird. Auch der an acht Profilen angesprochene rAp-Horizont trägt mit mittleren C-Vorräten zwischen 22,5 t ha⁻¹ (2009_Bohrkern) und 33,3 t ha⁻¹ (2018_Grube) wesentlich zum Gesamtvorrat bei. Die Unterbodenhorizonte speichern zwischen 18,1 t ha⁻¹ (UB1, 2019_Bohrkern) und 9,0 t ha⁻¹ (UB2, 2019_Grube).

Die Kohlenstoffvorräte aller Beprobungen weisen mit Variationskoeffizienten zwischen 31,1 % (2018_Grube) und 33,5 % (2019_Grube) eine hohe räumliche Variabilität auf. Im Vergleich dazu publizierten Schrumpf et al. (2011) für drei europäische Ackerböden auf Standortsebene deutlich niedrigere Variationskoeffizienten zwischen 11 und 19 % in 0 – 60 cm Bodentiefe.

		2009_Bohrkern	2018_Grube	2019_Bohrkern	2019_Grube
n		15	15	15	15
min	t/ha	54.14	59.12	61.88	51.15
qu_1		67.34	72.84	76.87	78.83
median		85.30	104.92	109.14	94.86
mean		92.47	101.94	108.83	103.94
qu_3		110.56	121.51	143.52	135.53
max		150.80	160.06	158.18	149.20
se		7.88	8.17	8.81	8.66
sd		30.54	31.66	34.12	33.53
cv	%	33.03	31.05	31.35	32.26

Tabelle 10: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Klingenberg pro Beprobung mit Stichprobenumfang (n), Mittelwert (mean), Median, Minimum (min), Maximum (max), Standardabweichung (sd), Variationskoeffizient (cv), Standardfehler des Mittelwerts (se) und 1. und 3. Quartil (qu_1, qu_3).

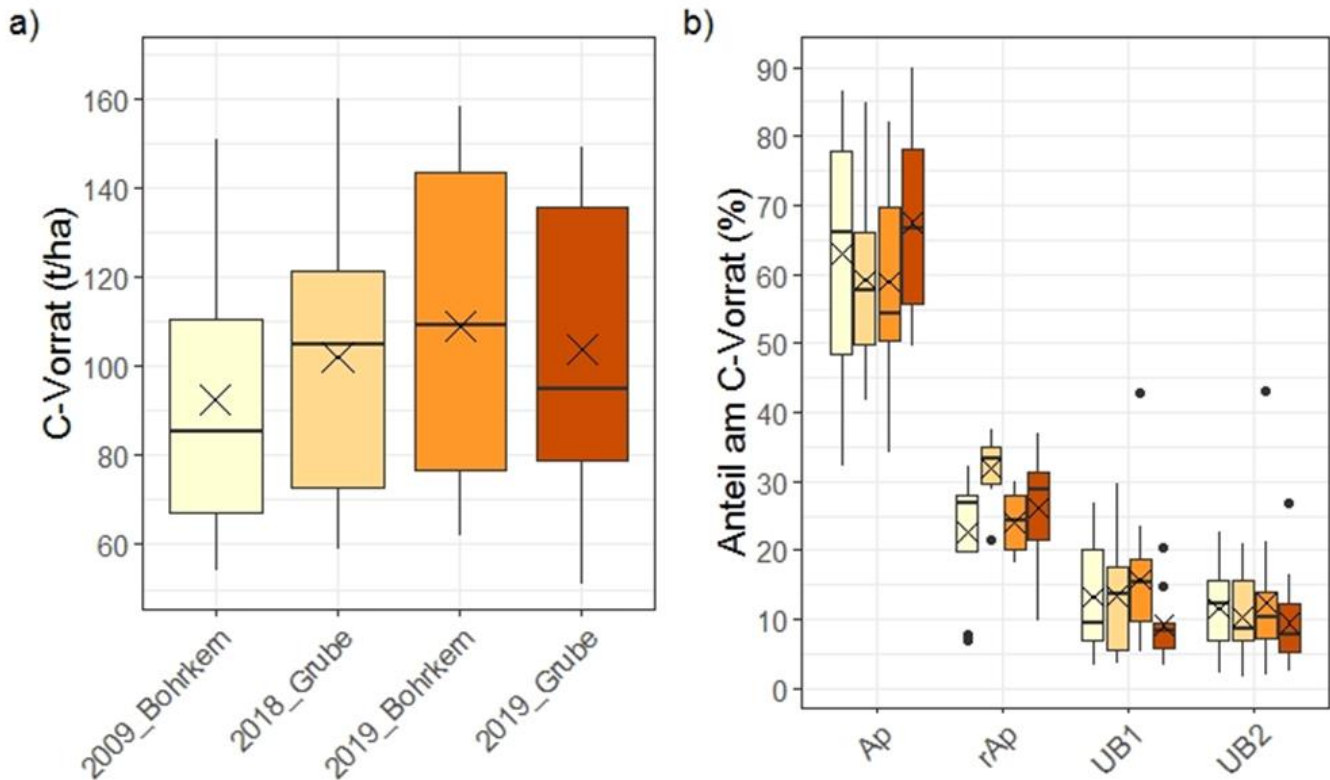


Abbildung 21: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Klingenberg aufgeschlüsselt nach Beprobung (a) und nach Horizontgruppe und Beprobung (b).

Die Boxplots zeigen Median, 1. und 3. Quartil und Whisker für die Minimal- und Maximalwerte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes an. In b) sind unter „UB1“ und „UB2“ Unterbodenhorizonte mit unterer Horizontgrenze < 45 cm (UB1), bzw. > 45 cm (UB2) zusammengefasst.

In Tabelle 11 sind Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient der Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettgehalt pro Beprobung, Variable und Horizontgruppe aufgelistet, und in Abbildung 22 sind die Variationskoeffizienten dazu abgebildet. Die Lagerungsdichte weist für alle Beprobungen und Horizontgruppen die geringste Variation (6,5 bis 23 %) auf, während die Variabilität für den Skelettgehalt am höchsten ist. Die Variationskoeffizienten von C-Gehalt und Skelettgehalt reichen von 34,4 bis 89,7 % (C-Gehalt) und von 30,8 bis 109,8 % (Skelettgehalt). Die Variabilität dieser beiden Variablen unterscheidet sich deutlich zwischen den Horizontgruppen und Beprobungen, ohne einem eindeutigen Trend zu folgen. Die Variationskoeffizienten der Zielgröße C-Vorrat sind in den Unterbodenhorizonten größer als für die Horizontgruppen Ap und rAp und unterscheiden sich vor allem im rAp und UB2 stark zwischen den Beprobungen. Diese Horizonte weisen geringe Kohlenstoffvorräte auf (Vergleich Abbildung 22), weswegen die Variabilität im Unterboden nur gering zur Erklärung der Gesamt-Kohlenstoffvorräte beiträgt. Schrumpf et al. (2011) fanden ähnliche Variationskoeffizienten für Lagerungsdichten und C-Gehalte für drei europäische Ackerböden. Die Variabilität des Skelettgehalts ist, bei ähnlichen Skelettgehalten, für diese Standorte jedoch deutlich geringer im Vergleich zum Standort Klingenberg.

Für die Profilbeprobung (2019_Grube) wurden multiple lineare Regressionsanalysen horizontgruppenweise durchgeführt, um den Einfluss der Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte des Feinbodens (LD), Skelettgehalt (Skelett), Mächtigkeit des jeweiligen Horizonts (Mächtigkeit) und pH-Wert auf die Variabilität im C-Vorrat zu analysieren (Vergleich Kapitel 4.1). In Tabelle 12 sind die Modellparameter aufgelistet, Informationen zur

Modellgüte sind in Anlage A1 zu finden. Die Variablen C-Gehalt und Mächtigkeit tragen für alle Horizontgruppen bedeutend zur Erklärung der Variabilität des C-Vorrats bei, wobei mit dem C-Gehalt im Oberboden (Ap, Ar+rAp) und UB1 ≥ 60 % der Varianz erklärt werden kann. Die Lagerungsdichte des Feinbodens ist in den Modellen aller Horizontgruppen vertreten, erklärt aber nur in UB2 (48 %) und Ap (13 %) einen bedeutenden Teil der Varianz. Der Skelettgehalt ist für die Horizontgruppen Ap und UB1 im Modell enthalten, trägt aber nur gering zur Erklärung der Varianz bei (1,5 bis 2,2 %). Der pH-Wert zeigt für keine der Horizontgruppen einen signifikanten Einfluss auf den C-Vorrat.

Schrumpf et al. (2011) fanden ebenfalls einen dominanten Einfluss des C-Gehalts auf die Varianz der C-Vorräte, der einem zunehmenden Trend mit der Tiefe folgte. Dabei konnten in skelettarmen Ackerböden zwischen 30 und 60 cm Tiefe bis zu 94 % der Varianz des C-Vorrats durch den C-Gehalt erklärt werden. In dieser Studie wurde nach festen Tiefenstufen beprobt, weswegen die Mächtigkeit des Horizonts nicht in die Modellbildung einfluss. In skelettreicheren Ackerböden spielten die bodenphysikalischen Variablen, Skelettgehalt und Lagerungsdichte des Feinbodens eine wichtigere Rolle und erklärten ca. zwischen 20 und 50 % der Varianz. Dies könnte einen Erklärungsansatz für den Unterboden (UB2) am Standort Klingenberg liefern, da hier der mittlere Skelettgehalt (12,5 %) deutlich höher ist im Vergleich zu den anderen Horizontgruppen (siehe Tabelle 11, Beprobung 2019_Grube). Der signifikante Einfluss der Lagerungsdichte im Ap-Horizont passt zu Ergebnissen aus belgischen Ackerböden (Ap-Horizonte), wo auf Standortsebene im Mittel sogar 35 % der Varianz im C-Vorrat durch die Lagerungsdichte des Feinbodens erklärt wurden, während auf kleinerer Skala der C-Gehalt die dominante erklärende Variable blieb (Goidts et al., 2009).

Zeitlicher Vergleich der Beprobungen

Zwischen den Beprobungen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede (paarweiser t-Test für verbundene Stichproben, Bonferroni-Korrektur, alle p-Werte $> 0,3$) gefunden. Ein leicht zunehmender Trend der Mittelwerte zwischen der Beprobung 2009 (92,5 t ha⁻¹) und den drei Beprobungen 2018/19 (101,9; 103,0 und 108,8 t ha⁻¹, Abbildung 22, Tabelle 11) steht der sehr großen räumlichen Variabilität (Standardabweichungen in der Größenordnung 30 t ha⁻¹ für alle Beprobungen) gegenüber. Es lässt sich somit anhand der Bodeninventuren keine Aussage über eine zeitliche Veränderung der C-Vorräte am Standort Klingenberg treffen.

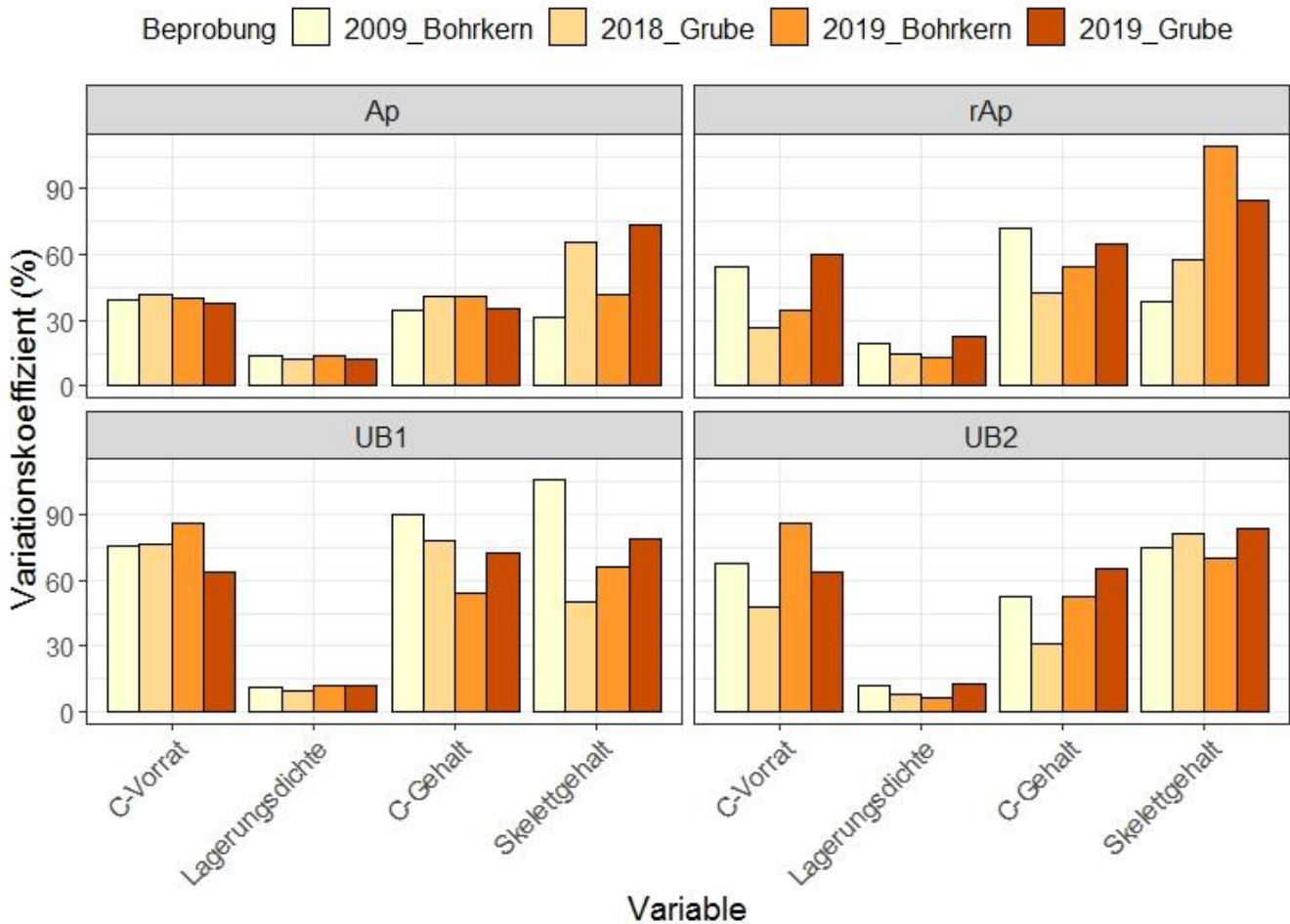


Abbildung 22: Variationskoeffizienten ($sd/mean \cdot 100$) pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat in $t\ ha^{-1}$ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in $g\ cm^{-3}$ (Lagerungsdichte), Kohlenstoffgehalt (C-Gehalt) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelettgehalt) für den ICOS Standort Klingenberg.

**Tabelle 11: Mittelwerte (mean), Standardabweichung (sd) und Variationskoeffizient (cv) pro Be-
probung und Horizontgruppe (type) für die Zielvariable C-Vorrat in t ha⁻¹ (C-Vorrat) und die er-
klärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in g cm⁻³ (LD), Kohlenstoffgehalt (C%)
und Skelettanteil in Volumen-% (Skelett) für den ICOS Standort Klingenberg**

	type	variable	mean	sd	cv (%)		type	variable	mean	sd	cv (%)
2009_Bohrkern	Ap	C-Vorrat	56.97	22.55	39.59	2019_Bohrkern	Ap	C-Vorrat	63.78	25.71	40.30
		LD	1.12	0.15	13.54			LD	1.19	0.16	13.76
		C%	3.11	1.07	34.44			C%	3.54	1.44	40.75
		Skelett	3.08	0.95	30.81			Skelett	4.80	2.01	41.99
	rAp	C-Vorrat	22.48	12.18	54.20		rAp	C-Vorrat	26.54	9.18	34.60
		LD	1.32	0.26	19.90			LD	1.31	0.18	13.41
		C%	2.20	1.59	72.26			C%	2.57	1.40	54.29
		Skelett	3.02	1.16	38.40			Skelett	6.32	6.93	109.79
	UB1	C-Vorrat	12.85	9.69	75.43		UB1	C-Vorrat	18.14	15.57	85.84
		LD	1.51	0.16	10.87			LD	1.53	0.18	11.73
		C%	0.80	0.72	89.86			C%	1.03	0.56	54.54
		Skelett	6.68	7.07	105.88			Skelett	6.69	4.41	65.80
UB2	C-Vorrat	10.66	7.22	67.66	UB2	C-Vorrat	12.76	11.02	86.41		
	LD	1.57	0.19	12.36		LD	1.69	0.11	6.44		
	C%	0.30	0.16	52.71		C%	0.34	0.18	52.77		
	Skelett	8.40	6.27	74.57		Skelett	11.43	7.98	69.83		
2018_Grube	Ap	C-Vorrat	61.41	25.56	41.62	2019_Grube	Ap	C-Vorrat	69.50	26.37	37.94
		LD	1.13	0.14	12.70			LD	1.11	0.14	12.27
		C%	3.41	1.40	41.07			C%	3.82	1.37	35.76
		Skelett	3.55	2.34	65.90			Skelett	3.39	2.49	73.30
	rAp	C-Vorrat	33.33	8.90	26.69		rAp	C-Vorrat	30.48	18.43	60.48
		LD	1.18	0.18	15.10			LD	1.23	0.28	22.97
		C%	3.15	1.33	42.23			C%	2.93	1.90	64.77
		Skelett	3.90	2.27	58.03			Skelett	3.43	2.90	84.51
	UB1	C-Vorrat	13.19	10.09	76.49		UB1	C-Vorrat	9.23	5.88	63.68
		LD	1.53	0.14	9.25			LD	1.53	0.18	11.92
		C%	0.85	0.67	78.12			C%	0.62	0.45	72.70
		Skelett	5.07	2.54	50.08			Skelett	5.46	4.32	79.04
UB2	C-Vorrat	9.57	4.60	48.06	UB2	C-Vorrat	8.96	5.74	64.08		
	LD	1.62	0.13	7.97		LD	1.52	0.19	12.65		
	C%	0.26	0.08	30.87		C%	0.26	0.17	65.14		
	Skelett	8.57	7.00	81.66		Skelett	12.54	10.54	84.06		

Tabelle 12: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen pro Horizontgruppe. Für alle Modelle wurde für die Zielgröße C-Vorrat der natürliche Logarithmus berechnet. Die erklärenden Variablen wurden zentriert. Signifikanzlevels für die Parameterschätzungen (Nullhypothese: Parameterschätzung=0) sind * < 0.001, ** < 0.01, * < 0.05, † < 0.1.**

Horizontgruppe	Variablen	Parameter- schätzung	≈ Anteil an erklärter Varianz (%)	F-Statistik		
				korr.R ²	F-Wert (Freiheitsgrade)	p-Wert
Standort Klingenberg (Acker)						
Ap		a = 4.18***		0.98	214.4 (4,10)	1.21E-09
	C-Gehalt	b = 0.24***	59.90			
	LD	c = 0.88***	12.86			
	Skelett	d = -0.03**	2.15			
	Mächtigkeit	e = 0.06***	23.94			
Ap+rAp		a = 8.97***		0.97	207 (4,18)	8.76E-15
	C-Gehalt	b = 0.32***	62.05			
	LD	c = 0.58**	0.00			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	d = 0.65***	6.82			
	Mächtigkeit	e = 0.07***	29.00			
UB1		a = 1.98***		0.98	144.6 (5,11)	1.20E-09
	C-Gehalt	b = 1.58***	68.13			
	LD	c = -0.15	0.12			
	Skelett	d = -0.03**	1.34			
	Mächtigkeit	e = 0.08***	27.03			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	f = 1.85**	1.89			
UB2		a = 1.78***		0.97	208 (3,14)	7.48E-12
	C-Gehalt	b = 2.72***	27.79			
	LD	c = 1.37***	48.05			
	Mächtigkeit	d = 0.05***	21.98			
Standort Grillenburg (Grünland)						
Ah		a = 3.61***		0.93	455.3 (4,17)	2.20E-16
	C-Gehalt	b = 0.27***	26.98			
	LD	c = 1.12***	38.86			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	d = 0.31**	0.65			
	Mächtigkeit	e = 0.09***	32.59			
Sw-rAp		a = 3.46***		0.97	166.3 (4,17)	2.18E-13
	C-Gehalt	b = 0.45***	11.99			
	LD	c = 0.80**	14.37			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	d = 0.76*	1.18			
	Mächtigkeit	e = 0.08***	69.96			
Sw		a = 2.29***		0.83	27.8 (4,18)	1.75E-07
	C-Gehalt	b = 2.46***	1.11			
	LD	c = 1.11**	7.03			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	d = 6.42***	21.85			
	Mächtigkeit	e = 0.06***	56.06			
Sd		a = 1.55***		0.97	247.3 (3,21)	2.20E-16
	C-Gehalt	b = 4.79***	46.44			
	Mächtigkeit	c = 0.06***	49.74			
	Interaktion(C-Gehalt_Mächt.)	d = -0.18**	1.07			
Standort Tharandt (Forst)						
Oberboden		a = 3.06***		0.73	11.8 (4,12)	0.0004012
	C-Gehalt	b = 0.11***	4.3			
	LD	c = 0.27	16.69			
	Skelett	d = -0.01**	20.16			
	Mächtigkeit	e = 0.10***	38.58			
Unterboden		a = 2.74***		0.73	21.53 (5,34)	1.17E-09
	C-Gehalt	b = 0.58***	6.5			
	LD	c = 0.62***	5.68			
	Skelett	d = -0.17***	14.03			
	Mächtigkeit	e = 0.05***	38.49			
	Interaktion(C-Gehalt_LD)	f = 0.34***	11.31			

4.2.2 Standort Grillenburg (Grünland)

Profilsprachen

Die Profilsprachen am Standort Grillenburg (Grünland) ergaben, dass alle Profile des Beprobungsrasters von Staunässe geprägt sind und dem Bodentyp Pseudogley zugeordnet werden können. An allen Profilen wurde ein rezenter Ah-Horizont (\emptyset -Tiefe -10,5 cm) ausgewiesen, der sich anhand von Lagerungsdichte und Gefüge vom reliktschen Ap-Horizont unterscheiden lässt. Bereits im rAp (\emptyset -Tiefe -23,2 cm) konnten an allen Profilen leichte Merkmale der Pseudovergleyung beobachtet werden. Eine Ausnahme stellt das Profil C1 dar. Die Intensität der Hydromorphie in den darunterliegenden Horizonten (Sw, Sd und Übergangshorizonte) unterliegt räumlichen Schwankungen. An fünf Profilen (F2, F6, G1, G4, G6) wurden Sew-Horizonte ausgewiesen, da eine starke Nassbleichung und < 5 Flächen-% Konkretionen und Rostflecken dokumentiert wurden (Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden, 2005). An neun Profilen war keine eindeutige Unterteilung in Sw- und Sd-Horizonte zu erkennen und es wurden Übergangshorizonte ausgewiesen (Sw_d). Das Bodenskelett der Sw- und Sew-Horizonte besteht zum Großteil aus Eisen-/ Mangankonkretionen. Vereinzelt wurden im reliktschen Ap kleine Tonscherben und Holzkohle gefunden. Die Profilaufnahmen stimmen gut mit der Digitalen Bodenkarte Sachsens (1:50.000) überein, die für den Standort Grillenburg die Leitbodenform „Pseudogley aus periglaziärem Schluff (Lösslehm) über tiefem periglaziärem Gruslehm (Gneis)“ angibt. Profil- und Bohrkernfotos der Beprobung 2019 befinden sich in Anlage A1.

Kohlenstoffvorräte und deren räumliche Variabilität

Die mittleren Kohlenstoffvorräte in äquivalenten Bodenmassen der verschiedenen Beprobungen am Standort Grillenburg (Tabelle 13) liegen zwischen $82,7 \text{ t ha}^{-1}$ (2009_Bohrkern) und $96,0 \text{ t ha}^{-1}$ (2019_Bohrkern). Die Ergebnisse der BZE-LW (alle in 0 – 100 cm Bodentiefe) ergaben im gesamtdeutschen Mittel deutlich höhere C-Vorräte von ungefähr 200 t ha^{-1} für Dauergrünland. Hierbei fließen allerdings organische Nässtandorte unter Grünlandnutzung mit ein. Die deutschlandweite Betrachtung von mineralischen Stauwasserböden unter Dauergrünland ergab einen Mittelwert von ungefähr 125 t ha^{-1} . Für die Region um den Standort Grillenburg lassen sich aus den BZE-Ergebnissen zwei Grünlandstandorte mit C-Vorräten von $50 - 90 \text{ t ha}^{-1}$ ablesen (Jacobs et al., 2018). Wie im Abschnitt zum Standort Klingenberg bereits beschrieben, beziehen sich die Kohlenstoffvorräte der BZE-LW auf das Bodenvolumen in 0 – 100 cm Tiefe, was die Vergleichbarkeit mit den hier vorgestellten Ergebnissen erschwert. Es lässt sich jedoch festhalten, dass auch die C-Vorräte am Standort Grillenburg bereits an der Obergrenze der BZE-Ergebnisse liegen und im regionalen Kontext als hoch einzustufen sind.

In Abbildung 23a sind Boxplots der Kohlenstoffvorräte nach Beprobungsjahr und -methode abgebildet. Tabelle 13 umfasst die deskriptive Zusammenfassung der vier Datensätze. Die Kohlenstoffvorräte aller Beprobungen weisen mit Variationskoeffizienten zwischen 15,1 % (2018_Grube), 16,7 % (2019_Bohrkern), 18,1 % (2019_Grube) und 20,9 % (2009_Bohrkern) eine ähnlich hohe Variabilität auf. Dies spricht für eine räumlich bedingte Variabilität der C-Vorräte. Die Profilsprachen am Standort weisen hierfür sowohl auf eine natürliche Variabilität der Bodeneigenschaften (z. B. Staunässeintensität), als auch auf eine durch anthropogene Überprägung (z. B. Pflughorizont, Holzkohle) entstandene Variabilität hin.

Tabelle 13: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Grillenburg pro Beprobung mit Stichprobenumfang (n), Mittelwert (mean), Median, Minimum (min), Maximum (max), Standardabweichung (sd), Variationskoeffizient (cv), Standardfehler des Mittelwerts (se) und 1. und 3. Quartil (qu_1, qu_3).

		2009_Bohrkern	2018_Grube	2019_Bohrkern	2019_Grube
n		21	22	22	22
min	<i>t/ha</i>	57.81	63.45	71.00	61.90
qu_1		69.94	79.99	86.28	73.82
median		78.59	90.17	97.01	83.90
mean		82.68	90.90	96.04	85.69
qu_3		87.62	102.38	105.79	95.33
max		130.22	112.56	134.16	130.04
se		3.78	2.93	3.42	3.31
sd		17.30	13.72	16.04	15.51
cv	%	20.93	15.10	16.70	18.10

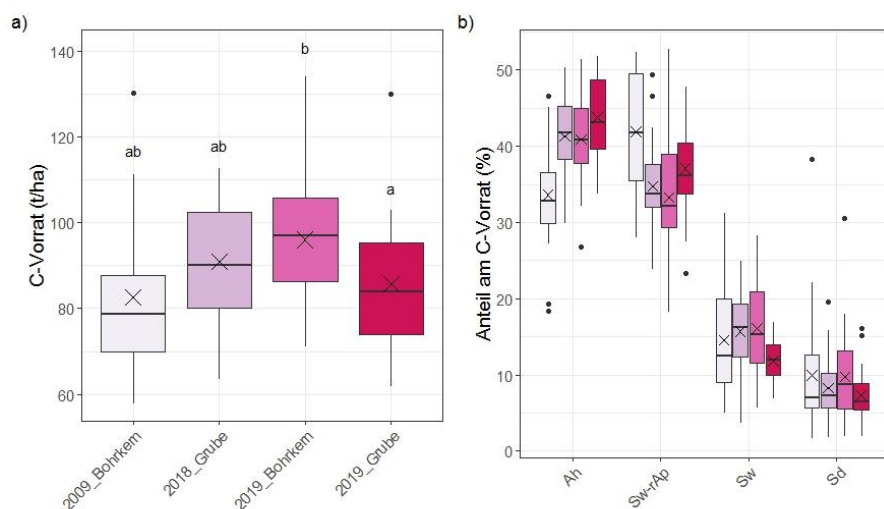


Abbildung 23: Kohlenstoffvorräte am ICOS Standort Grillenburg aufgeschlüsselt nach Beprobungsjahr und -methode. Die Boxplots zeigen Median, 1. und 3. Quartil und Whisker für die Minimal- und Maximalwerte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes an. Buchstaben (a,b) zeigen signifikante Unterschiede (95 % Signifikanzniveau) der Mittelwerte an (paarweisen T-Tests für gepaarte Stichproben, Bonferroni-Korrektur).

In Abbildung 23b sind die C-Vorräte nach Beprobung und Horizontgruppe (Anteile am gesamten C-Vorrat pro Profil) abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass sowohl Ah- als auch Sw-rAp-Horizonte einen großen Teil zum Gesamtkohlenstoffvorrat beitragen und die Variabilität für alle Horizonte sehr groß ist. Im Mittel sind zwischen 33,6 % (2009_Bohrkern) und 43,8 % (2019_Grube) im Ah-Horizont gespeichert. Im Sw-rAp-Horizont liegen die Mittelwerte zwischen 33,3 % (2019_Bohrkern) und 41,9 % (2009_Bohrkern). Deutschlandweit ergab die BZE-LW für Grünlandböden, dass ca. 50 % des C-Vorrats im Oberboden (0 – 30 cm) gespeichert ist (Jacobs et al., 2018). Jobbagy und Jackson (2000) fanden in Grünlandböden der gemäßigten Breiten 40 % des Kohlenstoffvorrats in Oberböden von 0 – 20 cm Tiefe. Für beide Vergleichsstudien bezog sich die Anteilsberechnung auf den C-Vorrat in 0 – 100 cm Tiefe. Im Oberboden (Horizontgruppen Ah und Sw-rAp) des Standorts Grillenburg ist demnach im nationalen Vergleich relativ viel Kohlenstoff gespeichert.

Der C-Vorratsberechnung liegen die Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettgehalt zugrunde, welche in Tabelle 14 pro Beprobung, Variable und Horizontgruppe mit Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient aufgelistet sind. Dazu sind in Abbildung 24 die jeweiligen Variationskoeffizienten pro Beprobung und Horizontgruppe abgebildet. Die Variation der Zielgröße C-Vorrat nimmt tendenziell für alle Beprobungen in der Reihenfolge Ah < Sw-rAp < Sw < Sd, also mit zunehmender Tiefe, zu. Nur für die Beprobung 2019_Grube sind die Variationskoeffizienten der Sw-rAp-Horizonte etwas höher als die der Sw-Horizonte (31,6 und 26,5 %). Von den erklärenden Variablen weist der Skelettgehalt in den meisten Fällen die höchste Variabilität auf (Variationskoeffizienten von 42,1 % bis 119,7 %), gefolgt vom C-Gehalt. Ausnahmen stellen für die Beprobung 2009_Bohrkern die Horizontgruppen Sw und Sd dar, wo die Variationskoeffizienten des C-Gehalts mit 95,9 % und 70,4 % höher liegen als die des Skelettgehalts (42,3 % und 59,8 %). Die Lagerungsdichte des Feinbodens weist für alle Beprobungen und Horizontgruppen die geringsten Variationskoeffizienten auf.

Analog zum Standort Klingenberg wurden für die Profilbeprobung (2019_Grube) multiple lineare Regressionsanalysen horizontgruppenweise durchgeführt (Tabelle 14). Für den Ah-Horizont liegen die Anteile an der Erklärung der Varianz der C-Vorräte der Variablen C-Gehalt, Lagerungsdichte und Mächtigkeit mit ca. 27 %, 39 % und 33 % in der gleichen Größenordnung. In der Horizontgruppe Sw-rAp trägt die Mächtigkeit mit ca. 70 % am Meisten zur Varianz bei. Lagerungsdichte und C-Gehalt erklären jeweils ca. 14 % und 12 %. Für die Sw-Horizonte nimmt der erklärende Effekt in der Reihenfolge Mächtigkeit >> Interaktion von C-Gehalt und Lagerungsdichte >> Lagerungsdichte > C-Gehalt ab. Für die Sd-Horizonte tragen nur die Variablen C-Gehalt (46 %) und Mächtigkeit (50 %), sowie ihre Interaktion signifikant zur Erklärung der Variabilität im C-Vorrat bei. Weder Skelettgehalt noch pH-Wert tragen zur Erklärung der räumlichen Variabilität des C-Vorrats in den verschiedenen Horizontgruppen bei. Dieses Ergebnis ist bezüglich der Variable Skelettgehalt im Sw-Horizont ein überraschendes Ergebnis, da hier teilweise deutlich höhere Skelettgehalte (bis zu 18 Volumen-%) vorliegen und die Variabilität am Standort sehr hoch ist (cv = 119,7 %). Im Vergleich zu anderen Studien auf Grünlandstandorten ist der Einfluss des C-Gehalts auf die Variabilität des C-Vorrats eher als gering zu bewerten, wobei der Einfluss der Mächtigkeit bei der Beprobung in Tiefenstufen wegfällt (Don et al., 2007; Schrumpf et al., 2011).

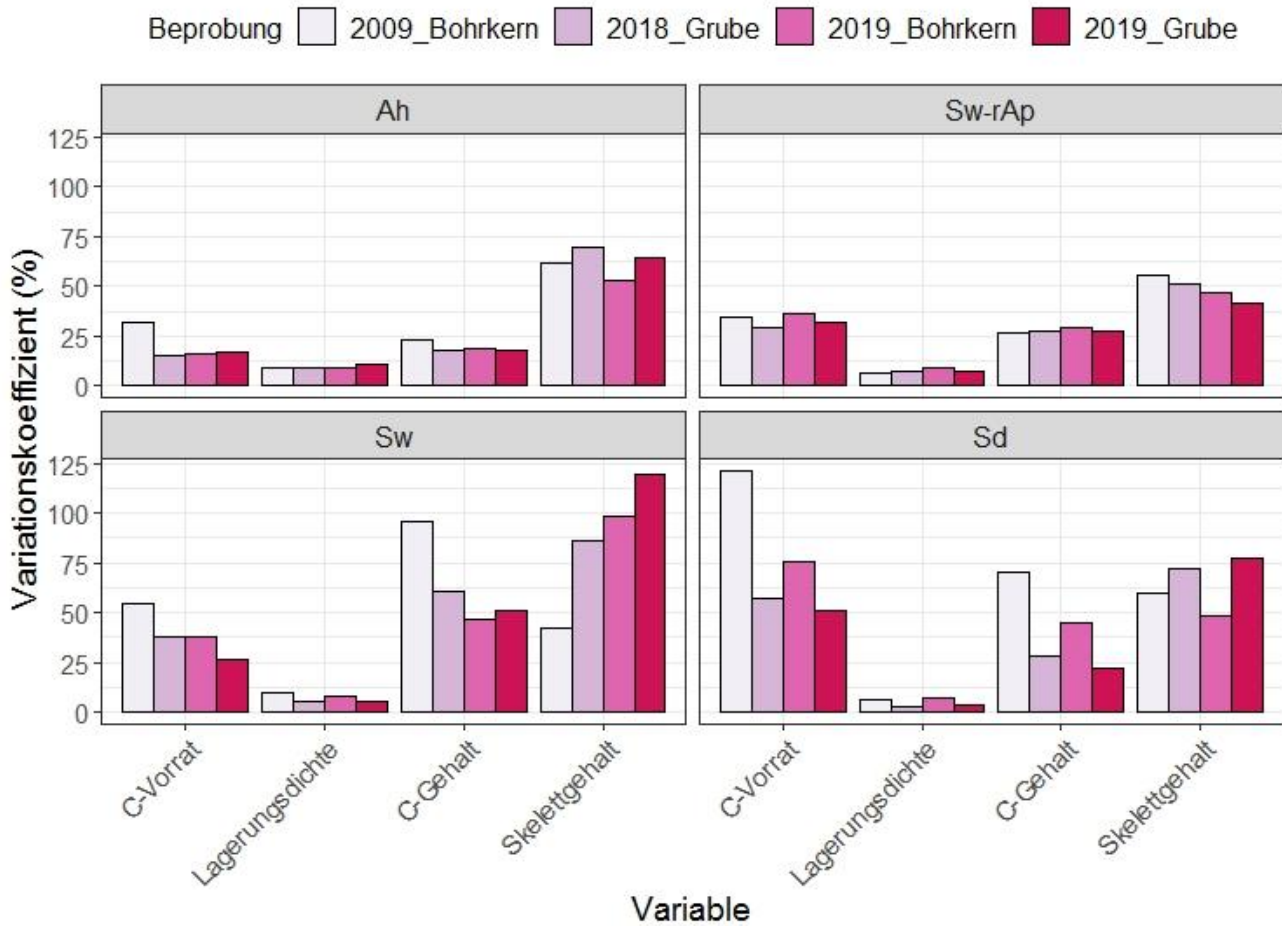


Abbildung 24: Variationskoeffizienten (Standardabweichung/Mittelwert*100) pro Beprobung und Horizontgruppe für die Zielvariable C-Vorrat in $t\ ha^{-1}$ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in $g\ cm^{-3}$ (Lagerungsdichte), Kohlenstoffgehalt (C-Gehalt) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelettgehalt) für den ICOS Standort Grillenburg.

Tabelle 14: Mittelwerte (mean), Standardabweichung (sd) und Variationskoeffizient (cv) pro Beprobung und Horizontgruppe (type) für die Zielvariable C-Vorrat in t ha⁻¹ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Lagerungsdichte des Feinbodens in g cm⁻³ (LD), Kohlenstoffgehalt (C%) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelett) für den ICOS Standort Grillenburg

	type	variable	mean	sd	cv (%)		type	variable	mean	sd	cv (%)
2009_Bohrkern	Ah	C-Vorrat	25.99	8.23	31.66	2019_Bohrkern	Ah	C-Vorrat	38.85	6.34	16.31
		LD	1.04	0.10	9.38			LD	1.07	0.09	8.85
		C%	2.63	0.62	23.42			C%	3.74	0.71	19.07
		Skelett	1.73	1.07	61.97			Skelett	0.45	0.24	52.85
	Sw-rAp	C-Vorrat	32.92	11.36	34.52		Sw-rAp	C-Vorrat	32.33	11.71	36.22
		LD	1.09	0.08	6.92			LD	1.39	0.13	9.42
		C%	2.26	0.60	26.35			C%	2.15	0.64	29.76
		Skelett	1.82	1.01	55.57			Skelett	2.03	0.95	46.72
	Sw	C-Vorrat	11.32	6.20	54.72		Sw	C-Vorrat	15.34	5.74	37.44
		LD	1.41	0.14	9.62			LD	1.60	0.13	8.39
		C%	0.58	0.55	95.91			C%	0.66	0.30	46.33
		Skelett	2.38	1.01	42.31			Skelett	2.23	2.20	98.63
	Sd	C-Vorrat	8.68	10.50	120.85		Sd	C-Vorrat	9.51	7.15	75.16
		LD	1.47	0.09	6.13			LD	1.70	0.12	7.05
		C%	0.26	0.18	70.38			C%	0.28	0.13	45.04
		Skelett	2.42	1.45	59.76			Skelett	1.17	0.57	48.67
2018_Grube	Ah	C-Vorrat	37.16	5.58	15.01	2019_Grube	Ah	C-Vorrat	37.26	6.39	17.14
		LD	1.04	0.09	8.98			LD	1.01	0.11	11.28
		C%	3.57	0.64	17.90			C%	3.57	0.64	18.02
		Skelett	0.30	0.21	69.39			Skelett	0.20	0.13	63.99
	Sw-rAp	C-Vorrat	31.93	9.33	29.22		Sw-rAp	C-Vorrat	32.17	10.17	31.62
		LD	1.34	0.10	7.46			LD	1.28	0.10	7.81
		C%	2.14	0.58	27.23			C%	2.15	0.59	27.50
		Skelett	1.85	0.96	51.69			Skelett	1.80	0.76	42.05
	Sw	C-Vorrat	14.22	5.40	37.96		Sw	C-Vorrat	10.01	2.65	26.47
		LD	1.56	0.09	5.55			LD	1.52	0.09	5.74
		C%	0.63	0.39	60.69			C%	0.45	0.23	51.33
		Skelett	2.18	1.87	85.82			Skelett	3.53	4.22	119.70
	Sd	C-Vorrat	7.59	4.35	57.27		Sd	C-Vorrat	6.25	3.18	50.90
		LD	1.61	0.05	3.04			LD	1.59	0.05	3.37
		C%	0.23	0.07	28.40			C%	0.19	0.04	22.36
		Skelett	1.20	0.86	71.66			Skelett	1.04	0.80	77.38

Zeitlicher Vergleich der Beprobungen

Der paarweise t-Test für gepaarte Stichproben mit Bonferroni-Korrektur ergibt (bei einem Signifikanzniveau von 0,05) einen statistisch signifikanten Unterschied der C-Vorräte zwischen den Methoden Grube und Bohrkern des Beprobungsjahres 2019 (p-Wert: 2,4E-04). Dies ist im Hinblick auf methodische Unterschiede zwischen den Probenahmen interessant. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % ist der Unterschied zwischen den Bohrkernbeprobungen 2009 und 2019 mit einem p-Wert von 0,051 ebenfalls statistisch signifikant. Hierbei stellt sich die Frage, ob aus den Unterschieden zwischen den Beprobungen eine Zunahme im C-Vorrat über die Zeit abgeleitet werden könnte. Für eine detailliertere Betrachtung der Unterschiede im Kohlenstoffvorrat zwischen den Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern, sowie 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern sind in Abbildung 25 die Differenzen als Balken dargestellt. Die mittleren Differenzen (und Standardfehler des Mittelwerts, se) liegen jeweils bei $-10,3$ ($se = 4,8$) $t\ ha^{-1}$ und $-14,2$ ($se = 2,0$) $t\ ha^{-1}$.

Multiple Regressionsanalysen wurden horizontgruppenweise und pro Vergleich durchgeführt, um den Einfluss der Differenzen der Variablen C-Gehalt (diff(C-Gehalt)), Lagerungsdichte des Feinbodens (diff(LD)) und Skelettgehalt diff(Skelett) auf die Differenz im C-Vorrat zu analysieren. Für alle Modelle wurde als Zielgröße die Differenz der natürlichen Logarithmen der C-Vorräte definiert. Signifikante Variablen, Parameterschätzungen, korrigiertes Bestimmtheitsmaß und F-Statistik sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Angaben zur Modellgüte finden sich in Anlage A1. In allen Modellen ist die Differenz im C-Gehalt als erklärende Variable vertreten. Für die Horizontgruppen Ah, Sw-rAp und Sw des Vergleichs 2019_Grube – 2019_Bohrkern ist die Differenz der C-Gehalte sogar die einzige erklärende Variable und erklärt jeweils 99 %, 96 % bzw. 83 % der Varianz. Für die Sd-Horizonte kommt der Skelettgehalt als erklärende Variable hinzu und es können 76 % der Varianz erklärt werden. Die Modelle für den Vergleich zwischen den Beprobungen 2019_Bohrkern und 2009_Bohrkern unterscheiden sich etwas stärker voneinander. Für die Horizontgruppen Ah, Sw-rAp und Sw sind die Differenz im C-Gehalt und die Differenz der Lagerungsdichte des Feinbodens erklärende Variablen. Für die Ah-Horizonte spielt darüber hinaus noch der C-Gehalt (2019_Bohrkern) eine Rolle. Er hat einen positiven Einfluss auf den Unterschied im C-Vorrat zwischen den Beprobungen. Für die Sd-Horizonte wurde nur die Differenz im C-Gehalt als erklärende Variable gefunden und die erklärte Varianz beträgt 82 %.

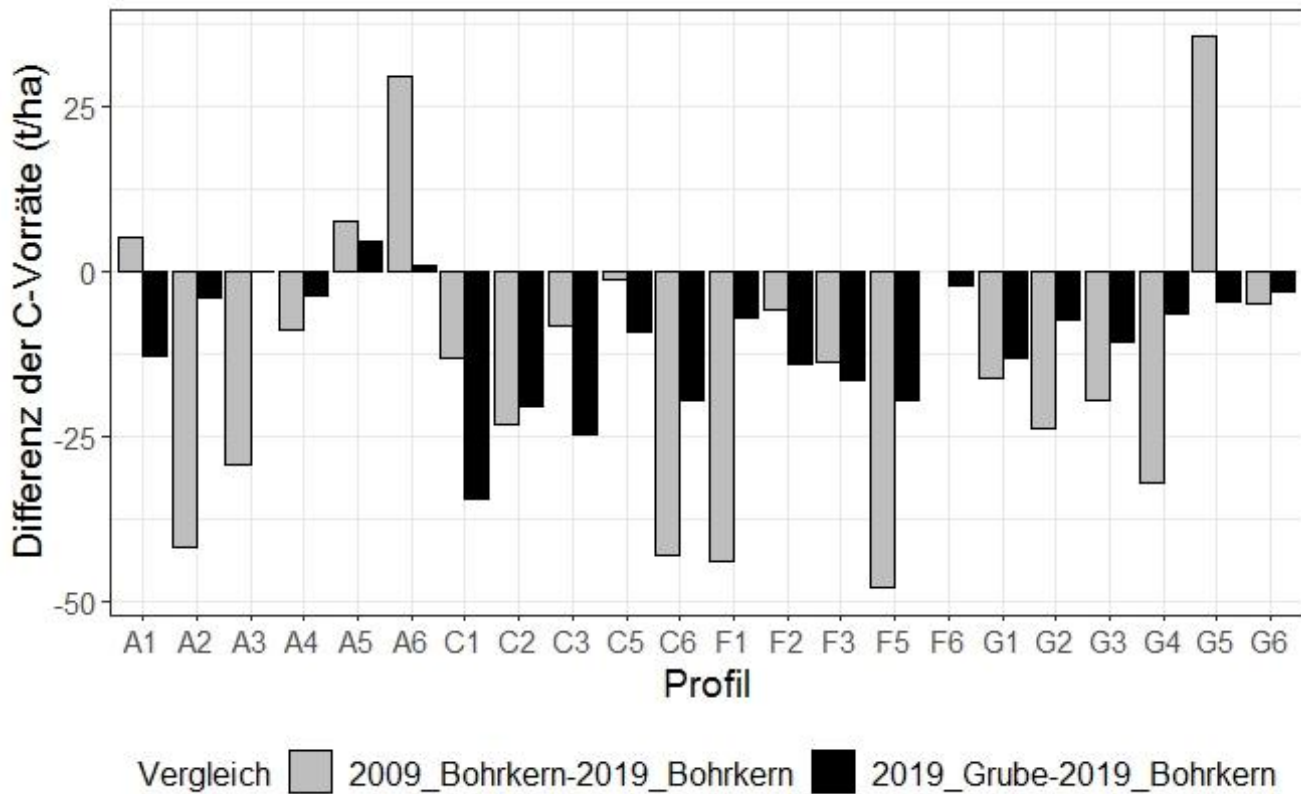


Abbildung 25: Differenz der C-Vorräte in t ha⁻¹ zwischen den Beprobungen 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern (grau) sowie 2019_Grube und 2019_Bohrkern (schwarz) pro Profil für den Standort Grillenburg. Negative Werte bedeuten höhere C-Vorräte der Beprobung 2019_Bohrkern im Vergleich zu 2009_Bohrkern, bzw. 2019_Grube.

Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen pro Horizontgruppe für den Vergleich der Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern (a), sowie 2019_Bohrkern und 2009_Bohrkern (b) am Standort Grillenburg. Als abhängige Variable wurde jeweils die Differenz der natürlichen Logarithmen der C-Vorräte definiert. Die Modellauswahl erfolgte durch schrittweise Vereinfachung. Signifikanzlevels für die Parameterschätzungen (Nullhypothese: Parameterschätzung=0) sind * < 0.001, ** < 0.01, * < 0.05, ' < 0.1.**

Horizontgruppe	Variablen	Parameterschätzung	korr.R ²	F-Statistik	
				F-Wert (Freiheitsgrade)	p-Wert
a) Vergleich 2019_Grube und 2019_Bohrkern					
Ah	diff(C-Gehalt)	a = 0.01*, b = 0.29***	0.99	1649 (1,20)	< 2.2E-16
Sw-rAp	diff(C-Gehalt)	a = 0.01, b = 0.50***	0.96	450.1 (1, 20)	3.49E-15
Sw	diff(C-Gehalt)	a = -0.13**, b = 1.24***	0.83	118.3 (1,23)	1.54E-10
Sd	diff(C-Gehalt) + diff(Skelett)	a = -0.07, b = 3.13***, c = 0.05 '	0.76	87.2 (1,29)	8.02E-10
b) Vergleich 2019_Bohrkern und 2009_Bohrkern					
Ah	diff(C-Gehalt) + diff(LD) + C-Gehalt_2019	a = 0.39***, b = 0.39***, c = 0.02, d = -0.12***	0.97	190.5 (3,17)	2.79E-13
Sw-rAp	diff(C-Gehalt) + diff(LD)	a = -0.01, b = 0.48***, c = -0.01	0.95	187.2 (2,18)	8.98E-13
Sw	diff(C-Gehalt) + diff(LD)	a = 0.39**, b = 1.00***, c = -0.79	0.82	51.49 (2, 21)	8.00E-09
Sd	diff(C-Gehalt)	a = 0.07, b = 2.98***	0.82	133.6 (1,28)	3.60E-12

Die Unterschiede zwischen den Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern lassen sich hauptsächlich durch Unterschiede im C-Gehalt erklären. Die Unterschiede in den bodenphysikalischen Variablen spielen eine untergeordnete Rolle, obwohl die standörtliche Variabilität des Skelettgehalts deutlich größer ist als die des C-Gehalts. Diese Ergebnisse zeigen, dass die geringeren C-Vorräte der Profilbeprobung im Vergleich zur Entnahme von Bohrkernen hauptsächlich auf geringere C-Gehalte zurückzuführen sind. Daraus lässt sich ableiten, dass die Unterschiede im C-Vorrat nicht auf die unterschiedlichen Beprobungsmethoden zurückzuführen sind. Dafür spricht außerdem, dass die Beprobung 2018_Grube mit der Verteilung des C-Vorrats zwischen den verglichenen Beprobungen liegt. Die Unterschiede in den C-Gehalten zwei so zeitlich nah beieinanderliegenden Beprobungen schließen die zeitliche Variabilität im C-Gehalt nahezu aus. Vertikale Verschleppungen am Rand der Bohrkernkerne wurden entfernt; alle anderen Bearbeitungsschritte und Analyseverfahren der Beprobungen waren gleich. Daher ist es wahrscheinlich, dass die Unterschiede im C-Gehalt ein Ergebnis der räumlichen Variabilität am Standort Grillenburg sind. Offensichtlich reicht bereits ein Abstand von 1 – 2 m zwischen Profilgrube und Bohrkernentnahme zur Erklärung der hohen räumlichen Variabilität und könnte eine räumliche Unabhängigkeit der Proben voneinander bedeuten.

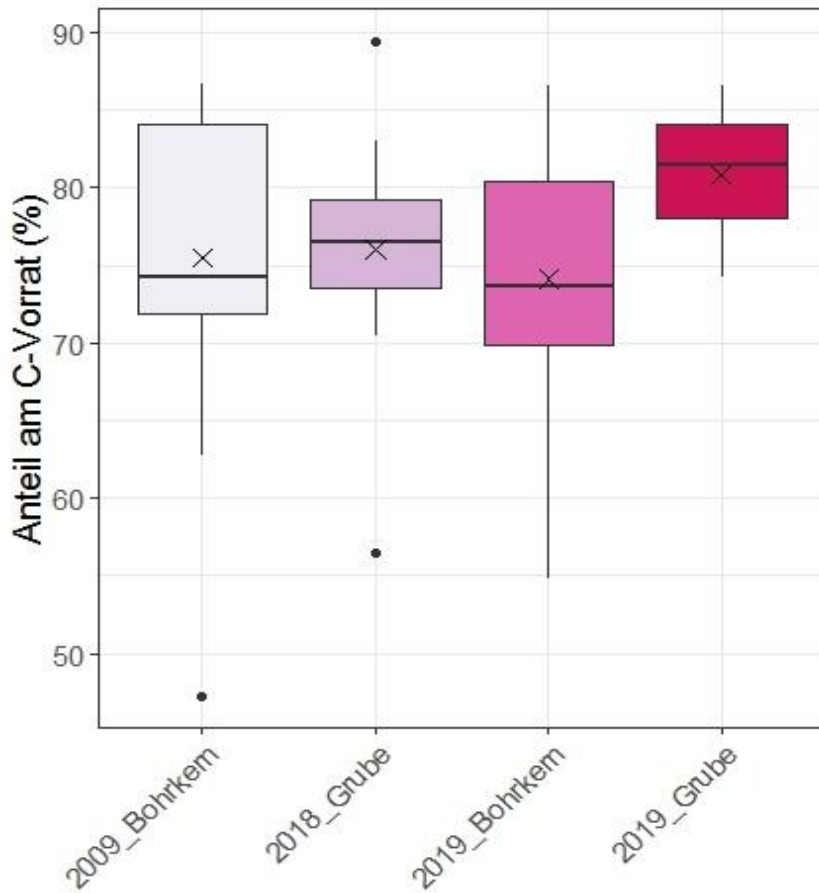


Abbildung 26: Anteil (%) des Oberbodens am gesamten C-Vorrat pro Beprobung. Oberboden = Horizontgruppen Ah + Sw-rAp. Die Boxplots zeigen Median, 1. und 3. Quartil und Whisker für die Minimal- und Maximalwerte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes an.

Aus den Unterschieden im C-Vorrat zwischen den Beprobungen 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern lässt sich keine zeitliche Veränderung des C-Vorrats am Standort Grillenburg ableiten. Auch für einzelne Horizontgruppen ist keine Aussage möglich. So legt Abbildung 23b zwar optisch eine Zunahme der C-Vorräte über die Zeit im Ah-Horizont nahe, doch handelt es sich hierbei um eine Verschiebung der vertikalen Verteilung des C-Vorrats durch die Berechnung in äquivalenten Bodenmassen. Betrachtet man die C-Vorräte von beiden Ah und Sw-rAp zusammen (Abbildung 26), wird deutlich, dass keine zeitliche Veränderung abzuleiten ist.

4.2.3 Standort Tharandt (Forst)

Profilansprachen

Am Standort Tharandt wurden an 14 Profilen, teils skelettreiche, Braunerden und an vier Profilen Pseudogleye angesprochen. Die Pseudogleye liegen im südwestlichen Teil der beprobten Fläche in Richtung des S-Berges und wurden an den Profilen W5, W6, W10 und W16 ausgewiesen. Hier ist das Substrat von Sandsteinschutt führendem Lösslehm geprägt, während an den restlichen Profilen das Bodenskelett aus Rhyolithschutt besteht. Die gesamte Fläche ist von einem charakteristischen Mikrorelief mit kleinen Kuppen und Senken geprägt, das im Tharandter Wald als Ergebnis der Kryoturbation im Zusammenhang mit der Weichsel-Kaltzeit bekannt ist (Fiedler et al., 1983 in LfULG, 2012). Bei den meisten Braunerde-Profilen wurde eine beginnende Podsolierung beobachtet und ein Aeh-Horizont ausgewiesen, lediglich an zwei Profilen in Kuppenlage unter Buchenvoranbau bzw. Mischbestand (W8 und W18) war dies nicht der Fall. Die angesprochenen Humusformen reichen von mullartigem Moder (unter Buchenvoranbau) bis rohhumusartigem Moder. Die Digitale Bodenkarte (1:50.000) bestätigt die Profilansprachen durch die Ausweisung der Leitbodenformen „Braunerde aus periglaziärem Schuttsand über verwittertem Schuttlehm (Rhyolith)“ und „Pseudogleye aus periglaziärem Schutt führendem Schluff (Lösslehm, Psammite) über periglaziärem Schuttsand (Psammite)“. Profildaten der Beprobung 2019 befinden sich in Anlage A1.

Kohlenstoffvorräte und deren räumliche Variabilität

Die mittleren Kohlenstoffvorräte in äquivalenten Bodenmassen der verschiedenen Beprobungen am Standort Tharandt liegen bei $135,4 \text{ t ha}^{-1}$ (2019) und $103,5 \text{ t ha}^{-1}$ (2020) (Abbildung 27a und Tabelle 16). Der Kartenband der BZE2 (Grüneberg et al., 2018) gibt Bewertungsstufen für C-Vorräte an, die sich auf die Humusaufgabe und den Mineralboden 0 bis max. 90 cm Tiefe beziehen. Die maximale Tiefe ergibt sich dabei aus der Entwicklungstiefe des Bodens. Am Standort Tharandt wurde für neun der 18 Profile innerhalb der beprobten Tiefe bereits das Ausgangssubstrat angesprochen, weswegen eine grobe Einordnung anhand BZE2 Ergebnissen und forstlicher Standortaufnahme möglich ist. Demnach sind die beiden mittleren C-Vorräte der Beprobungen 2019 und 2020 als mittel ($100 \text{ bis } 200 \text{ t ha}^{-1}$) einzustufen. Die Ergebnisse der BZE2 geben für das Wuchsgebiet Erzgebirge (Gauer und Kroiher, 2012) ebenfalls mittlere C-Vorräte (Humusaufgabe $> 30 \text{ t ha}^{-1}$, Mineralboden $110 - 125 \text{ t ha}^{-1}$) an (Wellbrock et al., 2016). Die organische Auflage speichert im Mittel 55,2 bzw. 47,9 % (2019 bzw. 2020) des gesamten C-Vorrats. Dieser Anteil liegt deutlich über dem vom Staatsbetrieb Sachsenforst für Sachsen angegebenen Anteil von ca. 30 % (Jacob et al., 2018). Schrumpf et al. (2011) bestimmten unter einem Nadelbaumbestand in Südost-Thüringen 49 % des C-Vorrats (0 – 60 cm Tiefe) in der organischen Auflage.

Tabelle 16: Kohlenstoffvorräte in t ha⁻¹ am ICOS Standort Tharandt pro Beprobungsjahr mit Stichprobenumfang (n), Mittelwert (mean), Median, Minimum (min), Maximum (max), Standardabweichung (sd), Variationskoeffizient (cv), Standardfehler des Mittelwerts (se) und 1. und 3. Quartil (qu_1, qu_3).

	2019	2020
n	18	18
min t/ha	77.02	70.29
qu_1	109.49	92.06
median	132.12	105.64
mean	135.36	103.53
qu_3	156.18	118.25
max	215.53	133.38
se	8.95	4.44
sd	37.96	18.85
cv %	28.04	18.21

Die Kohlenstoffvorräte weisen mit Variationskoeffizienten von 28,0 % (2019) und 18,2 % (2020) eine hohe räumliche Variabilität auf. Ein direkter Vergleich mit Daten der BZE2 ist nicht möglich, da lediglich Variationskoeffizienten auf nationaler Ebene angegeben sind. Im Fichtelgebirge wurden für die organische Auflage unter Fichtenbeständen mittlere Kohlenstoffvorräte von 63,8 t ha⁻¹ mit einem Variationskoeffizienten von 26,4 % publiziert (Alewell, 2001). Die räumliche Variabilität ist demnach gut mit der des hier betrachteten Standorts Tharandt (Variationskoeffizienten für die organische Auflage von 31,5 und 30,5 % für 2019 und 2020) zu vergleichen. Andere Publikationen, die die räumliche Variabilität von C-Vorräten auf Standortebene beinhalten, sind naturräumlich nur begrenzt mit dem Untersuchungsstandort zu vergleichen. So ergeben sich z.B. aus Kristensen et al. (2015) für die organischen Auflagen von sieben Untersuchungsflächen (jeweils n = 73 auf ca. 2000 m²) in südborealen Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst) Variationskoeffizienten zwischen 28,4 und 60,9 % mit einem mittleren Variationskoeffizienten von 43,3 %.

Die multiple Regressionsanalyse am Standort Tharandt für die Beprobung 2019 ergab für den mineralischen Oberboden, dass die Variablen Mächtigkeit, Skelett, Lagerungsdichte und C-Gehalt 73 % der Variabilität des C-Vorrats erklären können. Für Unterbodenhorizonte lag die erklärte Varianz ebenfalls bei 73 %, wobei neben den genannten Variablen noch die Interaktion zwischen C-Gehalt und Lagerungsdichte zur Erklärung der Variabilität beiträgt. Der pH-Wert ist in keinem der Modelle berücksichtigt.

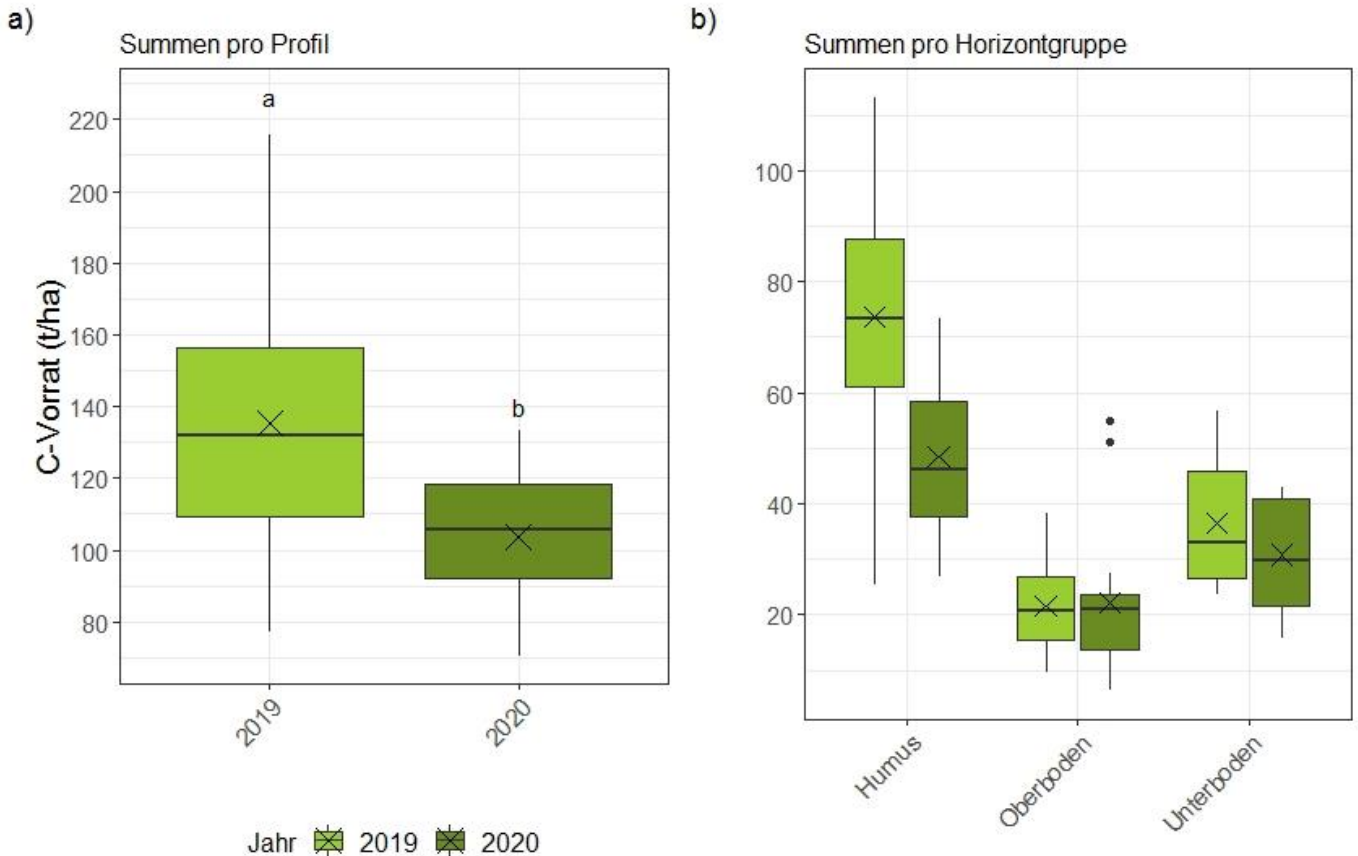


Abbildung 27: Kohlenstoffvorräte in $t\ ha^{-1}$ für den ICOS Standort Tharandt pro Beprobungsjahr (a) und pro Beprobungsjahr und Horizontgruppe (b). In b) sind die Profile W2, W20 und W21 ausgenommen, da bei diesen Profilen 2019 die Grenze zwischen organischer Auflage und Mineralboden nicht treffend beprobt wurde. Die C-Vorräte der gesamten Profile (a) sind davon nicht betroffen. Die Boxplots zeigen Median, 1. und 3. Quartil und Whisker für die Minimal- und Maximalwerte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes an. Buchstaben (a, b) zeigen signifikante Unterschiede (95 % Signifikanzniveau) der Mittelwerte an.

Unterschiede zwischen den Beprobungen 2019 und 2020

Die C-Vorräte der Beprobung 2020 sind insgesamt geringer als die der Beprobung 2019. Die Differenz der Mittelwerte liegt bei ca. $30\ t\ ha^{-1}$, was in etwa der Größenordnung der Standardabweichungen der Einzeljahre entspricht. Der t-Test für gepaarte Stichproben ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied (Signifikanzniveau 0,05) der C-Vorräte zwischen den Beprobungsjahren 2019 und 2020 (p-Wert: 0,00044).

Die detailliertere Betrachtung der Kohlenstoffvorräte pro Horizontgruppe (Abbildung 27b) zeigt statistisch signifikante Unterschiede (Signifikanzniveau 0,05) zwischen den Jahren für die organische Auflage („Humus“) und den Unterboden an. Dabei ergibt der t-Test für gepaarte Stichproben für die Horizontgruppe „Humus“ eine mittlere Differenz von $25\ t\ ha^{-1}$ bei einem p-Wert von $0,39E-03$. Für die Horizontgruppe „Unterboden“ ergibt der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (für verbundene Stichproben) einen p-Wert von 0,02. Die Betrachtung der Horizontgruppen schließt die Profile W2, W20 und W21 aus, da diese Profile für die Beprobung 2019 hohe Kohlenstoffgehalte im Aeh ($> 15\ %$) aufweisen und damit nicht als Mineralbodenhorizont gewertet werden können (Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden, 2005). Die Grenze zwischen organischer Auflage und Mineraloberboden wurde somit nicht treffend beprobt und die Zuordnung zu einer Horizontgruppe ist nicht eindeutig möglich. Die für den Oberboden 2020 als Ausreißer markierten Profile sind W5 und W6. Die hohen C-Vorräte sind hier zum einen mit hohen C-Gehalten (3,04 und 3,14 %) im

Vergleich zur Beprobung 2019 (1,64 und 2,00 %) zu erklären. Zum anderen weisen diese Horizonte im Vergleich zu den Oberbodenhorizonten der anderen Profile eine große Mächtigkeit auf, wodurch die C-Vorräte besonders hoch ausfallen.

Die C-Gehalte, die der Kohlenstoffvorratsberechnung zugrunde liegen, sind in Tabelle 17 pro Beprobung und Horizontgruppe zusammengefasst. Die C-Gehalte der Horizontgruppe „Unterboden“ unterscheiden sich statistisch signifikant (p-Wert: 0,01 Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für verbundene Stichproben) zwischen den Jahren 2019 und 2020. Für den Oberboden ist dies nicht der Fall. Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettgehalt sind für beide Beprobungen identisch (siehe Methodenbeschreibung Kapitel 4.1), weswegen abgeleitet werden kann, dass die Unterschiede im Unterboden-C-Vorrat durch Unterschiede im C-Gehalt zustande kommen. Eine mögliche Erklärung könnte die steigende räumliche Variabilität der C-Gehalte mit zunehmender Tiefe in Kombination mit geringen Gehalten und hohen Feinbodenmassen liefern (Schrumpf et al., 2011; Wellbrock et al., 2016).

Tabelle 17: Mittelwerte (mean), Standardabweichung (sd) und Variationskoeffizient (cv) pro Beprobung und Horizontgruppe (type) für die Zielvariable C-Vorrat in t ha⁻¹ (C-Vorrat) und die erklärenden Variablen Kohlenstoffgehalt (C%), Humusvorrat (t ha⁻¹), Lagerungsdichte des Feinbodens in g cm⁻³ (LD) und Skelettanteil in Volumen-% (Skelett) für den ICOS Standort Tharandt. Die Profile W2, W20 und W21 sind hierbei ausgenommen.

	type	variable	mean	sd	cv (%)		type	variable	mean	sd	cv (%)
Beprobung 2019	L+Of	C-Vorrat	26.57	7.47	28.11	Beprobung 2020	L+Of	C-Vorrat	20.43	7.09	34.69
		Humusvorrat	57.35	15.42	26.89			Humusvorrat	44.61	16.44	36.85
		C-Gehalt	46.52	4.00	8.60			C-Gehalt	46.20	3.00	6.50
	Oh	C-Vorrat	47.02	21.80	46.37		Oh	C-Vorrat	28.08	9.99	35.60
		Humusvorrat	135.19	47.73	35.31			Humusvorrat	88.74	24.46	27.57
		C-Gehalt	1.69	1.01	59.53			C-Gehalt	31.98	7.20	22.50
	Oberboden	C-Vorrat	21.67	8.52	39.33		Oberboden	C-Vorrat	22.26	13.78	61.90
		C-Gehalt	5.94	2.80	47.18			C-Gehalt	5.50	2.61	47.42
		LD	1.31	0.48	36.93			LD	siehe Beprobung 2019		
		Skelett	42.77	26.41	61.75			Skelett	siehe Beprobung 2019		
	Unterboden	C-Vorrat	36.42	11.88	32.63		Unterboden	C-Vorrat	30.84	10.53	34.15
		C-Gehalt	1.69	1.01	59.53			C-Gehalt	1.36	0.76	55.87
LD		1.49	0.50	33.80	LD	siehe Beprobung 2019					
Skelett		45.51	25.37	55.75	Skelett	siehe Beprobung 2019					

Die C-Vorräte, Humusvorräte und C-Gehalte der organischen Auflage sind in Abbildung 29a-c pro Beprobungsjahr und Horizont (L+Of und Oh) dargestellt. Die C-Gehalte unterscheiden sich nicht statistisch signifikant voneinander zwischen den Jahren für die Horizonte „L+Of“ und „Oh“ mit p-Werten von 0,42 (L+Of) und 0,35 (Oh) (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben). Dagegen sind die Unterschiede in den Humusvorräten für beide Horizonte statistisch signifikant (p-Werte 0,65E-02 (L+Of) und 0,23E-02 (Oh); t-Tests für gepaarte Stichproben). Daraus lässt sich schließen, dass die Unterschiede im C-Vorrat der organischen Auflage vor allem durch deren variierende Mächtigkeit zustandekommt.

Die Unterschiede im Humusvorrat von L+Of und Oh mit mittleren Differenzen von $-15,8 \text{ t ha}^{-1}$ (L+Of) und $-44,9 \text{ t ha}^{-1}$ (Oh) könnten dem Einfluss des Mikroreliefs unterliegen. In Abbildung 28b ist die prozentuale Abweichung des Humusvorrats ($\text{Differenz } 2020-2019 / \text{Humusvorrat}_{2019} * 100$) innerhalb der Mikroreliefklassen „Senke“, „eben“, „geneigt“ und „Kuppe“ dargestellt. Es lässt sich der Trend ablesen, dass an den Profilen, die 2019 in einer Senke oder auf einer Ebene im Mikrorelief angelegt wurden, die prozentuale Abweichung deutlich im negativen Bereich liegt. Für die Mikroreliefklassen „geneigt“ und „Kuppe“ liegen die Abweichungen eher bei null bzw. im positiven Wertebereich. In Abbildung 28a sind die absoluten Humusvorräte des Beprobungsjahres 2019 dargestellt. Es lässt sich ebenfalls ein Trend erkennen, bei dem die Humusvorräte in der Reihenfolge „Senke“ > „eben“ > „geneigt“ > „Kuppe“ abnehmen. Dies gilt vor allem für den Oh-Horizont. Die Beprobung von Senken und ebenen Geländepunkten in 2019 geht also sowohl mit hohen Humusvorräten als auch mit großen Differenzen zwischen den Beprobungsjahren einher. 2020 wurde die organische Auflage mit 1 – 2 m Abstand zur Profilwand beprobt, was Änderungen in der Mikroreliefform bedingt. So wurde beispielsweise 2019 eine Senke beprobt, die 2020 für die Beprobung nicht mehr zur Verfügung stand, um Störungseinflüsse zu vermeiden. Daher musste 2020 ein geneigter Bereich beprobt werden. Mit 12 Profilen, die 2019 in einer Senke oder auf einer ebenen Fläche angelegt wurden (jeweils $n = 6$) könnte dieser Effekt eine mögliche Erklärung für die Unterschiede im C-Vorrat der organischen Auflage sein. Es liegt daher nahe, die Kohlenstoffvorräte der organischen Auflage 2020 als räumlich unabhängig von den Profilen von 2019 zu betrachten. Studien zur räumlichen Variabilität von C-Vorräten in organischen Auflagen südborealer Wälder berichten von räumlicher Unabhängigkeit ab 0,75 – 2,25 m (Muukkonen et al., 2009) bzw. 0,86 – 2,85 m Abstand (Kristensen et al., 2015).

Zeitlicher Vergleich der Beprobungen

Die Beprobung 2007 enthielt hauptsächlich Daten zur organischen Auflage. Von den 2019 integrierten Punkten (Abbildung 18), liegen für die Profile W9 und W21 keinerlei Daten vor. Dies reduziert die Stichprobenanzahl der Beprobung 2007 auf sechs Probepunkte. Die mittleren C-Vorräte für die Auflagehorizonte L+Of und Oh liegen bei $17,5$ und $38,9 \text{ t ha}^{-1}$ mit Variationskoeffizienten von 31,0 und 35,2 %. Die Abbildung 29d zeigt, dass die Kohlenstoffvorräte dieser Proben innerhalb der räumlichen Variabilität liegen, die für die Beprobungen 2019 und 2020 gefunden wurde. Dies gilt ebenfalls für Humusvorrat und Kohlenstoffgehalt (Abbildung 29e,f). Eine zeitliche Veränderung der C-Vorräte in der organischen Auflage lässt sich also nicht erkennen.

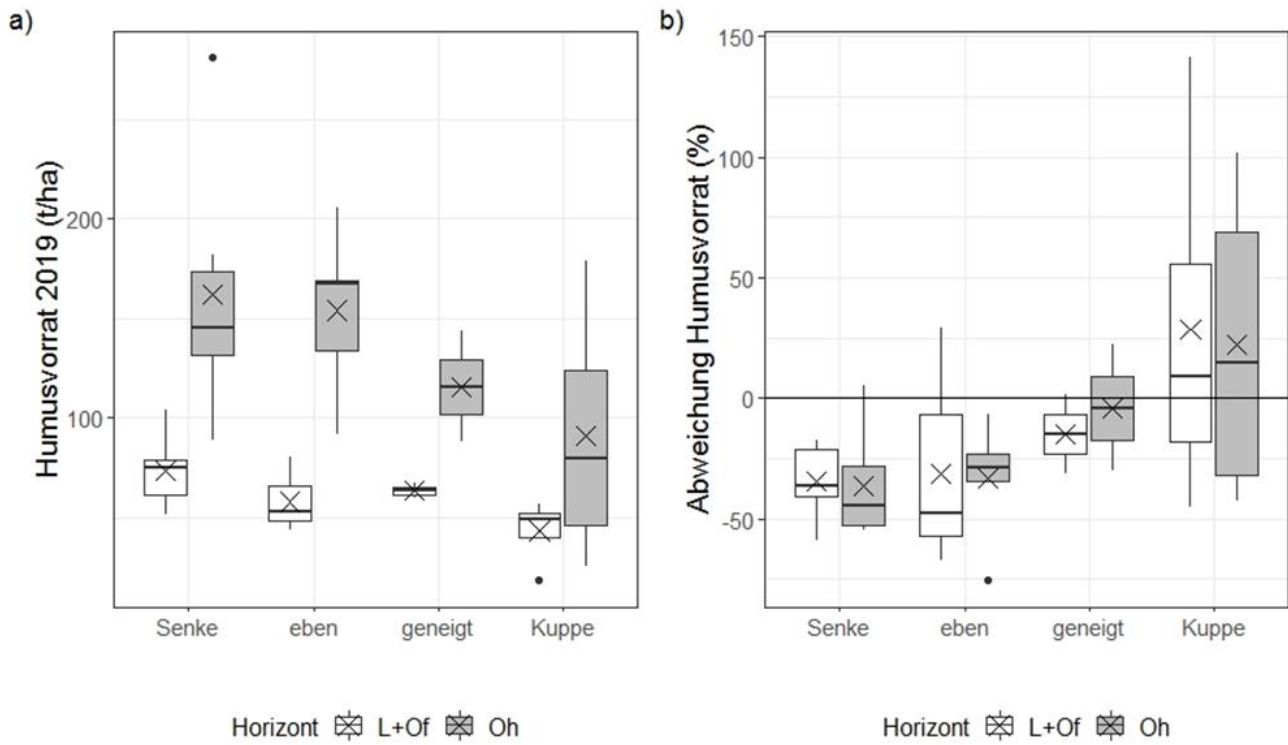


Abbildung 28: Betrachtung der Humusvorräte pro Auflagehorizont nach Mikrorelieftypen.
a) Humus-vorräte in t ha⁻¹ der Beprobung 2019,
b) Prozentuale Abweichung (Differenz 2020 – 2019 / Humus-vorrat_2019*100).

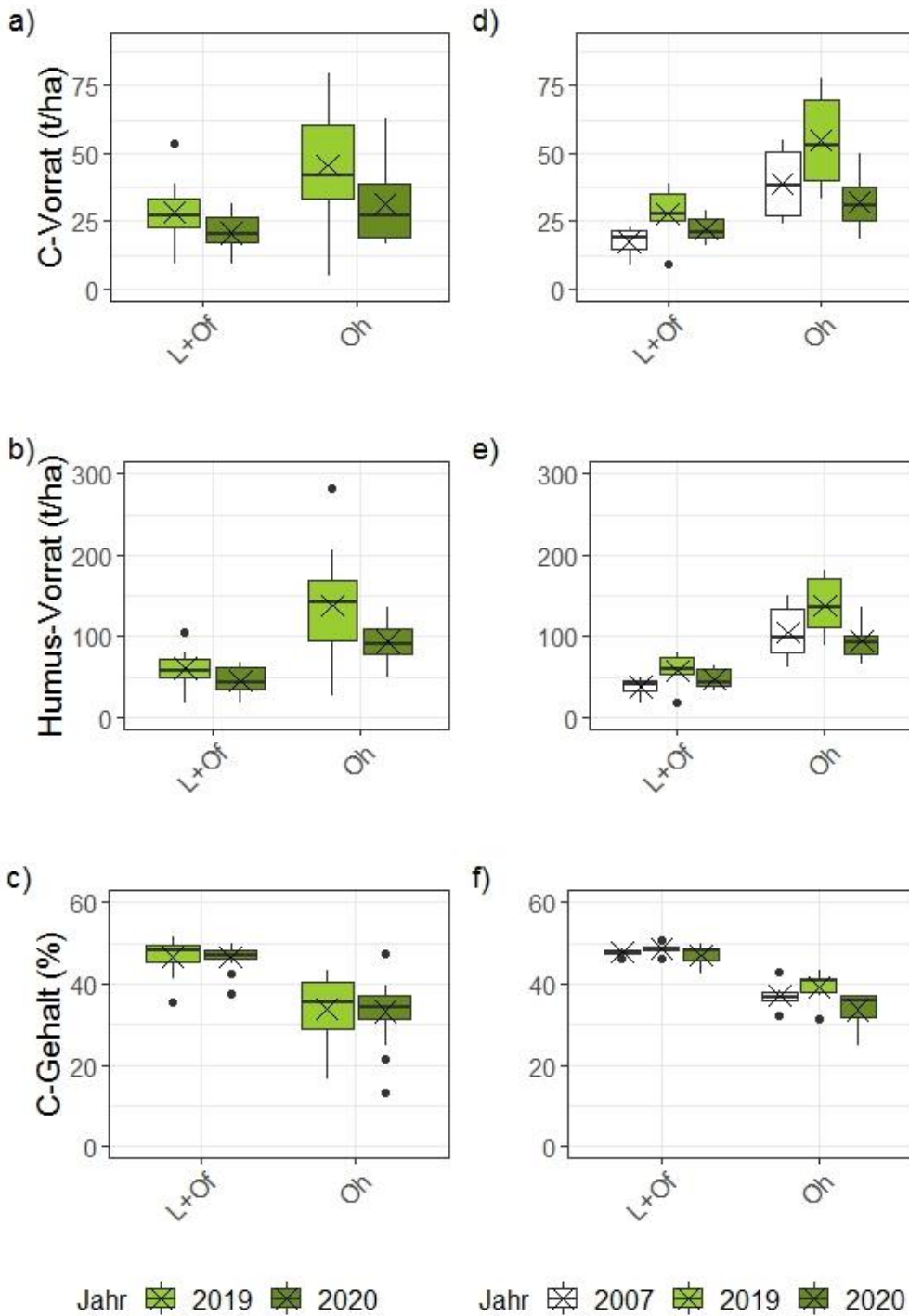


Abbildung 29: Kohlenstoffvorräte (oben), Humusvorräte (mitte) und C-Gehalte (unten) pro Beprobungsjahr und Auflagehorizont (L+Of und Oh) für den ICOS Standort Tharandt. Abbildungen a-c beinhalten alle 2019 und 2020 beprobten Profile (n=18). Bei den Abbildungen d-f fließen nur die Profile (n = 6) ein, für die Daten aus der Beprobung 2007 existieren.

4.3 Allometrische Beziehungen am Standort Tharandt

Im September 2020 wurden am ICOS-Standort Tharandt 4 Fichten geerntet, um den oberirdischen Biomassevorrat (AGB) und den Brusthöhendurchmesser (BHD) jedes Einzelbaumes zu bestimmen. Im Ergebnis konnten folgende Abhängigkeiten (allometrische Beziehung) ermittelt werden (Abbildung 30):

$$AGB = -2939.7 + 143.15 BHD - 1.104 BHD^2 \quad (6)$$

$$AGB_C = -1416.5 + 68.74 BHD - 0.519 BHD^2 \quad (7)$$

Der C-Gehalt von Derbholz und Nadeln beträgt 49,0 bzw. 51,0 %. Die gesamte trockene oberirdische Biomasse hat im Mittel einen C-Gehalt von 49,4 %. Mittels langfristiger Umfangsmessungen und Informationen über die Stammzahl pro Hektar (2007: 230 ha⁻¹, 2019: 220 ha⁻¹) kann an diesem Waldstandort der oberirdische C-Vorrat zu den Stichjahren der C-Inventur des Bodens (2007, 2019) berechnet werden.

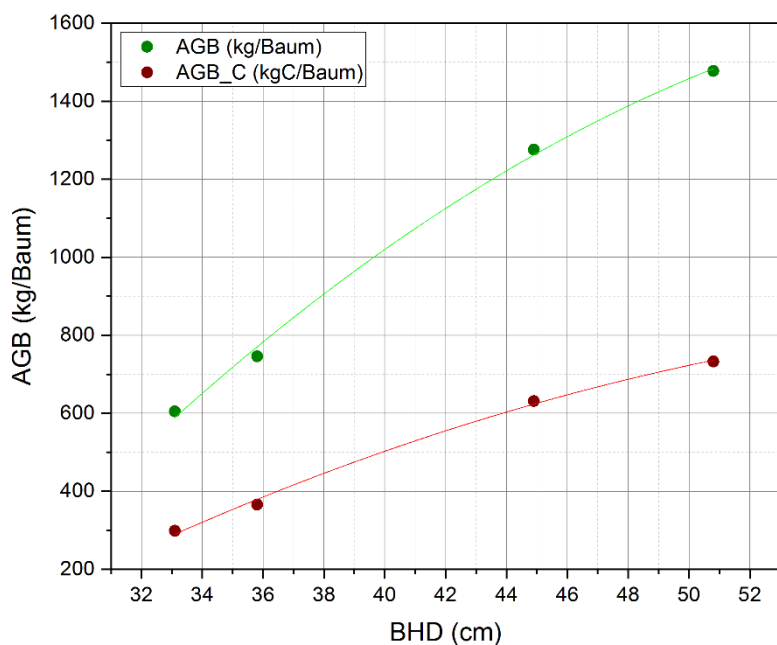


Abbildung 30: Brusthöhendurchmesser BHD und oberirdischer trockener Biomassevorrat AGB (grüne Punkte) bzw. oberirdischer C-Vorrat AGB_C (braune Punkte) von vier im September 2020 geernteten Bäumen am Standort DE-Tha sowie deren Abhängigkeiten (s. Text)

4.4 Vergleichende Betrachtung von Inventuren, EC-Messungen und Emissionsfaktoren

Die anhand der Inventuren erhobenen Kohlenstoffvorräte unterscheiden sich zwischen den ICOS-Standorten. Die höchsten mittleren Kohlenstoffvorräte wurden am forstlich genutzten Standort Tharandt gefunden, gefolgt vom Standort Klingenberg unter Ackerfruchtfolge. Der Standort Grillenburg (Dauergrünland) weist die geringsten C-Vorräte auf. Dieser Standort wurde seit mindestens 1987 nicht mehr organisch gedüngt.

Die räumliche Variabilität des C-Vorrats nimmt in der Reihenfolge Klingenberg > Tharandt > Grillenburg ab. Für die beiden landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde der C-Gehalt als wichtigster Faktor für die räumliche Variabilität gefunden, während am Waldstandort Tharandt bodenphysikalische Parameter wie Lagerungsdichte des Feinbodens und Skelettgehalt einen stärkeren Einfluss zeigten. Dies könnte auf den großen Unterschied im Skelettgehalt zwischen forstlicher und landwirtschaftlicher Fläche zurückzuführen sein (Schrumpf et al., 2011).

Die Trends der langjährigen C-Bilanzen auf Basis der atmosphärischen EC-Messungen der drei beobachteten Ökosysteme sind signifikant und unterscheiden sich deutlich. Demgegenüber sind die C-Vorratsänderungen im Boden mittels Inventuren nicht signifikant, und deren interannuelle Variabilität (Inventuren 2007/2008, Herbst 2018, Frühjahr 2019/2020) ist in der gleichen Größenordnung wie der erwartete langfristige Trend. Hierbei kann jedoch der saisonale Einfluss die Interpretation der C-Vorratsänderungen erschweren. Trotz des vergleichsweise hohen Aufwandes der Bodenkohlenstoffinventuren (15 – 22 Probenahmepunkte) ist die jeweilige räumliche Streuung der C-Vorräte an den untersuchten Standorten zu hoch (Standardabweichungen von 17 bis 38 tC ha⁻¹), um belastbare Veränderungen in der erwarteten Größenordnung in einem Zeitraum von 9 – 13 Jahren nachzuweisen.

Dennoch zeigen die Ergebnisse beider Erhebungsmethoden (EC-Messungen und Inventur) am Grünland- und Waldstandort grundsätzliche Übereinstimmungen. Das Grünland verhält sich C-neutral, denn einer leichten nicht signifikanten C-Vorratszunahme im Boden (Inventur) von 0,3 – 0,8 tC ha⁻¹ a⁻¹ steht eine nur geringe signifikante C-Quelle (EC) von 0,1 tC ha⁻¹ a⁻¹ gegenüber (Abbildung 31), so dass sich beide Erhebungsmethoden nicht widersprechen.

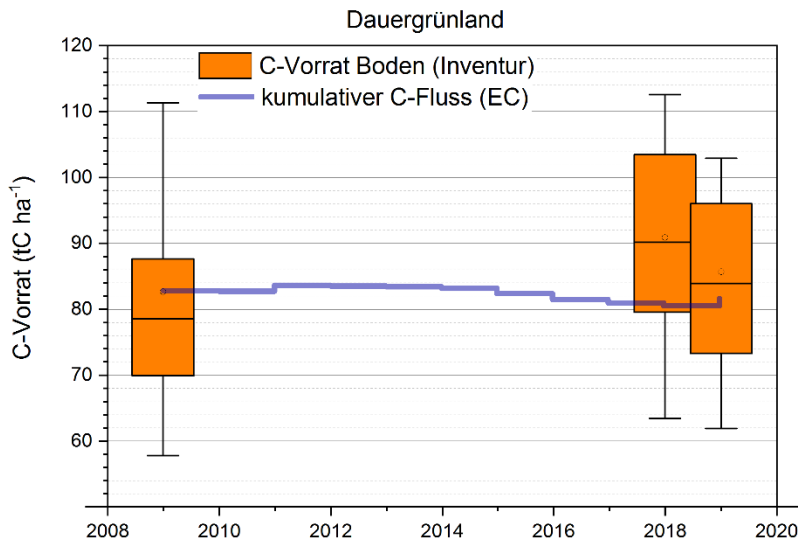


Abbildung 31: Räumliche Variabilität (Boxplots) der Boden-C-Vorräte 2009, 2018 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse (NBP) nach EC-Methode zwischen 2009 und 2019 (Startwert: Mittelwert des C-Vorrates 2009) am ICOS Standort Grillenburg

Der Waldstandort ist auf Basis von EC-Messungen und Inventuren eine deutliche und signifikante CO₂-Senke. Ausgehend von einem mittleren C-Vorrat von 216,4 tC ha⁻¹ (2007), wovon 59 % im Boden gespeichert sind, zeigen die EC-Messungen eine Zunahme des in Boden und Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs zwischen 2007 und 2019 um 42,0 tC ha⁻¹ bzw. 3,5 tC ha⁻¹ a⁻¹ (Abbildung 32). Mittels Inventuren konnte im selben Zeitraum eine nicht signifikante Zunahme des C-Vorrates im Boden von 8,2 tC ha⁻¹ (0,7 tC ha⁻¹ a⁻¹) registriert werden. Ähnliche Zunahmen im unterirdischen C-Speicher (0,6 tC ha⁻¹ a⁻¹) wurden für den sächsischen Wald zwischen 2002 und 2012 festgestellt (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019). Der C-Vorrat in der oberirdischen Biomasse der Fichten nahm um 17,6 tC ha⁻¹ (1,5 tC ha⁻¹ a⁻¹) zu. In Summe ist der C-Vorrat in Boden und oberirdischer Biomasse der Fichten um 25,8 tC ha⁻¹ (2,1 tC ha⁻¹ a⁻¹) gestiegen. Zur C-Senke der EC-Messungen ergibt sich eine Differenz von 16,2 tC ha⁻¹ (1,3 tC ha⁻¹ a⁻¹). Da jedoch weitere ober- und unterirdische Vorratsänderungen (Jungbestände, Unterwuchs, Wurzeln) durch Boden- und Biomasseinventuren nicht erfasst wurden, aber (indirekt) dem atmosphärischen Austausch unterliegen, ist nicht notwendigerweise von einer Überschätzung der C-Senke anhand der EC-Messungen oder einer Unterschätzung der Vorratszunahme auszugehen. Untersuchungen zum Vorrat insbesondere der Buchenjüngbestände und zum Wurzelwachstum könnten Einblicke in die weitere Aufteilung dieser Differenz geben.

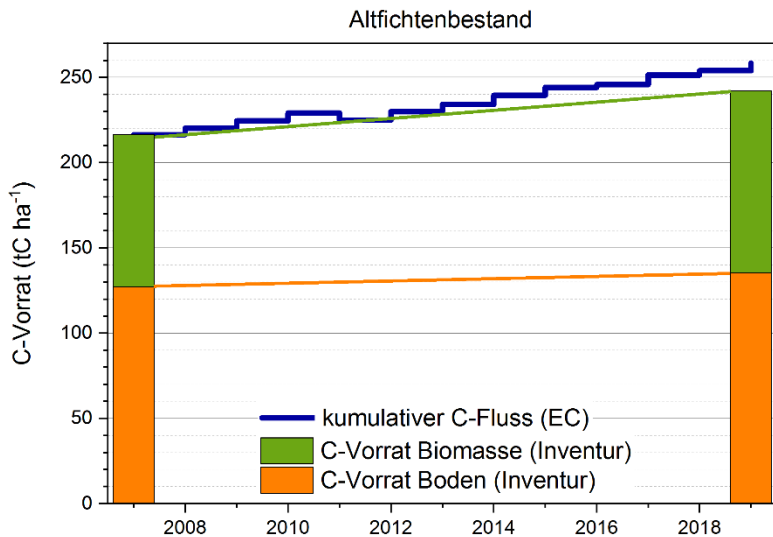


Abbildung 32: C-Vorräte in Boden und oberirdischer Biomasse der Fichten 2007 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse (NBP) nach EC-Methode zwischen 2007 und 2019 (Startwert: Summe der C-Vorräte 2007) am ICOS Standort Tharandt

Die größte Diskrepanz zwischen Inventuren und EC-Messungen wurde am Ackerstandort registriert. Während die Inventuren zwischen 2009 und 2018/2019 eine ebenfalls nicht signifikante Zunahme des C-Vorrats im Boden um $1,0 - 1,6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ausweisen, zeigen die C-Flüsse zwischen 2009 und 2019 eine signifikante Abnahme um $1,6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Abbildung 33). Dennoch liegen die nach EC-Methode erwarteten C-Vorräte 2018/2019 noch am unteren Rand des Interquartilbereiches der Vorratsverteilung der 15 Probenahmepunkte, so dass diese von den Inventurdaten nicht umfassend widerlegt werden.

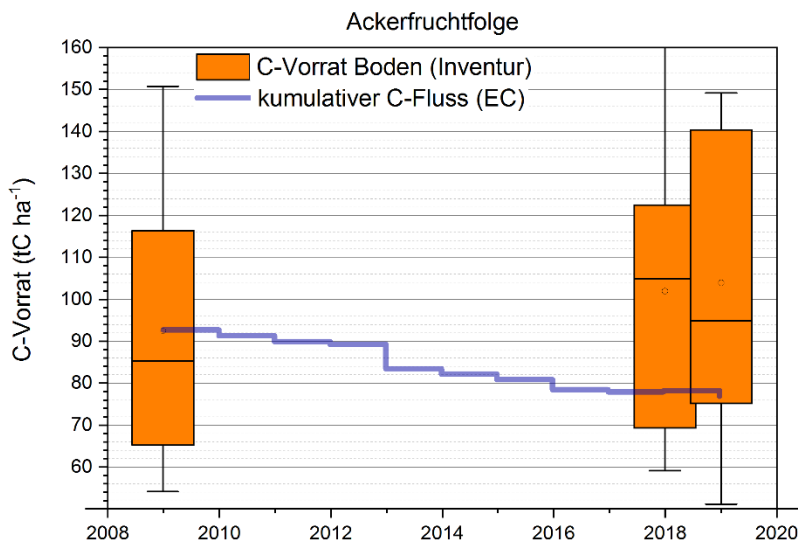


Abbildung 33: Räumliche Variabilität (Boxplots) der Boden-C-Vorräte 2009, 2018 und 2019 sowie kumulative C-Flüsse (NBP) nach EC-Methode zwischen 2009 und 2019 (Startwert: Mittelwert des C-Vorrates 2009) am ICOS Standort Klingenberg

Grundsätzlich sind die C-Vorratsänderungen im Boden an den drei ICOS-Standorten in einer Dekade zu gering, um diese mittels Inventuren mit 20 Probenahmepunkten signifikant nachweisen zu können. Nach Schrupf et al. (2011) betragen die minimal zeitlich auflösbaren Änderungen des C-Vorrats im Boden nach 20 Jahren 20 – 25 % der räumlichen Streuung. Bei entsprechendem Aufwand könnte eine Erhöhung der Probenahmepunkte der Bodeninventur auf bis zu 100 (Arrouays et al., 2018) die räumliche Streuung der C-Vorräte so weit reduzieren, dass signifikante zeitliche Änderungen in einer 10-Jahres-Periode erkennbar sind. Dagegen sind auch geringe Änderungen in den C-Bilanzen nach EC-Methode wegen der hohen zeitlichen Auflösung i.d.R. signifikant. Außerdem integrieren atmosphärische Flussmessungen räumlich über einen Bereich von mehreren Hektar (footprint). In die atmosphärische CO₂-Bilanz müssen jedoch C-Exporte und -Importe integriert werden, um sie mit den Vorratsänderungen im Boden vergleichbar zu machen. Eine mit weniger Unsicherheiten behaftete Erfassung dieser lateralen C-Flüsse an den ICOS-Standorten erfolgt gegenwärtig hinsichtlich des C-Exports, indem Probenahmen der oberirdischen Biomasse vor und nach der Ernte bzw. der Mahd durchgeführt werden.

Beide Erhebungsmethoden zeigen im Rahmen der gegebenen Unsicherheiten an zwei Standorten (Dauergrünland, Wald) ähnliche und erwartete Tendenzen der Kohlenstoffbindung. Die relativ hohe C-Freisetzung am Ackerstandort nach EC-Methode konnte dagegen durch die Inventuren nicht bestätigt werden.

Ein Vergleich mit den Emissionsfaktoren (EF), die im nationalen Inventarbericht für Deutschland für den Zeitraum bis 2018 angegeben werden (Strogies und Gniffke, 2019), zeigt für die Landnutzungen Wald und Dauergrünland der ICOS-Standorte eine tendenzielle Übereinstimmung, während sich der ICOS-Ackerstandort je nach Erhebungsmethode (Inventur, EC) unterschiedlich verhält. Im Folgenden (Tabelle 18) werden die nationalen EF (Strogies und Gniffke, 2019), sächsische EF (soweit möglich) und EF der ICOS-Standorte gegenübergestellt.

Tabelle 18: Emissionsfaktoren (EF) für verschiedene Landnutzungen und Kompartimente des nationalen Inventarberichts (DEU), für Sachsen (SN) und für ICOS-Standorte in Sachsen (negative Werte: CO₂-Senke)

EF (tC ha ⁻¹ a ⁻¹)	DEU ¹	SN ²	ICOS ³
Wald gesamt	-1,13	-2,1	-3,4 (EC)
Wald (Boden)	-0,41	-0,58	-0,7 (Inventuren)
Wald (unterirdische Biomasse)	-0,11		
Wald (oberirdische Biomasse)	-0,624	-1,52	-1,5 (Fichte)
Wald (Totholz)	-0,006		
Wald (Streu)	+0,02		
Dauergrünland gesamt	0		+0,1 (EC)
Dauergrünland (Boden)	0		-0,3 ... -0,8 (Inventuren)
Ackerfruchtfolge gesamt	0		+1,6 (EC)
Ackerfruchtfolge (Boden)	0		-1,0 ... -1,6 (Inventuren)

¹ Strogies und Gniffke, 2019 (2002 – 2012)

² Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019 (2002 – 2012)

³ dieser Bericht (2007/2009 – 2018/2019)

Der EF des Gesamtwaldes ist für Sachsen mit $-2,1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich niedriger (höhere CO_2 -Senke) als für Deutschland insgesamt ($-1,13 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Beide EF beziehen sich auf den Zeitraum 2002 – 2012. In der Periode 2012 – 2017 vergrößerte sich die CO_2 -Senke im deutschen Wald auf $-1,58 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Sollte sich für den sächsischen Wald ein ähnlicher Trend abzeichnen, wäre zu erwägen, den EF für den sächsischen Wald entsprechend anzupassen (keine Übernahme des nationalen EF). Der fichtendominierte ICOS-Standort weist mit $-2,1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2002 – 2012) bzw. $-4,4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2012 – 2017) die niedrigsten EF für das Ökosystem Wald auf (diese sind standortspezifisch abhängig von Anzahl und Umfang der Durchforstungen in den jeweiligen Zeiträumen). Bei diesem Standort handelt es sich um einen weitgehend ungestörten Bestand, der deshalb nicht repräsentativ für den sächsischen Gesamtwald sein kann. Die Differenz des deutschen und sächsischen EF für den Gesamtwald resultiert im Wesentlichen aus der Speicheränderung in der oberirdischen Biomasse. Für den Waldboden (inkl. unterirdische Biomasse) sind dagegen die nationalen und sächsischen EF gleich ($-0,58 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Waldboden-C-Inventuren (ohne unterirdische Biomasse) am ICOS-Standort ergaben einen nicht signifikanten EF von $-0,7 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die verschiedenen Bezugszeiträume ergeben sich aus den Bezugsjahren der Boden-C-Inventuren am ICOS-Standort.

Für Dauergrünland und Ackernutzung (jeweils ohne Landnutzungsänderung) werden im nationalen Inventarbericht (Strogies und Gniffke, 2019) keine Änderungen im C-Vorrat sowohl der Mineralböden als auch der Biomasse ausgewiesen ($\text{EF} = 0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Für Sachsen können auf Basis der C-Vorratsänderungen an den BDF aus in Kap. 2.4 genannten Gründen keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Am ICOS-Standort mit der Landnutzung Dauergrünland wird der nationale EF im Wesentlichen bestätigt (EC: $+0,1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Inventuren: $-0,3$ bis $-0,8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Am größten sind die Differenzen für die ackerbauliche Landnutzung. Während die EC-Messungen am ICOS-Standort mit $+1,6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich nach oben vom nationalen EF abweichen, zeigen die Inventuren mit einem EF von $-1,0$ bis $-1,6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine (nicht signifikante) CO_2 -Senke.

Für Sachsen ergeben sich aus den vorliegenden Berechnungen (BDF, DTF) und Messungen an den ICOS-Standorten kaum Argumente, vom nationalen EF für die Landnutzungen Dauergrünland und Acker abzuweichen, weshalb diese weiterhin als C-neutral betrachtet werden sollten. Dagegen deuten sowohl Berechnungen für den sächsischen Wald auf Basis von BZE und BWI (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019) als auch EC-Messungen an Waldstandorten eine größere CO_2 -Senke an als im nationalen Inventarbericht (Strogies und Gniffke, 2019) angegeben. Eine Anpassung des EF für den sächsischen Wald könnte deshalb erwogen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für Sachsen liegen jährliche Bilanzierungen der THG-Quellen vor (Schreiber, 2015). Analoge Quantifizierungen insbesondere von CO₂-Senken in sächsischen Ökosystemen sind bisher nicht erfolgt. Deswegen war es ein Ziel des Projektes »C-Speicherung und -Freisetzung aus Böden unter landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung«, die vorhandenen Datengrundlagen zu den Kohlenstoffvorräten in den Bereichen Forst, Boden und Landwirtschaft zusammenzuführen sowie an Intensivstandorten (ICOS) atmosphärische Flussmessungen und C-Inventuren zu evaluieren.

Basierend auf vorliegenden Bodendaten zum organischen Kohlenstoffgehalt, Lagerungsdichte und Skelettgehalt wurden Kohlenstoffvorräte für die Tiefenstufe bis 60 cm an 60 BDF für verschiedene Stichjahre im Zeitraum 1995 – 2017 berechnet. Für die 857 DTF lagen nur C_{org}-Gehalte für die Tiefenstufe bis 30 cm für den Zeitraum 1997 – 2017 vor, so dass die C-Vorräte unter vereinfachenden Annahmen (konstante Lagerungsdichte, kein Skelett) nur geschätzt werden konnten. Für den Wald lagen C-Vorräte der BZE1 und BZE2 für die Humusaufgabe und den Mineralboden (bis 90 cm Tiefe) sowie der oberirdischen Biomasse (BW12 und BW13) vor. Auf Grund der hohen räumlichen und zeitlichen Streuung der C-Vorräte an BDF und DTF konnten keine (bodentypabhängigen) Höhengradienten oder Regressionen des C-Vorrates mit der mittleren Temperatur oder dem mittleren Niederschlag ermittelt werden, die eine belastbare Hochrechnung für unbeobachtete Gebiete erlauben würden. Eine Bilanzierung der C-Vorräte im Boden der Landnutzungen Forst, Grünland und Acker auf Basis des vorhandenen Datenmaterials (BZE, BDF, DTF) zeigt, dass im Waldboden ca. 120 tC ha⁻¹ gespeichert ist, während im Boden von Grünland und Acker der Vorrat ca. 110 tC ha⁻¹ bzw. ca. 65 tC ha⁻¹ beträgt. Mit den jeweiligen Aktivitätsflächen ergibt sich daraus für Sachsen im Zeitraum 2014 – 2017 ein C-Vorrat in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden von 126,1 Mio tC (Wald: 59,4 Mio tC, Acker: 45,7 Mio tC, Grünland: 21,0 Mio tC).

Einen Schwerpunkt bildeten Untersuchungen zum Kohlenstoffhaushalt an langjährig mittels Eddy-Kovarianz-Technik intensiv beobachteten sächsischen ICOS-Standorten typischer Landnutzungen (Altfichtenbestand, Dauergrünland, Ackerfruchtfolge). Hintergrund war die beobachtete Diskrepanz in den C-Bilanzen auf Basis atmosphärischer Flussmessungen und wiederholter C-Inventuren insbesondere der ackerbaulichen Landnutzung (Grünwald, 2019). Auf Grundlage kontinuierlicher CO₂-Flussmessungen seit mindestens 2004 und Bodenkohlenstoffinventuren im Zeitraum 2007 – 2009 konnte nun durch wiederholte Inventuren die aus den EC-Messungen bestimmte C-Bilanz unabhängig überprüft werden. Mit hohem Aufwand wurde an den drei Standorten an 15 bis 22 Probenahmepunkten der Bodenkohlenstoffvorrat ermittelt. Aus der hohen räumlichen Streuung der C-Vorräte folgte jedoch, dass zeitliche Änderungen in einem Zeitraum von 9 bis 13 Jahren in der erwarteten Größenordnung nicht signifikant waren. Vor diesem Hintergrund konnte trotzdem die C-Neutralität des Dauergrünlandes im Wesentlichen bestätigt werden. Der Waldbestand zeigte eine Zunahme des Kohlenstoffvorrates im Boden und in der oberirdischen Biomasse der Fichten. Die deutliche Netto-CO₂-Senke der EC-Messungen konnte bestätigt werden. Der relativ hohen C-Freisetzung am Ackerstandort von 1,6 tC ha⁻¹ a⁻¹ (EC) steht dagegen eine (nicht signifikante) Zunahme des C-Vorrates im Boden von 1,1 tC ha⁻¹ a⁻¹ gegenüber. Diese methodische Unsicherheit bleibt Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Ein Vergleich mit den im nationalen Inventarbericht für Deutschland angegebenen Emissionsfaktoren (Strogies und Gniffke, 2019) zeigt für den Grünlandstandort eine weitgehende Übereinstimmung, während sich der Ackerstandort je nach Erhebungsmethode unterschiedlich verhält. Deswegen wird für diese landwirtschaftlichen Nutzungen keine Anpassung des nationalen Emissionsfaktors für Sachsen empfohlen. Dagegen ist im Zeitraum 2002 bis 2012 der sächsische Wald mit $2,1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine deutlich höhere CO_2 -Senke als der deutsche Wald insgesamt ($1,13 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Im Zeitraum 2012 – 2017 vergrößerte sich die CO_2 -Senke im deutschen Wald auf $1,58 \text{ tC ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Sollte sich für den sächsischen Wald ein ähnlicher Trend abzeichnen, wäre zu erwägen, den Emissionsfaktor für den sächsischen Wald entsprechend anzupassen und nicht den nationalen Emissionsfaktor zu übernehmen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden weiterhin Empfehlungen für das Monitoring von Kohlenstoffvorratsänderungen und CO_2 -Flüssen in sächsischen Ökosystemen erarbeitet (s. Anhang 2). Diese basieren auf langjährige Anstrengungen und erheblichen Investitionen in die Messnetze der beteiligten Institutionen LfULG, SBS und TU Dresden. Vorgeschlagen werden u.a.

- zeitlich harmonisierte Inventuren des C-Vorrates in landwirtschaftlichen und forstlichen Ökosystemen in einem Stichjahr,
- Bodenprobenahmen zusätzlich zum bestehenden Messprogramm so zu gestalten, dass die Tiefenstufen 0 – 30 cm und 30 – 60 cm abgedeckt werden können und
- eine Verstetigung und kontinuierliche Fortsetzung des Messprogramms an den sächsischen ICOS-Standorten, um eine zeitlich höher aufgelöste quantitative Beurteilung der Auswirkungen von Störungen und Managementoptionen auf den Kohlenstoffhaushalt zu ermöglichen.

Auf dieser Basis könnte ein systematisch integriertes Monitoring Synergien nutzbar machen, um mit moderatem Zusatzaufwand eine belastbare Bestimmung der Kohlenstoffbindung in Sachsen zu ermöglichen und im Rahmen des THG-Monitorings den sächsischen Treibhausgasquellen künftig eine konsistente Abschätzung der sächsischen CO_2 -Senken gegenüberzustellen.

Literaturverzeichnis

- AG Boden, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, & Sponagel, H. (Hg.), 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung: mit 103 Tabellen und 31 Listen (5., verbesserte und erweiterte Auflage). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).
- C. ALEWELL, 2001: C- und N-Gehalte sowie -Vorräte auf der Messfläche 'Coulissenhieb' – Ergebnisse einer Humusinventur. In: Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald (ed. Gerstberger, P.), pp. 33–35. Bayreuther Inst. für Terrestrische Ökosystemforschung, Bayreuth.
- T. ANGELOPOULOU, N. TZIOLAS, A. BALAFOUTIS, G. ZALIDIS, D. BOCHTIS, 2019: Remote Sensing Techniques for Soil Organic Carbon Estimation: A Review. *Remote Sens.*, 11, 676.
<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/6/676/htm>
- D. ARROUAYS, N.P.A. SABY, H. BOUKIR, C. JOLIVET, C. RATIÉ, M. SCHRUMPF, L. MERBOLD, B. GIELEN, S. GOGO, N. DELPIERRE, G. VINCENT, K. KLUMPP, D. LOUSTAU, 2018: Soil sampling and preparation for monitoring soil carbon. *Int. Agrophys.*, 32, 633–643. <http://www.international-agrophysics.org/Soil-sampling-and-preparation-for-monitoring-soil-carbon,104350,0,2.html>
- D. BALDOCCHI, E. FALGE, L. GU, R. OLSON, D. HOLLINGER, S. RUNNING, P. ANTHONI, CH. BERNHOFER, K. DAVIS, R. EVANS, J. FUENTES, A. GOLDSTEIN, G. KATUL, B. LAW, X. LEE, Y. MALHI, T. MEYERS, W. MUNGER, W. OECHEL, K. T. PAW U, K. PILEGAARD, H. P. SCHMID, R. VALENTINI, S. VERMA, T. VESALA, K. WILSON, S. WOFSY, 2001: FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82 (11), 2415 - 2434.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/82/11/1520-0477_2001_082_2415_fantts_2_3_co_2.xml
- N. BARTH, W. BRANDTNER, E. CORDSEN, T. DANN, K.-H. EMMERICH, D. FELDHAUS, B. KLEEFISCH, B. SCHILLING, J. UTERMANN, 2000: Boden-Dauerbeobachtung. Einrichtung und Betrieb von Bodendauerbeobachtungsflächen. In: Rosenkranz/Einsele/Harreß: Handbuch Bodenschutz, Band 3, KennNr: 9152.
- R. BENNING, E. PICKERT, H. JOISTEN, R. SYMMANGK, R. STACHE, 2019: Fachinformationssystem Boden. BML Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1990: Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) – Arbeitsanleitung, Bonn.
- A. DON, J. SCHUMACHER, M. SCHERER-LORENZEN, T. SCHOLTEN, E.D. SCHULZE, 2007: Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites - Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141, 272–282.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706107001711>
- B.H. ELLERT, J.R. BETTANY, 1995: Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 529–538.
<https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss95-075>
- FAO, 2010: Global Forest Resources Assessment 2010, Main report, FAO Forestry paper 163, 340 S.
<http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/>
- H. FLESSA, A. DON, A. JACOBS, R. DECHOW, B. TIEMEYER, C. POEPLAU, 2018: Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 521.
<https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.html>

- J. GAUER, F. KROIHER (Hg.), 2012: Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke –. Digitale Topographische Grundlagen – Neubearbeitung Stand 2011. Unter Mitarbeit von Norbert Asche (NW), Cihan-Tarih Aydin (SH), Andreas Bolte (vTI), Claus Böttcher (SH), Karl Burse (TH), Erich Fritz (SL), Jürgen Gauer (RP), Dietmar Frömdling (MV), Rolf-Peter Hinrichsen (SH), Marieanna Holzhausen (TI), Wolfgang Katzschner (SN), Christian Kölling (BY), Alexander Konopatzky (BB), Hans-Jörg Korb (RP), Ernst Kraft (HE), Till Kirchner (vTI), Franz Kroiher (vTI), Michael Ley (RP), Hans-Gerd Michiels (BW), Falko Ohlmeyer (ST), Hannelore Reuß (HE), Thomas Riedel (vTI), Dieter Seemann (BW), Ute Sprengemann (ST), Volker Stüber (NI), Stefan Stiefel (TH), Thomas Ullrich (HE), Michael Wirner (MV), Barbara Wolff (HNE Eberswalde), Eberhard Aldinger (BW). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Landbauforschung Sonderheft, 359). http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050265.pdf
- R. GEBAUER, M. MARTINKOVA, 2005: Effects of pressure on the root systems of Norway spruce plants (*Picea abies* [L.] Karst.). *Journal of Forest Science*, 51, 268–275.
- E. GOIDTS, B. VAN WESEMAEL, M. CRUCIFIX, 2009: Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *European Journal of Soil Science*, 60, 723-739. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01157.x>
- E. GRÜNEBERG, W. RIEK, I. SCHÖNING, J. EVERS, P. HARTMANN, D. ZICHE, 2018: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland, Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald. Kartenband zu Kapitel 6: Kohlenstoffvorräte und deren zeitliche Veränderung in Waldböden. https://www.thuenen.de/media/institute/wo/Waldmonitoring/bze/kartenband/BZEII_2016_KB_6_Kohlenstoff.pdf.
- T. GRÜNWALD, 2019: Istanalyse C-Bindung Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 46 S., <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32640>.
- Gutachterausschuss Forstliche Analytik (GAFA, Hg.), 2014: Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk 2005 mit Ergänzungen 1 bis 5. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/Bodenzustands_erhebung/Handbuch/Z-Ergaenzung5.html (14.11.2019).
- S.P. HAMBURG, M.A. VADEBONCOEUR, C.E. JOHNSON, J. SANDERMAN, 2019: Losses of mineral soil carbon largely offset biomass accumulation 15 years after whole-tree harvest in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 144, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00568-3>
- Integrated Carbon Observation System (ICOS) Research Infrastructure, 2020: ICOS Handbook 2020, ICOS ERIC, Helsinki. <https://www.icos-cp.eu/sites/default/files/cmis/ICOS%20Handbook%202020.pdf>
- F. JACOB, H. ANDREA, N. EICKENSCHIEDT, N. AUGUSTIN, 2018: Sächsischer Waldbodenbericht: aktueller Waldbodenzustand und dessen Veränderung. Pirna: Staatsbetrieb Sachsenforst (Schriftenreihe 30), 160 S..(At: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32359>).
- A. JACOBS, H. FLESSA, A. DON, A. HEIDKAMP, R. PRIETZ, R. DECHOW, A. GENSIO, C. POEPLAU, C. RIGGERS, F. SCHNEIDER, B. TIEMEYER, C. VOS, M. WITTNEBEL, T. MÜLLER, A. SÄURICH, A. FAHRION-NITSCHKE, S. GEBBERT, R. HOPFSTOCK, A. JACONI, H. KOLATA, M. LORBEER, J. SCHRÖDER, A. LAGGNER, C. WEISER, A. FREIBAUER, 2018: Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. www.dnb.de
- E.G. JOBBAGY, R.B. JACKSON, 2000: The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*, 10, 423. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- T. KRISTENSEN, M. OHLSON, P. BOLSTAD, Z. NAGY, 2015: Spatial variability of organic layer thickness and carbon stocks in mature boreal forest stands – implications and suggestions for sampling designs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-4741-x>

- LfULG - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hg.), 2010: Bodenlehrpfad Tharandter Wald. Exkursionsführer. Verfügbar unter: <https://www.lfulg.sachsen.de/tharandter-wald-8211.html> (14.11.2019).
- P. MUUKKONEN, M. HÄKKINEN, R. MÄKIPÄÄ, 2009: Spatial variation in soil carbon in the organic layer of managed boreal forest soil-implications for sampling design. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158, 67–76. <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10661-008-0565-2>
- C. OERTEL, 2017: Analyse von Bodenentgasungen in Sachsen mit Kammersystemen. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- PASTORELLO, GILBERTO, TROTTA, CARLO, CANFORA, ELEONORA, CHU, HOUSEN, CHRISTIANSON, DANIELLE, CHEAH, YOU-WEI, POINDEXTER, CRISTINA, CHEN, JIQUAN, ELBASHANDY, ABDELRAHMAN, HUMPHREY, MARTY, ISAAC, PETER, POLIDORI, DIEGO, RIBECA, ALESSIO, VAN INGEN, CATHARINE, ZHANG, LEIMING, AMIRO, BRIAN, AMMANN, CHRISTOF, ARAIN, M. ALTAF, ARDÖ, JONAS, ARKEBAUER, TIMOTHY, ARNDT, STEFAN K., ARRIGA, NICOLA, AUBINET, MARC, AURELA, MIKA, BALDOCCHI, DENNIS, BARR, ALAN, BEAMESDERFER, ERIC, MARCHESINI, LUCA BELELLI, BERGERON, ONIL, BERINGER, JASON, BERNHOFER, CHRISTIAN, BERVEILLER, DANIEL, BILLESBACH, DAVE, BLACK, THOMAS ANDREW, BLANKEN, PETER D., BOHRER, GIL, BOIKE, JULIA, BOLSTAD, PAUL V., BONAL, DAMIEN, BONNEFOND, JEAN-MARC, BOWLING, DAVID R., BRACHO, ROSVEL, BRODEUR, JASON, BRÜMMER, CHRISTIAN, BUCHMANN, NINA, BURBAN, BENOIT, BURNS, SEAN P., BUYSSE, PAULINE, CALE, PETER, CAVAGNA, MAURO, CELLIER, PIERRE, CHEN, SHIPING, CHINI, ISAAC, CHRISTENSEN, TORBEN R., CLEVERLY, JAMES, COLLALTI, ALESSIO, CONSALVO, CLAUDIA, COOK, BRUCE D., COOK, DAVID, COURSOLE, CAROLE, CREMONESE, EDOARDO, CURTIS, PETER S., D'ANDREA, ETTORE, DA ROCHA, HUMBERTO, DAI, XIAOQIN, DAVIS, KENNETH J., DE CINTI, BRUNO, DE GRANDCOURT, AGNES, DE LIGNE, ANNE, DE OLIVEIRA, RAIMUNDO C., DELPIERRE, NICOLAS, DESAI, ANKUR R., DI BELLA, CARLOS MARCELO, DI TOMMASI, PAUL, DOLMAN, HAN, DOMINGO, FRANCISCO, DONG, GANG, DORE, SABINA, DUCE, PIERPAOLO, DUFRÊNE, ERIC, DUNN, ALLISON, DUŠEK, JIŘÍ, EAMUS, DEREK, EICHELMANN, UWE, ELKHIDIR, HATIM ABDALLA M., EUGSTER, WERNER, EWENZ, CACILIA M., EWERS, BRENT, FAMULARI, DANIELA, FARES, SILVANO, FEIGENWINTER, IRIS, FEITZ, ANDREW, FENSHOLT, RASMUS, FILIPPA, GIANLUCA, FISCHER, MARC, FRANK, JOHN, GALVAGNO, MARTA, GHARUN, MANA, GIANELLE, DAMIANO, GIELEN, BERT, GIOLI, BENIAMINO, GITELSON, ANATOLY, GODED, IGNACIO, GOECKEDE, MATHIAS, GOLDSTEIN, ALLEN H., GOUGH, CHRISTOPHER M., GOULDEN, MICHAEL L., GRAF, ALEXANDER, GRIEBEL, ANNE, GRUENING, CARSTEN, GRÜNWARD, THOMAS, HAMMERLE, ALBIN, HAN, SHIJIE, HAN, XINGGUO, HANSEN, BIRGER ULF, HANSON, CHAD, HATAKKA, JUHA, HE, YONGTAO, HEHN, MARKUS, HEINESCH, BERNARD, HINKO-NAJERA, NINA, HÖRTNAGL, LUKAS, HUTLEY, LINDSAY, IBROM, ANDREAS, IKAWA, HIROKI, JACKOWICZ-KORCZYNSKI, MARCIN, JANOUŠ, DALIBOR, JANS, WILMA, JASSAL, RACHHPAL, JIANG, SHICHENG, KATO, TOMOMICHI, KHOMIK, MYROSLAVA, KLATT, JANINA, KNOHL, ALEXANDER, KNOX, SARA, KOBAYASHI, HIDEKI, KOERBER, GEORGIA, KOLLE, OLAF, KOSUGI, YOSHIKO, KOTANI, AYUMI, KOWALSKI, ANDREW, KRUIJT, BART, KURBATOVA, JULIA, KUTSCH, WERNER L., KWON, HYOJUNG, LAUNIAINEN, SAMULI, LAURILA, TUOMAS, LAW, BEV, LEUNING, RAY, LI, YINGNIAN, LIDDELL, MICHAEL, LIMOUSIN, JEAN-MARC, LION, MARRYANNA, LISKA, ADAM J., LOHILA, ANNALEA, LÓPEZ-BALLESTEROS, ANA, LÓPEZ-BLANCO, EFRÉN, LOUBET, BENJAMIN, LOUSTAU, DENIS, LUCAS-MOFFAT, ANTJE, LÜERS, JOHANNES, MA, SIYAN, MACFARLANE, CRAIG, MAGLIULO, VINCENZO, MAIER, REGINE, MAMMARELLA, IVAN, MANCA, GIOVANNI, MARCOLLA, BARBARA, MARGOLIS, HANK A., MARRAS, SERENA, MASSMAN, WILLIAM, MASTEPANOV, MIKHAIL, MATAMALA, ROSER, MATTHES, JACLYN HATALA, MAZZENGA, FRANCESCO, MCCAUGHEY, HARRY, MCHUGH, IAN, MCMILLAN, ANDREW M. S., MERBOLD, LUTZ, MEYER, WAYNE, MEYERS, TILDEN, MILLER, SCOTT D., MINERBI, STEFANO, MODEROW, UTA, MONSON, RUSSELL K., MONTAGNANI, LEONARDO, MOORE, CAITLIN E., MOORS, EDDY, MOREAUX, VIRGINIE, MOUREAUX, CHRISTINE, MUNGER, J. WILLIAM, NAKAI, TARO, NEIRYNCK, JOHAN, NESIC, ZORAN, NICOLINI, GIACOMO, NOORMETS, ASKO, NORTHWOOD, MATTHEW, NOSETTO, MARCELO, NOUVELLON, YANN, NOVICK, KIMBERLY, OECHEL, WALTER, OLESEN, JØRGEN EIVIND, OURCIVAL, JEAN-MARC, PAPUGA, SHIRLEY A., PARMENTIER, FRANS-JAN, PAUL-LIMOGES, EUGENIE, PAVELKA, MARIAN, PEICHL, MATTHIAS, PENDALL, ELISE, PHILLIPS, RICHARD P., PILEGAARD, KIM, PIRK, NORBERT, POSSE, GABRIELA, POWELL, THOMAS, PRASSE, HEIKO, PROBER, SUZANNE M., RAMBAL, SERGE, RANNIK, ÜLLAR, RAZ-YASEEF, NAAMA, REED, DAVID, DE DIOS, VICTOR RESCO, RESTREPO-COUBE, NATALIA,

REVERTER, BORJA R., ROLAND, MARILYN, SABBATINI, SIMONE, SACHS, TORSTEN, SALESKA, SCOTT R., SÁNCHEZ-CAÑETE, ENRIQUE P., SANCHEZ-MEJIA, ZULIA M., SCHMID, HANS PETER, SCHMIDT, MARIUS, SCHNEIDER, KARL, SCHRADER, FREDERIK, SCHRODER, IVAN, SCOTT, RUSSELL L., SEDLÁK, PAVEL, SERRANO-ORTÍZ, PENÉLOPE, SHAO, CHANGLIANG, SHI, PEILI, SHIRONYA, IVAN, SIEBICKE, LUKAS, SIGUT, LADISLAV, SILBERSTEIN, RICHARD, SIRCA, COSTANTINO, SPANO, DONATELLA, STEINBRECHER, RAINER, STEVENS, ROBERT M., STURTEVANT, COVE, SUYKER, ANDY, TAGESSON, TORBERN, TAKANASHI, SATORU, TANG, YANHONG, TAPPER, NIGEL, THOM, JONATHAN, TIEDEMANN, FRANK, TOMASSUCCI, MICHELE, TUOVINEN, JUHA-PEKKA, URBANSKI, SHAWN, VALENTINI, RICCARDO, VAN DER MOLEN, MICHIEL, VAN GORSEL, EVA, VAN HUISSTEDEN, KO, VARLAGIN, ANDREJ, VERFAILLIE, JOSEPH, VESALA, TIMO, VINCKE, CAROLINE, VITALE, DOMENICO, VYGODSKAYA, NATALIA, WALKER, JEFFREY P., WALTER-SHEA, ELIZABETH, WANG, HUIMIN, WEBER, ROBIN, WESTERMANN, SEBASTIAN, WILLE, CHRISTIAN, WOFYSY, STEVEN, WOHLFAHRT, GEORG, WOLF, SEBASTIAN, WOODGATE, WILLIAM, LI, YUELIN, ZAMPEDRI, ROBERTO, ZHANG, JUNHUI, ZHOU, GUOYI, ZONA, DONATELLA, AGARWAL, DEB, BIRAUD, SEBASTIEN, TORN, MARGARET, PAPALE, DARIO, 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Sci Data* 7, 225 (2020).
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>.

- G. RABEN, H. ANDREAE, H. KARST, F. SYMOSSEK, F. LEUBE, 2004: Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern. Freistaat Sachsen, Landesforstpräsidium.
- R CORE TEAM, 2020: R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- S. RUNNING, Q. MU, M. ZHAO, 2015: MOD17A3H MODIS/Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3H.006>.
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2013: Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/19813>
- SAG, 1991: Konzeption zur Einrichtung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen – Bericht der Unterarbeitsgruppe „Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ im Auftrag der Sonderarbeitsgruppe „Informationsgrundlagen Bodenschutz“ – München.
- U. SCHREIBER, 2015: Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen in Sachsen, Jahresbericht 2012. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13414>
- M. SCHRUMPF, E.D. SCHULZE, K. KAISER, J. SCHUMACHER, 2011: How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 8, 1193–1212. <https://bg.copernicus.org/articles/8/1193/2011/>
- Staatsbetrieb Sachsenforst, 2019: Die Kohlenstoffbilanz des sächsischen Waldes 2002-2012. Kurzfassung. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34682>
- M. STROGIES, P. GNIFFKE, 2019: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020, Umweltbundesamt–UNFCCC-Submission. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-5>
- R. TANNERT, N. BARTH, C. LAUSCH, A. BEUGE, 2019: Stoffkreisläufe an Boden-Dauerbeobachtungsflächen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 162 S. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/34468>

- B. TIEMEYER, A. FREIBAUER, M. DRÖSLER, E. ALBIAC-BORRAZ, J. AUGUSTIN, M. BECHTOLD, S. BEETZ, S. BELTING, M. BERNRIEDER, C. BEYER, J. EBERL, T. EICKENSCHIEDT, H. FELL, S. FIEDLER, C. FÖRSTER, E. FRAHM, S. FRANK, M. GIEBELS, S. GLATZEL, T. GRÜNWALD, J. HEINICHEN, M. HOFFMANN, J. HOMMELTENBERG, H. HÖPER, A. LAGGNER, K. LEIBER-SAUHEITL, T. LEPELT, C. METZGER, M. PEICHL-BRAK, S. RÖHLING, N. ROSSKOPF, T. RÖTZER, M. SOMMER, M. WEHRHAN, P. WERLE, J. ZEITZ, 2013: Klimarelevanz von Mooren und Anmooren in Deutschland: Ergebnisse aus dem Verbundprojekt „Organische Böden in der Emissionsberichterstattung“. Thünen Working Paper 15, Braunschweig/Germany. http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn052806.pdf
- F. WALDMANN, W. WEINZIERL, 2014: Organische Kohlenstoffvorräte der Böden Baden-Württembergs in Abhängigkeit von Bodentyp, Bodenart, Klima und Landnutzung. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 63 S. <https://pd.lubw.de/13155>
- N. WELLBROCK, A. BOLTE, H. FLESSA, 2016: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report, 43, 557 S. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_43.pdf.
- C.A. WILLIAMS, G. J. COLLATZ, J. MASEK, C. HUANG, S. N. GOWARD, 2014: Impacts of disturbance history on forest carbon stocks and fluxes: Merging satellite disturbance mapping with forest inventory data in a carbon cycle model framework. *Remote Sensing of Environment*, 151, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.034>

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Anhang A: Inventuren des C-Vorrats im Boden	82
Horizontgrenzen und Profilfotos	82
Fotos der Bohrkern.....	87
Volumenberechnung für den Standort Tharandt.....	89
Analyseplots der multiplen linearen Regressionen	90
Anhang B: Empfehlungen für das Monitoring von Kohlenstoffvorratsänderungen und CO₂- Flüssen in sächsischen Ökosystemen	99
Zusammenfassung für Entscheidungsträger	99
Aktuelles Monitoring	100
Zielsetzung für ein künftiges Monitoring.....	100
Optionen für das künftige Monitoring in sächsischen Ökosystemen	101

Anhang A: Inventuren des C-Vorrats im Boden

Horizontgrenzen und Profilfotos

Tabelle A 1: Horizontgrenzen der Profilsprache 2019 für die Standorte Klingenberg und Grillenburg

Klingenberg (Acker)			Grillenburg (Grünland)					
Profil	Horizont	Untere Horizont-grenze	Profil	Horizont	Untere Horizont-grenze	Profil	Horizont	Untere Horizont-grenze
B1	Ap	15	A1	Ah	15	F5	Ah	18
B1	Sw-rAp	26	A1	Sw-rAp	39	F5	Sw-rAp	32.5
B1	II(Al-)Sdw	34	A1	Sw	54.5	F5	Sew	55.5
B1	III(Bt-)Go-Sd	50	A1	Sd	90	F5	Swd	78
B1	IVSw-Gro	60	A2	Ah	17.5	F5	Sd	90
B2	Ap	20	A2	Sw-rAp	50.5	F6	Ah	18
B2	Sw-rAp	32	A2	Sw	76	F6	Sw-rAp	29
B2	II(Al-)Sdw	45	A2	Sd	90	F6	Sew	46
B2	III(Bt-)Go-Sd	60	A3	Ah	15	F6	Sd	90
B3	Ap	15	A3	Sw-rAp	40.5	G1	Ah	11
B3	Sw-rAp	25	A3	Swd	67.5	G1	Sw-rAp	23
B3	IISdw	42	A3	Sd	90	G1	Sew	41
B3	III Go-Sw	60	A4	Ah	15	G1	Sd	90
B4	Ap	25	A4	Sw-rAp	30	G2	Ah	15
B4	Al-Sw	30	A4	Sw	60	G2	Sw-rAp	26.5
B4	II Bt-Sd	50	A4	Sd	90	G2	Sw	54.5
B4	III(Bt-)Sd	60	A5	Ah	16.5	G2	Sd	90
B5	Ap	20	A5	rAp-Sw	40.5	G3	Ah	15.5
B5	jM	35	A5	Swd	75	G3	Sw-rAp	30
B5	IISw	60	A5	Sd	90	G3	Sw	52.5
C1	Ap	15	A6	Ah	18	G3	Sd	90
C1	Sw-rAp	23	A6	rAp-Sw	40.5	G4	Ah	15
C1	IISw	32	A6	Sw	51	G4	Sw-rAp	32
C1	IIISwd	50	A6	Swd	75	G4	Sew	44.5
C1	IVSd	60	A6	Sd	90	G4	Sw	60.5
C2	Ap	20	C1	Ah	15	G4	Sd	90
C2	II(Ael-)Sdw	30	C1	rAp	33	G5	Ah	15
C2	III(Ael+Bt-)Swd	60	C1	(Al)Sw	41.5	G5	Sw-rAp	30.5
C3	Ap	14	C1	(Bt)Sd	90	G5	rAp-Sw	41.5
C3	Sw-rAp	22	C2	Ah	16.5	G5	Swd	90
C3	IISd	34	C2	Sw-rAp	29.5	G6	Ah	14
C3	III Go-Sd	60	C2	Swd	61.5	G6	Sw-rAp	32
C4	Ap	15	C2	IIISwd	76.5	G6	Sew	54.5
C4	IISw-rAp	24	C2	IIISd	90	G6	Sd	90
C4	IIISd	30	C3	Ah	15.5			
C4	IVSd	60	C3	(Sw)-rAp	37			
C5	Ap	20	C3	Swd	80			
C5	II(Ael+Bt-)Sdw	30	C3	Sd	90			
C5	(Bt-)Sd	60	C5	Ah	16.5			
D1	Ap	15	C5	Sw-rAp	36			
D1	rAp	25	C5	Sw	68.5			
D1	IISdw	45	C5	Sd	90			
D1	III Go-Sw	60	C6	Ah	18			
D2	Ap	20	C6	Sw-rAp	34.5			
D2	IISwd	40	C6	Sw	58.5			
D2	III Go-Sdw	60	C6	Sd	90			
D3	Ap	20	F1	Ah	15			
D3	IISdw	25	F1	Sw-rAp	38.5			
D3	Swd	35	F1	Swd	60			
D3	III Go-Sd	60	F1	Sd	90			
D4	Ap	12	F2	Ah	12			
D4	IISdw	20	F2	Sw-rAp	27			
D4	III Go-Sd	60	F2	Sew	52.5			
D5	Ap	15	F2	Swd	90			
D5	rAp	25	F3	Ah	15			
D5	(Ael+Bt-)Sw	30	F3	Sw-rAp	29.5			
D5	(Ael+Bt-)Sdw	40	F3	Sw	65.5			
D5	(Bt-)Go-Sd	60	F3	Sd	90			

Abbildung A 1: Profilfotos für den Standort Klingenberg (Fotos: C. Schmidt-Cotta)

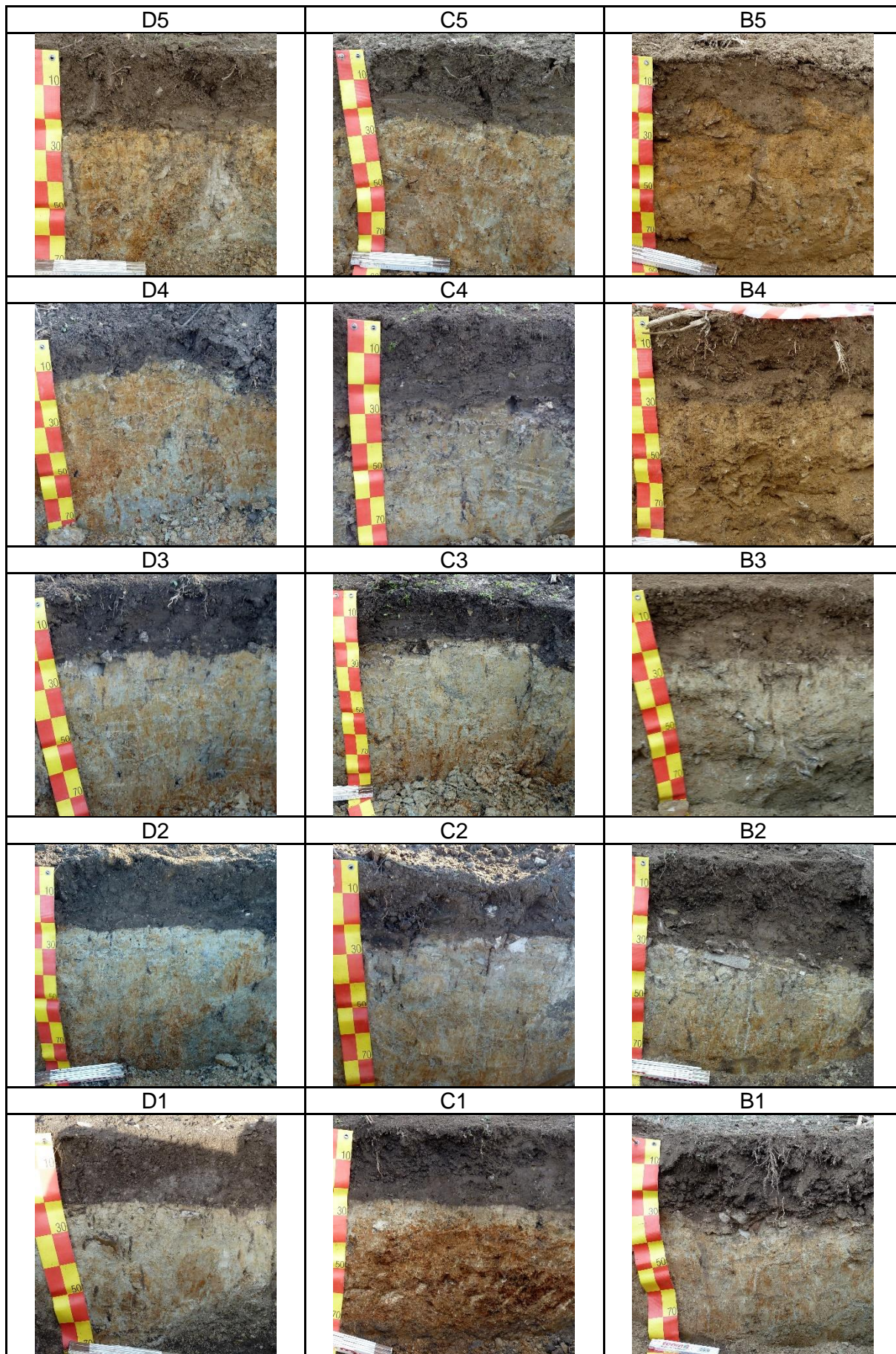


Abbildung A 2: Profilfotos für den Standort Grillenburg (Fotos: C. Schmidt-Cotta)

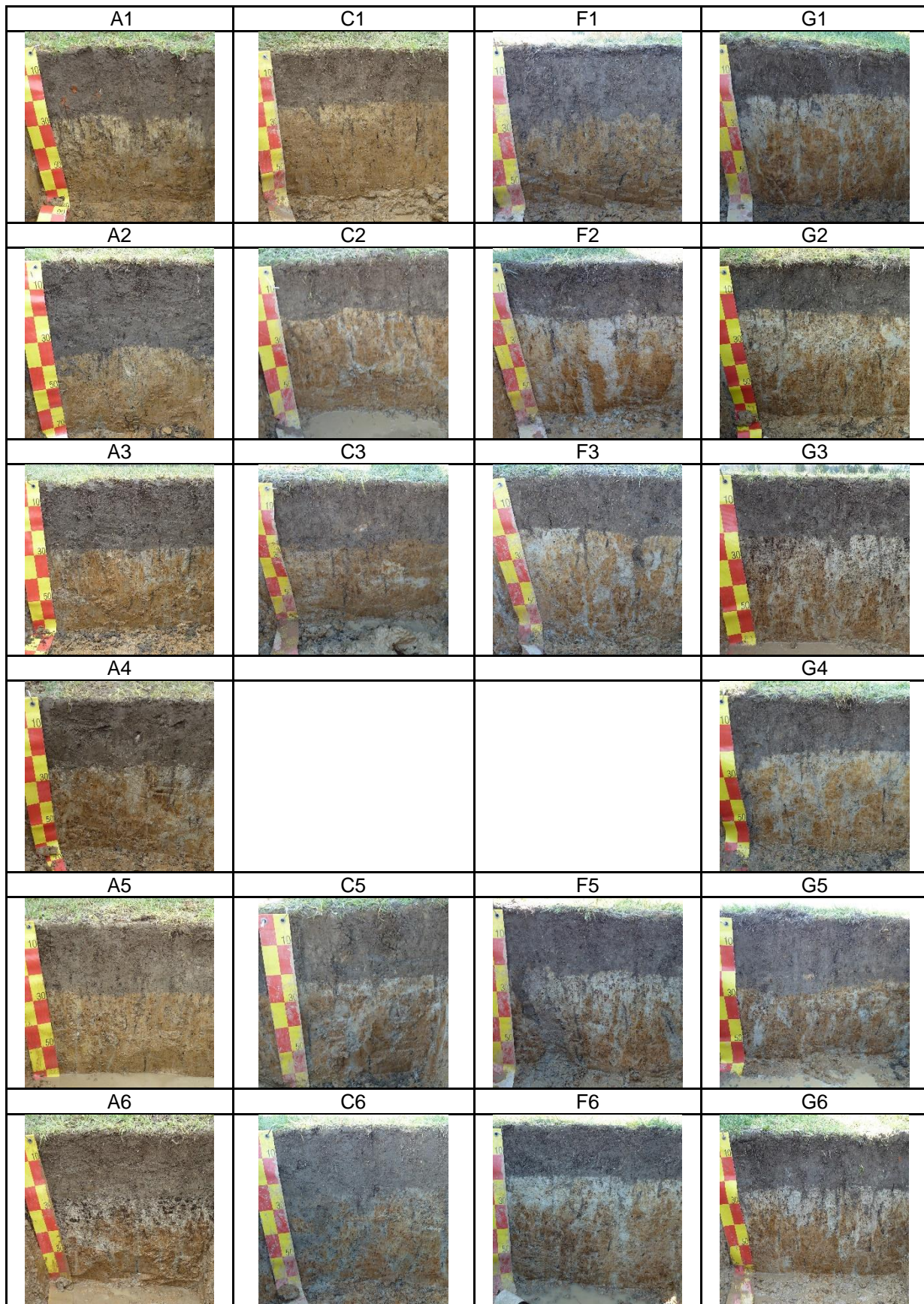








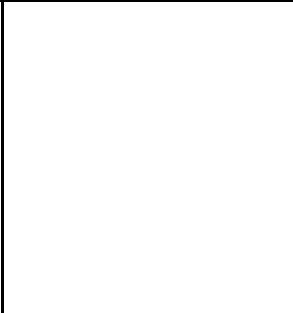


Tabelle A 2: Horizontbezeichnungen und -Grenzen für den Standort Tharandt.

Die Profilanfragen sind den Horizontgrenzen der Beprobung jeweils zugeordnet.

Tharandt									
Profil	Horizont	Untergrenze Beprobung	Untergrenze Ansprache	Humusform	Profil	Horizont	Untergrenze Beprobung	Untergrenze Ansprache	Humusform
W2	Aeh	2.1	3 bis 4.5	MR	W12	Aeh	8	10	ROT
W2	Aeh	9.3	3 bis 4.5		W12	Bv	18.8	40	
W2	Bv	27.9	19 bis 23		W12	Bv-Cv	48.9	50	
W2	IIBv+Cv	50.4	40+50		W13	Aeh	7	10	MR
W3	Aeh	10.2	10		W13	Bv	18.2	50	
W3	Bv	17	20 bis 25		W13	Bv	47.9	50	
W3	Sw-Bv	49.5	50		W14	Aeh	7.8	2 bis 20	ROT
W4	Aeh	10.2	1 bis 5	ROT	W14	Bv	20.9	35 bis 45	
W4	Bv	34.8	25		W14	Bv	33.6	35 bis 45	
W4	IIBv	49.7	50		W14	Cv	49.3	53	
W5	Sw-Ah	9.6	2 bis 7		W15	Aeh	7.7	8 bis 10	MR-GMO
W5	Sw	20	10 bis 30		W15	Bv	24.7	25 bis 45	
W5	IISw	31.3	50		W15	Cv	49.4	50	
W5	IISw	53.9	50		W16	Ah	4.7	5 bis 7	MR
W6	Ah	11.8	3	MR	W16	(Bv-)Sw1	24.8	20 bis 30	
	Sw+(Bv)-		20 bis 25 +			Sw2 +		40 bis 50 +	
W6	Swd	35	40		W16	IISd	49.3	50	
W6	IISwd	48.9	50		W18	Ah	3	1 bis 2	MOT
W7	Aeh	8.1	5 bis 10		W18	(Bv-)Sw1	8.4	20 bis 30	
W7	Bv	15.6	50		W18	(Bv-)Sw1	25.1	20 bis 30	
								40 bis 50 +	
W7	Bv	47.4	50		W18	Sw2 + Sd	51.3	50	
W8	Ah	3.9	2 bis 3	MOM	W19	Ah	5.7	10	MR-GMO
W8	Bv	13.5	35		W19	Bv	15.6	35	
W8	Bv-Cv	57.4	55		W19	Bv	31.3	35	
W9	Aeh	8.5	5 bis 8	MR	W19	Cv	48.5	50	
W9	Bv	25.9	35		W20	Ah	3.2	5 bis 10	MOT
W9	Bv-Cv	52.6	50		W20	Bv	14.2	40	
W10	Sw-Ah	2	3 bis 5	MOT	W20	Cv	57.8	55	
	Sw1 +		5 bis 15 + 35						
W10	(Bv)-Sw2	29.3	bis 40		W21	Aeh	11.7	10 bis 15	ROT
W10	Swd	53.4	55		W21	Bv	33.4	40	
					W21	Bv-Cv	43.5	45	

Abbildung A 3: Profilfotos für den Standort Tharandt (Fotos: C. Schmidt-Cotta)

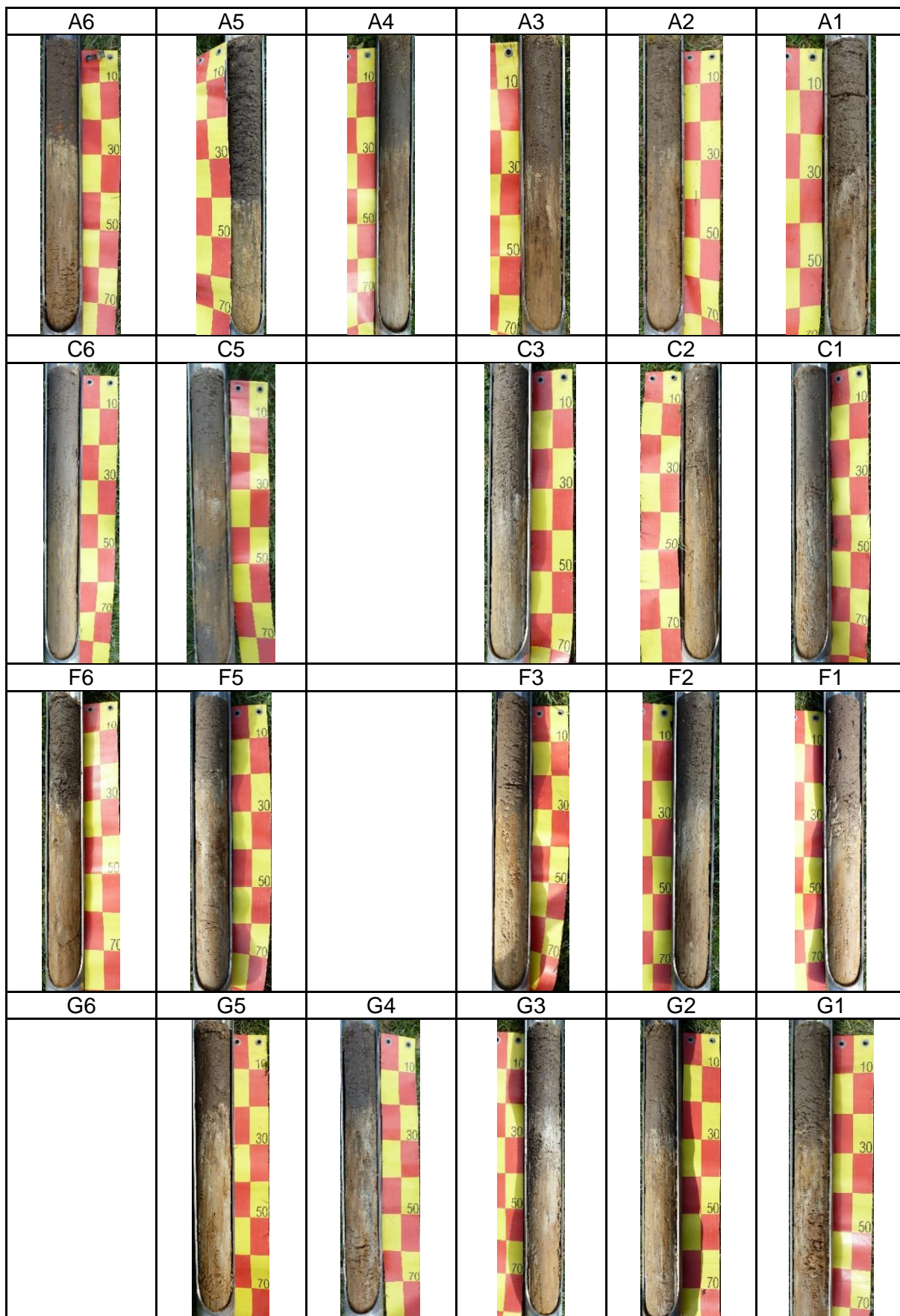
<p>W2</p> 	<p>W3</p> 	<p>W4</p> 	<p>W5</p> 
<p>W6</p> 	<p>W7</p> 	<p>W8</p> 	<p>W9</p> 
<p>W10</p> 	<p>W12</p> 	<p>W13</p> 	<p>W14</p> 
<p>W15</p> 	<p>W16</p> 	<p>W18</p> 	<p>W19</p> 
<p>W20</p> 	<p>W21</p> 		

Fotos der Bohrkern

Abbildung A 4: Fotos der Bohrkern am Standort Klingenberg (Fotos: C. Schmidt-Cotta)



Abbildung A 5: Fotos der Bohrkerns am Standort Grillenburg (Fotos: C. Schmidt-Cotta)

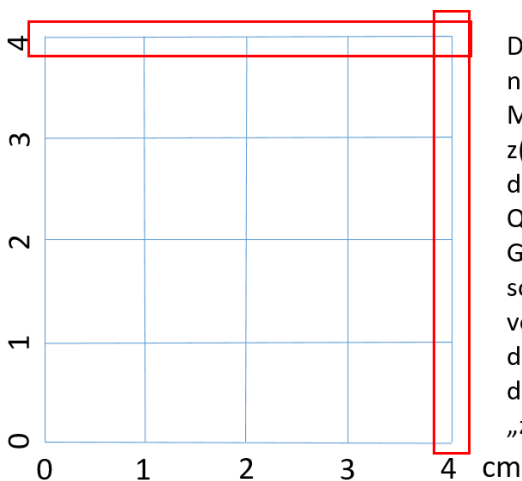
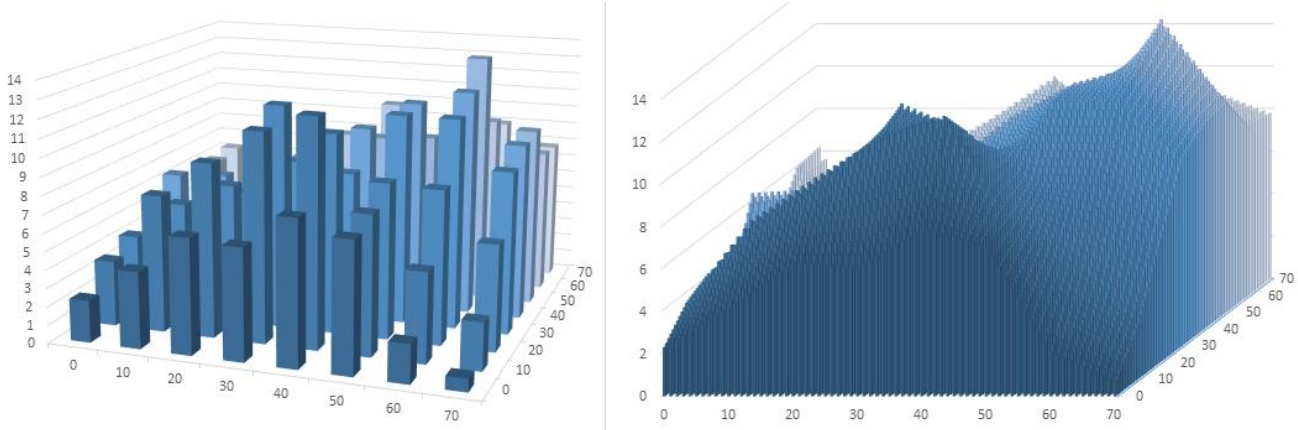


Volumenberechnung für den Standort Tharandt

Abbildung A 6A: 3D-Visualisierung der bilinearen Interpolation der Horizontmächtigkeit von 49 Messpunkten in 10 cm-Abständen (oben links) auf 4900 Punkte in 1 cm-Abständen (oben rechts) und schematische Veranschaulichung (unten links) und Beschreibung (unten rechts) der Volumenberechnung durch Addition der Mächtigkeitswerte.

Die bilineare Interpolation wurde in R mittels `bilinear.grid` des `akima`-Pakets durchgeführt:

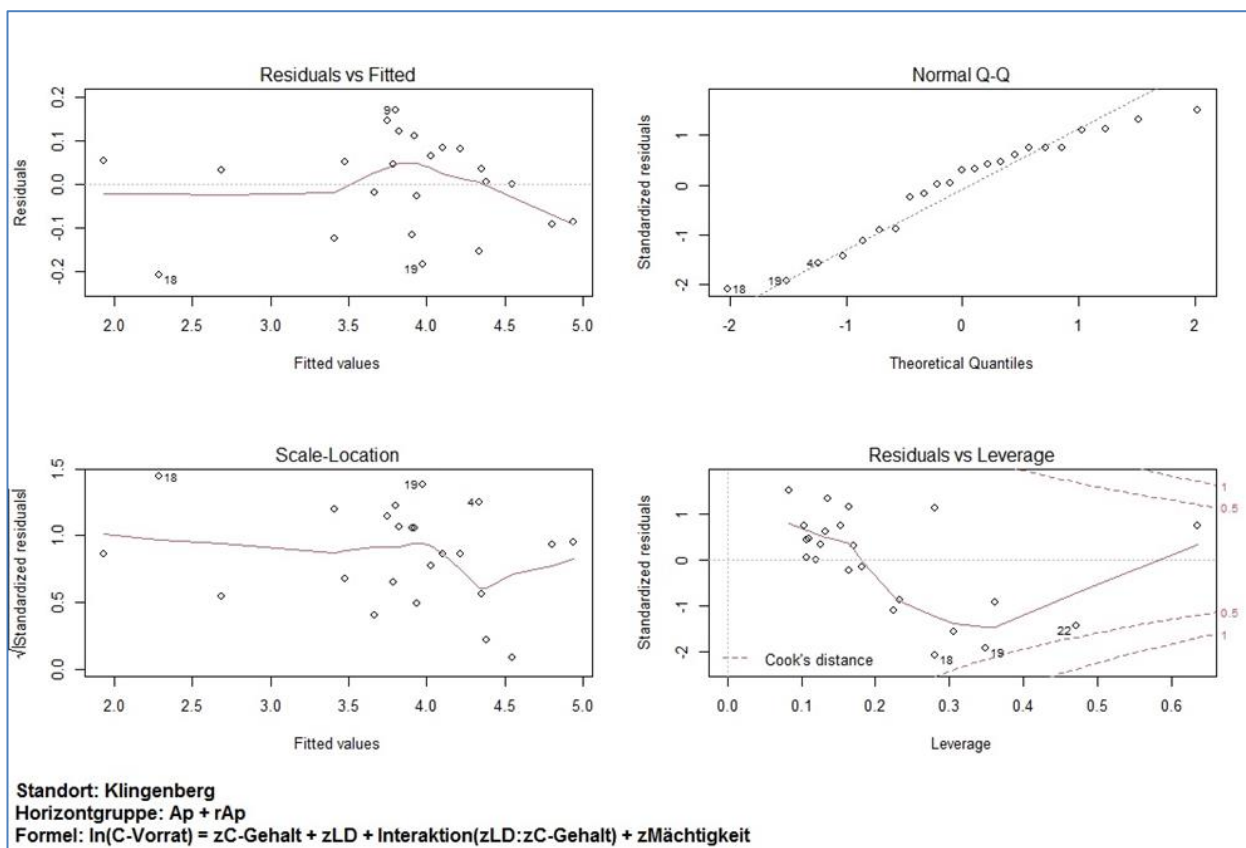
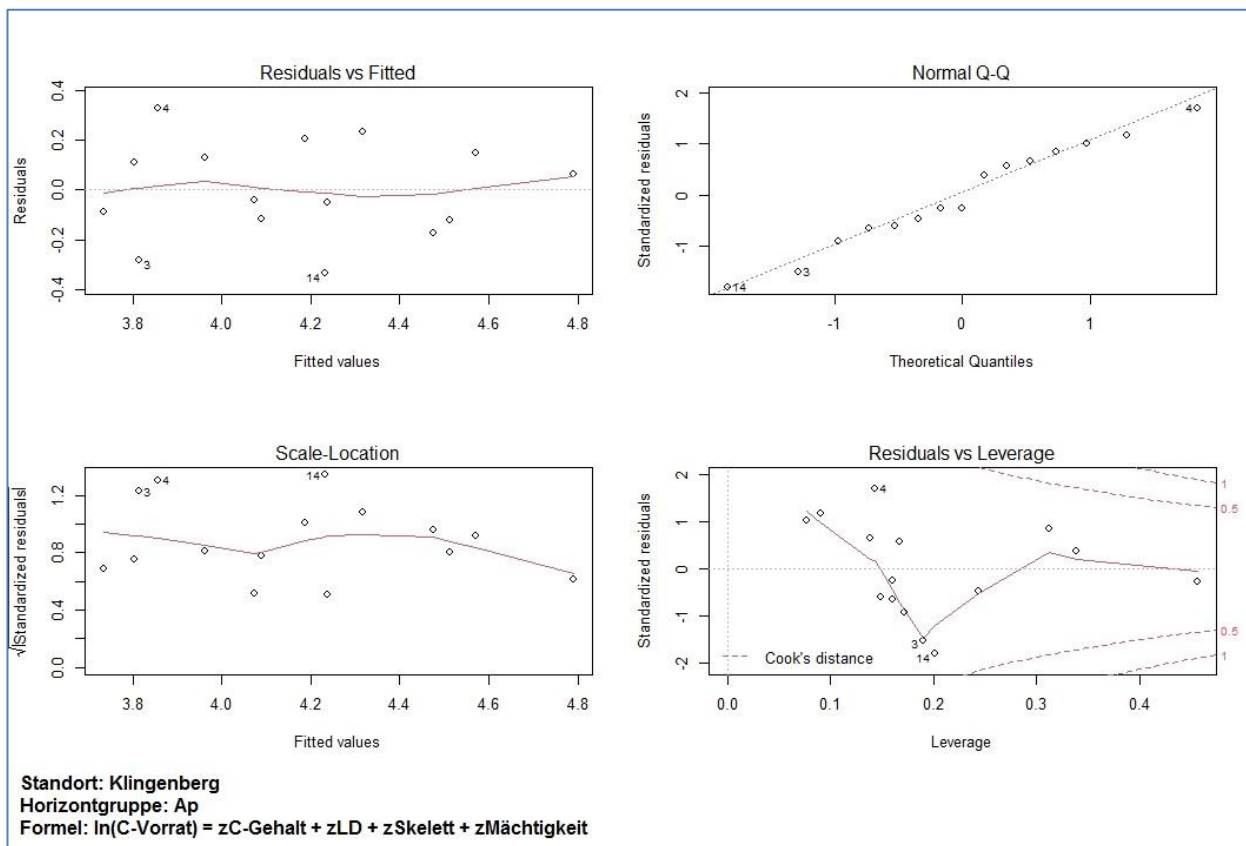
<https://www.rdocumentation.org/packages/akima/versions/0.6-2/topics/bilinear.grid>



Der Messwert $z(0/0)$ (dritte Achse, hier nicht dargestellt) repräsentiert die Mächtigkeit für 1cm^2 . Die Messwerte $z(0/1)$ und $z(1/0)$ spannen jeweils bereits den nächsten cm^2 auf. Das ergibt imaginäre Quader den Volumina $1\text{cm} \cdot 1\text{cm} \cdot z$ cm. Die Gesamt-Volumenberechnung lässt sich somit auf die Addition der z -Werte vereinfachen. Dabei ist zu beachten, dass die letzten Reihen in x - und y -Richtung davon auszuschließen sind, da sonst „zusätzliche“ cm^2 mit berechnet werden.

Analyseplots der multiplen linearen Regressionen

Abbildung A 7: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Klingenberg.



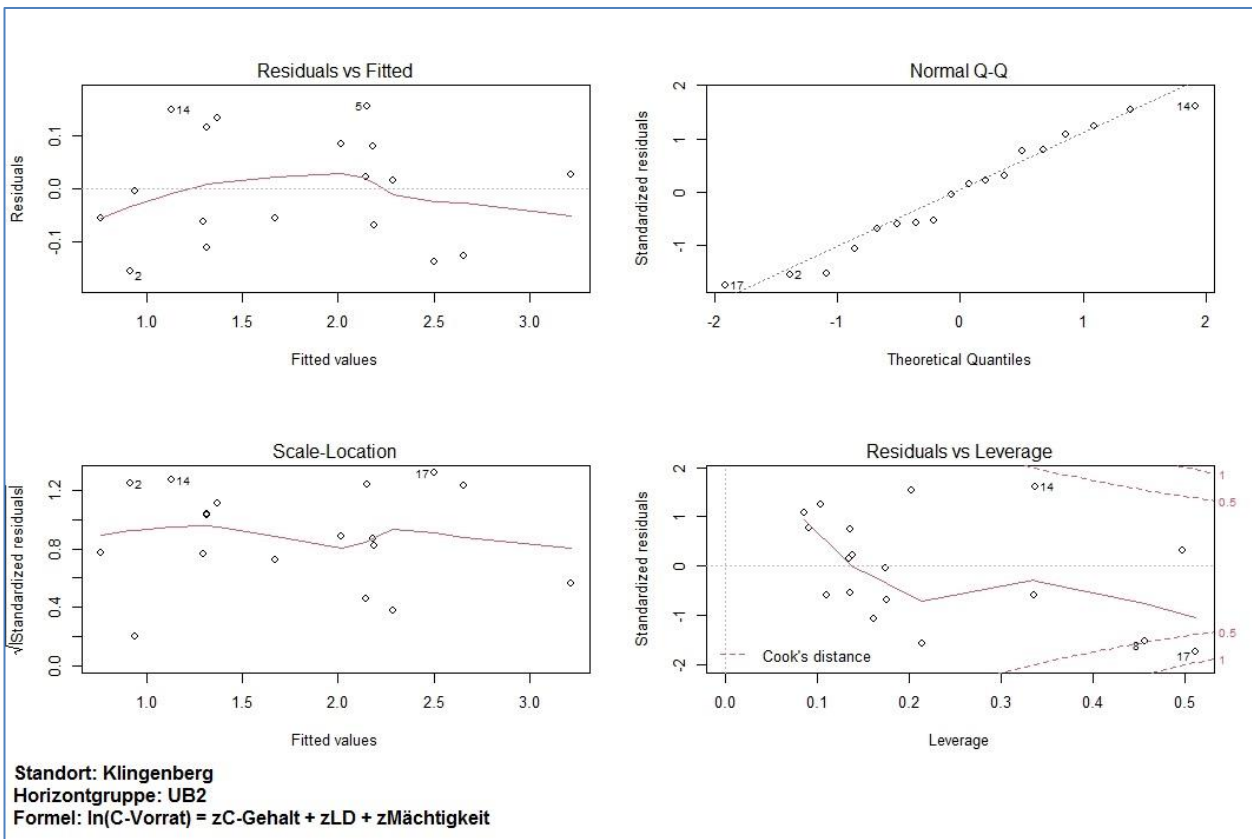
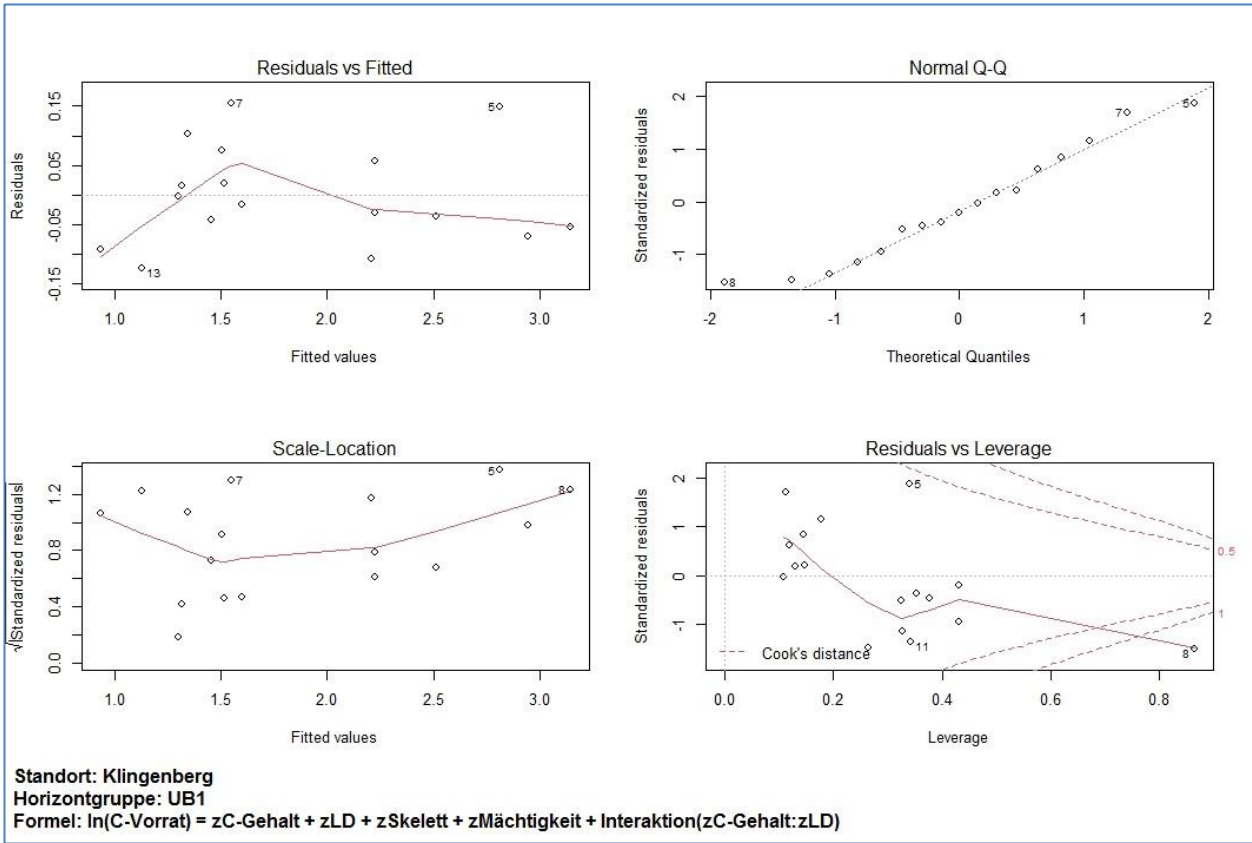
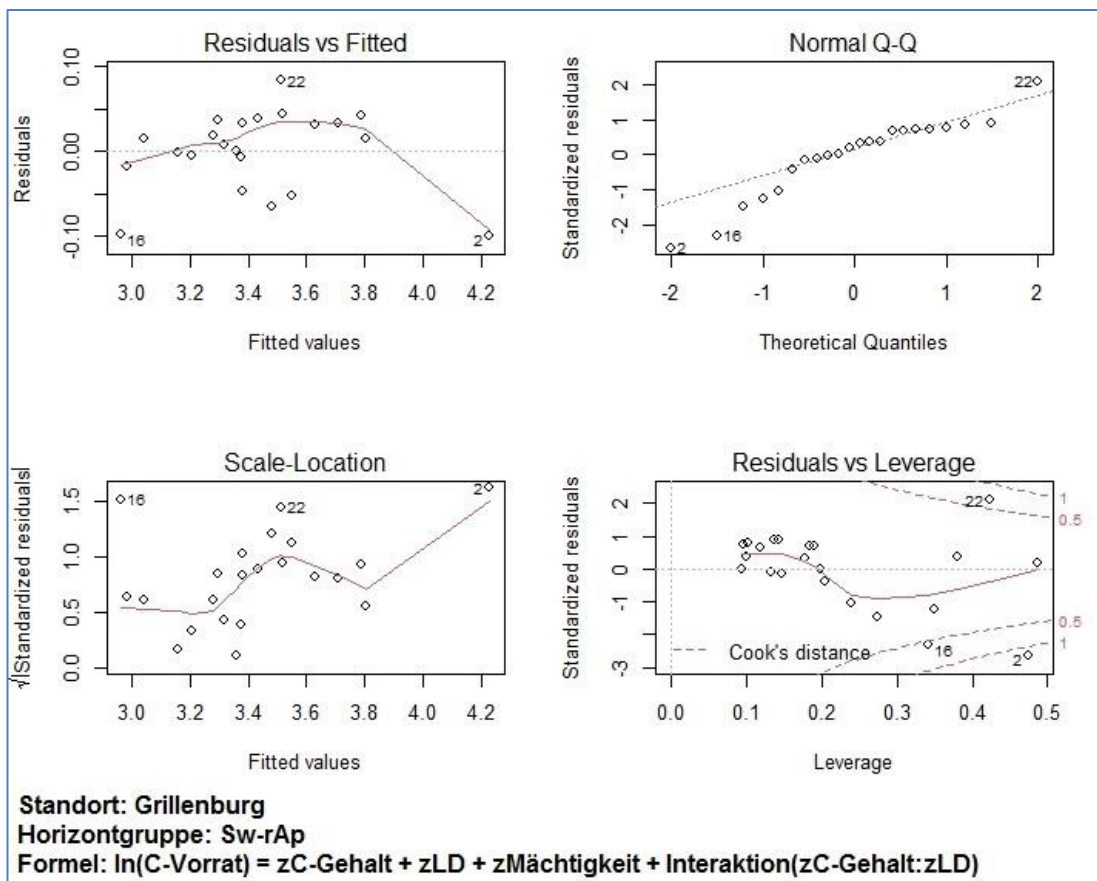
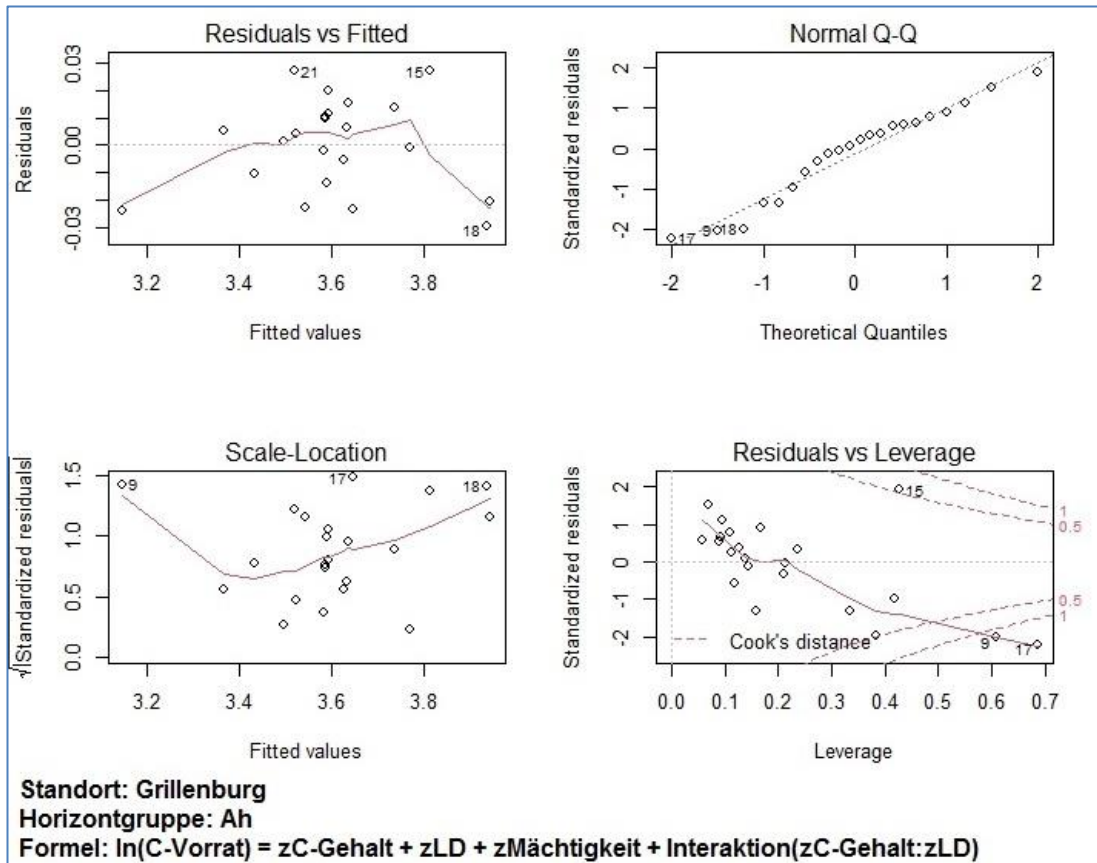


Abbildung A 8: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Grillenburg



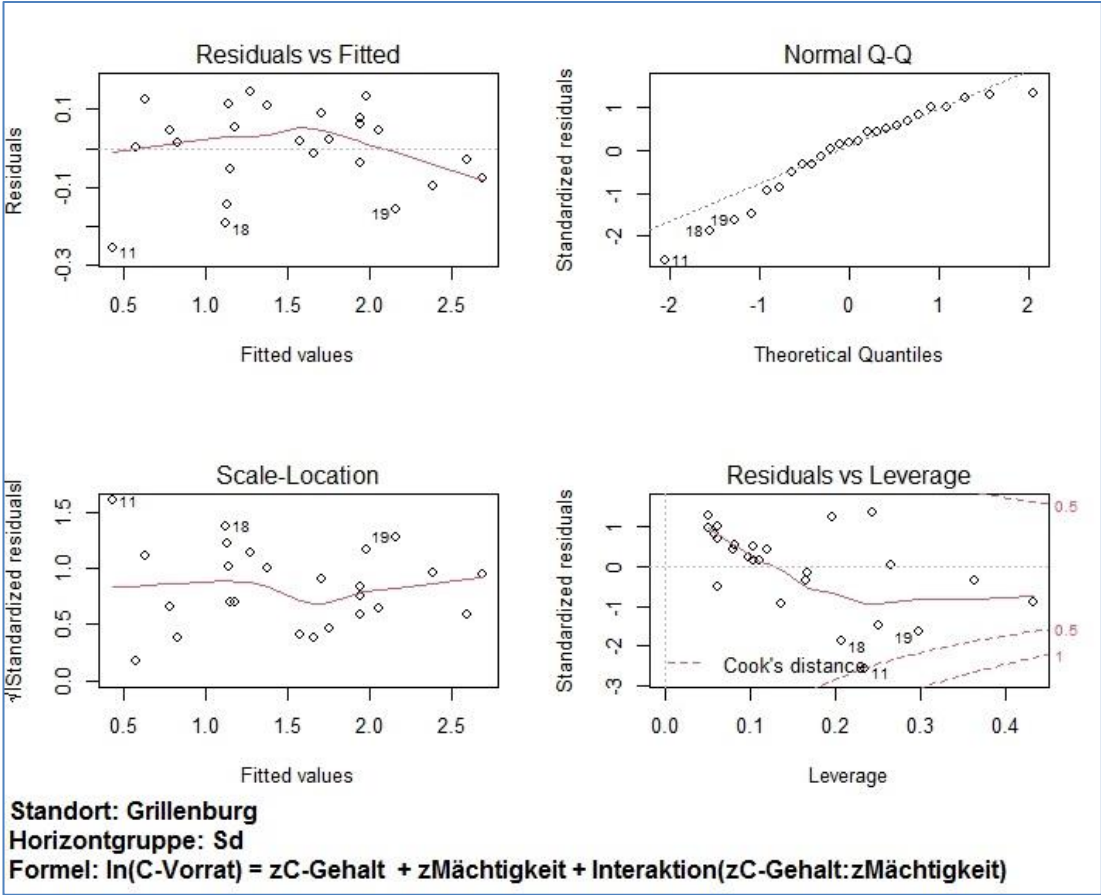
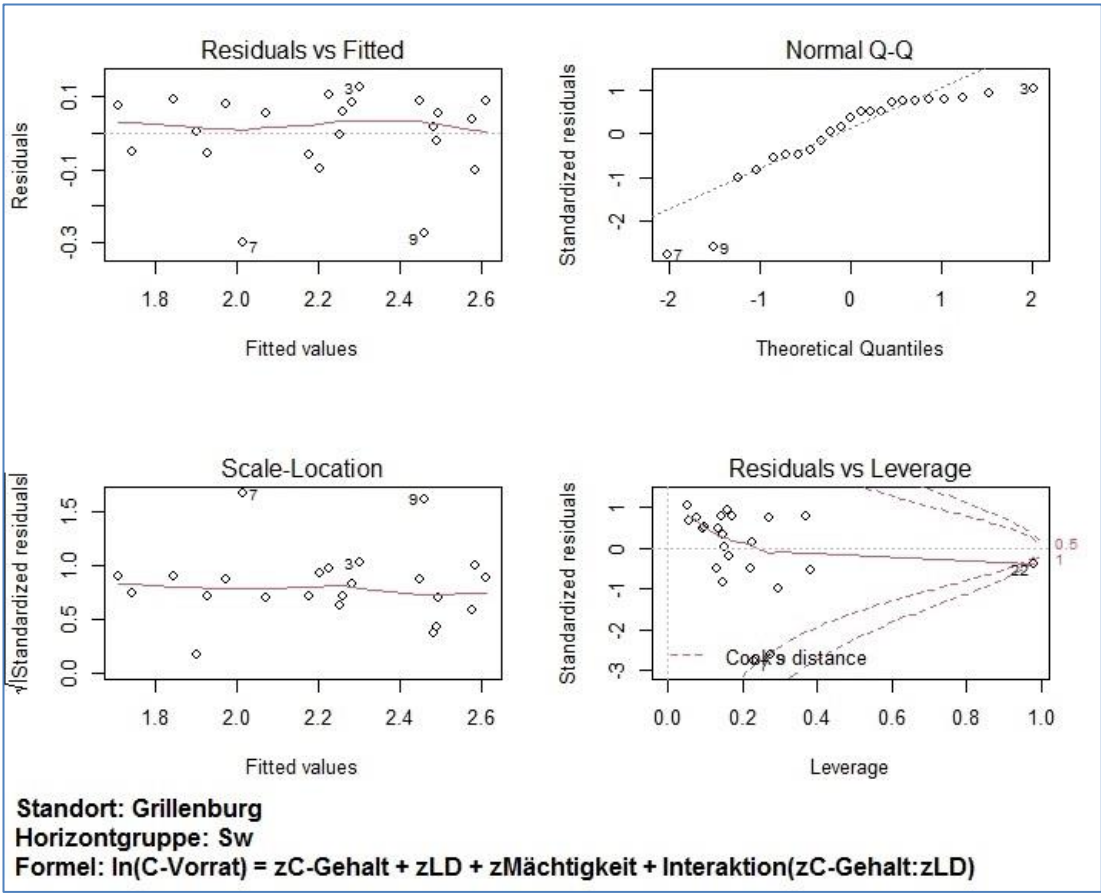


Abbildung A 9: Analyseplots pro Horizontgruppe der Regressionen für die Beprobung 2019_Grube am Standort Tharandt.

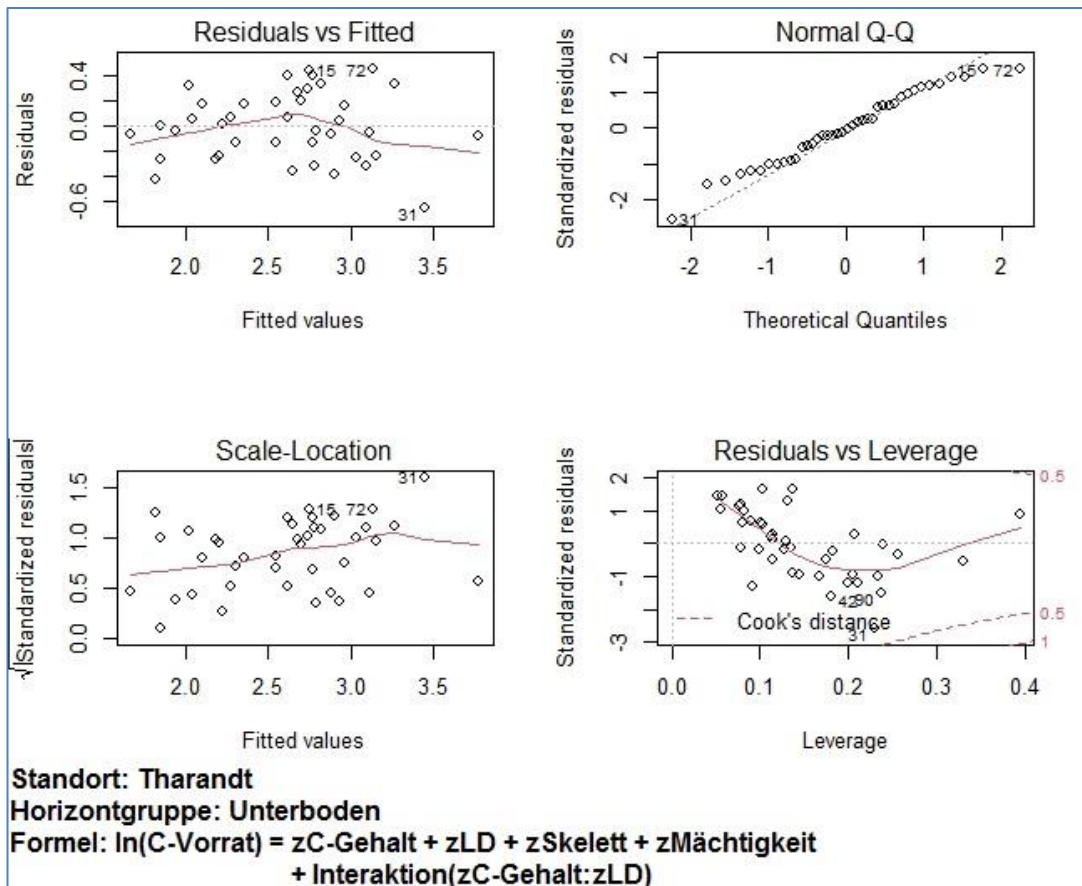
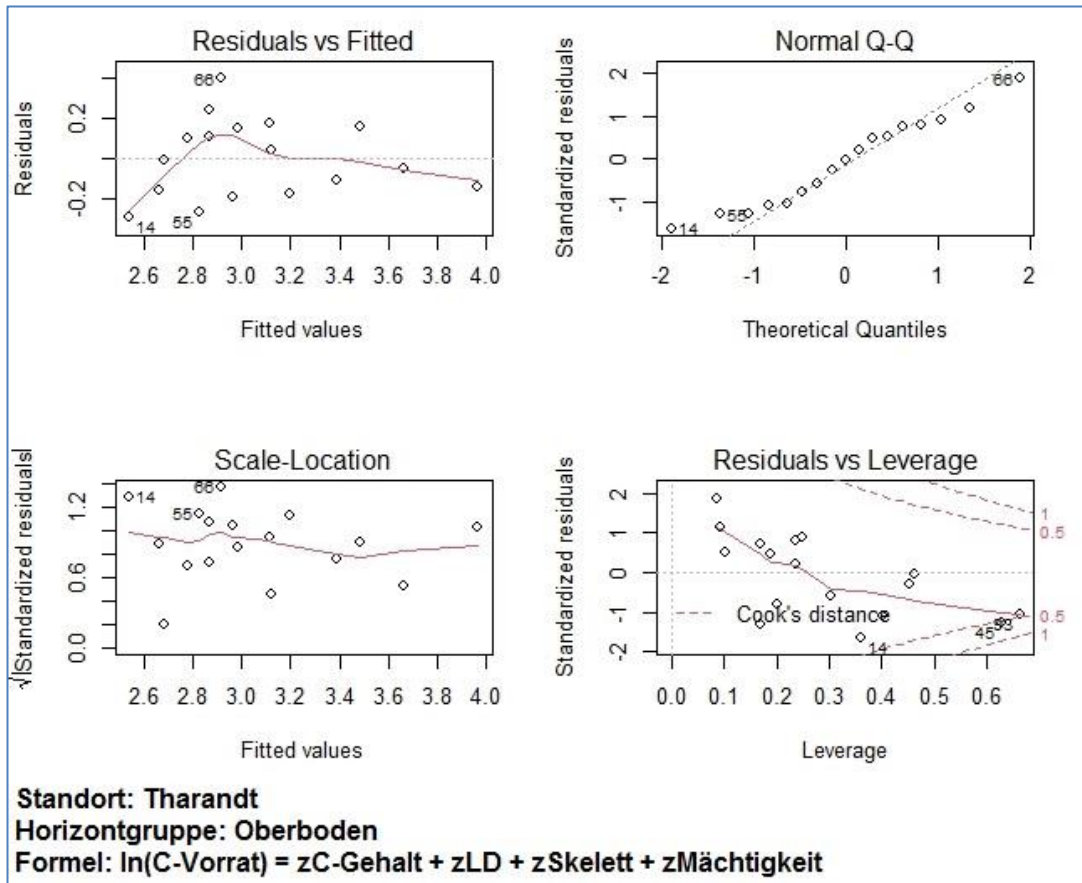
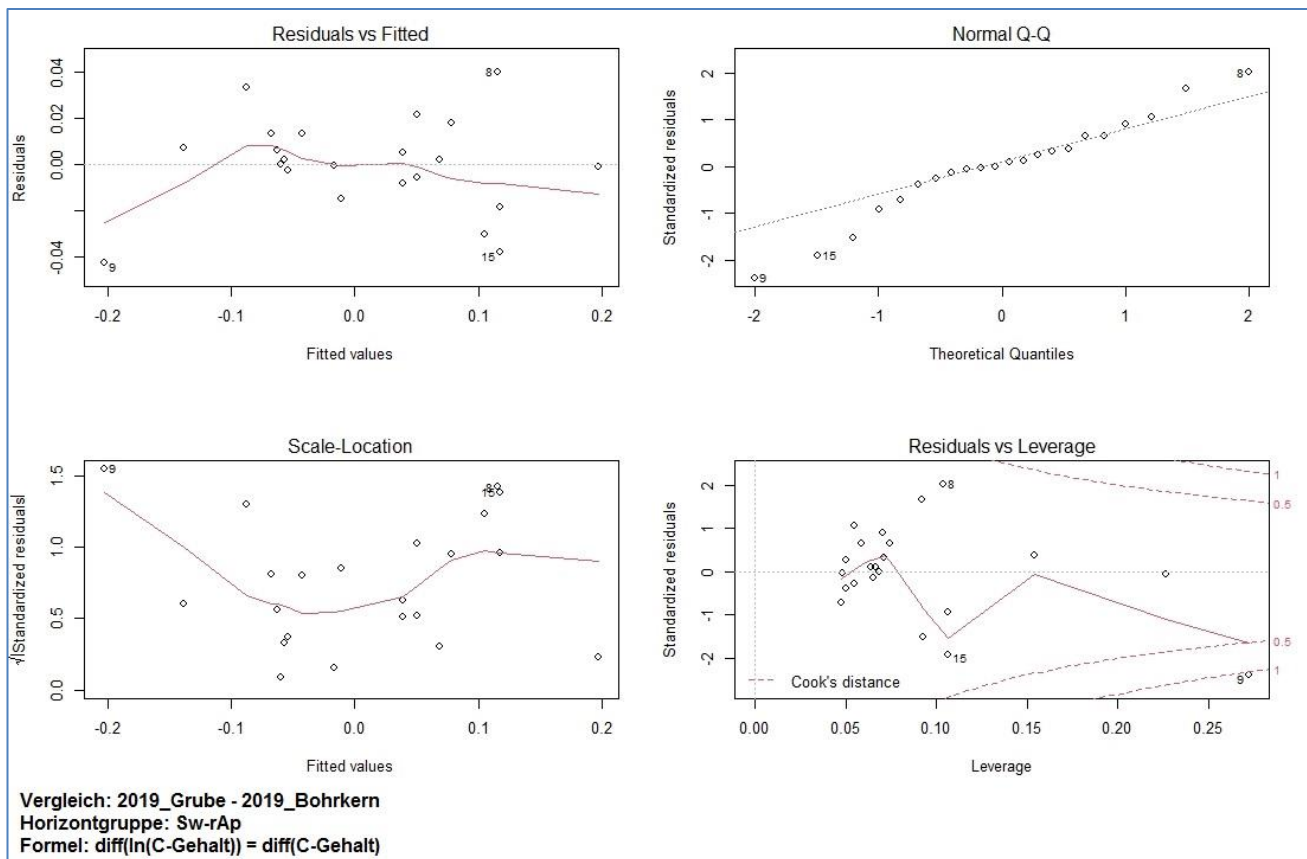
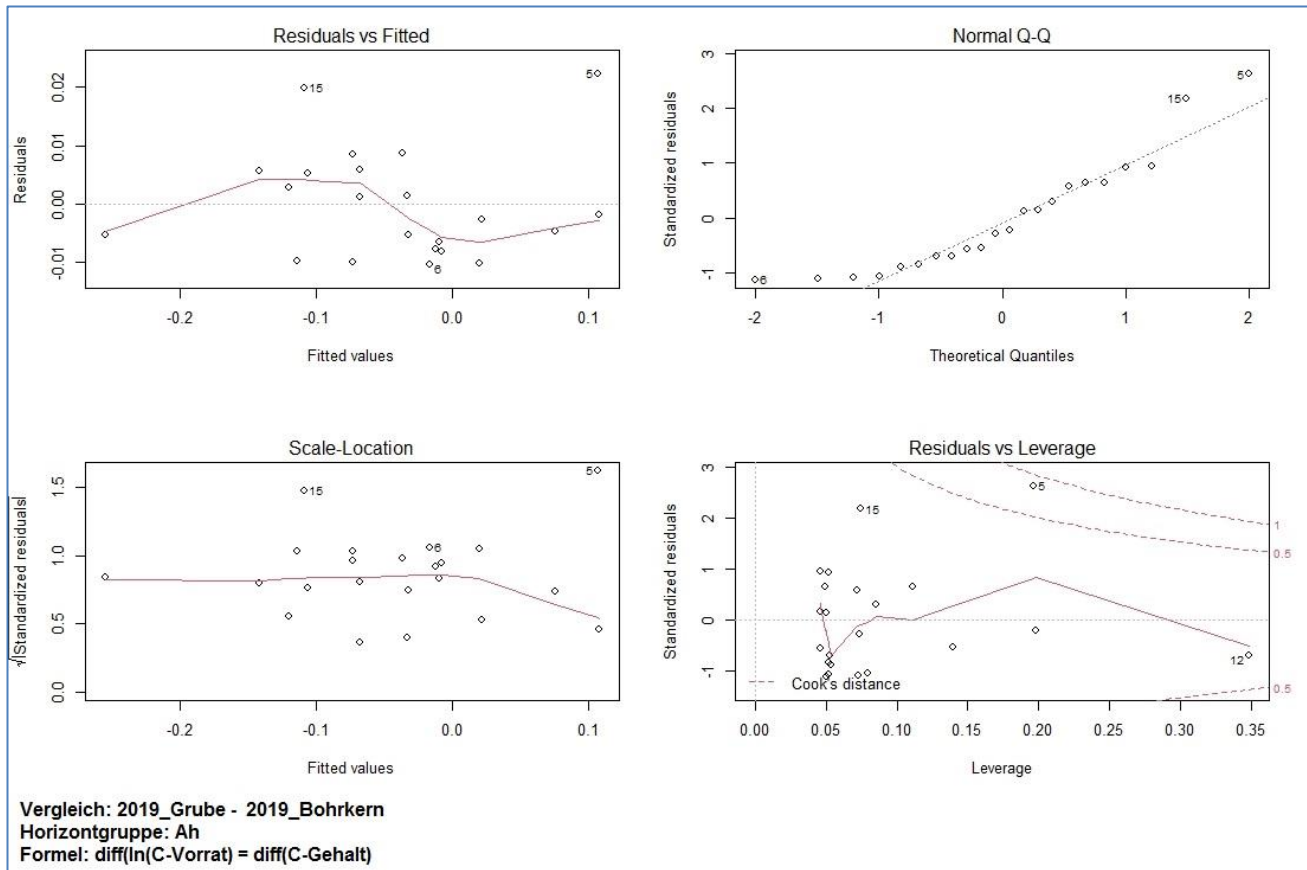


Abbildung A 10: Analyseplots der Regressionen für den Vergleich der Beprobungen 2019_Grube und 2019_Bohrkern am Standort Grillenburg. Analyseplots pro Horizontgruppe.



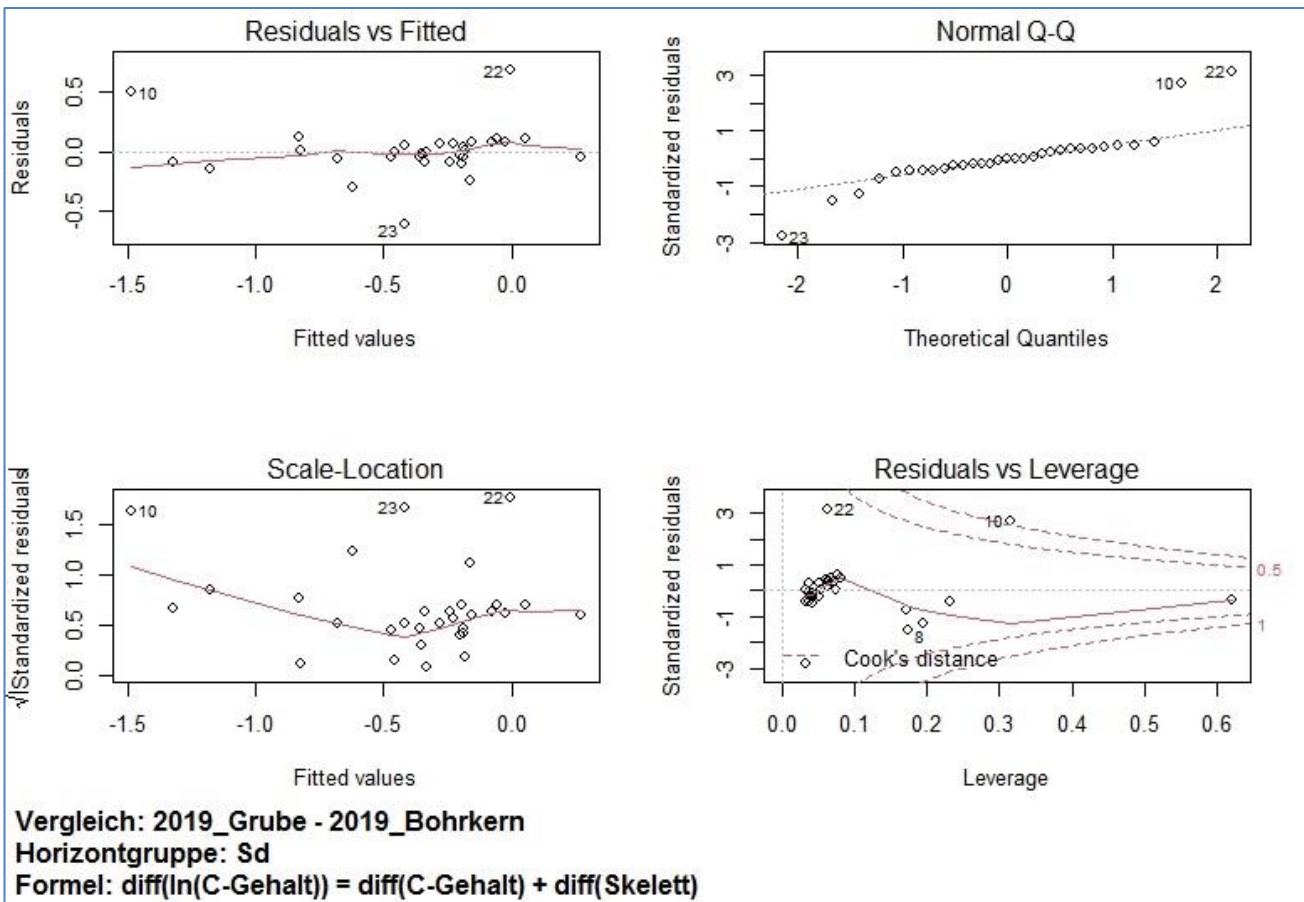
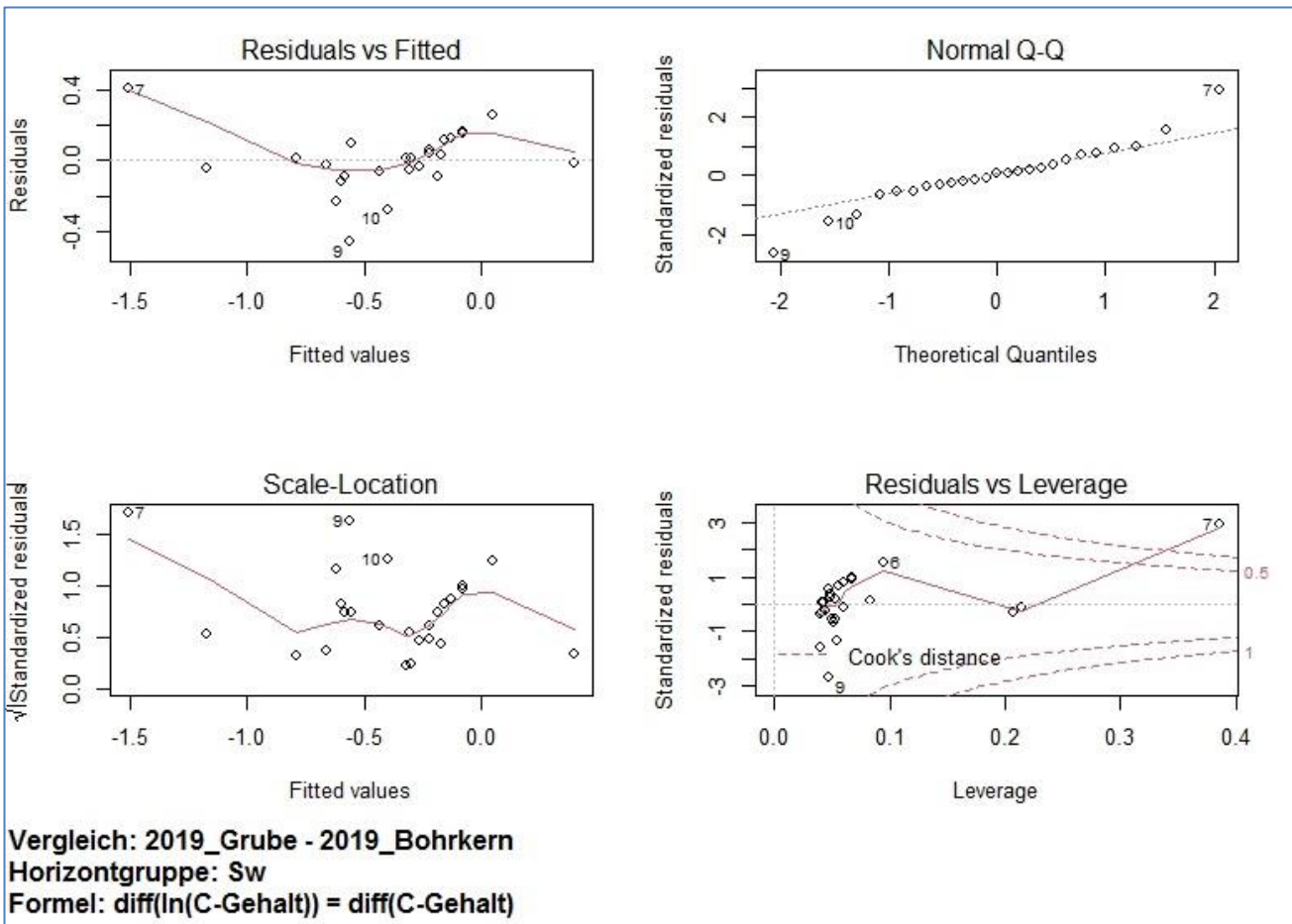
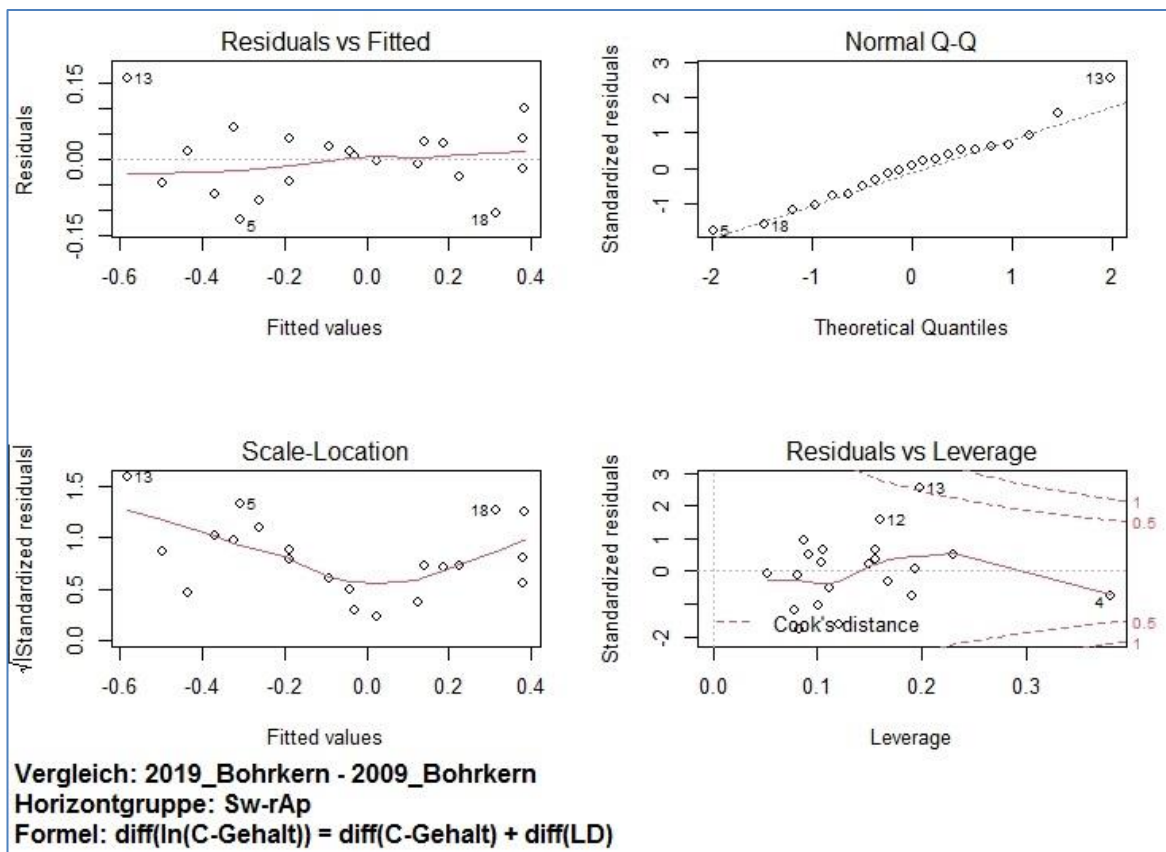
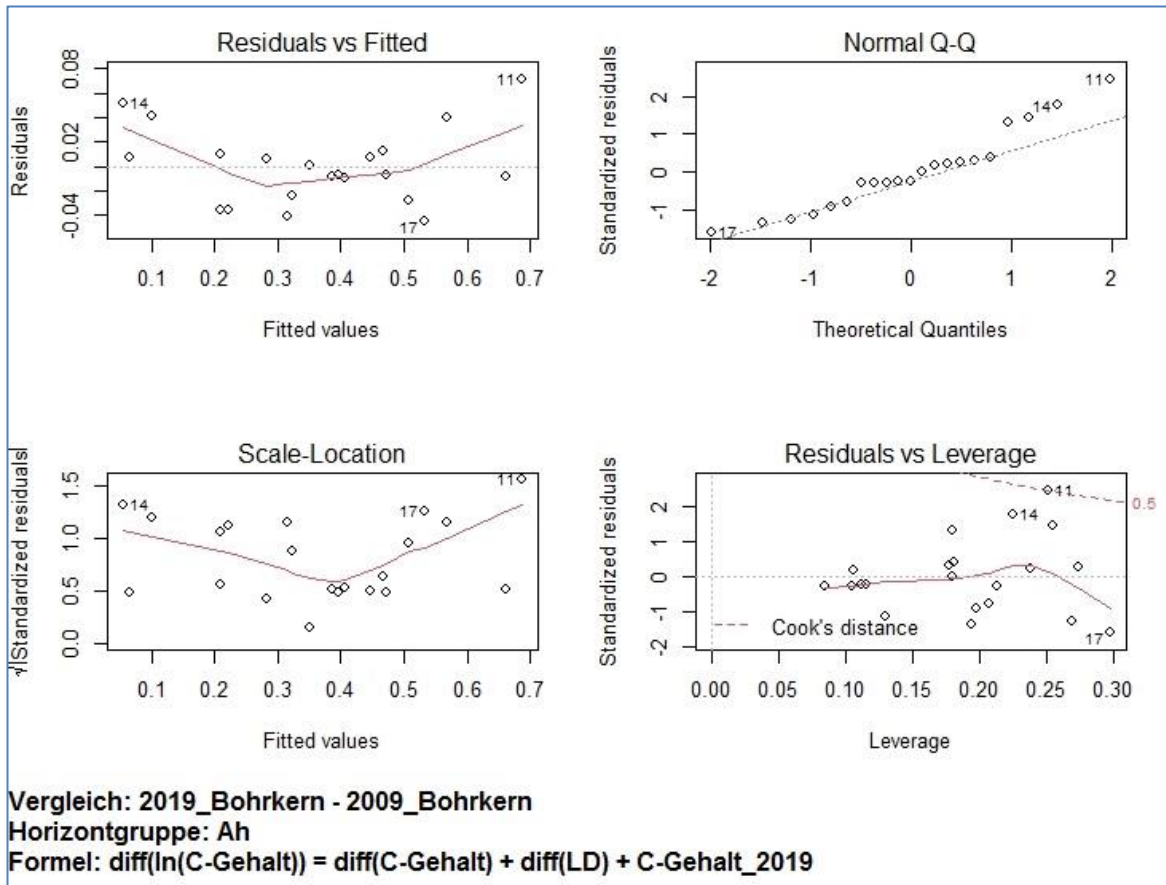
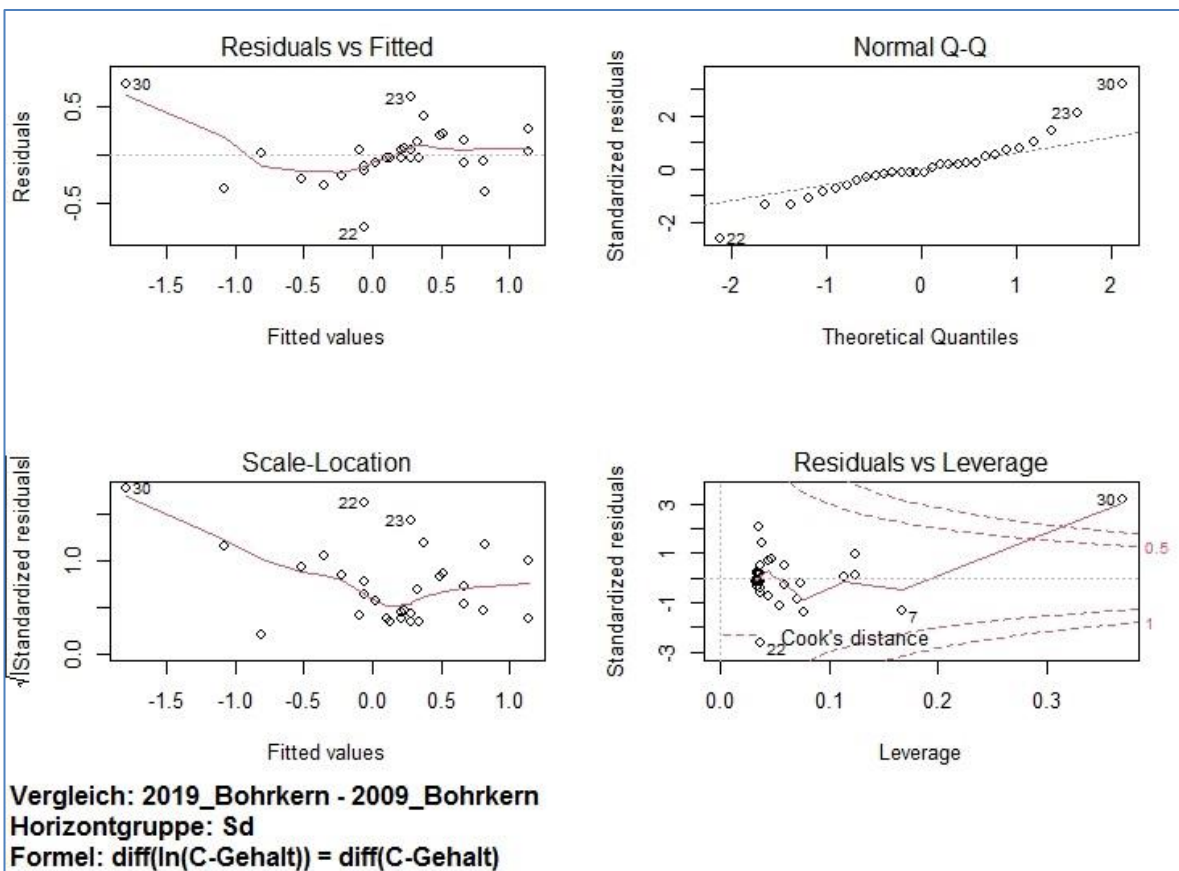
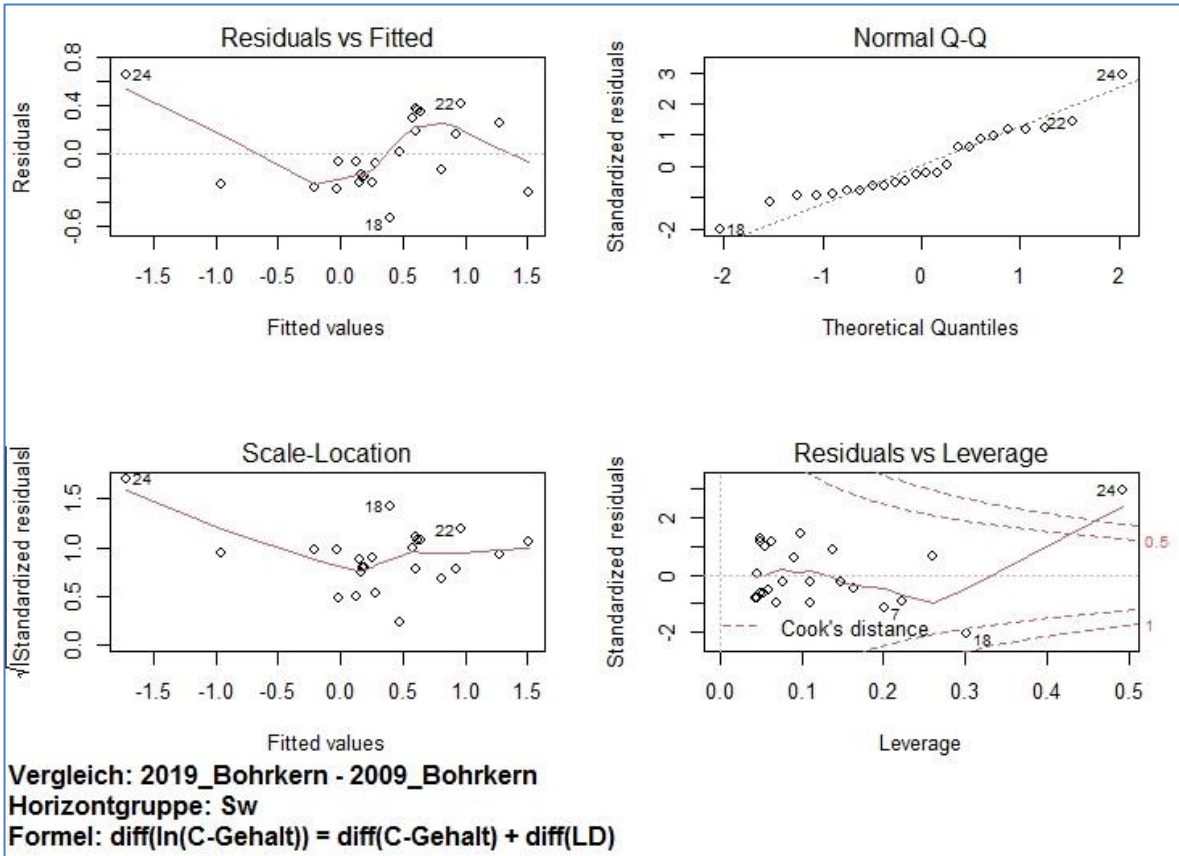


Abbildung A 11: Analyseplots der Regressionen für den Vergleich der Beprobungen 2009_Bohrkern und 2019_Bohrkern am Standort Grillenburg. Analyseplots pro Horizontgruppe.





Anhang B: Empfehlungen für das Monitoring von Kohlenstoffvorratsänderungen und CO₂-Flüssen in sächsischen Ökosystemen

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Für ein aussagekräftiges Monitoring im Freistaat Sachsen müssen die derzeit nebeneinander vorhandenen Messstrukturen zunächst harmonisiert und gebündelt sowie anschließend für die Beantwortung konkreter Fragestellungen weiter ausgebaut werden.

Entscheidend für die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre und damit für die Klimawirkung ist die Bilanz zwischen Quellen und Senken. Global werden noch ca. 55 % (30 % terrestrisch, 25 % ozeanisch) des emittierten CO₂ durch Senken gebunden. Damit tragen diese Senken einen entscheidenden Anteil am notwendigen Klimaschutz. Ihr Management ist eine regionale Aufgabe und bedarf eines entsprechenden Monitorings.

In Sachsen existieren mehrere Messnetze zur Erfassung von Kohlenstoffvorräten und deren Änderungen in landwirtschaftlichen und forstlichen Ökosystemen, die sich ergänzen. Die Messnetze werden durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), den Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) und die Technische Universität (TU) Dresden betrieben. Auf dieser Basis könnte ein systematisch integriertes Monitoring Synergien nutzbar machen, um mit moderatem Zusatzaufwand eine belastbare Bestimmung der Kohlenstoffbindung (CO₂-Senken) in Sachsen sowie eine quantitative Beurteilung der Auswirkungen von Störungen und Managementoptionen auf den Kohlenstoffhaushalt zu ermöglichen.

Der vorliegende Vorschlag für ein Monitoringkonzept nutzt langjährige Anstrengungen und erhebliche Investitionen der beteiligten Institutionen. Seine Umsetzung würde es ermöglichen, im Rahmen des THG-Monitorings den sächsischen Treibhausgasquellen künftig eine konsistente Abschätzung der sächsischen CO₂-Senken gegenüberzustellen.

In einer **ersten Phase** der Umsetzung des vorliegenden Konzeptes liegen die Prioritäten auf dem Erhalt und der Harmonisierung verschiedener Komponenten des Monitorings. Anzustreben ist eine weitgehend synchronisierte und koordinierte Fortsetzung der Boden-C-Inventuren an Bodendauerbeobachtungs- und Dauertestflächen, die sich am Stichjahr der nächsten Bodenzustandserhebung 2023 orientiert. Dazu sind die behördenübergreifenden Kompetenzen der beteiligten Landesinstitutionen und der TU Dresden zusammenzuführen und unter Nutzung europäischer Vorarbeiten (ICOS, ICP Forests) ein Daten- und Wissensmanagement (übergreifende Auswertungs- und Koordinierungsplattform) einzurichten. In der **zweiten Phase** werden sowohl Störungen insbesondere in Waldökosystemen als auch das landwirtschaftliche Management mit ihren jeweiligen Auswirkungen auf den Kohlenstoffhaushalt betrachtet. Dies soll klimaoptimierte Handlungsoptionen für die Sicherung von flächenhaften Kohlenstoffsenken und die Reduzierung von Kohlenstoffquellen ermöglichen. Schließlich könnten in einer **dritten Phase** das Monitoring auf weitere Landnutzungen (z.B. Moore) erweitert sowie Zusatzmessungen an vorhandenen repräsentativen Standorten eingerichtet werden, um Vorratsinventuren und atmosphärische Treibhausgasmessungen in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten in der für Sachsen typischen Kombination von Landnutzungen zu erfassen.

Aktuelles Monitoring

Das sächsische Energie- und Klimaprogramm 2012 (EKP) listet zur Stärkung und Sicherung von Treibhausgassenken schwerpunktmäßig u. a. folgende Maßnahmen auf:

- Schutz bestehender Kohlenstoffspeicher wie Moore, Nass-Standorte und Grünland hat Vorrang gegenüber Anstrengungen zur Erhöhung der Senkenleistung
- Erhalt und planmäßige Entwicklung standortgerechter Kulturwälder zur Stabilisierung der Senkenleistung
- Entwicklung einer Kaskaden-Nutzung von Holz und Biomasse
- Senken gerechte Bewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Böden
- Aufbau eines sächsischen Monitorings für Treibhausgasspeicher und -senken sowie Bewertung des Senkenpotenzials von Wald, Mooren, Auen und Grünland.

Unabhängig von der gegenwärtigen Überarbeitung und Anpassung des EKP ist die Grundlage für die Implementierung bzw. Bewertung dieser Maßnahmen ein konsistentes Langfrist-Monitoring von Kohlenstoffvorratsänderungen in sächsischen Ökosystemen und Böden sowie die statistische Erfassung der Substitution fossiler Energieträger durch regionale Holznutzung und der C-Bindung in langfristigen Holzprodukten.

Das gegenwärtige Monitoring stützt sich auf wiederholte Inventuren an Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF, LfULG, Ref. 42) und Dauertestflächen (DTF, LfULG, Ref. 72), entsprechende Erhebungen im Wald (BZE und BWI, SBS, Ref. 43/44) sowie kontinuierliche Langfristbeobachtungen von CO₂-Flüssen (ICOS, TU Dresden). Es weist spezifische Defizite, Inkonsistenzen und Inkompatibilitäten auf, die es erschweren, repräsentative Bilanzen der Kohlenstoffsinken und -quellen sächsischer Ökosysteme zu erstellen sowie Störungen und Landnutzungsänderungen mit ihren Auswirkungen auf die C-Bilanzen zu erfassen. Deswegen wurden im Rahmen dieses Vorhabens Vorschläge zur systematischen Integration und mittelfristigen Absicherung des Monitorings erarbeitet. Mit deren Umsetzung gäbe es eine verbesserte Grundlage sowohl für die Berechnung konsistenter C-Bilanzen der sächsischen Ökosysteme als auch für die Erfassung von Ökosystemreaktionen auf Witterungseinflüsse, Störungen, Klimaänderung und anthropogene Beeinflussung.

Zielsetzung für ein künftiges Monitoring

Durch eine Zusammenführung der separaten Monitoring-Programme von LfULG, SBS und TU Dresden hier (Abbildung 1) könnten erhebliche Synergien erschlossen werden hinsichtlich der Beobachtung der Kohlenstoffsinken sächsischer Ökosysteme und deren Reaktion auf den Klimawandel und seine Folgen (u. a. Ökosystemstörungen). Ziel ist, der bestehenden Quantifizierung der THG-Quellen (SCHREIBER, 2015) eine Quantifizierung der THG-Senken (v. a. CO₂) für Sachsen gegenüberzustellen. Im Folgenden werden mehrere Optionen zur Verstetigung, Integration und Erweiterung der gegenwärtigen Messnetze aufgeführt, die fachlich begründet sind und unabhängig voneinander realisiert werden könnten. Das Ziel besteht in der gegenseitigen Nutzung existierender Infrastrukturen im Sinne einer synergetischen Verknüpfung verschiedener räumlicher und zeitlicher Auflösungen des C-Monitorings, die im Ergebnis zu einem Informationsgewinn führt (Abbildung A2a). Hierbei ist ein langfristiges Wissensmanagement von zentraler Bedeutung. Dieses erfordert in einer neuen Form der Zusammenarbeit der Institutionen und Behörden eine Koordinierungsstelle, die die harmonisierte Umsetzung des Monitorings von der Beprobung bis zur Auswertung überblickt und die Zusammenführung und Auswertung von Ergebnissen organisiert. Neben dieser personellen Schlüssel-

position (z.Zt. 40%-Stelle im gehobenen Dienst) erfordern auch die nachfolgenden Vorschläge zusätzliche finanzielle und personelle Ressourcen, die derzeit dafür in LfULG, BfUL, SBS und TU Dresden nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

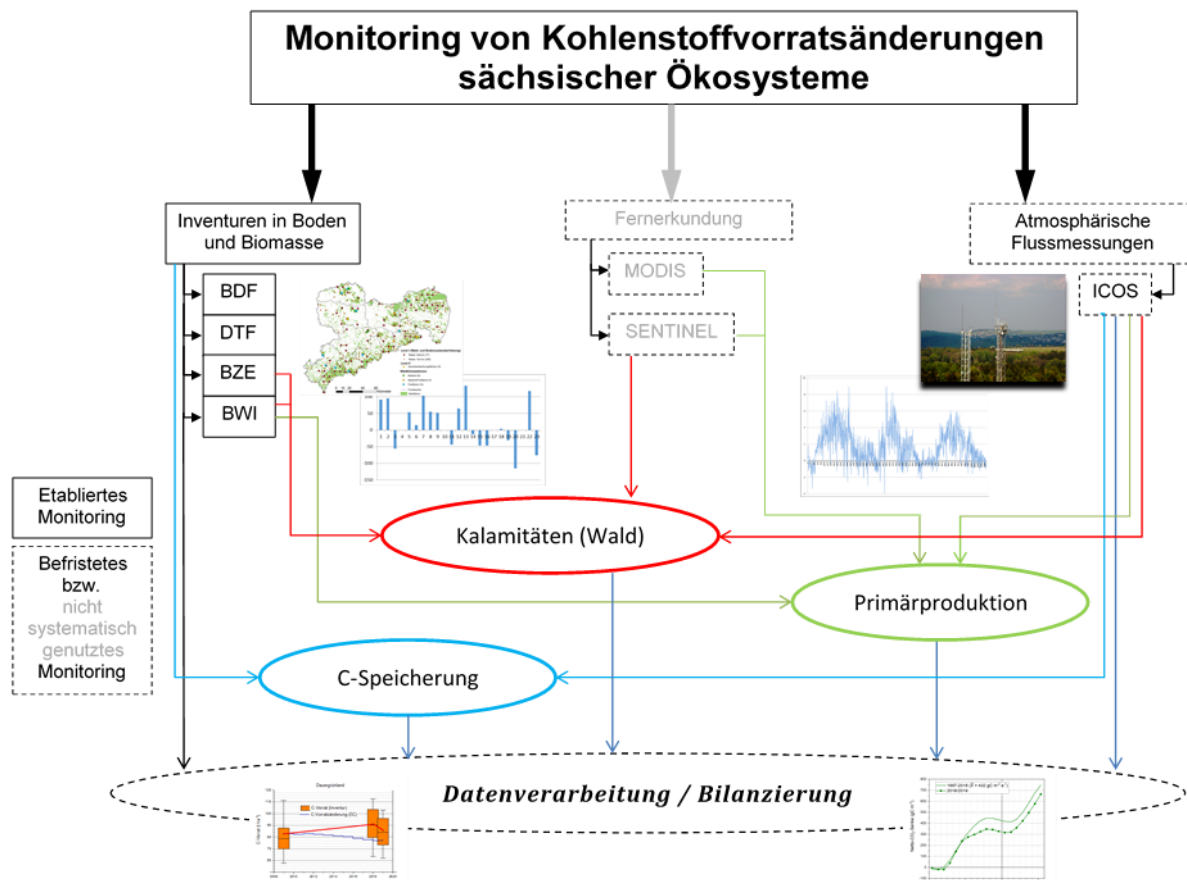


Abbildung A 12: Komponenten des Monitorings von Veränderungen des C-Vorrats in sächsischen Ökosystemen auf Basis von Inventuren, Flussmessungen und Fernerkundung und deren potentielle Anknüpfungspunkte zur Erstellung von Datenprodukten

Optionen für das künftige Monitoring in sächsischen Ökosystemen

Phase 1: Harmonisierung und Erhalt des Monitorings sowie Koordination

Bisherige Erhebungen der C-Vorräte im Boden erfolgen je nach Systematik (BDF, DTF, BZE) zu verschiedenen Stichjahren und in verschiedenen Bodenhorizonten und -tiefen. Dies führt zu Unsicherheiten bei der Berechnung von Vorratsänderungen für Sachsen. Anzustreben ist eine weitgehend synchronisierte Fortsetzung der Boden-C-Inventuren (z. B. 5-jährige Periode an BDF/DTF und 15-jährige Periode der BZE, Tabelle A 3). Zusätzlich zum bestehenden Messprogramm sollten Bodenproben einheitlich die Humusaufgabe (im Wald) und die Tiefenstufen 0 – 30 cm und 30 – 60 cm abdecken.

An den DTF des LfULG werden bereits bisher in 4-jährlichen Abständen C-Beprobungen der Tiefenstufe 0 – 30 cm durchgeführt. Künftig sollte an einer Untergruppe von 150 ausgewählten DTF zusätzlich auch die Tiefenstufe 30 – 60 cm beprobt werden. Des Weiteren sollten bei jeder Beprobung dieser Untergruppe volumengerechte Proben zur Bestimmung der Lagerungsdichte entnommen werden, um C-Vorräte nach dem Prinzip der Massenäquivalenz berechnen zu können. Die Auswahl der 150 DTF erfolgt nach den

Demgegenüber sind mehrschichtige Waldstrukturen gleichbedeutend mit einer relativ geringen Schwankung der Nettoprimärproduktion und dementsprechend der Wirkung von Wäldern als C-Speicher.

Für den Gesamtwald im Freistaat werden Inventuren des oberirdischen Biomassespeichers (BWI) mit 10-jähriger Periode durchgeführt (BWI⁴ 2022). Die dritte bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE 3) ist 2022 – 2024 durch das Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft (SBS) auf 77 Standorten durchzuführen; die BZE wird aber in Sachsen zur regionalen Nutzung der Daten auf 283 Standorte (Vollerhebungsnetz 4 x 4 km) verdichtet. Dieses Vollerhebungsnetz der BZE könnte in seiner Aussagekraft für Standortseinheiten mit großer Bedeutung als C-Speicher (z. B. organische Böden) durch Wiederbeprobung von qualitätsgeprüften Leitprofilen der bodenkundlichen Landesaufnahme des LfULG oder Weiserprofilen der Forstlichen Standortserkundung systematisch verdichtet werden. Dazu ist über geostatistische Analysen des vorhandenen Datenbestandes im Geschäftsbereich eine bezüglich Aufwand und Repräsentativität optimierte Beprobungsstrategie (z. B. Nested Sampling als Ergänzung der systematischen Stichprobe) zu entwickeln.

Für den Gesamtwald sind die Effekte großflächiger Einbrüche der Wirkung von Wäldern als C-Senke als Folge der Einwirkungen von exogenen (z. B. Sturm, Nassschnee, Dürre) oder endogenen Faktoren (z. B. Massenvermehrungen von Insekten) mit Methoden der Fernerkundung (Sentinel-2-Daten) abzuschätzen und mit terrestrisch erhobenen Waldzustandsdaten sowie repräsentativen Informationen zu C-Vorräten und -Flüssen zu verknüpfen. Für die Bereitstellung und die Verarbeitung der Fernerkundungsdaten wäre in Anlehnung an die Zusammenarbeit bei den ReKIS-Klimadaten eine Kooperation mit dem Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) der TU Dresden anzustreben. Gleichzeitig sind im Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS) die technologischen (VPN-Schnittstelle, Rechentechnik, Software) und personellen Voraussetzungen zur optimierten Interpretation von Satellitendaten zu schaffen. Für großflächige Systemeinträge von Fichten- und Kiefern-Forsten fehlen hinreichend genaue Modelle zur Abschätzung der Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Bodenspeicher entlang repräsentativer und flächenrelevanter Standortgradienten. Derartige Modelle sind folglich zu entwickeln. Ein erster Schritt dafür ist die Ermittlung der notwendigen Eingangsdaten, wie die repräsentative Bestimmung des C-Vorrates von bewaldeten Flächen und Flächen nach dem Wegfall der Nettoprimärproduktion der betroffenen Forst-Ökosysteme. Die geschätzten Kosten im Bereich Sachsenforst enthält die Anlage, Tabelle A 4.

Landwirtschaft

Für landwirtschaftlich genutzte Standorte sind die Wahl der Fruchtfolge, Art und Menge der organischen Düngung und die Bodenbearbeitung wesentliche Einflussgrößen auf die C-Bindung bzw. -Freisetzung. Um diese Effekte besser quantifizieren zu können, wird im Bereich Landwirtschaft eine Aufnahme der Bodenbearbeitungsversuche des LfULG und der Südzucker AG (Standorte Lüttewitz, Zschortau, Methau/Colditz und Versuchsstation Nossen) in ein entsprechendes Monitoringprogramm zur periodischen Erfassung der C-Gehalte und -Vorräte in unterschiedlichen Bodentiefen in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren vorgeschlagen. Zudem sollen auch an 5 ausgewählten Düngungs- und Grünlanddauerversuchen C-Gehalte und -Vorräte in regelmäßigem Turnus erfasst werden.

Im aktuellen Monitoring zu klären ist die Erfassung von (fachgebietsübergreifenden) Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen. Dies betrifft z. B. Änderungen der Wald- und Dauergrünlandflächen oder Änderungen der Flächen mit Zwischenfruchtanbau. Das begleitende Monitoring sollte Aussagen über die Effekte solcher Änderungen auf die C-Bilanz insbesondere in der Landwirtschaft ermöglichen. Die geschätzten Kosten im Bereich Landwirtschaft enthält die Anlage, Tabelle A 4.

Phase 3: Parallelmessungen an repräsentativen Standorten (Verschneidung von Vorrats- und Flussmessungen) und Erweiterung des Monitorings auf bisher unbeobachtete Landnutzungen

Die Kohlenstoffbilanz landwirtschaftlich genutzter Böden ist bislang unklar. Diese sind an ICOS-Standorten in Sachsen und Europa eine CO₂-Quelle. Wiederholte Inventuren an BDF in Sachsen zeigen dagegen keine signifikanten Trends. Diese Diskrepanz sowie spezifische methodische Unsicherheiten von Vorrats- und Flussmessungen könnten mit einem parallelen Monitoring an Intensivstandorten (z. B. BDF 2, ICOS) untersucht werden. Dazu müssten an sächsischen ICOS-Standorten zusätzlich Inventuren nach verschiedenen Erhebungsmethoden durchgeführt werden. Alternativ oder zusätzlich könnten z. B. an repräsentativen BDF-2-bzw. forstlichen Level-2-Standorten Flussmessungen (CO₂, H₂O) nach ICOS Standard eingerichtet werden.

Die geschätzten Kosten für Einrichtung und Betrieb von Vorratsinventuren an ICOS-Standorten sowie für Flussmessungen nach ICOS-Standard an weiteren repräsentativen Standorten enthält die Anlage, Tabelle A 4.

Bisher gibt es für Sachsen kaum Informationen zu den Kohlenstoffvorräten von organischen Böden (naturnahe Moore, entwässerte und genutzte Moore). So verursachen genutzte organische Böden trotz ihrer flächenbezogen geringen Bedeutung erhebliche Treibhausgasemissionen infolge des Abbaus organischer Substanz. Deren Bedeutung für die sächsische Treibhausgas- und C-Bilanz kann gegenwärtig nur grob geschätzt werden. Nach derzeitigem (ungenauen) Erkenntnisstand umfassen naturnahe Moore und organische Nassstandorte insgesamt ca. 2,5 % der Landesfläche (ca. 47.000 ha). Diese oftmals kleinräumig vorkommenden Standorte wurden in der Vergangenheit entwässert und in Kultur genommen. Deren aktueller C-Vorrat und seine Veränderungstendenz sind nicht bekannt. Um die Unsicherheiten und Kenntnislücken zu schließen, ist eine Neukartierung (auch forstlich genutzter) organischer Standorte insbesondere im Tiefland sowie die Bestimmung aktueller C-Vorräte und deren Veränderungspotentiale erforderlich. Es geht dabei auch um die Frage, ob eine Wiedervernässung auch aus dem Blickwinkel der Sicherung und des Wiederausbaus der C-Vorräte sinnvoll sein kann. Für diese drainierten, naturnahen und wiedervernässten Flächen könnte an ausgewählten Standorten der langfristige zeitliche Verlauf der C-Vorratsänderungen im Rahmen eines dauerhaften Monitorings von C-Vorräten und C-Flüssen über die Einrichtung von BDF-2-/ Level-2-Flächen und/oder Flussmessungen nach ICOS-Standard und/oder mittels automatischer Haubenmessungen erfolgen. Durch diese Kombination aus Vorrats- und Flussmessungen könnten der atmosphärische CO₂/CH₄-Austausch, die bodenbezogenen C-Umsetzungs- und Speicherungsprozesse und der Austrag von DOC über Sicker- und Oberflächenwasser abgebildet werden. Bei einer derartigen Kombination ließen sich zudem zahlreiche messtechnische Synergien nutzen. Auch die Problematik der DOC-Austräge und deren Eintrag in die Zuflüsse von Trinkwassertalsperren könnte in diesem Zusammenhang untersucht werden. Die geschätzten Kosten für Einrichtung und Betrieb von Vorratsinventuren und Flussmessungen an neu einzurichtenden Standorten enthält die Anlage, Tabelle A 4.

Ein analoges Monitoring von Bergbaufolgelandschaften, Binnengewässern/Talsperren und urbanen Gebieten sollte darüber hinaus bedacht und ggf. in Erwägung gezogen werden.

Tabelle A 4: Kostenschätzungen zum Monitoringkonzept

C-Monitoring: Kostenübersicht nach Jahren																										
Tätigkeit	Institutio	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	
Phase 1 - zwingend notwendig																										
BDF (Anpassung des Probenintervalls/zusätzliche Beprobung)	LfULG/ A 4			25000					25000					25000					25000						25000	
BZE (landesweite Verdichtung, 206 Punkte, Personal E 6, 2 Jahre (in HH-Planung für 2011/22 eingebracht, Entscheidung steht aus)	SBS		45000	45000																						
BZE (landesweite Verdichtung, 206 Punkte, Vergabe Beprobung)	SBS		25000	20000	5000													25000	20000	5000						
DTF (Erweiterung der 5-jährlichen C-Beprobung an 150 ausgewählten DTF auf die Tiefenstufe 30 – 60 cm sowie zusätzliche Erhebungen der Trockenrohddichte in 0 – 30 und 0 – 60 cm Tiefe; Zusammensetzung der Kosten: Personal 50 % E13 37.000 €, Mittel für Aufträge an Dritte 14.000 €)	LfULG/ A 7		18500	48200	21300				18500	48200	21300			18500	48200	21300		18500	48200	21300				18500	48200	21300
Fortsetzung des Messprogramms an drei bestehenden ICOS-Standorten und zwei weiteren bestehenden Messstationen mit Eddy-Kovarianz-Messtechnik	TU	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000
Fachliche Koordinierung	FS SN?	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000	116000
IT (50 % E 11, Investitionen)	LfULG/ A 5		47000	94000	47000									47000	94000	47000		47000	94000	47000				47000	94000	47000
Summe Phase 1 (ohne Eigenbeitrag der TU Dresden)	LfULG/ A 11 + A 5	116000	251500	390200	189300	116000	116000	134500	189200	137300	116000	116000	181500	283200	184300	116000	116000	206500	303200	189300	116000	116000	181500	283200	184300	
Phase 2 - optional																										
Geostatistische Analyse des Datenbestandes „Waldboden“ (BZE, qualitätsgeprüfte Weiserprofile des LfULG & SBS) für kosten- und nutzenoptimierte Verdichtungsstrategie	SBS	75000	75000																							
Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Detektion von großflächigen Einbrüchen der Nettoprimärproduktion in Fichten- und Kiefern-Forsten	SBS			75000	75000					75000					75000						75000					
Bestimmungen des C-Vorrates von Waldökosystemen in repräsentativen Phasen der Dynamik der Nettoprimärproduktion bzw. nach großflächigen Systemeintrüben für flächenrepräsentative Standortsgradienten (4 Beprobungszyklen)	SBS					35000					35000					35000					35000					
Monitoring der Auswirkungen von Bodenbearbeitungsverfahren, Düngung und Grünlandbewirtschaftung auf C-Gehalte und Trockenrohddichte	LfULG/A 7	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000
Summe Phase 2		89000	89000	89000	89000	49000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000	
Phase 3 - optional																										
Einrichtung und Betrieb von Vorratsinventuren an ICOS-Standorten sowie für Flussmessungen nach ICOS-Standard an weiteren repräsentativen Standorten	FS SN?							142500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	45500	
Einrichtung und Betrieb von Vorratsinventuren und Flussmessungen nach ICOS-Standard an bisher unbeobachteten Standorten	FS SN?												270000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	59000	
Summe Phase 3								142500	45500	45500	45500	45500	315500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	104500	
Gesamtkosten bei Umsetzung aller Maßnahmen (ohne Tarif- und sonstige Erhöhungen)		205000	340500	479200	278300	165000	130000	291000	248700	271800	210500	175500	511000	401700	377800	269500	234500	325000	421700	382800	269500	234500	300000	401700	302800	

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: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autor:

Thomas Grünwald, Claudia Schmidt-Cotta, Karsten Kalbitz, Christian Bernhofer
TU Dresden, Professuren Meteorologie und Bodenressourcen,
Landnutzung
Pienner Str. 23, 01737 Tharandt
Telefon: +49 351 4633129
E-Mail: thomas.gruenwald@tu-dresden.de

Redaktion:

Andrea Hausmann
Abteilung 5/Referat 51
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5100
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: andrea.hausmann@smul.sachsen.de

Fotos:

Claudia Schmidt-Cotta

Auflage:

1. Auflage

Redaktionsschluss:

03.02.2021

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de