

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Steigerung der Kohlenstoffsequestrierung in Waldböden durch gezieltes Totholzmanagement

Akronym:

TotC

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Teilvorhaben 2: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2219WK07A4

Teilvorhaben 2: 2219WK07B4

Laufzeit:

01.04.2021 bis 31.12.2024

Monat der Erstellung:

06/2025

Veröffentlichung:

20.10.2025

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	3
1.	Aufgabenstellung	3
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	5
	a) Arbeitspakete und Meilensteine	5
	b) Zusammenfassung	6
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	7
1.	Erzielte Ergebnisse	7
1.1	Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte.....	7
	1.1.1 AP 1.1 Flächenauswahl und Methodik	7
	1.1.2 AP 1.2 Kohlenstoff- und Stickstoffanalysen.....	10
1.2	Arbeitspaket 2: Prozessuntersuchungen auf Intensivmessplots: Kohlenstoffflüsse	11
	1.2.1 AP 2.1 Einrichtung Intensivmessplots	11
	1.2.2 AP 2.2 Bodenbeprobung	14
	1.2.3 AP 2.3 Analyse bodenchemischer Parameter.....	15
	1.2.3.1 Analyse der Humusaufgabe und des Mineralbodens	15
	1.2.3.2 Analyse der Bodenwasserproben.....	15
	1.2.4 AP 2.4 Beprobung Stoffflüsse auf Intensivmessplots	16
	1.2.4.1 DOC-Flüsse	16
	1.2.4.2 CO ₂ -Flüsse	16
	1.2.4.3 Bodentemperatur und Bodenfeuchte.....	17
	1.2.5 AP 2.5 Bilanzierung der Flüsse	17
	1.2.5.1 Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) im Bodenwasser	17
	1.2.5.2 Kohlenstoff in Form von CO ₂ aus dem Boden und dem Totholz	18
	1.2.5.3 Bilanzierung der DOC- und CO ₂ -Flüsse	20
1.3	Arbeitspaket 3: Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention	21
	1.3.1 AP 3.1 Probenahme und Analysen	21
	1.3.2 AP 3.2 Ergebnisse der Messungen an ungestörten Bodenproben	22
	1.3.3 AP 3.3 Wurzelbiomasse und Nährelementgehalte in den Wurzeln.....	23
	1.3.4 AP 3.4 Stabilität der organischen Substanz	24
	1.3.5 AP 3.5 Einfluss des Zersetzungsgrad	25
1.4	Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3	26
	1.4.1 AP 4.1 Zusammenstellung der Daten aus AP 1-3.....	26
	1.4.2 AP 4.2 Korrelationsanalysen und Geostatistik	26
	1.4.3 AP 4.3 Modellerstellung und Regionalisierung.....	26
	1.4.3.1 Modellierung des Einflusses von Totholz auf Bodenfeuchte und Bodentemperatur	26
	1.4.3.2 Modellierung Einflussfaktoren auf DOC	28
	1.4.3.3 Modellierung der Einflussfaktoren auf CO ₂ -Flüsse.....	29
	1.4.3.4 Lückenfüllung der CO ₂ -Flüsse mittels Modellierung.....	30
	1.4.3.5 Modellierung der Einflüsse auf C _{org} in der Bodenfestphase	30
	1.4.3.6 Regionalisierung der Daten	31

1.5	Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen	31
1.5.1	AP 5.1 Aufbereitung der Ergebnisse für Fortbildungsveranstaltungen der Forstpraxis 31	
1.5.2	AP 5.2 Planung und Durchführung des Abschlussworkshops	31
1.6	Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen.....	31
2.	Verwertung	31
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	31
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	31
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	32
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	32
e)	Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten	32
3.	Erkenntnisse von Dritten	32
4.	Veröffentlichungen	32
ANHANG	35
	Teilvorhaben 1: Kohlenstoffbilanzen	35
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	35
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	35
2.1	Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte	35
2.2	Arbeitspaket 2: Prozessuntersuchungen auf Intensivmessflächen: Kohlenstoffflüsse	35
2.3	Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3	35
2.4	Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen	35
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	35
3.1	Zielsetzung und Untersuchungsdesign	35
3.2	Kohlenstoffflüsse: Messungen und Bilanzierung	35
3.2.1	DOC-Konzentration im Bodenwasser	35
3.2.2	Bilanzierung der DOC- und CO ₂ -Flüsse	36
3.3	Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffflüsse	36
3.3.1	Baumart und Zersetzungsstufe	36
3.3.2	Mikroklimatische Effekte	36
3.3.3	Standort- und Expositionsabhängigkeit	36
3.4	Modellierungen und Regionalisierungen.....	36
3.5	Schlussfolgerung.....	37
	Teilvorhaben 2: Kohlenstoffstabilisierung und Bodenstruktur	38
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	38
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	38
2.1	Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte	38
2.2	Arbeitspaket 3: Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention	38
2.3	Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3	38
2.4	Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen	38
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	39
QUELLENANGABEN	40

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

In der forstlichen Praxis und im Rahmen ökologischer Zertifizierungssysteme wird die Erhöhung des Totholzanteils im Wald zunehmend als bedeutende Maßnahme zur Förderung der Biodiversität betrachtet. Insbesondere seltene und gesetzlich geschützte Arten profitieren vom Verbleib abgestorbener Bäume im Ökosystem. Neben dieser naturschutzfachlichen Funktion deutet sich jedoch ein weiterer, bislang wenig untersuchter Vorteil an: die potenzielle Förderung der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden. Ziel des Projektes war es, den Zusammenhang zwischen Totholz und der Kohlenstoffbindung im Boden systematisch zu untersuchen. Die zugrundeliegende Hypothese lautete, dass durch gezielte Steuerung von Menge, Qualität und Verteilung von Totholz nicht nur die organische Substanz im Boden angereichert, sondern auch wichtige Bodenfunktionen wie Wasserhaushalt, Nährstoffverfügbarkeit und Bodenstruktur positiv beeinflusst werden kann. Dies hätte direkte Auswirkungen auf die Biomasseproduktion, die Bioturbation und die langfristige Stabilisierung der Kohlenstoffvorräte im Boden.

Das Projekt setzte dabei auf eine Kombination aus großflächigen Datenerhebungen und detaillierten Prozessanalysen. In Baden-Württemberg wurden bestehende Daten aus Boden- und Kohlenstoffinventuren mit neuen Totholzerhebungen zusammengeführt. Ergänzend erfolgte auf ausgewählten Intensivmessflächen die Erfassung von Kohlenstoffausträgen über das Sickerwasser und die Messung der CO₂-Emissionen aus dem Boden und dem Totholz. Zusätzlich wurden Bodenaggregate hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Stabilisierung von Kohlenstoff sowie zur Speicherung von Wasser und Nährstoffen analysiert. Auch Hanglagen wurden berücksichtigt, um dort den Rückhalt von Streu und Feinmaterial durch Totholz sowie den Transport gelöster Stoffe zu bewerten.

Ein wesentlicher Teil des Projektes war die Bewertung der Standortabhängigkeit der Prozesse. Dabei wurden Unterschiede in Bodentypen, Baumartenmischung, Klimaeinflüssen und forstlichem Management berücksichtigt. Ziel war es, standortspezifische Handlungsempfehlungen für die Waldbewirtschaftung zu entwickeln, die nicht nur dem Naturschutz dienen, sondern auch die Funktion des Waldes als CO₂-Senke stärken.

Das Vorhaben bezog sich direkt auf mehrere Förderschwerpunkte des Förderaufrufs „Waldböden im Klimawandel“, insbesondere auf den Schwerpunkt zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung im Boden. Es lieferte einen wichtigen Beitrag zum Verständnis von Kohlenstoffdynamiken in Waldökosystemen, insbesondere unter Einbeziehung von Totholz. Durch die Erhebung und Auswertung von Daten zu gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC), Bodenrespiration, CO₂-Flüssen aus dem Totholz und Bodenaggregatstabilität war es möglich, die Klimawirkung von Totholz differenziert zu bewerten. Darüber hinaus trug das Projekt zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel bei. Es untersuchte, inwiefern ein angepasstes Totholzmanagement nicht nur die Kohlenstoffspeicherefähigkeit des Bodens erhöht, sondern auch den Wasserhaushalt stabilisiert und damit eine wichtige Rolle bei der Minderung klimabedingter Stressphasen, etwa in Trockenperioden, spielen kann. Das Projekt leistete somit einen integrativen Beitrag zur Kohlenstoff- und Klimabilanz der Wälder und unterstützte die Entwicklung von Strategien zur CO₂-Minderung, die sowohl ökologische als auch forstwirtschaftliche Ziele miteinander verbinden.

Die übergeordnete Fragestellung des Projektes war, inwieweit ein angepasstes Totholzmanagement die Kohlenstoffsequestrierung in Waldböden steigern kann. Zur Beantwortung dieser Frage wurden folgende Teilziele verfolgt:

(1) Inventur des Beitrags von Totholz für die Bodenkohlenstoffvorräte

Der Einfluss von Totholz auf Menge und Stabilisierung des Bodenkohlenstoffs wurde quantifiziert. Dafür wurde eine Inventur des Bodenkohlenstoffs auf systematisch ausgewählten Untersuchungsflächen durchgeführt (Extensivmessflächen), deren Erhebungen die flächige Abschätzung des Totholzeffektes erlaubten. In die Auswertungen wurden ebenfalls Daten der Bodenzustandserhebung (BZE) und der Bodeninventur im Rahmen der Bundeswaldinventur (BWI) einbezogen.

(2) Analyse der bodenbezogenen Kohlenstoffbilanz im Umfeld von Totholz (DOC-Austrag mit dem Sickerwasser, CO₂-Emissionen aus dem Boden und dem Totholz, in der Festphase des Bodens gespeicherter Kohlenstoff)

Auf ausgewählten Versuchsflächen (Intensivmessplots) wurden die für die Kohlenstoffbilanz maßgeblichen Flüsse (Sickerwasserausträge, Respiration aus Boden und Totholz) erfasst und quantifiziert. Dadurch wurden Bedingungen identifiziert, unter denen totholzbürtiger Kohlenstoff über die Bodenwasser- oder -gasphase ausgetragen wird.

(3) Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Totholz, Bodenkohlenstoffspeicherung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserspeicherung

Der Einfluss von Totholz auf die Bodenkohlenstoffspeicherung, Bodenstruktur sowie Bodenfunktionen wie Wasser- und Nährstoffhaushalt wurde untersucht. Dafür wurden auf den Intensivmessplots Totholz, Stabilität des Kohlenstoffs, Wurzelbiomasse und Gehölzvegetation erfasst.

(4) Abschätzung und Bewertung des Einflusses von Totholz auf die Kohlenstoffsequestrierung für unterschiedliche Naturräume und Bewirtschaftungsformen

Es wurden flächig Totholzeffekte abgeleitet und der Beitrag verschiedener Totholz-Management-Konzepte (Anteil, Baumart, Standort) für die Kohlenstoffsequestrierung in Waldböden quantifiziert. Durch Modelle wurden die wesentlichen Treiber der Kohlenstoffbilanzen bzw. -teillflüsse erfasst.

(5) Ableitung von allgemeingültigen Managementempfehlungen für das Belassen von Totholz im Wald; Bewertung des Alt- und Totholzkonzeptes von ForstBW bezüglich des Potenzials zur Kohlenstoffsequestrierung

Es wurden praxistaugliche, wenn möglich nach Standorteigenschaften differenzierte, Empfehlungen in Bezug auf das Belassen von Totholz im Wald erarbeitet. Die Konzepte basierten auf der Analyse von Zusammenhängen zwischen Totholzanteil, Bodentyp, Bodenart, Bodenstruktur, Baumarten, Dauer des Totholzkontaktes mit dem Boden, der Kohlenstoffsequestrierung und der Wasser- und Nährstoffspeicherung.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war feldarbeitsintensiv und mit einer hohen Anzahl an Boden- und Wasserproben verbunden. Der zeitliche Ablauf gliederte sich wie folgt: Zunächst erfolgte die Einrichtung der Intensivmessflächen, gefolgt von einer umfangreichen Probenahme im Gelände und Analyse im Labor. Diese Daten wurden für die anschließende Auswertung aufbereitet. Zur besseren Planung und Strukturierung des Projektes wurde ein Balkenplan erstellt, der den geplanten zeitlichen Projektfortschritt anhand der Arbeitspakete visualisiert.

	2021			2022				2023				2024
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
AP 1 – Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte												
1.1. Auswertung von Inventurdaten bzgl. Boden-C-Vorräten												
1.2. Bodenbeprobung auf Extensivmessflächen												
1.3. Laboranalysen												
1.4. Totholzinventur auf Extensivmessflächen												
1.5. Zusammenhangsanalysen Boden-C-Vorräte vs. Totholz												
AP 2 – Prozessuntersuchungen auf Intensivmessflächen: Kohlenstoffflüsse												
2.1. Einrichtung Intensivmessflächen												
2.2. Bodenbeprobung												
2.3. Analyse bodenchemischer Parameter												
2.4. Beprobung Stoffflüsse auf Intensivmessflächen												
2.5. Bilanzierung der Flüsse												
AP 3 – Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention												
3.1. Entnahme Stechzylinder für Analyse der Bodenstruktur												
3.2. Analyse der Bodenstruktur im Labor												
3.3. Dichtefraktionierung der organischen Bodensubstanz												
3.4. Totholzinventur												
3.5. Quantifizierung der Wurzelbiomasse												
3.6. Verknüpfung der Ergebnisse mit Daten aus AP 1 und 2												
AP 4 – Modellierung und Regionalisierung der Daten aus den APs 1, 2 und 3												
4.1. Zusammenstellung der Daten aus AP 1 bis AP 3												
4.2. Korrelationsanalysen und Geostatistik												
4.3. Modellerstellung und Regionalisierung												
AP 5 – Ableitung von Managementempfehlungen												
5.1. Aufbereitung der Ergebnisse für Fortbildungsveranstaltungen der Forstpraxis												
5.2. Planung und Durchführung des Abschlussworkshops												
Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen (FowiTa, DBG)												
Meilensteine												

Ein Großteil des Arbeitsvolumens entfiel auf die Beprobungen der Extensivmessflächen und Intensivmessplots und die Analysen der entnommenen Proben (AP 1-3). Die Ergebnisse dieser Analysen waren als Vorbereitung für die Bearbeitung von AP 4 und AP 5 notwendig. Ein besonders hoher Zeitaufwand entstand durch die kontinuierliche Beprobung der Stoffflüsse auf den Intensivmessplots und durch die Entnahme der Bodenproben auf den 20 Extensivmessflächen und deren Analyse, da für eine belastbare Datengrundlage eine hohe Messfrequenz und Probenanzahl erforderlich war. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes (ursprüngliches Ende: 31.03.2024, neues Ende: 31.12.2024) erlaubte eine längere Messung der Flüsse auf den Intensivmessplots und mehr Zeit für die Auswertung der beachtlichen Menge an erhobenen Daten.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte	04/2021 bis 06/2023	Im Rahmen von AP 1 wurden insgesamt 20 Extensivmessflächen ausgewählt und pro Fläche jeweils 3 bis 4 Totholzstämme beprobt. Auf den Flächen wurde eine Vielzahl zusätzlicher Variablen erhoben. Es konnte eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes in der Humusaufgabe bzw. dem Oberboden von im Mittel ca. 10 bis 20 Prozent im Umfeld von liegendem Totholz festgestellt werden.
AP 2 Prozessuntersuchungen auf Intensivmessplots: Kohlenstoffflüsse	04/2021 bis 09/2023	Die Messungen der Kohlenstoffflüsse im Umfeld von Totholz fanden über einen Zeitraum von knapp 3 Jahren statt. Hauptexportpfad von Kohlenstoff aus dem Boden ist CO ₂ . Durch das Vorhandensein von Totholz wurde vermehrt Kohlenstoff in Form von CO ₂ , aber auch in Form von DOC, freigesetzt. Die Kohlenstoffbilanzen zeigten eine starke Standortabhängigkeit. Darüber hinaus traten selbst innerhalb einzelner Standorte erhebliche Unterschiede zwischen den untersuchten Totholzstämmen auf. Diese Beobachtungen weisen auf eine ausgeprägte, teils auch kleinräumige Variabilität der zugrundeliegenden Prozesse hin.
AP 3 Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention	07/2021 bis 03/2023	Es wurden ca. 200 volumen- und lagerungstreue Stechzylinder auf den Intensivmessflächen entnommen. An ihnen konnten Trockenrohdichten, Strahlungsaktivität von CS137, Wasserleitfähigkeit und die Wurzelbiomasse bestimmt werden. Trockenrohdichten, Wasserleitfähigkeit und Wurzelbiomasse sind am Totholz im Vergleich zu den Kontrollen verringert. Allerdings ist der Gehalt an Hauptnährstoffen in den Wurzeln erhöht. Die CS137-Aktivität als Marker zeigt eine erhöhte Bioturbation im Umfeld von liegendem Totholz.
AP 4 Modellierung und Regionalisierung der Daten aus den APs 1, 2 und 3	10/2022 bis 12/2023	Während die CO ₂ -Flüsse hauptsächlich von der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte gesteuert wurden, war die DOC-Konzentration abhängig vom pH-Wert im Bodenwasser, von der Baumart des Totholzes und von mikroklimatischen Parametern im Boden. Der C _{org} -Gehalt in der Bodenfestphase wurde maßgeblich vom pH-Wert gesteuert. Ebenso spielte die Baumart eine Rolle, wobei hier Wechselwirkungen mit dem pH-Wert anzunehmen sind. Aufgrund der starken Standortabhängigkeit des Totholzeffektes war eine Regionalisierung mit dem vorhandenen Datensatz nicht möglich.
AP 5 Ableitung von Managementempfehlungen	07/2023 bis 03/2024	Die Ableitung allgemeingültiger Empfehlungen bezüglich des Belassens von Totholz stellte sich aufgrund der starken Standortabhängigkeit der Totholzeffekte als äußerst schwierig heraus. Einen deutlich größeren Effekt vor allem auf die DOC-Konzentration im Boden konnte unter Buchentotholz nachgewiesen werden. Dies ist ein Argument für die Belassung von abgestorbenen Buchen im Wald im Vergleich zu Fichten. Für die Bodenfestphase zeigt sich gegenteilig ein erhöhter Effekt unter Fichtentotholz auf sauren Standorten. Dieser Effekt kann genutzt werden, indem das ohnehin durch zunehmende, klimabedingte Abgänge anfallende Holz auf den Flächen belassen wird. Hierbei sollten jedoch Gründe der Wirtschaftlichkeit und des Waldschutzes Beachtung finden.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Kick-Off-Treffen hat stattgefunden, Versuchsflächen sind ausgewählt und Intensivmessplots sind eingerichtet (AP 1-3)	06/2021	erreicht 12/2021
M 2 C-Vorräte aus Inventurdaten sind berechnet (AP 1), Bodenbeprobung und Analyse auf Intensivmessplots sind abgeschlossen (AP 2), Bodenstrukturanalysen und Dichtefraktionierung sind abgeschlossen (AP 3)	03/2022	erreicht 09/2024
M 3 Probenahme und Analysen auf Extensivmessflächen sind abgeschlossen (AP 1), Totholzinventuren sind abgeschlossen (AP 3), Zusammenstellung der Daten ist abgeschlossen (AP 4)	12/2022	erreicht 12/2024
M 4 AP 1 ist abgeschlossen, die Bilanzierung der C-Flüsse auf den 12 Intensivmessplots ist abgeschlossen (AP 2), erste Modelle für die Regionalisierung der Bodenkohlenstoffvorräte sind erstellt (AP 4-5)	09/2023	erreicht 12/2024

b) Zusammenfassung

(1) Inventur des Beitrags von Totholz für die Bodenkohlenstoffvorräte

Es wurden 20 sogenannte Extensivmessplots beprobt. Der Unterschied von totholzbeeinflussten Proben zu Kontrollproben beläuft sich für die Bodenfestphase auf ca. 10 bis 20 % mehr organischer Kohlenstoff (C_{org}) im Oberboden.

(2) Bodenbezogene Kohlenstoffbilanz im Umfeld von Totholz

Durch das Vorhandensein von Totholz konnte neben einem erhöhten CO_2 -Ausstoß auch ein Anstieg der DOC-Gehalte im Bodenwasser nachgewiesen werden. Der Beitrag von Totholz – sowohl als Kohlenstoffquelle (CO_2) als auch als Lieferant von DOC – war auf dem Standort mit silikatischem Ausgangsgestein am stärksten ausgeprägt. Die Kohlenstoffflüsse zeigten eine starke Standortabhängigkeit und teilweise auch große Unterschiede zwischen einzelnen untersuchten Stämmen innerhalb eines Standortes.

(3) Zusammenhang zwischen Totholz, Bodenkohlenstoffspeicherung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserspeicherung

Im Umfeld von liegendem Totholz ist die Bioturbation erhöht, was zusammen mit der geringeren Masse des eingetragenen organischen Materials zu einer geringeren Trockenrohdichte führt. Die Wasserleitfähigkeit ist trotz der verringerten Dichte nicht erhöht. Dies lässt sich mit der abschirmenden Wirkung des Holzes gegen Niederschläge erklären. Die Kationenaustauschkapazität, als Maß für die Verfügbarkeit von Nährstoffen ist nicht signifikant unterschiedlich zwischen Totholz- und Kontrollproben. Jedoch sind trotz geringerer Wurzelbiomasse die Nährstoffgehalte in den Wurzeln erhöht. Dies spricht für eine effizientere Aufnahme der Nährstoffe am Totholz und somit für ein engeres Stoffrecycling.

(4) Der Einfluss von Totholz auf Kohlenstoffsequestrierung für unterschiedliche Naturräume und Bewirtschaftungsformen

Für die Bodenfestphase konnten signifikant erhöhte C_{org} -Gehalte auf sauren Standorten und unter Fichtentotholz festgestellt werden. Da saure Standorte von Natur aus die Wuchsgebiete der Fichte sind, lassen sich so die schlechteren Nadelholzstandorte von den besseren Laubholzstandorten unterscheiden.

(5) Empfehlungen für die Praxis

Da festgestellt wurde, dass bodensaure Fichtenbestände einen erhöhten Totholzeffekt aufweisen als basische Buchenbestände, sollte im Sinne des Totholzmanagements vermehrt der Fokus auf erstere gelegt werden. Da bedingt durch den fortschreitenden Klimawandel ohnehin viele Nadelholzbestände abgängig sind, bieten sich vielfach Optionen für Synergien an. Gleichwohl ist der Kohlenstoff in der Festphase vor allem in vulnerablen Pools gespeichert, so dass nach dem Belassen von Totholz auf den Flächen auch eine zügige Wiederbewaldung angestrebt werden sollte, um keine Mineralisationsspitzen zu verursachen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte

1.1.1 AP 1.1 Flächenauswahl und Methodik

Im Rahmen des AP 1 wurden insgesamt 20 sogenannte Extensivmessflächen beprobt. Jede Fläche schließt drei bis vier Totholzstämme ein. Innerhalb einer Fläche wurde darauf geachtet, dass die Parameter Zersetzungsgrad, Baumart, Bestandesstruktur, Bodentyp und Ausgangsgestein, sowie Exposition und Hangneigung an allen Totholzstämmen annähernd identisch sind. Die Flächen decken die Humusformen von L-Mull bis rohhumusartigen Moder und die pH-Werte von 3,4 bis 8,5 ab. In **Tabelle 1** sind Extensivmessflächen und Intensivmessplots (siehe **II. 1.2**) inklusive der wichtigsten Kennwerte aufgelistet. Es wurden 13 Flächen mit Buchentotholz und 7 Flächen mit Fichtentotholz ausgewählt. Die Flächenauswahl bzw. die Streuung der Kennwerte spiegelt die verschiedenen Naturräume Baden-Württembergs gut wieder. In **Abbildung 1** ist die Lage der Versuchsflächen in einem Kartenausschnitt des Bundeslandes dargestellt. Wie dort ersichtlich ist auch die flächige Abdeckung des Bundeslandes hinreichend gelungen. Allerdings sind die Regionen Alpenvorland und Hohenlohe unterrepräsentiert. Auf allen Extensivmessflächen wurde das Beprobungsdesign verwendet, dass in **Abbildung 2** schematisch dargestellt ist: Das Design besteht aus vier Beprobungspunkten, die in Hangfalllinie ausgerichtet sind. Da bei der Lage der Totholzstämme auf eine möglichst höhenlinienparallele Ausrichtung geachtet wurde ergab sich so ein annähernd rechtwinkliger Verlauf der Beprobungs- zur Stammachse. Es wurden jeweils zwei Punkte direkt oberhalb und unterhalb des Stammes beprobt. Hierbei wurde der Bohrer bzw. Stechrahmen direkt am Holz angelegt und das Auflage- bzw. Bodenmaterial lotrecht entnommen. Im Abstand von ca. drei bis fünf Metern wurden Kontrollpunkte oberhalb und unterhalb beprobt. An allen Punkten wurde die Humusaufgabe, nach Schichten getrennt in einem Stechrahmen (25x25cm) entnommen. Im Anschluss wurde der so freigelegte Mineralboden mittels eines volumengetreuen Bohrers (Murachscher Wurzelbohrer, Durchmesser 8 cm) beprobt (vgl. **Abbildung 2** rechts). Im Mineralboden wurden je nach Gründigkeit bis zu drei Tiefenstufen beprobt (0-10 cm, 10-30 cm und 30-60 cm). Bei einer voll ausgeprägten Humusaufgabe (L, Of und Oh) ergaben sich so bis zu 6 Tiefenstufen/Teilproben pro Beprobungspunkt. Bei Flächen auf denen die Oh-Lage nur so schwach ausgeprägt war, dass nicht genug Material für die Laboranalysen angefallen wäre, wurden Of-Oh Mischproben entnommen. Insgesamt wurden auf den Extensivmessflächen 1093 Bodenproben an 66 Totholzstämmen entnommen.

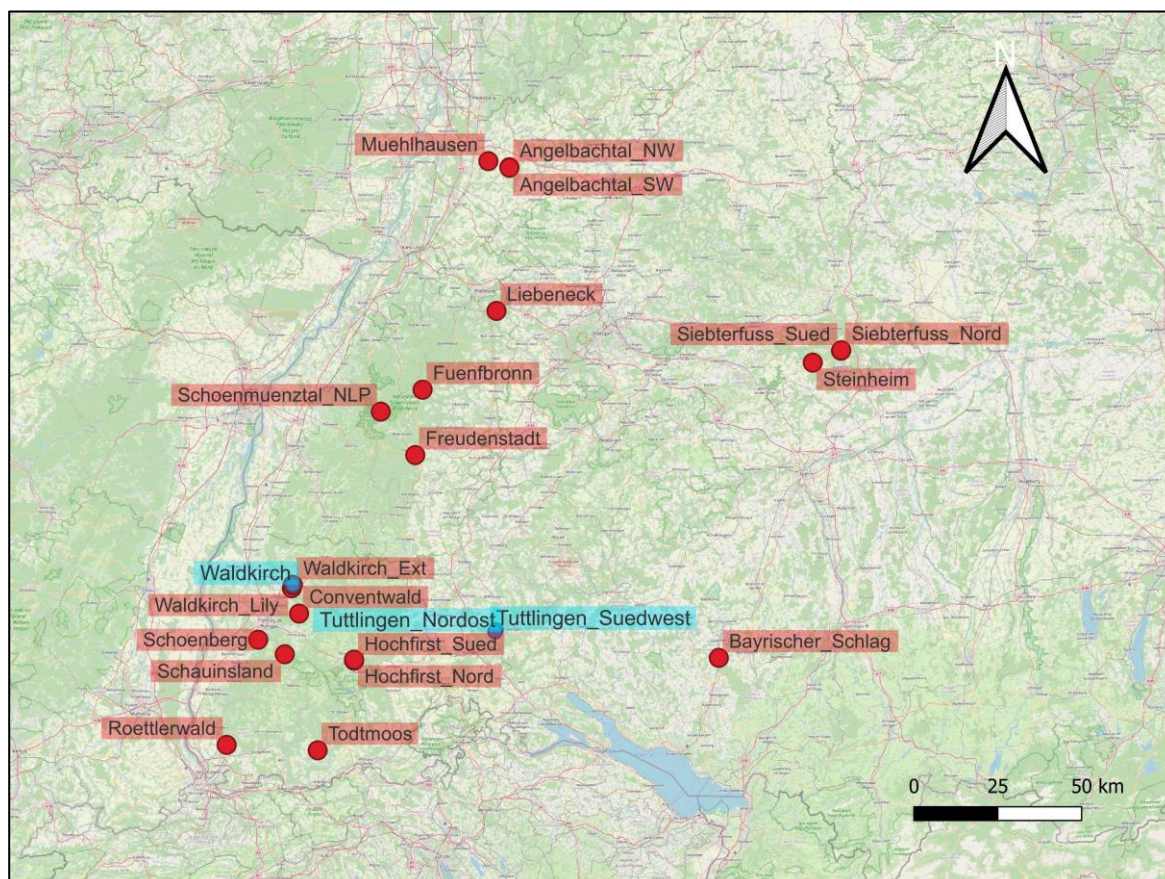


Abbildung 1: Karte Baden-Württembergs mit Lage der Extensivmessflächen (rot) und Intensivmessplots (blau).

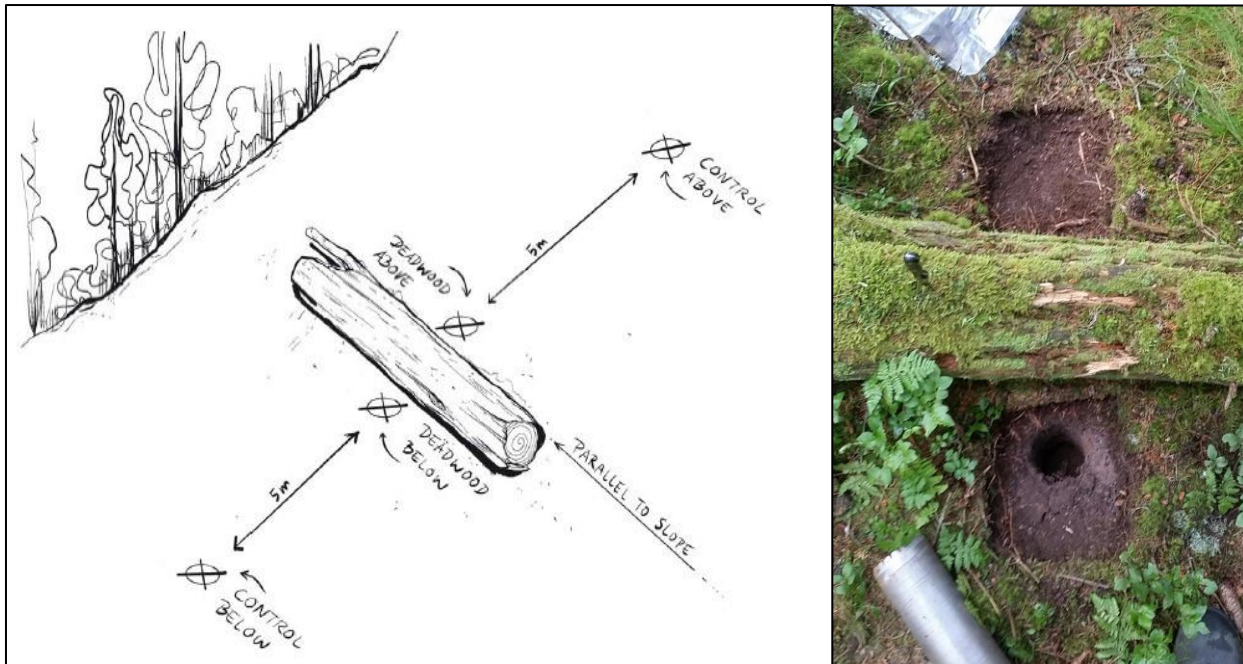


Abbildung 2: Beprobungsdesign auf den Extensivmessflächen (links) und Beispielfoto der Beprobung (rechts).

An jedem beprobten Stamm wurden folgende Parameter als mögliche erklärende Variablen erhoben:

- Durchmesser des Stammes am Beprobungspunkt
- Zersetzungsgrad
- Prozent Berindung
- Prozent Bodenkontakt
- Abweichung der Stammachse von der Höhenlinie
- Exposition der Fläche
- Hangneigung
- Humusform
- Bodenart (Fingerprobe)
- Bestandesgrundfläche durch Winkelzählprobe
- 10-Baumstichprobe mit BHD, Baumart und Kraft`scher-Klasse
- Deckungsgrad der Gehölzvegetation, geschätzt und anhand von Kronenfotos
- Vollaufnahme allen liegenden Totholzes innerhalb des Probekreises der 10-Baum-Probe
- forstliche Bestandesbeschreibung

Alle genommenen Bodenproben wurden standardmäßig auf Gehalte von organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Stickstoff (N), sowie auf ihren pH-Wert analysiert. An Teilmengen der Proben wurden weitere Analysen (Dichtefraktionierung, KAK etc.) durchgeführt. Ergebnisse hierzu sind unter AP 3 (II. 1.3) zu finden.

Tabelle 1: Übersicht über alle Extensivmessflächen und Intensivmessplots inklusive der wichtigsten Kennwerte.

Kategorie	Fläche	Ausgangsgestein	Höhenstufe	Exposition°	Neigung°	Baumart	Anzahl Stämme
Extensivmessflächen (AP 1)	Schönberg	Carbonat (Hauptrogenstein)	kollin	137	37	Buche	4
	Mühlhausen	Silikat über Carbonat (Fließerde über Jura)	kollin	330	3	Buche	4
	Angelbachtal Süd	Silikat & Carbonat (Lösslehm & Löss)	kollin	240	7	Buche	4
	Angelbachtal Nord	Silikat (Lösslehm)	kollin	330	11	Buche	4
	Schönmünzthal (NLP Wino10)	Silikat (Bundsandstein)	montan	205	26	Fichte	4
	Röttlerwald	Silikat (Lösslehm über Sandstein)	submontan	87	7	Buche	4
	Fünfbronn	Silikat (Bundsandstein)	montan	305	3	Fichte	3
	Steinheim	Carbonat (Hangschutt aus Jurakalken)	montan	20	22	Buche	3
	Schau-ins-Land	Silikat (Granit/Gneis)	hochmontan	175	13	Fichte	3
	Liebeneck	Silikat (Bundsandstein)	submontan	305	21	Buche	3
	Hochfirst Nord	Silikat (Granitschutt)	hochmontan	60	7	Fichte	3
	Hochfirst Süd	Silikat (Granitschutt)	hochmontan	210	15	Fichte	3
	Freudenstadt	Silikat (Bundsandstein)	montan	40	3	Fichte	3
	Bayrischer Schlag	Silikat (Geschiebemergel der Würmkaltzeit)	submontan	204	2	Fichte	3
	Siebter Fuß Süd	Carbonat (Residualton des Oberjura)	montan	173	12	Buche	3
	Siebter Fuß Nord	Carbonat (Kalksteinersatz des Oberjura)	montan	310	10	Buche	3
	Waldkirch Extensiv	Silikat (Fließerde aus Gneis)	kollin	275	12	Buche	3
	Waldkirch Lilly	Silikat (Fließerde aus Gneis)	kollin	45	n.a.	Buche	3
	<i>Conventwald</i>	Silikat (Hangschutt aus Gneis)	montan	200	n.a.	Buche	3
<i>Todtmoos</i>	Silikat (Hangschutt aus Granit)	montan	n.a.	n.a.	Buche	3	
Intensivmessplots (AP 2&3)	Waldkirch Buche	Silikat (Fließerde aus Gneis)	kollin	275	7	Buche	3
	Waldkirch Fichte	Silikat (Fließerde aus Gneis)	kollin	275	7	Fichte	3
	Tuttlingen Nordost	Carbonat (Hangschutt des Oberjura)	montan	50	27	Buche	3
	Tuttlingen Südwest	Carbonat (Hangschutt des Oberjura)	montan	253	26	Buche	3

1.1.2 AP 1.2 Kohlenstoff- und Stickstoffanalysen

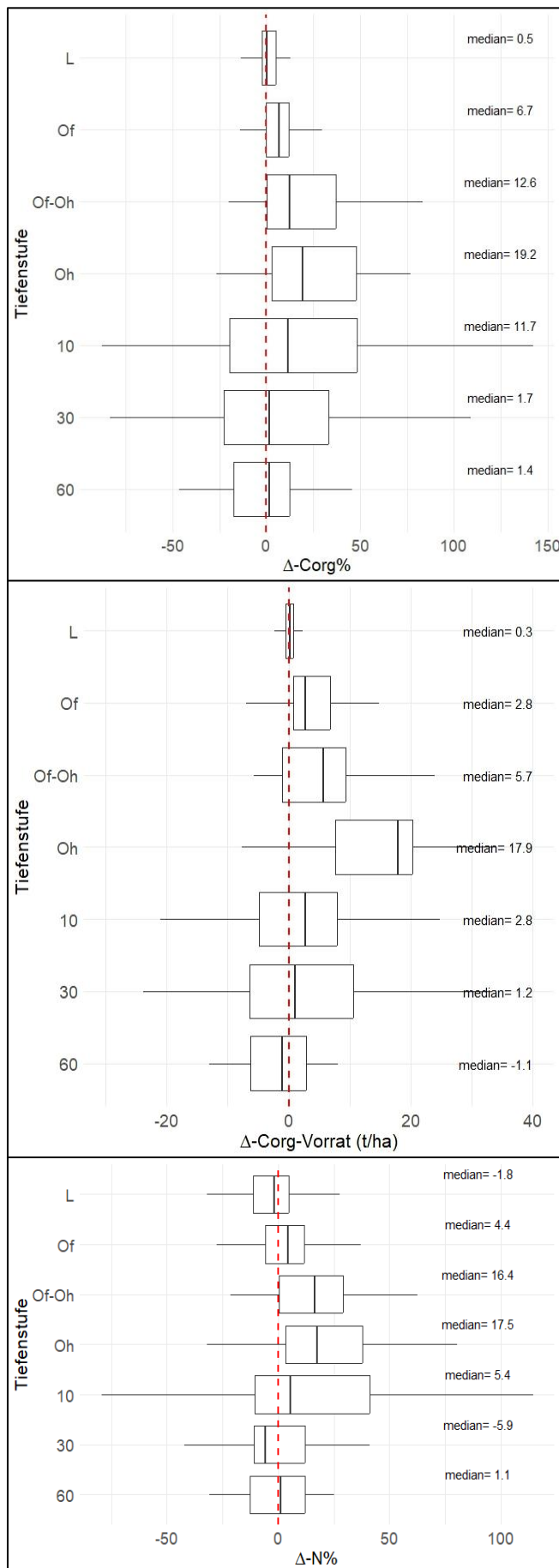


Abbildung 3: Δ-C und Δ-N im Tiefenverlauf.

Die Ergebnisse der C- und N-Analysen sind in **Abbildung 3** zu sehen. Hierbei ist jeweils auf der y-Achse das Tiefenprofil der Beprobungspunkte aufgetragen. Die x-Achsen zeigen Stoffgehalte (%) bzw. Vorräte (t/ha). Dargestellt sind Δ-Werte zwischen Proben am Stamm und den zugehörigen Kontrollen (vgl. Formel unten).

$$\Delta C \text{ bzw. } N = \left(\frac{\text{Messwert}_{\text{Stamm}} - \text{Messwert}_{\text{Kontrolle}}}{\text{Messwert}_{\text{Kontrolle}}} \right) * 100$$

Hieraus ergibt sich, dass alle Werte rechts der Nulllinie in den Boxplot-Diagrammen eine erhöhte Stoffkonzentration am Stamm gegenüber unbelasteten Kontrollen darstellen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Mediane der Verteilungen fast alle im positiven Bereich liegen, so dass im Mittel von einem vorhandenen „Totholzeffekt“ ausgegangen werden kann. Dieser ist sowohl bei den prozentualen Gehalten, als auch bei den errechneten Vorräten im Übergangsbereich zwischen Humusaufgabe und Mineralboden (Oh-Lage bis 10 cm Mineralbodentiefe) am deutlichsten ausgeprägt.

Da C und N gleichermaßen ansteigen kommt es zu keiner signifikanten Änderung des C/N Verhältnisses im Umfeld von liegendem Totholz im Vergleich zu den Kontrollen. Ebenso konnte keine signifikante Veränderung des pH-Wertes zwischen Totholz- und Kontrollpunkten festgestellt werden.

Eine Auswertung der Datensätze aus BWI und BZE konnte diese Ergebnisse bisher nicht reproduzieren. Es ließ sich in den Inventurdaten kein Zusammenhang zwischen Totholzmenge auf den Probekreisen und dem C_{org} -Gehalt des Bodens feststellen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Verfahren nicht darauf ausgelegt sind mögliche Totholzeinflüsse zu beachten, da Totholz nur als Gesamtvolumen auf dem Probekreis erfasst wird, jedoch nicht dessen Lage in Bezug zum Beprobungspunkt.

Im Rahmen einer zusätzlichen Kontrolluntersuchung innerhalb dieses Projektes wurden weitere 3 Stämme auf der Fläche Waldkirch (WAL) in einem deutlich engeren Raster beprobt (vgl. II. 1.2). Hierbei ergab sich, dass der Totholzeinfluss schon nach wenigen Dezimetern Entfernung vom Stamm nicht mehr messbar war.

Dies unterstreicht die Schwierigkeit der Übertragung von großräumigen Inventurdaten auf das im Projekt angewandte Probedesign. Die Auswertung der C_{org} -Gehalte in Bezug auf die erhobenen möglichen Erklärungsvariablen wird in II. 1.4 (AP 4 Modellierung und Regionalisierung) vorgestellt.

1.2 Arbeitspaket 2: Prozessuntersuchungen auf Intensivmessplots: Kohlenstoffflüsse

An insgesamt 12 Totholzstämmen (1 Totholzstamm = 1 Intensivmessplot) und auf dazugehörigen Kontrollflächen wurden die für die Kohlenstoffbilanz maßgeblichen Flüsse (DOC im Sickerwasser, CO₂ aus dem Totholz und dem Boden) über einen Zeitraum von knapp 3 Jahren erfasst. Ziel war es, Unterschiede zwischen Totholz- und Kontrollproben herauszuarbeiten, Einflussfaktoren auf die Flusssdynamiken zu identifizieren und Standortabhängigkeiten darzustellen. Des Weiteren wurde der Kohlenstoffvorrat in der Humusaufgabe und im Mineralboden analysiert, um Aussagen treffen zu können über den in der Bodenfestphase gebundenen Kohlenstoff.

1.2.1 AP 2.1 Einrichtung Intensivmessplots

Die 12 Intensivmessplots wurden auf 3 Versuchsflächen im westlichen Schwarzwald und am südlichen Rand der Schwäbischen Alb eingerichtet. Die erstgenannte Fläche befand sich in der Nähe der Gemeinde Waldkirch (WAL) auf saurem Ausgangsgestein (Gneis), über dem sich eine Braunerde mit der Humusform F-Mull ausbildete. Der Baumbestand setzte sich aus etwa 50 % Buche (*Fagus sylvatica*), 30 % Weißtanne (*Abies alba*), 10 % Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und 10 % Fichte (*Picea abies*) zusammen. Die beiden anderen Flächen befanden sich in der Nähe von Tuttlingen (TUT) an zwei benachbarten Hängen mit unterschiedlicher Exposition: Nordost (TUT NE) und Südwest (TUT SW). Das Ausgangsgestein auf beiden Standorten war Weißjurakalkstein, über dem sich jeweils eine Rendzina bildete. Die vorherrschende Baumart war Buche, auf dem Südwesthang mit einer Beimischung von Spitzahorn (*Acer platanoides*). Die Kenndaten der Versuchsflächen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Tabelle 2: Kenndaten der Versuchsflächen, auf denen die Intensivmessplots eingerichtet wurden. MAP bezeichnet die mittlere Jahresniederschlagssumme, MAT bezeichnet die mittlere Jahresmitteltemperatur. Die beiden klimatischen Kennwerte beziehen sich auf den Zeitraum 1991-2023. pH (CaCl₂) ist unterteilt nach Humusaufgabe und Mineralboden.

ID	Fläche	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]	Exposition	Höhe [m ü NN]	MAP [mm]	MAT [°C]	Hangneigung [°]	Humusform	Textur	pH (CaCl ₂)
WAL	Waldkirch	48,09	7,93	W	415	1100	10,4	7	F-Mull	Ls/Lt	5,1 4
TUT NE	Tuttlingen Nordost	47,97	8,74	NO	850	933	8,2	27	F-Mull	Tu/TI	5,6 7
TUT SW	Tuttlingen Südwest	47,98	8,75	SW	760	907	8,3	26	F-Mull	Tu/TI	5,9 7,1

Ein Fokus des Projektes lag auf Standorts- und Baumartenunterschieden in Bezug auf die Kohlenstoffdynamiken. Aus diesem Grund wurde Buchen- und Fichtentotholz auf Versuchsflächen mit unterschiedlichem Ausgangsgestein (silikatisch, karbonatisch) und mit unterschiedlicher Exposition (Nordost- und Südwestexposition) ausgewählt. Auf der Fläche in Waldkirch wurden zur Analyse der Baumartenunterschiede jeweils 3 Stämme Buchen- und Fichtentotholz ausgewählt. Auf den beiden Standorten in Tuttlingen wurde nur Buchentotholz ausgewählt, um dort den Fokus auf die Exposition und damit einhergehend unterschiedlichem Wasser- und Temperaturhaushalt zu setzen. Alle ausgewählten Stämme befanden sich in Zersetzungsstufe 3 oder 4 (beispielhaft dargestellt in **Abbildung 4**). Die Zersetzungsstufe wurde mit der Taschenmesseremethode nach Schweizerischem Landesforstinventar bestimmt, wie sie beispielsweise in Lachat et al. (2019) beschrieben ist. Für jeden ausgewählten Totholzstamm wurde eine dazugehörige Kontrollfläche in unmittelbarer Nähe (Entfernung ca. 3-4 m) seitlich oder oberhalb des Stammes eingerichtet. Die Kenndaten der einzelnen Totholzstämmen sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.



Abbildung 4: Zwei beprobte Buchentotholzstämme, links WAL Bu A (Zersetzungsstufe 4), rechts eine Buche auf einer Extensivmessfläche. Fotos: Peter Stiasny

Tabelle 3: Kenndaten der ausgewählten Totholzstämme.

Baum-ID	Baumart	Länge [m]	Durchmesser [cm]	Volumen [m ³]	Zersetzungsstufe	Position am Hang
WAL Bu A	Buche	5,75	18,5	0,15	4	hangparallel
WAL Bu B	Buche	9	19	0,26	3	hangabwärts
WAL Bu C	Buche	9	14	0,14	4	hangabwärts
WAL Fi A	Fichte	11	27	0,63	3	hangparallel
WAL Fi B	Fichte	4,21	14	0,06	3	hangabwärts
WAL Fi C	Fichte	6,5	15	0,11	4	hangparallel
TUT NE A	Buche	7	20	0,22	3	hangabwärts
TUT NE B	Buche	2,55	11	0,02	4	hangabwärts
TUT NE C	Buche	3,7	15,5	0,07	4	hangabwärts
TUT SW A	Buche	4,55	30,75	0,34	3	hangabwärts
TUT SW B	Buche	4,3	24,5	0,20	4	hangparallel
TUT SW C	Buche	11,3	27	0,65	3	hangparallel

Der Aufbau der Intensivmessplots ist schematisch in **Abbildung 5** dargestellt. Die Messplots (Totholz und Kontrolle) wurden wie folgt eingerichtet: Zur Gewinnung von Bodenwasser wurden Saugkerzen mit einer Keramikspitze entlang der Totholzstämme in unterschiedlichen Tiefenstufen eingebaut (**Abbildung 6**). Es wurden pro Stamm jeweils 3 Saugkerzen direkt unter der Humusaufgabe sowie im Mineralboden in 15 cm, 30 cm und 60 cm eingebaut, die zu einer Mischprobe zusammengefasst wurden. Auf den Flächen TUT NE und TUT SW konnten aufgrund der Flachgründigkeit der Böden und des hohen Skelettanteils keine Saugkerzen in 60 cm Tiefe eingebaut werden. Im Fall einer hangparallelen Lage des Stammes wurden die Saugkerzen unterhalb eingebaut, bei hangabwärts gelegenen Stämmen verteilt auf beiden Seiten des Stammes. Auf den Kontrollflächen wurden die Saugkerzen flächig verteilt. Für die Messung der Bodenfeuchte und Bodentemperatur wurden FDR-Sonden (ML3 Theta Sonden, Delta-T-Devices, Cambridge, Großbritannien) jeweils in 15 cm und 30 cm (TUT NE und TUT SW) bzw. 60 cm (WAL) eingebaut. An jedem Logger wurde zusätzlich noch ein Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur angebracht. Anfang des Jahres 2023 erfolgte die Installation der Basisringe/-rahmen für die Erfassung der CO₂-Flüsse, die mittels Kammermessungen durchgeführt wurden. Diese wurden an folgenden Kleinstandorten installiert: am Totholz, direkt neben dem Stamm (Randbereich) und auf Kontrollflächen. Für die Messungen am Totholz wurde ein

Teil des Stammes abgeschnitten, die zusätzlich generierten Schnittflächen versiegelt und ein Basisrahmen um den Stamm herum in den Boden eingebaut (**Abbildung 7**). Das Hauptziel dieses Designs war es, den Stamm nicht bewegen zu müssen und das System Totholz-Boden so wenig wie möglich zu stören. Zusätzlich wurden auf jeder der 3 Flächen Regensammler installiert, um den Bestandesniederschlag zu erfassen.

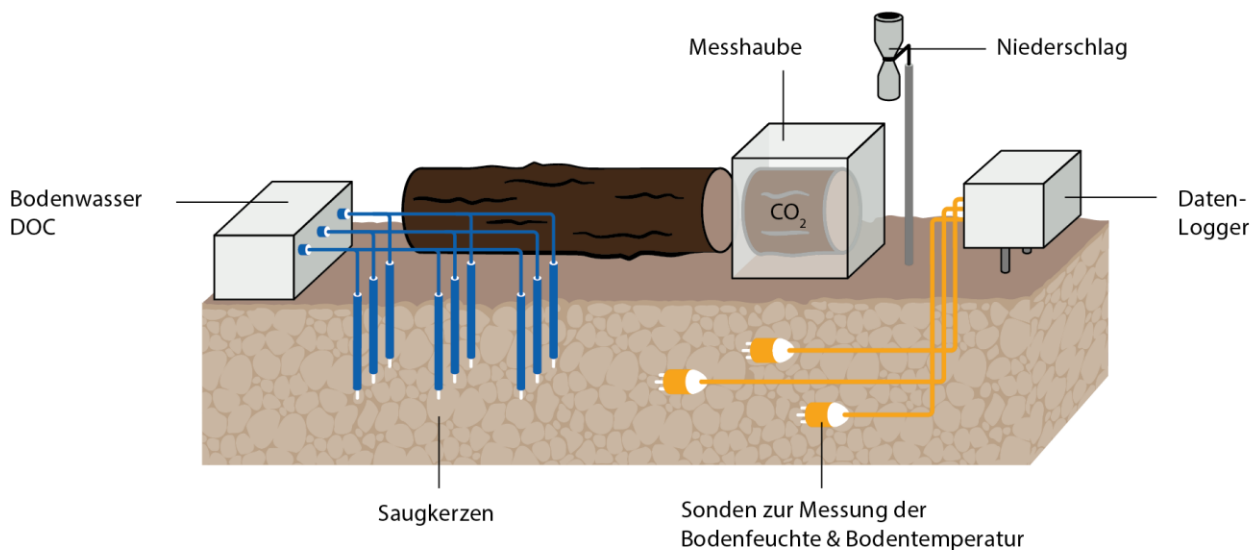


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Messaufbaus auf den Intensivmessplots (hier exemplarisch für die Messsituation Totholz). Quelle: FVA BW, Gestaltung: B612



Abbildung 6: Einbau der Saugkerzen entlang des liegenden Totholzstammes. Foto: Lisa Rubin



Abbildung 7: Basisrahmen für die Kammermessungen für den Kleinstandort Totholz. Foto: Lisa Rubin

1.2.2 AP 2.2 Bodenbeprobung

Auf allen Intensivmessplots wurden sowohl von jedem Stamm als auch von jeder Kontrollfläche Proben der Humusauflage und des Mineralbodens in einer Tiefe von 0-10 cm und 10-30 cm entnommen. In Waldkirch wurden zusätzlich noch Proben aus 30-60 cm entnommen, da hier ebenfalls Saugkerzen bis in eine Tiefe von 60 cm installiert wurden. Die Probenahme erfolgte volumengetreu, damit Kohlenstoffvorräte berechnet werden konnten. Bei hangparallel liegenden Stämmen wurden die Proben unterhalb der Stämme entnommen, bei hangabwärts liegenden Stämmen an einer Seite des Stammes. Dadurch erfolgte die Bodenprobenahme auch immer dort, wo Saugkerzen eingebaut waren. Die Humusauflage wurde sowohl unterhalb als auch oberhalb des Stammes entnommen, um etwaige streustauende Effekte der hangparallel liegenden Stämme zu erfassen. Die Humusauflage wurde im Gesamten beprobt und nicht in L-, Of- und Oh-Lage unterteilt. Zusätzlich wurde auf jeder Fläche ein Bodenprofil angelegt, an dem eine Profilansprache nach BZE-Standard durchgeführt wurde.

Im Rahmen von zwei Abschlussarbeiten (M.Sc.) wurden Bodenproben auf der Versuchsfläche WAL entnommen. Zuerst wurde an 3 zusätzlich ausgewählten Totholzstämmen der Baumart Buche in Zersetzungsstufe 3 die kleinräumige Variabilität entlang von liegendem Totholz erfasst. Das Probenahmedesign ist in **Abbildung 8** dargestellt.

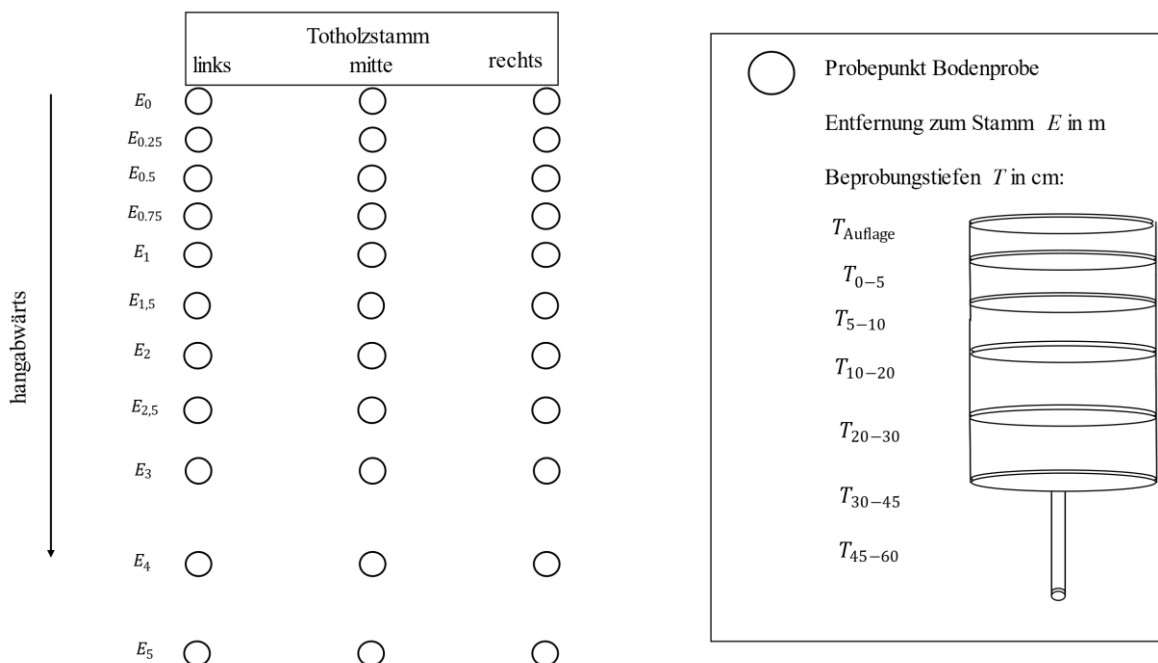


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versuchsdesigns zur Erfassung der kleinräumigen Variabilität entlang von Totholzstämmen. Im linken Teil der Abbildung sind die Positionen (links, Mitte, rechts) der 2D-Profile am Stamm in Vogelperspektive dargestellt. „E“ stellt die Entfernung in Metern zum Totholzstamm dar (E0 bis E5). Im rechten Teil der Abbildung sind die beprobten Tiefenstufen („T“ in cm) von der Humusauflage bis in 60 cm Tiefe dargestellt. Quelle: Magdalena Kalio

Aufbauend auf den Ergebnissen der kleinräumigen Beprobung wurden auf der Fläche WAL an insgesamt 16 zusätzlich ausgewählten Stämmen in den Zersetzungsstufen von 2-5 (jeweils 4 Stämme pro Stufe) Bodenproben entnommen. Die Entnahme erfolgte auf beiden Seiten (je nach Hanglage oberhalb und unterhalb bzw. rechts und links des Stammes) in 2 Entfernungen vom Totholz (0-20 cm, 20-40 cm) aus 2 unterschiedlichen Tiefenstufen (Humusauflage, 0-10 cm). Ziel war es, den Bodenkohlenstoff unter Betrachtung verschiedener Zersetzungsstufen zu erfassen. Die Abschlussarbeiten sind unter **II. 4** (Veröffentlichungen) aufgelistet.

Die Analyse der kleinräumigen Variabilität zeigte, dass sich der Effekt des Totholzes auf nahe Distanzen zum Totholzstamm beschränkt (innerhalb 0,5 m). Dies war eine Bestätigung unseres Probenahmedesigns, sowohl beim Einbau der Saugkerzen direkt am Stamm als auch bei der Bodenprobenahme. Diese Arbeit konnte zusätzlich bestätigen, dass unsere gewählten Kontrollflächen in ausreichender Entfernung vom Totholzstamm angelegt wurden. Es zeigte sich außerdem ein Anstieg der Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden mit zunehmender Zersetzung des Totholzes (statistisch allerdings nicht signifikant). Weitere Ergebnisse der Untersuchungen der Bodenfestphase sind in den Kapiteln **II. 1.1** und **II. 1.3** präsentiert.

1.2.3 AP 2.3 Analyse bodenchemischer Parameter

1.2.3.1 Analyse der Humusauflage und des Mineralbodens

Die Humusauflage und der Mineralboden wurden bei 60 °C bzw. 40 °C getrocknet und anschließend auf 2 mm gesiebt. Die Humusauflage wurden zusätzlich gemahlen. Die pH-Werte wurden in einer Suspension aus 5 ml Probenmaterial und 25 ml Lösung (H_2O und $CaCl_2$) automatisiert mittels pH-Meter (Metrohm, Filerstadt, Deutschland) gemessen, die Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen mit einem Elementaranalysator (elementar vario MAX, Langensfeld, Deutschland).

1.2.3.2 Analyse der Bodenwasserproben

Die im Feld gewonnenen Wasserproben wurden bis zur Analyse im Labor bei 5,8 °C gelagert. 20 ml der ungefilterten Bodenwasserprobe wurden für die Messung des pH-Wertes von der Gesamtprobe getrennt. Dieser wurde mittels pH-Meter (SP 2000-1, Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande) erfasst. Die restliche Probenmenge wurde mit einem Zelluloseacetat-Filter (0,45 μm , Sartorius, Göttingen, Deutschland) filtriert. Trübe Bodenwasserproben, die meist direkt unterhalb der Humusschicht vorkamen, wurden zusätzlich durch einen Glasmikrofasfilter (Whatman, Maidstone, Großbritannien) gefiltert. Die DOC-Konzentration in der Probe wurde mittels Autoanalyser (Skalar Analytical B. V., Breda, Niederlande) gemessen. Alle Analysen fanden gemäß dem Handbuch Forstliche Analytik statt (GAFA, 2014). Durch das Filtern der Bodenwasserproben wird der Anteil an partikulärem organischem Kohlenstoff (POC) entfernt und nur der Anteil an DOC bestimmt. Dadurch wird der Anteil an gesamtem gelösten organischem Kohlenstoff (TOC) leicht unterschätzt. Dies wird bei der Interpretation der Bilanzierung der DOC-Flüsse im Sickerwasser berücksichtigt.

1.2.4 AP 2.4 Beprobung Stoffflüsse auf Intensivmessplots

1.2.4.1 DOC-Flüsse

Bodenwasserproben unter Totholz und auf benachbarten Kontrollflächen wurden über einen Zeitraum von Januar 2022 bis einschließlich September 2024 in einem 4-wöchigen Rhythmus entnommen. Über Pumpen, die 6-mal pro Tag für jeweils 3 Minuten einen Unterdruck von -0,6 hPa erzeugten, wurde das Bodenwasser gewonnen. Die ersten Proben nach Installation der Saugkerzen wurden nicht in die Ergebnisse miteinbezogen, um ausschließen zu können, dass sich Relikte vom Einbau in den Messdaten widerspiegeln. Da durch die Messmethodik mit den Saugkerzen keine Aussagen getroffen werden können über die Menge des Sickerwasserflusses, musste diese modelliert werden. Die Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte mit dem Modell LWF-Brook90 (Hammel & Kennel, 2001). Für jede der 3 Versuchsflächen wurde eine standortspezifische Modellierung auf Grundlage von Klima-, Bestandes- und Bodendaten durchgeführt. Ergebnis der Modellierung war der gesamte Sickerwasserfluss in den beprobten Tiefenstufen für den 4-wöchigen Zeitraum vor jeder Probenahme. Dieser wurde mit der gemessenen DOC-Konzentration multipliziert, um die DOC-Flüsse zu erhalten.

1.2.4.2 CO₂-Flüsse

Die CO₂-Flüsse wurden über einen Zeitraum von Mai 2023 bis einschließlich September 2024 mittels Kammermessungen erfasst, ebenfalls in 4-wöchigem Rhythmus. In **Abbildung 9** sind die Messungen über dem Totholz und neben dem Totholz (Randbereich) zu sehen. Die Messungen im Randbereich zusätzlich zum Totholz und zur Kontrolle wurden durchgeführt, da durch erhöhtes Wurzelwachstum in Richtung des Totholzes und durch erhöhte mikrobielle Aktivität von vermehrter CO₂-Freisetzung ausgegangen wurde. Dieses Messdesign erlaubte eine genauere Bilanzierung der CO₂-Flüsse im Umfeld von Totholz. Die Messungen wurden immer an denselben Tagen durchgeführt, an denen auch das Bodenwasser entnommen wurde. Zur Datenaufzeichnung wurde ein Arduino-Logger (Arduino S.r.l., Monza, Italien) genutzt, an dem ein Infrarot CO₂-Sensor angeschlossen war (Dynament Limited, Mansfield, Großbritannien).

Das Prinzip der Kammermessungen ist, dass man über den gemessenen Anstieg der CO₂-Konzentration in der geschlossenen Kammer einen CO₂-Fluss pro Fläche und Zeiteinheit (hier $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) nach **Gleichung (1)** berechnet:

$$CO_2\text{Fluss} = \frac{x_{CO_2}}{A} \cdot \frac{V}{t} \quad (1)$$

wobei die x_{CO_2} der Stoffmengenanteil in $\mu\text{mol s}^{-1}$ ist und A die Grundfläche des jeweiligen Basisrahmens (cm^2).



Abbildung 9: Im linken Foto ist die Messung der CO₂-Flüsse über dem Totholzstamm zu sehen, im rechten Foto die Messungen direkt neben dem Totholzstamm (Randbereich). Fotos: Lisa Rubin

1.2.4.3 Bodentemperatur und Bodenfeuchte

Bodentemperatur und Bodenfeuchte wurden im 30-Minuten-Intervall durch einen Datenlogger aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten wurden anschließend bereinigt (Messfehler, Loggerausfälle) und zu Tagesmittelwerten zusammengefasst. Der aufgezeichnete volumetrische Wassergehalt (Vol.-%) wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit in die relative Bodenfeuchte (% nFK) umgerechnet. Dafür wurde eine Funktion verwendet, um lokale Maxima in den gemessenen Bodenwassergehaltsdaten zu erkennen und herauszufiltern. Anhand dieser Maxima konnte die Feldkapazität (FK in Vol.-%) bestimmt werden, also den Wasseranteil im Boden, der im Boden gehalten werden kann (hier: 3 Tage). Die Funktion erkennt zuerst die höchsten Punkte (Maxima) in der Kurve, indem sie die zweite Ableitung berechnet. Danach entfernt sie Werte, die entweder unter einem bestimmten Schwellenwert liegen (genauer: unter dem 85 %-Perzentil), oder die, zeitlich gesehen, zu nah beieinanderliegen. Zusätzlich wird geprüft, ob die Bodenfeuchte nach jedem dieser Maxima gleichmäßig abnimmt – das zeigt, dass es sich wirklich um relevante Spitzenwerte handelt, die zur Berechnung der Feldkapazität geeignet sind. Der permanente Welkepunkt (PWP in Vol.-%) wurde ebenfalls aus den täglichen Durchschnittswerten abgeleitet – als der niedrigste Wert während des gesamten Messzeitraums. Der PWP wird hier vermutlich leicht überschätzt und je nach Grad der Austrocknung in den Sommermonaten ist die PWP-Überschätzung für die verschiedenen Stämme und Kontrollflächen unterschiedlich, was wiederum Auswirkungen hat auf die Vergleichbarkeit der nutzbaren Feldkapazität. Jedoch war unser Ziel tatsächlich gemessene Werte für die Ableitung dieser Kenndaten und nicht Werte aus einer Modellierung zu verwenden. Aus den beiden abgeleiteten Werten (FK und PWP) wurde dann die nutzbare Feldkapazität (nFK in Vol.-%) nach **Gleichung (2)** berechnet.

$$nFK (\text{Vol.}\text{-}\%) = FK (\text{Vol.}\text{-}\%) - PWP (\text{Vol.}\text{-}\%) \quad (2)$$

Daraus wiederum lässt sich die relative Bodenfeuchte in Prozent nach **Gleichung (3)** berechnen.

$$\text{relative Bodenfeuchte } (\% \text{ nFK}) = \frac{\text{gemessener Bodenwassergehalt (Vol.}\text{-}\%) - PWP (\text{Vol.}\text{-}\%)}{nFK (\text{Vol.}\text{-}\%)} * 100 \quad (3)$$

1.2.5 AP 2.5 Bilanzierung der Flüsse

1.2.5.1 Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) im Bodenwasser

Die gemessenen DOC-Konzentrationen unter Totholz und auf den Kontrollflächen sind, aufgeteilt nach Standorten, in **Abbildung 10** dargestellt. Der Standort WAL wurde nochmals in WAL Buche (Buchentotholz) und WAL Fichte (Fichtentotholz) unterteilt. Es zeigt sich eine Abnahme der DOC-Konzentrationen mit zunehmender Tiefe. Ebenfalls deutlich zu sehen ist eine breitere Streuung der DOC-Konzentrationen in der Humusaufgabe im Vergleich zu den Mineralbodentiefen. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 30 cm auf der Fläche TUT NE unterscheiden sich die DOC-Konzentrationen zwischen Totholz und Kontrolle signifikant voneinander (gepaarter Wilcoxon Test). Um eine gleiche Anzahl an Datenpunkten pro Gruppe (Totholz/Kontrolle) zu gewährleisten, wurden die gemessenen DOC-Konzentrationen nur verwendet, wenn pro Probenahmedatum, Totholzstamm und Tiefenstufe jeweils vom Stamm als auch von der dazugehörigen Kontrolle eine für die Analyse ausreichende Menge an Wasser entnommen werden konnte. Die Unterschiede zwischen Totholz und Kontrolle sind auf der Fläche TUT SW größer im Vergleich zur Fläche TUT NE. Ebenso sind die Unterschiede unter Buchentotholz größer (WAL Buche) im Vergleich zu Fichtentotholz (WAL Fichte). In 15 cm Tiefe auf der Fläche WAL Fichte wurden auf der Kontrolle sogar höhere DOC-Konzentrationen gemessen im Vergleich zum Totholz.

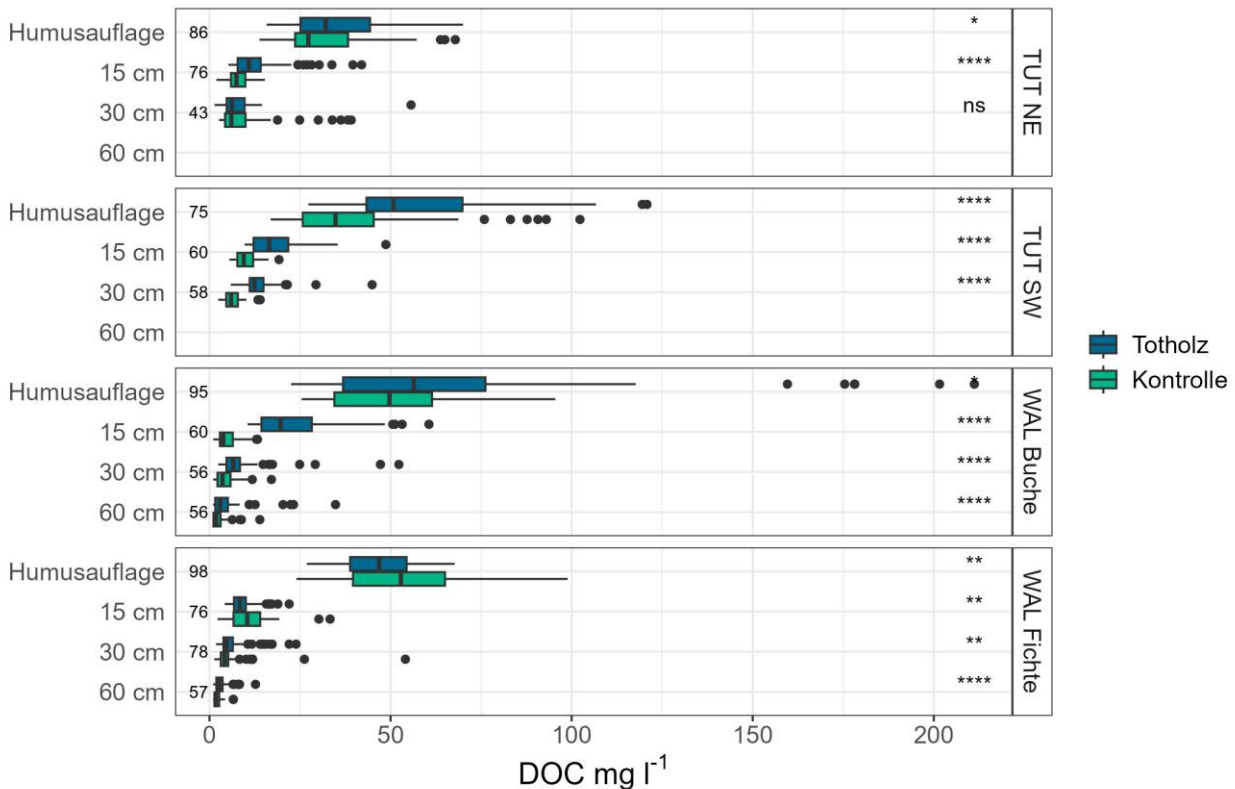


Abbildung 10: DOC-Konzentrationen unter Totholz und auf den Kontrollflächen in unterschiedlichen Tiefenstufen (Humusauflage, 15 cm, 30 cm und 60 cm), aufgeteilt nach Versuchsflächen (TUT NE, TUT SW, WAL Buche, WAL Fichte). Die Nummern geben die Anzahl der Beobachtungen pro Boxplot an. Die Signifikanzniveaus sind wie folgt: $p < 0.0001$ ****, $p < 0.001$ ***, $p < 0.01$ **, $p < 0.05$ *, ns = nicht signifikant.

1.2.5.2 Kohlenstoff in Form von CO₂ aus dem Boden und dem Totholz

Die berechneten CO₂-Flüsse sind, aufgeteilt nach Kleinstandort und Versuchsfläche, in **Abbildung 11** dargestellt. Die CO₂-Flüsse auf der Fläche WAL aus Buchen- und Fichtentotholz sind in diesem Fall zusammengefasst, da die Modellierung der Einflussfaktoren keinen Effekt der Baumart ergab (siehe **II. 1.4.3.3**). Die Flüsse weisen ein stark saisonales Muster auf, mit höheren Flüssen in den Sommermonaten und niedrigen Flüssen in den Wintermonaten. In den Sommermonaten unterscheiden sich die CO₂-Flüsse an den Kleinstandorten deutlicher im Vergleich zum Winter, in dem an manchen Messtagen kaum Unterschiede zwischen Totholz bzw. Randbereich und Kontrollflächen festzustellen sind.

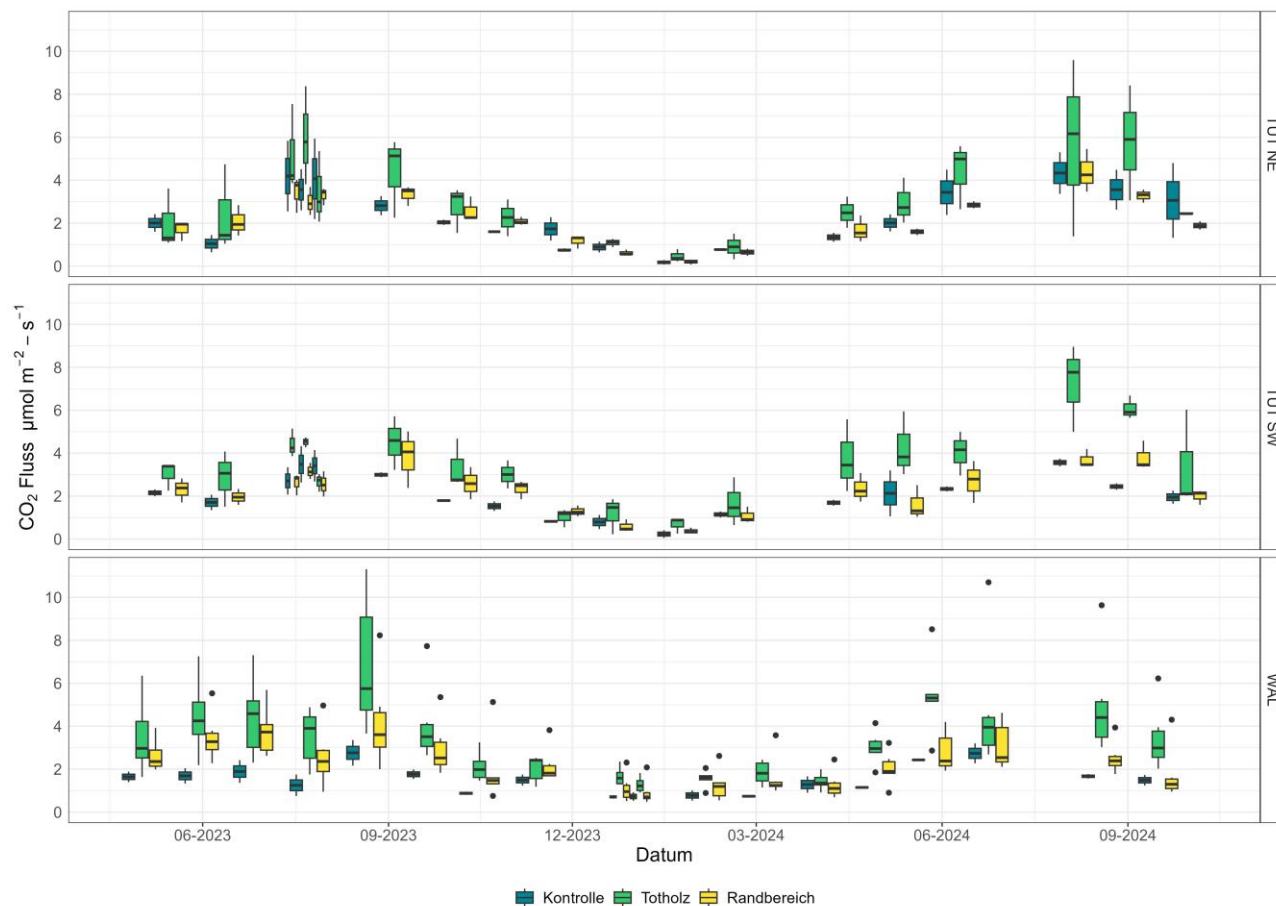


Abbildung 11: Berechnete CO₂-Flüsse auf den 3 Versuchsfeldern an jedem Messzeitpunkt. Die Messungen sind unterteilt nach den Kleinstandorten Kontrolle, Totholz und Randbereich.

Alle CO₂-Flüsse zusammengefasst verdeutlichen, dass die Unterschiede zwischen den Kleinstandorten standortabhängig sind (**Abbildung 12**). Während sich die CO₂-Flüsse auf der Fläche TUT NE nicht signifikant voneinander unterscheiden, unterscheiden sich auf der Fläche WAL alle Kleinstandorte signifikant voneinander, mit den höchsten gemessenen CO₂-Flüssen über dem Totholz, gefolgt vom Randbereich und der Kontrolle. Auf der Fläche TUT SW konnten ebenfalls signifikant höhere CO₂-Flüsse über dem Totholz im Vergleich zur Kontrolle gemessen werden. Auch hier wurden im Randbereich höhere Flüsse gemessen verglichen mit der Kontrolle, der Unterschied ist allerdings nicht signifikant. Die höheren Flüsse aus den Randbereichen unterstützen die Hypothese, dass im nahen Umfeld von Totholz vermehrt Zersetzungsprozesse und stattfinden, die zu höheren CO₂-Freisetzungen führen.

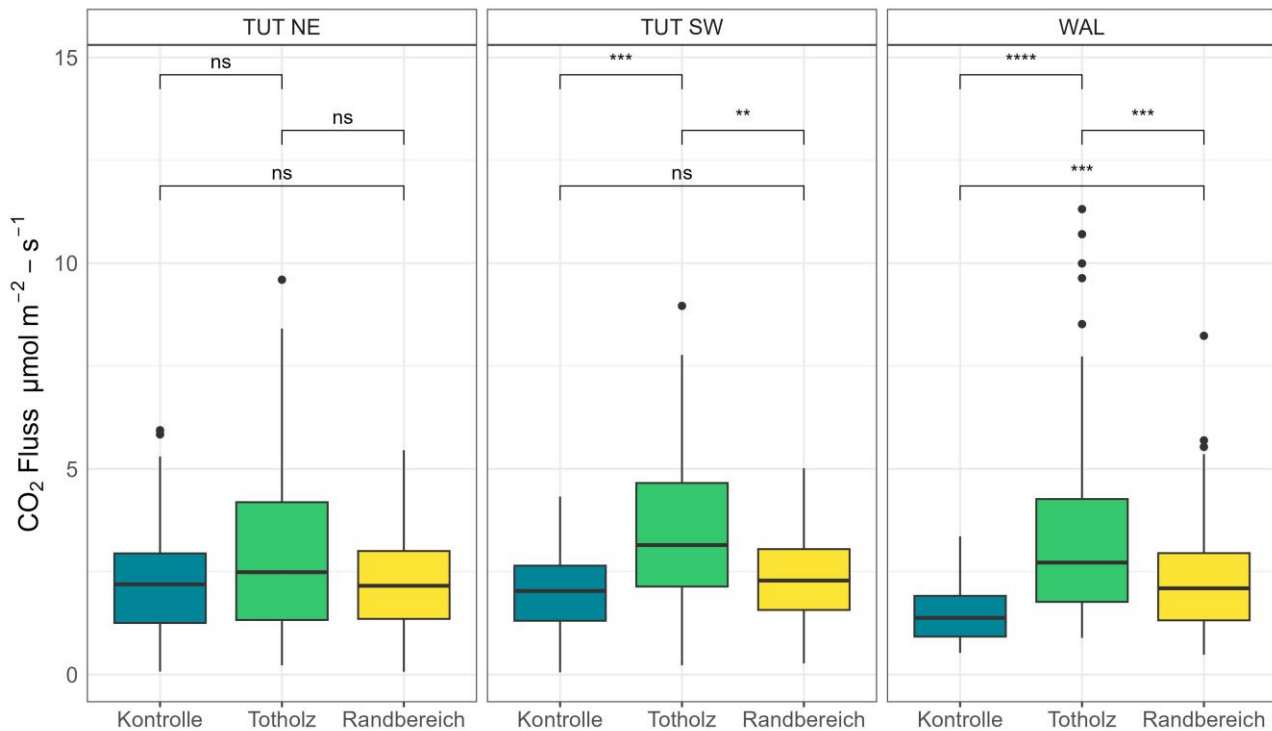


Abbildung 12: Vergleich der CO₂-Flüsse zwischen den Kleinstandorten (Kontrolle, Totholz, Randbereich), aufgeteilt nach Versuchsflächen. Die Signifikanzniveaus sind wie folgt: p < 0.0001 ****, p < 0.001 ***, p < 0.01 **, p < 0.05 *, ns = nicht signifikant.

1.2.5.3 Bilanzierung der DOC- und CO₂-Flüsse

Im Rahmen der Untersuchung der Kohlenstoffbilanz zeigte sich, dass Kohlenstoff auf verschiedenen Wegen aus dem Totholz exportiert wird – primär über die direkte Freisetzung von CO₂. CO₂ stellt somit den Hauptexportpfad dar, wobei sich dieser Effekt in Abhängigkeit vom Standort verändern kann. Auch ohne das Vorhandensein von Totholz wird deutlich mehr CO₂ aus dem Boden freigesetzt, als sich DOC im Bodenwasser befindet. Beispielhaft für 15 cm Bodentiefe auf den Kontrollflächen aller Standorte waren ca. 13 % des Kohlenstoffs als DOC im Bodenwasser und ca. 87 % des Kohlenstoffs wurden als CO₂ freigesetzt. Die gemessenen CO₂-Flüsse zeigten standortspezifische Unterschiede. Auf der Fläche TUT NE war durch Totholz ein Anstieg der CO₂-Flüsse um 2 % im Vergleich zur Kontrollfläche zu verzeichnen. Auf der Fläche TUT SW betrug der Unterschied 47 %, während auf der Fläche WAL sogar ein Plus von 118 % gemessen wurde. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Totholz erheblich CO₂-Freisetzung freisetzt – in Abhängigkeit von Standortbedingungen jedoch unterschiedlich stark.

Neben der direkten CO₂-Freisetzung spielt auch DOC eine wichtige Rolle als Transportpfad für Kohlenstoff. DOC kann aus dem Totholz ausgewaschen und in den Boden eingetragen werden, wodurch er Teil langfristiger Kohlenstoffspeicherprozesse werden kann. Auch hier zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Flächen: Auf der Fläche TUT NE wurden unter Totholz 115 % mehr DOC freigesetzt als auf der Kontrollfläche. Auf TUT SW lag der Unterschied bei 94 % und auf der Fläche WAL war ein besonders starker Anstieg um 278 % zu beobachten.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Totholz nicht nur eine Kohlenstoffquelle in Form von CO₂-Emissionen ist, sondern auch als bedeutender Kohlenstofflieferant für den Boden wirkt. Die Effekte von Totholz auf die Kohlenstoffbilanz waren auf der Fläche WAL am stärksten – sowohl hinsichtlich CO₂ als auch DOC. Bei der Bilanzierung spielen sowohl der Standort als auch das Abbaustadium des Totholzes eine entscheidende Rolle. An sauren Standorten beispielsweise kann Totholz als lokaler und temporärer Hotspot für mikrobielle Aktivität und Wurzelwachstum fungieren. Je stärker das Totholz zersetzt ist, desto mehr Wasser wird darin gespeichert – was die Mobilisierung und den Austrag von DOC zusätzlich fördert. Dies könnte eine mögliche Erklärung für das große Plus an DOC im Vergleich zum CO₂ auf der Fläche TUT NE sein. Auf dieser Fläche befinden sich die am stärksten zersetzten Stämme aller Intensivmessplots.

Die Unsicherheit hinsichtlich der genauen Zersetzungsstufe des Totholzes erschwert eine eindeutige Bewertung der Kohlenstoffflüsse. Die Frage, in welcher Phase des Zersetzungsprozesses sich das Totholz derzeit befindet, bleibt offen – insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein Zeitraum von drei Jahren lediglich einen Bruchteil des vollständigen Abbauprozesses umfasst. Je nach Abbaustadium variieren sowohl die CO₂-Emissionen als auch die DOC-Freisetzung erheblich. Darüber hinaus unterscheiden sich ebenfalls die Freisetzungsdynamiken zwischen den Baumarten Buche und Fichte.

Trotz dieser Unsicherheiten bietet der Beobachtungszeitraum von drei Jahren (bzw. 1,5 Jahren überschneidender Zeitraum DOC- und CO₂-Messungen) mit kontinuierlicher Datenerhebung in hoher zeitlicher Auflösung eine fundierte Grundlage für weiterführende Analysen der Kohlenstoffdynamik im Zusammenhang mit Totholz in mitteleuropäischen Wäldern.

Weitere Ergebnisse der Bilanzierung und Untersuchung der Kohlenstoffflüsse werden in einem in Bearbeitung befindlichen Manuskript für wissenschaftlichen Veröffentlichungen präsentiert (siehe II. 4 Veröffentlichungen).

1.3 Arbeitspaket 3: Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention

1.3.1 AP 3.1 Probenahme und Analysen

Die Arbeiten des AP 3 wurden auf den Intensivmessplots in Waldkirch und Tuttlingen durchgeführt. Es wurden insgesamt 212 Stechzylinder (SZ) entnommen (**Abbildung 13**). Hierbei wurde pro Beprobungspunkt und Tiefenstufe eine 3-fache Wiederholung durchgeführt. Die Bergung der Zylinder in ungestörtem Zustand erlaubt Analysen, bei denen es auf eine intakte Bodenstruktur und -lagerung ankommt (z.B. Wasserleitfähigkeit/kf-Wert). Es wurde nah am Stamm hangabwärts der Stämme beprobt, die auch in AP 2 zur Messung von Gas und Wasserflüssen instrumentiert wurden. Zusätzlich wurden Kontrollproben aus einem 3x3-Raster, welches gleichmäßig über jede der vier Flächen (WAL Buche, WAL Fichte, TUT NE, TUT SW) gelegt wurde entnommen. Auf jeder Fläche wurde ein Leitprofil zur Bodenansprache angelegt. Hier wurden ebenfalls Stechzylinder entnommen. Die Beprobungstiefen orientierten sich am Design der Extensivmessflächen. Lediglich die Tiefenstufe 30-60 cm wurde nach anfänglichen Versuchen nicht mehr beprobt, da dort der Skelettgehalt auf allen Flächen schon zu hoch war, um in der Lagerung ungestörte Proben zu entnehmen. Zusätzlich zur Probennahme wurden alle sonstigen Parameter analog zu den Extensivmessflächen erhoben. An den Zylindern wurden die folgenden Analysen durchgeführt: Perkolationsversuch zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit (kf-Wert), Trocknung bei 105°C zur Bestimmung der Trockenrohdichte (TRD), Messung der Radioaktivität mit Gammaskpektrometer als Marker für die Bioturbation (CS137), Abtrennen der Wurzeln durch Auswaschen und Dekantieren zur Bestimmung von Wurzelbiomasse- und Nährstoffgehalten. Zusätzlich wurde das die Stechzylinder umgebende Material bei der Bergung aufgefangen und als Schüttprobe für zusätzliche Analysen wie die Dichtefraktionierung aufbereitet.



Abbildung 13: Fotos der Stechzylinderentnahme auf den Intensivmessplots. Fotos: Peter Stiasny

1.3.2 AP 3.2 Ergebnisse der Messungen an ungestörten Bodenproben

In **Abbildung 14** sind die Ergebnisse der Analysen an den Stechzylindern dargestellt. Im Panel links ist die Aktivität des Isotops CS137 in Becquerel/Kilogramm (Bq/kg) dargestellt. Da CS137 wenig wasserlöslich ist und als nicht natürliches Isotop erst mit dem Fallout von Tschernobyl auf der Geländeoberfläche abgelagert wurde, kann sein Tiefenverlauf als Marker für die Bioturbationsaktivität grabender Organismen genutzt werden. Wie in **Abbildung 14** zu sehen, ist die Aktivität im Oberboden bei stammnahen Proben im Vergleich zu den Kontrollen verringert. Demgegenüber ist sie im Unterboden erhöht. Dies spricht für eine stärkere Tiefenverlagerung von Material im Umfeld von liegendem Totholz, sprich eine höhere Bioturbation

Im mittleren Panel der **Abbildung 14** ist der kf- Wert, also die Strecke, die eine Einheit Wasser pro Sekunde durch die Bodensäule zurücklegt, dargestellt. Der Median der Kontrollen ist hier für beide Tiefenstufen größer als für die totholzbeeinflussten Proben. In der Tendenz ist die Tiefensickerung im Umfeld von Totholz demnach leicht verringert. Mögliche Erklärung hierfür wären eine geringere Porosität unter Totholz durch die Verformung durch Aufschlag- bzw. Last des Totholzes.

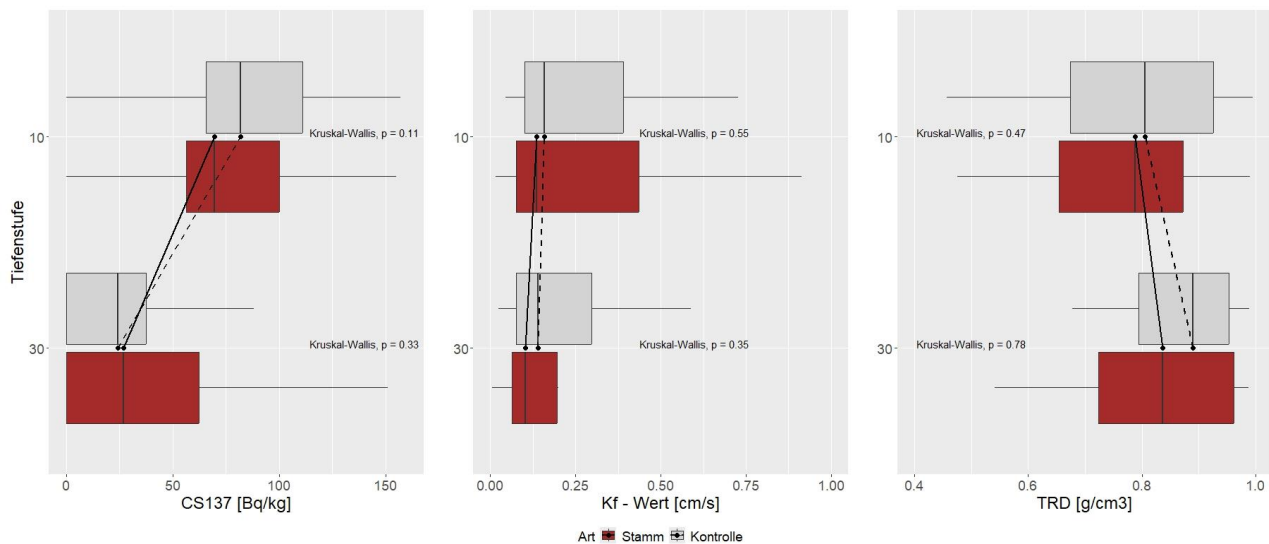


Abbildung 14: Ergebnisse der Analysen an den genommenen Stechzylindern, grau (Kontrolle), rot (Stamm).

Diese These lässt sich jedoch durch die Analyse der Trockenrohddichte (TRD) (vgl. **Abbildung 14** Panel rechts) nicht bestätigen. Hier fällt auf, dass für beide Tiefenstufen die Dichte im Umfeld von Totholz geringer ausfällt als in den Kontrollproben. Ein Umstand der sich durch die bereits erwähnte bessere Durchmischung durch Bioturbation und die generell geringere Dichte der eingetragenen organischen Substanz erklären ließe. So stehen CS137-Aktivität und TRD in einem stringenten logischen Zusammenhang, während für die Wasserleitfähigkeit eine plausible Erklärung noch gefunden werden muss.

1.3.3 AP 3.3 Wurzelbiomasse und Nährstoffgehalte in den Wurzeln

Die Analyse von Wurzelbiomasse- und Nährstoffgehalt sind in **Abbildung 15** dargestellt. Im linken Teil ist die Wurzelbiomasse pro Kubikzentimeter dargestellt. Es wird deutlich, dass in beiden Tiefenstufen (0-10 cm und 10-30 cm) die Kontrollen eine höhere Biomasse aufweisen. Im rechten Teil sind die Nährstoffgehalte in Milligramm Substanz pro Gramm Trockenmasse Wurzel, aufgeteilt nach Hauptnährstoffen und in Summe dargestellt. Hier ist zu sehen, dass sowohl die Summe der Nährstoffe als auch die meisten einzelnen Stoffe in totholznahen Wurzeln erhöht sind. In Kombination lassen sich die Ergebnisse so interpretieren, dass im Umfeld von liegendem Totholz weniger Wurzeln wachsen, diese aber dafür einen höheren Gehalt an Nährstoffen aufweisen. Als mögliche Erklärung hierfür kann das Streben nach Ressourceneffektivität der Gehölze dienen: Dort wo viele Nährstoff aus dem sich zersetzenden Totholz vorhanden sind benötigt die Pflanze weniger Wurzelmasse zur Aufnahme relevanter Mengen an Nährstoffen.

Interessanterweise wurde bei der Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (KAK) an den Bodenproben kein signifikant erhöhter Wert im Umfeld von Totholz festgestellt. Die höhere Konzentration von Nährstoffen die aus dem Totholz stammen lässt sich demnach im Boden nicht wiederfinden. Ein Grund hierfür könnte eine effektive und schnelle Aufnahme (Nährstoffrecycling) durch die lebende Biomasse sein.

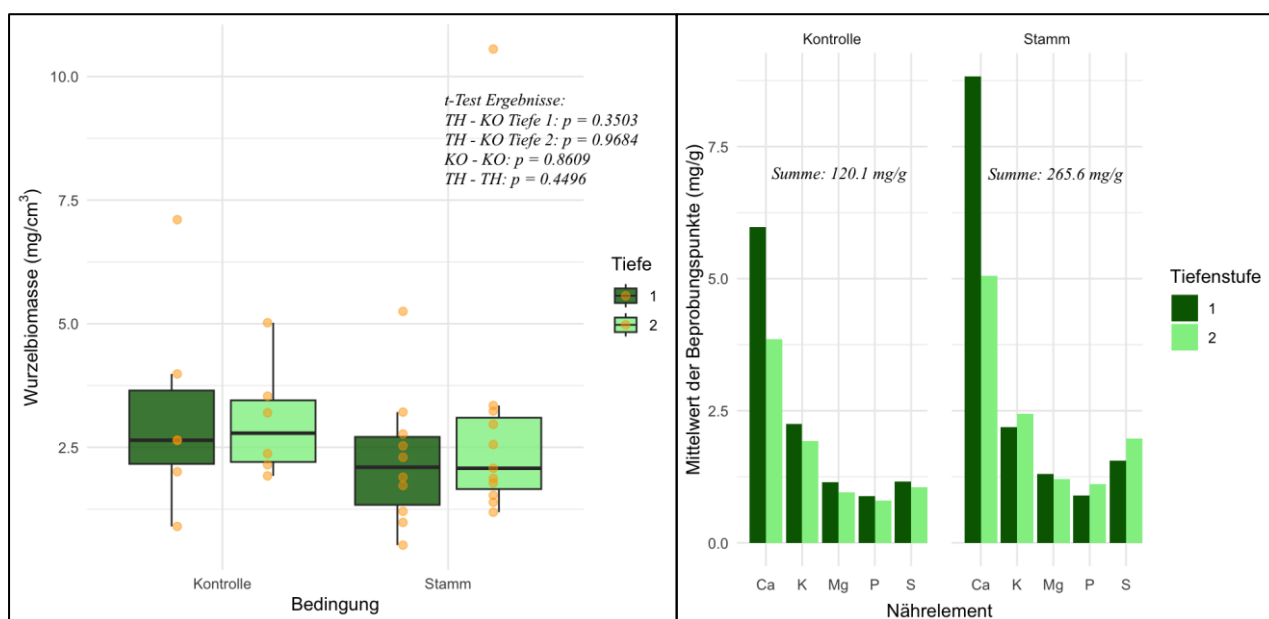


Abbildung 15: Ergebnisse der Analysen zur Wurzelbiomasse.

1.3.4 AP 3.4 Stabilität der organischen Substanz

In **Abbildung 16** sind die Ergebnisse der Dichtefraktionierung an einem Teilsatz der Extensivproben dargestellt (ca. 300 Proben). Die x-Achse zeigt die Beprobungsachse, wie in AP1 erläutert. Die y-Achse zeigt den Anteil des organischen Kohlenstoffes der bezogen auf den Gesamtkohlenstoff der Probe in den jeweiligen Dichtefractionen vorliegt. Es ist zu sehen, dass hangaufwärts des Totholzstammes signifikante Unterschiede zwischen den Beprobungspunkten am Stamm (BO) und der Kontrolle (KO) vorliegen. Direkt oberhalb des Stammes ist der Anteil des Kohlenstoffes der in der freien leichten Fraktion (fLF) vorliegt gegenüber der Kontrolle erhöht. Gegenläufig sinkt damit der Anteil des Kohlenstoffes der in der schweren Fraktion (heavy-fraction/HF) vorliegt. Die Stärke der Festlegung/Speicherung des Kohlenstoffes kann in abnehmender Folge so interpretiert werden: $HF > olf > fLF$. Es liegt also mehr leicht verfügbarer bzw. zersetzbarer partikulärer organischen Kohlenstoff (fLF) direkt oberhalb des Stammes vor. Wohingegen bei den zugehörigen Kontrollen mehr Kohlenstoff in schwer zersetzbaren Aggregaten (olf) oder an Mineralbodenoberflächen (HF) gebunden ist. Hangabwärts des Stammes sind derartige Effekte nicht signifikant zu finden. Eine mögliche Erklärung für die Effekte kann der Anstau von hangabwärts rutschender Streu oberhalb des Totholzstammes sein. Diese Streu wirkt dann als zusätzlicher Lieferant von frei vorliegender, partikulärer organischer Bodensubstanz. Ähnliche Effekte ließen sich auch während der Geländearbeiten feststellen (vgl. **Abbildung 17**).

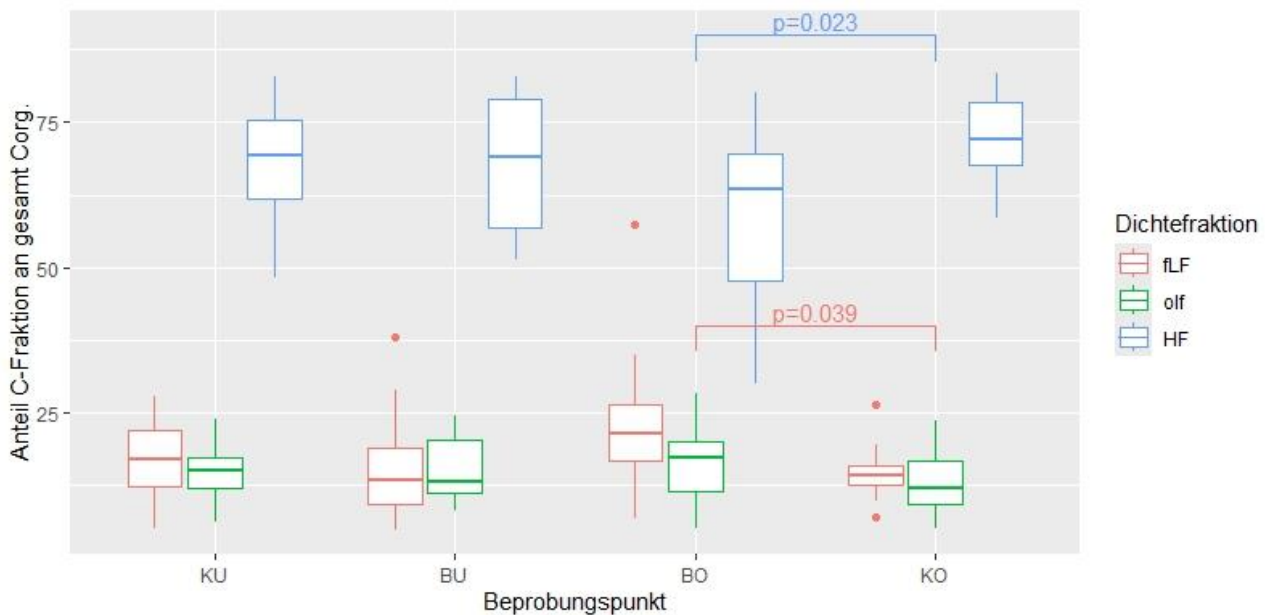


Abbildung 16: C_{org}-Gehalte in den Dichtefractionen aufgeteilt nach den Beprobungspunkten des Extensivdesigns.



Abbildung 17: Geländefoto aus dem Conventwald. Deutlich zu sehen ist der Anstau von Streu auf der Hangoberseite des Stammes. Foto: Jörg Niederberger

1.3.5 AP 3.5 Einfluss des Zersetzungsgrad

Zusätzlich zu den Analysen an Stechzylindern wurde auf den Intensivmessplots eine Serie stärker zersetzter Stämme beprobt. Die Ergebnisse sollten im Sinne einer unechten Zeitreihe auch zur Absicherung der methodischen Entscheidung für den Zersetzungsgrad 4 in der Extensivbeprobung dienen. In die unechte Zeitreihe wurden vier von fünf Stufen der Skala des Zersetzungsgrades nach schweizerischem Forstinventar aufgenommen. Der Zersetzungsgrad 1 wurde ausgelassen, da in diesem wenig zersetzten Zustand kein stofflicher Austrag zu erwarten war. Die Ergebnisse der Auswertung (**Abbildung 18**) weisen kein eindeutiges Muster über die Zersetzungsstufen auf. Im Mineralboden ist der C_{org} -Gehalt erst abnehmend, dann in der letzten Stufe zunehmend. In der Humusauflage ist er in der ersten Stufe abnehmend, danach zunehmend. Ähnlich sprunghafte Ergebnisse zeigen sich bei Berechnung der C_{org} -Vorräte pro Hektar. Eine mögliche Erklärung wäre ein Gleichgewicht aus Ein- und Austrag bzw. Abbau über die Zersetzung hinweg, so dass ein bestimmter Schwellenwert an zusätzlichem Kohlenstoff im Boden nicht überschritten werden kann.

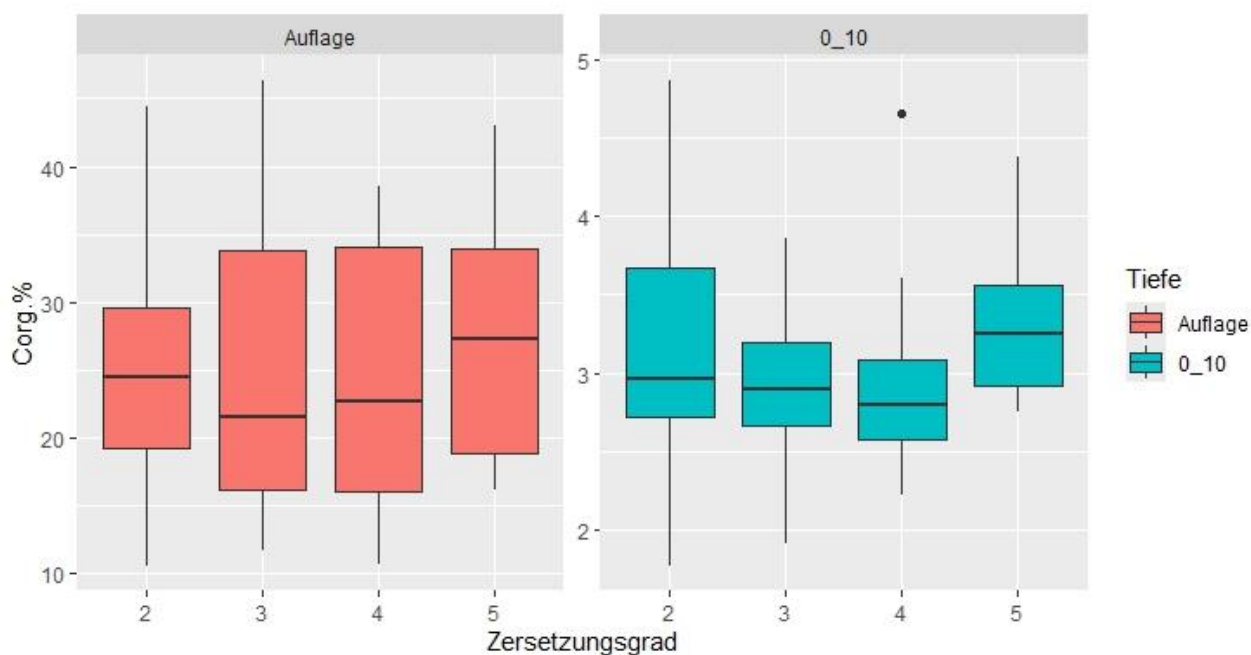


Abbildung 18: Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) ausgewertet in Bezug auf den Zersetzungsgrad.

1.4 Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3

1.4.1 AP 4.1 Zusammenstellung der Daten aus AP 1-3

Die im Rahmen der APs 1-3 erhobenen Daten wurden nach Abschluss aller Analysen zusammengestellt. Jegliche Datenaufbereitung, Analyse und Modellierung fand mit der Open Source Software R (R Core Team, 2024) statt.

1.4.2 AP 4.2 Korrelationsanalysen und Geostatistik

Die grafisch in **Abbildung 19** dargestellten Korrelationsanalysen zeigen, wie unterschiedlich sich DOC in Abhängigkeit vom Standort und der Totholzbaumart zu verschiedenen chemischen Parametern im Bodenwasser verhält. Auffällig ist vor allem, dass die Beziehungen zwischen Nährstoffen wie Calcium (Ca), Kalium (K) oder Magnesium (Mg) stark vom Standort abhängen. So zeigt Ca beispielsweise unter Buchen- und Fichtentotholz auf dem sauren Standort (WAL) eine positive Korrelation, während auf den karbonatischen Hängen das Gegenteil zu beobachten ist – bedingt durch veränderte Bindungsprozesse im Boden. K und Mg stehen fast überall in einem positiven Zusammenhang mit DOC, wenn auch in unterschiedlicher Stärke. Mangan (Mn) dagegen verhält sich je nach Exposition und Baumart unterschiedlich – mal schwach positiv, mal leicht negativ. Besonders konstant ist hingegen der Zusammenhang mit organischem Stickstoff (N_{org}), der standortunabhängig stark positiv ausfällt. Natrium (Na) korreliert unter sauren Bedingungen negativ mit DOC, während auf kalkreichen Böden eine positive Beziehung besteht. Phosphor (P) zeigt unabhängig vom Standort eine durchweg positive Korrelation. Auch der pH-Wert spielt eine wichtige Rolle: Auf dem sauren Standort steigt der DOC-Gehalt mit zunehmendem pH, während auf den karbonatischen Flächen ein zu hoher pH-Wert die Zersetzungsprozesse hemmt – was sich in einer negativen Korrelation widerspiegelt.



Abbildung 19: Korrelationen zwischen DOC und verschiedenen chemischen Parametern im Bodenwasser.

1.4.3 AP 4.3 Modellerstellung und Regionalisierung

1.4.3.1 Modellierung des Einflusses von Totholz auf Bodenfeuchte und Bodentemperatur

Der Effekt des Vorhandenseins von Totholz auf die Bodenfeuchte und Bodentemperatur in einer Tiefe von 15 cm wurde mit linearen gemischten Modellen getestet. Diese Art von Modell ist vor allem geeignet, um wiederholte Messungen an denselben Punkten zu erfassen. Die Versuchsflächen (WAL, TUT NE, TUT SW) wurden als zufällige (randomisierte) Effekte einbezogen. Die Modelle wurden mit der Funktion *lmer()* aus dem Paket *lmerTest* (Kuznetsova et al., 2017) implementiert, die Ergebnisse sind in **Tabelle 4** dargestellt. Totholz hat einen signifikant negativen Effekt sowohl auf Bodentemperatur als auch auf Bodenfeuchte (negative Schätzwerte). Das bedeutet, dass es unter Totholz prinzipiell etwas kühler und trockener ist im Vergleich zu Kontrollflächen ohne Totholz. Vor allem der Effekt von Totholz auf die Bodentemperatur ist mit einem Schätzwert von -0,11 sehr gering. Der Einfluss auf die relative Bodenfeuchte ist größer (Schätzwert -2,12).

Beide Modelle haben ein niedriges R^2 , was bedeutet, dass der erklärte Varianzanteil gering ist. Bei Ansicht der Rohdaten wurde deutlich, dass der Effekt von Totholz auf Bodentemperatur und vor allem Bodenfeuchte stark abhängig ist vom jeweiligen Baumstamm. In **Abbildung 20** wird deutlich, dass es Baumstämme gibt, unter denen es vor allem auch in den Sommermonaten deutlich trockener ist (bspw. TUT SW B, TUT SW C, WAL Bu A, WAL Bu C, WAL Fi B). Dies deutet darauf hin, dass die Niederschläge im Sommer direkt vom Totholzstamm „abgefangen“ werden und gar nicht erst im Boden darunter ankommen. Die Peaks nach Regenereignissen im Sommer, die auf den Kontrollflächen dieser Stämme deutlich zu sehen sind, spiegeln sich unter Totholz nicht wieder. Umgekehrte Muster sind beispielsweise bei Stamm TUT NE A zu sehen. Hier ist es fast über den gesamten Messzeitraum unter Totholz nasser im Vergleich zur Kontrolle. Die Effekte von Totholz auf die Bodenfeuchte können anhand der 12 untersuchten Stämme nicht eindeutig identifiziert werden, da sie beispielsweise stark abhängig sind von der Lage des Stammes am Hang oder der Zersetzungstufe des Totholzstammes.

Tabelle 4: Ergebnisse des linearen gemischten Modells zum Einfluss von Totholz auf Bodentemperatur und Bodenfeuchte; Signifikanzlevel p-Wert <0,001 ***, p-Wert < 0.05 **, p-Wert < 0.1 *.

Prädiktor	Bodentemperatur [°C]			Relative Bodenfeuchte [% nFK]		
	Schätzwert	p-Wert	Signifikanz	Schätzwert	p-Wert	Signifikanz
Totholz	-0,11	0,090	*	-2,12	<0,001	***

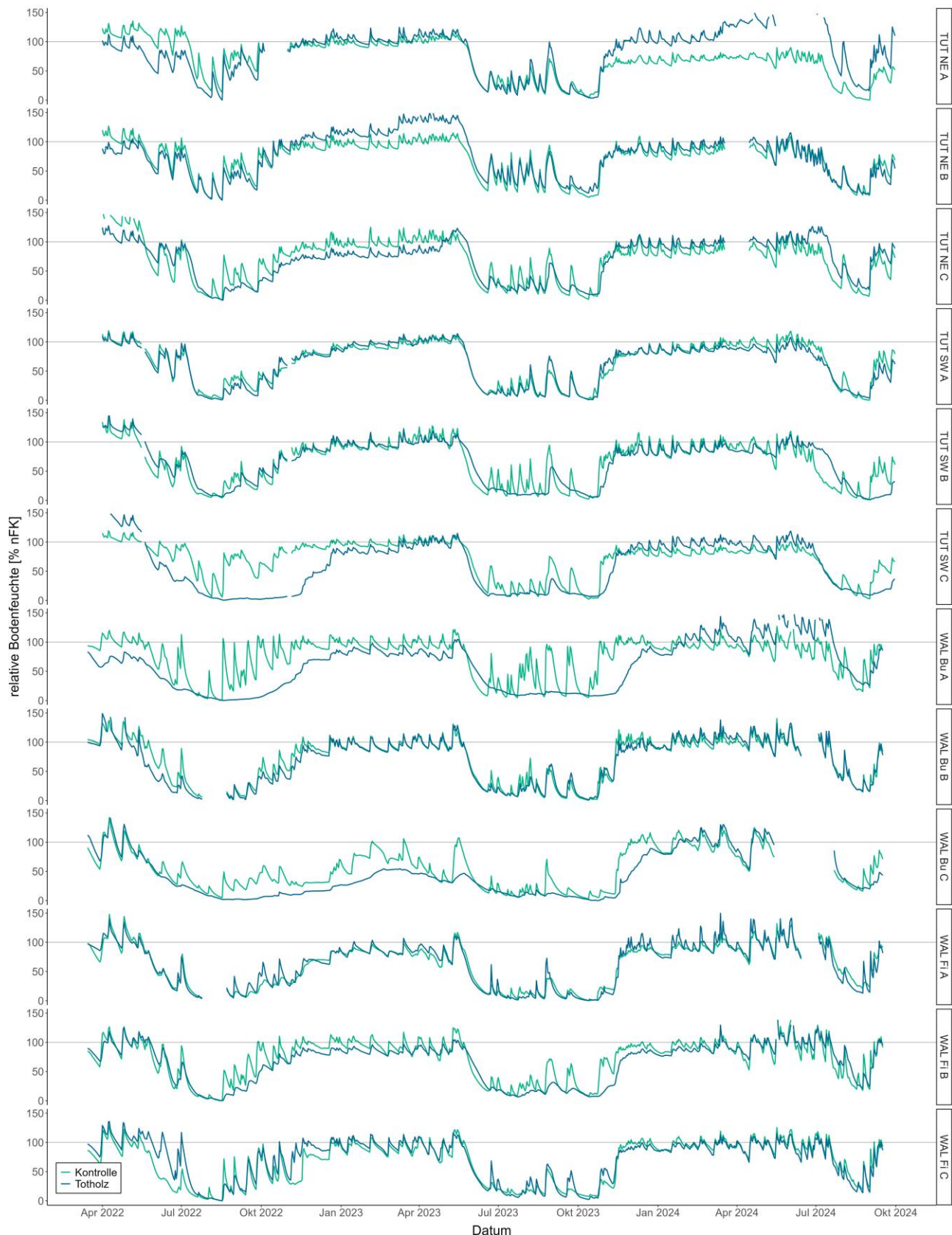


Abbildung 18: Tageswerte der relativen Bodenfeuchte unter Totholz und der Kontrollfläche für jeden Intensivmessplot (jeden Totholzstamm).

1.4.3.2 Modellierung Einflussfaktoren auf DOC

Lineare gemischte Modelle wurden ebenfalls genutzt, um Faktoren zu identifizieren, die die DOC-Konzentrationen im Bodenwasser beeinflussen. Für jede Versuchsfläche (TUT Standorte zusammengefasst) und jede Tiefenstufe (Humusaufgabe, 15 cm, 30 cm) wurden separate Modelle erstellt. Am Standort WAL wurden die Effekte der Baumart (Buche oder Fichte) mit ins Modell aufgenommen. An den TUT-Standorten wurde die Exposition (NE und SW) als fester Effekt in die Modelle integriert. Um der hierarchischen Datenstruktur Rechnung zu tragen, wurde die Baum-ID als Zufallseffekt mit ins Modell genommen. Für die Modellierung wurde die Tiefenstufe 60 cm in WAL ausgelassen, um gleiche Bedingungen wie auf den TUT-

Standorten zu haben und keine Verzerrung der Ergebnisse durch eine unterschiedliche Anzahl an Tiefenstufen zu erhalten. Alle im Modell inkludierten Prädiktoren wurden in Interaktion mit dem Vorhandensein von Totholz miteinbezogen.

Hauptinflussfaktoren auf die DOC-Konzentration war beispielsweise die Baumart des Totholzes. Während unter Buchentotholz durchgehend höhere DOC-Konzentrationen gemessen werden konnten im Vergleich zur Kontrollfläche, war dies bei Fichtentotholz nicht der Fall. Das Modell zeigte ebenfalls eine signifikante Interaktion zwischen dem Vorhandensein von Totholz und der mittleren Bodentemperatur im Hinblick auf die DOC-Konzentration. In den Kontrollproben nahm die DOC-Konzentration mit steigender Bodentemperatur leicht zu, was auf eine temperaturbedingte Förderung mikrobieller Umsatzprozesse hindeutet. In den Proben unter Totholz zeigte sich ein gegenteiliger Trend: hier sank die DOC-Konzentration mit zunehmender Temperatur. Dies bedeutet, dass sich die positiven Temperatureffekte auf die DOC-Mobilisierung bei Anwesenheit von Totholz umkehren. Mögliche Erklärungen dafür könnten sein, dass Totholz kühlere Mikrohabitate schafft (siehe II. 1.4.3.1) oder dass bei steigenden Temperaturen eventuell vermehrt mikrobieller Abbau von DOC im Totholz/unter Totholz stattfindet. Die Ergebnisse zeigten ebenfalls eine signifikante Interaktion zwischen dem pH-Wert des Bodenwassers und dem Vorhandensein von Totholz im Mineralboden auf dem sauren Standort WAL. In den Kontrollproben ohne Totholz blieb die DOC-Konzentration über den betrachteten pH-Bereich weitgehend konstant, was auf eine geringe pH-Sensitivität hinweist. In Proben unter Totholz hingegen stieg die DOC-Konzentration deutlich mit zunehmendem pH-Wert an. Dies deutet darauf hin, dass Totholz die pH-Abhängigkeit der DOC-Mobilisierung verstärkt. Mögliche Erklärungen sind eine pH-abhängige Veränderung der Löslichkeit organischer Substanzen unter Totholz sowie eine erhöhte mikrobielle Aktivität bei höheren pH-Werten, die unter Totholz verstärkt zum Tragen kommt.

Ausführliche Ergebnisse und die Diskussion der Modellierung werden in einem in Bearbeitung befindlichen Manuskript für eine wissenschaftliche Veröffentlichung präsentiert (siehe II. 4. Veröffentlichungen).

1.4.3.3 Modellierung der Einflussfaktoren auf CO₂-Flüsse

Um die Einflussfaktoren auf die CO₂-Flüsse aus dem Totholz und dem Boden zu identifizieren, wurden generalisierte additive Modelle (GAMs) angewandt. Die Modellierung wurde mit der Funktion *gam()* aus dem *mgcv* Paket (Wood, 2017) umgesetzt. Im Modell enthaltene Prädiktoren waren die mittlere Bodentemperatur und die mittlere relative Bodenfeuchte an dem jeweiligen Messtag, der Kleinstandort (Totholz, Randbereich, Kontrolle), die Versuchsfläche (WAL, TUT NE, TUT SW) und die Baumart (Buche, Fichte). Ebenfalls miteinbezogen wurde die Interaktion zwischen Versuchsfläche und Kleinstandort, um zu schauen, ob sich die CO₂-Flüsse an den Kleinstandorten auf den einzelnen Versuchsflächen unterscheiden. Die Baum-ID wurde als Zufallseffekt integriert. Die Ergebnisse wurden, wie bei den linearen gemischten Modellen, auf folgenden Ebenen als statistisch signifikant angesehen: $p < 0,001 = ***$, $p < 0,05 = **$ und $p < 0,1 = *$. Die Ergebnisse der Modellierung der Einflussfaktoren sind in **Tabelle 5** dargestellt.

Tabelle 5: Modellergebnisse des GAMs zu Einflussfaktoren auf CO₂-Flüsse.

Prädiktor	Schätzwert	Signifikanz
Bodentemperatur [°C]	Smooth	***
Relative Bodenfeuchte [% nFK]	Smooth	**
Kleinstandort Totholz	0,04	ns
Kleinstandort Randbereich	-0,20	ns
Fläche TUT SW	-0,32	ns
Fläche WAL	-0,80	**
Baumart Fichte	0,06	ns
Totholz : TUT SW	0,34	ns
Randbereich : TUT SW	0,29	ns
Totholz : WAL	0,74	**
Randbereich : WAL	0,71	**

Den stärksten Einfluss auf die CO₂-Flüsse hatte die Bodentemperatur. Der Zusammenhang war fast linear, was bedeutet, dass die CO₂-Flüsse mit zunehmender Temperatur steigen. Der Zusammenhang mit der Bodenfeuchte, ebenfalls signifikant, hatte einen konvexen Zusammenhang. Das bedeutet es gibt einen „Optimumbereich“ der Bodenfeuchte, in dem die CO₂-Flüsse am höchsten sind. Sowohl wenn der Boden zu trocken ist, als auch wenn es zu nass ist, verringerten sich die CO₂-Flüsse. Beide Gegebenheiten hemmen die mikrobiellen Umsatzprozesse im Boden und die Wurzelatmung. Aus dem Modell ließen sich auch standörtliche Unterschiede ableiten. Auf der Fläche TUT NE wurden insgesamt die höchsten CO₂-Flüsse gemessen, gefolgt von TUT SW und WAL. Wie auch schon aus den Rohdaten ersichtlich (**Abbildung 12**), gab es ebenfalls eine Abstufung bei den Kleinstandorten, mit den niedrigsten CO₂-Flüssen auf den Kontrollen, gefolgt von den Randbereichen und dem Totholz. Vor allem die höheren Flüsse in den Randbereichen bestätigen unsere Annahme, dass auch im nahen Umfeld von Totholz noch vermehrt CO₂ frei wird, da hier

vermehrt Umsatzprozesse stattfinden. Es konnte kein Effekt der Baumart nachgewiesen werden. Dies unterscheidet sich von den DOC-Konzentrationen im Bodenwasser, bei denen ein deutlicher Effekt der Baumart erkennbar war. Besonders spannend ist der Blick auf die Interaktion zwischen Versuchsfläche und Kleinstandort. Hierbei wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Kleinstandorten auf der Fläche WAL am größten sind. Auf der Fläche TUT NE sind fast keine Unterschiede zwischen Totholz und Kontrolle erkennbar. Hier sind schon auf der Kontrollfläche sehr hohe CO₂-Flüsse gemessen worden.

Ausführliche Ergebnisse und die Diskussion der Modellierung werden in einem in Bearbeitung befindlichen Manuskript für eine wissenschaftliche Veröffentlichung präsentiert (siehe **II. 4. Veröffentlichungen**).

1.4.3.4 Lückenfüllung der CO₂-Flüsse mittels Modellierung

Die DOC-Flüsse konnten mittels der Wasserhaushaltsmodellierung immer exakt für den Zeitraum zwischen zwei Probenahmedaten erfasst werden. Um die DOC-Flüsse mit den CO₂-Flüssen zu kombinieren, war es notwendig, die Zeiträume zwischen 2 Messzeitpunkten (4 Wochen) zu modellieren. Da die Haupteinflussfaktoren auf die CO₂-Flüsse Bodentemperatur und Bodenfeuchte waren, konnte unter Verwendung dieser beider Prädiktoren ein Modell (GAM) erstellt werden, um die CO₂-Flüsse zu modellieren (Funktion *predict()*, ebenfalls aus dem *mgcv* Paket). Dies wurde für jede Fläche und für jeden Kleinstandort separat durchgeführt. Das Ergebnis wurde dann von der ursprünglichen Einheit ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in Tageswerte umgerechnet. Da die Messungen immer ungefähr zur selben Zeit stattfanden (zwischen 10 Uhr und 13 Uhr) können sie als repräsentativ für den gesamten Tag angesehen werden (Davidson et al., 2002). Dies erlaubte eine Bilanzierung der CO₂-Flüsse mit den modellierten Daten. Ergebnisse der Bilanzierung sind unter **II. 1.2.5.3** beschrieben.

1.4.3.5 Modellierung der Einflüsse auf C_{org} in der Bodenfestphase

Im Rahmen der Modellierung wurden die in AP 1 gewonnenen Bodenproben bzw. die daran gemessenen C- und N-Gehalte mit den gemessenen Standorts- und Bestandesparametern in Verbindung gebracht. Hierzu wurden gemischte Modelle (linear-mixed-models) genutzt. Bei allen Modellen wurden die Parameter Untersuchungsfläche, Stammnummer und Tiefenstufe als zufällige Effekte (random effects) gesetzt. Hierbei wurde Stammnummer als Unterkategorie von Untersuchungsfläche geschachtelt aufgefasst (nested random effect). Durch die Ausweisung der zufälligen Effekte im Modell konnte deren Einfluss auf die Daten herausgerechnet werden und der Einfluss der festen Effekte (fixed effects) über die Gruppen der zufälligen Effekte hinweg bestimmt werden. Als abhängige Variable wurden die jeweiligen Δ -Werte (C_{org} oder N) gesetzt. Hierbei wurden jeweils getrennte Modelle für die Δ -Werte der Gehalte und der Vorräte gerechnet, sowie Modelle für Gehalts- bzw. Vorratssummen, z.B. Summe C_{org} im Mineralboden, erstellt. Am Anfang wurden Modelle größtmöglicher Komplexität erstellt, die als feste Effekte alle in AP 1 erhobenen Parameter beinhalten (Zersetzungsgang, Durchmesser, Hangneigung etc.). Diese Modelle wurden im Anschluss durch schrittweise Reduktion vereinfacht, bis die treibenden Faktoren isoliert festgestellt werden konnten.

Es wurde festgestellt, dass der pH-Wert bezogen auf die $\Delta\text{C}_{\text{org}}$ -Gehalte einen signifikanten Einfluss hat ($p=0,008599$). Die Effektrichtung beschreibt hierbei mit $-8,455$ einen negativen Zusammenhang. Das heißt mit steigendem pH nimmt der Effekt des Totholzes auf den C_{org}-Gehalt signifikant ab. Der Zusammenhang ist in **Abbildung 21** rechts dargestellt, wobei zu beachten bleibt, dass die Datenpunkte die Originaldaten darstellen, während die Regressionsgerade errechnete Modellwerte (über alle random effects) widerspiegeln. Der Zusammenhang erscheint auch deswegen plausibel, da die ΔC -Werte gerade in der Oh-Lage der Humusaufgabe besonders groß sind (vgl. **Abbildung 3**) und es ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen den Baumarten (Buche/Fichte) gibt. Es erscheint ein sich gegenseitig verstärkender Effekt plausibel, da Fichten auf überwiegend saureren Standorten angebaut werden, wo sie zusammen mit den Standortseigenschaften zu mächtigeren Humusaufgaben, respektive Oh-Lagen, führen.

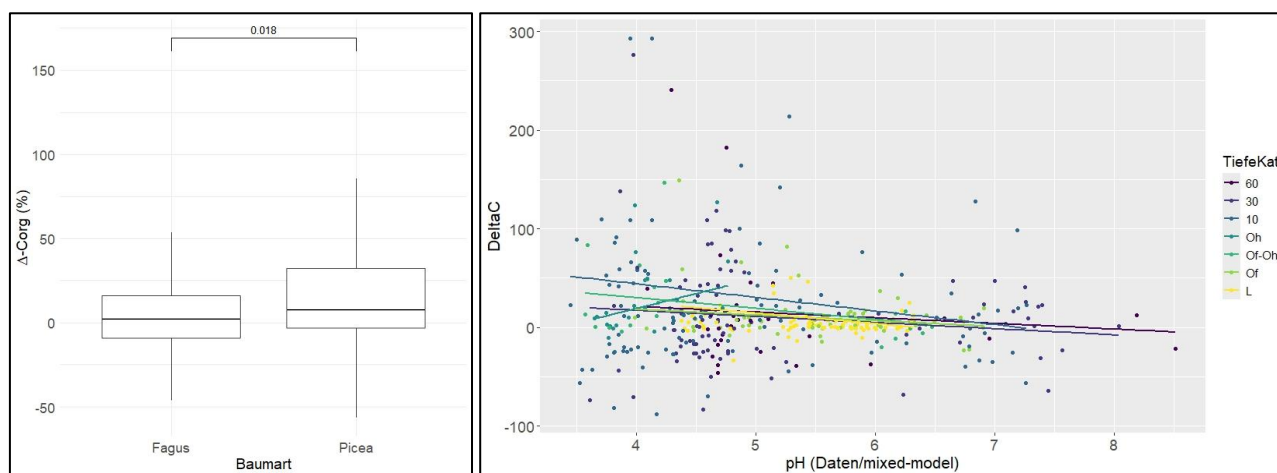


Abbildung 19: Einflussfaktoren auf ΔC die durch gemischte Modelle identifiziert wurden. Links Einfluss der Baumart, rechts Einfluss des pH-Wertes des Bodens.

Ein ebenfalls signifikanter Zusammenhang konnte zwischen ΔC und dem Parameter Abweichung von der Isohypse festgestellt werden ($p=0,0496$). Letzterer beschreibt die Lage des beprobten Totholzstammes im Bezug zur Höhenlinie (0=Höhenlinienparallel, 90=senkrecht hangabwärts). Die Effektrichtung war hier schwach positiv (+0,03384), so dass ein zunehmender Totholzeffekt mit zunehmender Abweichung von der Höhenlinie festgestellt werden kann. Dieses Ergebnis war unerwartet, lässt sich jedoch mit einer zunehmenden kohlenstoffemittierenden Stammquerschnittsfläche bei abnehmendem Winkel der Stammachse zur Beprobungslinie erklären.

Als letzter weiterer signifikanter Zusammenhang wurde ein Einfluss des Stammdurchmessers auf die Summe des Kohlenstoffvorrats im Mineralboden gefunden ($-0,8987/p=0,0333$). Es lässt sich daher festhalten, dass mit abnehmendem Durchmesser ein höherer Totholzeffekt auf die Boden-C-Vorräte festzustellen war. Als mögliche Erklärung sind hier Effekte der Abschattung gegen Sickerwasser, als Transportmedium für Kohlenstoff, oder eine stärkere Verschiebung von biologischer zu physikalischer Verwitterung und damit einhergehende geringere Einarbeitung in den Mineralboden denkbar.

1.4.3.6 Regionalisierung der Daten

Vor allem bei der Modellierung der Einflussfaktoren auf die DOC-Konzentration im Bodenwasser war der Standort, bzw. der einzelne Totholzstamm, ein sehr wichtiger Faktor. Bei der Modellierung der CO_2 -Flüsse konnten Bodentemperatur und Bodenfeuchte als maßgebliche Einflussfaktoren identifiziert werden. Jedoch unterschied sich hier der Einfluss von Totholz auf die CO_2 -Flüsse ebenfalls stark zwischen den einzelnen Versuchsflächen. Der starke Standorteffekt, bzw. Effekt der Baum-ID, vor allem bei der DOC-Konzentration, machte eine Regionalisierung der Ergebnisse auf der vorhandenen Datengrundlage quasi unmöglich.

Für das Bodenkompartment der Festphase kann zusammengefasst ein erhöhter Totholzeffekt auf saureren Standort, mit denen für sie typischen Fichtenbestockung und stärkeren Humusaufgaben, festgestellt werden. Führt man diese Kenntnis mit den Ergebnissen des AP 1 zusammen (vgl. **Abbildung 3**), so könnte man ein um ca. 10 bis 20 Prozent erhöhtes Speichervolumen des Bodenkohlenstoffspeichers bei Belassen von Totholz veranschlagen.

1.5 Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen

1.5.1 AP 5.1 Aufbereitung der Ergebnisse für Fortbildungsveranstaltungen der Forstpraxis

Das Projekt und seine Ergebnisse wurden in verschiedenen praxisorientierten Veranstaltungen präsentiert. So gab es Vorträge bei den Themennachmittagen des Waldklimafonds (Vortrag am 26.11.2024), dem Kolloquium der FVA-BW (Vorträge am 16.11.2022 und am 08.05.2025), dem von der FVA-BW organisierten Bodensymposium (16.10.2024) und der Jahrestagung des Kuratoriums für Wald- und Forstwirtschaft (KWF Tagung, Posterbeitrag am 19. – 22.06.2024). Alle Beiträge sind unter **II. 4** aufgelistet.

1.5.2 AP 5.2 Planung und Durchführung des Abschlussworkshops

Aufgrund der im Vergleich zum Projektantrag deutlich umfangreicheren Vorstellung des Projekts bei verschiedenen praxisorientierten Veranstaltungen (vgl. **I. 1.5.1**) wurde auf eine zusätzliche Ausrichtung eines projektspezifischen Abschlussworkshops, wie es ursprünglich im Projektantrag geplant war, verzichtet.

1.6 Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse wurden über den gesamten Projektzeitraum auf unterschiedlichen Fachtagungen in Form von Postern und Vorträgen präsentiert. Die Beiträge sind unter **II. 4** aufgelistet.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projektes erfolgten keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Bei Antragstellung wurde erwartet, dass die Projektergebnisse wissenschaftlich begründete, praxisrelevante Informationen über die Steigerung der Kohlenstoffsequestrierung durch ein angepasstes Totholzmanagement bereitstellen können. Damit sollte der positive Mehrwert bestehender, in der Regel mit Naturschutzzielen motivierter Konzepte zur Totholzanreicherung in Wäldern quantifiziert werden. Insbesondere war die Erwartung, dass die Untersuchungen einen signifikanten Beitrag von Totholz zur Kohlenstoffanreicherung in Waldböden nachweisen würden und dieser Beitrag zukünftig in der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll berücksichtigt werden kann. Die Projektergebnisse zeigen, dass der Einfluss von Totholz auf die Kohlenstoffsenkenfunktion von Waldböden sowohl von der Baumart und dem Standort abhängen. Für eine abschließende Empfehlung, nach welchem Verfahren dieser Beitrag in die Berichterstattung zu Kohlenstoffsequestrierung von Wäldern einbezogen werden kann, war das im Projekt untersuchte Stichprobenkollektiv aber zu klein. Hier sind weitere

Auswertungen unter Berücksichtigung einer größeren Vielfalt an Standorteigenschaften und Waldbeständen erforderlich (siehe Abschnitt **2c**).

c) **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse wurden im Rahmen diverser Veranstaltungen, die sich speziell auch an die Forstpraxis richteten (WKF-Themennachmittag, FVA-Kolloquien, KWF-Tagung), vorgestellt. Damit hat das Projekt dazu beigetragen, das Wissen um die Bedeutung von Totholz als Kohlenstoff- und Nährstoffquelle sowie seine Funktion für die Kohlenstoffsequestrierung von Wäldern bei Waldbewirtschaftenden zu erweitern. Die im Rahmen des Projektes erstellten Beiträge zu Veranstaltungen sowie Veröffentlichungen sind in Kapitel **II. 4** aufgelistet. Zwei Artikel in wissenschaftlichen Journalen sind, als Teil der Dissertation von Frau Rubin, unmittelbar vor der Einreichung. Im Rahmen beider Teilvorhaben wurden auch mehrere Abschlussarbeiten (B. Sc. und M. Sc.) betreut (siehe **II. 1.2.2** und **II. 4**).

d) **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Basierend auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen der Wirkung von Totholz auf die Bodenkohlenstoffvorräte können daran anknüpfende Forschungsfragen bearbeitet und beantwortet werden. Aufbauend auf den im Projekt erhobenen Datensatz sowie ergänzenden Messungen kann beispielsweise untersucht werden, inwieweit Totholz auch die Nährstoffversorgung in Waldböden positiv beeinflusst. Dies ist insbesondere für solche Nährstoffe relevant, die in vielen Wäldern im Mangel sind (z.B. Kalium und Phosphor).

Vielfältige Anknüpfungspunkte zu den Projektarbeiten bieten die aktuellen Inventuren der 3. Bodenzustandserhebung im Wald und der bodenkundlichen Begleiterhebung zur 4. Bundeswaldinventur. Im Rahmen einer Forschergruppe der DFG („Humusaufgabe: Funktionsweise, Dynamik und Vulnerabilität im Wandel“, DFG RU FOR 5315) untersucht die FVA unter anderem, wie Totholz auf die Umsatzprozesse in Humusaufgaben wirkt.

Sollte sich der im Projekt beobachtete positive Effekt von Totholz auf die Kohlenstoffspeicher- und Klimaschutzfunktion von Waldböden bestätigen, wäre dies ein weiterer Anreiz, die Bemühungen der Forstbetriebe zur Totholzanreicherung in Wäldern fortzuführen und zu intensivieren. Denkbar wäre auch eine stärkere Berücksichtigung dieser Totholzeffekte bei ökologischen Waldzertifizierungen wie PEFC und FSC.

e) **Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten**

Auf die im Antrag beschriebenen Verwertungsoptionen wird in den Abschnitten **2 b)** bis **d)** eingegangen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung war ein FDM-Plan noch nicht notwendig. Die Rohdaten von Teilvorhaben 1 befinden sich in der abgesicherten Labordatenbank der FVA BW (Lims), die aufbereiteten Daten liegen auf den gesicherten Laufwerken der FVA BW.

3. **Erkenntnisse von Dritten**

Im Verlauf des Projektes wurden relevante Veröffentlichungen und neue Erkenntnisse Dritter kontinuierlich beobachtet und in die Weiterentwicklung der Methodik sowie in die Bewertung der Ergebnisse integriert.

4. **Veröffentlichungen**

Konferenzbeiträge

2022

- Stiasny, P., Rubin, L., Kalio, M., Blumenberg, E., Puhmann, H. und Lang, F.: Totholzbürtiger Kohlenstoff: Flüsse, Vorräte und Stabilität in Waldökosystemen Baden-Württembergs, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – Jahrestagung 2022 (DBG) – Grenzen überwinden, Skalen überschreiten, Trier, 04.-08-September 2022
https://www.researchgate.net/publication/391663151_Totholzburtiger_Kohlenstoff_Flusse_Vorrate_und_Stabilitat_in_Waldokosystemen_Baden-Wurtembergs
- Rubin, L., Stiasny, P., Weber, L., Meyer, A., Lang, F. und Puhmann, H.: Der Einfluss von Totholz auf Kohlenstoffvorräte und Struktur in Waldböden Baden-Württembergs, Stoffflüsse & Vorräte in Waldökosystemen: Messung, Monitoring, Modellierung, Göttingen, 17.-18. März 2022
https://www.researchgate.net/publication/391662885_Der_Einfluss_von_Totholz_auf_Kohlenstoffvorrate_und_Struktur_in_Waldboden_Baden-Wurtembergs

2023

- Rubin, L., Stiasny, P., Puhmann, H., Oelmann, Y. und Lang, F.: DOC- und CO₂-Flüsse im Umfeld von liegendem Totholz, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – Jahrestagung 2023 (DBG) – Böden - divers & multifunktional, Halle an der Saale, 02.-08. September 2023
[https://www.researchgate.net/publication/375379543_DOC- und CO₂-Flüsse im Umfeld von liegendem Totholz](https://www.researchgate.net/publication/375379543_DOC-_und_CO2-Flusse_im_Umfeld_von_liegendem_Totholz)
- Stiasny, P., Rubin, L., Weber, L., Puhmann, H. und Lang, F.: Einfluss von liegendem Totholz auf die C-Sequestrierung in Waldböden Baden-Württembergs. Quantität und Qualität/Stabilität des organischen Kohlenstoffs und deren Standortabhängigkeit, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – Jahrestagung 2023 (DBG) – Böden - divers & multifunktional, Halle an der Saale, 02.-08. September 2023
- Stiasny, P., Rubin, L., Weber, L., Puhmann, H. und Lang, F.: Einfluss von liegendem Totholz auf die C-Sequestrierung in Waldböden Baden – Württembergs. Quantität und Qualität/Stabilität des organischen Kohlenstoffs und deren Standortabhängigkeit, Forstwissenschaftstagung 2023, Dresden 2024
- Rubin, L., Stiasny, P., Puhmann, H. und Lang, F.: Aus dem Totholz in den Boden – DOC-Dynamiken in Abhängigkeit vom Standort, Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress, Göttingen, 24.-26. April 2024
[https://www.researchgate.net/publication/391662897_Aus dem Totholz in den Boden - DOC-Dynamiken in Abhängigkeit vom Standort](https://www.researchgate.net/publication/391662897_Aus_dem_Totholz_in_den_Boden_-_DOC-Dynamiken_in_Abhangigkeit_vom_Standort)
- Stiasny, P., Rubin, P., Karzel, Z., Bethke, L., Stutz, K., Puhmann, H. und Lang, F.: Hin und wieder zurück – Die Geschichte eines Totholzstammes und die unbekanntenen Wege des Kohlenstoffes, Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress, Göttingen, 24.-26. April 2024
- Rubin, L.: Aus dem Totholz in den Boden – DOC-Dynamiken in Abhängigkeit vom Standort, 18. KWF Tagung, Schwarzenborn, 19.-22. Juni 2024
[https://www.researchgate.net/publication/391663075_Aus dem Totholz in den Boden - DOC-Dynamiken in Abhängigkeit vom Standort](https://www.researchgate.net/publication/391663075_Aus_dem_Totholz_in_den_Boden_-_DOC-Dynamiken_in_Abhangigkeit_vom_Standort)
- Rubin, L., Puhmann, H. und Lang, F.: Kohlenstoffspeicher Waldboden – Welchen Beitrag kann Totholz leisten?, Bodensymposium 2024 – Waldboden: überfordertes Multitalent?, Stuttgart, 16. Oktober 2024
[https://www.researchgate.net/publication/391662890_Kohlenstoffspeicher Waldboden - Welchen Beitrag kann Totholz leisten](https://www.researchgate.net/publication/391662890_Kohlenstoffspeicher_Waldboden_-_Welchen_Beitrag_kann_Totholz_leisten)

2025

- Rubin, L., Stiasny, P., Puhmann, H. und Lang, F.: Der Einfluss von Totholz auf DOC im Sickerwasser, Kohlenstoffbindung in Waldökosystemen und Holzprodukten, Göttingen, 12.-14. März 2025
[https://www.researchgate.net/publication/391685399_Der Einfluss von Totholz auf DOC im Sickerwasser](https://www.researchgate.net/publication/391685399_Der_Einfluss_von_Totholz_auf_DOC_im_Sickerwasser)
- Stiasny, P., Rubin, L., Puhmann, H. und Lang, F.: Potentiale und Steuerungsgrößen beim Belassen von Totholz zur Anreicherung von Bodenkohlenstoff, Kohlenstoffbindung in Waldökosystemen und Holzprodukten, Göttingen, 12.-14. März 2025

Sonstiges

2023

- Rubin, L.: Zurück in den Boden – Wie Totholz den Kohlenstoffspeicher Waldboden beeinflusst, astrein 2023 Jahresmagazin der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, S. 48-53 (ebenfalls erschienen auf waldwissen.net)
https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/jahresbericht/FVA_Jahresmagazin_2023_web_komprimiert.pdf
<https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/waldboden/zurueck-in-den-boden-wie-totholz-den-kohlenstoffspeicher-waldboden-beeinflusst>

Vorträge

2022

- Rubin, L., Puhmann, H., Kalio, M. und Stiasny, P.: Einfluss von Totholz auf den Bodenkohlenstoff, Kolloquium der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 10. November 2022
[https://www.researchgate.net/publication/365451169_FVA_Kolloquium_10112022 - Einfluss von Totholz auf den Bodenkohlenstoff](https://www.researchgate.net/publication/365451169_FVA_Kolloquium_10112022_-_Einfluss_von_Totholz_auf_den_Bodenkohlenstoff)

2024

- Rubin, L., Stiasny, P., Puhmann, H. und Lang, F.: Klimaschützer Waldboden – Wie wirkt sich Totholz auf die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden aus?, Wald-Themennachmittag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 27. Oktober 2024 https://www.researchgate.net/publication/391686932_Klimaschuetzer_Waldboden_-_Wie_wirkt_sich_Totholz_auf_die_Kohlenstoffspeicherung_in_Waldboden_aus

2025

- Rubin, L., Stiasny, P., Lang, F. und Puhmann, H.: Aus dem Totholz in den Boden? Kohlenstoffdynamiken in Abhängigkeit vom Standort, Kolloquium der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 08. Mai 2025 https://www.researchgate.net/publication/391688806_Aus_dem_Totholz_in_den_Boden_Kohlenstoff_dynamiken_in_Abh%C3%A4ngigkeit_vom_Standort

Abschlussarbeiten

2022

- Blumenberg, E. (2022): Steuergrößen der Kohlenstoffdynamiken von Waldböden - Auf Basis der Bodenzustandserhebungen in Baden-Württemberg unter Berücksichtigung des Totholzaufkommens. *Unveröffentlichte Masterarbeit*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

2023

- Kalio, M. (2023): Kleinräumige Variabilität bodenchemischer Kennwerte im Umfeld liegender Totholzstämme. *Unveröffentlichte Masterarbeit*. Georg-August-Universität Göttingen

2024

- Straub, M. (2024): Reichweite der Anreicherung organischen Bodenkohlenstoffs im Umfeld von liegendem Totholz unter Betrachtung verschiedener Zersetzungsstufen. *Unveröffentlichte Masterarbeit*. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
- Bethke, L. (2024): Begünstigt liegendes Totholz das Wurzelwachstum? Untersuchungen auf einem Silikatstandort im Südschwarzwald. *Unveröffentlichte Bachelorarbeit*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Winkelbrandt, S. (2024): Verteilung von organischem Bodenkohlenstoff an Hangstandorten: vergleich von drei Flächen in Baden-Württemberg. *Unveröffentlichte Bachelorarbeit*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Karzel, Z. (2024): Einfluss von liegendem Totholz auf die Nährelementverfügbarkeit von Waldböden: Eine bodenchemische Analyse unter Betrachtung direkter und indirekter Effekte. *Unveröffentlichte Masterarbeit*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Berichte über das Projekt

2025

- Karpenstein-Machan, M. (2025): Intakter Waldboden nützt allen – Rolle des Waldbodens als Kohlenstoff- und Methanspeicher. Erschienen in: Forstmaschinenprofi, Ausgabe Februar 2025, S. 32-35
- Karpenstein-Machan, M. (2025): Intakter Waldboden nützt allen – Rolle des Waldbodens als Kohlenstoff- und Methanspeicher. Erschienen in: Holzmachen Magazin, Ausgabe Frühling 2025, S. 60-63

Veröffentlichungen in Arbeit

- Rubin, L., Stiasny, P., Nowack, R., Puhmann, H. and Lang, F. (in prep.): Arbeitstitel: DOC Dynamics Beneath Deadwood Depend on Tree Species and Site Characteristics.
- Rubin, L., Stiasny, P., Puhmann, H. and Lang, F. (in prep.): Arbeitstitel: Decomposition-Driven Carbon Emissions: Assessing CO₂ Fluxes from Deadwood and Their Relation to DOC in Soil Water.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Kohlenstoffbilanzen

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Gegenstand des Teilvorhabens 1 (Kohlenstoffbilanzen) war die Erfassung und Quantifizierung der Kohlenstoffflüsse aus dem Totholz. Ziel war es, Einflussfaktoren zu identifizieren, standörtliche Unterschiede herauszuarbeiten und Kohlenstoffbilanzen für Totholz zu erstellen. Ein weiterer wichtiger Gegenstand des Teilvorhabens war die Zusammenführung und Auswertung der Daten sowie der Wissenstransfer im Rahmen von praxisorientierten und wissenschaftlichen Tagungen/Veranstaltungen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

2.1 Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte

Die Ermittlung des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte erfolgte schwerpunktmäßig durch den Projektpartner an der Professur für Bodenökologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Teilvorhaben 2). Im Rahmen von Teilvorhaben 1 wurden zwei Masterarbeiten betreut, die einerseits die horizontale und laterale Ausdehnung des Totholzeffektes in der Bodenfestphase und den Effekt unterschiedlich starker Zersetzung der Totholzstämmen anhand unechter Zeitreihen untersuchten.

2.2 Arbeitspaket 2: Prozessuntersuchungen auf Intensivmessflächen: Kohlenstoffflüsse

Auf den Intensivmessplots wurden die Kohlenstoffflüsse im Bodenwasser (DOC) und in Form von CO₂ aus dem Boden und dem Totholz über einen Zeitraum von knapp 3 bzw. 1,5 Jahren erfasst. Zusätzlich wurden die für Umsatzprozesse wichtigen Parameter Bodentemperatur und Bodenfeuchte erfasst. Durch eine Wasserhaushaltsmodellierung konnten die DOC-Flüsse im Sickerwasser berechnet werden.

2.3 Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3

Die Einflussfaktoren auf die DOC-Konzentration und die CO₂-Flüsse aus dem Totholz und dem Boden wurden durch Modellbildungen identifiziert. Die Regionalisierung war aufgrund des starken Einflusses von Standort und einzelnen Totholzstämmen (Baum-ID) mit dem vorhandenen Datensatz nicht möglich.

2.4 Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen

Die erzielten Ergebnisse wurden im Laufe des Projektes auf diversen, auch an die Forstpraxis orientierten Veranstaltungen, vorgestellt. Aufgrund der starken Abhängigkeit des Totholzeffektes vom Standort und der Baumart war es nicht möglich, allgemeingültige Managementempfehlungen zu erstellen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

3.1 Zielsetzung und Untersuchungsdesign

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden über einen Zeitraum von knapp drei Jahren Kohlenstoffflüsse auf Intensivmessflächen untersucht, um die Rolle von Totholz bei der Kohlenstoffdynamik in mitteleuropäischen Wäldern zu erfassen. Die Erhebungen erfolgten an insgesamt 12 Totholzstämmen sowie entsprechenden Kontrollflächen an drei Standorten in Waldkirch (Schwarzwald) und in Tuttlingen (Schwäbische Alb). Erfasst wurden Kohlenstoffflüsse in Form von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) im Bodenwasser sowie CO₂-Emissionen aus Boden und Totholz gemessen.

Das Messdesign berücksichtigte standortspezifische Unterschiede hinsichtlich Baumart (Buche/Fichte), Ausgangsgestein (silikatisch/karbonatisch) und Exposition (Nordost/Südwest). Ergänzend zu den Flussmessungen wurden detaillierte Bodenbeprobungen, kontinuierliche Aufzeichnungen von Bodenfeuchte und -temperatur sowie modellbasierte Bilanzierungen durchgeführt.

3.2 Kohlenstoffflüsse: Messungen und Bilanzierung

3.2.1 DOC-Konzentration im Bodenwasser

Die Konzentration des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Bodenwasser nahm mit zunehmender Tiefe deutlich ab. Besonders in der Humusaufgabe wurden hohe Konzentrationen festgestellt, während diese im Mineralboden – insbesondere unterhalb von 30 cm Tiefe – deutlich geringer ausfielen. In den obersten Bodenschichten zeigten sich zudem größere Schwankungen in den Konzentrationswerten.

Unter Totholz lagen die DOC-Konzentrationen, mit wenigen Ausnahmen, durchgehend höher als auf den benachbarten Kontrollflächen. Die Stärke dieses Effektes war jedoch abhängig vom Standort und von der jeweiligen Baumart des Totholzes. Besonders deutlich trat der Effekt auf der Fläche WAL (saurer Standort) unter Buchentotholz hervor. Auf den karbonatischen Standorten TUT NE und TUT SW waren die Unterschiede geringer, aber dennoch überwiegend signifikant. Unter Fichtentotholz (ebenfalls WAL) fielen die Unterschiede weniger deutlich aus; vereinzelt wurden sogar höhere Konzentrationen auf den Kontrollflächen gemessen. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse, dass Totholz durch die Freisetzung gelöster organischer Substanz zur Erhöhung der DOC-Konzentration im Bodenwasser beiträgt.

3.2.2 Bilanzierung der DOC- und CO₂-Flüsse

Für die Bilanzierung der DOC-Flüsse wurden die gemessenen Konzentrationen mit modellierten Sickerwassermengen kombiniert. Die CO₂-Flüsse hingegen wurden direkt über Kammermessungen quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass Totholz die Kohlenstoffdynamik im Ökosystem beeinflusst – allerdings in stark standortabhängiger Ausprägung.

Im Mittel wurde der Kohlenstoff auf den Kontrollflächen zu etwa 87 % als CO₂ freigesetzt, während rund 13 % in Form von DOC im Bodenwasser in 15 cm Tiefe nachweisbar waren. Auf der Versuchsfläche WAL wurden CO₂-Flüsse gemessen, die im totholzbeeinflussten Bereich um 118 % über denen der Kontrollflächen lagen. Auf der Fläche TUT SW betrug der Unterschied 47 %, während auf TUT NE nur ein geringer Anstieg von 2 % festgestellt wurde.

Auch bei den DOC-Flüssen zeigten sich deutliche Unterschiede: Unter Totholz lagen sie in WAL um 278 % höher als auf den Kontrollflächen, auf TUT NE um 115 % und auf TUT SW um 94 %. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass Totholz nicht nur als CO₂-Quelle wirkt, sondern auch mittel- bis langfristig zum Eintrag organischen Kohlenstoffs in den Boden beiträgt. Die Stärke des Einflusses ist stark vom Standort abhängig.

3.3 Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffflüsse

3.3.1 Baumart und Zersetzungsstufe

Ein signifikanter Einfluss der Baumart wurde bei den DOC-Konzentration festgestellt: Unter Buchentotholz lagen diese systematisch höher als unter Fichtentotholz. Für die CO₂-Flüsse hingegen konnte kein signifikanter Effekt der Baumart nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der Zersetzungsstufe des Totholzes zeigte eine ergänzende Masterarbeit auf der Fläche WAL, dass mit zunehmendem Abbaugrad des Totholzes tendenziell höhere Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden zu finden waren. Dieser Trend war allerdings statistisch nicht signifikant. Weitere systematische Effekte der Zersetzungsstufe auf die gemessenen Kohlenstoffflüsse (DOC und CO₂) konnten im Untersuchungszeitraum nicht eindeutig nachgewiesen werden.

3.3.2 Mikroklimatische Effekte

Totholz beeinflusst das Mikroklima im Boden in mehrfacher Hinsicht. Im Durchschnitt wurden unter Totholz etwas niedrigere Bodentemperaturen und Bodenfeuchten gemessen als auf den Kontrollflächen. Allerdings war dieser Effekt stark vom Einzelfall abhängig. Unter einigen Totholzstämmen war es deutlich trockener als auf benachbarten Kontrollflächen – vermutlich, weil der Stamm einen Teil des Niederschlags abfing und den Boden darunter abschirmte. An anderen Stämmen wiederum war es unter Totholz feuchter.

Modellgestützte Analysen zeigten, dass sowohl Bodentemperatur als auch Bodenfeuchte signifikante Einflussgrößen auf die Kohlenstoffflüsse darstellen. Dabei traten Wechselwirkungen auf: Totholz veränderte lokale Mikroklimabedingungen, welche wiederum Einfluss haben auf Mobilisierung, Umsetzung und Transport von organischem Kohlenstoff – insbesondere im Hinblick auf DOC-Konzentrationen und CO₂-Freisetzung.

3.3.3 Standort- und Expositionsabhängigkeit

Die Wirkung von Totholz auf Kohlenstoffflüsse war stark vom Standort geprägt. Auf sauren Böden wie in WAL war der Einfluss von Totholz auf DOC- und CO₂-Flüsse besonders ausgeprägt. Auch die Exposition hatte einen messbaren Effekt: Südwestexponierte Hänge zeigten tendenziell größere Unterschiede zwischen Totholz- und Kontrollflächen als nordostexponierte Lagen, sowohl in der DOC-Konzentration als auch bei den CO₂-Emissionen.

3.4 Modellierungen und Regionalisierungen

Mittels linearer gemischter Modelle und generalisierter additiver Modelle (GAMs) wurden die zentralen Einflussgrößen auf die Kohlenstoffflüsse identifiziert. Für die CO₂-Emissionen erwies sich Bodentemperatur als der stärkste Prädiktor, gefolgt von der Bodenfeuchte mit einem konvexen Zusammenhang. Für die DOC-Konzentrationen waren neben der Bodentemperatur auch der pH-Wert, die Baumart und das Vorhandensein von Totholz entscheidende Einflussfaktoren. Besonders auffällig war, dass sich temperaturbedingte Effekte auf DOC auf Kontrollflächen und unter Totholz unterschiedlich auswirkten: Während auf Kontrollflächen höhere Temperaturen mit erhöhten DOC-Werten einhergingen, zeigte sich unter Totholz ein stark abgeschwächter oder sogar entgegengesetzter Trend. Aufgrund der hohen kleinräumigen Variabilität und der dominierenden Effekte einzelner Baumstämme war eine übergeordnete Regionalisierung der Ergebnisse auf Basis der erhobenen Daten nicht möglich.

3.5 Schlussfolgerung

Totholz ist nicht nur eine bedeutende Quelle für CO₂, sondern trägt auch wesentlich zum Eintrag gelösten organischen Kohlenstoffs in den Boden bei. Die erhobenen Daten deuten darauf hin, dass Totholz temporäre „Hotspots“ mikrobieller Aktivität und biogeochemischer Prozesse schaffen kann – besonders auf sauren Standorten und bei fortgeschrittener Zersetzung. Die Dynamik der Kohlenstoffflüsse hängt dabei maßgeblich von Standortbedingungen, Baumart, Exposition und mikroklimatischen Effekten ab.

Der lange, engmaschig dokumentierte Messzeitraum sowie die Verknüpfung von Feldbeobachtung, Laboranalytik und Modellierung bieten eine solide Grundlage für weiterführende Forschung sowie praxisorientierte Handlungsempfehlungen. Totholz sollte bei der Bewertung der Kohlenstoffdynamik in Wäldern sowohl als Emissionsquelle als auch als möglicher Beitrag zur Kohlenstoffbindung systematisch berücksichtigt werden.

Teilvorhaben 2: Kohlenstoffstabilisierung und Bodenstruktur

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens war die Untersuchung des Einflusses von liegendem Totholz der Baumarten Buche und Fichte auf den organischen Kohlenstoff sowie auf weitere Bodeneigenschaften (KAK, Wasserleitfähigkeit, Bioturbation etc.) in der Bodenfestphase.

Hierzu wurden 20 Untersuchungsflächen mit 3 bis 4 Totholzstämmen verteilt über Baden-Württemberg beprobt (Extensivmessflächen). Die Proben wurden im Labor auf Gehalte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff, sowie auf den pH-Wert hin analysiert. Auf den Untersuchungsflächen wurden eine Reihe von möglichen Einflussfaktoren auf die Speicherfunktion erhoben (vgl. II. 1.). Durch die Auswertung der Kohlenstoffspeicheränderung im Hinblick auf die erklärenden Einflussfaktoren werden diejenigen Größen identifiziert, die einen Einfluss auf die Speicheränderung haben (AP 1).

Auf den Intensivmessplots (Waldkirch und Tuttlingen) wurden an denselben Stämmen der Bodengas- und wassermessungen (Projektpartner FVA-BW) volumen- und lagerungstreue Stechzylinderproben entnommen. An diesen konnten Analysen durchgeführt werden, die eine ungestörte Probe voraussetzen. Hierzu gehörte die Bestimmung der Wasserleitfähigkeit (kf-Wert), der CS137-Aktivität als Marker für die Bioturbation sowie der Wurzelbiomasse und des Wurzelnährstoffgehaltes. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse wurden genutzt, um zum einen das Prozessverständnis zu verbessern und zum anderen zusätzliche positive Effekte des Belassens von Totholz aufzuzeigen (AP 2).

An Teilkontingenten aus beiden Probenkategorien (Extensiv- und Intensivproben) wurde eine Dichtefraktionierung durchgeführt (insgesamt ca. 200 Proben). Durch diese Methode und die anschließende Analyse der Gehalte an organischem Kohlenstoff in den einzelnen Fraktionen kann die Bindungsform und damit -stärke festgestellt werden. Dies ermöglicht zusätzlich zur quantitativen Bewertung der Speicheränderung unter Totholz auch noch eine Bewertung der Qualität des C-Speichers.

Zusammen mit den Projektpartnern der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg wurden aus den gewonnenen Erkenntnissen Gesamtbilanzen des Systems Totholz – Atmosphäre – Hydrosphäre – Boden erstellt.

Schlussendlich können so fundierte Empfehlungen an die forstliche Praxis ausgegeben werden, an welchen Standorten und unter welchen Gegebenheiten ein Belassen von Totholz zur Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung sinnvoll erscheint.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

2.1 Arbeitspaket 1: Inventur des Beitrags von Totholz zur Kontrolle der Bodenkohlenstoffvorräte

Es wurden insgesamt 20 Extensivmessflächen bodenkundlich beprobt. Auf den Flächen wurden Bestandes- und Geländeparameter erhoben, die als erklärende Variablen interessant erschienen. Im Labor wurden an den Proben C- und N-Gehalte sowie der pH-Wert gemessen.

2.2 Arbeitspaket 3: Kohlenstoffstabilisierung, Nährstoffverfügbarkeit und Wasserretention

Es wurden auf den Intensivmessplots Stechzylinder und Schüttproben entnommen. An den Stechzylindern wurden Messungen zur Radioaktivität/Bioturbation (CS137), Trockenrohddichte (TRD), Wasserleitfähigkeit (kf) und zur Wurzelbiomasse durchgeführt.

2.3 Arbeitspaket 4: Modellierung und Regionalisierung der Daten aus AP 1, 2 und 3

Es wurden mittels linearer gemischter Modelle die Treiber identifiziert, die den größten Einfluss auf die C- und N-Gehalte sowie die in AP 3 gemessenen Variablen haben.

2.4 Arbeitspaket 5: Ableitung von Managementempfehlungen

Die Ergebnisse wurden auf verschiedenen Tagungen und zukünftig in Form von wissenschaftlichen Fachartikeln und Artikeln in praxisorientierten Zeitschriften veröffentlicht.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Es konnten im Mittel um ca. 10 bis 20 % erhöhte Gehalte an organischem Kohlenstoff in den Horizonten der Humusaufgabe und des Oberbodens festgestellt werden. Dies entspricht unter günstigen Umständen einer rechnerischen Erhöhung des Kohlenstoffvorrates um ca. 20 t/ha in den Horizonten angrenzend an die Geländeoberfläche.

Als treibende Faktoren der erhöhten Speicherung wurden der pH-Wert sowie die Baumart als statistisch signifikante Größen identifiziert: Der pH-Wert korreliert negativ mit der Erhöhung des Speichers. Die Baumart Fichte als Totholz bzw. Hauptbaumart im Bestand weist höhere Werte als Buche auf. Beide Faktoren sind auf ökologischer Ebene eng verknüpft, da die Fichte ihre sowohl natürliche als auch anthropogene Verbreitung auf saureren Standorten hat und sie gleichzeitig ihrerseits durch die Bildung stärkerer Humusaufgaben und einer sauren Streu zur Versauerung des Standortes beiträgt.

Das durch Klimawandel und damit einhergehende Kalamitäten in großen Mengen vorhandene Fichtentotholz könnte/sollte im Rahmen von Förderprogrammen vermehrt auf den Flächen belassen werden um so die Kohlenstoffspeicherfunktion aufrechtzuerhalten bzw. zu erhöhen. Dies ist vor allem dort sinnvoll, wo durch Käferbefall oder ähnliche biotische Schädigung eine Entwertung des Holzes stattgefunden hat, so dass eine höherwertige, stoffliche Verwertung ausgeschlossen werden kann. Weniger hochwertige stoffliche oder gar thermische Verwertung führt zu einer schnellen Rückführung des gespeicherten Kohlenstoffes in die Atmosphäre, so dass in diesen Fällen das Belassen als Totholz im Wald als positiver zu bewerten ist.

Da die Ergebnisse der Dichtefraktionierung eine vermehrte Festlegung des Kohlenstoffes in der freien, partikulären Fraktion – im Gegensatz zur mineralgebundenen – ergeben haben, muss jedoch von einem eher vulnerablen Speicher ausgegangen werden. Dies deckt sich auch mit der Erkenntnis, dass die größten Speichererhöhungen in den Horizonten der Humusaufgabe bzw. knapp unter der Mineralbodenoberfläche zu beobachten sind. Um eine schnelle Mineralisierung und damit verbundene Austragsspitzen in die Gasphase zu verhindern sollte vor allem auf Kalamitätsflächen auf eine zügige Wiederbestockung geachtet werden. Erfolgt diese mit schnellwüchsigen Pionierbaumarten hat dies nicht nur weitere positive Effekte auf die Biodiversität, sondern bringt auch schnell den Kohlenstoffbiomassespeicher wieder in Gang.

Die Projektergebnisse legen ebenfalls dar, dass durch das Belassen von Totholz die Bioturbation angeregt, die Trockenrohdichte verringert und die Nährstoffaufnahme durch die Wurzeln effektiver wird. Auf den Beprobungsflächen wurde außerdem beobachtet, dass hangparallel liegendes Totholz eine stark erosionsmindernde Wirkung entwickelt. Dies sind Faktoren, die wiederum zu einer gelingenden Verjüngung und einem verbesserten Wachstum auf der Fläche führen, so dass sich durch das Belassen des Totholzes zyklische Synergien auf verschiedenen Ebenen des Ökosystems ausbilden.

QUELLENANGABEN

- Davidson, E. A., Savage, K., Verchot, L. V., & Navarro, R. (2002). Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and forest meteorology*, 113(1-4), 21-37.
- GAFA. (2014). *Handbuch Forstliche Analytik (HFA), 1.-5. Ergänzung des Gutachterausschuss Forstliche Analytik*. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) & Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA).
- Hammel, K., & Kennel, M. (2001). *Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90*. Frank.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of statistical software*, 82(13), 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Lachat, T., Brang, P., Bolliger, M., Bollmann, K., Brändli, U.-B., Bütler, R., Herrmann, S., Schneider, O., & Wermelinger, B. (2019). Totholz im Wald: Entstehung, Bedeutung und Förderung. *Merkblatt für die Praxis*, 52, 1-12.
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. In (Version 4.4.2) <https://www.R-project.org/>
- Wood, S. N. (2017). *Generalized Additive Models: An introduction with R* (2 edition ed.). Chapman and Hall/CRC.