Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Nadelholzalternativen zur nachhaltigen Entwicklung von Standortpotentialen fichtendominierter Altbestände

Zuwendungsempfänger:

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Professur für Bodenökologie
Prof. Dr. Friederike Lang

Förderkennzeichen:

22029214

Laufzeit:

01.02.2016 bis **30.09.2019**

Monat der Erstellung:

02/2020

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 Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht

Nadelholzalternativen zur nachhaltigen Entwicklung von Standortpotentialen fichtendominierter Altbestände

I. Ziele

Nadelholz macht etwa 90% des Nutzholzes in Deutschland aus und wird auch mittelfristig beispielsweise von der Bauindustrie benötigt (“Thünen-Institut: Holzeinschlag und Rohholzverwendung”; Jochem *et al.*, 2015). Gleichzeitig ist man jedoch aus ökologischer Sicht seit mehr als drei Jahrzehnten daran interessiert, Fichtenreinbestände, die in Süddeutschland die wichtigsten Nadelrohholzlieferanden darstellen, in Buchenwälder umzuwandeln. Die Waldstrategie 2020 der Bundesregierung unterstützt diese Umwandlung nachdrücklich. Argumente hierfür sind neben der Orientierung an der potentiell natürlichen Vegetation, die auf vielen Standorten Buchen-dominierte Waldgesellschaften wären, und der in den vergangenen Jahren immer relevanter werdenden Trockenheitsempfindlichkeit der Fichte (Rehschuh *et al.*, 2017; Svobodová *et al.*, 2019), auch der positive Einfluss der Buche im Vergleich zur Fichte für den Boden. Waldbauliche Untersuchungen deuten an, dass sowohl die verstärkte Einbringung der Tanne als auch der Douglasie in Fichtenreinbestände eine Lösung für die Konkurrenz zwischen nachhaltigem Bodenschutz und der Bereitstellung von Nadelrohholz bieten könnte. Ein direkter Vergleich der in diesem Kontext zur Diskussion stehenden Baumarten Fichte, Tanne, Douglasie und Buche hinsichtlich ihres Einflusses auf den Boden in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften fehlt derzeit. Das fehlende Wissen über den Einfluss der Standortbedingungen auf die Bodenwirkung bestimmter Baumarten wird international als eine der relevanten und noch offenen Fragen im Hinblick auf bodenbezogenes forstliches Management angesehen (Prescott & Vesterdal, 2013). Dieses Wissen ist jedoch zur standortspezifischen Bewertung der angesprochenen Funktionskonkurrenz und der Identifikation der geeigneten Baumartenzusammensetzung sowie der Entwicklung von Maßnahmen zur Konfliktlösung dringend nötig.

Ziel des Projektes ist die Bereitstellung quantitativer, standortspezifischer Informationen zum Einfluss der Baumarten Fichte, Tanne, Buche, und Douglasie auf bodenassoziierte Standortpotenziale. Wir wollten mit unserem Projekt eine wichtige bodenökologische Grundlage zum multifunktionalen und nachhaltigen Waldmanagement in Süddeutschland liefern.

1. Aufgabenstellung

Das Projekt gliederte sich in 8 Arbeitspakete:

AP1) Auswahl der Standorte zur Analyse des Baumarteneinflusses

Pro Standorttyp (a) sauer/frisch, (b) sauer/wechselfeucht staunass, (c) carbonathaltig, und (d) metamorph, magamatisch wurden Standorte in Zusammenarbeit mit den lokalen Partnern in Baden-Württemberg und Bayern vor Ort so ausgewählt, dass mindestens 3 Verjüngungsbaumarten vertreten sind.

AP2) Beprobung der Freilandstandorte

Zur Erfassung des Faktors „Baumart“ wurden über mehrere Vegetationsperioden die 13 Standorte beprobt (mehr als 2000 Boden und Blattproben wurden dafür entnommen).

AP3) Chemische und physikalische Bodenanalysen

Insgesamt wurden an ca. 1300 Proben bodenphysikalische und bodenchemische Analysen durchgeführt. Dazu kommen Dichtefraktionierungen der org. Bodensubstanz auf fünf Standorten sowie die Analyse der Aggregatstabilität.

AP4) Nadel- und Blattanalysen

Von fünf Standortvarianten wurden Blatt- bzw. Nadelmaterial im Hinblick auf die Nährstoffgehalte analysiert.

AP5) Quantifizierung der Bioturbation über ^{137}Cs Aktivität

Die Bestimmung der ^{137}Cs-Aktivität als Proxy für Bioturbation erfolgte an ca. 800 Proben an einem Messplatz in der Professur für Bodenökologie.

AP6) Datenmanagement und Datenbankpflege

Im Rahmen des Projektes entstand ein umfangreicher und stark vernetzter Datensatz, der für die statistische Analyse in eine relationale Datenbank eingepflegt werden musste. Die interne Datenbank der Professur für Bodenökologie wurden dafür angepasst.

AP7) Explorative Datenanalyse und statistische Modellierung

Die Komplexität des Versuchsansatzes in Verbindung mit der zu erwartenden Heterogenität erfordert die Anwendung moderner statistischer Verfahren wie gemischter Modelle oder additive Verfahren um die den Hypothesen entsprechenden Zusammenhänge herauszuarbeiten.

AP8) Publikations- und Vortragstätigkeit

Zielorientierte Weitergabe der Ergebnisse an Stakeholder wie Entscheidungsträger und die wissenschaftliche Gemeinschaft gemäß dem Verwertungsplan.

1.1 Unterschiede zum Antrag

Angesichts der nicht vorhersehbaren Variabilität zwischen den Standorten mussten wir das Analysenprogramm intensivieren und im Gegenzug die Anzahl der Standorte verringern. Anstelle der geplanten Mischproben haben wir uns dafür entschieden die 5 Feldwiederholungen pro Baumart einzeln zu analysieren.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Motivation zu unserem Projekt ist der aktuell von verschiedenster Seite angemahnte Bedarf an Nadelrohholz auf der einen Seite und der Erhalt bzw. die Verbesserung bodenassoziierter Standortpotenziale durch die Baumartenwahl auf der anderen Seite. Beides sind wichtige Aspekte einer multifunktionalen und nachhaltigen Forstwirtschaft, die aber unter Umständen miteinander konkurrieren. Fichtenreinbestände liefern große Mengen an Nadelrohholz. Dies war an vielen Stellen im Laufe der Forstgeschichte, der Grund dafür, dass

Fichtenbestände etabliert wurden und der Fichtenanteil in vielen Wäldern in Deutschland deutlich höher ist, als unter naturnahen Bedingungen (Zerbe, 1993). Bereits lange bevor die vergangenen Trockenjahre das Bewusstsein der Forstbesitzer für die Trockenheitsempfindlichkeit von Fichtenreinbeständen schärften, wurden negative Folgen des Fichtenreinanbaus für Böden bemerkt. Viele Arbeiten zeigen die Verschlechterung der Humusform unter Fichte, die Versauerung und verstärkte Podsolierung der Böden oder auch die Verflachung des Wurzelsystems und die Verschlechterung der Bodenstruktur. Die Beobachtung, dass Fichtenreinbestände versauernd auf den Boden wirken, führten im Rahmen der Waldschadensforschung in den 80er Jahren und daran anschließend zu Waldumbauprogrammen, in denen mithilfe von Voranbauten verstärkt versucht wurde den Buchenanteil in Wäldern zu erhöhen (Zerbe, 2002). Besonders im Bereich der Mittelgebirge wurde ebenfalls bereits frühzeitig versucht, auf diese Weise den Tannen-Anteil zu erhöhen, auch wenn aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Tanne gegenüber anthropogenen Schwefel-Einträgen dieser Maßnahme keine besondere forstökonomische Bedeutung beigemessen wurde (Weidenbach, 2010). Aus dieser Zeit liegen verschiedene Untersuchungen zum Einfluss von Buche im Vergleich zu Fichte auf sauren Waldstandorten vor (s. unten).

Auch aktuell findet an vielen Standorten und in vielen Forstbetrieben Waldumbau statt. In der letzten Dekade begannen sich jedoch die Rahmenbedingungen und somit auch die waldbauliche Zielsetzung grundlegend zu ändern. Ziel ist es immer noch, die risikoanfällige Fichte durch andere Baumarten zu ersetzen. Als Risikofaktoren werden neben anthropogenen Säureeinträgen nun jedoch verstärkt Borkenkäferbefall, Sturmwurf und Anfälligkeit der Fichte gegenüber erhöhter Sommertrockenheit beachtet. Aufgrund der hohen Anforderungen an den Wald und der auch aus ökologischer Sicht wünschenswerten Sicherstellung des Nadelrohholzbedarfs, rückt hierbei nun der Ersatz der Fichte durch andere Nadelhölzer immer mehr in den Vordergrund. Die Erhöhung des Douglasienanteils wird hier seit einigen Jahren als erfolgversprechend angesehen. Aktuelle Untersuchungen zeigen aber auch, das große Potenzial der Tanne als Nadelholzlieferant (Uhl *et al.*, 2013). Einige Untersuchungen widmen sich dabei auch der Frage wie Douglasie bzw. Tanne den Boden im Vergleich zur Fichte beeinflussen (s. unten). Aus dieser hier kurz zusammengefassten Geschichte der Zielsetzung des Umbaus von Fichtenbeständen und damit assoziierter Forschung ergibt sich, dass an manchen Standorten Untersuchungen zum Vergleich Buche (Bu) vs. Fichte (Fi) durchgeführt wurden, an anderen Standorten Tanne (Ta) vs. Fichte oder Douglasie (Dgl) vs. Fichte bzw. Kiefer (Ki). Es fehlt allerdings an Untersuchungen, die es erlauben, den Einfluss dieser vier Baumarten auf die Bodeneigenschaften und das damit assoziierte Standortpotenzial zu quantifizieren und zu vergleichen.

Einfluss von Bäumen auf Böden

Der Boden ist ein wichtiger Bestandteil von Waldökosystemen, er dient als Nährstoff- und Wasserspeicher für die Bäume und steuert in vielen Fällen Artenzusammensetzung und Biomasseproduktion. Als Bestandteil von Ökosystemen wird der Boden aber auch ganz entscheidend, durch die Lebewesen, die in ihm leben bestimmt. Hierbei nehmen Pflanzen entweder direkt oder indirekt durch die Beeinflussung der Bodenfauna (Reich *et al.*, 2005) und der Mikroorganismen (Godbold et al. 2006) eine wichtige Rolle ein. In der Erdgeschichte gibt es Böden erst seitdem es Landpflanzen gibt. Bäume trugen ganz entscheidend zur Entwicklung der Böden in Mitteleuropa bei. Viele Studien befassen sich daher mit dem Einfluss von Bäumen auf Böden (Prescott & Vesterdal, 2013). Wichtige baumartenspezifische Effekte werden induziert durch unterschiedliche Streuqualität und deren Einfluss auf die biologische Aktivität (Reich *et al.*, 2005), durch unterschiedliche Durchwurzelung verschiedener Baumarten (Hansson *et al.*, 2011) und der damit verbundenen Bodenstrukturbildung (Gajić, 2013) und Nährstoffumverteilung (Clarholm und Skyllberg, 2013), durch

unterschiedliche Gehalte an organischer Substanz im Mineralboden, sowie unterschiedliche Evapotranspiration (Augusto *et al.*, 2015) oder den Einfluss der Bäume auf das Mikroklima und die Deposition von Schad- und Nährstoffen am Standort (Koch & Matzner, 1993). Effekte, die für die hier zur Diskussion stehenden Baumarten eine wichtige Rolle spielen sind in *Abbildung 1* zusammenfassen dargestellt.

Einfluss der Fichte

Ausschlaggebend für den negativen Einfluss von Fichten auf Böden ist die schlechte Streuqualität der Fichte, die dazu führt, dass die Qualität der Humusauflage sich verschlechtert. Die Bildung von Rohhumus wird von Fichtenmonokulturen begünstigt. (Vesterdal, 1999) konnte zeigen, dass die Zersetzungsgeschwindigkeit der

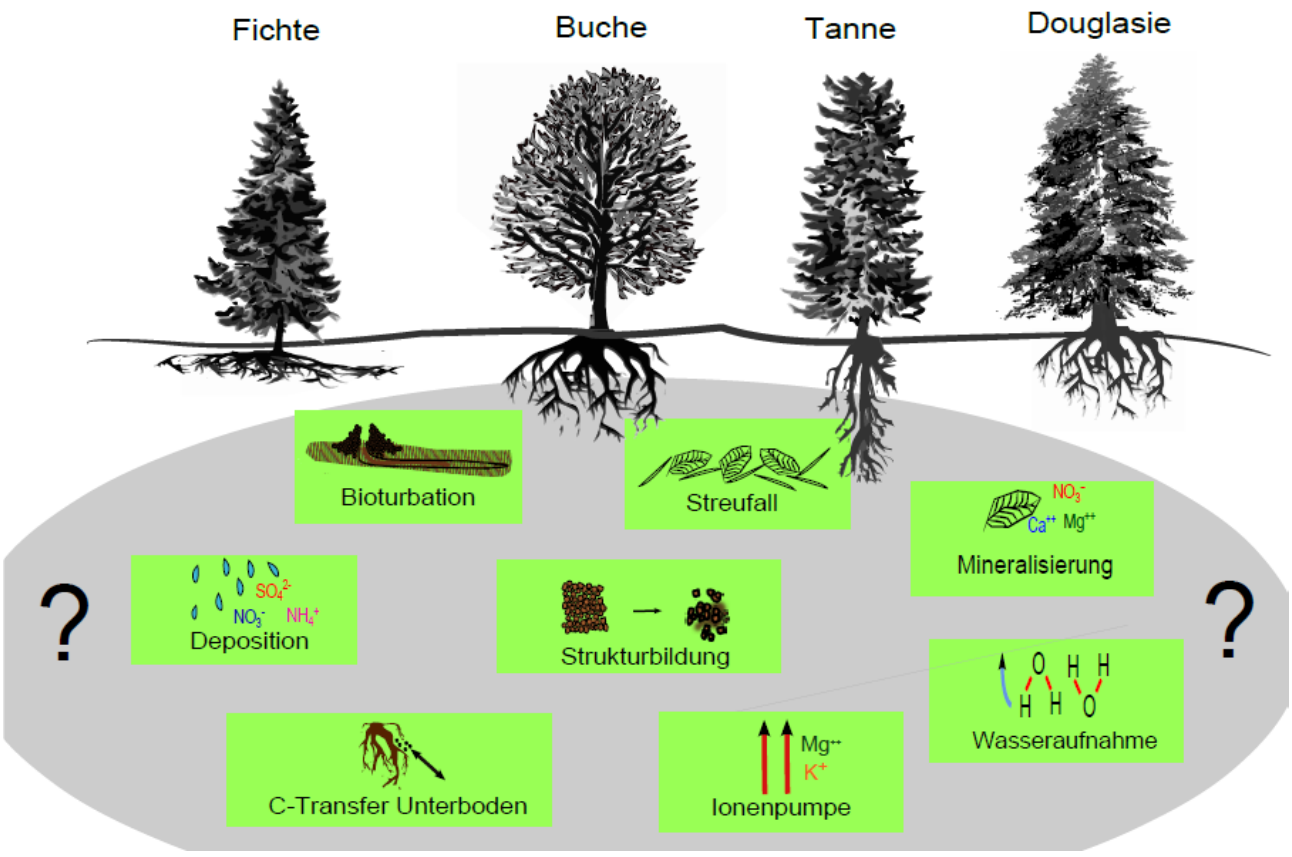


Abbildung 1 - Mögliche Prozesse die den Einfluss der unterschiedlichen Baumarten auf Bodeneigenschaften erklären können

Streu von Fichten selbst an Standorten mit recht guter Nährstoffversorgung der Böden geringer ist als die Zersetzungsgeschwindigkeit von Buchen. Die geringe Bioturbation, die unter Fichte häufig festgestellt wird (Reich *et al.*, 2005), führt zusätzlich zur Ausbildung von oft mächtigen Humusauflagen. Gerade auf Standorten mit ohnehin geringer Säureneutralisationskapazität, kann die Akkumulation von Streu die weitere Versauerung und Podsolierung der Böden begünstigen. Eine Entkopplung der Bestände vom Mineralboden wurde als Folge festgestellt, ebenso wie die Fixierung von Nährstoffen in der nur schwer zersetzbaren Streu. Auf Standorten, die nicht von atmogener N-Deposition betroffen sind, führt dies zu N-Limitierung der Bestände (Högberg *et al.*, 2006). Es wird vermutet, dass ungünstige Bedingungen für Bodentiere und Mikroorganismen die Ursache dafür sind, dass die Vorräte an organischem Kohlenstoff unter Fichte häufig höher sind als auf vergleichbaren Standorten mit Buche (Grüneberg *et al.*, 2014). Selbst für Mischbestände wurde festgestellt, dass mit zunehmendem Fichtenanteil der C-Speicher im Boden zunimmt (Berger *et al.*, 2002).

Auch negative Einflüsse von Fichten auf bodenphysikalische Eigenschaften sind in der Literatur beschrieben. Als wurzelwage Baumart bildet die Fichte vor allem bei ungünstigen Bodeneigenschaften ein sehr flaches Wurzelsystem aus. Dadurch wird die Ausbildung einer plattigen Bodenstruktur gefördert (Rehfuess, 1990). Im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs in Österreich zur Restauration von Waldökosystemen (SFB 008) wurde der Einfluss von Fichte auf Böden im Vergleich zu Laubbäumen untersucht. Es war befürchtet worden, dass der langjährige Fichtenanbau zur Verdichtung der Oberböden beigetragen haben könnte und dadurch die Etablierung der Verjüngung beeinträchtigt werden könnte. Diese Hypothese konnte jedoch widerlegt werden (Berger & Hager, 2000). Übereinstimmend mit früheren Untersuchungen wurde im Oberboden unter Fichte sogar geringere Lagerungsdichte festgestellt als unter Fichte-Buche-Mischbeständen. Die Autoren erklären dies mit der intensiven Durchwurzelung des Oberbodens durch Fichte. Bodenverdichtung in Folge des Fichtenreinanbaus ist wohl eher im Unterboden (ab 30-40 cm Mineralbodentiefe) zu erwarten (Friederich, 1992).

Einfluss der Buche

In einem Großteil der oben zitierten Studien wird der Einfluss der Fichte mit Buchenwäldern als Referenzsystem untersucht. Daher lassen diese Arbeiten oft auch entsprechende Einflüsse der Buche auf Böden erkennen. Viele Arbeiten bestätigen hier mittlerweile die bessere Streuqualität, die höhere biologische Aktivität, geringere Bodenversauerung und bessere Versorgung mit basischen Kationen. Einige Untersuchungen zeigen auch, dass Buchen, durch die tiefere Durchwurzelung der Böden, zum Transport von Nährstoffen aus dem Unterboden in den Oberboden beitragen (Basenpumpe, e.g. Meier und Leuschner, 2013). Eine Arbeit von Prietzel (2004) zum Buchenvoranbau unter Kiefernaltbeständen zeigt ebenfalls eine Zunahme des pH-Wertes und der Basensättigung unter Buche verglichen mit Kiefernbeständen und eine Verbesserung der Humusform. Letzteres wird aber auch mit der Unterdrückung von Vaccinien-Arten unter der Schattbaumart Buche begründet.

Eine Besonderheit hinsichtlich des Einflusses von Buche auf Böden ist die Ausbildung von Streuauflagen mit geringer Luftdurchlässigkeit. (Pilegaard *et al.*, 2006) vermutet, dass dies der Grund für die höhere Emission von N_2O unter Buche verglichen mit Nadelbaumbeständen ist. Untersuchungen zum Einfluss der Buche auf bodenphysikalische Eigenschaften gibt es aber ansonsten nur recht wenige.

Einfluss der Tanne

Tannen zeichnen sich im Vergleich zu anderen, in Deutschland heimischen Nadelbaumarten durch hohe Streuqualität aus ((Uhl *et al.*, 2013), und dort zitierte Literatur). Eine vor kurzem publizierte Arbeit zum Trend der Nährelementversorgung von Waldbeständen auf europäischen Dauerbeobachtungsflächen, bestätigt die Sonderstellung der Tanne hinsichtlich der Nährstoffaufnahme und Zirkulation (Jonard *et al.*, 2015). Während die meisten der untersuchten Baumarten einen negativen Trend verschiedenster Nährelementkonzentrationen aber einen positiven Trend hinsichtlich der Nährelementvorräte (aufgrund erhöhten 1000 Nadel- bzw. 100 Blatt-Gewichtes) aufwiesen, zeigt die Tanne umgekehrt gleichbleibende Nährelementkonzentrationen aber auch keine Zunahme im 1000 Nadelgewicht über die letzten 20 Jahre. Dies deutet darauf hin, dass die Tanne, den aus der Atmosphäre eingetragenen Stickstoff weniger gut nutzen kann, als die anderen Baumarten, dadurch aber auch nicht in Nährstoffungleichgewichte „hineinwächst“. Dies könnte unter den Bedingungen der aktuell immer noch sehr hohen N-Einträgen in Wälder ein großer (Konkurrenz-)Vorteil dieser Baumart sein. Entsprechend engeren Verhältnissen von N zu anderen Nährelementen sollte auch die Ökologie und Dynamik der Humusauflagen beeinflusst werden. Im Gegensatz zu anderen Nadelbaumarten (Fichte oder Douglasie)

zeigen Tannen auf karbonathaltigen Standorten keine Mangelerscheinungen, wie z.B. Eisen- oder Kalium-Chlorosen oder P-Unterversorgung. Eine Arbeit aus Italien liefert Hinweise dafür, dass Tannen sehr gut in der Lage sind auch bei neutralem pH-Wert Nährstoffe zu mobilisieren. Certini *et al.*, (2000) konnten besonders hohe Oxalat-Konzentrationen in Böden unter Tannenbeständen nachweisen. Die Exudation dieser organischen Säure trägt zur Mobilisierung von Nährelementen, wie P oder Fe bei.

Ein großer und in der Literatur gut beschriebener Vorteil der Tanne ist die Fähigkeit auch schwere und wasserstauende Bodenhorizonte gut durchwurzeln zu können (Holzapfel, 1960, Kölling 2004). Allerdings, gibt es bisher wenige Untersuchungen, die den Einfluss der Tanne auf bodenphysikalische Eigenschaften staunasser Böden quantifiziert. Auch der Frage, ob sich damit positive Standortveränderungen ergeben, die auch von anderen Baumarten genutzt werden können, wurde bisher soweit wir wissen noch nicht nachgegangen.

Einfluss der Douglasie

Verschiedene Untersuchungen zeigen die hohe Streuqualität der Douglasie auch auf vergleichsweise ungünstigen Standorten (Wittich, 1961). Daraus leitet man ab, dass die Douglasie zur Verbesserung der Qualität der Humusauflage auf mit Fichte oder Kiefer bestockten Standorten beitragen kann. Dies bestätigt eine Untersuchung von (Prietzel & Bachmann, 2011). Im Vergleich zu benachbarten Fichten- oder Kiefernreinbeständen war die Basensättigung und der pH-Wert der Humusauflage unter Douglasie höher und das C/N Verhältnis auf einigen Standorten enger. Das Vermögen von Bäumen, Nährstoffe aus Mineralen zu mobilisieren steuert maßgeblich deren Nährstoffaufnahme und Wachstum. Mareschal *et al.* (2013) finden Hinweise dafür, dass es diesbezüglich relevante Unterschiede zwischen Vertretern unterschiedlicher Baumarten gibt. Sie finden eine besonders hohe Verwitterung im Boden inkubierter Tonminerale unter Douglasie. Erklärt wird dieses Phänomen mit der hohen Nitrifikation unter Douglasie, die in verschiedenen Studien beschrieben wird (Prietzel & Bachmann, 2011). Die Autoren weisen außerdem auf große bestehende Wissenslücken hinsichtlich baumartenspezifischer Nährstoffmobilisierung aus Böden hin.

Zur Fähigkeit der Douglasie, auf staunassen Böden zu wachsen, gibt es nur wenig Untersuchungen. Von Wilpert (1986) konnte zeigen, dass Douglasien auch auf staunassen Standorten ein tiefreichendes Wurzelsystem ausbilden können, wenn die stauende Schicht sich nicht zu nahe an der Geländeoberfläche befindet. Die Arbeit zeigt die Notwendigkeit, staunasse Standorte hinsichtlich ihrer Douglasien-Eignung entsprechend weiter zu differenzieren. Darauf aufbauende Untersuchungen zum Einfluss der Douglasie auf die Bodenstrukturbildung auf unterschiedlichen Standorten fehlen bisher.

Mischungseffekte

Zusätzlich zum Einfluss einzelner Baumarten sind auch Synergismen zwischen verschiedenen Baumarten oder die viel diskutierten Biodiversitätseffekte zu berücksichtigen (Scherer-Lorenzen *et al.*, 2007; Aponte *et al.*, 2013), auch wenn ein Einfluss der Biodiversität an sich zum Beispiel auf das Bestandeswachstum noch immer umstritten ist (Prescott & Vesterdal, 2013). Mischungseffekte sind für unterschiedlichste Ökosystemkompartimente beschrieben. So zeigt sich zum Beispiel, dass die Zersetzungsgeschwindigkeit von Nadel-Streu in der Mischung mit Buche deutlich schneller ist als im Reinanbau (Prescott, 2000). Häufig stehen bei der Untersuchung zum Einfluss der Artenzahl oder der Mischung verschiedener Baumarten, die Bäume und die Reaktion der Bestände auf die Mischung im Mittelpunkt. Eine aktuelle Arbeit zeigt beispielsweise den positiven Effekt der Einbringung von Laubholz in Fichtenbestände für deren Resistenz gegenüber Trockenereignissen (Neuner et al. 2014). Ähnliches wird auch für Tanne beschrieben (Lebourgeois *et al.*,

2013). Forrester *et al.* (2013) zeigen jedoch eindrücklich die Komplexität dieser Mischungseffekte. Der positive Effekt der Mischung auf das Wachstum von Fichte und Tanne jeweils verglichen mit den entsprechenden Reinbeständen, variierte zwischen -60% - 200%. Die Autoren vermuten, dass das Klima, die Bestandesdichte und verschiedene Standorteigenschaften die Größe und Ausprägung des Mischungseffektes steuern. Der Einfluss der Baumartenmischung auf Bodeneigenschaften, der ja eine wichtige Ursache für die beschriebenen Mischungseffekte sein könnte, ist hingegen bisher wenig untersucht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die existierende Literatur andeutet, dass es einen kontinuierlichen Gradienten zwischen Bäumen, die gute und leicht zersetzbare Streu liefern und Bäumen, die schwer zersetzbare, nährstoffarme Streu liefern, gibt. Es ist aber nicht gerechtfertigt Nadelhölzer grundsätzlich als bodenschädlich und Laubhölzer als bodenverbessernd zu beurteilen. Ein aktuelles Review zum Vergleich des Einflusses von immergrünen Baumarten und laubabwerfenden Baumarten auf den Boden hebt hervor, dass es viele dokumentierte Beobachtungen zum Einfluss von Baumarten auf Böden gibt, dass es aber an Prozesswissen fehlt, um diese Beobachtungen zu generalisieren und damit für das forstliche Management nutzbar zu machen (Augusto *et al.*, 2015). Der große Bedarf an Prozessinformationen zum Baumarteneinfluss auf Böden für forstwirtschaftliche Entscheidungsträger wird auch in einer aktuellen internationalen Publikation betont (Prescott & Vesterdal, 2013). Die Autoren schließen ihre Publikation mit der Aufforderung: „Finally recognition that tree species influences on soils are context-dependent obliges us to refine our research questions – for example, rather than asking ‚do broadleaves stimulate soil fauna?' we should ask 'under which conditions would broadleaves ameliorate soils by stimulating soil fauna and under which conditions do they not?". Die hier geforderte standortabhängige Erklärung der Prozesse aber auch die Quantifizierung des Baumarteneinflusses ist dringend nötig, um die Sicherung der Nadelrohholzversorgung aus dem Wald der Sicherung des Standortpotenzials gegenüberzustellen und daraus nachhaltige Maßnahmen zum Waldmanagement abzuleiten.

Tabelle 1 fasst die Beobachtungen und Annahmen zum Einfluss der von uns berücksichtigten Baumarten auf den Boden zusammen und stellt die von uns aus dem Stand der Forschung abgeleitete Hypothese zur Standortabhängigkeit des Baumarteneinflusses vor.

Tabelle 1 – Zusammenfassung aus der Literatur ableitbarer qualitativer Baumarteneinflüsse auf den Boden und unsere Hypothese zur Standortabhängigkeit und der vergleichenden Einflussstärke der vier berücksichtigten Baumarten

	Saure, frische Standorte	**Saure, staunasse Standorte**	**Karbonat-Standorte**
bodenbedingte Limitierung der Bestände	*Auswaschung basischer Kationen*	*Verflachung des Wurzelsystems; schlechte P-Verfügbarkeit*	*Fe-Mangel, K-Mangel, Flachgründigkeit*
Hypothese: Bodenverbessernde Prozesse, induziert durch Bäume	Basenpumpe aus Unterboden Anlieferung von Streu mit höherer Qualität	Verdichteter Unterboden wird besser durchwurzelt	Mobilisierung von Fe und K durch Wurzelexudate
Hypothese: Baumartenspezifisches Potenzial zur Bodenverbesserung	**Ta> Dgl=Bu > Fi** Bu: Problem anoxische Bedingungen in Auflage Dgl: hohe Nitrifikation wirkt versauernd	**Ta > Bu > Dgl > Fi** Vorteil Ta besonders bei mittleren – geringen Niederschlagsmengen erwartet, erreicht Stauhorizonte	**Ta=Bu > Dgl=Fi** Mangelchlorosen in der Literatur für Fi und Dgl beschrieben
Folgen für die Bäume	•Mehr basische Kationen im Oberboden •Anstieg des pH-Wertes in Auflage und Oberboden •Mehr Humus im mineral. Oberboden •Bessere Bodenstruktur •Bessere Versorgung mit basischen Kationen (K, Mg, Ca) •Bessere Durchwurzelung des Mineralbodens	•Höhere Porosität; bessere Sauerstoffversorgung •Strukturverbesserung im Oberboden und in der Humusauflage •Höhere P-Gehalte im Oberboden, bessere P-Verfügbarkeit •Bessere Versorgung mit Phosphor •Bessere Durchwurzelung, + besonders des Unterbodens	•Entkarbonatisierung des Oberbodens •Höhere Gehalte an verfügbarem Fe und K •Destabilisierung des Bodengefüges •Anstieg des Humusgehaltes •Bessere Versorgung mit K, Fe und P

,

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Unsere Projektarbeit wurde bereichert durch das Zusammenarbeiten mit folgenden Kolleginnen und Kollegen sowie deren Institutionen:

Baden-Württemberg	Bayern
Marijan Gogic, Hans Steinhauser *Landratsamt Ravensburg*	**Thomas Christen** *Bayerischen Staatsforsten*
Karin Baur *Forstrevier Königsbronn*	**Prof. Dr. Carsten Lorz, Tilman Zepf** *Hochschule Weihenstephan-Triesdorf*
Helmut Hohnheiser, Reinhold Else *Forst-Außenstelle Ellwangen*	**Winfried Pfahler, Martin Hertel** *Forstbetrieb Fichtelberg*
Dr. Tobias Kühn *Forstamt der Stadt Villingen-Schwenningen*	**Paul Höglmüller, Franz Obermayer** *Forstbetrieb Ruhpolding*
Herr Hayn, Herr Winterhalder, Herr Kummer *Forstbezirk Kirchzarten*	
Hans Dr. Untheim *Landratsamt Heidenheim*	

Zusätzlich war **Dr. Martin Metschies** vom *Chemischen und Veterinäruntersuchungsamt Feiburg (CVUA)* daran beteiligt die Messung von Radiocaesium an der Professur für Bodenökologie zu ermöglichen und die Methode zu etablieren.

Während des Projektes wurden 14 Bachelor- und Masterarbeiten durchgeführt. Ein Teil der Arbeit ist außerdem die Basis zur Doktorarbeit von Gilles Kayser, der diese derzeit anfertigt.

II. Ergebnisse

Methodischer Ansatz

Probenahme

Für die Untersuchungen und zur Prüfung der in *Tabelle 1* dargestellten Hypothesen wurden die Proben in ehemals reinen Fichtenbeständen genommen, die seit mindestens 20-30 Jahren im Rahmen von Waldumbauprogrammen mit Buche, Tanne oder Douglasie gemischt wurden. Diese Flächen wurden mit solchen Flächen verglichen, auf denen sich nur Fichten Naturverjüngung unter dem Fichtenschirm befindet. Buche und Tanne wurde meist mittels Voranbau in die Fichtenbestände eingebracht. Douglasie wurde in unterschiedlich großen Lücken (Gruppen – Trupps) in die Fichtenbestände eingebracht. Dies macht den unmittelbaren Vergleich für diese Baumart schwierig, weil Unterschiede im Boden dann ggf. auch auf die Bestandeslücken zurückzuführen sind. Auf zwei Standorten war es dennoch möglich. Douglasie direkt in den Baumartenvergleich einzubeziehen. Die verschiedenen Baumarten wurden oft auf kleinstem Raum nebeneinander eingebracht, teils strikt getrennt, teils mit einem Überschneidungsbereich, an dem dann unter Fichte, zwei oder drei verschiedene Baumarten gleichzeitig zu finden sind. Wir haben sehr von diesem Konzept des Waldumbaus profitiert, da es uns erlaubt hat, benachbarte Flächen mit unterschiedlichen Baumarten ähnlichen Alters zu beproben, die vor der Einbringung dieser Baumarten annähernd gleiche Bodeneigenschaften aufwiesen (siehe *Abbildung 2*). Auf diese Weise konnten wir einen mittelfristigen Baumarteneffekt identifizieren und quantifizieren.

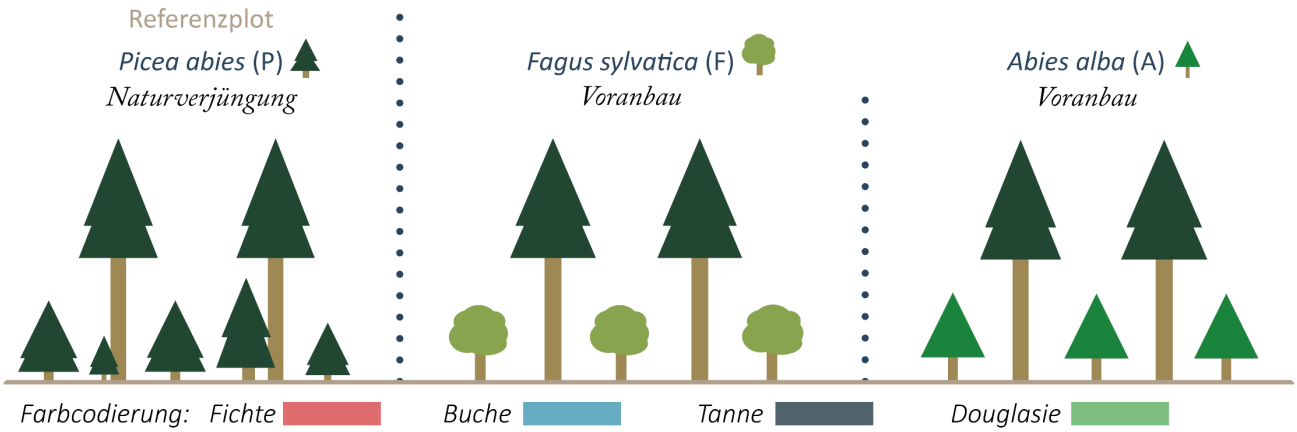


Abbildung 2 Probenahmedesign zur Analyse des Einflusses der gezeigten Baumarten auf den Boden. Verjüngung: 20-30 Jahre; Altbestand > 90 Jahre. Die Farbcodierung zeigt die Farbe der jeweiligen Baumart in den folgenden Abbildungen.

Unsere Hypothese war, dass der Baumarteneinfluss vom Ausgangsgestein und dem Wasserhaushalt der Standorte gesteuert wird, daher wurden diese vier „Standorttypen“ gewählt. Insgesamt wurden 13 Standorte in Süddeutschland(Locker- und Sedimentgestein sauer, frisch (Abkürzung Sediment); Sedimentgestein sauer, wechselfeucht/staunass (Abkürzung Sediment, staunass); Carbonatgestein, frisch (Abkürzung Carbonat); Metamorph und Magmatisch sauer, frisch (Abkürzung Magmat)) untersucht (siehe *Abbildung 3*), auf denen mindestens drei verschiedene Verjüngungs-Baumarten vertreten sind (siehe *Abbildung 2*, *Tabelle 2*).

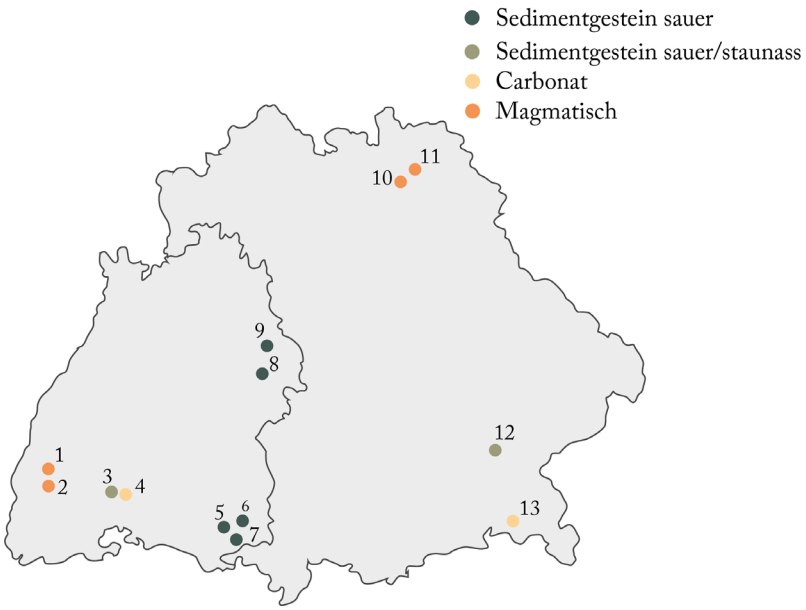


Abbildung 3 – Karte der beprobten Standorte in Süddeutschland, farblich klassifiziert nach dem Standorttyp: Locker- und Sedimentgestein sauer, Sedimentgestein staunass, Carbonatgestein, frisch, Magmatisch, frisch. 1: Schwarzwald, 2 Giersberg, 3 Villingen, 4 Schwenningen, 5-7 Ravensburg, 8 Königsbronn, 9 Ellwangen, 10 Moosloh, 11 Zinnschützweiher, 12 Freising, 13 Ruhpoling

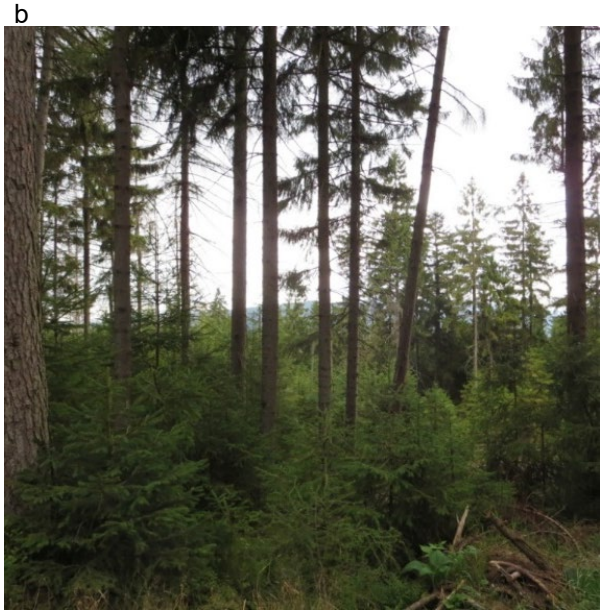
Beprobung und durchgeführte Analysen

An allen Standorten wurden die Humusauflage (L, Of, Oh) und den Mineralboden (acht Bodentiefen) mithilfe eines modifizierten Murach'schen Wurzelbohrers beprobt (siehe *Abbildung 8*). An fünf Punkten pro Kleinstandort wurden jeweils im Zwischenstammbereich Proben entnommen. Die entnommenen Bohrkerne wurden mittels Halbschalen fixiert, transportiert und im Labor die jeweiligen Horizonte bzw. Tiefen unterteilt (siehe *Abbildung 9*). Insgesamt wurden mehr als 2000 Bodenproben (einschließlich Auflagen), Nadel- und Blattproben gesammelt. An jeder der fünf Feldwiederholungen wurden nachfolgend der pH-Wert, der Gehalt an austauschbaren Kationen, der Gehalt an organischem Kohlenstoff, Stickstoff, das C/N-Verhältnis sowie die Konzentration an Zitronensäure-extrahierbarem PO_4^{3-} und P bestimmt. An den Karbonatstandorten wurde zusätzlich der Karbonatgehalt bestimmt. Durch die volumenbezogene Beprobung war es möglich, für jede Tiefe die Lagerungsdichte zu bestimmen. Die Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung sowie eine Dichtefraktionierung der organischen Bodensubstanz wurden auf ausgewählten Standorten durchgeführt. Diese wurden basierend auf der erwarteten Humusdynamik im Boden ausgewählt.

Standortbilder

a

b



c

Abbildung 4- Beispiel für die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Verjüngungssituation, hier Forstbetrieb Fichtelberg, Abteilung Bänkerswiese. Auf Kleinstandorten mit Tannen- (a), Fichten- (b) oder Buchenverjüngung (c) wurden an fünf, mindestens 5 m voneinander entfernten Punkten Bodenproben entnommen.

Abbildung 5- Beispiel für die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Verjüngungssituation, hier Forstbetrieb Fichtelberg, Abteilung Moosloh. Auf Kleinstandorten mit Fichten- (links), Tannen (Mitte) oder Buchenverjüngung (rechts) wurden an fünf, mindestens 5 m voneinander entfernten Punkten Bodenproben entnommen.

Abbildung 6 - Beispiel für die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Verjüngungssituation, hier Forstbetrieb Ruhpolding, hier Kleinstandort mit Tannenverjüngung.

Abbildung 7 - Beispiel für die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Verjüngungssituation, hier Forstbetrieb Freising, hier Kleinstandort mit Buchenverjüngung.

Tabelle 2 – Grundcharakteristika der Untersuchungsstandorte.

Standortname	***Bundesland***	***Analysierte Baumarten***	***Standorttyp***	***Grundgestein***	***Bodentyp***	***Durchschnitts-temperatur [°C]***	***Niederschlag [mm]***	***Tongehalt [%]***	***Höhe über NN [m]***
Ravensburg	BW	Fichte, Buche, Tanne	Sediment	Moränenlehm	Braunerde	8.8	1004	20	457
Ravensburg_2	BW	Fichte, Buche, Tanne	Sediment	Moränenlehm	Braunerde	8.8	1004	21	457
Ravensburg_3	BW	Fichte, Buche, Tanne	Sediment	Moränenlehm	Braunerde	8.8	1004	19	457
Freising	BY	Fichte, Buche, Tanne, Douglasie	Sediment, staunass	Lösslehm	Pseudogley	7.9	833	20	460
Ellwangen	BW	Fichte, Buche, Tanne	Sediment	Buntsandstein	Braunerde	7.7	837	5	443
Königsbronn	BW	Fichte, Buche, Tanne, Douglasie	Sediment	Lösslehmhaltige Fließerde über Muschelkalk	Braunerde	6.8	879	27	638
Villingen	BW	Fichte, Buche, Tanne	Sediment, staunass	Buntsandstein	Braunerde	7.6	860	34	800
Schwenningen	BW	Fichte, Buche, Tanne	Carbonat	Muschelkalk	Rendzina	7.6	690	35	750
Giersberg	BW	Fichte, Buche, Tanne	Magmat.	Paragneis	Braunerde	9.6	942	22	485
Moslooh	BY	Fichte, Buche, Tanne	Magmat.	Granit	Braunerde	6.7	757	24	720
Zinnschützweiher	BY	Fichte, Buche, Tanne	Magmat.	Granit	Podsolierte Braunerde	7.0	708	18	663
Thurner	BW	Fichte, Buche, Tanne	Magmat.	Paragneis-Metatexit	Podsolierte Braunerde	6.7	1600		1097
Ruhpolding	BY	Fichte, Buche, Tanne	Carbonat	Lokalmoräne (carbonatisch)	Rendzina	6.7	1992	21	907

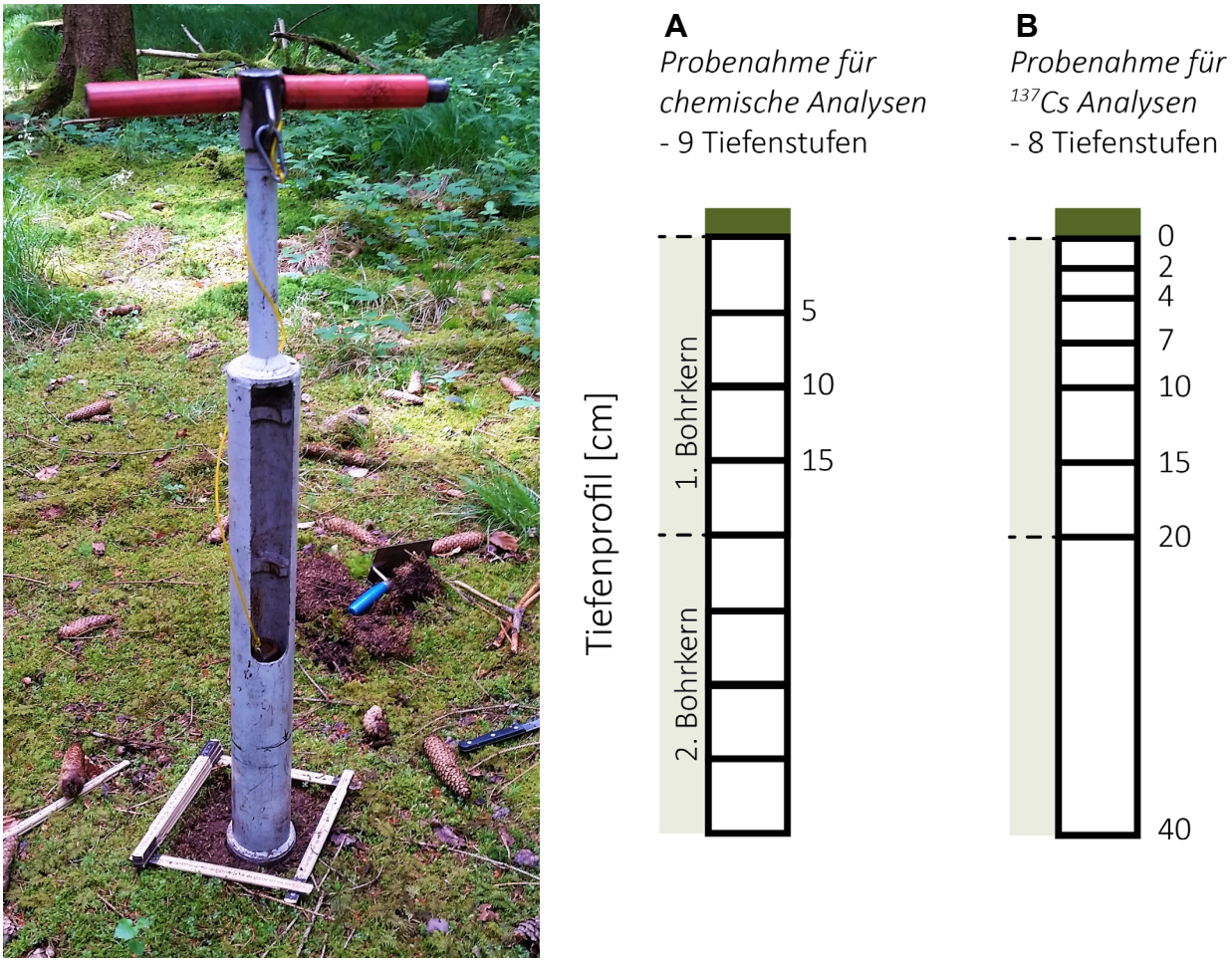


Abbildung 8 – links: Probenahme mit Hilfe vom Murach'scher Wurzelbohrer der ersten Tiefe bis 20 cm. rechts: Tiefenstufen der Probenahme, Probenahme gemäß Tiefenprofil A wurde auf allen Standorten durchgeführt und ist die Basis für alle chemischen Analysen, Tiefenprofil B ist die Grundlage für die Analyse der Tiefenverteilung von Radiocaesium um die Bioturbation zu quantifizieren.

Es wurden zusätzliche Bohrkerne genommen um höhere aufgelöste Tiefenprofile (Tiefenprofil B) für die Quantifizierung der Bioturbation zu erstellen. Dafür wurde die Tiefenverteilung von Radiocaesium (^{137}Cs) analysiert (siehe *Kapitel 1.2.7*).

Tabelle 3 - Überblick über die gewonnenen Bodenproben und an den jeweiligen Proben analysierten Bodeneigenschaften.

Tiefe	Analysen
Auflage unterteilt nach L, Of, Oh Horizont	pH, Kationenaustauschkapazität, organischer Kohlenstoff und Stickstoff, Zitrat-extrahierbarer PO_4^{3-} und P, Vorrat
Tiefenprofil A	pH, Kationenaustauschkapazität, organischer Kohlenstoff und Stickstoff, Zitrat-extrahierbarer PO_4^{3-} und P, Lagerungsdichte, Vorrat
5-10 cm	Dichtefraktionierung, Aggregatgrößenverteilung mittels digitaler dynamischer Bildanalyse
20-25 cm	Dichtefraktionierung
Tiefenprofil B	Bioturbation mittels Gammaspektrometrie

Zusätzlich zu den Bodenproben wurden an fünf Standorten Blatt/Nadelproben der Verjüngung Ende September (Buche) bzw. im November (Nadelbäume) entnommen. An den Proben wurde die Konzentration der Hauptnährelementen und die Eisenkonzentration bestimmt.

Abbildung 9 – Durchführung der Probenahme A: Zeigt den modifizierten Murach'schen Wurzelbohrer zur Entnahme ungestörter, volumenbezogener Bodenproben bis 40 cm Bodentiefe. B: Lagerung des Bohrkerns in Halbschalen um einen sicheren Transport zu ermöglichen. C & D: Unterteilung der Bohrkerne, die im gestörtem Zustand weiteranalysiert wurden, in die jeweiligen Tiefenstufen bevor sie luftgetrocknet (35 °C) und gesiebt (< 2 mm) werden.

Quantifizierung der Bioturbation

Die Bioturbation, die Durchmischung des Bodens insbesondere durch Regenwürmer, aber auch durch Kleinsäuger wie Maulwürfe, ist sowohl im Hinblick auf die physikalischen Bodenfunktionen als auch auf die Nährstoffversorgung und Kohlenstoffspeicherung in unbearbeiteten Böden von zentraler Bedeutung. Neubildung von Aggregaten, Schaffung von Makroporosität und damit die Verbesserung der Bodenbelüftung erlaubt vielfach erst die tiefe Durchdringung von Böden mit Wurzeln. Nach dem Wasserfluss ist die Bioturbation der wichtigste zum Stofftransport beitragende Prozess in unbearbeiteten Böden. Eine Hypothese des Projektes war, dass die Bioturbation mit der Qualität der Streu zunimmt und dadurch auch die Fruchtbarkeit der Böden. Die Quantifizierung der Bioturbation erfolgte durch die Erfassung der oberflächennahen Verteilung von radioaktivem ^{137}Cs aus dem Reaktorunfall von Tschernobyl 1983 (siehe Tiefenprofil B, *Abbildung 8*). Dies entspricht der Zeit, als die von uns beprobten Voranbauten entstanden sind. Die Methode beruht darauf, dass Caesium im Boden sehr immobil ist und eine Verlagerung, vor allem bei höheren Tongehalten, überwiegend einer partikulären Verlagerung zuzuordnen ist. In der Erosionsforschung ist die Methode der Umverteilung von Radiocaesium schon länger etabliert (vgl. Mabit et al. 2013). Neuere Arbeiten zeigen jedoch auch, dass die Quantifizierung vertikaler Radiocaesium Profile auch die Abschätzung *der summarischen längerfristigen Bioturbationswirkung erlaubt (Tyler et al. 2001, Jarvis et al. 2010).*

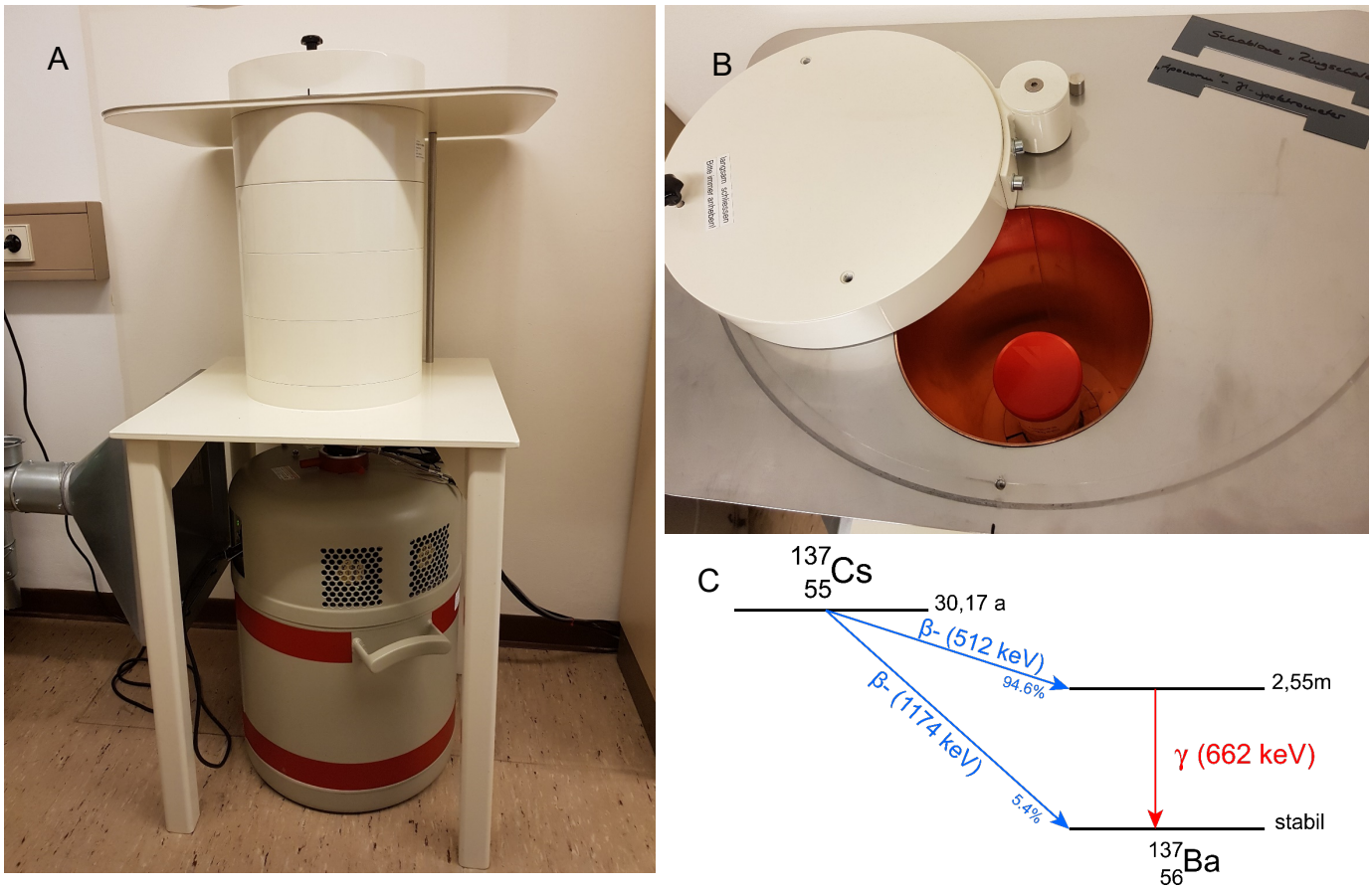


Abbildung 10 – A: Gammaspektrometer, zu sehen ist das Bleischild, um den HPGe-Sensor vor äußerlicher Strahlung zu schützen und eine Probe welche in einem kalibrierten Gefäß (B) auf dem Sensor zur Analyse steht. C: Zerfallsschema von ^{137}Cs. Das Radiocaesium zerfällt dabei in ein instabiles Barium-Isotop welches eine sehr kurze Halbwertszeit hat. Die Menge dieses instabilen Isotops ist damit linear korreliert zur Menge des zerfallenen Caesiums und ist das eigentliche Isotop, welches Gammastrahlung emittiert und gemessen werden kann.

Die Messung wurde an einem HPGe („High Purity Germanium“) Gammaspektrometer (Mirion Technologies (Canberra) GmbH), welches vom Chemischen und Veterinäruntersuchungsamt (CVUA) Freiburg bereitgestellt wurde. Der Halbleiter Sensor wird dabei konstant von flüssigem Stickstoff (LN_2) auf -196 °C gekühlt und von

äußerlicher Strahlung durch ein Bleischild (ca. 500 kg) geschützt. Während der Messung erzeugt die ionisierende Strahlung Elektron-Loch-Paare, in unserem Fall durch den Zerfall von Barium (Zerfallsprodukt von ^{137}Cs) wodurch Elektronen aus dem Metall wandern. Diese Stromimpulse hängen von der Energie der Gammastrahlung ab, werden verstärkt und können somit ausgewertet werden (siehe *Abbildung 10C*).

Jedes der Messgefäße muss als Geometrie für die Auswertung der Probe hinterlegt sein, da das Füllvolumen sowie die Form und Position in Relation zum HPGe-Sensor einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Je nach Caesiumgehalten wurden die Proben zwischen 30 Minuten und bis zu 24 Stunden gemessen. Nach Etablierung der Methode wurden insgesamt ca. 850 Proben von fünf Standorten (Tiefenprofilmuster B, *Abbildung 8*) gemessen.

Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung und Stabilität mittels dynamischer Bildanalyse

Bodenaggregierung ist die Organisation von Primärpartikeln zu Aggregaten, in denen die Kräfte zwischen den Partikeln höher sind als zu denen in der Umgebung (Martin et al., 1955). Verschiedene Bodeneigenschaften beeinflussen die Bildung von Bodenaggregaten. Diese Eigenschaften sind z.B. der Einfluss von anorganischen Bindungsmitteln (Ca^{2+} und Mg^{2+}, (Jastrow & Miller, 1997)), Meso- und Microfauna und der Pflanzen (Wurzeln, Mykhoriza und Schleimstoffe) (Six *et al.*, 2004). Zusätzlich beeinflussen Trocken-Nass sowie Frost-Tau Wechsel die Aggregatbildung (Oades, 1993; Lupwayi *et al.*, 2001; Bronick & Lal, 2005). Diese komplexen Interaktionen von Aggregierungsfaktoren und Prozessen definieren die Bodenstruktur und deren Eigenschaften (Bronick & Lal, 2005).

Aufgrund der hohen ökologischen Bedeutung der Aggregate wurden Analysemethoden zur Charakterisierung entwickelt. Diese basieren jedoch oft nur auf sehr groben Siebanalysen, mit nur wenigen Größenklassen (Bavel, 1950). Die geringe Auflösung ist jedoch der Grund für geringe Sensitivität der analysierten Charakteristika. Um diesen Mangel zu beheben wurde während des Projektes eine Methode entwickelt hochaufgelöste Aggregatgrößenverteilung mittels digitaler dynamischer Bildanalyse zu erstellen. Die Anwendung der digitalen dynamischen Bildanalyse wurde zum ersten Mal von uns in der Bodenkunde angewendet und veröffentlicht: *Kayser G, Graf- Rosenfellner M, Schack-Kirchner H, Lang F. Dynamic imaging provides novel insight into the shape and stability of soil aggregates. Eur J Soil Sci. 2019;70:454–465. https://doi.org/10.1111/ejss.12796*. Verwendet wurde dazu das Gerät QICPIC in Kombination mit LIXELL und SUCELL (Sympatec GmbH, Clausthal Zellerfeld). Bei der Analyse werden mindestens 10^6 Partikel/Aggregate analysiert (siehe z.B. Ergebnisse *Abbildung 25*). Die Proben werden in Suspension über die Pumpe an der Optik vorbeigepumpt während 450 Bilder/Sekunde aufgenommen werden. Dadurch werden quasi statische Bilder von den Partikeln möglich wodurch jedes einzeln in die Auswertung mit eingeht. Die dynamische Bildanalyse ermöglicht durch die direkte Auswertung von einzelnen Partikeln anstelle von Gewichtsverteilungen, wie beim „mean weight diameter“ (MWD), auch die Analyse von Aggregatformen (siehe *Abbildung 11B für Beispiele von Partikelformen*). Dadurch wird die Analyse von hoch aufgelösten Aggregatgrößenverteilungen und Zerfallsmustern möglich. Derartige Messungen wurden zum ersten Mal im Laufe dieses Projektes durchgeführt.

Jede Probe wurde dafür vorsichtig in eine Suspension überführt um „slaking“ (Aufbrechen von Aggregaten z.B. durch eigenschlossene Luft) zu verhindern. Die Messbereiche des Messgeräts sind durch die verschiedenen Optiken vordefiniert und die Bodenprobe muss für den jeweiligen Bereich vorfraktioniert

werden. Wir haben uns bei der Methodenentwicklung dafür entschieden zwei Fraktionen zu genieren, 0 – 63 µm und 63 – 2000 µm, um den optimalen Bereich von verschiedenen Optiken auszunutzen.

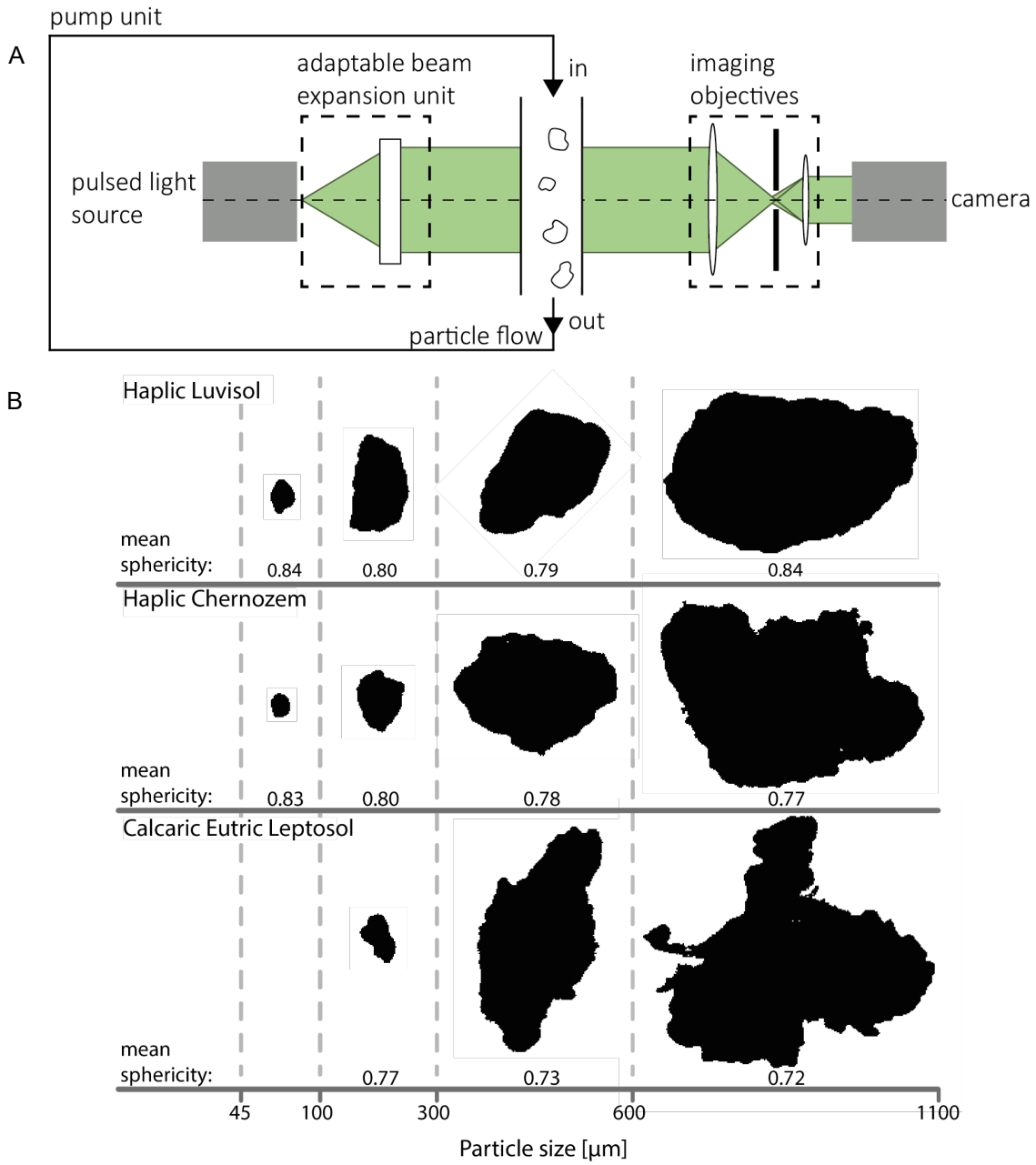


Abbildung 11 – A: Schematische Darstellung des digitalen dynamischen Bildanalysegerät QICPIC (Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland). B: Beispiele von einzelnen Partikeln welche während der Messung analysiert wurden. Dargestellt sind Aggregate verschieder Größe und Rundheit (Sphärizität).

Dichtefraktionierung

Ein Ansatz organische Bodensubstanz im Boden zu differenzieren ist die Klassifizierung von Fraktionen unterschiedlicher Stabilität und Art der Speicherung. Bei der Dichtefraktionierung wird die im Boden vorliegende organische Bodensubstanz in drei verschiedene Fraktionen unterteilt. Dabei unterscheidet man zwischen **frei** im Boden vorliegende organische Substanz (engl. free light fraction, fLF), **okkludierter** (engl. occluded light fraction, oLF) und **mineralisch gebundener** (engl. heavy fraction, HF). Die organische Bodensubstanz wird dabei basierend auf ihrer Dichte (< 1,6 g/cm³) von der mineralisch (> 2 g/cm³) gebundenen getrennt (siehe *Abbildung 12* für die schematische Zusammenfassung). Um die Fraktionen zu

trennen wird eine Natriumpolywolframat Lösung (SPT, 3 $Na_2WO_4 \cdot 9\ WO_3 \cdot H_2O$) auf eine Dichte von 1,6 g/cm³ eingestellt.

Für die Dichtefraktionierung wurden 25 g luftgetrockneter Boden in 250 ml Probenflaschen eingewogen und 125 ml SPT-Lösung versetzt. Damit sich die schwere von der leichten Fraktion trennt, wurde die Lösung bei 3500 U/min für 30 min zentrifugiert. Die überstehende SPT-Lösung mit der enthaltenen fLF wurde abgesaugt und anschließend über C-freie Glasfaserfilter (Partikelrückhalt > 1,5 µm) filtriert. Dieser Schritt wurde nach der Zerstörung der Aggregate (Ultraschall, 400 J/cm³) und Freisetzung der organischen Substanz nochmal wiederholt um die oLF von der HF zu trennen.

Die Proben werden anschließend möglichst komplett vom Filter gespült, eingefroren und anschließend gefriergetrocknet. Nach der Gefriertrocknung werden alle Fraktionen (fLF, oLF, HF) gewogen und mit einer Kugelschwingmühle zermahlen. Am Elementaranalysator wird von den einzelnen Fraktionen nochmal der organische Kohlenstoffgehalt bestimmt um die finalen Gehalte der einzelnen Fraktionen zu berechnen. Das ausgewertete Ergebnis beschreibt nun die Gehalte (mg/kg) von drei verschiedenen organischen Kohlenstofffraktionen (fLF, oLF, HF).

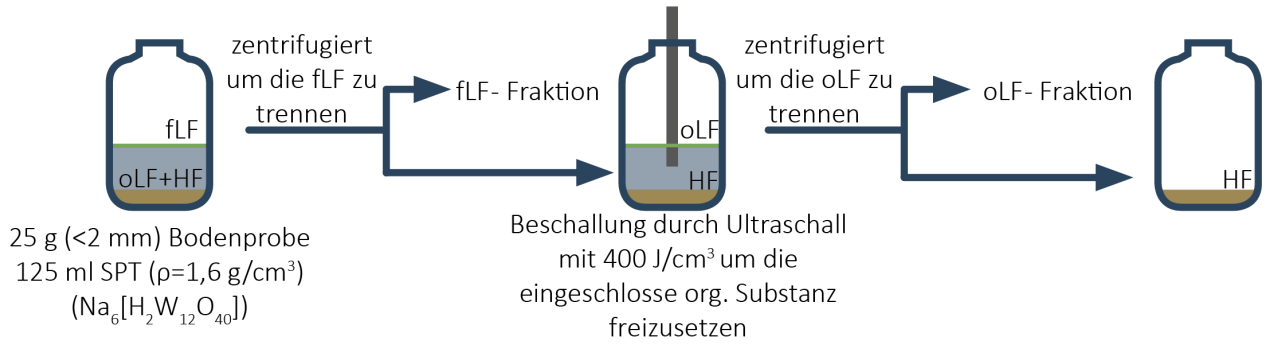


*Abbildung 12 – Schematische Darstellung der Dichtefraktionierung in drei verschiedene Fraktionen (fLF: freie leichte Fraktion; oLF: okkludierte leichte Fraktion, HF: „**h**eavy"/schwere Fraktion).*

1. Erzielte Ergebnisse

Im Projekt dient die Fichtennaturverjüngungsfläche als Referenzplot. Um die Veränderung nach Einbringen der jeweiligen Baumart einfacher darzustellen, werden im Folgenden unter anderem die Differenzen der jeweiligen Ergebnisse dargestellt. Diese sind immer auf den Referenzplot der Fichte bezogen (siehe Beispiel *Abbildung 13*).

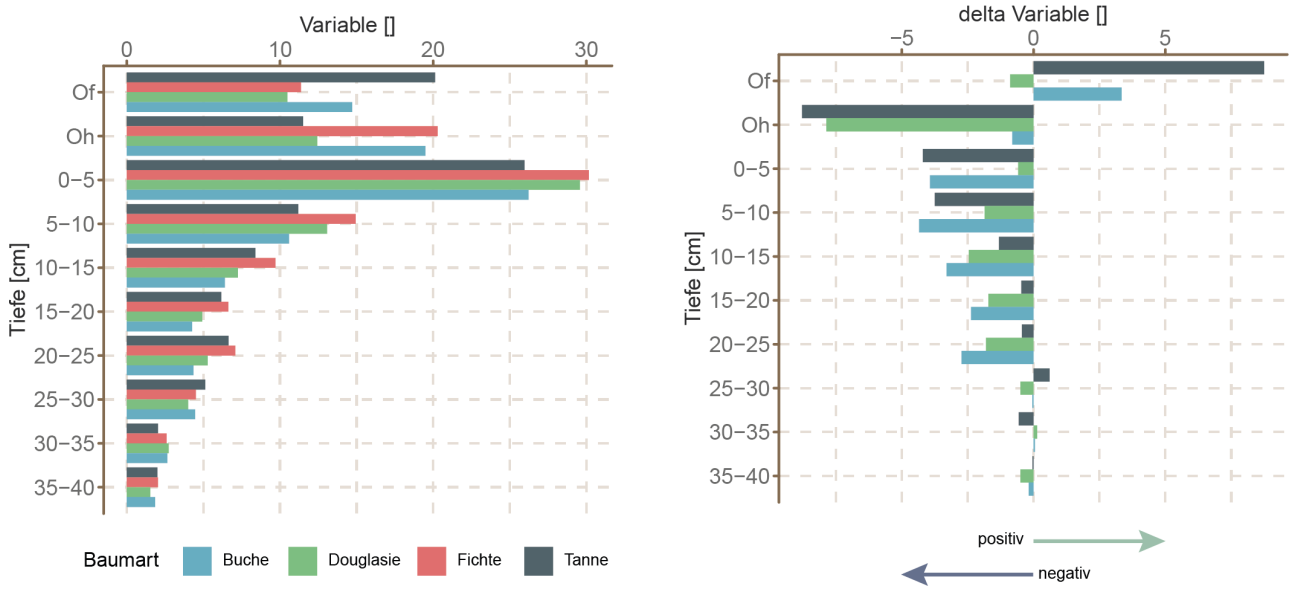


Abbildung 13 – Konzept der nachfolgenden Ergebnisdarstellung. Die Fichte dient hier als Referenz und wird von den Ergebnissen der anderen Baumarten abgezogen. Positive Werte bedeuten somit höhere Gehalte im Vergleich zur Fichte und negative Werte niedrigere Gehalte.

1.1 Fallstudie – Freising

Im Folgenden werden alle Analysen und Methoden am Standort *Freising* im Detail dargestellt. Im weiteren Ergebnisteil werden dann Ergebnisse in stärker aggregierter Form, häufig strukturiert nach den Standorttypen, dargestellt.

1.1.1 pH-Wert

In *Abbildung 14* ist der mittlere pH-Wert der Bodenproben (n=5 pro Baumart) vom Standort Freising, einem staunassen Standort auf Lösslehm im Tertiären Hügelland dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass vor allem Buche und Douglasie den pH-Wert im Of-Horizont erhöhen. Im Oh-Horizont und in 0-5 cm Tiefe finden wir keine signifikanten Unterschiede zwischen den Baumarten. Erst ab der Tiefe 5-10 cm sehen wir wieder eine positive Tendenz aller drei Baumarten bis in eine Tiefe von 20-25 cm. Die Erhöhung erreicht bis zu einer viertel pH-Einheit bei der Buche in der Tiefe 20-25 cm. In tieferen Schichten dominieren Douglasie und Tanne den Einfluss auf die Azidität des Bodens und erhöhen den pH-Wert um 0,5 pH-Einheiten während wir bei der Buche keine Unterschiede mehr zur Fichte feststellen können.

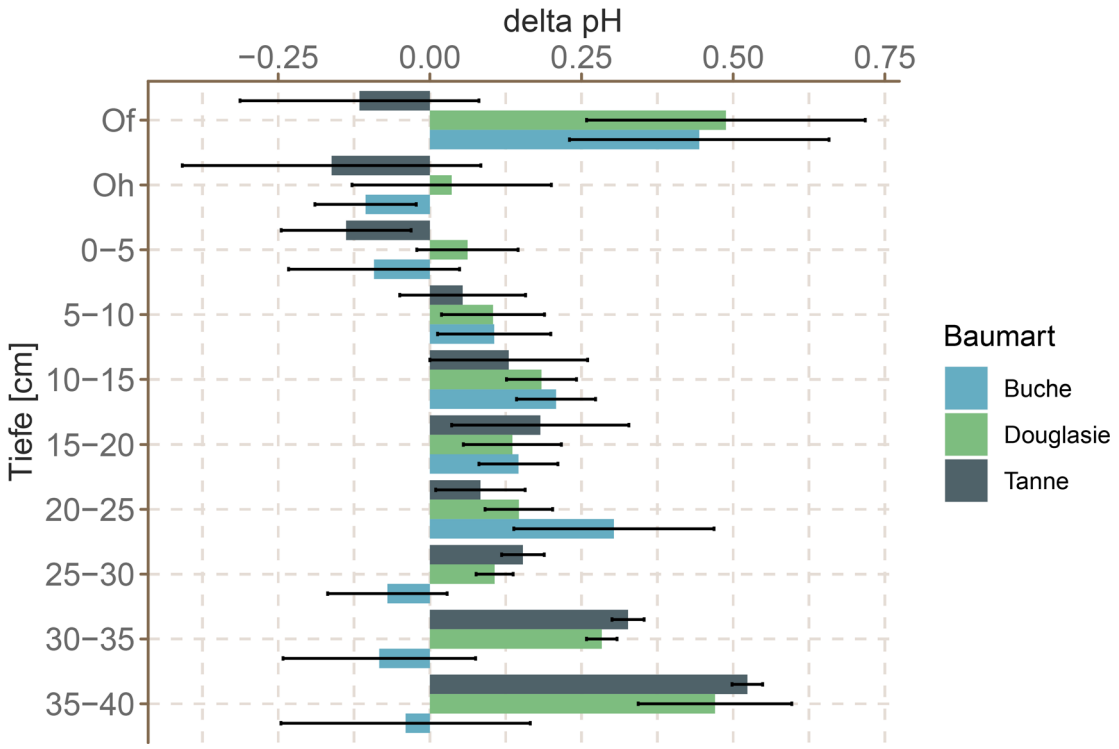


Abbildung 14 – Unterschiede der pH-Werte der Bodenproben unterschiedlicher Tiefenstufen von Buche, Douglasie und Tanne im Vergleich zur Fichte am Standort Freising. Von den mittleren pH-Werten der Kleinstandorte mit der jeweiligen Baumart in der Verjüngung wurde jeweils der mittlere pH-Wert der Kleinstandorte mit Fichtenverjüngung abgezogen.

1.1.2 Organischer Kohlenstoff und Stickstoff

In den folgenden *Abbildungen 15 und 16* sind die Ergebnisse der Kohlenstoff- und Stickstoffanalysen dargestellt. Die Tanne zeigt in den zwei Auflage-Horizonten eine signifikante Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration (um ca. 10%) während in tieferen Schichten keine Unterschiede zur Fichte mehr festzustellen ist (*Abbildung 15).* Die Buche zeigt ebenfalls eine leichte Erhöhung der C_{org}-Konzentration in der Auflage, jedoch ist diese sehr heterogen. In der Tiefe 0-5 cm sehen wir eine Abnahme der C_{org}-Konzentration. Die Douglasie zeigt keine Unterschiede in der Auflage zur Fichte und eine negative Tendenz der Kohlenstoffkonzentration über das ganze mineralische Profil.

Die Kohlenstoffvorräte zeigen, dass wir einen Verlust von organischem Kohlenstoff nach dem Anbau von Tanne, Buche und Douglasie haben. Unter Douglasie und Tanne gehen zwischen 10 und 15 t/ha über das Profil (bis in 40 cm Tiefe) verglichen mit reiner Fichte verloren. Nur im Of-Horizont können wir einen großen Anstieg für die Tanne (knapp 7 t/ha) verzeichnen und einen leichten Anstieg für die Buche (knapp 3 t/ha). Im Mineralboden finden wir ebenfalls unter Buche eine Abnahme des Kohlenstoffvorrats, aber in deutlich geringerem Maße. Der Stickstoffvorrat zeigt bis in eine Tiefe von 20 cm einen fast identischen Verlauf wie der Kohlenstoffvorrat, in größerer Tiefe ist eine Erhöhung der Stickstoffvorräte zu erkennen (*Abbildung 13*). Dies könnte durch den erhöhten Abbau der organischen Substanz im Oberboden und Auflage (z.B. Mineralisierung), durch Verlagerung (Bioturbation, gelöster organischer Kohlenstoff) oder durch Input von Wurzelstreu erklärt werden.

Das C/N Verhältnis in *Abbildung 18* zeigt eine Abnahme für die Douglasie über das ganze Profil. Vor allen ist sie die einzige Baumart welches ein engeres C/N-Verhältnis in der Auflage aufzeigt was auf eine besser abbaubare Streu hindeutet. Buche und Tanne zeigen keine eindeutigen Tendenzen. Erst in tiefer gelegenen Bodenschichten sehen wir eine starke Abnahme des C/N-Verhältnisses, vor allem unter Buche, was hier

vielleicht durch bereits weiter fortgeschrittenen Abbau der organischen Bodensubstanz erklärt werden könnte. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung des höheren Anteils an mineralassoziierter organischer Substanz unter Buche verglichen mit Fichte (siehe unten, *Abbildung 23*).

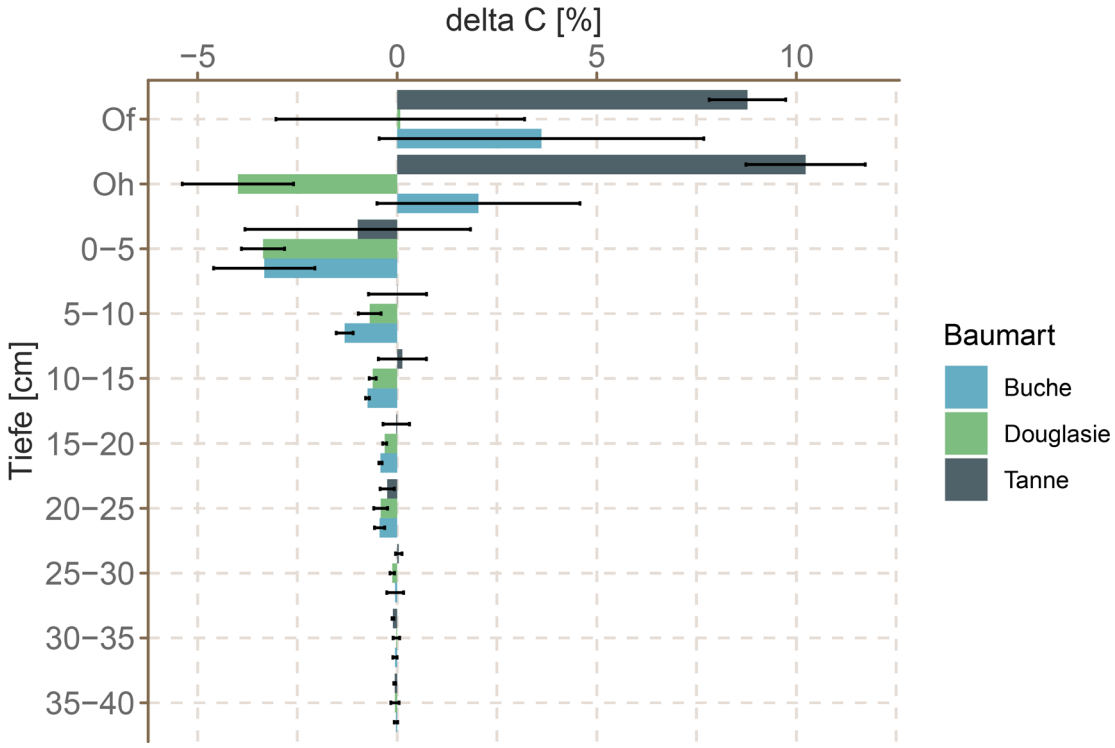


Abbildung 16 – Unterschiede der Kohlenstoffkonzentration [%a] am Standort Freising. Differenz des mittleren Kohlenstoffvorrats in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

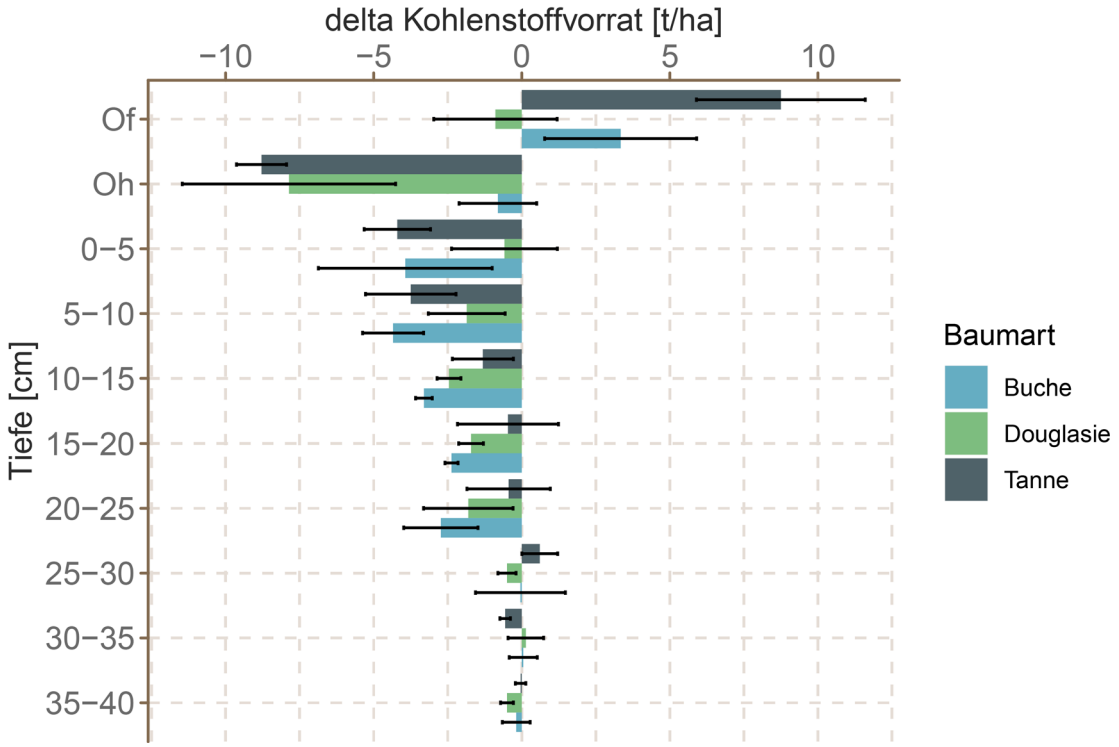


Abbildung 15 – Unterschiede im Kohlenstoffvorrat [t/ha] am Standort Freising. Differenz der mittleren Kohlenstoffkonzentration in den Bodenproben zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte,, Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

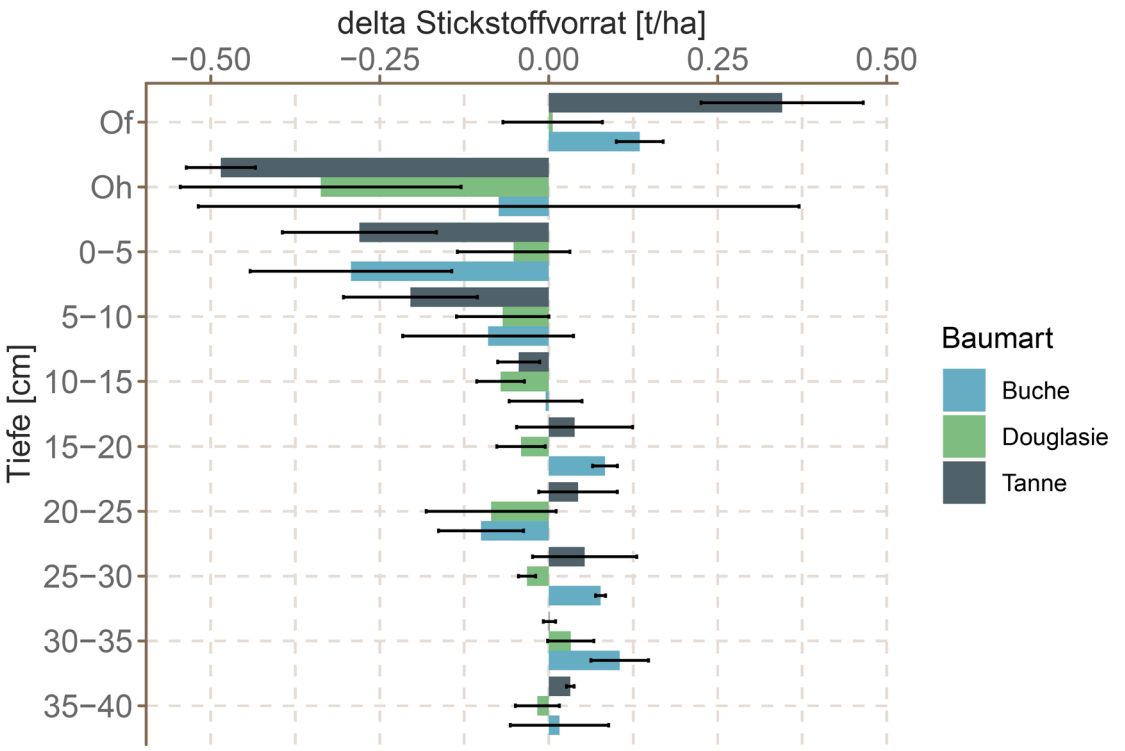


Abbildung 187 – Unterschiede Stickstoffvorrat [t/ha] am Standort Freising. Differenz des mittleren Stickstoffvorrats in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

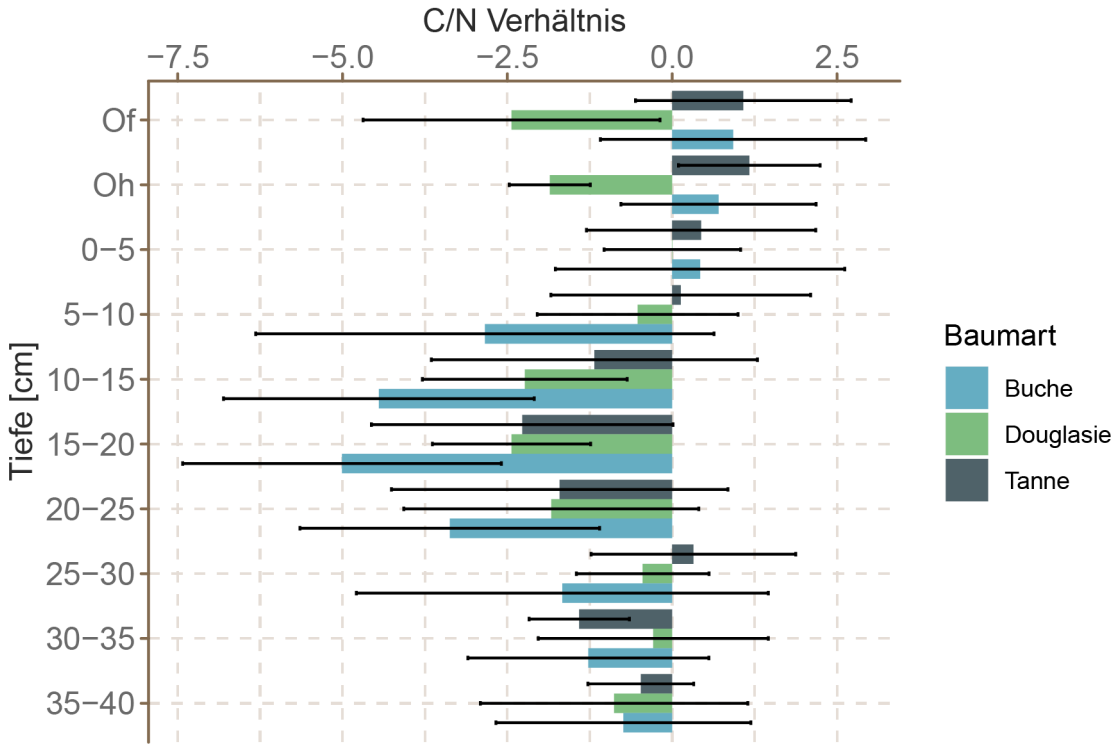


Abbildung 178 – Unterschiede in den C/N-Verhältnissen amd Standort Freising. Differenz des mittleren C/N-Verhältnisses in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

1.1.3 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Der Einfluss der Verjüngungsbaumarten auf die Kationenaustauschkapazität und deren Tiefenverteilung ist in *Abbildung 19* dargestellt. Vor allem im Of-Horizont der Auflage unter Buche sehen wir eine Zunahme der negativen Austauschplätze der organischen Substanz. Eine ähnliche Tendenz ist bei der Douglasie und Tanne zu beobachten, jedoch schwächer ausgeprägt. Bis in eine Tiefe von 20 cm finden wir eher eine Abnahme der Kationenaustauschkapazität im Vergleich zur Fichte. Diese steigt bei allen Baumarten ab 20 cm wieder an, wobei die Buche den höchsten Anstieg verzeichnet. Dies stimmt mit der Zunahme des pH-Wertes für die Tanne und Douglasie in den Tiefenschichten überein. Jedoch finden wir keine erhöhten pH-Werte der Buche in dieser Tiefenschicht. Da wir keine Erhöhung des Kohlenstoffvorrats sehen und wir sehr homogene Tongehalte auf dem Standort vorfinden, kann die Zunahme auch durch andere Zusammensetzung des organischen Kohlenstoffs der Buche erklärt werden.

Bei der Basensättigung (*Abbildung 20*) sehen wir ein ähnliches Muster wie bei der Kationenaustauschkapazität. Wir finden die größten Unterschiede in der Auflage und ab 20 cm Bodentiefe. In der Auflage und in 0-5 cm finden wir vor allem eine Abnahme der Basensättigung bei der Buche und Tanne. Ab 25 cm Tiefe sehen wir vor allem bei der Douglasie und Tanne einen Anstieg der Basensättigung von bis zu 20 %, während wir bei der Buche keine Unterschiede sehen. Dies Erhöhung des pH-Wertes in den Tiefen korreliert signifikant mit dieser Änderung (p=0,02, nicht gezeigt).

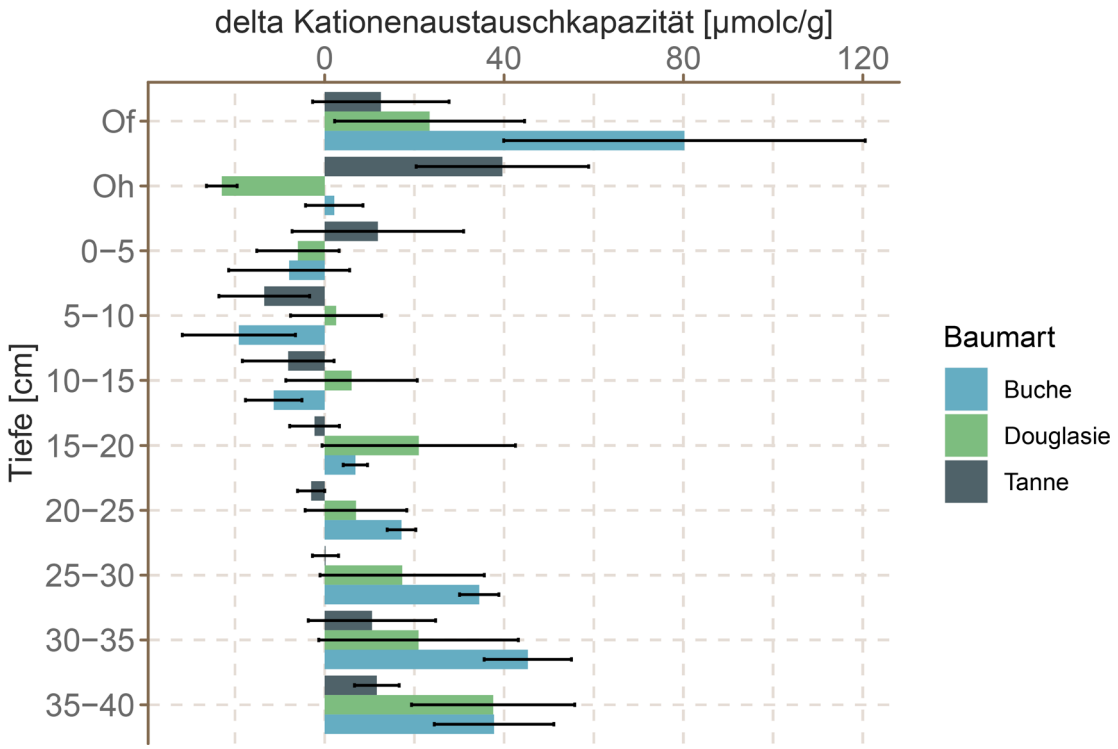


Abbildung 19 – Unterschiede in Kationenaustauschkapazität (KAK) [µmol$_c$/g] am Standort Freising. Differenz der mittleren KAK in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

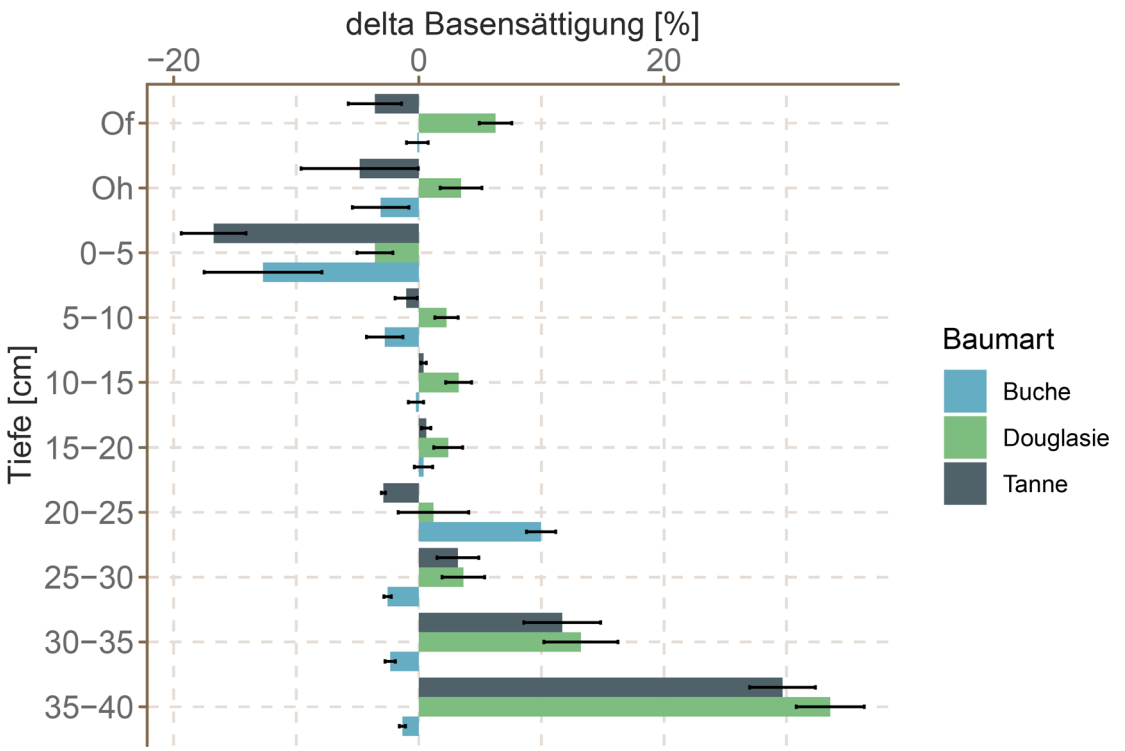


Abbildung 20 – Unterschiede in der Basensättigung (BS) [%] am Standort Freising. Differenz der mittleren BS in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

1.1.4 Phosphor und Phosphat im Waldökosystem

In der *Abbildung 21* sind die Gehalte des Zitronensäure-extrahierbarem Phosphat-P und in *Abbildung 22* des gesamt Zitronensäure-extrahierbaren P (einschließlich organischer P-Verbindungen) zusammengefasst. Wir sehen hier, dass der Of-Horizont für alle drei Baumarten signifikant höhere Gehalte an Orthophosphat-P aufweist. Die Buche zeigt hier mit knapp 90 mg/g die stärkste Zunahme. Im Oh-Horizont dieser Trend jedoch nur für die Tanne fort. Hier finden wir immer noch eine Erhöhung von ca. 50 mg/g vor.

Ein ähnliches Muster finden wir bei dem Zitronensäure-extrahierbarem Gesamtphosphorgehalt (siehe *Abbildung 22*). Auch hier haben wir eine signifikante Erhöhung der Gehalte im Vergleich zur Fichte. Dies schlägt für die Douglasie und Buche wieder in eine Abnahme ab dem Oh-Horizont um während wir bei der Tanne eine langsame Abnehme über mehrere Tiefenschichten sehen können. Erst ab einer Tiefe bei 15-20 cm finden wir keine Unterschiede mehr. Die Tanne scheint auf dem staunassen Standort ein höheres Aneignungsvermögen für Phosphor zu besitzen, dies erhöht den P-Gehalt in der Nadelstreu und damit auch in der Humusauflage. Insgesamt scheint das im Boden unter Tanne vorhandene, Zitronensäure-extrahierbare P weniger vollständig als Phosphat vorzuliegen. Größere Teile des organisch gebundenen Phosphors als für die anderen Baumarten werden nicht mineralisiert.

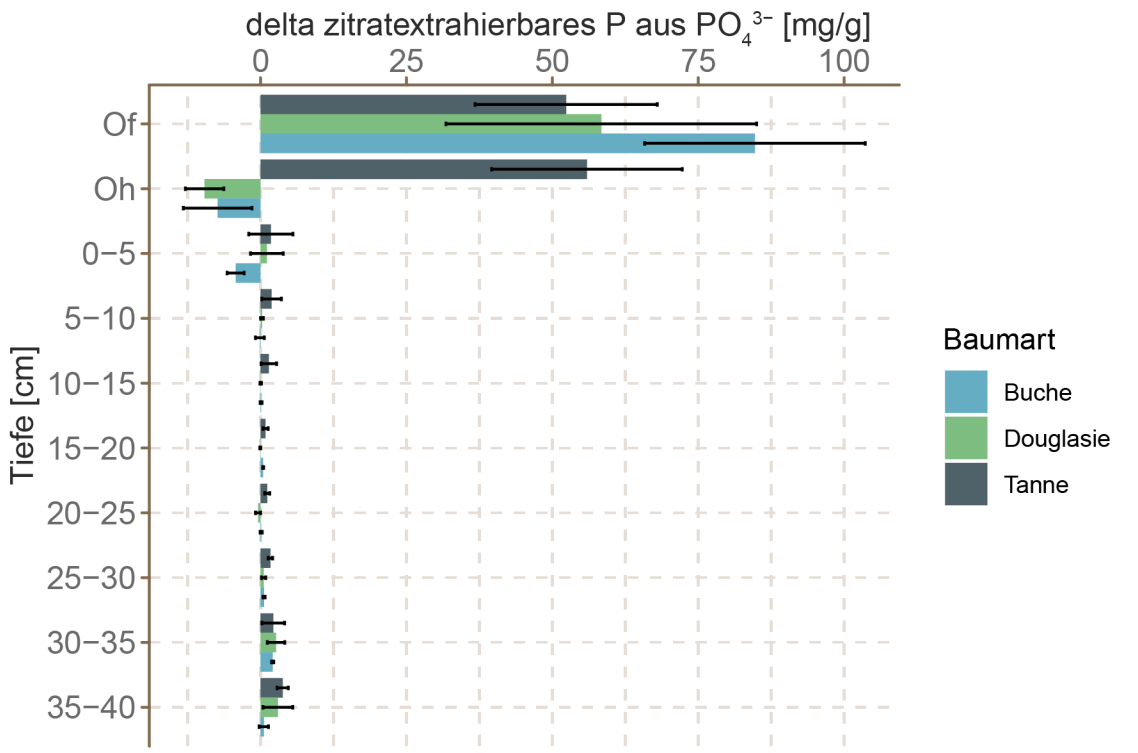


Abbildung 21 – Unterschiede im Zitronensäure-extrahierbares PO_4^{3-} P [mg/g]. Differenz der mittleren PO4-P Konzentration in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

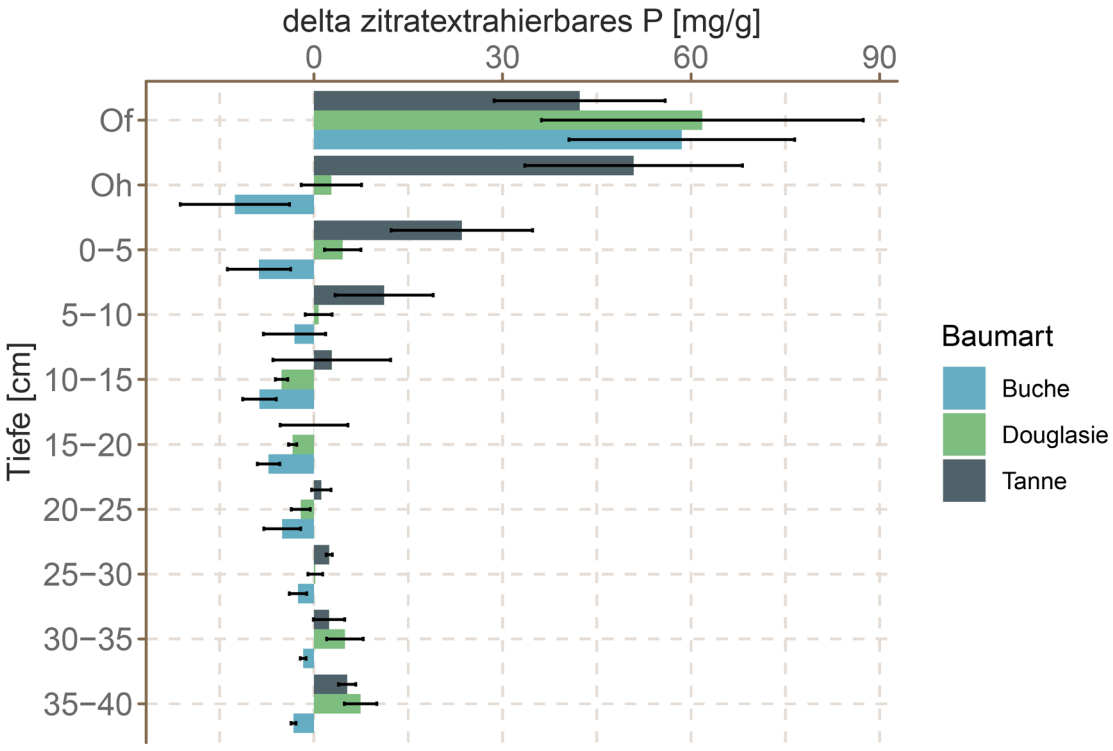


Abbildung 22 – Unterschied im Zitronensäure extrahierbarerem Phosphor [mg/g] am Standort Freising. Differenz der mittleren P Konzentration in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

1.1.5 Dichtefraktionierung

Im Vergleich zur Fichte ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff in der HF unter Buche und Tanne tendenziell höher (Buche: 76,4 ± 8,0 %; Douglasie: 76,9±5,0%; Tanne: 77,23±2,5%; Fichte: 71,1±12,2%), während die Gehalte des organischen Kohlenstoffs in fLF und oLF jeweils deutlich absinken (*nicht gezeigt*). In *Abbildung 23* sind die absoluten Gehalte an organischen Kohlenstoff der einzelnen Fraktionen der Dichtefraktionierung bezogen auf den Gesamtboden dargestellt. Man sieht, dass die absoluten Mengen der einzelnen Fraktionen deutlich abgenommen haben. Auf dem Buchenstandort finden wir die geringsten Gehalte, gefolgt von Tanne und Douglasie welche nur noch leicht geringer Gehalte als die Fichte aufweisen. Wie in *Kapitel 1.1.2*. gezeigt, sinken die organischen Kohlenstoffvorräte unter allen drei Baumarten im Vergleich zur Fichte, was sich mit diesem Ergebnis deckt. Die Verschiebung der Anteile der organischen Substanz von der flF und olF in die „heavy"-Fraktion bei Buche, Tanne und Douglasie deutet jedoch auf höhere Stabilität der organischen Substanz unter diesen Baumarten hin.

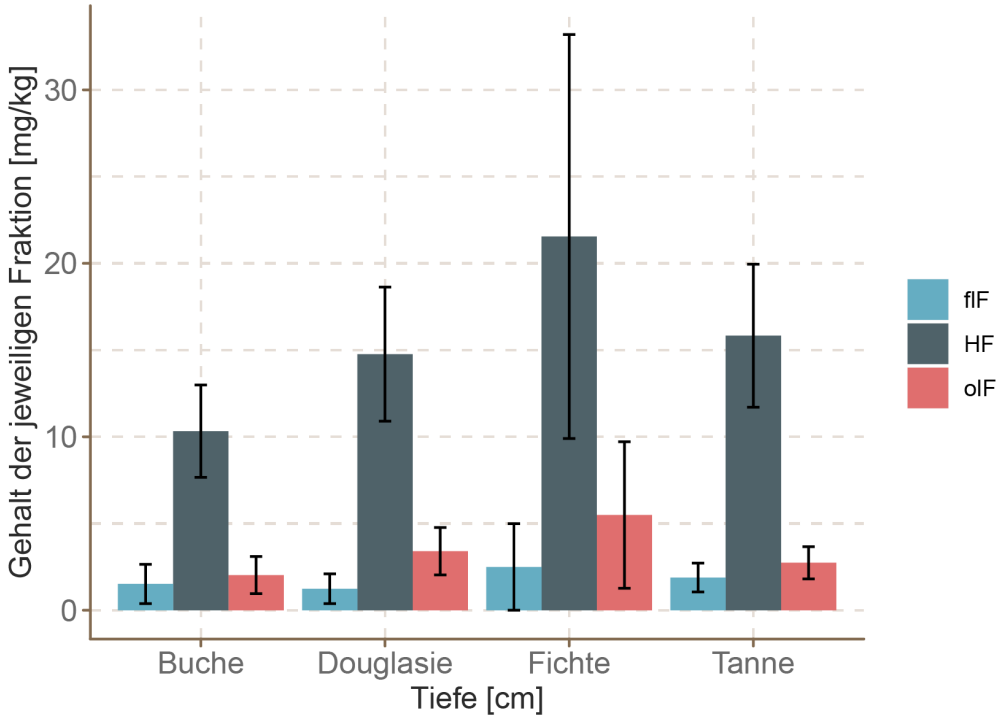


Abbildung 23 – Gehalte des Bodens an organischem Kohlenstoff in den verschiedenen Fraktionen der Dichtefraktionierung. fLF = Freie leichte Fraktion, oLF = Okkludierte leichte Fraktion, HF = „heavy" Fraktion. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

1.1.1 Wasserspannungskurven (pF Kurven)

Die Wasserspannungskurven unter den verschiedenen Baumarten sind in *Abbildung 24* dargestellt. Wir sehen eine 60%ige Erhöhung der weiten Grobporen (50 µm, pF 1,8) bei der Tanne gegenüber der Fichte. Wir können ebenfalls eine leichte Erhöhung (30 %) bei der Buche und Douglasie sehen, welche sich intermediär zwischen Fichte und Tanne einordnen. Dieser Trend setzt sich bis pF 2,5 fort bevor sich alle vier Baumarten annähern. Die gefundenen Unterschiede sind durchaus beachtlich und bedeuten, dass unter Tanne doppelt so viel Wasser in pflanzenverfügbarer Form gespeichert werden kann, als unter Fichte.

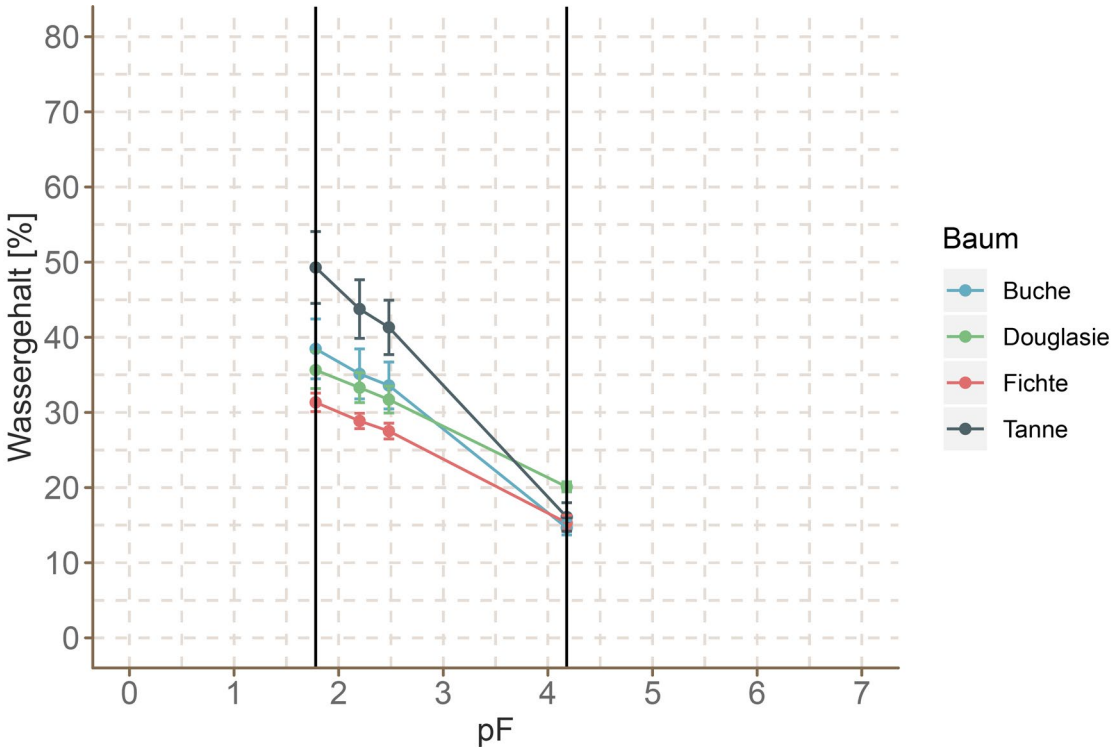


Abbildung 24 – Wasserspannungskurve unter verschiedenen Baumarten in der Bodentiefe 5-10 am Standort Freising. Die Fehlerbalken stellen den Standartfehler dar.

1.1.2 Dynamische Bildanalyse, erste Einsichten in den hochaufgelösten Aggregatzerfall

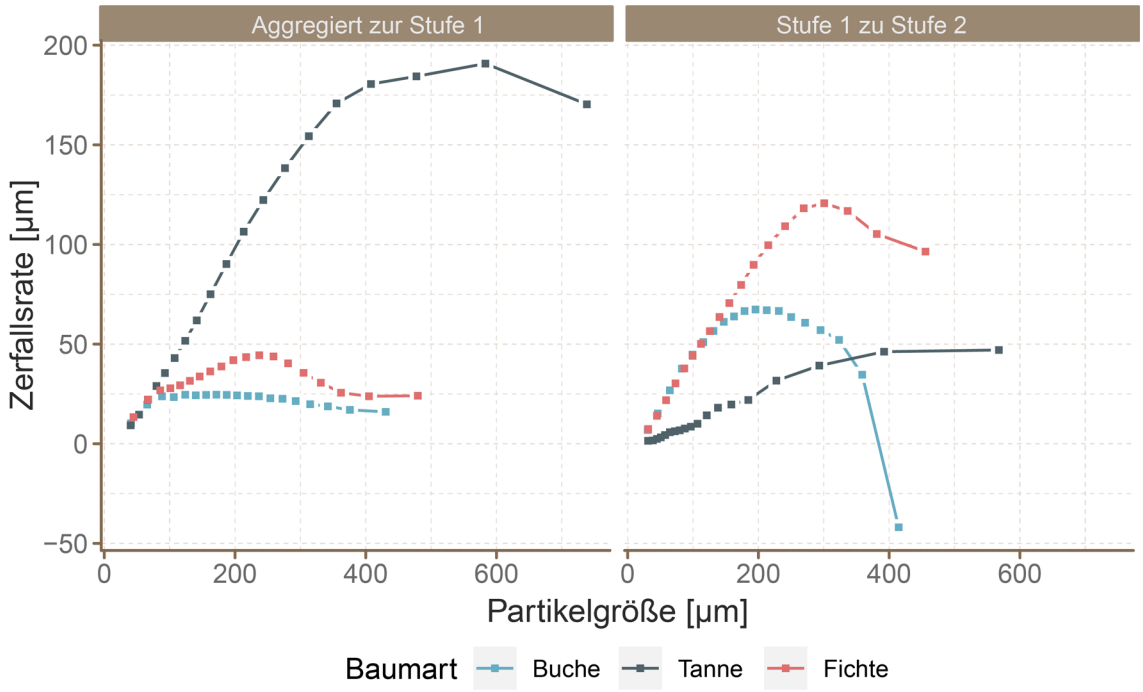


Abbildung 25- Zerallsrate der Bodenaggregate aus der Bodentiefe 5-10 cm am Standort Freising als Funktion der Aggregatgröße bei schwacher (links) und nachfolgend stärkerer (rechts) Störung durch Ultraschall.

In den Abbildungen zu den Ergebnissen der dynamischen Bildanalyse sind die Zerfallsraten der Aggregate dargestellt. Die Zerfallsrate beschreibt die durchschnittliche Größenänderung in µm einer Aggregatklasse nach Applikation von einer mechanischen Kraft (Beschallung durch Ultraschall). Das heißt, je höher die Zerfallsrate, umso weniger stabil sind Aggregate in der entsprechenden Größenklasse. Die Kurve gibt zusätzlich Informationen über die initiale Größe der Aggregate. Je weiter die Punkte rechts auf der X-Achse liegen, desto größer sind die Aggregate in der analysierten Probe.

In *Abbildung 25* sind die Zerfallsraten der Bodenaggregate in Freising dargestellt. Dabei weist Tanne mit über 600 µm die mit Abstand größten Aggregate auf. Die größten Aggregate, die wir unter Buche und Fichte finden, sind nur zwischen 450 und 500 µm groß. Das Ergebnis der Tanne deckt sich ebenfalls mit dem Ergebnis der Wasserspannungskurve, bei der wir eine deutliche Erhöhung von weiten Grobporen finden die sich in Zwischenräumen bzw. im Inneren von größeren Aggregaten bilden können. Die größeren Aggregate unter der Tannen sind jedoch sehr instabil und zerfallen bereits nach der ersten 10 s Beschallung um fast 200 µm während die kleineren Aggregate der Buche und Fichte nur eine geringe Zerfallsrate zwischen 25 – 50 µm aufweisen. Bei der zweiten Beschallungsstufe sehen wir, dass die Buche und Fichte nun eine höhere Zerfallsrate haben als die Tanne und sogar eine höhere als bei der ersten Beschallung. Auch dies deutet auf eine höhere Aggregatstabilität hin wodurch die Aggregate erst nach höherem Input von mechanischer Energie zerfallen, bzw. nach und nach kleiner werden.

1.1.3 Radiocäsium aus Tschernobyl, Tracer für die Quantifizierung der Bioturbation

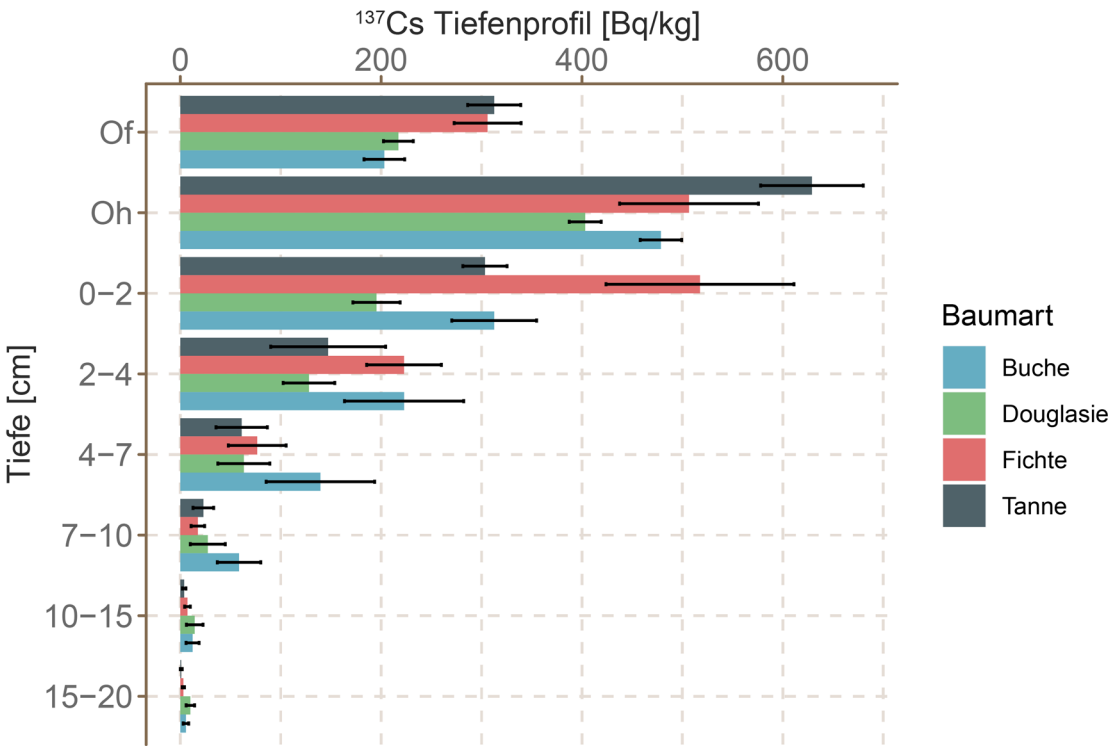


Abbildung 26 – Tiefenprofil der Radiocaesiumverteilung [Bq/kg] am Standort Freising. Differenz der mittleren Radiocaesium Konzentration in den jeweiligen Tiefenstufen zwischen der in der Legende angegebenen Baumart und der Fichte. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde.

1.2 Analyse der standortübergreifenden Veränderung

Im folgenden Abschnitt wird der Baumarteneinfluss auf verschiedene Bodeneigenschaften standortübergreifend illustriert. Dazu werden signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Standorten als Übersicht in Form von Tabellen und die Verteilung der Daten auf den unterschiedlichen Standorttypen mithilfe von Boxplots dargestellt. Um den Einfluss der anderen Baumarten in Relation zur Fichte auf allen Standorten einzuordnen, werden die Ergebnisse abschließend in Ranggrafiken dargestellt. In die Abbildungen fließen jeweils 2 Standorte auf Carbonatgestein, 4 Standorte aus magmatischem Gestein, 5 Standorte aus silikatischem Sandstein und 2 saure und staunasse Standorte ein.

In den Tabellen mit den Signifikanzen wird jeder Standort einzeln betrachtet und in *Auflage* und *Mineralboden* unterteilt. Die signifikanten Unterschiede ($p<0,05$) werden mit **+** oder **–** gekennzeichnet, welche gleichzeitig als Indikator dienen ob wir höhere oder niedrigere Werte vorfinden. Die Unterschiede beziehen sich immer auf die Fichte. Signifikante Unterschiede zwischen Buche und Tanne, Buche und Douglasie und Tanne und Douglasie können in *Tabelle 10* im Anhang eingesehen werden. In den Boxplots repräsentiert der Querstrich den Median, die obere und untere Kante der Box das obere und untere Quantil. Innerhalb dieser Box befinden sich 50% der Daten, auch „interquartile range“ (IQR) genannt. Somit gibt die Position des Medians innerhalb der Box zusätzlich eine Information über die Schiefe bzw. deren Verteilung. Die „whisker“ entsprechen maximal der 1,5-fachen IQR, liegen alle Werte unter der 1,5 x IQR, gibt der höchste Wert innerhalb des Bereichs die Länge des „whisker“ an. Alle Werte außerhalb des Bereichs sind als Punkte dargestellt und werden als Ausreißer klassifiziert. Die Ranggrafiken zeigen die Mittelwerte des betrachteten Parameters der Fichte aufsteigend als 1:1-Gerade. Jeder Punkt repräsentiert dabei einen Mittelwert. Die dazugehörigen Werte von Buche und Tanne werden anhand der Fichte mitsortiert und zeigen ob der Mittelwert von Buche oder Tanne oberhalb oder unterhalb des Mittelwertes der Fichte liegt.

Viele Unterschiede werden erst klar sichtbar, wenn man für die einzelnen Standorte die Bodeneigenschaften getrennt nach Baumart aufträgt (siehe zum Beispiel *Abbildung 24,34*). An vielen Standorten sind diese Kurven Baumarten-spezifisch.

1.2.1 pH-Wert

In *Tabelle 4* sind alle signifikanten Unterschiede für den pH-Wert dargestellt. Vor allem die Buche erhöht den pH-Wert mit 8 signifikanten Erhöhung, meist auf sauren Standorten und in den Auflage Horizonten. Nur auf einem Standort finden wir niedrigere pH-Werte (Ravensburg2). Unter der Tanne finden wir nur in zwei Fällen eine signifikante Erhöhung des pH-Wertes.

In *Abbildung 27* sind die pH-Werte der Böden für die verschiedenen Standorttypen zusammengefasst. Wir sehen, dass die pH-Werte auf den Carbonat Standorten keine signifikanten Unterschiede zeigen. Jedoch haben die pH-Werte im Mineralboden die höchste Variabilität bei der Fichte und Tanne. Dies kann durch das Aufbrauchen des Carbonat Puffers (zwischen 6,5 und 8,6) erklärt werden. Allgemein ist festzuhalten, dass die Buche oft die höchsten pH-Werte zeigt, die Fichte die niedrigsten, die Tanne liegt dazwischen. Der Einfluss der Baumart auf den pH-Wert-Einfluss ist für die Auflagen am Standorttyp „sauer magmatisch“ am deutlichsten ausgeprägt. Der Einfluss ist für die Auflagen allgemein stärker ausgeprägt als für den Mineralboden. Dies ist sehr deutlich in der *Abbildung 28* (oben) zu sehen, fast alle Mittelwerte der Buche liegen deutlich über dem Mittelwert der Fichte. Vor allem bei niedrigen pH-Werten (zwischen 3,5 und 5) sehen wir Sprünge um eine ganze pH-Einheit, was sehr bemerkenswert ist. Die Tanne schafft dies auch, jedoch in geringerem Maße. Der Einfluss der Buchenverjüngung auf den pH-Wert des

*Tabelle 4 – Zusammenfassung der signifikanten Unterschiede (p<0,05) der pH-Werte auf den verschiedenen Standorten zwischen Buche-Fichte und Tanne-Fichte. Ein „+“ bedeutet eine signifikante Erhöhung des pH-Wertes im Vergleich zur Fichte während ein „-“ eine signifikante Senkung des pH-Wertes im Vergleich zur Fichte bedeutet. * durch die Beprobung von Mischproben ist hier keine statistische Auswertung möglich, die angegeben Werte in Klammern zeigen die Tendenz.*

Standort	Tiefe	Baumart	pH
Freising	Auflage	Buche	
		Douglasie	
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Douglasie	
		Tanne	
Villingen	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	+
		Tanne	+
Ellwangen	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	+
		Tanne	
Ravensburg*	Auflage	Buche	*(+)*
		Tanne	*(-)*
	Mineral	Buche	*(+)*
		Tanne	*(+)*
Moslooh	Auflage	Buche	+
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Tanne	
Zinnschützweiher	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Tanne	
Giersberg	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Tanne	
Königsbronn	Auflage	Buche	
		Douglasie	
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Douglasie	
		Tanne	
Ravenbsurg2*	Auflage	Buche	*(-)*
		Tanne	
	Mineral	Buche	*(-)*
		Tanne	
Ravensburg3	Auflage	Buche	+
		Douglasie	
		Tanne	+
	Mineral	Buche	
		Douglasie	
		Tanne	
Thurner	Auflage	Buche	+
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Tanne	
Schwenningen	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	
		Tanne	
Ruhpolding	Auflage	Buche	
		Tanne	
	Mineral	Buche	+
		Tanne	

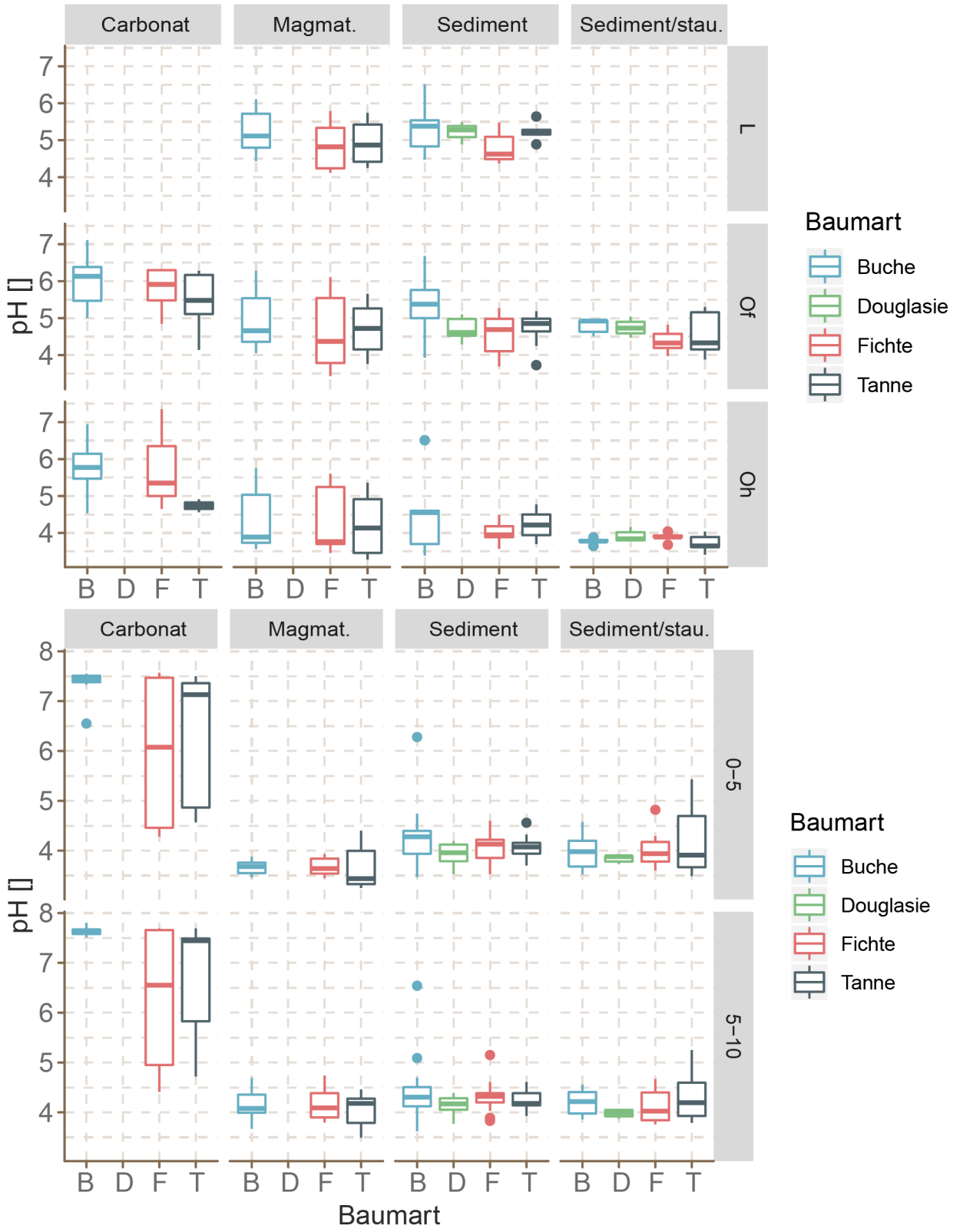


Abbildung 27 – Box-Plots der Boden-pH Werte der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

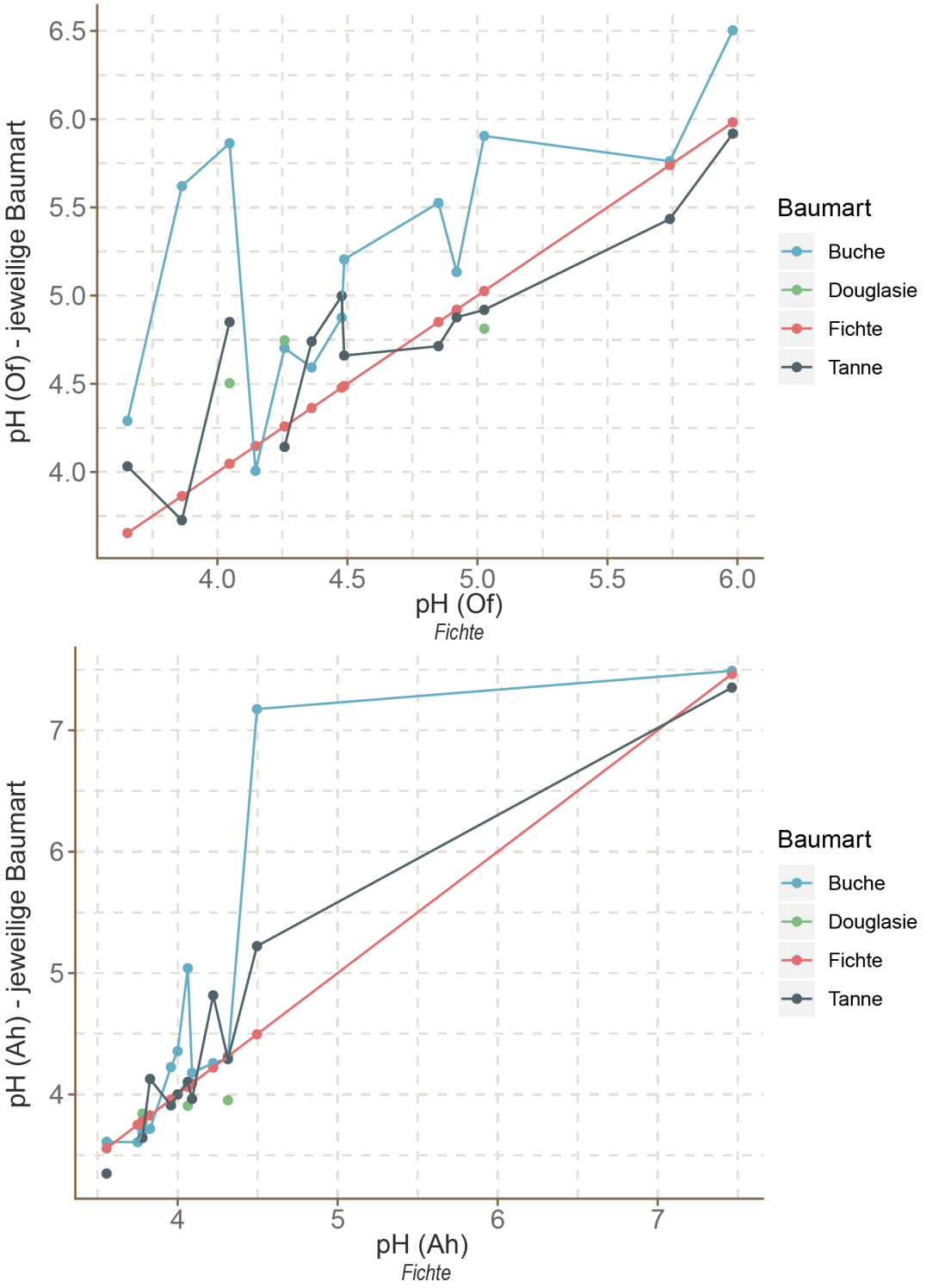


Abbildung 28 - Ranggrafik der Mittelwerte der pH-Werte der verschiedenen Baumarten. Oben: Daten aus dem Of-Horizont, Unten: Darstellung aus dem Ah. Horizont. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1 Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Lini einen niedrigeren Mittelwert beschreiben.

Bodens ist vergleichbar oder sogar größer als der in der Literatur beschriebene Einfluss der Kalkung. Diese Erhöhung der pH-Werte setzt sich jedoch nur teilweise in den Mineralboden fort. Vor allem bei den niedrigen pH-Werten (< pH 4,5) sehen wir diese starke Erhöhung das pH-Wertes nur noch in Einzelfällen. Trotzdem gibt es Standorte auf denen wir eine starke Erhöhung finden, dies zeigt wie stark die Einwirkung der 20-30 Jahren jungen Buchen ist. Auch wenn wir nur zwei signifikante Unterschiede bei der Tanne finden, sehen wir tendenziell eine Erhöhung der pH-Werte im Mineralboden. Diese Erhöhung sieht man vor allem auf den staunassen Standorten (siehe *Abbildung 27*, Sediment/staunass). Im Vergleich zur Buche und Fichte zeigt die Tanne hier deutlich höhere pH-Werte.

.

1.2.2 Organischer Kohlenstoff und Stickstoff

In *Tabelle 5* sind die signifikanten Unterschiede für den Kohlenstoffvorrat sowie für die C/N-Verhältnisse zusammengefasst. In *Abbildung 29-31* sind die Kohlenstoffkonzentrationen, und die Kohlenstoff- sowie die Stickstoffvorräte für die verschiedenen Standorttypen zusammengefasst. *Abbildung 42* zeigt die Ranggrafik für die Vorräte in den Auflage-Horizonten. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff in der Humusauflage der verschiedenen Standorte und Baumarten schwankt zwischen 5 und 35 t C ha^{-1}. Der Kohlenstoffvorrat des Mineralbodens bis 40 cm Bodentiefe zwischen 40 und 125 t C ha^{-1}. An einigen Standorten zeigt die Buche im Vergleich zur Fichte höhere C-Vorräte. Dies könnte dadurch zu erklären sein, dass die Buche mehr Streu produziert, die Streu aber ähnlich schlecht abgebaut wird, wie die Fichtenstreu. Dies sehen wir vor allem auf sauren und nährstoffarmen Standorten (siehe *Abbildung 53* im Anhang) wo wir einen signifikanten Zusammenhang zwischen Kohlenstoffvorrat und pH-Wert finden. Auf nährstoffreicheren Standorten hingegen, scheint die Buchenstreu schneller abgebaut zu werden als die Fichtenstreu, was zu niedrigeren C-Vorräten unter der Buche verglichen mit der Fichte führt (siehe *Abbildung 32*). Den maximalen positiven Baumarteneinfluss auf die C-Speicherung im Boden finden wir am Standort Villingen (bis 40 cm). Dort ist der C-Vorrat der Böden unter Buche um 15 t ha^{-1} größer als unter Fichte (unter Tanne 1 t ha^{-1} kleiner). Die Buchen sind etwa 20 Jahre alt, dies bedeutet eine zusätzliche Speicherung von C beim Voranbau von Buchen von ca. 1 t ha^{-1} a^{-1}. Die aktuellen Daten aus der BZE ergeben eine jährliche durchschnittliche C-Speicherung unserer Waldböden von 0,3 t ha^{-1}. Bei Buchenvoranbau würde sich dieser Wert also verdreifachen. Den maximal negativen Einfluss der Buche auf die C-Speicherung findet sich am Standort Schwenningen. Dort ist der C-Vorrat der Böden unter Buche 4 t ha^{-1} kleiner. Insgesamt deuten unsere Ergebnisse an, dass die Umwandlung von Fi-Reinbeständen in Bu/Fi Mischbestände auf nährstoffreichen Standorten zu einem Verlust von organischer Bodensubstanz beiträgt, auf nährstoffarmen Standorten allerdings zu einem Gewinn.

In den meisten Fällen sinkt das C/N-Verhältnis unter Buche im Vergleich zur Fichte, geringere Unterschiede aber ebenfalls niedrigere C/N-Verhältnisse finden sich unter der Tanne. Die Qualität der Blatt- oder Nadelstreu spielt hier sicher eine wichtige Rolle. Mit größerem C/N-Verhältnis, nimmt die Abbaubarkeit der organischen Substanz ab. Gleichzeitig steigt der Beitrag pilzlicher Zersetzer am Abbau der organischen Substanz. Dies wiederum unterstützt die Bildung von Huminsäuren, die zur Absenkung des Boden-pH Wertes beitragen. Dieser Mechanismus steht im Einklang mit dem Zusammenhang zwischen dem C/N-Verhältnis der Humusauflage und des A-Horizontes und dem pH-Wert dieser Horizonte an den unterschiedlichen Standorten (siehe *Abbildung 33*).

*Tabelle 5 Zusammenfassung der signifikanten Unterschiede (p<0,05) der Kohlenstoffvorräte und C/N Verhätlnisse auf den verschiedenen Standorten zwischen Buche und Fichte und Tanne und Fichte. Ein „+“ bedeutet eine signifikante Erhöhung des Wertes im Vergleich zur Fichte während ein „-“ eine signifikante Senkung des Wertes im Vergleich zur Fichte bedeutet. * durch die Beprobung von Mischproben ist hier keine statistische Auswertung möglich, die angegeben Werte in Klammern zeigen die Tendenz.*

Standort	Tiefe	Baumart	Vorrat	C/N
Freising	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
Villingen	Auflage	Buche		+
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Ellwangen	Auflage	Buche	+	
		Tanne	+	
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Ravensburg*	Auflage	Buche	*(+)*	*(+)*
		Tanne	*(-)*	*(+)*
	Mineral	Buche	*(+)*	
		Tanne	*(+)*	
Moslooh	Auflage	Buche	+	+
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Zinnschützweiher	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne	-	
Giersberg	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Königsbronn	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		-
Ravenbsurg2*	Auflage	Buche		+
		Tanne		
	Mineral	Buche		+
		Tanne		
Ravensburg3	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		-
		Douglasie		
		Tanne		
Thurner	Auflage	Buche	+	+
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Schwenningen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Ruhpolding	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	+	
		Tanne		

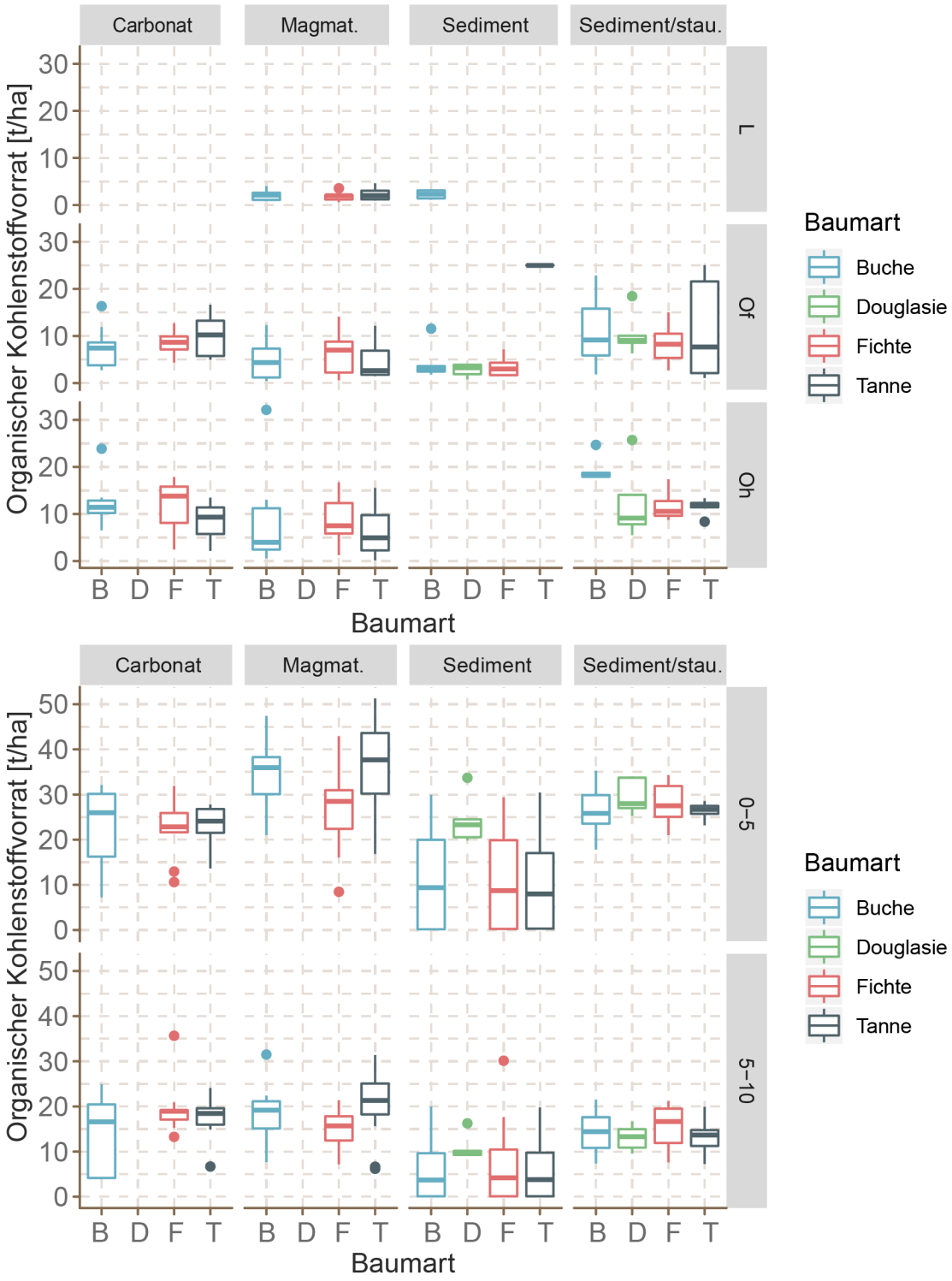


Abbildung 29 – Vorräte von organischem Kohlenstoff [t ha^{-1}] der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

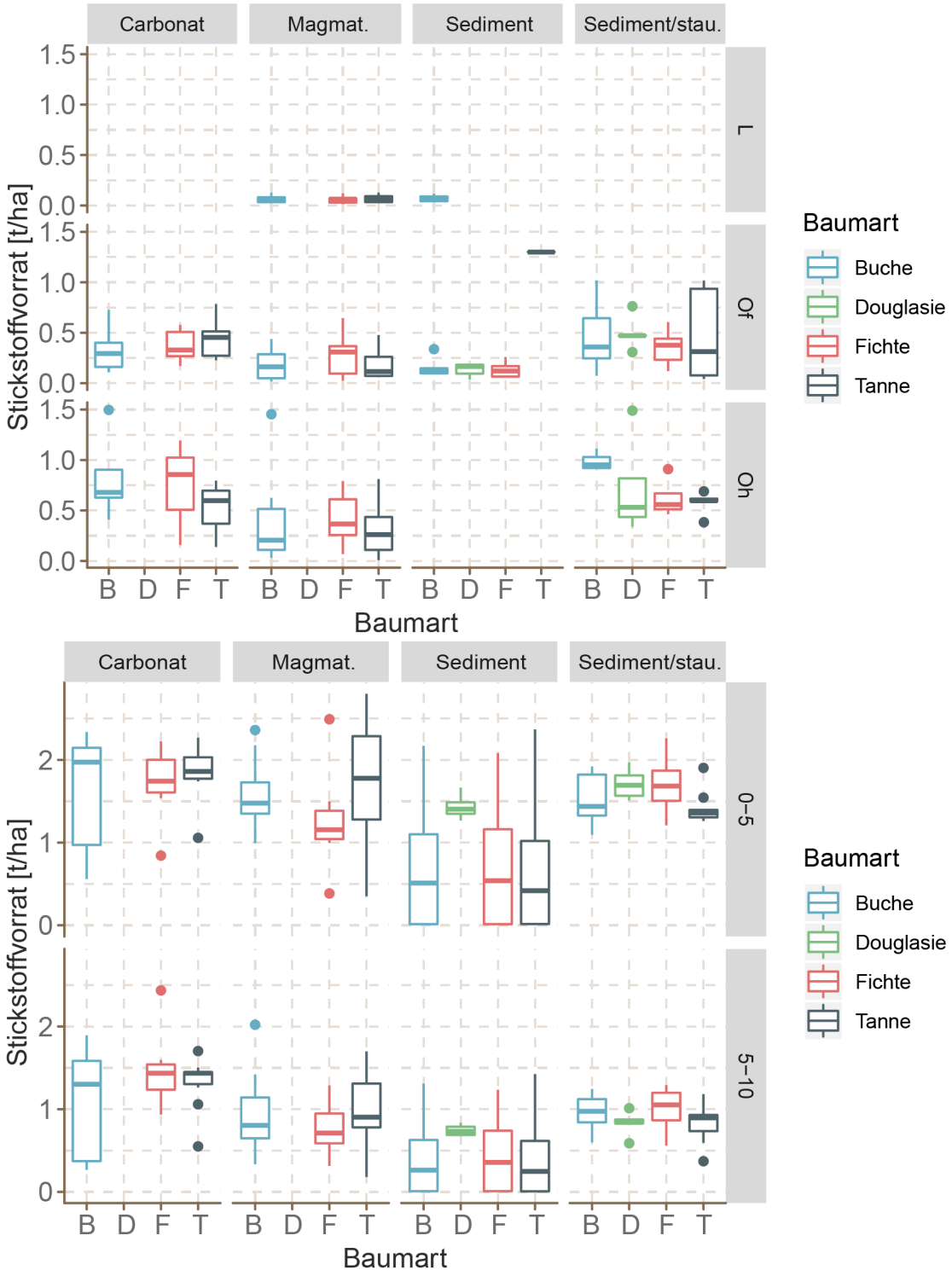


Abbildung 30 - Vorräte von Stickstoff [t ha^{-1}] der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

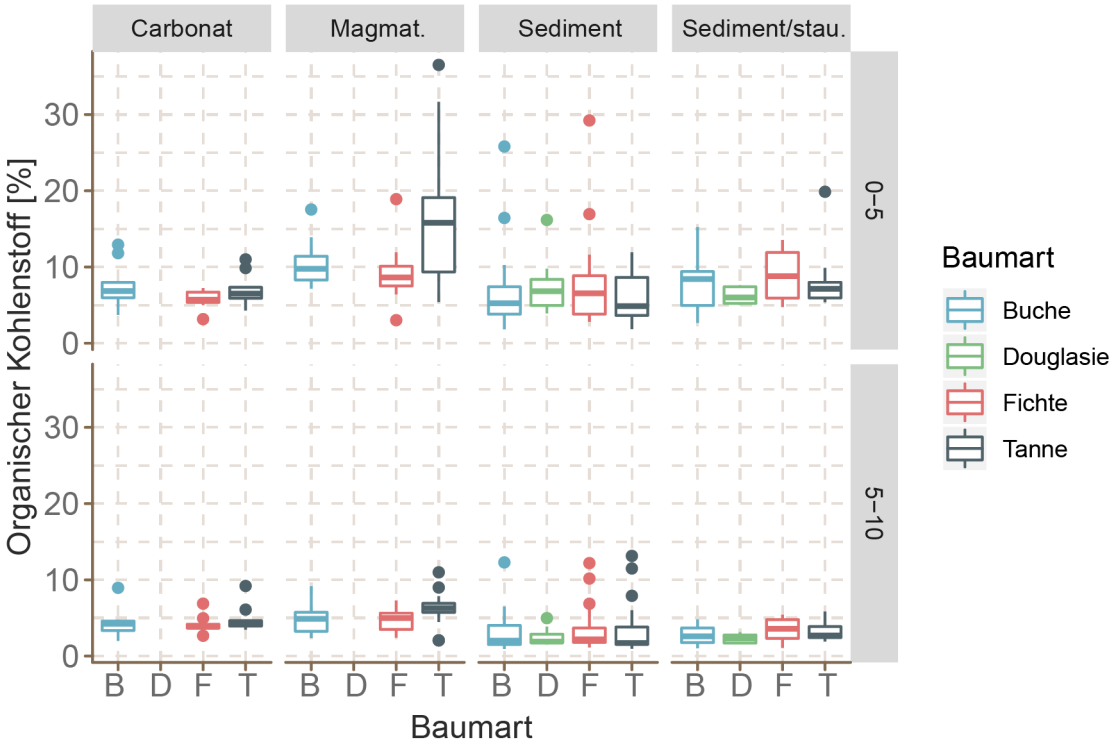


Abbildung 31 – Organisch Kohlenstoffkonzentration [%] der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

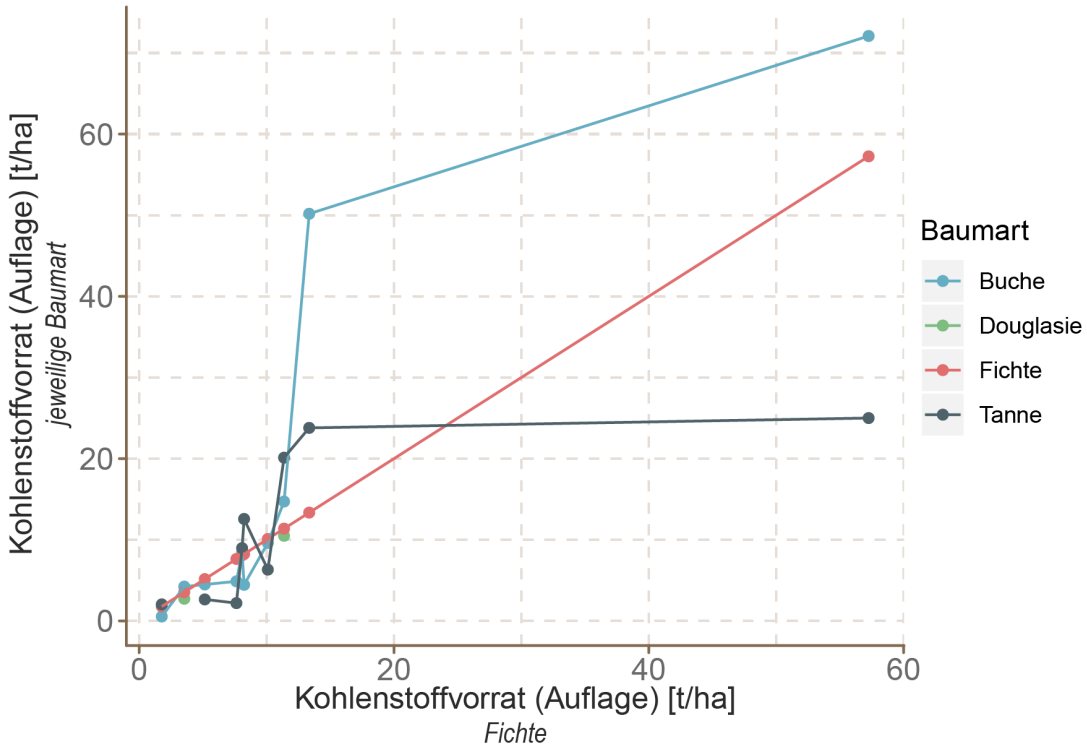


Abbildung 32 - Ranggrafik der der Mittelwerte der Kohlenstoffvorräte in der Auflage der verschiedenen Baumarten. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1 Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Linie einen niedrigeren Mittelwert beschreiben.

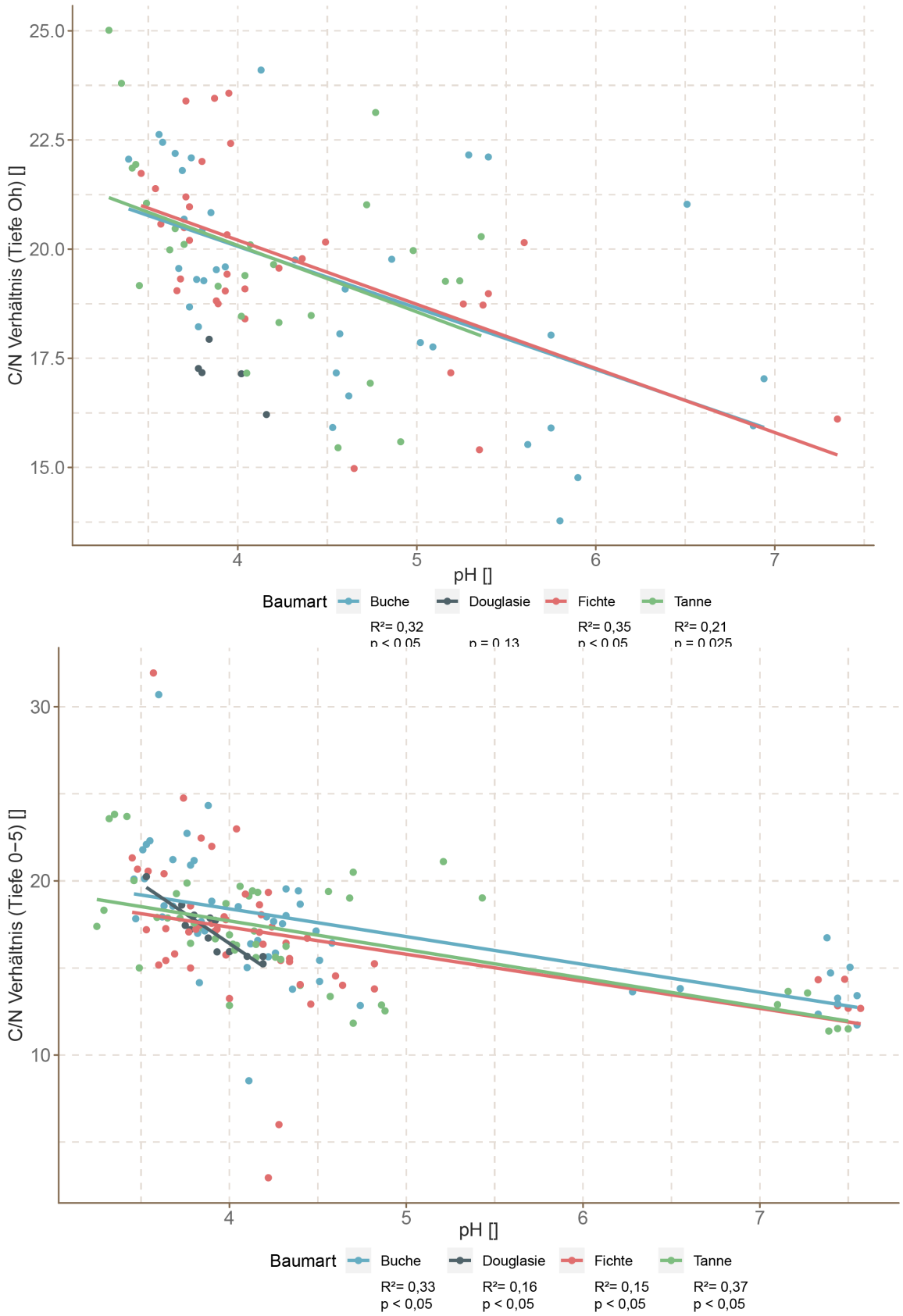


Abbildung 33 – Korrelationen der pH-Werte mit dem C/N Verhältnissen. Oben zeigt die Korrelation im Oh-Horizont für alle Standorte. Unten zeigt die Korrelation für die Tiefe 0-5 cm für alle Standorte.

1.2.3 Kationenaustauschkapazität

In der *Tabelle 6* sind alle signifikanten Unterschiede der Kationenaustauschkapazität in Bezug auf die Fichte zusammengefasst. Häufig zeigt die Buche die höchsten Werte der KAK. Dies liegt zum einen daran, dass der pH-Wert unter dieser Baumart oft am höchsten ist. Die Spanne der gemessenen Basensättigung unter Buche im Ah-Horizont reicht von 4-90%, die Spanne unter Fichte hingegen nur von 1-70%. Zum anderen besitzt die organische Substanz, die sich unter dem Einfluss der Buche bildet, offenbar mehr funktionelle Gruppen und damit negative Ladungsplätze als die organische Substanz unter Fichte. Daher ist die Steigung der Ausgleichsgeraden zwischen organischem Kohlenstoff und der KAK für die Buche am steilsten (*Abbildung 32*). Besonders auf armen Standorten und Zweischicht-Profilen mit deutlich höheren Gehalten an basischen Kationen im Unterboden (z.B. Geschiebelehm über Karbonat-führender Moräne, Ravensburg) tragen die tiefer wurzelnden Baumarten Buche und Tanne zur Verbesserung der Nährelementversorgung bei. Eine außergewöhnliche Erhöhung der Basensättigung finden wir auf dem Standort Ravensburg (siehe *Abbildung 34*). Hier finden wir eine Basensättigung von 40% unter Buche, während wir unter Tanne und Fichte eine Basensättigung von ca. 10% finden. Eine Verringerung der Verfügbarkeit an basischen Kationen durch Buche oder Tanne im Vergleich zu Fichte wurde auf keinem der Standorte beobachtet.

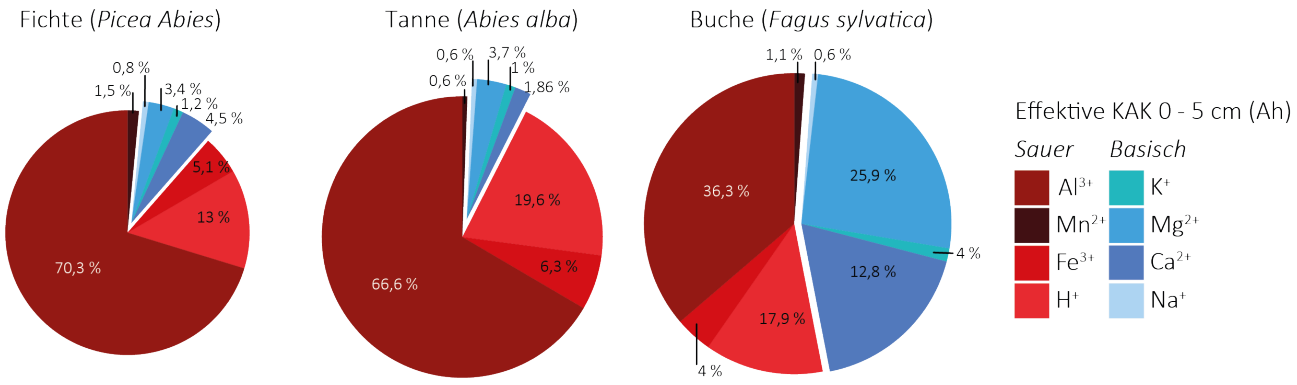


Abbildung 34 Verteilung der Kationen aus der Kationenaustauschkapazität der Tiefenstufen 0-5 cm unter drei verschiedenen Baumarten auf dem Standort Ravensburg. Die Fichte hat eine gesame KAK von 107 µmolc/g, Tanne von 123 µmolc/g und die Buche eine KAK von 132 µmolc/g.

Tabelle 6 – Zusammenfassung der signifikanten Unterschiede (p<0,05) der Kationenaustauschkapazität (KAK in µmolc/g) und Basensättigung (BS in %) auf den verschiedenen Standorten zwischen Buche und Fichte und Tanne und Fichte. Ein „+“ bedeutet eine signifikante Erhöhung im Vergleich zur Fichte während ein „-“ eine signifikante Abahmne im Vergleich zur Fichte bedeutet.

Standort	Tiefe	Baumart	KAK	BS
Freising	Auflage	Buche	+	+
		Douglasie	+	+
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Douglasie		+
		Tanne		
Villingen	Auflage	Buche		
		Tanne	-	
	Mineral	Buche		
		Tanne		+
Ellwangen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	-	
		Tanne	-	
Ravensburg*	Auflage	Buche	*(+)*	*(+)*
		Tanne		
	Mineral	Buche	*(+)*	*(+)*
		Tanne		
Moslooh	Auflage	Buche	+	+
		Tanne		
	Mineral	Buche		+
		Tanne		
Zinnschützweiher	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		-
		Tanne	+	-
Giersberg	Auflage	Buche		
		Tanne		-
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Königsbronn	Auflage	Buche	+	+
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche	+	+
		Douglasie	+	+
		Tanne		+
Ravenbsurg2*	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	*(+)*	*(+)*
		Tanne		
Ravensburg3	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		+
		Douglasie		
		Tanne		
Thurner	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Schwenningen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne	-	
Ruhpolding	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	+	+
		Tanne	+	+

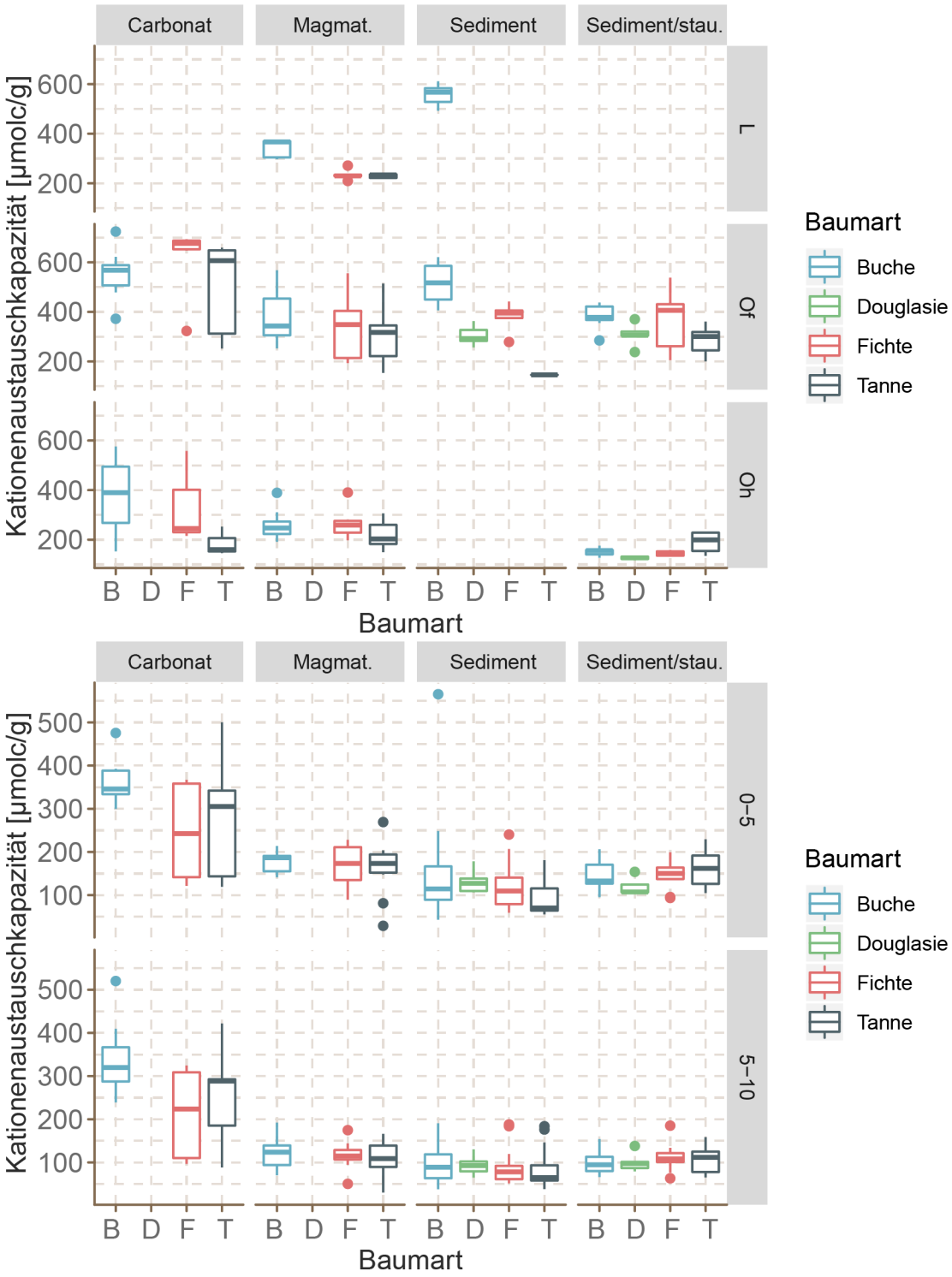


Abbildung 35 - Box-Plots der Kationenaustauschkapazität der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

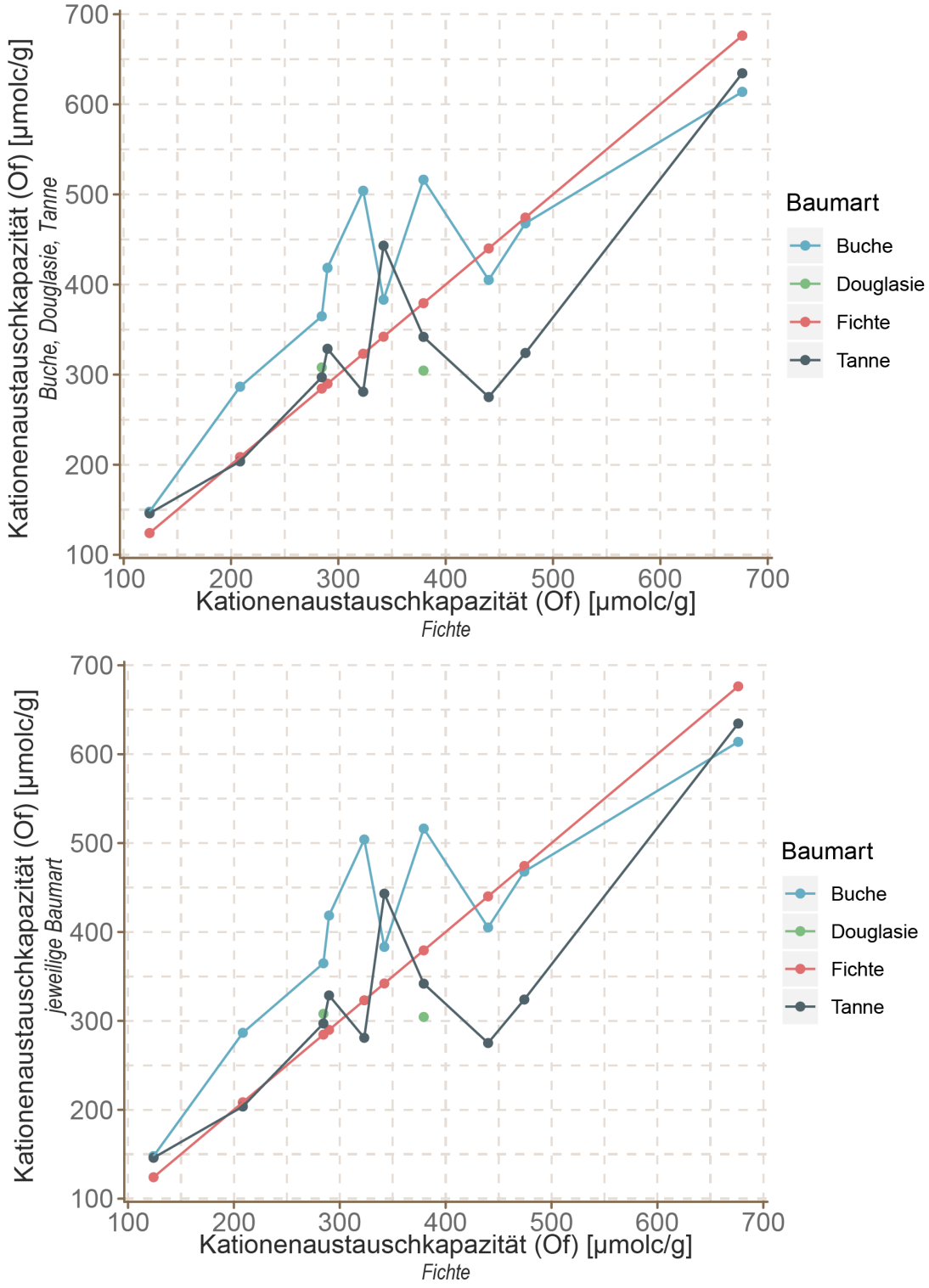


Abbildung 36 - Ranggrafik der der Mittelwerte der Kationenaustauschkapazität der verschiedenen Baumarten. Oben: Daten aus dem Of-Horizont, Unten: Darstellung aus dem Ah. Horizont. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1 Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Lini einen niedrigeren Mittelwert beschreiben.

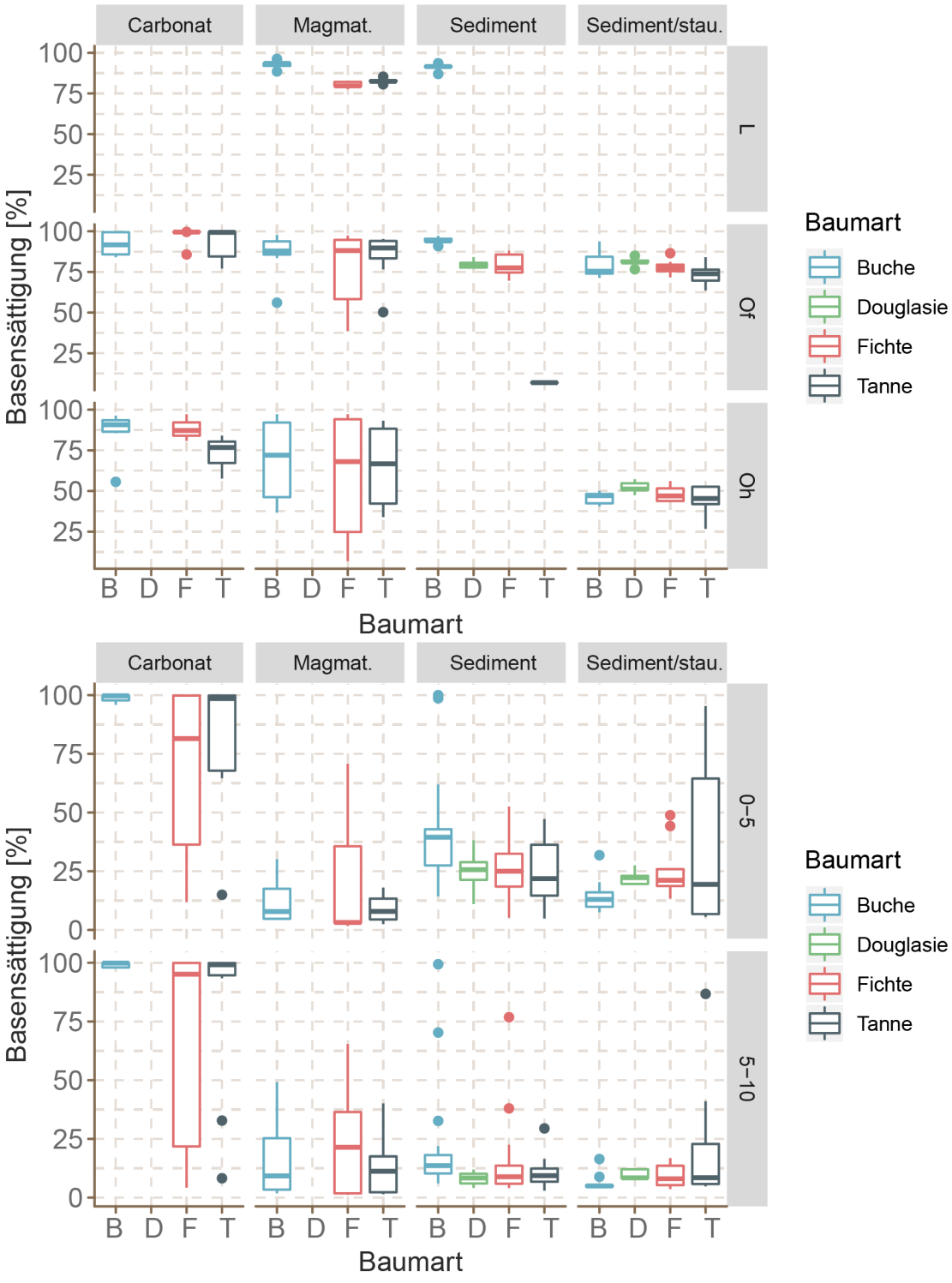


Abbildung 37 - Box-Plots der Basensättigung der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

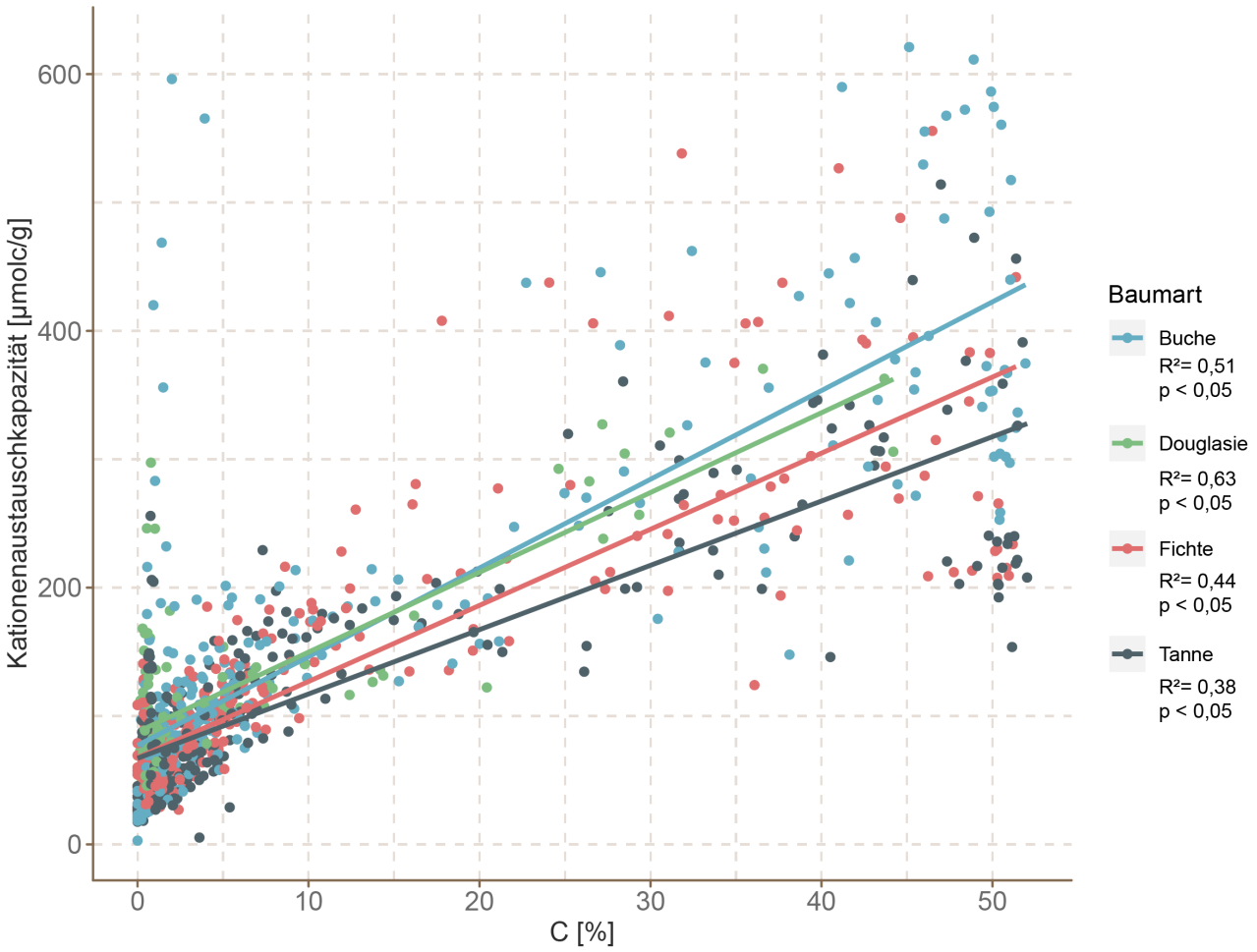


Abbildung 38 - Korrelation der Konzentration an organischem Kohlenstoff und der Kationenaustauschkapazität. Eingeflossen in die Korrelationsanalyse sind alle sauren Standorte und Analysendaten für alle Bodentiefen.

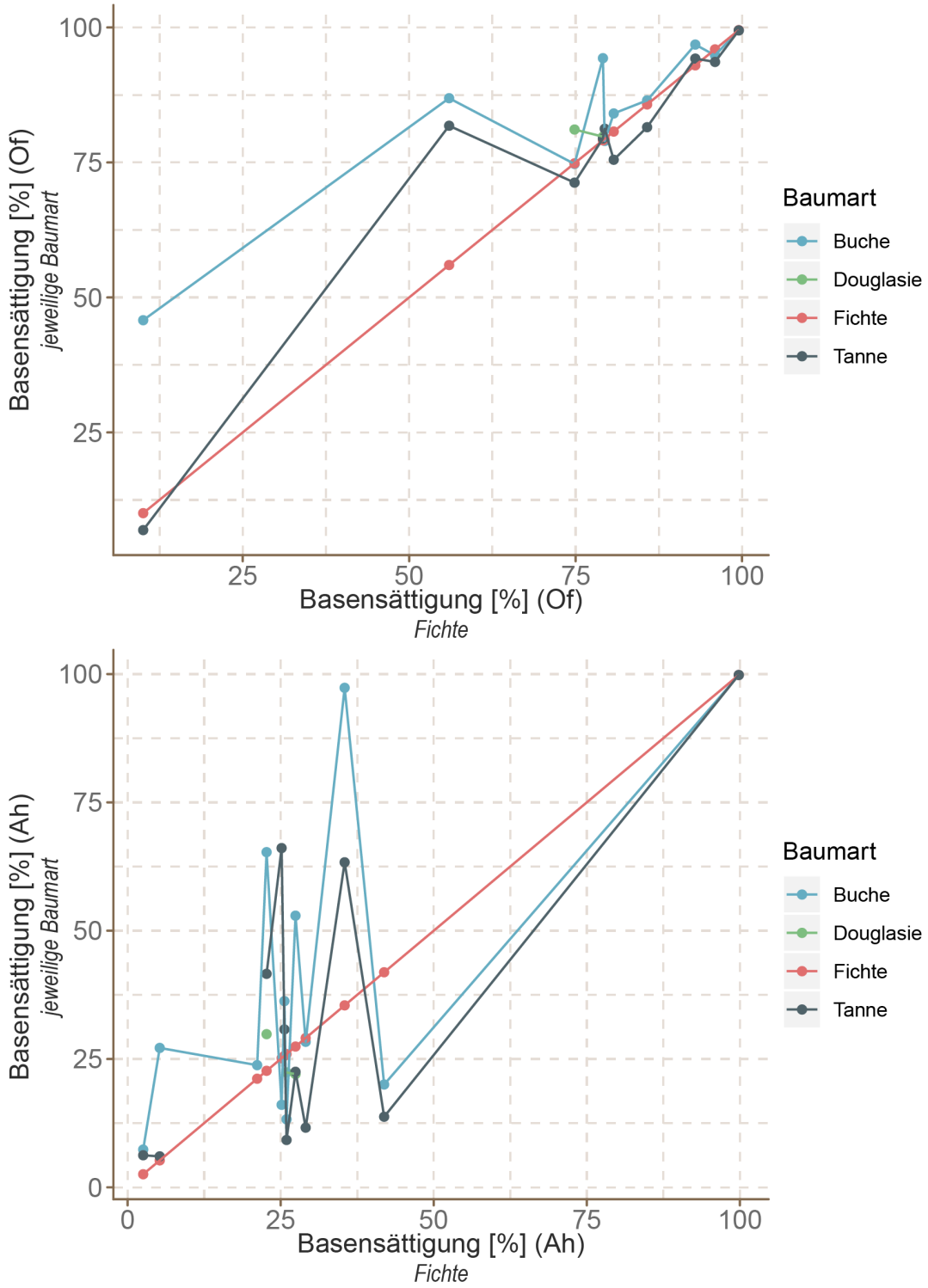


Abbildung 39 - Ranggrafik der Mittelwerte der Basensättigung der verschiedenen Baumarten. Oben: Daten aus dem Of-Horizont, Unten: Darstellung aus dem Ah. Horizont. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1-Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Lini einen niedrigeren Mittelwert beschreiben.

1.2.4 Phosphor im Waldökosystem

In *Tabelle 7* sind falle signifikanten Unterschiede im Gehalt an Zitronensäure-extrahierbarem Orthophosphat-P zwischen Fichte und Tanne und Fichte und Buche zusammengefasst. In *Abbildung 40* sind die Ergebnisse für die Auflage und für den minaeralischen Oberboden aufgeteilt nach Standorttyp dargestellt. In *Abbildung 41* sind die Ranggrafiken für Orthophosphat-P-Gehalte über alle Standorte und Beprobungstiefen dargestellt. Am größten ist der Einfluss der Baumart auf die P-Verfügbarkeit im Mineralboden auf staunassen und sauren Standorten (*Abbildung 41*). Auf solchen Standorten ist die Verfügbarkeit unter Tanne am größten. Dies könnte damit erklärt werden, dass diese Baumart in der Lage ist, auch in den staunassen Horizonten zu wurzeln und dort P aufzunehmen. Die Fichte führt evtl. durch eine Versauerung im Oberboden zu einer Mobilisierung von P, während die Böden unter Buche die geringste P-Verfügbarkeit aufweisen. Diese Reihenfolge findet sich von der Tendenz her auch in der Humusauflage. Auf sauren Standorten ohne Staunässe scheint hingegen die Buche ähnlich wie die Tanne P aus dem Unterboden aufzunehmen, das sich dann im Laufe der Zeit im Oberboden anreichert und dort zu einem Anstieg der P-Gehalte gegenüber den Fichtenreinbeständen führt. Erstaunlich ist, dass auf den P-ärmsten Standorttyp – den Carbonatstandorten, der P-Medianwert unter Buchen höher liegt als unter Fichten (siehe auch *Abbildung 41*), obwohl die stärkere Versauerung unter Fichten zur Mobilisierung von P beitragen sollte. Hier könnte es sein, dass baumartenspezifisches Aneignungsvermögen zur Mobilisierung von P unter Buchen führt ohne, dass gleichzeitig eine Absenkung des pH-Wertes eintritt.

Tabelle 7– Zusammenfassung der signifikanten Unterschiede (p<0,05) der PO_4^{3-}-P-und Gesamt P Gehalte [mg/g] auf den verschiedenen Standorten zwischen Buche-Fichte und Tanne-Fichte. Ein „+" bedeutet eine signifikante Erhöhung im Vergleich zur Fichte während ein „-" eine signifikante Senkung im Vergleich zur Fichte bedeutet.

Standort	Tiefe	Baumart	PO_4^{3-}-P	P_{tot}
Freising	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
Villingen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	+	+
		Tanne		+
Ellwangen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	-	
		Tanne		
Ravensburg*	Auflage	Buche	*(+)*	*(+)*
		Tanne	*(+)*	*(+)*
	Mineral	Buche	*(-)*	*(-)*
		Tanne	*(-)*	*(-)*
Moslooh	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	-	
		Tanne		
Zinnschützweiher	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Giersberg	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		

Standort	Tiefe	Baumart	PO_4^{3-}-P	P_{tot}
Königsbronn	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Douglasie		-
		Tanne		-
Ravenbsurg2	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche	*(-)*	*(-)*
		Tanne		
Ravensburg3	Auflage	Buche		
		Douglasie		
		Tanne		+
	Mineral	Buche	+	
		Douglasie		
		Tanne		
Thurner	Auflage	Buche		+
		Tanne		
	Mineral	Buche		
		Tanne		
Schwenningen	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		+
		Tanne	+	+
Ruhpolding	Auflage	Buche		
		Tanne		
	Mineral	Buche		-
		Tanne	+	

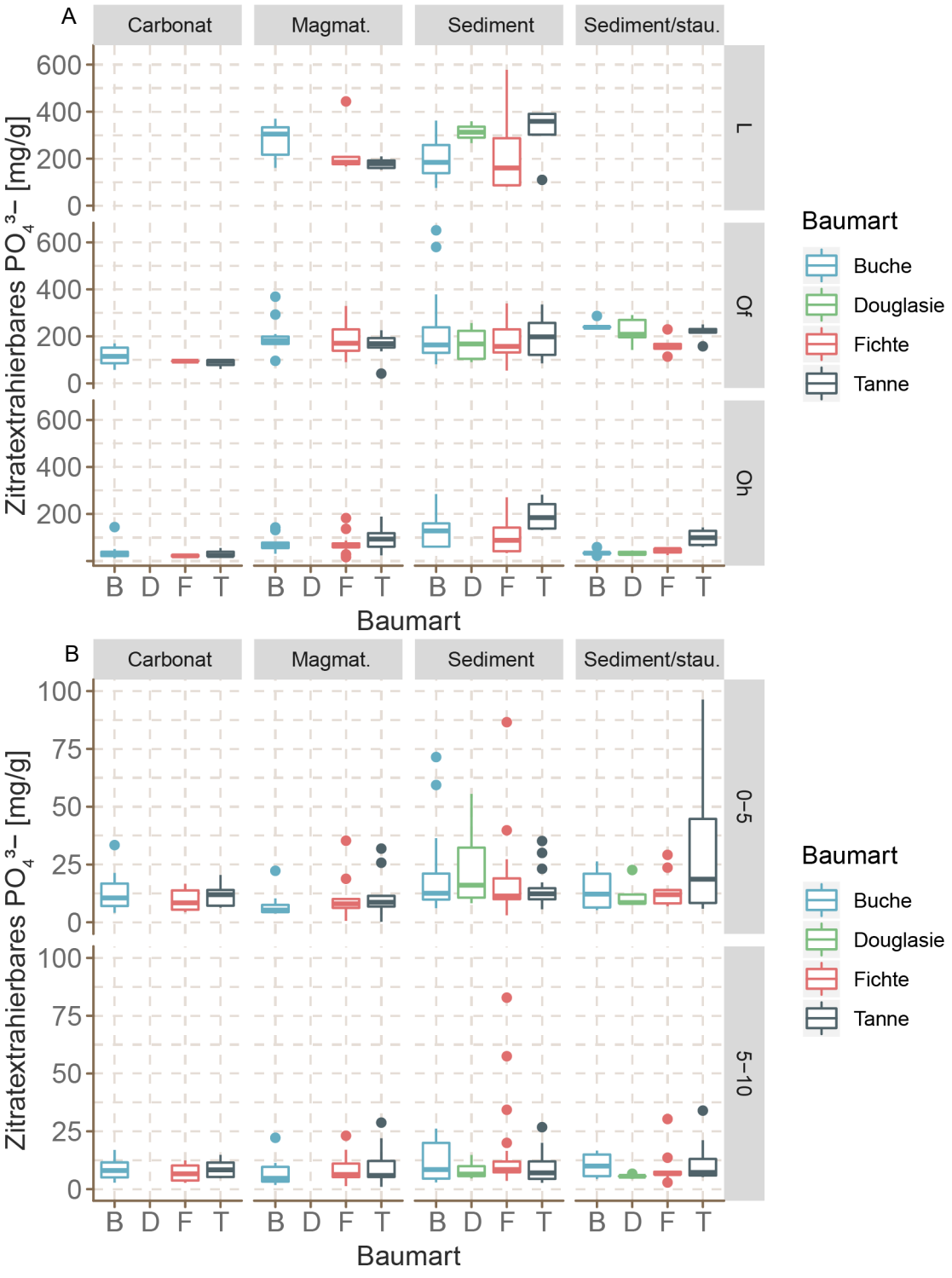


Abbildung 40 – Box-Plots der Gehalte an Zitronensäureextrahierbarem PO_4^{3-} -P [mg/g] der verschiedenen Auflagenhorizonte und der Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 4 Standorttypen.

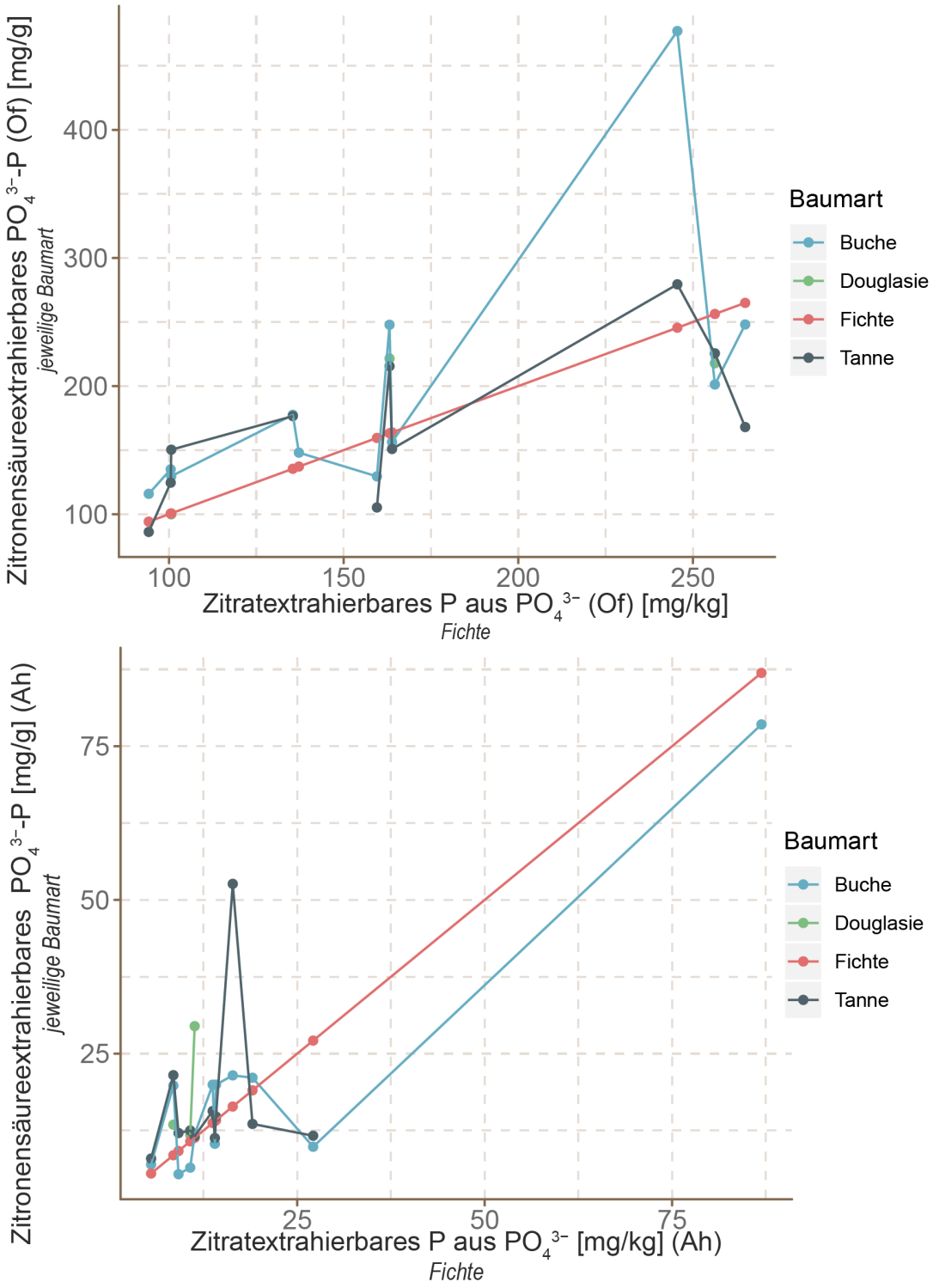


Abbildung 41 - Ranggrafik der Mittelwerte des zitratextrahierbarem Zitronensäure-extrahierbarem P aus PO43- -P der verschiedenen Baumarten. Oben: Daten aus dem Of-Horizont, Unten: Darstellung aus dem Ah. -Horizont. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1 Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Linie einen niedrigeren Mittelwert beschreiben.

1.2.5 Wurzellängendichten

Die Wurzellängendichten [cm/cm³] sind in *Abbildung 43* zusammengefasst. Zwischen den Standorten fällt auf, dass wir auf dem Carbonat- Standort in den oberen Mineralbodenschichten deutlich höhere Wurzellängen haben als auf den beiden sauren Standorten. Diese haben jedoch eine hohe Variabilität. Bereits in 5-10 cm Tiefe finden wir bei der Buche nur noch knapp die Hälfte der Wurzeln. Auf den sauren Standorten nimmt die Wurzellängendichte kontinuierlich ab. Wobei wir hier eine Tendenz sehen, dass die Buche deutlich mehr

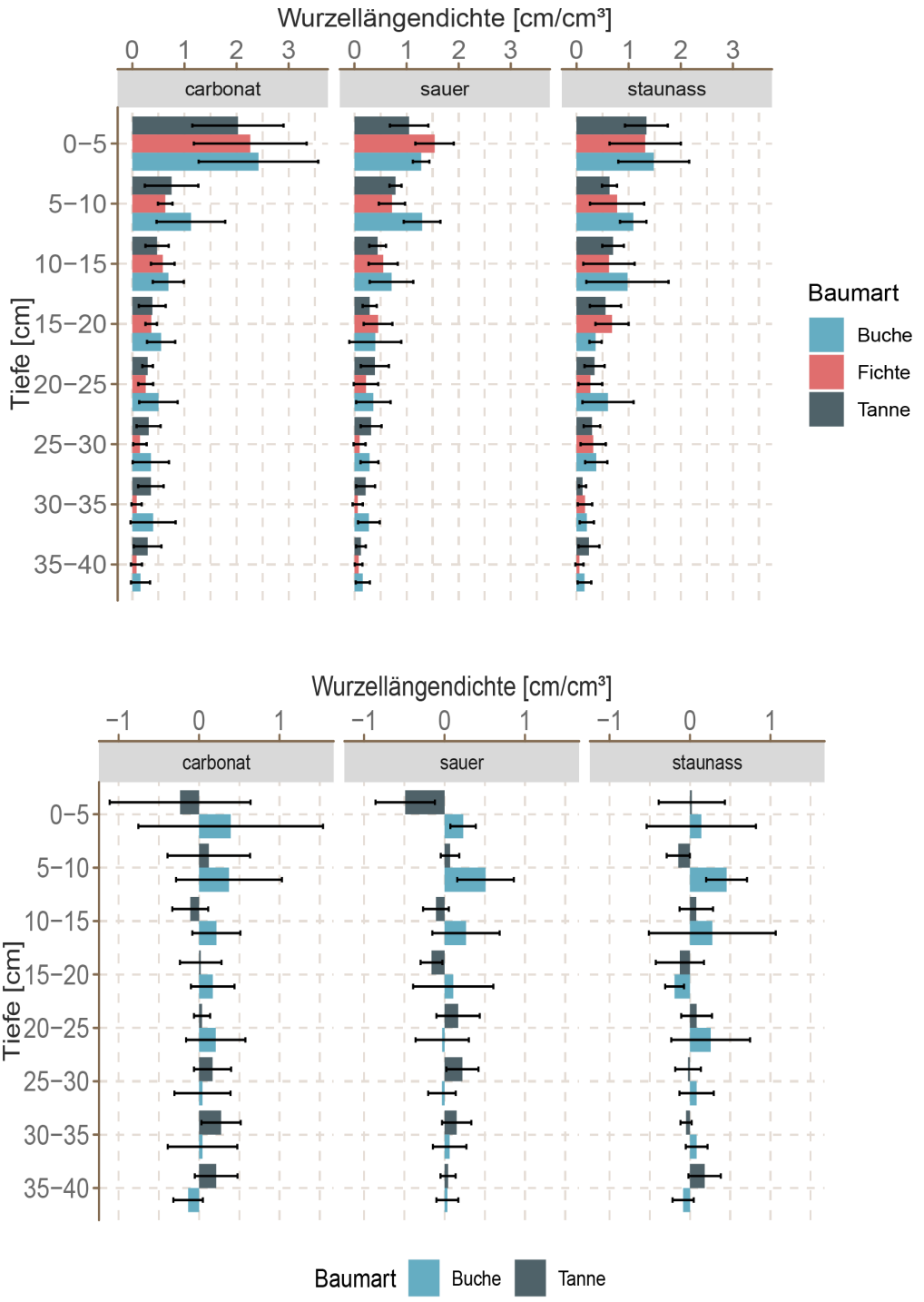


Abbildung 42 – Wurzellängendichten Verteilung [cm/cm³] auf verschiedenen Standorttypen (carbonat, sauer/frisch, sauer/staunass). Gezeigt sind die Mittelwerte und Standardfehler von einem1 (carbonatischem), 2 zwei (saueren) und 2 zwei (staunass)en Standorten

Wurzeln ausbildet und es auch schafft diese in tieferen Schichten auszubilden. Selbst auf dem staunassen Standort finden wir höhere Wurzellängendichten bei der Buche (ca. 50%). Auf staunassen Standorten hatten wir vermutet, dass die Tanne auf diesen dominiert.

1.2.6 Aggregatstabilität

1.2.6.1 Dynamische Bildanalyse

Die dynamische Bildanalyse zeigt einen signifikanten Unterschied, der auf den vier analysierten Standorten ähnlich ausgeprägt ist (siehe *Abbildungen 25, 44 und 45*). Wir sehen, dass vor allem die Tanne die größten Aggregate bildet, gefolgt von Fichte und teilweise mit deutlichem Abstand die Buche (siehe *Abbildung 44*). Diese wasserstabilen Aggregate erreichen bei der Tanne durchweg eine Größe von bis zu 800 µm, wohingegen wir unter der Buche dies nur auf einem Standort finden (*Abbildung 41 B*). Im Durchschnitt sind diese ca. 200 µm kleiner. Die Aggregate unter Fichte nehmen dabei einen intermediären Platz ein, und schwanken sehr stark auf den verschiedenen Standorten (500-800 µm). In Freising, auf einem staunass geprägten Standort führt die Fichte wie die Buche zur Bildung relativ kleiner Aggregate während es in Villingen, einem sauren Standort, ebenso wie unter Tanne auch unter Fichte zur Bildung relativ großer Aggregate kommt.

Die Tanne scheint die Ausbildung größerer Aggregate zu begünstigen, jedoch sind diese Aggregate auch

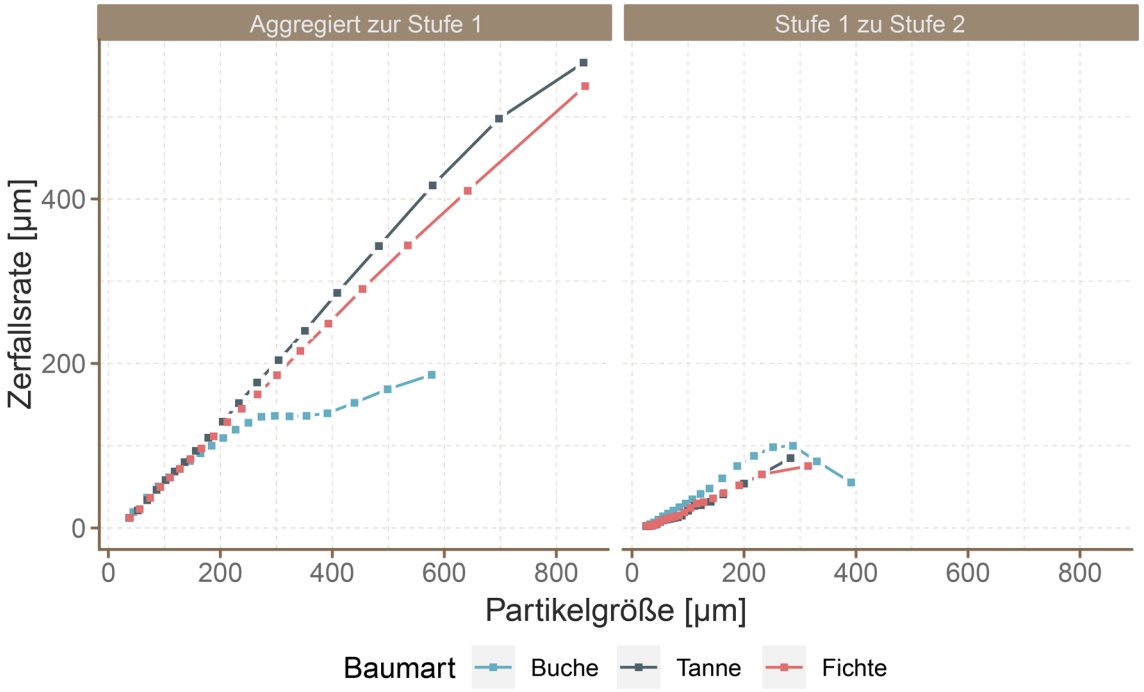


Abbildung 43- Zerallsrate der Bodenaggregate aus der Bodentiefe 5-10 cm am Standort Schwenningen als Funktion der Aggregatgröße bei schwacher (links) und nachfolgend stärkerer (rechts) Störung durch Ultraschall.

durchweg die instabilsten und zerfallen sehr schnell schon bei der Einwirkung relativ geringer mechanischer Kraft. Auf dem Standort Schwenningen finden wir beispielsweise eine Zerfallsrate von fast 500 µm. Dies bedeutet, dass die Aggregate nach der Applikation von mechanischen Kräften sehr stark (z.B. Regentropfen, mechanischer Druck, etc.) zerfallen. Auf dem Standort Ellwangen hingegen fällt diese Zerfallsrate deutlich geringer aus, bleibt jedoch im Vergleich zur Fichte und Buche deutlich höher. Im Vergleich dazu entstehen

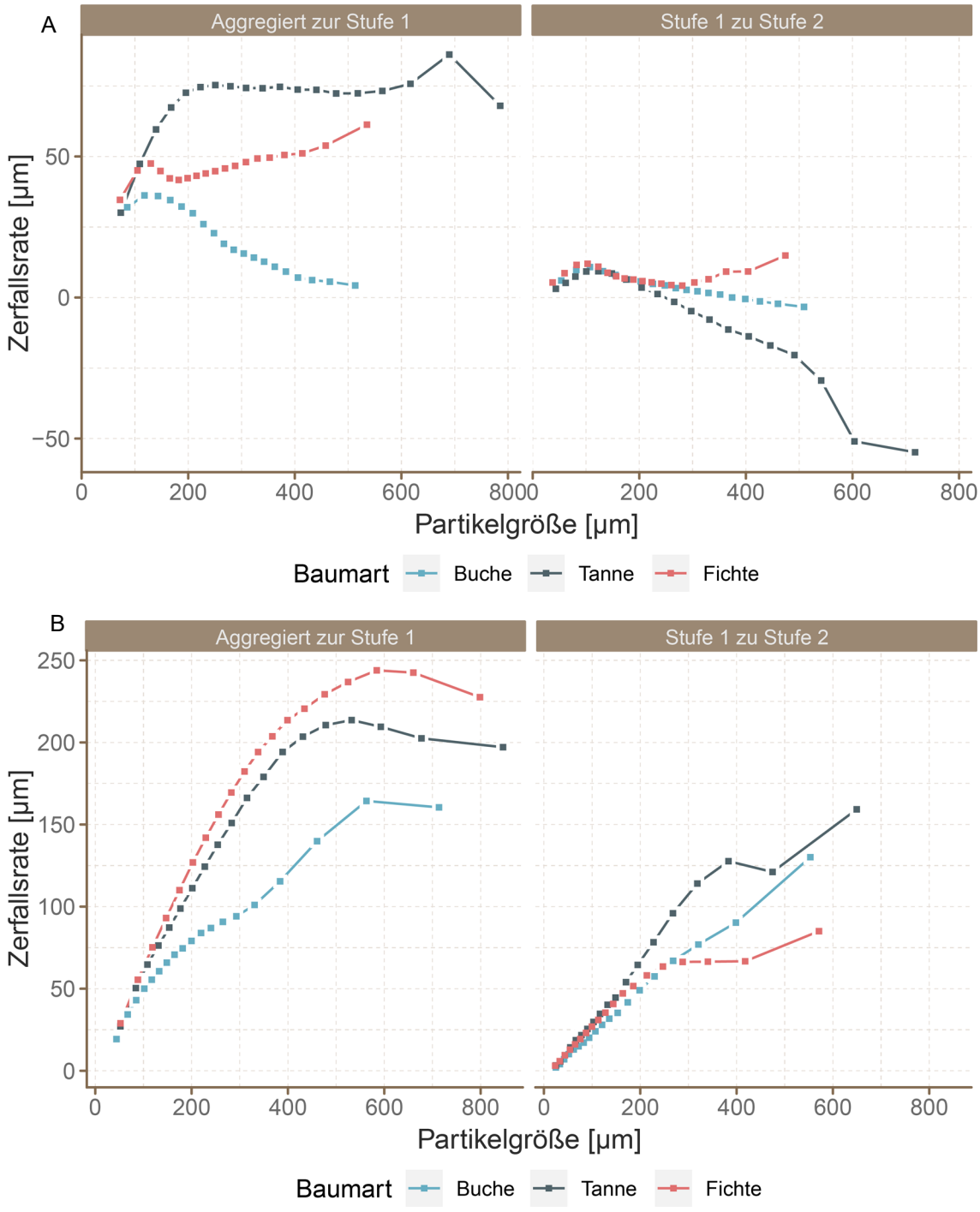


Abbildung 44 - Zerfallsrate der Bodenaggregate aus der Bodentiefe 5-10 cm am Standort A: Ellwangen, und B: Villingen als Funktion der Aggregatgröße bei schwacher (links) und nachfolgend stärkerer (rechts) Störung durch Ultraschall.

unter Buchen zwar die kleinsten Aggregate, diese sind jedoch verhältnismäßig stabil. Bezieht man die zweite Beschallung mit ein, sehen wir, dass die Buche insgesamt die geringstens Zerfallsraten über die zwei Stufen aufweist.

Die Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Aggregatgröße haben, scheinen sich unter den Baumarten zu unterscheiden. So finden wir unter Buche eine Korrelation der organischen Kohlenstoffkonzentration und der Aggregatgröße (siehe *Abbildung 46*), welche unter den anderen Baumarten weniger stark oder gar nicht ausgeprägt ist. Diese deutet darauf hin, dass die organische Substanz, welche durch die Buche in das System gelangt andere Eigenschaften aufweist als die der Tanne. Ein ähnliches Ergebnis haben wir bereits bei der

Kationenaustauschkapazität feststellen können (siehe *Kapitel 1.2.3.*). Die Korrelation finden wir jedoch nur für größere Aggregate was darauf hindeutet, dass der organische Kohlenstoff Aggregate erst ab einer Größe von ca. 300 µm beeinflusst ($p < 0,05$). Für die Fichte finden wir eine ähnliche Korrelation mit der organischen Bodensubstanz, jedoch mit flacherer Steigung.

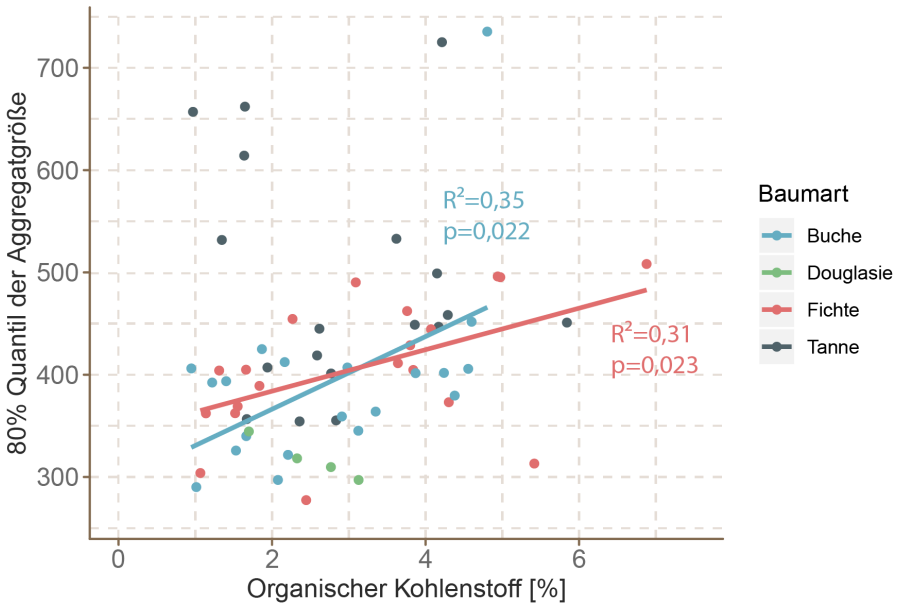


Abbildung 45 – Korrelation der Konzentration an organischem Kohlenstoff [%] und der Aggregatgröße (80 % Quantil) [µm]. Lineare Regressionsgeraden werden bei signifikanter Korrelation gezeigt. Eingeflossen sind die Werte der Bodentiefen 5-10 cm von insgesamt 4 Standorten an denen die Aggregatgrößenverteilung gemessen wurde.

1.2.6.2 Dichtefraktionierung

In *Abbildung 47* sind die Anteile die Anteile der Gehalte an organischen Kohlenstoff einzelnen Dichtefraktionen am Gesamtkohelnstoffgehalt auf drei Standorttypen (carbonatisch, Sandstein/sauer und Sandstein/staunass) dargestellt. Auf den Carbonat-Standorten sehen wir einen klaren Trend, dass die Anteile der fLF und oLF unter Tanne (fLF: > 6 %, oLF: > 23 %) am höchsten sind, gefolgt von Fichte und der Buche (fLF <2,5 %, oLF < 20 %). Im Gegenzug sehen wir, dass der Anteil der HF unter Buche mit knapp 80 % am höchsten ist, gefolgt von der Fichte und Tanne, welche den niedrigsten Anteil aufweist (knapp über 70 %).

Eine ähnliche Tendenz finden wir auch auf den sauren Standorten. Auch hier finden wir die höchsten Anteile an fLF unter Tanne (zwischen 12-20 %) gefolgt von der Fichte und Buche. Nur die Douglasie hat noch geringere fLF Anteile als die Buche. Bei der okkludierten Fraktion, also der organischen Substanz, die in Aggregate eingeschlossen ist, sehen wir auf den beiden sauren Standorttypen

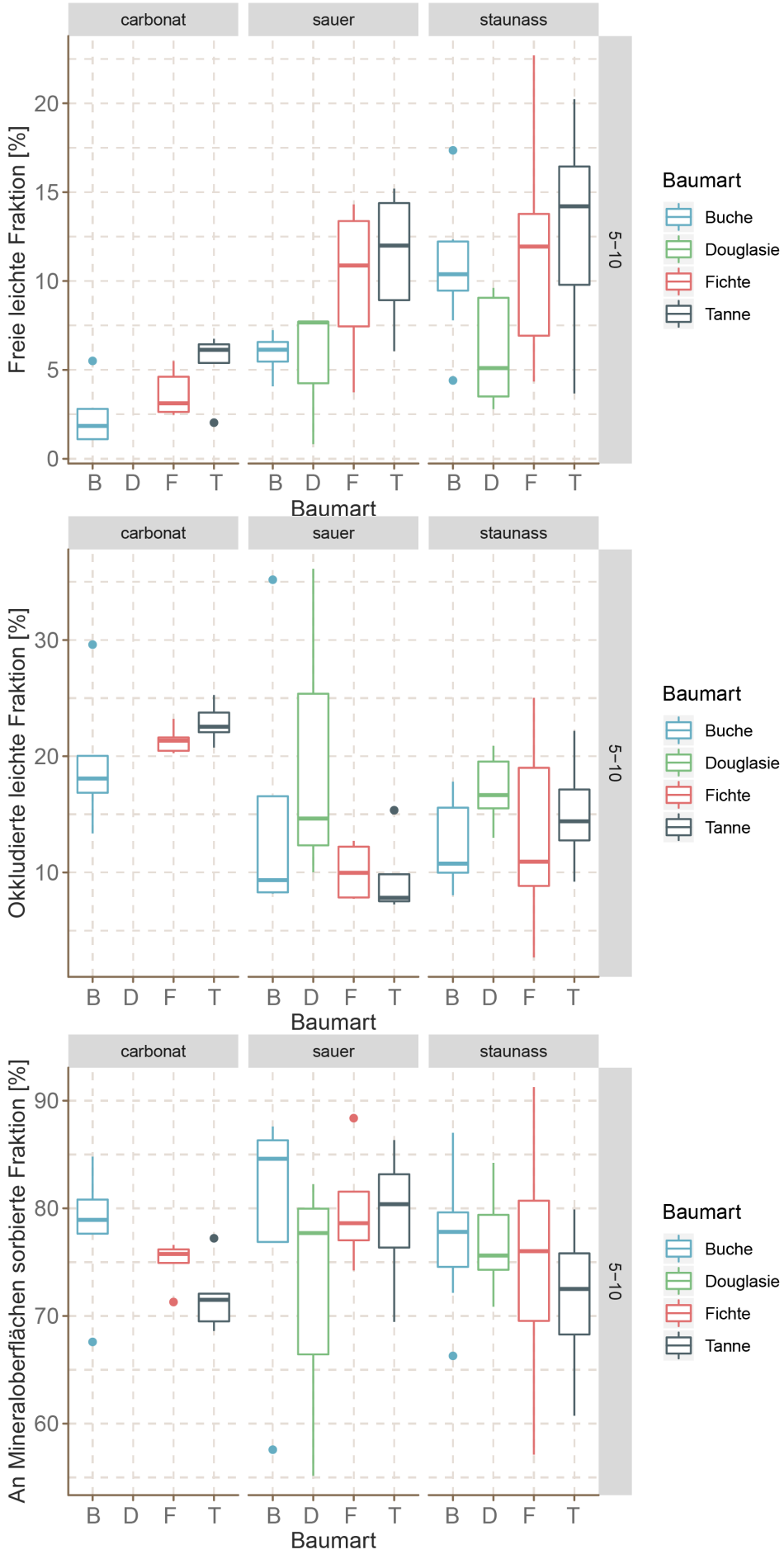


Abbildung 46 - Box-Plots der Gehalte an organischem Kohlenstoff in den verschiedenen Fraktionen der Dichtefraktionierung. fLF = Freie leichte Fraktion, oLF = Okkludierte leichte Fraktion, HF = „heavy" Fraktio jeweils in der Bodentiefe 5-10 cm unter den jeweiligen Baumarten klassifiziert nach den 3 Standorttypen.

eine ähnliche Verteilung. Die Douglasie, welche bei der fLF noch sehr geringe Anteile hat, hat hier die höchsten Anteile. Auf dem sauren Sandstein Standort hat die Buche die zweit höchsten Anteile, gefolgt von Fichte und Tanne. Auf dem staunassen Sandstein-Standort sehen wir, dass die Tanne ähnliche hohe Anteile wie die Douglasie in der oLF vorweist. Die Fichte erreicht hier ebenfalls sehr hohe Anteile, diese schwanken jedoch sehr stark (5 – 25 %). Der Median der Buche liegt hier deutlich unter dem der anderen Baumarten. Die Buche hat die höchsten Anteile an HF auf dem sauren Sandstein Standort gefolgt von der Tanne und Fichte. Am niedrigsten ist der Anteil an HF bei der Douglasie. Auf dem staunassen Standort haben wir einen Gradieten von hoch zu niedrigem Anteil der HF (Buche > Douglasie > Fichte > Tanne).

In *Abbildung 48* sind die C/N Verhältnisse der Fraktionen fLF, oLF, und HF dargestellt. Das C/N Verhältnis ist in diesem Fall ein Maß dafür, wie weit abgebaut die organische Substanz in der jeweiligen Fraktion ist. Die HF Fraktion hat hier deutlich die niedrigsten Verhältnisse und schwankt zwischen 10 und 15. Die okkludierte Fraktion hat die weitesten Verhältnisse und schwankt zwischen 30 und knapp 40. Sie ist auch die Fraktion, die am ehesten Unterschiede zwischen den verschiedenen Standorten aufweist, zwischen den Baumarten sind Unterschiede am selben Standort eher gering. Die freie leichte Fraktion liegt in der Mitte und schwankt zwischen 25 und 30.

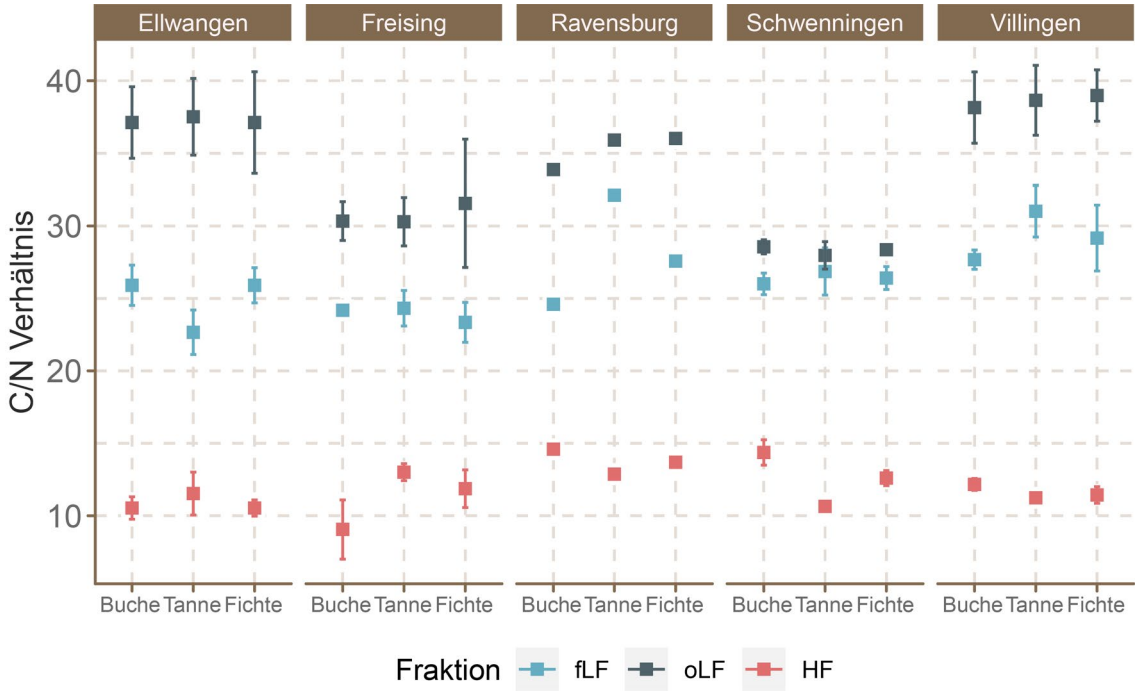


Abbildung 47 – C/N Verhältniss der einzelnen Dichtefraktionen (fLF: freie leichte Fraktion; oLF: okkludierte leichte Fraktion; HF: „heavy“ (schwere) Fraktion auf den verschiedenen Standorten.

Diese Fraktionen der organischen Substanz und ihre Anteile am Gesamtpool beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften des durchschnittlichen C/N-Verhältnisses des Bodens. Über die Anteile der einzelnen Schwerefraktionen und deren C/N-Verhältnisse ist man in der Lage, das Mittel des Bodens zu berechnen. Damit ist das C/N-Verhältnis eine Funktion der Menge der jeweiligen Fraktionen (fLF, oLF, HF) und der Eigenschaften der Streu, welche maßgeblich den Abbaumechanismus beeinflusst. Das heißt, wenn durch den Input von Streu mit anderen Eigenschaften, andere Abbaumechanismen (mikrobieller Abbau, Bioturbation, etc.) angeregt werden, ist eine Verschiebung von einer Fraktion in die andere möglich, was zu einer Veränderung des C/N-Verhältnisses führt.

1.2.6.3 Wasserspannungskurve

Die Daten der Wasserspannungskurven sind in *Abbildung 49* zusammengefasst. Die Kurve zeigt deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Standorttypen. In Freising, auf dem staunass geprägtem Standort finden wir deutlich höhere Grobporenanteile bei der Tanne gefolgt, von Buche und Douglasie, welche eine sehr ähnliche Grobporenverteilung haben. Unter dem Fichtenbestand finden wir über alle Stufen hinweg den geringsten Anteil. Diese Verteilung ist in Einklang mit den Daten der Aggregierung (siehe *Kapitel 1.2.6*) bei denen wir unter Tanne die Bildung sehr großer Aggregate beobachten konnten.

Auf dem Carbonat-Standort finden wir einen großen Anstieg der Porengrößen unter Buche, während die Fichte und Tanne eine fast identische Verteilung aufweisen. Auf dem sauren Standort Villingen finden wir allgemein die größten Standardfehler was auf deutlich inhomogenere Verteilung hindeutet. Auf diesem sauren Standort finden wir unter der Fichte die höchsten Anteile an größeren Poren, gefolgt von Buche und Tanne, welche eine sehr lineare Verteilung aufweist. Diese Daten zeigen keine Korrelation mit den Aggregatstabilitäten. Dies könnte darauf hindeuten, dass die digitale dynamische Bildanalyse und die daraus entstehende Aggregatgrößenverteilung und -stabilität sensitiver gegenüber anderen Eigenschaften des Bodens ist.

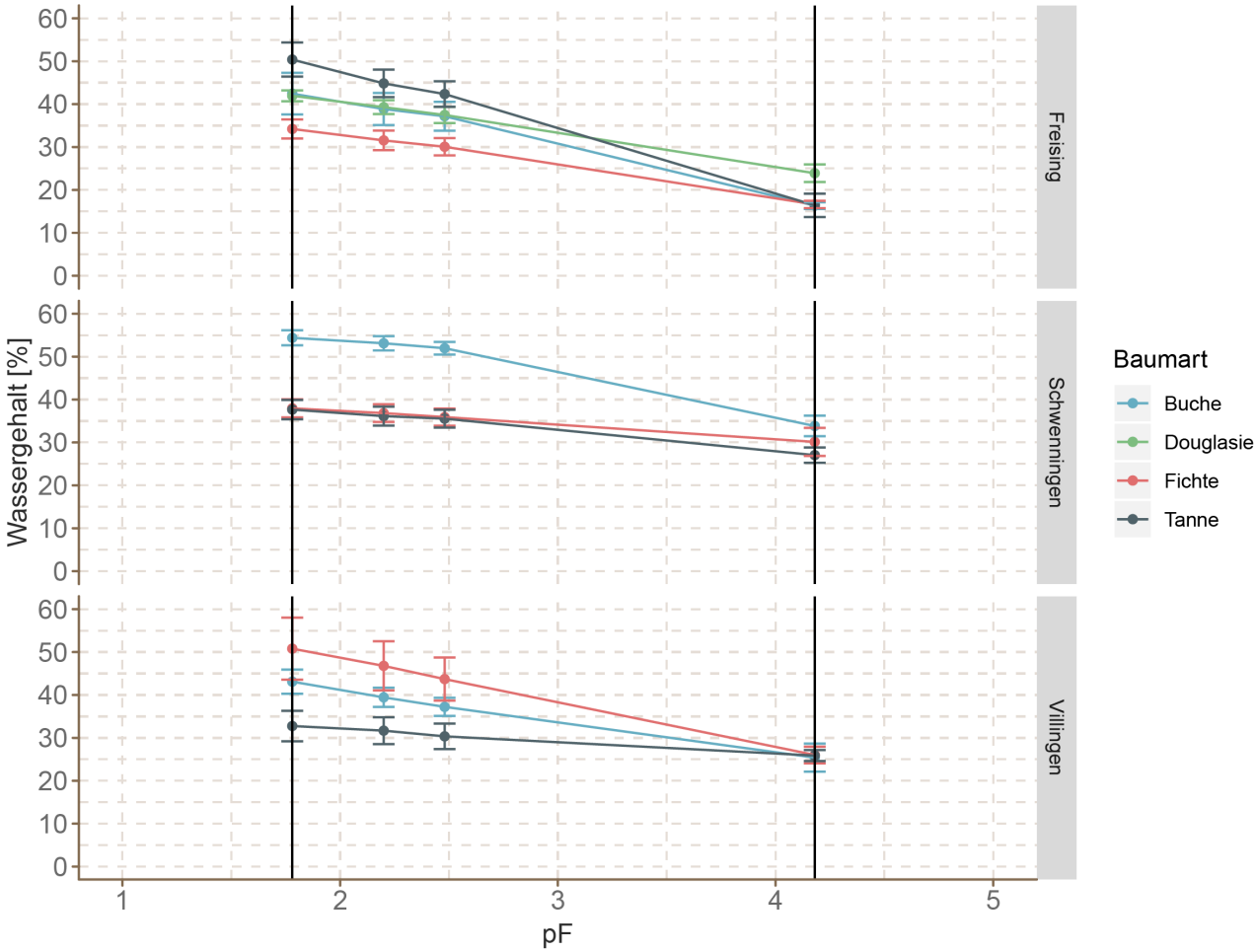


Abbildung 48 - Wasserspannungskurven unter der jeweiligen Verjüngung verschiedener Baumarten in der Bodentiefe 5-10 cm an den Standorten Freising, Schwenningen und Villingen.

1.2.7 Radiocäsium als Tracer für die Bioturbation

Die Ergebnisse der Tiefenverteilung vom Radiocäsium der vier hochaufgelösten Standorte sind in *Abbildung 50* zusammengefasst. Dargestellt sind die Ergebnisse bis in eine Tiefe von 25 cm, unterhalb dieser konnten wir auf den Standorten keine Gehalte oberhalb der Nachweisgrenze (ca. 5 Bq) mehr messen. Wir sehen einen starken Gradienten über die Standorte hinweg. In Ravensburg finden wir noch den Großteil vom ^{137}Cs in der Auflage. Dieser Standort ist noch durch einen ausgeprägten Rohhumus geprägt. Wir finden an diesem Standort eine starke Erhöhung des pH-Wertes und Anstieg der Nährstoffversorgung unter der Buche (siehe *Kapitel 1.2.3, Abbildung 34*), was auch durch das niedrigste Verhältnis von Radiocaesium in der Auflage im Verhältnis zum Mineralboden bestätigt wird (siehe *Tabelle 8*). Man sieht bereits ein deutlich niedrigeren Anteil von ^{137}Cs bei der Buche im Vergleich zur Fichte, was auf eine stärkere Bioturbation hinweist. Dieses Verhältnis ist auf den drei anderen Standorten ebenfalls zu beobachten. Überall ist unter Buche das niedrigste Verhältnis von Radiocaesium zwischen Auflage und Mineralboden zu finden. In Freising und Ellwangen finden wir bereits eine stärkere Verlagerung des Radiocaesium aus der Auflage in den Mineralboden, dies wird auch von dem Verhältnis in *Tabelle 8* widergespiegelt. Die Werte für beide Standorte bewegen sich zwischen 3,58 und 11,49. Wobei die Buche auf beiden Standorten die niedrigsten Werte (4,05 bzw. 3,58) und die Tanne durchweg die höchsten Verhältnisse aufweist (11,49 bzw. 5,64). Die hohen Werte unter den Tannen können einerseits durch erhöhte Aufnahme über die Wurzeln und nachfolgende Deposition über Nadelstreu, oder andererseits durch langsamere Inkorporation von organischer Streu in den Mineralboden erklärt werden.

Auf dem Standort Schwenningen ist über 99% des vor 30 Jahren deponierten Radiocaesiums aus der Auflage im Mineralboden gespeichert (*Abbildung 50*). Der Peak befindet sich in ca. 7 cm Tiefe. Durch die schnelle Umsetzungsrate von der Auflage und hohe biologische Aktivität von Organismen auf Carbonat-Standorten kann man diese Verlagerung erklären.

Tabelle 8 – Verhältnis von Radiocaesiumvorrat in der Auflage und dem Mineralboden bis 40 cm. Niedrigere Werte bedeuten, dass weniger ^{137}Cs in der Auflage vorhanden ist.

	Fichte	**Buche**	**Tanne**	**Douglasie**
Schwenningen *Carbonat*	0,904	0,304	0,366	
Ravensburg *Moränenlehm*	28,49	22,96	38,15	
Ellwangen *Sedimentgestein*	7,58	4,05	11,49	
Freising *Sedimentgestein*	4,8	3,58	5,64	4,65

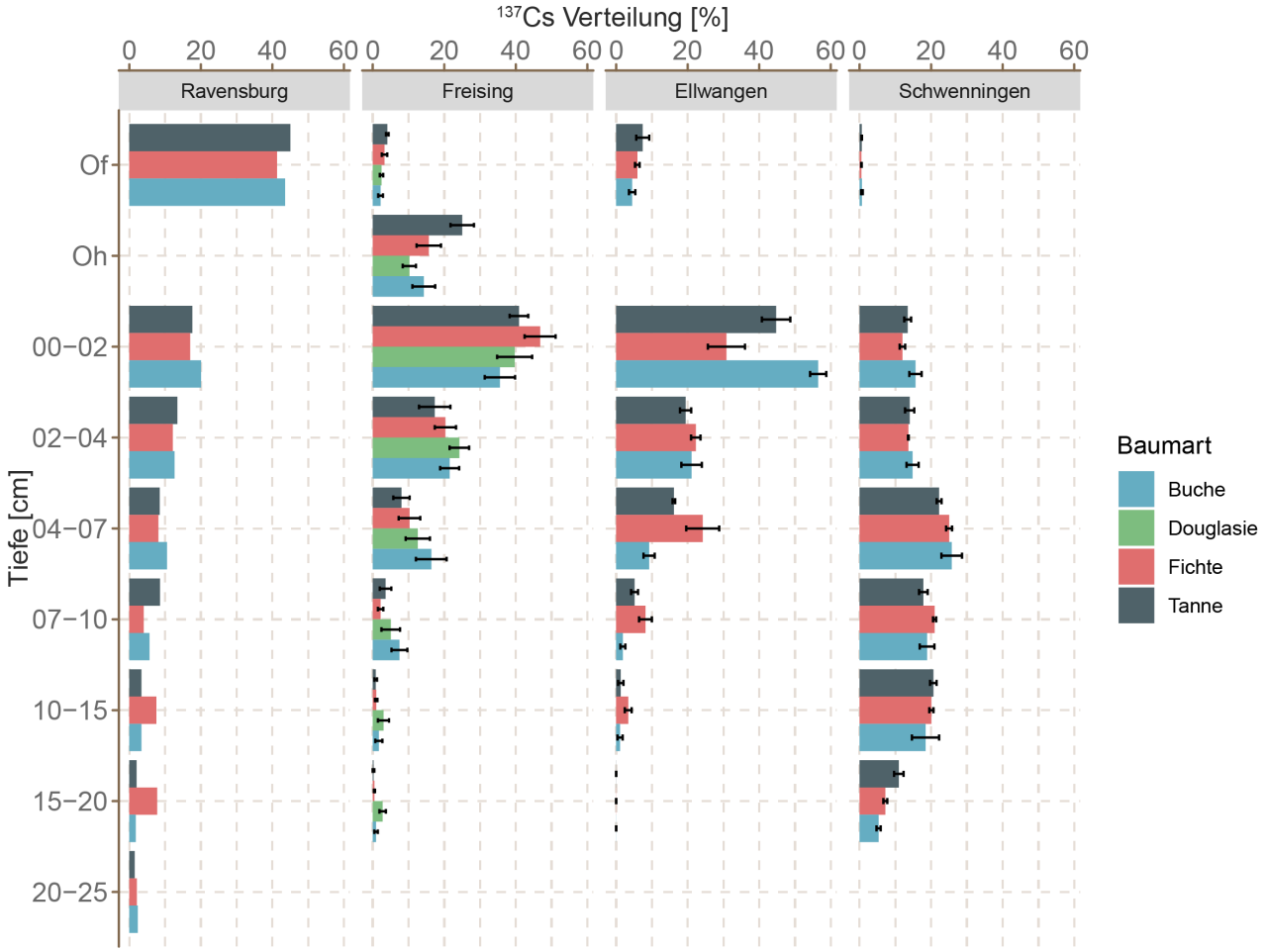


Abbildung 49 - Prozentuale Radiocaesiumverteilung [%] an den angegebenen Standorten. Die Fehlerbalken stellen den Standardfehler dar, der nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Standardfehlern der jeweiligen Mittelwerte berechnet wurde. Am Standort Ravensburg wurden Mischproben untersucht.

1.2.8 Nährstoffgehalte der Nadel- und Blattproben

In der *Abbildung 51* sind die molaren Nährelementkonzentrationen, normiert auf 100 Stickstoffatome, dargestellt. Die grünen Flächen stellen den optimalen Versorgungsbereich dar, die blauen beschreiben ein leichtes Ungleichgewicht, während die Punkte im roten Bereich eine Unter- oder Überversorgung des jeweiligen Elements im Verhältnis zum Stickstoff darstellen. Die Tanne hat somit das höchste Aneignungsvermögen der drei Baumarten. Dies ist vor allem den Nährelementen Phosphor, Calcium, und Kalium der Fall. Insgesamt fällt auf, dass die Buche für die Nährelemente K, Mg, und Ca deutlich öfter im Optimal Bereich der Nährelementverhältnisse zu Stickstoff liegt als Fichte und Tanne, während für das Nährelement Phosphor die Tanne diese Spitzenposition übernimmt. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung, dass auf vielen Standorten bei dem Vergleich der drei Baumarten die Buche hinsichtlich der austauschbaren Kationen die höchsten Konzentrationen zeigt, anders als hinsichtlich des verfügbaren P, bei dem die Buche oft ähnliche oder sogar niedrigere Bodenkonzentrationen aufweist als die anderen beiden Baumarten (siehe *Abbildungen 37 und 40*).

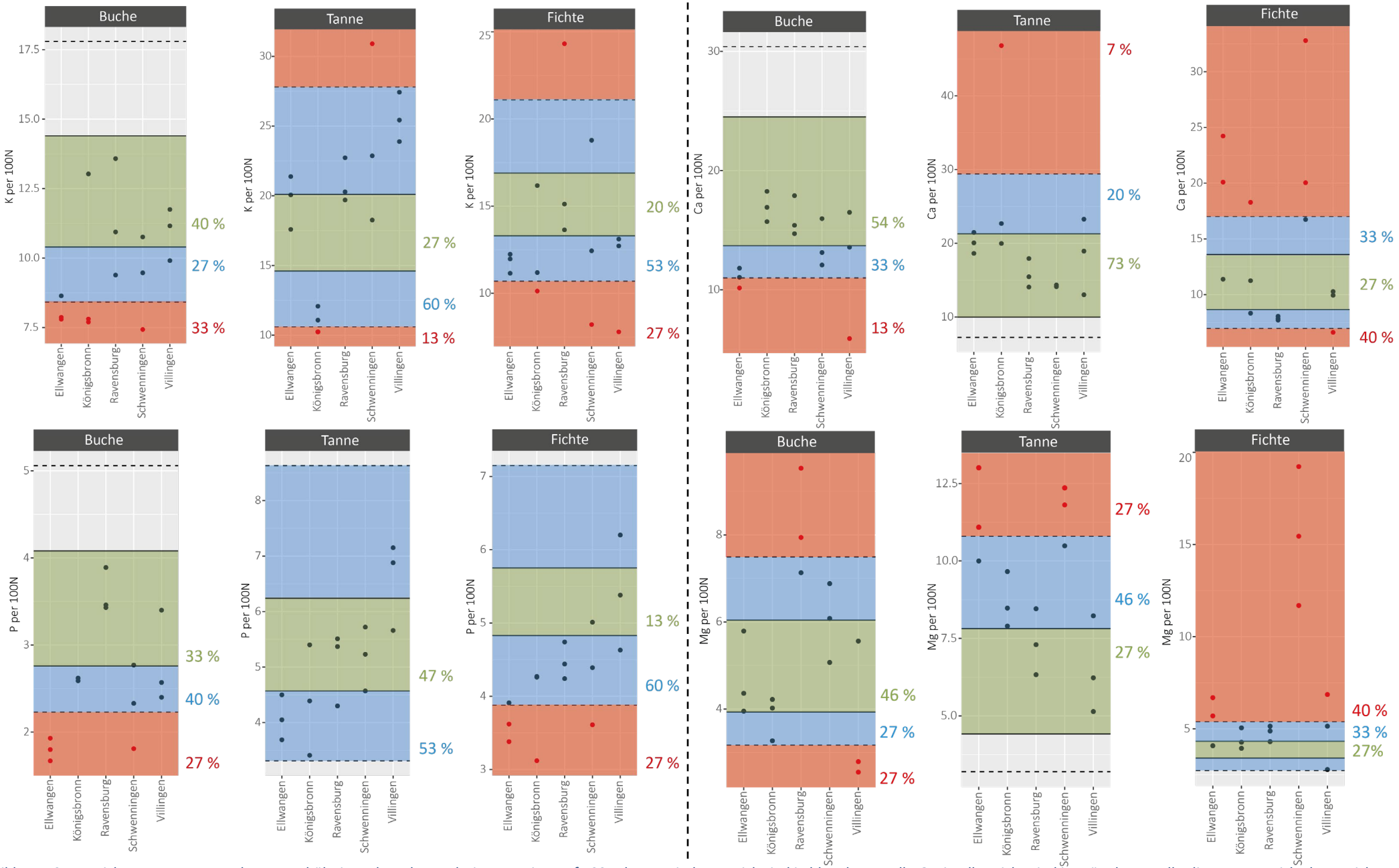


Abbildung 50 - Bereiche ausgewogener Elementverhältnisse als molare Relation normiert auf 100N, harmonische Bereich sind in blau dargestellt, Optimalbereiche sind in grün dargestellt, die roten Bereiche kennzeichnen die Verhältnisse außerhalb der ausgewogenen Bereiche (nach Göttlein, 2016). Die prozentuelen Angaben geben den jeweiligen Anteil an Strichproben einer Baumart in den entsprechenden Bereichen wieder.

1.3 Konzeptmodell zur Erklärung des Baumarteneinflusses

Aus den im vorangehenden Text vorgestellten Ergebnissen leiten wir folgendes Konzeptmodell für den Baumarteneinfluss auf Waldböden ab:

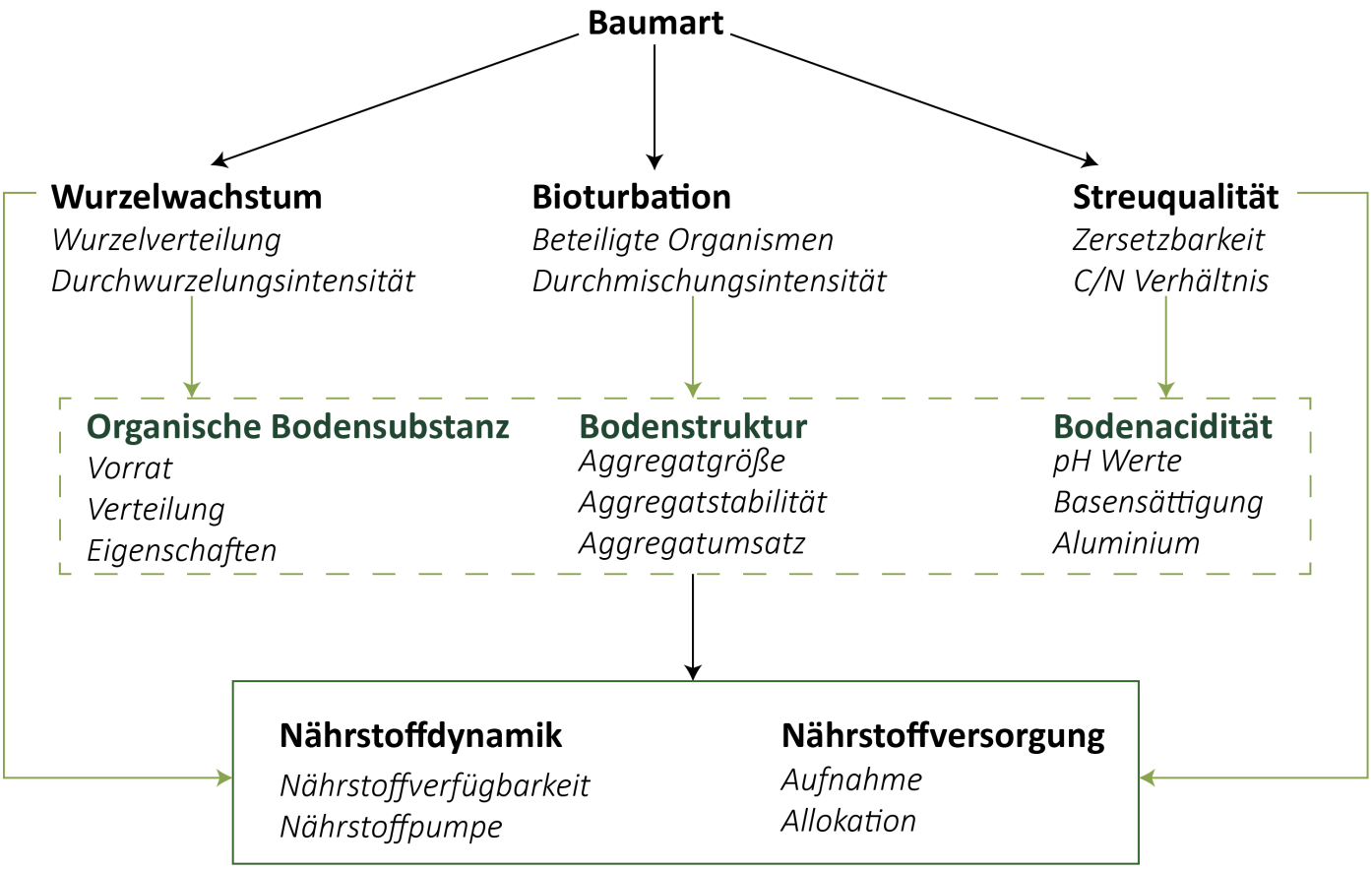


Abbildung 51 – Konzeptmodell zur Erkläruing des Baumarteneinflusses

Drei biologische Einflussfaktoren sind entscheidend für den Einfluss der Baumart auf Böden: das Wurzelwachstum, die Bioturbation und die Streuqualität (siehe *Abbildung 44, Tabelle 8*). Diese drei Faktoren sind für die hier untersuchten Baumarten unterschiedlich ausgeprägt, aber die Baumarten-spezifische Ausprägung wird immer auch von den Standortbedingungen gesteuert. Daraus ergibt sich, dass der Baumarteneinfluss vom standörtlichen Kontext abhängt. So kann zum Beispiel auf einem Carbonatstandort unter Buche deutlich mehr Bioturbation erfolgen als unter Fichte, während auf einem sehr sauren Standort weder unter Fichte noch unter Buche tiefgrabende Regenwürmer an der Bioturbation beteiligt sind (siehe *Tabelle 8*).

An der großen Variabilität der Baumarteneinflüsse innerhalb der hier gewählten Standortklassen ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die vorgenommene Klassifikation zwar in manchen Fällen hilft, den Baumarteneinfluss besser zu erklären, aber nicht vollkommen ausreicht. Ein Faktor, der bei dieser Klassifikation nicht berücksichtigt wurde ist vermutlich der Tiefengradient der Nährstoffgehalte im Bodenprofil. Der Einfluss der Durchwurzelungstiefe auf die Bodeneigenschaften steigt mit zunehmendem Gradienten. Die Basenpumen-Wirkung von Buche und Tanne ist zum Beispiel dann besonders groß, wenn wir Zweischichtprofile finden, mit deutlich höherer Nährstoffkonzentration im Unterboden (z.B. Königsbronn oder Ravensburg). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, der bei der Klassifikation nicht im Detail berücksichtigt

wurde, sich aber sicherlich auf Strukturbildungsprozesse auswirkt ist die Bodenart. Unter den Typ „metamorph und magmatisch“ fallen lehmige Sande genauso wie schluffige Lehme. Auch der Skelettgehalt und der Nährstoffstatus der Standorte könnte eine wichtige Rolle spielen.

Diese Einflussfaktoren steuern maßgeblich den Vorrat, die Stabilität und die Tiefenverteilung der organischen Bodensubstanz, die Bodenstruktur, Aggregatgröße und Stabilität, sowie die Bodenazidität (siehe *Abbildungen 25,27,29,44 und 45*). Diese direkt beeinflussten Bodeneigenschaften erklären dann in der Folge den indirekten Einfluss der Baumarten auf Nährstoffkreisläufe und Nährstoffverfügbarkeit im Boden.

1.4 Standortbezogener Einfluss der Baumart auf Bodeneigenschaften

Trotz der oben getroffenen Einschränkungen, erlaubt die grobe Klassifikation von Standorten nach Ausgangsgestein und Wasserhaushalt eine Beschreibung der zu erwartenden Baumarteneinflüsse, die bei der Baumartenwahl berücksichtigt werden sollte (*Tabelle 9*). Beachtet werden muss dabei, dass in unserer Studie nur das Stadium der Verjüngung mit noch vorhandenem Fichtenschirm berücksichtigt wurde. Die für die zukünftigen Mischbestände zu erwartenden Effekten sollten dann noch wesentlich stärker ausgeprägt sein.

Abbildung 52 - Waldumbaumaßnahmen wie hier im Mathislewald nahe Hinterzarten (Schwarzwald) finden seit mehr als 30 Jahren in vielen Regionen statt. In dem vorliegenden Projekt untersuchten wir den Einfluss 20-30-jähriger Voranbauten von Buche und Tanne unter Fichtenschirm. Die Verbesserung der Bodeneigenschaften durch diese Maßnahme in den zukünftigen Altbeständen könnte noch viel größer sein als hier beobachtet.

Tabelle 9 – Standortbezogener Einfluss der Baumart auf die Bodeneigenschaften.

	Carbonat		Sediment		Sediment/staunass		Magmat.	
Bioturbation	+	+	+	-	+	-		
Kohlenstoff	-	-	+	0	+	+	+	+
Phosphor	+	+	++	0	+	++	0	0
Kationen	0	0	++	0	+	++	0	0
	B	*T*	*B*	*T*	*B*	*T*	*B*	*T*

2. Verwertung

Die erzielten Ergebnisse werden den beteiligten Forstbetrieben zur Verfügung gestellt und könnten im Rahmen der Forsteinrichtung genutzt werde (Datenblatt für die Forstwirte). Weiterhin wollen wir Teilergebnisse in der AFZ veröffentlichen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Der Waldumbau ist ein zentrales Thema in der Waldwirtschaft und der Wissenschaft, wie z.B. auch in der aktuellen Zeitschrift proWald (Deutscher Forstverein e.v.) zu sehen ist (z.B. Artikel „Von Rot- und Weißtannen, Seite 9-11, proWALD, März 2017). Jedoch wird auch betont, dass es weiterhin viele ungeklärte Fragen bezüglich der Auswirkungen vom Waldumbau gibt.

4. Veröffentlichungen

Die folgenden Veröffentlichungen sind durchgeführt, bzw. in Arbeit und werden in verschiedenen angesehen Zeitschriften veröffentlicht.

- **Etablierung der digitalen dynamischen Bildanalyse in der Bodenkunde**

Kayser G, Graf- Rosenfellner M, Schack-Kirchner H, Lang F. Dynamic imaging provides novel insight into the shape and stability of soil aggregates. Eur J Soil Sci. 2019;70:454–465. https://doi.org/10.1111/ejss.12796.

- **Radiocaesium als Tracer für Bioturbation im Waldökosystem**

^{137}Cs as tracer of biologically induced cycling of hardly soluble elements (Science of the Total environment)

- **Bauminduzierte Unterschiede der Aggregierung: Ein Vergleich nach 20 Jahren**

Impact of tree species on aggregate formation and water holding capacity (Frontiers in Forests and Global Change)

- **Einfluss verschiedener Baumarten auf den Nährstoffhaushalt: Ein Vergleich auf 13 verschiedenen Standorten**

Impact of tree species on nutrient characteristics of forest soils (Biogeochemistry)

- **Einfluss der Baumarten auf die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden**

Tree species control forest soil carbon sequestration (Global Change Biology)

- **Jahreszeitliche Variabilität der organischen Auflage unter drei verschiedenen Baumarten (carbonat, sauer)**

Short communication: Seasonal variability of the organic layer under three different tree species (Forests)

5. Literaturverzeichnis

-Buchenwäldern, H. & Zerbe, S. 1993. *Fichtenforste als Ersatzgesellschaften von Hainsimsen-Buchenwäldern : Vegetation, Struktur und Vegetationsveränderungen eines Forstökosystems*.

Aponte, C., García, L. V. & Marañón, T. 2013. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecology and Management*.

Augusto, L., Achat, D.L., Bakker, M.R., Bernier, F., Bert, D., Danjon, F., Khlifa, R., Meredieu, C. & Trichet, P. 2015. Biomass and nutrients in tree root systems-sustainable harvesting of an intensively managed Pinus pinaster (Ait.) planted forest. *GCB Bioenergy*, **7**, 231–243.

Bavel, C. Van. 1950. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 23.

Berger, T.W. & Hager, H. 2000. Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (Picea abies) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management*.

Berger, T.W., Neubauer, C. & Glatzel, G. 2002. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (Picea abies) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management*.

Bronick, C.J. & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, **124**, 3–22.

Certini, G., Corti, G. & Ugolini, F.C. 2000. Vertical trends of oxalate concentration in two soils under Abies alba from Tuscany (Italy). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.

Forrester, D.I., Pares, A., O'Hara, C., Khanna, P.K. & Bauhus, J. 2013. Soil Organic Carbon is Increased in Mixed-Species Plantations of Eucalyptus and Nitrogen-Fixing Acacia. *Ecosystems*.

Gajić, B. 2013. Physical properties and organic matter of Fluvisols under forest, grassland, and 100years of conventional tillage. *Geoderma*.

Grüneberg, E., Ziche, D. & Wellbrock, N. 2014. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology*.

Hansson, K., Olsson, B.A., Olsson, M., Johansson, U. & Kleja, D.B. 2011. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden. *Forest Ecology and Management*, **262**, 522–530.

Högberg, P., Fan, H., Quist, M., Binkley, D. & Tamm, C.O. 2006. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. *Global Change Biology*.

Jastrow, J. & Miller, R.M. 1997. Soil Aggregate Stabilization And Carbon Sequestration: Feedbacks Through Organo Mineral Associations. In: *Soil Processes and the Carbon Cycle*, p. 624. CRC Press.

Jochem, D., Weimar, H., Bösch, M., Mantau, U. & Dieter, M. 2015. Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *European Journal of Forest Research*, **134**, 869–888.

Jonard, M., Fürst, A., Verstraeten, A., Thimonier, A., Timmermann, V., Potočić, N., Waldner, P., Benham, S., Hansen, K., Merilä, P., Ponette, Q., de la Cruz, A.C., Roskams, P., Nicolas, M., Croisé, L., Ingerslev, M., Matteucci, G., Decinti, B., Bascietto, M. & Rautio, P. 2015. Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*.

Koch, A.S. & Matzner, E. 1993. Heterogeneity of soil and soil solution chemistry under Norway spruce (Picea abies Karst.) and European beech (Fagus silvatica L.) as influenced by distance from the stem basis. *Plant and Soil*, **151**, 227–237.

Lebourgeois, F., Gomez, N., Pinto, P. & Mérian, P. 2013. Mixed stands reduce Abies alba tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *Forest Ecology and Management*, **303**, 61–71.

Lupwayi, N.., Arshad, M.., Rice, W.. & Clayton, G.. 2001. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management. *Applied Soil Ecology*, **16**, 251–261.

Mareschal, L., Turpault, M.P., Bonnaud, P. & Ranger, J. 2013. Relationship between the weathering of clay minerals and the nitrification rate: A rapid tree species effect. *Biogeochemistry*, **112**, 293–309.

Oades, J. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, **56**, 377–400.

Pigott, C.D. & Ellenberg, H. 1984. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. *The Journal of Ecology*.

Pilegaard, K., Skiba, U., Ambus, P., Beier, C., Bruggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Dick, J., Dorsey, J., Duyzer, J., Gallagher, M., Gasche, R., Horvath, L., Kitzler, B., Leip, a, Pihlatie, M.K., Rosenkranz, P., Seufert, G., Vesala, T., Westrate, H. & Zechmeister-Boltenstern, S. 2006. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N2O). *Biogeosciences*, **3**, 651–661.

Prescott, C.E. & Vesterdal, L. 2013. Tree species effects on soils in temperate and boreal forests: Emerging themes and research needs. *Forest Ecology and Management*, **309**, 1–3.

Prietzel, J. & Bachmann, S. 2011. Verändern Douglasien Wasser und Boden? *LWF aktuell*.

Rehfuess, K.E. 1990. Waldböden; Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studientexte, no. 29. (2.Auflage).

Rehschuh, R., Mette, T., Menzel, A. & Buras, A. 2017. Soil properties affect the drought susceptibility of Norway spruce. *Dendrochronologia*, **45**, 81–89.

Reich, P.B., Oleksyn, J., Modrzynski, J., Mrozinski, P., Hobbie, S.E., Eissenstat, D.M., Chorover, J., Chadwick, O.A., Hale, C.M. & Tjoelker, M.G. 2005. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: A common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters*, **8**, 811–818.

Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E.D., Don, A., Schumacher, J. & Weller, E. 2007. Exploring the functional significance of forest diversity: A new long-term experiment with temperate tree species (BIOTREE). *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, **79**, 7–31.

Svobodová, K., Langbehn, T., Björklund, J., Rydval, M., Trotsiuk, V., Morrissey, R.C., Čada, V., Janda, P., Begovič, K., Ágh-Lábusová, J., Schurman, J.S., Nováková, M., Kozák, D., Kameniar, O., Synek, M., Mikoláš, M. & Svoboda, M. 2019. Increased sensitivity to drought across successional stages in natural Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) forests of the Calimani Mountains, Romania. *Trees - Structure and Function*, **33**, 1345–1359.

Thünen-Institut: Holzeinschlag und Rohholzverwendung.

Uhl, E., Ammer, C., Spellmann, H., Schölch, M. & Pretzsch, H. 2013. Zuwachstrend und Stressresilienz von Tanne und Fichte im Vergleich. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **184**, 278–292.

Vesterdal, L. 1999. Influence of soil type on mass loss and nutrient release from decomposing foliage litter of beech and Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, **29**, 95–105.

Zerbe, S. 2002. Restoration of natural broad-leaved woodland in Central Europe on sites with coniferous forest plantations. *Forest Ecology and Management*.

6. Anhang

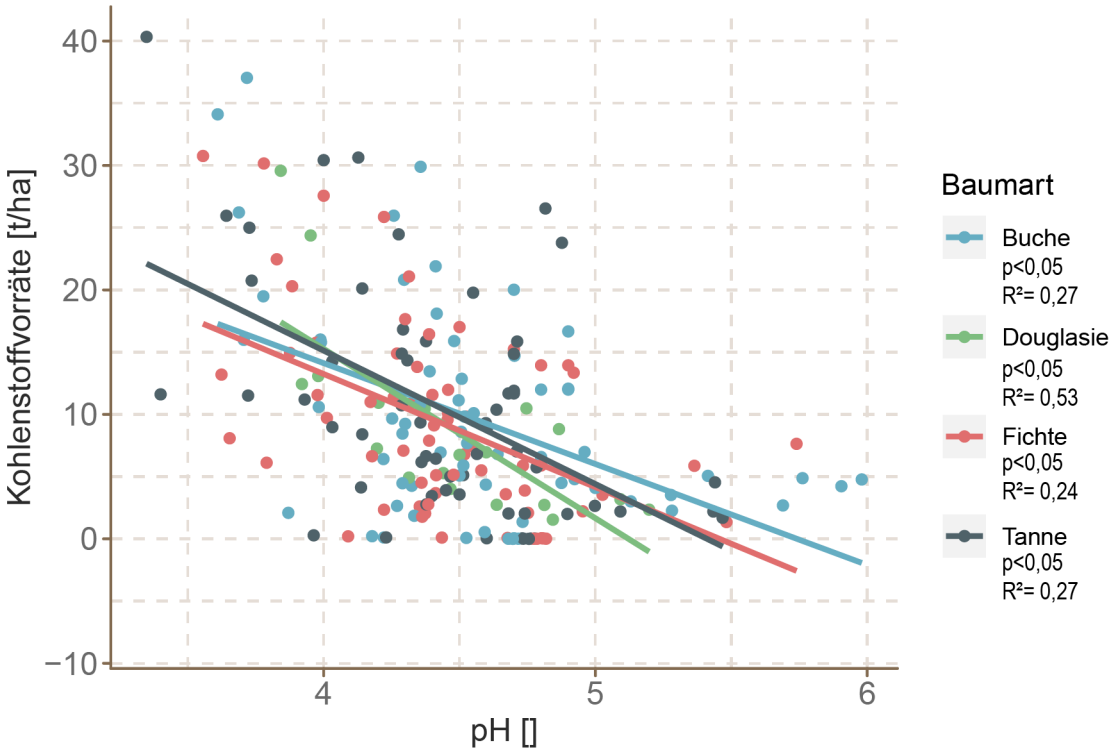


Abbildung 53 - Korrelation der Kohlenstoffvorräte [t/ha] und des pH-Wertes. Lineare Regressionsgeraden werden bei signifikanter Korrelation gezeigt. Eingeflossen sind die Werte der Mittelwerte aller Bodentiefen von allen sauren Standorten.

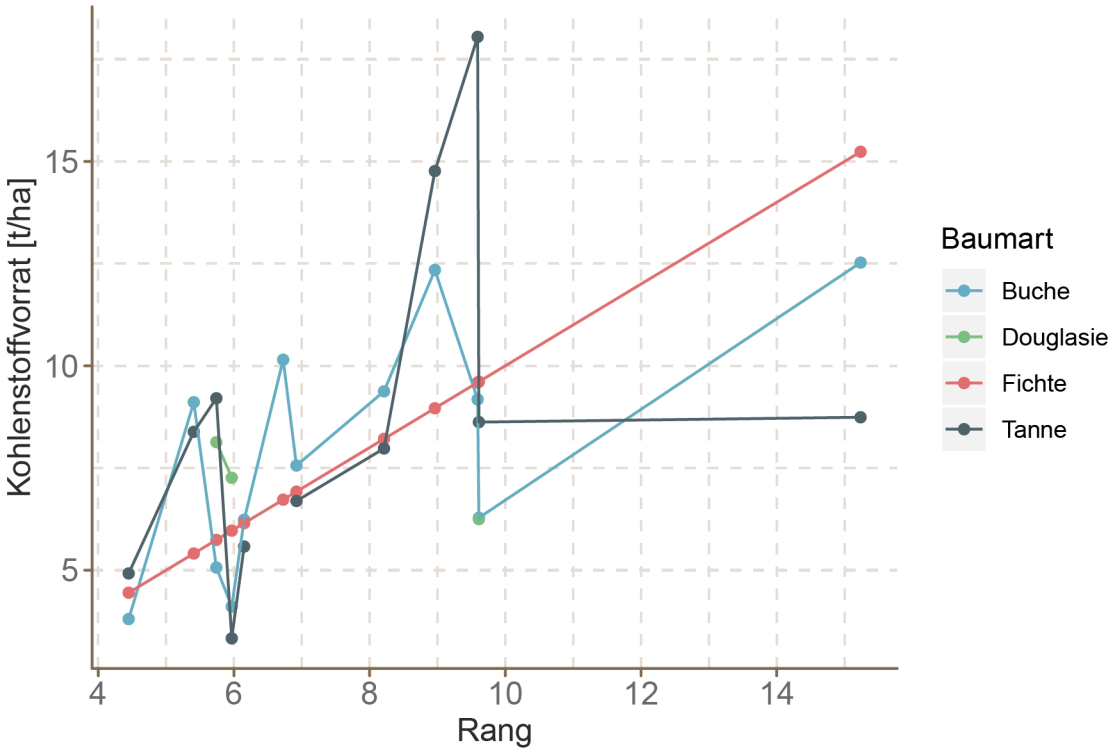


Abbildung 54 - Ranggrafik der Mittelwerte des zitratextrahierbarem P aus PO_4^{3-} der verschiedenen Baumarten. Oben: Daten aus dem Of-Horizont, Unten: Darstellung aus dem Ah. Horizont. Jeder Punkt stellt ein Mittelwert dar, Werte oberhalb der 1:1 Gerade der Fichte bedeuten einen höheren Mittelwert während Werte unterhalb der Lini einen niedrigeren Mittelwert beschreiben

Tabelle 10 – Tabelle aller signifikanten Unterschiede auf den einzelnen Standorten. Verschiede Buchstaben zeigen einen signifikanten Unterschied an.

Standort	Tiefe	Baumart	pH	C %	C t/ha	N %	N t/ha	C/N	C/P	KAK	BS	PPO4citr	Ptot
Freising	Auflage	Buche						a		a	a		
		Douglasie						b		a	a		
		Fichte						ab		b	b		
		Tanne						a		b	b		
	Mineral	Buche									a	a	
		Douglasie									b	ab	
		Fichte									a	ab	
		Tanne									a	b	
Ellwangen	Auflage	Buche			a								
		Fichte			b								
		Tanne			c								
	Mineral	Buche	a							a		a	
		Fichte	b							b		b	
		Tanne	ab							a		b	
Ravensburg	Auflage	Buche											
		Fichte											
		Tanne											
	Mineral	Buche											
		Fichte											
		Tanne											
Schwenningen	Auflage	Buche			a		a						
		Fichte			ab		ab						
		Tanne			b		b						
	Mineral	Buche						a		ab		ab	a

		Fichte				ab	a		a	b
		Tanne				b	b		b	a
Villingen	Auflage	Buche		a	a	ab	a			
		Fichte		b	ab	a	a			
		Tanne		b	b	b	b			
	Mineral	Buche	a				a	a	a	a
		Fichte	b				b	a	b	b
		Tanne	a				ab	b	b	a
Moslooh	Auflage	Buche	a	ab			a	a		
		Fichte	b	a			b	b		
		Tanne	ab	b			b	ab		
	Mineral	Buche		a	a			a	a	
		Fichte		a	a			b	b	
		Tanne		b	b			ab	ab	
Zinnschützweiher	Auflage	Buche								
		Fichte								
		Tanne								
	Mineral	Buche				a	a	a		
		Fichte				a	a	b		
		Tanne				b	b	a		
Giersberg	Auflage	Buche						ab		
		Fichte						a		
		Tanne						b		
	Mineral	Buche							a	a
		Fichte							ab	ab
		Tanne							b	b

Ruhpolding	Auflage	Buche	a							a	a			
		Fichte	ab							ab	ab			
		Tanne	b							b	b			
	Mineral	Buche	a	ab	a	ab	a			a	a	ab	a	
		Fichte	b	a	b	a	b			b	b	a	b	
		Tanne	b	b	b	b	b			c	a	b	b	
Königsbronn	Auflage	Buche	a	a				a		a	a			
		Douglasie	b	b				b		b	b			
		Fichte	ab	ab				ab		b	b			
		Tanne	b							b	b			
	Mineral	Buche						ab		a	a		ab	
		Douglasie						a		a	a		c	
		Fichte						a		b	b		a	
		Tanne						b		b	a		b	
Ravenbsurg2	Auflage	Buche												
		Fichte												
		Tanne												
	Mineral	Buche												
		Fichte												
		Tanne												
Ravensburg3	Auflage	Buche	a			a			a				ab	
		Douglasie	ab			b			ab				ab	
		Fichte	b			ab			b				a	
		Tanne	a			b			a				b	
	Mineral	Buche	a					a	a		a	a		
		Douglasie	b					b	b		b	b		

		Fichte	ab		b	ab	b	b	
		Tanne	ab		ab	ab	b	ab	
Schwarzwald	Auflage	Buche	a						a
		Fichte	b						b
		Tanne	ab						ab
	Mineral	Buche	a						
		Fichte	ab						
		Tanne	b						