

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz	S. 1–12	7 Fig. 3 Tab.
urn:nbn:de:0041-2604281421234.823970636673		



Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Feinwurzelverteilung von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) in befahrenen Rückegassen auf sandigem Standort in Norddeutschland

*Fine-root distribution of pine trees (*Pinus sylvestris* L.) in skid trails on a sandy site in Northern Germany*

Dominik Tamke

Abstract

Mechanical site preparation can substantially redistribute nutrients toward skid trails, raising concerns about localized nutrient depletion, particularly in nutrient-poor forest stands where plant-available elements are concentrated in the organic layer and topsoil. At the same time, skid trails are commonly associated with reduced root penetration due to machine traffic, resulting in markedly lower fine root densities in compacted soils. Whether these effects persist on sandy soils with low compaction susceptibility, however, remains largely unresolved.

We investigated these dynamics in a Scots pine stand on sandy soils approximately 30 km east of Bremen (Germany). Five soil profiles were excavated perpendicular to skid trails, spanning trafficked and adjacent undisturbed areas. Traffic intensity was delineated using track depth, and soil bulk density was quantified from collected samples. Fine root densities were assessed using the profile wall method and analyzed within a Bayesian regression framework assuming a zero-inflated negative binomial distribution.

Contrary to common expectations, skid trails exhibited only minor compaction in the topsoil. Instead, increases in soil density with depth were more pronounced across all traffic classes than the additional effect attributable to machine traffic. Fine root densities peaked in the upper 15 cm (Aeh horizon) and in the Bsh horizon (30–45 cm), while remaining low in intermediate and deeper layers. In skid trails, fine root densities declined in the upper soil (by approximately 20% at 0–15 cm and 50% at 15–30 cm), yet exceeded those of undisturbed areas at 30–45 cm depth.

These patterns indicate that nutrient availability, rather than soil compaction per se, is the dominant control on fine root distribution at this site. However, this does not imply

that traffic effects are negligible: nutrient redistribution and localized soil disturbance are likely to impose additional physiological costs on trees, potentially constraining growth and stand vitality. Our findings challenge simplified assumptions about traffic impacts on sandy soils and highlight the need for site-specific management strategies that account for both physical and biogeochemical soil responses.

Keywords: Podzol, zero-inflated negative binomial distribution, Bayesian inference, poor nutrient supply

Zusammenfassung

Mechanische Flächenräumung kann zu einer Verlagerung von Nährstoffen auf Rückegassen führen und damit insbesondere auf nährstoffarmen Standorten die Nährstoffverfügbarkeit beeinflussen, da pflanzenverfügbare Elemente vor allem in der Humusaufgabe und im Oberboden konzentriert sind. Gleichzeitig sind Rückegassen infolge der Befahrung häufig durch eine eingeschränkte Durchwurzelung gekennzeichnet, was sich in deutlich reduzierten Feinwurzel-dichten äußert. Inwieweit diese Zusammenhänge auch für verdichtungsunempfindliche Sandstandorte gelten, ist bislang jedoch unzureichend geklärt.

Die vorliegende Studie untersucht diese Fragestellung in einem Kiefernbestand auf Sandstandorten etwa 30 km östlich von Bremen. Hierzu wurden fünf Bodenprofile quer zu Rückegassen angelegt, die sowohl befahrene als auch angrenzende unbefahrene Bereiche umfassen. Der Befahrungsbereich wurde anhand von Spurtiefen abgegrenzt, und zur Bestimmung der Trockenrohdichte wurden Bodenproben entnommen. Die Feinwurzel-dichten wurden mithilfe der Profilwandmethode erfasst und mittels eines bayesschen Regressionsansatzes unter Annahme einer Zero-Inflated-Negativbinomialverteilung ausgewertet.

Entgegen verbreiteter Annahmen zeigten die Rückegassen nur geringe Verdichtungen im Oberboden. Mit zunehmender

Tiefe nahm die Bodendichte jedoch in allen Befahrungsvarianten stärker zu als durch die Befahrung allein erklärbar wäre. Hohe Feinwurzelichten traten vor allem in den oberen 15 cm (Aeh-Horizont) sowie im Bsh-Horizont (30–45 cm) auf, während sie in den dazwischenliegenden und tieferen Horizonten deutlich geringer waren. In den Rückegassen waren die Feinwurzelichten im Oberboden reduziert (ca. 20 % in 0–15 cm und ca. 50 % in 15–30 cm), übertrafen jedoch in 30–45 cm Tiefe die Werte der unbefahrenen Referenz.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Nährstoffverfügbarkeit die Verteilung der Feinwurzeln stärker beeinflusst als die Bodenverdichtung auf Sandstandorten. Gleichwohl sind die Effekte der Befahrung nicht als vernachlässigbar anzusehen, da Nährstoffverlagerung und Bodenstörung zusätzliche Kosten für das Wurzelwachstum verursachen und somit die Vitalität und Wuchsleistung der Bestände beeinträchtigen können. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit standortspezifischer Befahrungs- und Bodenmanagementstrategien.

Schlüsselwörter: Podsol, zero-inflated negative Binomialverteilung, bayessche Inferenz, schwache Nährstoffversorgung,

1 Einleitung

Befahrungen von Böden haben generell eine negative Wirkung auf die Bodenfunktionen (UNGER und KASPAR 1994). Dabei wird der Boden verdichtet, was zu vielfältigen Störungen führt: des Gasaustauschs (GAERTIG 2001), der Infiltrationsleistung (ZEMKE et al. 2019), der Mikroorganismen (FREY & HARTMANN 2013) sowie der Durchwurzelung (VON WILPERT & SCHÄFFER 2012). Da bereits einmalige Befahrungen Bodenschäden hervorrufen können (AMPOORTER et al. 2010; LENHARD 1986), wird die Befahrung bei der Holzernte durch Zertifizierungen auf permanente Rückegassen beschränkt (FSC DEUTSCHLAND & VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT E.V. 2018; PEFC DEUTSCHLAND E.V. 2014).

Nicht nur durch den Einsatz von Harvestern werden Nährstoffe auf der Rückegasse konzentriert (BORCHERT et al. 2015; ROSÉN und LUNDMARK-THELIN 1987), sondern auch durch Flächenräumungen mit Ablagerung des Schlagabbaus auf Rückegassen (NOPP et al. 1998; TAMKE 2024; WALL 2008). Bei Schlagräumungen in einem Kiefernbestand auf einem armen Sandstandort wurden bis zu 80 % des pflanzenverfügbaren Magnesium-Vorrats auf die Gasse verlagert (TAMKE 2024).

Rückegassen sind Bereiche, in denen die Durchwurzelung um bis zu 66 % gegenüber unbefahrenen Bereichen abnehmen kann (VON WILPERT und SCHÄFFER 2012). Wie stark die Durchwurzelung durch die Befahrung abnimmt, hängt einerseits von der Intensität der Befahrung und andererseits vom Ausgangssubstrat ab. Forstliche Standorte sind sehr heterogen und reichen von tonigen bis zu sandigen Ausgangssubstraten. Generell gilt: Je feuchter und feinkörniger der Boden ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit von Verdichtung und Spurbildung (ALLMAN et al. 2017; AMPOORTER et al. 2012; LÜSCHER et al. 2010). Eine natürliche Regeneration von Verdichtungen nach Befahrung zieht sich über Jahrzehnte hin, wobei sich der Oberboden schneller regeneriert als der Unterboden (FROELICH et al. 1985). Eine Ausnahme hiervon bilden quelfähige Tone, die bereits nach 10 Jahren regeneriert sind (EBELING et al. 2016).

Somit gelten Nährstoffe auf der Rückegasse als dauerhaft dem Wald entzogen (VON TEUFFEL 2012). Für arme Sandstandorte wäre eine Abnahme der Leistungsfähigkeit die Folge. Ob dies auch für Sandstandorte in Norddeutschland gilt, ist fraglich. In dieser Untersuchung sollen die Effekte der Befahrung auf die Durchwurzelung von Rückegassen anhand von Feinwurzelzählungen, begleitet von Spurtiefenmessungen und Trockenrohdichte Beprobungen, abgeschätzt werden. Studien zur Wirkung der Befahrung von Rückegassen liegen für Sandböden in Norddeutschland kaum vor (EBELING et al. 2016), für Lösslehmböden hingegen viele (EBELING et al. 2016; GAERTIG et al. 2000; SPARRER et al. 2023). Im folgenden Beitrag soll der Frage nachgegangen werden, wie Befahrung auf sandigen Standorten die Feinwurzelverteilung im Kontext möglicher Nährstoffverlagerungen beeinflusst.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsflächenbeschreibung

Etwa 30 Kilometer östlich von Bremen konnte ich im niedersächsischen Landkreis Rotenburg (Wümme) einen geeigneten Versuchsbestand finden. Der schwarze Punkt in der Abbildung 1 veranschaulicht die Position in der Bundesrepublik Deutschland. Der Versuchsbestand liegt nördlich der Ortschaft Ahausen in unmittelbarer Nähe zur Wümmeniederung, die sich im Norden anschließt (siehe Übersichtskarte



Abb. 1: Eine Übersichtskarte von Deutschland mit den Bundesländern. Der schwarze Punkt markiert die Lage des Untersuchungsbestandes in Niedersachsen. Erstellt habe ich die Karte mit R und den Paketen „sf“ und „giscore“ (HERNANGÓMEZ 2026; PEBESMA 2018; PEBESMA & BIVAND 2023; R CORE TEAM 2024).

Fig. 1: A general map of Germany showing the federal states. The black dot marks the location of the study site in Lower Saxony. I created the map using R and the packages „sf“ and „giscore“ (HERNANGÓMEZ 2026; PEBESMA 2018; PEBESMA AND BIVAND 2023; R CORE TEAM 2024).

oben rechts in Abb. 2). Entlang einer Rückegasse haben wir 5 Bodenprofile aufgebaggert. In unmittelbarer Nähe lag außerdem ein chemisch beprobtes Bodenprofil der forstlichen Standortkartierung aus dem Jahr 2025 vor (Abb. 2, Detailansicht).

Bei dem Versuchsbestand handelt es sich geologisch um einen Sandstandort mit einer geringen holozänen Flugsanddecke über einem vom Wasser abgelagerten weichseleiszeitlichen Sand. Die forstliche Standortkartierung beschrieb den Standort mit der niedersächsischen Standortschlüsselziffer 35.3-.2.2t. Dies entspricht verbal einem Grundwasserstandort mit einem Grundwasserstand unter Geländeoberfläche von 2,5 bis 4 m, einer schwachen bis mäßigen Nährstoffausstattung und einem einschichtigen Sand.

Der Versuchsbestand besteht aus einer ca. 80-jährigen Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) aus mittlerem und starkem Baumholz und einem lückigen Unterstand aus Birke (*Betula pendula* ROTH), Spätblühender Traubenkirsche (*Prunus serotina* EHRH.) und Stiel-Eiche (*Quercus robur* L.). Der Bestockungsgrad liegt bei 0,9 und die Bodenvegetation wird neben Moosen überwiegend von Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* L.) gebildet.

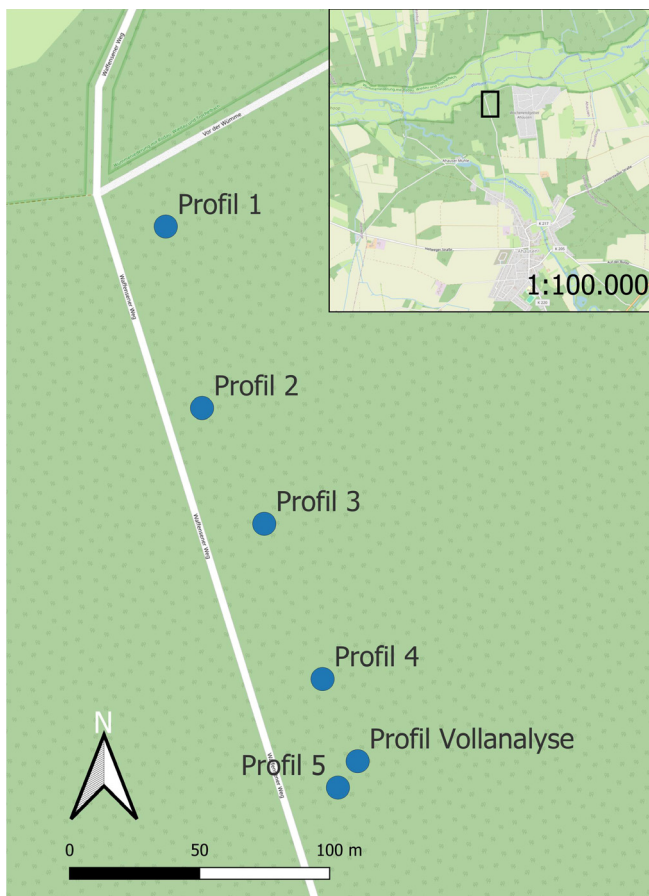


Abb. 2: Eine Detailansicht der Versuchsfläche nördlich der Ortschaft Ahausen mit den Positionen der untersuchten Profile. Die Karte habe ich mit QGIS und den Hintergrund von „OpenStreetMap“ erstellt.

Fig. 2: A detailed view of the study area north of the village of Ahausen, showing the locations of the soil profiles. I created the map using QGIS with a background from OpenStreetMap.

Tab. 1: Bodenprofilbeschreibung mit bodenchemischen Kennwerten des analysierten Bodenprofils.

Tab. 1: Description of the soil profile, including chemical properties of the analyzed soil profile.

Bodenprofilansprache				pH-Werte		Gesamtgehalte				eff. Austausch- kapazität				Austauschbare Kationen (mg/Kg), Humusauf- lage: Gesamtgehalte					
Horizont	Tiefe (cm)	Skelett (%)	Lagerungs- dichte	pH KCL	pH H2O	C (%)	N (mg/100g)	P (mg/100g)	C/N	C/P	Ake (meq/kg)	Ca+Mg (%)	K	Na	Mg	Ca	H	Al	Fe
Humusauf- lage	8-0			3,65	4,06	33,17	1.283,5	105,2	26	315			1.245	283	1.021	4.117		2.282	2.821
Aeh	0-10	2	2	2,77	3,86	5,31	136,6	3,6	39	1461	94	12,2	21	21	26	188	40	365	21
Ahe	10-30	2	2	3,33	4,73	0,59	17,1	35,9	34	16	12	27,2	4	9	5	56	3	42	4
Bsh	30-40	2	4	3,12	3,97	6,09	180	0,5	34	11.595	201	2,4	13	15	9	80	17	1.600	15
Bhsv	40-120	3	4	4,26	5,09	0,31	11,7	15,9	27	20	19	14	4	9	5	46	0	141	5
Cv	120-180	3	3	4,94	5,71	0,05	4,5	6	11	8	7	41,2	6	10	5	47	0	28	4

Die letzte Durchforstung liegt ca. 10 Jahre zurück. Damalige Erntemengen konnten ich nicht ermitteln.

In der Tabelle 1 sind die Bodenhorizonte sowie die Analyseergebnisse des beprobten Bodenprofils aufgeführt. Bei dem Bodentyp handelt es sich um einen Braunerde-Podsol. Die Humusaufgabe entspricht einem rohhumusartigen Moder



Abb. 3: Foto des beprobten Bodenprofils (Bild: Tamke).

Fig. 3: Photo of the analysed soil profile (Image: Tamke).

(ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016). Auffällig, aber typisch, ist der hohe Nährstoffvorrat in der Humusaufgabe im Vergleich zu den Mineralbodenhorizonten. Wie die dunkle Einfärbung des Humus im Bodenprofil erwarten lässt, weisen der Aeh- und der Bsh-Horizont hohe Kohlenstoffgehalte von 5 % bzw. 6 % auf (siehe Abb. 3 in Verbindung mit Tab. 1). Diese sind durch die Bindung von Kationen an Humuskomplexen für die höheren Werte der effektiven Austauschkapazität (Ake) verantwortlich. In den Bodenhorizonten sind demnach die höchsten Gehalte an basischen Kationen je Kilogramm Boden zu finden. Ob der Bestand gekalkt wurde, ist nicht bekannt.

2.2 Aufnahmemethoden

Da die Befahrung lange zurücklag und der Sand nur wenig zur Verdichtung neigt, konnte ich die Fahrspuren mit bloßem Auge schlecht erkennen. Die Gassenverläufe konnte ich hingegen gut erkennen. Zur Ermittlung der Bereiche der Fahrspuren habe ich Tiefen durch Ablotung von einer Messlatte, die ich über die Gasse gelegt hatte, in 5 cm Schritten gemessen.

Im Rahmen seiner Bachelorarbeit gewann Tobias Bindick mit Stechzylindern volumengerechte Bodenproben und bestimmte die Trockenrohdichte. Er entnahm je eine Probe in jedem Profil in 3 Bereichen (Unbefahren, Spur und Mittelspur) sowie 4 Tiefenstufen (0–5 cm, 5–10 cm, 10–25 cm und 25–40 cm), wobei er aus beiden Fahrspuren Proben entnahm und den Mittelwert bildete (BINDICK 2025). Der Schwerpunkt der Beprobung lag auf dem Oberboden, da die Verdichtung durch Befahrung mit zunehmender Bodentiefe aufgrund der Druckverteilung abnimmt (EBEL 2006).

Darüber hinaus führte Tobias Bindick Wurzelzählungen nach der Profilwandmethode durch. Der verwendete Zählrahmen bestand aus 25 Feldern mit den Maßen 5 x 5 cm. In jedem Profil hatte er bis zu einer Tiefe von 1 m die Feinwurzeln (Wurzeln < 2 mm) und die Grobwurzeln (Wurzeln > 2 mm) auf einer Breite von 5 m gezählt (BINDICK 2025). Dabei ließ er einen Bereich von 0,5 m zwischen dem Bereich der Fahrspur

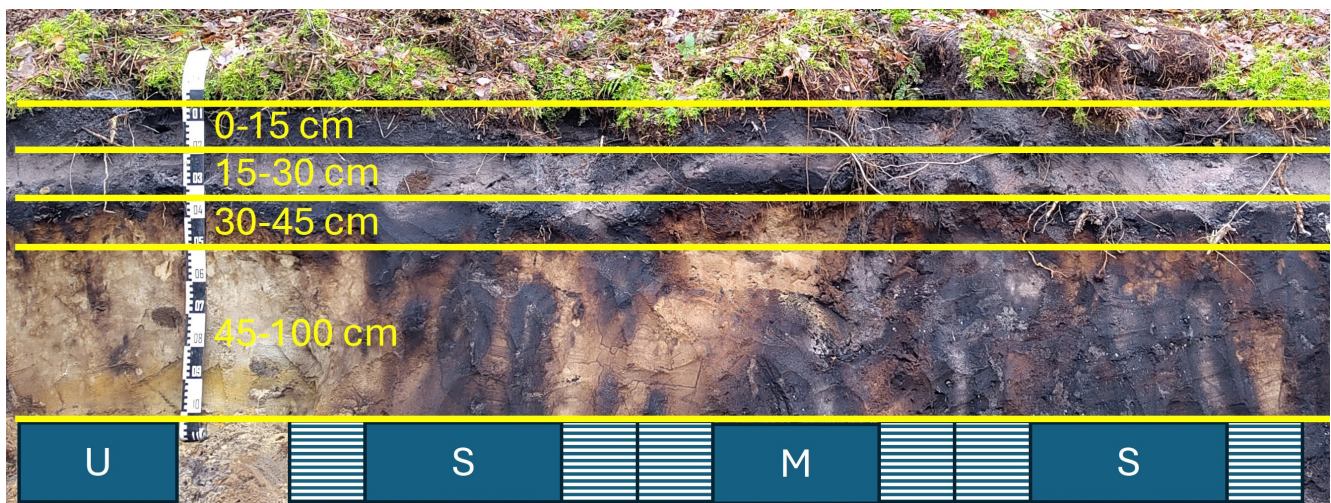


Abb. 4: Ein Beispiel für die Einteilung der Bereiche und Tiefenstufen anhand des Profils 1: Die schraffierten Bereiche stellen 20 cm breite Überlappungsbereiche der Befahrung dar, die bei der Analyse nicht berücksichtigt wurden. (U: Unbefahren; S: Spur; M: Mittelspur.)

Fig. 4: An example of how areas and depth levels are classified based on Profile 1: The hatched areas represent 20 cm wide overlap zones from vehicle traffic that were not included in the analysis. (U: Reference; S: Track of skid trail; M: Middle track of skid trail.)

und der Referenz aus, um den Zählaufwand zu reduzieren, da es sich in diesen Bereichen um indifferente Übergangsbereiche handelte.

Für meine Analysen habe ich die Daten der Trockenrohdichte und der Wurzelzählungen aus der Bachelorarbeit von Tobias Bindick verwendet und profilübergreifend ausgewertet (BINDICK 2025). Bei der Auswertung der Wurzelzählungen habe ich mich auf die Feinwurzeln beschränkt und die Daten nach 3 Bereichen (Unbefahren, Spur und Mittelspur) sowie 4 Tiefenstufen (0–15 cm, 15–30 cm, 30–45 cm und 45–100 cm) kategorisiert (Abb. 4). Wobei ich von einer Maschinenbreite des Rückezugs von 2,80 m mit einer 700 mm Bereifung ausgegangen bin, welche mit den Maßen der von den örtlichen Holzeinschlagsunternehmen eingesetzten Maschinen gut übereinstimmt. Die Einteilung der Tiefenstufen erfolgte in Anlehnung an die Horizonte des beprobten Profils. Allerdings musste ich hiervon abweichen, da sich die Horizontgrenzen in den Profilen der Wurzelzählungen etwas anders darstellten. Der Stichprobenumfang für die oberen 3 Horizonte betrug somit je Profil für Unbefahren, Spur und Mittelspur 30, 84 und 36 und für den unteren Horizont 110, 132 und 308.

2.3 Statistische Modellierung der Feinwurzelverteilung

Zur Auswertung der Feinwurzelverteilung habe ich ein bayesianisches Regressionsmodell berechnet. Da es sich bei den Daten um Zählungen mit „echten Nullen“ handelt, kamen Zero-Inflated-Wahrscheinlichkeitsverteilungen infrage. Die beste Anpassung an die Daten zeigte eine Zero-Inflated-Negativbinomialverteilung mit

$$Y \sim \text{zeroinflated negbinomial}(\mu, \phi, z),$$

wobei μ dem Erwartungswert, ϕ dem Dispersionsparameter, welcher die Varianz beschreibt, und z dem Parameter für die Häufigkeit von „Nullen“ entspricht.

Als Prädiktoren für den Erwartungswert habe ich die Befahrungskategorie, die Tiefenstufe sowie die Interaktionen aus Befahrungskategorie und Tiefenstufe als fixe Effekte gewählt:

$$\log(\mu) = \text{Befahrungskategorie} * \text{Tiefenstufe}$$

Die Modellberechnung erfolgte mit der Statistiksoftware R in der Version 4.4.2 (R CORE TEAM 2024) und dem Zusatzpaket brms (Version 2.22.0) (BÜRKNER 2018; BÜRKNER 2017), welches eine Schnittstelle zur Software Stan (CARPENTER et al. 2017) ist. Stan berechnet bayessche Modelle anhand von Monte-Carlo-Simulationen. Die Modellvisualisierung erfolgte mit den Paketen „tidybayes“ (KAY 2022) und „tidyverse“ (WICKHAM et al. 2019).

Als Priors wurden die vom Programm vorgeschlagenen Verteilungen übernommen, soweit nicht anders in Tabelle 2 angegeben; diese waren flach. Es wurden 4 Ketten mit jeweils 2.000 Iterationen gerechnet, von denen 1.000 Iterationen zum Aufwärmen genutzt wurden.

Die modellierten Werte habe ich zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen auf 100 cm² hochgerechnet.

Tab. 2: Priori der Feinwurzelmodellierung.

Tab. 2: Priors of fine-root modeling.

Parameter	Priori
$\beta_{\text{intercept}}$	<i>Student (3; -2,3; 2,5)</i>
ϕ	<i>Invers Gamma (0,4; 0,3)</i>
z	<i>Beta (1; 1)</i>

3 Ergebnisse

Die Abbildung 5 zeigt, dass es bei den Profilen 1 bis 4 zu Spurbildungen kam. Am ausgeprägtesten waren diese bei Profil 1 mit über 10 cm im Median. Beim Profil 5 sind keine Spurbildungen erkennbar. Eine Vertiefung ist auch in den Bereichen der Mittelspur der Profile 1, 2 und 4 erkennbar, allerdings nicht so ausgeprägt wie in den Fahrspuren. Bei den Profilen 3 und 5 zeigen die Mittelspuren keinerlei Vertiefung und liegen im Median sogar über der unbefahrenen Referenz.

In der Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Trockenrohdichten als Boxplots dargestellt. Generell lässt sich sagen, dass die Trockenrohdichten mit zunehmender Tiefe ansteigen und in der untersten Tiefenstufe wieder abnehmen. Die Mediane der Trockenrohdichte der Befahrungskategorie Spur liegen in jeder Tiefenstufe über den Medianen der anderen Befahrungskategorien, während die Mediane der Trockenrohdichte der Befahrungskategorie Mittelspur in jeder Tiefenstufe unter den Medianen der anderen Befahrungskategorien liegen.

Abbildung 7 zeigt die Wurzeldichte je 100 cm² für die einzelnen Tiefenstufen in Abhängigkeit zur Befahrungskategorie. In der Tabelle 3 sind die Grenzen der dazugehörigen Kreditibilitätsintervalle angegeben. Die meisten Wurzeln befinden sich bei allen Befahrungskategorien in der obersten Tiefenstufe, die wenigsten in der untersten. In der obersten Tiefenstufe und in der Tiefenstufe von 15–30 cm zeigt die Befahrungskategorie Unbefahren die beste Durchwurzelung im Vergleich zu den anderen Befahrungskategorien. In den Tiefenstufen 30–45 cm und 45–100 cm zeigt sie hingegen die geringste Durchwurzelung. Somit nimmt bei der Kategorie Unbefahren die Durchwurzelung von der obersten Tiefenstufe zur untersten Tiefenstufe ab. In der Tiefenstufe 30–45 cm ist die Durchwurzelung bei den Kategorien Spur und Mittelspur hingegen höher als in der Tiefenstufe 15–30 cm. In den untersten Tiefenstufen weist die Kategorie Mittelspur die höchste Durchwurzelung auf.

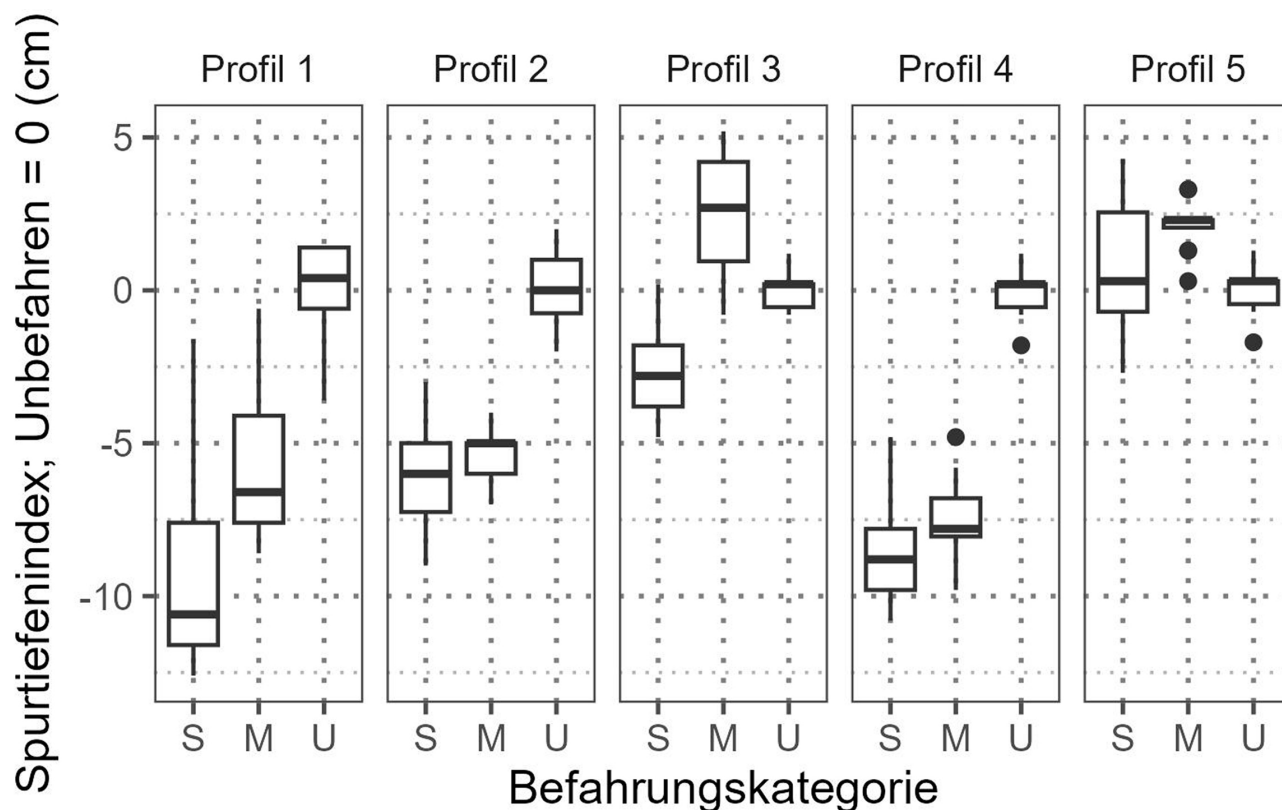


Abb. 5: Boxplots der Spurtiefenmessung für die Bereiche, in denen die Feinwurzeln analysiert wurden (S: Spur; M: Mittelspur; U: Unbefahren; n=28;12;10). Als Index habe ich den Mittelwert der unbefahrenen Variante je Profil herangezogen.

Fig. 5: Box plots of track depth measurements for the areas where fine roots were analyzed (S: Track of skid trail; M: Middle track of skid trail; U: Reference; n=28;12;10). I used the mean value of the reference per profile as an index.

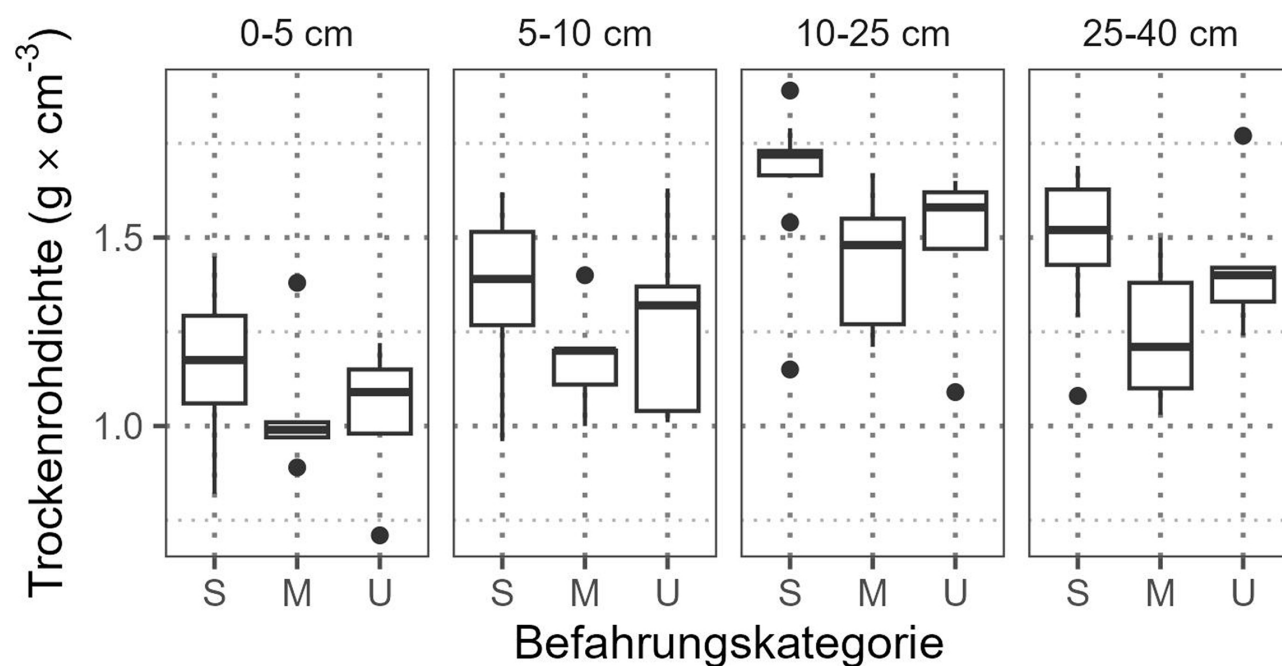


Abb. 6: Boxplots der Trockenrohddichten über alle Profile nach Tiefenstufen (S: Spur; M: Mittelspur; U: Unbefahren; n=10;5;5).

Fig. 6: Box plots of dry bulk densities for all soil profiles by depth level (S: Track of skid trail; M: Middle track of skid trail; U: Reference; n=10;5;5).

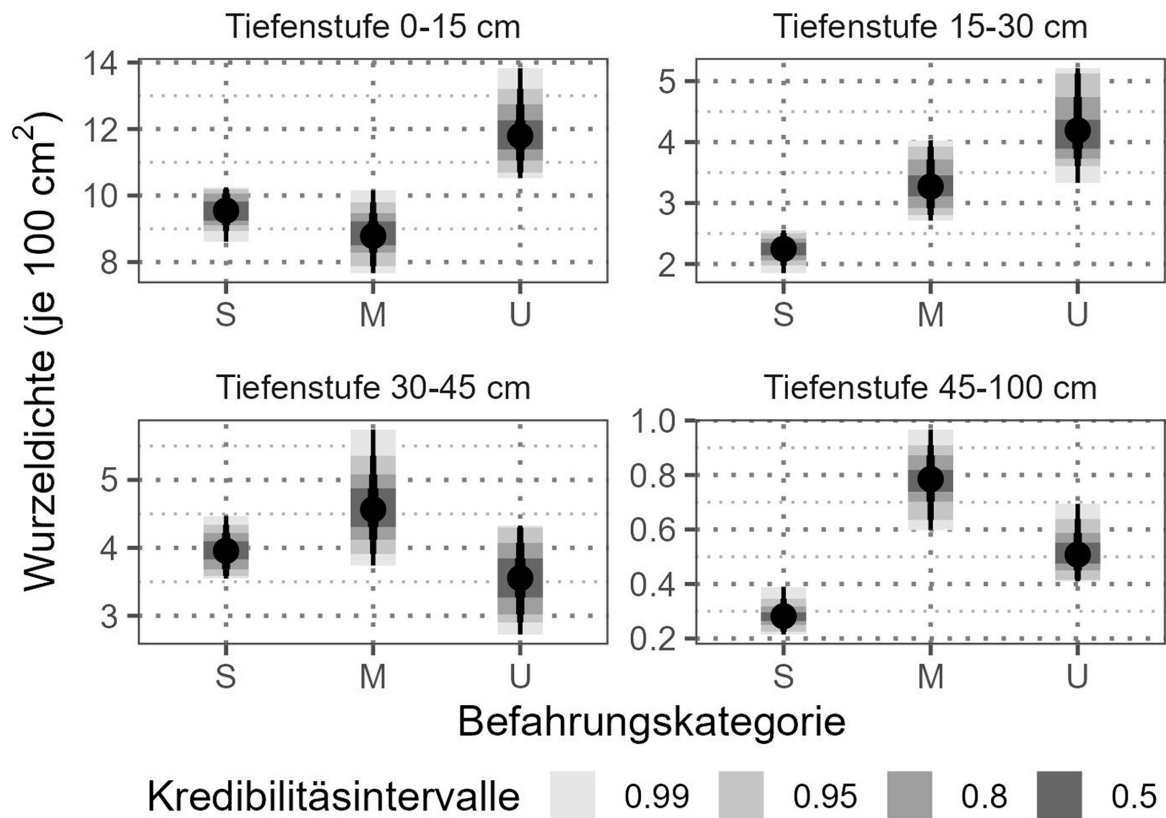


Abb. 7: Wurzeldichte je 100 cm² nach Tiefenstufen und Befahrungskategorie (S: Spur; M: Mittelspur; U: Unbefahren). Der Punkt entspricht dem Erwartungswert.

Fig. 7: Root density per 100 cm² by depth level and track category (S: Track of skid trail; M: Middle track of skid trail; U: Reference). The dot represents the expected value.

Tab. 3: Parameterspezifische Posteriori-Verteilung der Kreditabilitätsintervalle der Wurzeldichtemodellierung je 100 cm² (S: Spur; M: Mittelspur; U: Unbefahren).

Tab. 3: *Parameter-specific posterior distribution of the credible intervals for root density modeling per 100 cm² (S: Track of skid trail; M: Middle track of skid trail; U: Reference)*

Befahrungs-kategorie	Tiefenstufe (in cm)	Kredi-bilitäts-intervall	Unter-grenze	Ober-grenze	Kredi-bilitäts-intervall	Unter-grenze	Ober-grenze
S	0-15	0,5	9,36	9,88	0,95	8,96	10,52
S	15-30	0,5	2,12	2,28	0,95	1,91	2,47
S	30-45	0,5	3,82	4,12	0,95	3,59	4,36
S	45-100	0,5	0,27	0,30	0,95	0,24	0,34
M	0-15	0,5	8,56	9,32	0,95	7,84	9,84
M	15-30	0,5	3,04	3,48	0,95	2,77	3,69
M	30-45	0,5	4,36	4,84	0,95	3,90	5,44
M	45-100	0,5	0,72	0,83	0,95	0,66	0,91
U	0-15	0,5	11,40	12,36	0,95	10,68	13,28
U	15-30	0,5	4,04	4,60	0,95	3,53	5,04
U	30-45	0,5	3,28	3,78	0,95	2,90	4,24
U	45-100	0,5	0,48	0,55	0,95	0,38	0,61
S	0-15	0,8	9,24	10,08	0,99	8,76	10,64
S	15-30	0,8	2,03	2,36	0,99	1,88	2,59
S	30-45	0,8	3,69	4,24	0,99	3,52	4,68
S	45-100	0,8	0,26	0,32	0,99	0,23	0,35
M	0-15	0,8	8,16	9,56	0,99	7,72	10,12
M	15-30	0,8	2,84	3,64	0,99	2,72	3,87
M	30-45	0,8	4,12	5,08	0,99	3,68	5,72
M	45-100	0,8	0,69	0,88	0,99	0,64	0,93
U	0-15	0,8	11,12	12,96	0,99	10,08	13,80
U	15-30	0,8	3,82	4,80	0,99	3,33	5,60
U	30-45	0,8	3,05	3,99	0,99	2,74	4,88
U	45-100	0,8	0,43	0,58	0,99	0,38	0,64

4 Diskussion

Beim Bodenschutz während der Holzernte wird der Erhalt der technischen Befahrbarkeit angestrebt (HORVAT 2023). Auf verdichtungsunempfindlichen Sandböden mit ihren hohen Versickerungsraten (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016) ist es durch Befahrung der Rückegassen praktisch unmöglich, diese in einen Zustand zu versetzen, in dem die technische Befahrbarkeit nicht mehr gegeben ist.

Spurbildungen bei der Holzernte sind ein einfaches Hilfsmittel, um den Waldbewirtschaftern und Holzeinschlagsunternehmen zu zeigen, ob die Holzernte bei feuchten Witterungsbedingungen noch bodenschonend ist. Eine Studie im Solling auf einem Lösslehm-Standort kam zu dem abschließenden Ergebnis, dass Spurtiefen bis 10 cm tolerierbar sind, während Spurtiefen über 20 cm strikt zu vermeiden sind (SPARRER et al.

2023). In dieser Untersuchung zeigt das Profil 1 Spurtiefen von 11 cm im Median und liegt damit über 10 cm im Vergleich zur Kategorie Unbefahren. In allen anderen Profilen liegen die Spurtiefen zwischen 0 cm und 10 cm. Somit weisen die Spurtiefen auf leichte Bodenverdichtungen hin, die im Rahmen der Bewirtschaftung akzeptabel sind.

Die Abnahme der Spurtiefe vom Profil 1 zum Profil 5 lässt sich durch den Verlauf der Rückegasse von Norden nach Süden erklären. Alle Profile liegen auf derselben Gasse. Da das Profil 1 am dichtesten am Querweg liegt, an dem das geerntete Holz gepoltet wird, wird es von den Rückezügen am häufigsten befahren. Je mehr Überfahrten, desto größer ist die Belastung des Bodens (AMPOORTER et al. 2010; UNGER und KASPAR 1994).

Ich hatte erwartet, dass die Spurtiefen für die Bereiche der

Mittelspur ähnlich zu den Werten der Kategorie Unbefahren sein müssten. Über alle Profile hinweg zeigen sie jedoch einen Trend zu Werten unterhalb der Kategorie Unbefahren. Eine Möglichkeit dies zu erklären wäre, dass der Bereich der Mittelspur nicht sauber erfasst wurde, bzw. dass in der Praxis stärker spurversetzt gefahren wird als angenommen. Dies ist jedoch unwahrscheinlich, da die Breite der Rückegasse durch den Baumbestand begrenzt ist. Eine andere Erklärung wäre eine Lastübertragung durch Reisig auf den Bereich der Mittelspur. Harvester legen Äste und Baumkronen auf der Rückegasse ab und fahren darüber. Das Reisig überträgt das Maschinengewicht auf eine größere Aufstandsfläche, die über die Fahrspur hinausreicht. Dadurch wird der Bodendruck in der Fahrspur verringert (JACKE et al. 2008). 10 Jahre nach der Holzernte konnte ich aufgrund des Vermoderungsprozesses nicht mehr feststellen, ob in den Bereichen der Profile Reisig abgelagert wurde. In einer Studie zur Befahrung auf einem lössüberprägten Sandstein-Standort konnten mittels Gasaustauschmessungen im Oberboden auch Beeinträchtigungen der Zwischenspur nachgewiesen werden, die jedoch nicht so stark ausgeprägt waren wie in den Bereichen der Fahrspuren (VON WILPERT & SCHÄFFER 2012).

Eine Zunahme der Trockenrohdichte mit zunehmender Bodentiefe ist natürlich, da die Bodenlast steigt. Doch wie kommt es, dass die Trockenrohdichte in den tieferen Bereichen von 25–40 cm geringer ist als in den Bereichen von 10–25 cm? Dies lässt sich damit erklären, dass der Bereich von 10–25 cm im Bereich des Ae-Horizonts liegt, der einen geringen Kohlenstoffgehalt von 0,6 % aufweist (Tab. 1). Der darunter liegende Bsh-Horizont (30–40 cm) weist einen Kohlenstoffgehalt von 6,1 % auf. Die Kohlenstoffgehalte sind auf den Humus im Boden zurückzuführen. Mit steigenden Humusgehalten nimmt die Trockenrohdichte ab (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016).

Trotz der erhöhten Trockenrohdichten im Spurbereich ist diese Verdichtung eine Beeinträchtigung, da die Pflanzen mehr Energie aufbringen müssen, um den Wurzelraum zu erschließen. In einer Untersuchung zu Wurzelentwicklungen von Buchensämlingen auf einem verdichteten Lösslehmstandort konnte eine Hemmung ab einer Trockenrohdichte von $1,25 \text{ g x cm}^{-3}$ nachgewiesen werden (HILDEBRAND 1983). Der Autor gibt zu bedenken, dass die Trockenrohdichte allein für eine Beurteilung nicht ausreicht und weitere Parameter wie die Porengröße berücksichtigt werden müssen. Da Sande grobkörnige Substrate sind (LÜSCHER et al. 2010) und die Trockenrohdichte in der Spur in einer Tiefe von 0–5 cm weniger als $1,25 \text{ g x cm}^{-3}$ beträgt, kann von einer wuchshemmenden Schadverdichtung nicht die Rede sein.

Die Wurzelverteilung zeigt höhere Wurzeldichten in den Ahe- und Bhs-Horizonten, die höhere Nährstoffverfügbarkeiten als die anderen Horizonte aufweisen. Bereiche mit hohen Nährstoffverfügbarkeiten sind auf diesem armen Sandstandort Bereiche mit hohen Humusgehalten (Tab. 1). Humusverbindungen weisen negative Partialladungen auf, sodass basische Kationen aufgrund ihrer positiven Partialladungen austauschbar gebunden sind (SCHEFFER et al. 2008).

Es ist nicht ungewöhnlich, dass die Wurzeldichte in Bereichen mit höherer Nährstoffverfügbarkeit ansteigt. Oft konnte ich in Bodenprofilen beobachten, dass sich förmlich ganze Wurzelnetze um Lehmknollen in Sandböden bildeten. Studien bestätigen durch Versuche mit Nährstoffpflastern,

dass Wurzeln zu den Bereichen mit hohen Nährstoffkonzentrationen hinwachsen (HODGE 2009).

Die Wurzeldichten im Oberboden der Fahrspur liegen unter denen der unbefahrenen Kontrolle. Studien aus Baden-Württemberg von Lösslehmstandorten weisen allerdings deutlich geringere Wurzeldichten auf, in manchen Bereichen wurden sogar gar keine Wurzeln gefunden (GAERTIG 2001; VON WILPERT & SCHÄFFER 2012). Die nur moderate Abnahme der Wurzeln in dieser Untersuchung ist auf das sandige Substrat zurückzuführen (EBELING et al. 2016; GOMEZ et al. 2002).

Somit zeigt sich, dass andere Ursachen den Effekt der Befahrung überlagern. Allerdings haben Bodenverdichtungen immer negative Auswirkungen auf das Wurzelwachstum. Doch erst wenn kritische Level überschritten werden, können sie nachgewiesen werden (UNGER & KASPAR 1994). Ich interpretiere die Daten so, dass auf diesem schwach mit Nährstoffen versorgten Standort es für den Baum von Vorteil ist, den Bereich der Rückegasse nach Ressourcen zu erschließen. So wird auch der dicht gelagerte Bsh-Horizont stark durchwurzelt. Dieser ist im unbefahrenen Bereich dichter gelagert als der Oberboden in dem Bereich der Fahrspur. Auf Standorten mit einer Überflusversorgung bilden Bäume zuweilen ihre Wurzeln nur rudimentär aus und erschließen nicht den gesamten Wurzelraum, wie es in Pflughorizonten beobachtet wurde (SCHACK & HILDEBRAND 1988).

Es liegen sogar Studien vor, die der Befahrung unter Umständen eine positive Wirkung auf das Pflanzenwachstum bescheinigen. So bewirkte eine befahrungsbedingte Verdichtung eines sandigen Lehms eine Verlängerung des Nutzungszeitraums von pflanzenverfügbarem Wasser, während die Zeiträume bei Schluffen und Tönen abnahmen (GOMEZ et al. 2002). Ich sehe es jedoch kritisch, der Befahrung eine positive Wirkung zu bescheinigen, da nie alle Wirkungen der Befahrung auf das Ökosystem betrachtet werden können und eine positive Wirkung nur für einen Teilbereich gelten kann. Dennoch ist die Befahrung für eine forstwirtschaftliche Nutzung von Wäldern unumgänglich. Diese sollte, wie auch andere Autoren fordern (AMPOORTER et al. 2012; CAMBI et al. 2015; VON WILPERT & SCHÄFFER 2012) auf permanenten Rückegassen erfolgen, um eine flächige Beeinträchtigung zu vermeiden. Bei solchen Forderungen sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass Maßnahmen für einen höheren Bodenschutz Kosten verursachen (THEES & OLSCHESKI 2013). Durch die Harvester-Technologie ist die Anlage und Nutzung von permanenten Rückegassen gängige Praxis. Die Gassenabstände sollten vom Standort abhängig gemacht werden (VON WILPERT & SCHÄFFER 2012).

Bei der Befahrung von Kulturflächen sieht es anders aus. Besonders im norddeutschen Tiefland entwickeln lichte Kiefernwälder eine intensive Begleitvegetation aus Gräsern (MÜLLER et al. 1997) oder auch aus Spätblühender Traubekirsche, die ein Kulturhindernis darstellen. Für eine rationelle Kulturbegründung ist der Einsatz von Technik erforderlich, denn der Fachkräftemangel macht sich auch im Forst bemerkbar (DEUTSCHER FORSTVEREIN e.V. 2023) und die körperlich schwere Arbeit im Forst macht diese Tätigkeit nicht attraktiver (KAUFMANN 2010). So werden heute schon kleine Forstraupen für diverse Arbeiten auch abseits der Rückegasse eingesetzt (TASSIUS 2018). Zur Verdichtungswirkung kleiner, leichter Maschinen gibt es kaum Untersuchungen. Eine Studie aus Belgien, bei der ein 1,9 t schwerer Schmalspurschlepper zum Einsatz kam, zeigte keine erhöhte Trockenrohdichte und

keinen erhöhten Eindringwiderstand. Leider wurden keine Gasaustauschmessungen durchgeführt (AMPOORTER et al. 2010). Doch auch beim Einsatz leichter Maschinen kommt es auf den Kontaktflächendruck an. Dieser kann durch das Anlegen von geringen Reifenfülldrücken, der Reifenwahl oder durch den Einsatz von Kettenlaufwerken merklich verringert werden (EBEL 2006; JACKE 2008).

Da die Studie im Rahmen einer Bachelorarbeit erfolgte, konnte nur ein Bestand mit 5 Profilen untersucht werden, was die Aussagekraft für andere Bestände einschränkt. Darüber hinaus wären Gasflussmessungen wünschenswert, um die Ergebnisse mit denen anderer Autoren besser vergleichen zu können. Die Aussagen zu den Nährstoffaufnahmen unterliegen ebenfalls Limitationen, da Nährstoffanalysen nur an einem Referenzprofil durchgeführt wurden und keine Messungen zu Nährstoffverlagerungen erfolgten. Dennoch scheint auf den untersuchten Standorten eine pauschale Einschränkung auf eine einmalige flächige Befahrung im Zuge der Kulturbegründung, wie sie die PEFC-Zertifizierung erlaubt, nicht gerechtfertigt zu sein (PEFC DEUTSCHLAND E.V. 2014). Auf verdichtungsempfindlichen Substraten sollte eine Befahrung gänzlich unterlassen werden, während bei verdichtungsunempfindlichen Substraten mehrere Überfahrten mit leichten Maschinen und geringem Kontaktflächendruck erlaubt sein sollten. Andererseits werden Arbeitsverfahren eingesetzt, welche zwar von der Gasse aus arbeiten, aber unter Umständen erhebliche Nährstoffvorräte flächig auf die Gasse verlagern (TAMKE 2024).

In dieser Untersuchung liegt der Fokus auf dem Mineralboden. Bei zukünftigen Untersuchungen zu Verdichtungen auf verdichtungsunempfindlichen Böden sollte der Auflagehumus mit einbezogen werden. Dies ist nicht nur wichtig, weil der Auflagehumus am intensivsten durchwurzelt ist (LEUSCHNER 1998), sondern auch, weil der Humus verdichtet werden kann. So konnten ich Spurtiefen messen, die sich im Mineralboden jedoch nicht in dem Maße abzeichneten. Somit war hauptsächlich der Auflagehumus verdichtet. Durch Befahrung kommt es zu einer Beeinträchtigung der Konnektivität des Porenraums zwischen Auflagehumus und Mineralboden, wodurch der Gasaustausch gestört wird (SPARRER et al. 2023). Dies erklärt die reduzierten Wurzeldichten trotz fehlender Verdichtungsmerkmale im Mineralboden (AMPOORTER et al. 2010). Hier stellen sich die Fragen, ob alle Humusformen gleiche Eigenschaften zeigen, ab welchen Bodendrücken eine Humusschädigung einsetzt und wie sich Befahrung auf Böden ohne Humusauflage, beispielsweise nach Bodenbearbeitung, auswirkt.

5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass neben Befahrungen auch andere Faktoren, wie die Verfügbarkeit von Nährstoffen oder Wasser, einen Einfluss auf die Wurzelverteilung und -entwicklung haben. Auf dem Versuchsstandort mit Sand als Ausgangssubstrat wurden die kritischen Level durch die Befahrung bei der Holzernte nicht überschritten, weshalb sie in diesem Fall nicht ausschlaggebend waren.

Unter den hier untersuchten Bedingungen konnten keine wuchshemmenden Verdichtungseffekte nachgewiesen werden.

Vor diesem Hintergrund kommt man schnell zu dem Schluss, dass Befahrungseinschränkungen, z. B. durch Zertifizierungen, vom Standort abhängig sein sollten.

Da die Rückegassen eine ähnlich hohe Feinwurzeldichte wie die Referenz aufweisen, ist davon auszugehen, dass die Nährstoffkonzentrationen auf der Rückegasse durchaus aufgenommen werden können. Fraglich bleibt jedoch, ob die hohen Nährstofffrachten vollständig aufgenommen werden können. Daher sollte nach Möglichkeit auf eine Nährstoffkonzentration auf der Rückegasse verzichtet werden.

Mein Dank gilt Prof. Dr. Thorsten Gaertig für die anregenden Diskussionen. Für weitere Anmerkungen möchte ich mich bei den 2 anonymen Gutachtern und dem Schriftleiter bedanken, welche zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

Literatur

- ALLMAN, M., JANKOVSKÝ, M., MESSINGEROVÁ, V., ALLMANOVÁ, Z. (2017): Soil moisture content as a predictor of soil disturbance caused by wheeled forest harvesting machines on soils of the Western Carpathians. *Journal of Forestry Research* **28** (2): 283–289.
- AMPOORTER, E., DE SCHRIJVER, A., VAN NEVEL, L., HERMY, M., VERHEYEN, K. (2012): Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science* **69** (5): 533–542.
- AMPOORTER, E., VAN NEVEL, L., DE VOS, B., HERMY, M., VERHEYEN, K. (2010): Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management* **260** (10): 1664–1676.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.) (2016): Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching bei München.
- BINDICK, T. (2025): Untersuchung der Auswirkung forstlicher Befahrung auf den Bodenzustand von Rückegassen auf sandigen Waldstandorten in Norddeutschland. Bachelorarbeit. Göttingen.
- BORCHERT, H., HUBER, C., GOETTLEIN, A., KREMER, J. (2015): Nutrient Concentration on Skid Trails under Brush-Mats – Is a Redistribution of Nutrients Possible? *Croatian Journal of Forest Engineering* **36** (2): 243–252.
- BÜRKNER, P.-C. (2018): Advanced bayesian multilevel modeling with the R package brms. *The R Journal* **10** (1): 395–411.
- BÜRKNER, P.-C. (2017): brms: An package for bayesian multilevel models using Stan. *Journal of Statistical Software* **80** (1): 1–28.
- CAMBI, M., CERTINI, G., NERI, F., MARCHI, E. (2015): The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* **338**: 124–138.
- CARPENTER, B., GELMAN, A., HOFFMAN, M.D., LEE, D., GOODRICH, B., BETANCOURT, M., BRUBAKER, M., GUO, J., LI, P., RIDDELL, A. (2017): Stan: A probabilistic programming language. *Journal of Statistical Software* **76** (1): 1–32.
- DEUTSCHER FORSTVEREIN E.V. (2023): Fachkräftemangel auch im Wald? Internet: <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/aktuelles/news-detailansicht/news/fachkraeftemangel-auch-im-wald/>.
- EBEL, A. (2006): Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen. Monographie. Göttingen.
- EBELING, C., LANG, F., GAERTIG, T. (2016): Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. *Forest Ecology and Management* **359**: 74–82.

- FREY, B., HARTMANN, M. (2013): Biodiversität von Waldböden– Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. Forum Wissen, Band 2013. 61–69.
- FROELICH, H.A., MILES, D.W.R., ROBBINS, R.W. (1985): Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. Soil Science Society of America Journal **49** (4): 1015–1017.
- FSC DEUTSCHLAND UND VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT E.V. (2018): Deutscher FSC-Standard 3.0. Freiburg (Brsg.).
- GAERTIG, T. (2001): Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. Inaugural-Dissertation. Freiburg im Breisgau.
- GAERTIG, T., PULS, Ch., SCHACK-KIRCHNER, H., HILDEBRAND, E.E. (2000): Die Beurteilung der Bodenstruktur in Waldböden: Feldbodenkundliche Merkmale und ihre Relevanz für die aktuelle Bodenbelüftung auf Lösslehm-Standorten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **171** (12): 227–234.
- GOMEZ, A., POWERS, R.F., SINGER, M.J., HORWATH, W.R. (2002): Soil compaction effects on growth of young Ponderosa Pine following litter removal in California's Sierra Nevada. Soil Science Society of America Journal **66** (4): 1334–1343.
- HERNANGÓMEZ, D. (2026): giscoR: Download Map Data from GISCO API – Eurostat. Internet: <https://ropengov.github.io/giscoR/>.
- HILDEBRAND, E.E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. Forstwissenschaftliches Centralblatt **102** (1): 111–125.
- HODGE, A. (2009): Root decisions. Plant, Cell & Environment **32** (6): 628–640.
- HORVAT, M.E. (2023): Der Einfluss von Befahrung alter Rückegassen mit einem schweren Rückezug auf mechanische, strukturelle und funktionelle Eigenschaften eines mit Fichten bestockten Lössbodens in Abhängigkeit von der Fahrwerkkonfiguration. Internet: <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/14522> (26.05.2025).
- JACKE, H. (2008): Radlos – Wieviel Druck vertragen Mensch und Boden? Forst & Technik **20** (11): 2–6.
- JACKE, H., SENGPIEL, A., BROKMEIER, H. (2008): Zur Druckverteilung unter Reisigmatten. Forst & Technik **20** (10): 22–27.
- KAUFMANN, U. (2010): Im Wald geht der Puls hoch. Schwere Arbeit kann den Bewegungsapparat schädigen. Wald und Holz **91** (12): 33–35.
- KAY, M. (2022): tidybayes: Tidy data and geoms for Bayesian models. Internet: <http://mjskay.github.io/tidybayes/> (05.03.2022).
- LENHARD, R.J. (1986): Changes in void distribution and volume during compaction of a forest soil. Soil Science Society of America Journal **50** (2): 462–464.
- LEUSCHNER, C. (1998): Water extraction by tree fine roots in the forest floor of a temperate Fagus-Quercus forest. Annales des sciences forestières **55** (1–2): 141–157.
- LÜSCHER, P., FRUTIG, F., SCIACCA, S., SPJEVAK, S., THEES, O. (2010): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) (2010): Merkblatt für die Praxis, Band **45**. Birmensdorf: 12.
- MÜLLER, J., BOLTE, A., BECK, W., ANDERS, S. (1997): Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie **28**: 407–414.
- NOPP, U., KAZDA, M., LANG, H.P. (1998): Zur Umwandlung sekundärer Fichtenwälder auf Pseudogleyböden in Stieleichen-Hainbuchen-Wälder unter besonderer Berücksichtigung von Stockrodungen. Forstarchiv **69** (1): 12–18.
- PEBESMA, E. (2018): Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. The R Journal **10** (1): 439.
- PEBESMA, E., BIVAND, R. (2023): Spatial Data Science: With Applications in R. New York. Internet: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429459016> (23.01.2026).
- PEFC DEUTSCHLAND E.V. (2014): PEFC-Standards für nachhaltige Waldbewirtschaftung – Deutscher PEFC-Standard. Leitlinie für nachhaltige Waldbewirtschaftung zur Einbindung des Waldbesitzers in den regionalen Rahmen. Stuttgart.
- R CORE TEAM (2024): R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Internet: <https://www.R-project.org/>.
- ROSÉN, K., LUNDMARK-THELIN, A. (1987): Increased nitrogen leaching under piles of slash—a consequence of modern forest harvesting techniques. Scandinavian Journal of Forest Research **2** (1–4): 21–29.
- SCHACK, H., HILDEBRAND, E. (1988): Einfluß der mechanischen Beanspruchung eines Sandbodens auf das Wurzelwachstum von Forstpflanzen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **159** (1/2): 27–34.
- SCHAEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., STAHR, K. (Hrsg.) (2008): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum-Lehrbuch. Heidelberg.
- SPARRER, J., ROLFES, L., JENSEN, T., SENNHENN-REULEN, H., HEITKAMP, F., OVERBECK, M., BRUNOTTE, J., TALKNER, U. (2023): Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte. Projektabschlussbericht. Gülzow-Prüzen.
- TAMKE, D. (2024): Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden sowie den Erfolg von Eichenkulturen. Monografie. Göttingen. Internet: <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/15195> (22.04.2024).
- TASSIUS, P. (2018): Vorbereitung von Pflanzstreifen mit funktgesteuerter Mulchraupe im Forstamt Reinhardshagen. ImDialog **02**: 8–9.
- VON TEUFFEL, K. (2012): Nachhaltigkeit und Holznutzung. AFZ – Der Wald **4**: 8–9.
- THEES, O., OLSCHESKI, R. (2013): Ökonomische Überlegungen zum physikalischen Bodenschutz im Wald. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung, WSL Berichte, Band **6**. Birmensdorf: 31–43.
- UNGER, P.W., KASPAR, T.C. (1994): Soil compaction and root growth: A review. Agronomy Journal **86** (5): 759–766.
- WALL, A. (2008): Effect of removal of logging residue on nutrient leaching and nutrient pools in the soil after clearcutting in a Norway spruce stand. Forest Ecology and Management **256** (6): 1372–1383.
- WICKHAM, H., AVERICK, M., BRYAN, J., CHANG, W., MCGOWAN, L.D., FRANÇOIS, R., GROLEMUND, G., HAYES, A., HENRY, L., HESTER, J., KUHN, M., PEDERSEN, T.L., MILLER, E., BACHE, S.M., MÜLLER, K., OOMS, J., ROBINSON, D., SEIDEL, D.P., SPINU, V., TAKAHASHI, K., VAUGHAN, D., WILKE, C., WOO, K., YUTANI, H. (2019): Welcome to the tidyverse. Journal of Open Source Software **4** (43): 1686.
- VON WILPERT, K., SCHÄFFER, J. (2012): Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft. Bodenschadverdichtung- Vermeidung, Regeneration, Überwachung. Diskussionsforum Bodenkunde. Osnabrück.

ZEMKE, J.J., ENDERLING, M., KLEIN, A., SKUBSKI, M. (2019): The Influence of Soil Compaction on Runoff Formation. A Case Study Focusing on Skid Trails at Forested Andosol Sites. *Geosciences* **9** (5): 204.

submitted: 06.02.2026

reviewed: 26.02.2026

accepted: 01.04.2026

Autorenanschrift:

Dr. Dominik Tamke
Landwirtschaftskammer Niedersachsen – Geschäftsbereich
Forstwirtschaft
Fachbereich 4.1
Wunstorfer Landstr. 9
30453 Hannover

E-Mail: dominik.tamke@lwk-niedersachsen.de