

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte (Akronym: „BoSchuHoErn“)**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)<sup>1</sup>**

**Teilvorhaben 2: Johann Heinrich von Thünen-Institut  
Bundesforschungseinrichtung für Ländliche Räume, Wald und  
Fischerei – Institut für Agrartechnologie (TI)<sup>2</sup>**

**Unter Beteiligung des Niedersächsischen Forstplanungsamts (NFP)<sup>3</sup>**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 22024114**

**Teilvorhaben 2: 22014616**

Laufzeit:

**01.06.2017 bis 31.08.2022**

Monat der Erstellung:

**08/2023**

Autoren:

**Jannis Sparrer<sup>1</sup>, Lennart Rolfes<sup>2</sup>, Thomas Jensen<sup>3</sup>, Holger Sennhenn-Reulen<sup>1</sup>, Felix Heitkamp<sup>1</sup>, Marc Overbeck<sup>3</sup>, Joachim Brunotte<sup>2</sup>, Ulrike Talkner<sup>1</sup>**

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 bei der Autorenschaft.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>12</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>14</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>15</b>
<b>I. Kurzbericht .....</b>	<b>16</b>
1. Aufgabenstellung.....	16
2. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	17
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	19
3.1 Arbeitspakete und Meilensteine .....	19
3.2 Zusammenfassung.....	23
<b>II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>28</b>
1. Parameter- und Standortsauswahl.....	28
2. Versuchsergebnisse .....	35
2.1 Korngrößenverteilung (TV2).....	35
2.1.1 Material & Methoden .....	35
2.1.2 Ergebnisse .....	36
2.1.3 Schlussfolgerungen .....	40
2.2 Trockenrohdichte (TV2).....	40
2.2.1 Material & Methoden .....	41
2.2.2 Ergebnisse .....	42
2.2.3 Schlussfolgerungen .....	44
2.3 Porenraumverteilung und nutzbare Feldkapazität (TV2) .....	45
2.3.1 Material & Methoden .....	45
2.3.2 Ergebnisse .....	47
2.3.3 Schlussfolgerungen .....	51
2.4 Gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (TV2).....	52
2.4.1 Material & Methoden .....	52
2.4.2 Ergebnisse .....	53
2.4.3 Schlussfolgerungen .....	56
2.5 Bodenfeuchtedynamik (TV1).....	57
2.5.1 Material & Methoden .....	58
2.5.2 Ergebnisse .....	60
2.5.3 Schlussfolgerungen .....	63
2.6 Luftleitfähigkeit (TV2) .....	64
2.6.1 Material & Methoden .....	64
2.6.2 Ergebnisse .....	65
2.6.3 Schlussfolgerungen .....	66
2.7 Eisenstabreaktion (TV1).....	66
2.7.1 Material & Methoden .....	67
2.7.2 Ergebnisse .....	69
2.7.3 Schlussfolgerungen .....	71

2.8	Gasflussmessungen (TV1).....	72
2.8.1	Material & Methoden.....	73
2.8.2	Ergebnisse.....	76
2.8.3	Schlussfolgerungen.....	84
2.9	Bodenbiologische Eigenschaften (TV1).....	85
2.9.1	Material & Methoden.....	86
2.9.2	Ergebnisse.....	89
2.9.3	Schlussfolgerungen.....	95
2.10	Streuabbau (TV1).....	96
2.10.1	Material & Methoden.....	97
2.10.2	Ergebnisse.....	98
2.10.3	Schlussfolgerungen.....	102
2.11	Bodenchemische Eigenschaften (TV1).....	103
2.11.1	Material & Methoden.....	103
2.11.2	Ergebnisse.....	103
2.11.3	Schlussfolgerungen.....	112
2.12	Säuleninkubationsversuch (TV1).....	113
2.12.1	Material & Methoden.....	114
2.12.2	Ergebnisse.....	117
2.12.3	Schlussfolgerungen.....	122
2.13	Durchwurzelung (TV1).....	122
2.13.1	Material & Methoden.....	123
2.13.2	Ergebnisse.....	124
2.13.3	Schlussfolgerungen.....	125
2.14	Setzungsmessung (TV2).....	127
2.14.1	Material & Methoden.....	127
2.14.2	Ergebnisse.....	129
2.14.3	Schlussfolgerungen.....	132
2.15	Entwicklung von Fahrspurtiefe und Humusaufgabe durch erneute Befahrung (TV1) ...	133
2.15.1	Material & Methoden.....	133
2.15.2	Ergebnisse.....	133
2.15.3	Schlussfolgerungen.....	134
2.16	Verteilung von Spurtiefen in einem exemplarischen Untersuchungsgebiet (TV1+TV2).....	135
2.16.1	Material & Methoden.....	135
2.16.2	Ergebnisse.....	135
2.16.3	Schlussfolgerungen.....	136
2.17	Bodenfunktionsbewertung (TV1+TV2).....	137
2.17.1	Material & Methoden.....	137
2.17.2	Ergebnisse.....	142
2.17.3	Schlussfolgerungen.....	144
2.18	Ableitung „ökologischer Leitplanken“ für die Fahrspurtiefe (TV1+TV2).....	145

3.	Verwertung .....	149
3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen .....	149
3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	149
3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	149
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	149
4.	Erkenntnisse von Dritten .....	151
5.	Veröffentlichungen .....	156
5.1	Teilvorhaben 1 .....	156
5.2	Teilvorhaben 2 .....	156
5.3	Teilvorhaben 1 + 2 .....	157
<b>III.</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>158</b>
<b>IV.</b>	<b>Anhang Schlussbericht .....</b>	<b>164</b>
<b>V.</b>	<b>Anhang nach Teilvorhaben .....</b>	<b>172</b>
1.	Teilvorhaben 1 .....	172
1.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	172
1.2	Bearbeitete Arbeitspakete .....	172
1.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	174
2.	Teilvorhaben 2 .....	176
2.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	176
2.2	Bearbeitete Arbeitspakete .....	176
2.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	176

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiele für die Behandlungen <i>FS-A</i> (links), <i>FS-B</i> (Mitte) und <i>FS-C</i> (rechts).	29
Abbildung 2:	Anzahl verwendeter Laufmeter ( <i>n</i> ), Mittlere Spurtiefe (mean) und Standardabweichung ( <i>sd</i> ) in den Fahrspurbehandlungen <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> und <i>FS-C</i> von TV1.	30
Abbildung 3:	Anzahl verwendeter Laufmeter ( <i>n</i> ), Mittlere Spurtiefe (mean) und Standardabweichung ( <i>sd</i> ) in den Fahrspurbehandlungen <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> und <i>FS-C</i> von TV2.	30
Abbildung 4:	Übersicht über die Lage der Versuchsgassen beider Teilvorhaben im Forstamt Dassel.	32
Abbildung 5:	PARIO-Messgerät im Labor des Thünen-Instituts für Agrartechnologie.	36
Abbildung 6:	Korngrößendreieck nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA 5 und die Einteilung der Bodenart in Bodenarten-Hauptgruppen, Bodenarten-Gruppen und Bodenarten.	37
Abbildung 7:	Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> und <i>FS-C</i> in der Tiefenstufe 20 cm.	37
Abbildung 8:	Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> und <i>FS-C</i> in der Tiefenstufe 35 cm.	38
Abbildung 9:	Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> und <i>FS-C</i> in der Tiefenstufe 50 cm.	39
Abbildung 10:	Mittlerer Anteil der Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand aller untersuchten Varianten <i>FS-A</i> , <i>FS-B</i> , <i>FS-C</i> und <i>Ref-A</i> , <i>Ref-B</i> , <i>Ref-C</i> in den Tiefen 20 cm, 35 cm und 50 cm (von links nach rechts) nach Untersuchung von je 3 Wiederholungsproben des Feinbodens mit dem PARIO Plus Verfahren, dargestellt als gestapelte Säulen.	39
Abbildung 11:	Mittlere Korngrößenfraktionen des Feinbodens aller untersuchten Varianten differenziert nach der Exposition der Versuchsflächen „Nord“ (jeweils links) und „Süd“ (rechts) und den Probenahmetiefen 20 cm, 35 cm und 50 cm (von links nach rechts). Dargestellt sind die Mittelwerte aller Messungen mit dem PARIO Plus Verfahren der Anteile von Ton, Schluff und Sand als gestapelte Säulen, die in Summe 1 (100 %) ergeben.	40
Abbildung 12:	Gewinnung von 100 cm <sup>3</sup> fassenden Bodenproben mittels Stechzylindern bei Versuchen im Solling, Niedersachsen.	41
Abbildung 13:	Trockenrohdichte (g cm <sup>-3</sup> ) in den Tiefenstufen bis 50 cm unterhalb der Mineralbodenoberkante, dargestellt als Boxplots aller Varianten <i>FS</i> und <i>Ref</i> . Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Behandlungsunterschiede je Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	43
Abbildung 14:	Trockenrohdichte (g cm <sup>-3</sup> ) in den ausgewählten Tiefenstufen 20 cm (oben) und 35 cm (unten) in Bezug zur Distanz zur Fahrspurmitte (cm), dargestellt als Scatterplots aller <i>FS</i> -Varianten mit geglättetem Mittel (schwarz) und dem 95 % Konfidenzintervall (grau).	44
Abbildung 15:	Verdunstungsversuche an 250 cm <sup>3</sup> Stechzylinderproben und dem HYPROP2 Messgerät (©Meter Group AG).	46
Abbildung 16:	Dimensionslose Porenziffer der Proben aus den Tiefen bis 50 cm der Fahrspuren <i>FS-A</i> (0-10 cm), <i>FS-B</i> (10-20 cm) und <i>FS-C</i> (20-30 cm) sowie der unbefahrenen Referenz <i>Ref</i> . Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben (rechts) dargestellt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	48
Abbildung 17:	Porenraumverteilung der Klassen weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen und Feinporen, abgeleitet aus den Retentionsdaten der ungestörten Bodenproben aus den Tiefen 2,5 cm – 7,5 cm– 12,5 cm– 20 cm– 35 cm.	49
Abbildung 18:	Anteil der Luftkapazität als dimensionslose Größe am Gesamtporenvolumen der Fahrspurböden und der Referenzparzellen bis 35 cm. Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben angezeigt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	50

<b>Abbildung 19:</b> Anteil der nutzbaren Feldkapazität als dimensionslose Größe am Gesamtporenvolumen der Fahrspurböden und der Referenzparzellen bis 35 cm Tiefe. Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben angezeigt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau $\leq 5\%$ ). .....	51
<b>Abbildung 20:</b> Mittlere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (auf einer logarithmierten Achse) der untersuchten Varianten in den Probenahmetiefen bis 50 cm. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede je Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau $\leq 5\%$ ).....	54
<b>Abbildung 21:</b> Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (auf einer logarithmierten Achse) der untersuchten Varianten in den Probenahmetiefen 20 cm (oben) und 35 cm (unten) in Abhängigkeit zur Distanz zur Fahrspurmitte (cm). Ergänzend ist der geglättete Mittelwert (schwarz) und das 95% Konfidenzintervall (grau) angegeben. ....	55
<b>Abbildung 22:</b> Mittlere ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit aller Untersuchungszeitpunkte und Varianten in den Probenahmetiefen 20 cm bis 50 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Behandlungsunterschiede je Tiefenstufe nach dem Tukey-Test an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau $\leq 5\%$ ).....	56
<b>Abbildung 23:</b> Datenlogger und Sensoren (A), Leerrohr als Überführungshilfe für Sensorkabel (B), Zubereitung von Lössschlätze (C) und ein neben einer Respirationshaube eingebauter Sensor (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.). ....	58
<b>Abbildung 24:</b> Verlauf der Mediane der Bodenwasserspannung (kPa) $\pm 25\%$ - und $75\%$ -Quantile sowie der Bodentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 95\%$ -Konfidenzintervalle zwischen März 2019 und März 2022. Die Daten wurden in einer Tiefe von 6 cm des Mineralbodens gemessen und repräsentieren somit die Feuchtdynamik im Oberboden (Aeh-Horizont). Das Messsystem ist auf Maximalwerte von 239 kPa limitiert (zensierte Werte). Zu Einordnungszwecken sind in den Diagrammen der Bodenwasserspannung die Saugspannungswerte für pF 1,8 (6,3 kPa), pF 2,5 (31,62 kPa) und pF 3,0 (100 kPa) als horizontale Linien eingetragen sowie beim Bodentemperaturverlauf bei $5^{\circ}\text{C}$ und $15^{\circ}\text{C}$ . Die nach Behandlungen farblich differenzierte Schraffierung im Hintergrund gibt die Streuung der Messdaten wieder. In den ersten drei Diagrammen ist jeweils der direkte Vergleich der Bodenwasserspannungsdynamik der Fahrspurbehandlungen (FS-A, FS-B und FS-C) zu den jeweiligen Referenzparzellen (Ref-A, Ref-B und Ref-C) aufgetragen. Das vierte Diagramm zeigt die gemessenen Bodentemperaturen nach südlicher bzw. nördlicher Exposition. ....	60
<b>Abbildung 25:</b> Modellierter Verlauf der Bodenwasserspannung unter Ausschluss von meteorologischen Variablen.....	62
<b>Abbildung 26:</b> Modellierter Verlauf der Bodenwasserspannung in Zusammenhang mit dem variablen Einfluss von meteorologischen Variablen. ....	63
<b>Abbildung 27:</b> Luftleitfähigkeit der untersuchten Varianten bis 27 cm Tiefe unterhalb der Mineralbodenoberkante, dargestellt als logarithmierter Wert in cm pro Sekunde und dem gleitenden Mittelwert je Stratum. Verschiedene Buchstaben je Tiefenstufe zeigen signifikante Behandlungsunterschiede an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau $\leq 5\%$ ). ....	65
<b>Abbildung 28:</b> Tiefenverlauf des gravimetrischen (links) und volumetrischen (rechts) Wassergehalts in den Fahrspuren und den Referenzparzellen ( $n = 4$ ) bei Messung der Luftleitfähigkeit. Der volumetrische Wassergehalt wurde auf Basis der mittleren Trockenrohdichte aller Fahrspuren der entsprechenden Gruppe und Tiefe berechnet. Die Trockenrohdichten nicht untersuchter Tiefen wurden auf Basis linearer Interpolation approximiert. ....	66
<b>Abbildung 29:</b> Eisenstäbe im fabrikneuen, blanken Zustand (A) sowie nach 14-tägiger Exposition in Fahrspuren mit vorwiegend grau-stumpfer Patinaausbildung (B) und unbefahrenen Referenzparzellen, bei denen das Merkmal Rost (rötlich-braun) dominiert (C) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.). ....	67
<b>Abbildung 30:</b> Mittlere Anzahl zum Eintreiben benötigter Hammerschläge $\pm 95\%$ -Konfidenzintervalle nach Jahreszeiten und Behandlungen.....	69
<b>Abbildung 31:</b> Häufigkeitsgewichteter Tiefenverlauf der Ausprägungen der Merkmale „Blank“, „Patina“ und „Rost“ von blanken Eisenstäben nach 14-tägiger Exposition während der vier Untersuchungszeiträume Frühling, Sommer, Herbst und Winter $\pm$ Standardfehler (farbliche Schraffierung im Hintergrund). Die beobachteten Werte („Beobachtung“) sowie das Ergebnis der	

	Modellprädiktionen („Prädiktion“) aus der statistischen Analyse der zusammengefassten Tiefenstufen > 0 cm bis ≤ 10 cm, >10 cm bis ≤ 20 cm und > 20 cm bis ≤ 30 cm (Mittelwerte; estimated marginal means) werden gegenübergestellt. Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen je Tiefenstufe an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	70
Abbildung 32:	Auf der Versuchsfläche aufgestellte und verschlossene Respirationshauben (A+B), Methode der Überführung einer Gasprobe in eine Sammelspritze (C) sowie zur Befüllung vorbereitete Exetainer während einer Beprobung <i>in situ</i> (D) (Fotos: © Siebrecht, U.).	73
Abbildung 33:	Mittlerer Verlauf von Luft- und Bodentemperatur (obere Grafik), beobachteter CO <sub>2</sub> -C-Freisetzung (Bodenatmung, mittlere Grafik) sowie eine Zusammenstellung aus den Mittelwerten der Bodenrespiration und den Medianen der Bodenwasserspannung (untere Grafik) der Jahre 2018-2020. Die schattierten Bereiche im Hintergrund der Ganglinien der mittleren Grafik geben zudem Information über die Streuung der Daten als ± ein Standardfehler.	76
Abbildung 34:	Modellierter Verlauf der behandlungsweisen CO <sub>2</sub> -C-Freisetzungen der Jahre 2019-2020 mit simultanen Unsicherheitsintervallen in Abhängigkeit von Bodenwasserspannung und –temperatur.	78
Abbildung 35:	Posteriori-Wahrscheinlichkeiten für alle paarweisen Differenzen des modellierten Verlaufs der CO <sub>2</sub> -C-Freisetzung der Jahre 2019-2020. Die posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Vergleiche von <i>Ref</i> > <i>FS-B</i> , <i>Ref</i> > <i>FS-C</i> und <i>FS-A</i> > <i>FS-B</i> verlaufen wie die des Vergleichs <i>FS-A</i> > <i>FS-C</i> während des gesamten Beobachtungszeitraumes bei 100 %, weswegen die einzelnen Ganglinien nicht sichtbar und durch den Vergleich <i>FS-A</i> > <i>FS-C</i> überdeckt werden.	79
Abbildung 36:	Einfluss variierender Bodenwasserspannung und Bodentemperatur auf die CO <sub>2</sub> -Flüsse in den Behandlungen. Der obere Teil der Abbildung zeigt modellierte CO <sub>2</sub> -C-Gasflüsse unter variierenden Bodenwasserspannungen (Zunahme der Bodenwasserspannung von pF 0 ± 0 kPa bis pF 3 ± 100 kPa; Anstieg entspricht einer Austrocknung der Böden) und zunehmenden Bodentemperaturen, wobei zur Veranschaulichung des Effekts das Ergebnis des CO <sub>2</sub> -C-Flusses bei einer Bodentemperatur von 10°C angegeben ist. Im unteren Teil der Abbildung ist ebenfalls die Entwicklung der CO <sub>2</sub> -C-Freisetzungen bei ansteigender Trockenheit dargestellt, jedoch in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodentemperaturen (6°C, 8°C, 10°C und 12°C). Die angegebenen Gasflüsse beziehen sich auf den Zeitpunkt t = 45 Tage (seit 04.03.2019), zu dem der modellierte Einfluss der Zeit gleich 0 ist.	80
Abbildung 37:	Ergebnis der Gasflussmessungen des Jahres 2021 differenziert nach den mittleren, beobachteten Gasflüssen von CO <sub>2</sub> (a), N <sub>2</sub> O (b) und CH <sub>4</sub> (c). Die Streuung der Messdaten (Standardfehler) wird durch die farbliche Schraffierung im Hintergrund der Ganglinien repräsentiert. Zudem zeigt die Abbildung die Verläufe der Boden- und Lufttemperatur (d) sowie der Mediane der Bodenwasserspannung (e).	81
Abbildung 38:	Mittlere CO <sub>2</sub> -C- (a), N <sub>2</sub> O-N (b), CH <sub>4</sub> -C-Emissionen (c) sowie CO <sub>2</sub> e-Emissionen (d) in Tonnen bzw. Kilogramm je Jahr und Hektar ± 95%-Konfidenzintervall abgeleitet aus den Messergebnissen des Jahres 2021.	82
Abbildung 39:	Posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die behandlungsweisen Differenzen der modellierten CO <sub>2</sub> -C-, N <sub>2</sub> O-N- und CH <sub>4</sub> -C-Emissionen des Jahres 2021 im Zeitverlauf. Eine Posteriori-Verteilung ist eine direkte Wahrscheinlichkeitsaussage für die Unsicherheit, die, bedingt auf die genutzten Daten und das verwendete Modell, bezüglich einer unbekanntem Größe besteht. Die mittlere, verstärkte Linie innerhalb der Plots stellt den zentralen Wert innerhalb der Posteriori-Verteilung dar und gibt den wahrscheinlichsten Behandlungsunterschied wieder. Ober- und unterhalb der zentralen Linie liegt ein Anteil von jeweils 50 % der posteriori-Wahrscheinlichkeit dafür, dass der wahre Behandlungsunterschied oberhalb bzw. unterhalb dieses Wertes liegt. Die Intervalle besitzen von „heller“ (außen) zu „dunkler“ (innen) Spannweiten von 2,5 %, 2,5 %, 5 %, 15 % und 25 %. Für Werte außerhalb des gesamten Intervalls besteht eine Posteriori-Wahrscheinlichkeit von 0 %. Beinhaltet eine Schattierung die Nulllinie nicht, handelt es sich um einen eindeutigen Behandlungsunterschied (Differenz zwischen den Gasflüssen zweier Behandlungen größer bzw. kleiner als Null).	83

Abbildung 40: Beprobung der Humusauflage (A), Vorbereitung von Bodenproben (B), Beprobung des Mineralbodens mit einem Wurzelbohrer (C) und Separation entnommener Bodenkerne in Tiefenstufen (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).	86
Abbildung 41: Schema der Entnahme gestörter Bodenproben in Fahrspuren und unbefahrenem Waldboden von TV1.	87
Abbildung 42: Gehalte an $C_{mik}$ , $N_{mik}$ & $P_{mik}$ in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	89
Abbildung 43: Humusvorräte in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> . Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont nach dem Tukey-Test an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	90
Abbildung 44: Vorräte an $C_{mik}$ , $N_{mik}$ & $P_{mik}$ in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	91
Abbildung 45: Mittlere, massengewichtete $C_{mik-}$ , $N_{mik-}$ & $P_{mik-}$ -Gehalte über die Horizonte L+O <sub>f</sub> , O <sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm.	92
Abbildung 46: Basalatmung und Metabolischer Quotient in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	93
Abbildung 47: $C_{mik}/C_{ges-}$ und $N_{mik}/N_{ges-}$ -Quotienten in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	94
Abbildung 48: $C_{mik}/N_{mik-}$ und $C_{mik}/P_{mik-}$ -Quotienten in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	95
Abbildung 49: Gewinnung (A) und Sortierung (B) von Fichtenstreu sowie Ausbringung (C) und Einholung (D) von Netzbeuteln (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).	97
Abbildung 50: Überblick über die Untersuchungszeiträume des Netzbeutelversuchs nach Behandlungen.	99
Abbildung 51: Streurückstände nach 13 bzw. 21 Monaten Expositionszeit differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm) und Fahrspuren (S1-S6 und S7-S18; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen ± 95 %-Konfidenzintervalle ( <i>estimated marginal means</i> ; Werte bei y = 50 dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	100
Abbildung 52: Vergleich der Streurückstände zwischen den Behandlungen FS-A und FS-C differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen ± 95 %-Konfidenzintervalle ( <i>estimated marginal means</i> ; Werte bei y = 50 dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	101

Abbildung 53: Glührückstände nach 13 bzw. 21 Monaten Expositionszeit differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm) und Fahrspuren (S1-S6 und S7-S18; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen ± 95 %-Konfidenzintervalle ( <i>estimated marginal means</i> ; Werte bei $y = 3$ dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %). .....	102
Abbildung 54: C-, N-, P- und S-Gehalte bodenchemischer Proben in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	104
Abbildung 55: Mittlere, massengewichtete C-, N-, P- und S-Gehalte über die Horizonte L+O <sub>f</sub> , O <sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. ....	105
Abbildung 56: C/N-, C/P- und C/S-Quotienten in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	106
Abbildung 57: Effektive Kationenaustauschkapazität (AK <sub>e</sub> ), Basensättigung (BS), saure-Kationen (Ma-Kationen) und basische Kationen (Mb-Kationen) in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	107
Abbildung 58: Ca-, K-, Mg- und Na-Gehalte in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> (mittels Königswasseraufschluss analysiert) sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm (Bestimmung durch NH <sub>4</sub> Cl-Perkolation). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	108
Abbildung 59: Mittlere, massengewichtete Ca-, K-, Mg- und Na-Gehalte über die Horizonte L+O <sub>f</sub> , O <sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. ....	108
Abbildung 60: Al-, Fe- und Mn-Gehalte in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> (mittels Königswasseraufschluss analysiert) sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm (Bestimmung durch NH <sub>4</sub> Cl-Perkolation). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	109
Abbildung 61: Mittlere, massengewichtete Al-, Fe- und Mn-Gehalte über die Horizonte L+O <sub>f</sub> , O <sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. ....	110
Abbildung 62: pH-Werte in H <sub>2</sub> O und CaCl <sub>2</sub> in den Horizonten L+O <sub>f</sub> & O <sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben. ....	111
Abbildung 63: Gewinnung ungestörter Bodensäulen (A+B), Vorbereitung und Installation einer Säule in der Haltevorrichtung (C) und Aufbau des Messsystems in Kühlkammer (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.). ....	114
Abbildung 64: An ungestörten Bodensäulen gemessene Entwicklung der Gasflüsse von CO <sub>2</sub> -C, N <sub>2</sub> O-N und CH <sub>4</sub> -C sowie der Lufttemperatur während der Probenahmen im Zeitverlauf (08.05.2019 [Woche 12] bis 16.04.2020 [Woche 60]). Dargestellt sind sowohl die beobachteten Messwerte (Punktwolken) als auch die daraus abgeleiteten, mittleren Verläufe (ggplot2::geom_smooth() nach der Methode „loess“). ....	118

<b>Abbildung 65:</b> An ungestörten Bodensäulen gemessene Entwicklung der Sickerwasserkonzentrationen verschiedener Analyten im Zeitverlauf (13.02.2019 [Woche 0] bis 16.04.2020 [Woche 60]). Dargestellt sind sowohl die beobachteten Messwerte (Punktwolken) als auch die daraus abgeleiteten, mittleren Verläufe (ggplot2::geom_smooth() nach der Methode „loess“).	119
<b>Abbildung 66:</b> Auf ungestörte Bodensäulen applizierte Mengen Kronentraufe (c) + Nährstoffe (b), aufgefangene Sickerwassermengen (d), Wasserverluste durch Evaporation und Rückhalt (e) sowie Nährstoffausträge aus ungestörten Bodensäulen (a), jeweils ± Standardfehler. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	120
<b>Abbildung 67:</b> Profilwand einer unbefahrenen Referenzparzelle (A) und einer Fahrspur mit befestigtem Zählrahmen (B) (Fotos: © Valenzik, K.).	123
<b>Abbildung 68:</b> Häufigkeiten von Grobboden in Profilwänden von Wurzelzählgruben, dessen Flächenanteil mindestens 1/3 der Maße der Zählquadranten (5 x 10 cm) entsprach. Differenziert wurde nach Drittel-Flächenanteilen, wobei eine vollständige Ausfüllung (3/3) nicht festgestellt werden konnte. Je Behandlung wurden 480 Zählquadrate angesprochen.	124
<b>Abbildung 69:</b> Mittlere Anzahl Fein- + Grobwurzeln und Scherwiderstand ± Standardfehler in Abhängigkeit von der Bodentiefe (n = 4). Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Tiefenstufe an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.	125
<b>Abbildung 70:</b> Mittlere Summe Wurzeln differenziert nach Fein- (< 2mm Ø), Grob- (> 2mm Ø) und Totwurzeln (> 2mm Ø) ± Standardfehler (n = 4). Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).	125
<b>Abbildung 71:</b> Schematische Darstellung der unter einer Fahrspur installierten Setzungsmessung des Thünen-Institutes für Agrartechnologie (Nolting et al. 2006).	128
<b>Abbildung 72:</b> Draufsicht der Setzungsmessung (links), eingebaut bei Befahrungsversuchen (rechts) im Dezember 2017 im Solling, Niedersachsen.	128
<b>Abbildung 73:</b> Kumulierte mittlere Setzung des Bodens (in mm) der bereits verdichteten Fahrspuren FS-A, FS-B und FS-C nach einfacher Überfahrt eines Harvesters und eines Forwarders in 20 cm und 35 cm Messtiefe.	130
<b>Abbildung 74:</b> Mittlerer volumetrischer Wassergehalt der befahrenen Fahrspuren in 20 cm und 35 cm Tiefe mit Angabe der mittleren Porosität (maximal möglicher Wassergehalt).	130
<b>Abbildung 75:</b> Trockenrohddichte in den Tiefenstufen 2,5 cm bis 35 cm jeder Fahrspurbehandlung zum Zeitpunkt vor und nach der Befahrung unter Versuchsbedingungen. Ergänzend sind die Ergebnisse des t-Tests je Tiefenstufen angegeben.	131
<b>Abbildung 76:</b> Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit vor und nach der Befahrung der Versuchsflächen im Zuge der Setzungsmessung. Angegeben sind die Ergebnisse aus den Tiefenstufen 20 cm und 35 cm mit den Ergebnissen des t-Tests.	132
<b>Abbildung 77:</b> Entwicklung der Fahrspurtiefe in den Fahrspuren der Situationen S1-S6 durch einmalige Überfahrt mit einem Harvester (25 Mg) und einem beladenen Forwarder (35 Mg) bei sehr ungünstigen Witterungsverhältnissen (hohe Bodenfeuchte). Mittelwerte aus linker + rechter Fahrspurseite (Anzahl Fahrspurlaufmeter = Anzahl Messwerte).	133
<b>Abbildung 78:</b> Mittlerer volumetrischer Wassergehalt in den Fahrspuren FS-B in 20 cm und 35 cm Tiefe mit Angabe der mittleren Porosität bzw. der maximal möglichen Wassersättigung (roter Balken).	134
<b>Abbildung 79:</b> Entwicklung der Horizontmächtigkeiten der Humusaufgabe in den Fahrspuren der Situationen S1-S6 durch einmalige Überfahrt mit einem Harvester (25 Mg) und einem beladenen Forwarder (35 Mg) bei sehr ungünstigen Bedingungen. Anzahl Messwerte: A-Vorher = 19, B-Vorher = 13, B-Nachher = 24.	134

<b>Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen der Fahrspur-Mediane von den zugehörigen, unbefahrenen Referenzparzellen (Ref-A, Ref-B, Ref-C).....</b>	<b>138</b>
<b>Abbildung 81: Bestimmung der Bewertungsrichtung je Parameter und Ableitung der Punktebewertung aus der relativen Abweichung. ....</b>	<b>138</b>
<b>Abbildung 82: Übersicht über verwendete Parameter und deren Zuweisung zu den "Zuordnungstypen". ....</b>	<b>139</b>
<b>Abbildung 83: Übersicht über die Zuordnung von Messgrößen zu den bewerteten Bodenteilfunktionen. ....</b>	<b>141</b>
<b>Abbildung 84: Bodenfunktionsbewertung gegliedert nach Teilfunktionen. Boxen repräsentieren die enthaltenen Parameter = Mittelwerte aus Punktebewertungen über Horizonte/Tiefenstufen und ggf. Zeiträume. Schwarze Zahlen oberhalb der Boxplots zeigen die Mediane der Boxplots, rote Zahlen die Mittelwerte.....</b>	<b>143</b>
<b>Abbildung 85: Bodenfunktionale Gesamtbewertung. Boxen enthalten die Mittelwerte der Punktebewertungen der Teilfunktionen. Schwarze Zahlen oberhalb der Boxplots zeigen die Mediane der Boxplots, rote Zahlen die Mittelwerte. ....</b>	<b>144</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über Versuchsgassenbezeichnungen nach Behandlungsgruppen.....	30
Tabelle 2:	Termine der Bodenprobenahmen und Setzungsmessungen.....	33
Tabelle 3:	Gruppierungsvariablen der Projektdaten beider Teilvorhaben zur integrativen Auswertung. ....	34
Tabelle 4:	Übersicht über Mindestanzahlen entnommener ungestörter Stechzylinderproben in jeder Versuchsgasse im Teilvorhaben 2 zur Bestimmung der bodenphysikalischen Eigenschaften, differenziert nach Ort, Tiefe und Volumen des Zylinders. Zum Teil geht die Anzahl entnommener Proben deutlich über diese Werte hinaus, da die räumliche Verteilung ebenfalls erfasst wurde.....	41
Tabelle 5:	Bodenphysikalische Hauptparameter und deren Messverfahren an Bodenproben unterschiedlicher Zylindergrößen des Teilvorhabens 2. ....	42
Tabelle 6:	Gewählte pF-Werte zur Charakterisierung des Retentionsverhaltens der Böden und die Verfahren zur Bestimmung dieser.....	46
Tabelle 7:	Anzahl Einzelmessungen je Tiefenstufe mittels MiniDisc-Infiltrometer im TV2.....	52
Tabelle 8:	Mittlerer Gasflüsse (CO <sub>2</sub> ) ± Standardabweichung nach Jahreszeiten und Behandlungen der Jahre 2018-2020.....	77
Tabelle 9:	Mittlere Gasflüsse (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> ) ± Standardabweichung des Jahres 2021 differenziert nach Jahreszeiten und Behandlungen. ....	82
Tabelle 10:	Übersicht über bestimmte bodenbiologische und -chemische Messgrößen und zugrundeliegende Methoden .....	88
Tabelle 11:	Zusammenstellung von Beprobungspunkten und Probenumfängen zu verschiedenen Zeitpunkten. ....	88
Tabelle 12:	Mittlere Stoffkonzentrationen der Kronentraufe auf der Level-II-Fläche "Solling F1" der Jahre 2012-2016 (Daten: NW-FVA) sowie der daraus abgeleiteten Rezeptur einer künstlichen Kronentraufe und deren Analyseergebnisse.....	116
Tabelle 13:	Technische Parameter der in den Befahrungsversuchen genutzten Fahrzeuge und den gemessenen Daten zu Reifeninnendruck und Radlast.....	129
Tabelle 14:	Übersicht über Abteilungen im Solling, in denen die bestehenden Fahrspurtiefen von Rückegassen untersucht wurden.....	136
Tabelle 15:	Fahrspurtiefenverteilung in den untersuchten Abteilungen des Sollings.....	136
Tabelle 16:	Überblick über bewertete Bodenfunktionen (verändert nach Lambrecht et al. (2003)).....	140
Tabelle 17:	Beispiel für die Berechnung der mittleren Punktebewertungen zur Darstellung des Bewertungsergebnisses nach Teilfunktionen (hier: Ergebnis für FS-A in Teilfunktion „Puffervermögen für saure Einträge“). ....	141
Tabelle 18:	Beispiel für die Berechnung der mittleren Punktebewertungen zur Darstellung des Ergebnisses der Gesamtbewertung (hier: Ergebnis für FS-A). ....	142
Tabelle 19:	Übersicht über Versuchsgassenbezeichnungen nach Behandlungsgruppen differenziert nach den Bezeichnungen in der Übersichtskarte und in den Datensätzen. ....	164
Tabelle 20:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für die Parameter des ersten Zeitpunkts ( <i>first timepoint</i> ). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter $\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 0.$ ....	167
Tabelle 21:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für <i>exp_vapdm_vt_scaled</i> (Wasserdampfdruck). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter $\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 1.$ ....	167
Tabelle 22:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für <i>exp_globrad_vt_scaled</i> (Globalstrahlung). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter $\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 2.$ ....	167
Tabelle 23:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für <i>exp_wsdm_vt_scaled</i> (Windgeschwindigkeit). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach	

	rechts, beziehen sich auf die Parameter $\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 3.$	.....167
Tabelle 24:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für <code>exp_temp_dmean_vt_scaled</code> (Tagesmitteltemperatur). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter .....	
	$\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 4.$	.....168
Tabelle 25:	Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für <code>exp_rain_pred_vt_scaled</code> (Tagesniederschlag). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter	
	$\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}, j = 5.$	.....168
Tabelle 26:	Übersicht über bearbeitete Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten. ....	173

## Formelverzeichnis

Gleichung 1: Formel zur Berechnung der Gasflüsse.....	75
Gleichung 2: Reduktionsfaktor zur Berechnung des Gasvolumens auf Normbedingungen .....	75

## Abkürzungsverzeichnis

AFZ	.....	Allgemeine Forstzeitschrift
AK <sub>e</sub>	.....	effektive Kationenaustauschkapazität
AP	.....	Arbeitspaket
B°	.....	Bestockungsgrad
BoSchuHoErn	.....	Bodenschutz bei der Holzernte
BS	.....	Basensättigung
C <sub>anorg</sub>	.....	anorganischer Kohlenstoff
C <sub>ges</sub>	.....	Gesamtkohlenstoff
C <sub>mik</sub>	.....	Mikrobiell gebundener Kohlenstoff
C <sub>org</sub>	.....	Organischer Kohlenstoff
CritTrails	.....	Bodenwasserhaushalt forstlich genutzter Rückegassen
DOC	.....	dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
DON	.....	dissolved organic nitrogen (gelöster organischer Stickstoff)
DVFFA	.....	Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten
DWD	.....	Deutscher Wetterdienst
eGp	.....	enge Grobporen
EGU	.....	European Geosciences Union
FNR	.....	Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe
Fp	.....	Feinporen
FS	.....	Fahrspur
FS-A	.....	Fahrspuren mit Tiefen zwischen > 1 cm bis ≤ 10 cm
FS-B	.....	Fahrspuren mit Tiefen zwischen > 10 cm bis ≤ 20 cm
FS-C	.....	Fahrspuren mit Tiefen zwischen > 20 cm bis ≤ 30 cm
GC	.....	Gaschromatograph
GIS	.....	Geoinformationssystem
GLMM	.....	Generalisiertes gemischtes lineares Modell (generalized linear mixed model)
HA	.....	Humusaufgabe
HV	.....	Humusvorrat
KA	.....	Kartieranleitung
KT	.....	Kronentraufe
KWF	.....	Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.
LMM	.....	Gemischtes lineares Modell (linear mixed model)
Ma-Kationen	.....	sauer wirkende Kationen
MB	.....	Mineralboden
Mb-Kationen	.....	basisch wirkende Kationen
Mp	.....	Mittelporen
MS	.....	Microsoft
NFP	.....	Niedersächsisches Forstplanungsamt
N <sub>ges</sub>	.....	Gesamtstickstoff
NL	.....	Niederlande
NLF	.....	Niedersächsische Landesforsten
N <sub>mik</sub>	.....	Mikrobiell gebundener Stickstoff
NN	.....	Normalnull
NW-FVA	.....	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
PE	.....	Polyethylen
P <sub>mik</sub>	.....	Mikrobiell gebundener Phosphor
Ref	.....	unbefahrene Referenzparzellen
SD	.....	Standardabweichung
S <sub>ges</sub>	.....	Gesamtschwefel
TI	.....	Thünen Institut
TRD	.....	Trockenrohdichte
TV1	.....	Teilvorhaben 1
TV2	.....	Teilvorhaben 2
uGOK	.....	unter Geländeoberkante
UGT	.....	Firma Umwelt-Geräte-Technik GmbH
VG	.....	Versuchsgasse
wGp	.....	weite Grobporen
WHK	.....	Wasserhaltekapazität
WKF	.....	Waldklimafonds

## I. Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

An den Wald werden vielfältige ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Ansprüche gestellt, die in Deutschland im Rahmen der multifunktionalen Forstwirtschaft gleichberechtigt auf einer Fläche erreicht werden sollen. Dem Anspruch integrierender Berücksichtigung teils konträrer Interessen gerecht zu werden bzw. zwischen ihnen zu vermitteln, stellt eine herausfordernde Aufgabe dar. Zielkonflikte ergeben sich z.B. durch die Nutzung der Ressourcen aus dem Wald und durch erholungsuchende Menschen. Außerdem sind Waldökosysteme Belastungen wie z.B. durch Stoffeinträge aus externen Quellen ausgesetzt. Langjährige, luftgetragene Säure-, Stickstoff- und Schadstoffeinträge wirkten in der Vergangenheit aber auch aktuell auf den Wald ein und haben viele Waldökosysteme an die Grenze ihrer Belastbarkeit gebracht (BMELV 2011). Teils schon heute, aber sicherlich großflächig in naher Zukunft, stellt der Klimawandel eine große Belastung für die Waldökosysteme dar. Es ist daher von besonderer Wichtigkeit, weitere Risiken, die etwa durch Waldmanagement entstehen können, zu vermeiden bzw. zu minimieren. Zusätzliche Inanspruchnahme, die belastend für das Waldökosystem sein kann, entsteht, wenn der Waldboden im Rahmen der Bewirtschaftung mit schweren Maschinen befahren wird. Hierbei kann es im Bereich von Rückegassen (und zu kleineren Teilen auch in angrenzenden Bereichen) zu belastungsabhängigen Bodenstrukturveränderungen kommen, die zu einer Reihe ökologisch relevanter Folgewirkungen führen. Schädliche Bodengefügeveränderungen sind durch Wechselwirkungen mit Auswirkungen auf alle Bodenfunktionen verbunden (Lebert und Böken 2015, Cambi et al. 2015). In einer Reihe mit zahlreichen weiteren Risiken stellt Bodenverdichtung eine bedeutende Gefährdung für den Boden dar (Bachmann et al. 2015). Aufgrund des – je nach Ausprägung und Regenerationsbedingungen – sehr dauerhaften Charakters von Strukturveränderungen des Bodens infolge von Verdichtung, kommt dem Prinzip des vorbeugenden Bodenschutzes daher eine besondere Bedeutung zu. Dies wurde im Grundsatz auch in der Waldstrategie 2020 des Bundes erkannt, welche eine intensive Befahrung von Waldstandorten explizit als eine der künftigen Herausforderungen benennt, was innovative Arbeits-, Technik- und Logistikkonzepte erfordert (BMELV 2011).

Um bodenpflegliches Wirtschaften für die Praxis greifbar und überprüfbar zu machen, wird ein Gradmesser benötigt, der eine unkomplizierte Beurteilung der Befahrungstätigkeit ermöglicht, die in Zusammenhang mit der Intensität von Bodenveränderungen bzw. dem Erhalt oder Verlust von Bodeneigenschaften steht. Das Potential, eine solche Indikatorfunktion zu besitzen, wird der Ausprägung der Fahrspurtiefe zugeschrieben, die als kontinuierlich anfallende Größe einfach zu messen und zudem sehr dauerhaft ist und darüber hinaus die Eigenschaft besitzt, unterschiedliche Intensitäten anzunehmen. Mit der Formulierung von Schwellenwerten und zu vermeidenden Zuständen kann gleichzeitig sichergestellt werden, dass Handlungsspielräume für die multifunktionale, nachhaltige Forstwirtschaft erhalten bleiben. Aufgrund der Vorzüge der Fahrspurtiefe als operationale Größe hat sie bereits Eingang in Bodenschutzkonzepte einiger Landesforstbetriebe gefunden. Die Einschätzungen des Ausprägungsgrades akzeptabler Spurtiefen und Rückegassenzustände variiert jedoch erheblich zwischen den verschiedenen Betriebsanweisungen (z.B. TMLNU 2008, AG Bodenschutz 2015, Lüscher et al. 2010). Auch eine Differenzierung von Fahrspurtiefenempfehlungen nach Standortsverhältnissen sowie die Verknüpfung mit geeigneter Forsttechnik ist eine sinnvolle Herangehensweise, da Anfälligkeit und Reaktion der Waldböden auf Befahrungsergebnisse unterschiedlich ausfallen können.

Zur Thematik der Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftung auf Bodeneigenschaften des Waldes bzw. von Rückegassen wurden bereits umfangreiche Forschung unternommen (z.B. Froehlich 1979, Greacen und Sands 1980, Hildebrand 1983, Shepperd 1993, Schack-Kirchner und Hildebrand 1994, Ampoorter et al. 2012, Cambi et al. 2015, Solgi et al. 2015 u.v.a.). Während zu Veränderungen des physikalischen Bodenzustands auf befahrenen Waldböden umfangreiches Wissen vorhanden ist, sind die Auswirkungen in Bezug auf Bodenbiologie und die chemischen Eigenschaften in der Vergangenheit jedoch wenig untersucht worden (Cambi et al. 2015). Um die Auswirkungen der Befahrung von Waldböden auf die verschiedenen Bodenfunktionen ganzheitlich beurteilen zu können, bedarf es eines integrativen Ansatzes, bei dem sowohl bodenphysikalische, bodenbiologische als auch bodenchemische Eigenschaften analysiert und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Das vorliegende Verbundvorhaben will einen Beitrag zum Schluss dieser Lücke leisten. Hierfür wurden auf einem lössgeprägten Standort im Solling (Braunerde über Buntsandstein) bestehende Rückegassen ausgewählt und dort umfangreiche Untersuchungen aus den drei genannten Disziplinen vorgenommen. Im Fokus des Projektes standen dabei die Fragen nach den bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Eigenschaften von Fahrspurböden verschiedener Tiefe, wie sich diese voneinander und zu unbefahrenen Referenzparzellen unterscheiden und wie sich Befahrung auf die Funktionalität des Bodens auswirkt. Von Interesse war auch, welchen Einfluss die bestehende Fahrspurtiefe auf das weitere Setzungsgeschehen des Mineralbodens und die Spurbildung hat, wenn Rückegassen erneut unter ungünstigen Bedingungen (d.h. unter Bedingungen mit tiefgreifend hoher Bodenfeuchte) befahren werden. Die gewonnenen Erkenntnisse des Vorhabens sollen genutzt werden, um den im Merkblatt „Bodenschutz bei der Holzernte“ der Niedersächsischen Landesforsten (AG Bodenschutz 2015) formulierten Schwellenwert für die maximale Intensität von Fahrspuren auf Ton- bzw. Lehm Böden zu beurteilen und diesen ggf. anzupassen. Der Praxis wird somit ein empirisch fundiertes

Entscheidungswerkzeug zur Verfügung stehen. Die Ausweisung der Schwellenwerte sollte sich dabei an der ökologischen Wirkung der Spurtiefen orientieren und als wichtige Bewertungsgrundlage die Funktionsfähigkeit des Waldbodens berücksichtigen.

Nebst der Evaluation der bestehenden Zielgrößen des genannten Bodenschutzkonzepts stand in Aussicht, einen mechanischen Spurtiefengeber weiterzuentwickeln, der während der Befahrung durch einfache und schnelle Messung Informationen über die Entwicklung der Spurtiefe an den Maschinenführer weitergibt. Darüber hinaus sollte ein Konzept erarbeitet werden, dass der Praxis über ein modellbasiertes Entscheidungssystem Erleichterung bei der Planung der hochmechanisierten Holzernte verschafft, indem es Standorts- und Bestandesinformationen mit meteorologischen Daten verknüpft und über ein Prognosewerkzeug eine an Standorts- und Witterungsbedingungen angepasste Waldpflege bzw. Holzernte ermöglicht.

## 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Niedersächsischen Landesforsten (NLF) hatten 2012 eine Arbeitsgruppe zur Erarbeitung eines Merkblattes „Bodenschonende Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten“ (AG Bodenschutz 2015) mit Mitgliedern aus der Bodenkunde des Thünen-Instituts für Agrartechnologie (TI), der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und des Niedersächsischen Forstplanungsamtes (NFP), Vertretern des forstlichen Maschineneinsatzes (Niedersächsische Landesforsten (NLF) und Unternehmerverband) sowie einigen Spezialisten für Waldökologie und Naturschutz der NLF einberufen. Mit der Erarbeitung des Merkblattes und der Festlegung auf die Spurtiefe als Indikator zur Beurteilung bodenpfleglicher Bewirtschaftung, stellte sich die Frage nach den treffenden Richtwerten. Die im Merkblatt festgelegten Richtwerte sind das Ergebnis einer kompromissorientierten Diskussion unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Spurtiefenmessungen der NLF-Maschinenstützpunkte, individuellen Beobachtungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe in der Praxis und auf einer Exkursion zu verschiedenen Spurtiefen und Spurtypen sowie weiteren Experteneinschätzungen. Dabei blieb die Frage nach dem Grad der tolerierbaren Beeinträchtigungen von Bodeneigenschaften und -funktionen bei Einhaltung der festgelegten Richtwerte offen, da sie zum Zeitpunkt der Merkblatterstellung weitestgehend unbekannt waren. Zur Herleitung von faktenbasierten Schwellenwerten für tolerierbare Fahrspurtiefen, wurde nachfolgend das vorliegende Verbundvorhaben „Bodenschutz bei der Holzernte“ (BoSchuHoErn) initiiert, mit dem durch wissenschaftliche Untersuchung Erkenntnisse über den Zusammenhang von Fahrspurtiefe und Auswirkungen auf Eigenschaften und Funktionen des Bodens gewonnen werden sollten.

Das Forschungsvorhaben wurde als Verbundprojekt angelegt und gliederte sich in zwei Teilvorhaben, die inhaltlich ineinandergreifen. Es hatte eine Laufzeit von insgesamt 5 Jahren (3 Jahre reguläre Projektlaufzeit inklusive einer 24 monatigen Verlängerung) und erstreckte sich zwischen 2017 und 2022. Teilvorhaben 1 (TV1) umfasste bodenchemische und -biologische Untersuchungen und wurde von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt in Göttingen bearbeitet, während bei Teilvorhaben 2 (TV2) die bodenphysikalische Wirkung im Vordergrund stand. TV2 wurde vom Thünen-Institut für Agrartechnologie in Braunschweig verantwortet. Des Weiteren war das Niedersächsische Forstplanungsamt in Wolfenbüttel als zuständige Servicestelle der Niedersächsischen Landesforsten maßgeblich am Projekt beteiligt.

Das Gesamtvorhaben umfasste 5 inhaltlich voneinander abgegrenzte Arbeitspakete (AP) mit mehreren Teilaufgaben, deren Bearbeitung Voraussetzung für das Erreichen der angestrebten Meilensteine war.

Grundvoraussetzung für das gesamte Projekt war die Auswahl geeigneter Flächen (AP1: „Parameter- und Standortsauswahl“), auf denen die Untersuchungen vorgenommen werden konnten. Der Flächenauswahl wurden Informationen der forstlichen Standortkartierung der Niedersächsischen Landesforsten zu Grunde gelegt. Als Anspruchskriterien wurde formuliert, dass es sich um räumlich weitverbreitete Standorte mit geringem Skelettanteil und sensibler Reaktion auf Befahrung mit schweren Erntemaschinen handeln sollte. Die Flächen sollten sich zudem in erreichbarer Nähe befinden und sich untereinander möglichst ähnlich sein. Die Flächenauswahl fiel daher auf schwach geneigte Lösslehmstandorte des niedersächsischen Berg- und Hügellands im Waldgebiet Solling, nordwestlich von Göttingen gelegen. Da künftig besonders in Fichtenbeständen ein hohes Ernteaufkommen zu erwarten ist, wurden die Versuche auf mit Fichten bestockten Waldflächen etabliert. Bei diesen handelte es sich um wüchsige, gleichaltrige und einschichtige Bestände der Wuchsklasse Baumholz, das Alter lag bei etwa 90 Jahren. Obwohl auch in den ausgewählten Beständen die Trockenjahre 2018-2022 sowie die hohe Borkenkäferdichte zu Ausfällen bei den Fichten führten, überlebten die Bestände insbesondere im Bereich der Versuchsflächen zu größten Teilen. Bei der Versuchsflächenauswahl wurden potentiell geeignete Flächen bei mehreren Begehungen inspiziert und letztlich 18 Flächen ausgewählt. Diese wurden im Pärchendesign angelegt und bestanden aus einer unbefahrenen Referenz-Parzelle und einem danebengelegenen Abschnitt einer Rückegasse mit variabler Länge. Die Fahrspuren der Rückegassen differenzierten dabei hinsichtlich der Spurtiefe mit Werten zwischen  $> 0$  cm und etwa 30 cm und wurden entsprechend der Spurtiefen in drei Klassen eingeteilt: *FS-A*):  $> 0 \leq 10$  cm, *FS-B*):  $> 10 \leq 20$  cm und *FS-C*):  $> 20 < 30$  cm. Die zu analysierenden Messgrößen wurden größtenteils bereits vor Beginn des Vorhabens festgelegt, teils aber auch im Projektverlauf angepasst. Im Zuge der

Verlängerungsphase des Projektes fand im Wesentlichen eine Ergänzung um Parameter statt, die im Laufe des Projekts als relevant für die Bewertung der Bodenfunktionen eingestuft wurden.

Gemäß des Arbeitspaketes 2 „Datenerhebung“ wurde nach der Flächenauswahl mit den empirischen Erhebungen auf den Untersuchungsstandorten begonnen. Dies umfasste feldbodenkundliche Kartierungen sowie Bodenprobenahmen zu mehreren Zeitpunkten (aufgrund des Probenumfangs wurde in Kollektiven beprobt), die anschließend für umfangreiche Laboranalysen verwendet wurden. Für *in-situ*-Messungen wurde Messequipment wie Messhauben zur Gasanalyse oder Bodenwasserspannungssensoren inklusive Datenloggern und Kabeln auf den Flächen ausgebracht und diese regelmäßig beprobt bzw. ausgelesen. In TV2 fanden während der Wintermonate aufeinanderfolgender Jahre Messungen der Setzung des Mineralbodens während der Befahrung von Rückegassen statt. Zu diesem Zweck mussten Teile der ausgewählten Rückegassen erneut durch einen Harvester und einen beladenen Rückezug befahren werden. Vorher und nachher fanden Bodenanalysen statt. Die Versuche der Bodensetzungsmessung machten es erforderlich, Rückegassenabschnitte von TV1 und TV2 getrennt zu halten, da andernfalls kein dauerhaftes Monitoring des Gas- und Wasserhaushaltes auf Flächen von TV1 hätte stattfinden können. Die Vergleichbarkeit der Rückegassenabschnitte von TV1 und TV2 wurde durch enge Nachbarschaft (Distanz von wenigen Metern) der Flächen gewahrt (i.d.R. nebeneinander/hintereinander gelegene Rückegassen bzw. Rückegassenabschnitte), zudem wurden ausgewählte bodenphysikalische Parameter sowohl in den Abschnitten von TV1 als auch in den Abschnitten von TV2 gewonnen. Ursprünglich war eine Differenzierung des Probenumfangs in „Intensiv“- und „Extensiv“-Flächen vorgesehen. Dies wurde verworfen und alle Flächen entsprechend des Umfangs der „Intensivflächen“ untersucht.

Die Bearbeitung von AP3 „Datenanalyse & Erkenntnisgewinn“ fand nach Erhalt der ersten Daten statt, bildete den Kern der Untersuchungen und setzte sich bis zum Projektende fort. Neben der Aufbereitung von Rohdaten und der Vereinheitlichung von Gruppierungsvariablen zwischen den Projektpartnern, umfasste dies die Ergebnisdarstellung sowie die statistische Auswertung. Im Auswertungsprozess wurden die Daten nach Versuchsbehandlungen (Referenz + Spurtiefenklassen A/B/C) bzw. nach Zeitpunkten „vor“ und „nach“ Befahrung aggregiert. Als weiteres Mittel zur Bewertung der Ergebnisse erfolgte eine Einordnung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Wirkung auf einige Bodenfunktionen. Hierfür wurde ein eigenes Bewertungssystem entworfen. Die Gesamtschau aller Auswertungen mündete in die „Ableitung ökologischer Leitplanken“ für den Indikator Fahrspurtiefe und trifft eine Aussage über den anzustrebenden Spurtiefen-Schwellenwert.

Arbeitspaket 4 „Erkenntnistransfer in die Praxis“ sah die Verwendung der empirisch gewonnenen Erkenntnisse dahingehend vor, dass eine Prüfung und gegebenenfalls Aktualisierung der bisherigen Handlungsempfehlungen (AG Bodenschutz 2015) erfolgen sollte. Ursprünglich war zudem die Weiterentwicklung des Prototyps eines Spurtiefengebers („flexibler Stab“) geplant, der an Forstmaschinen befestigt und mit dessen Hilfe dem Maschinenführer die Überschreitung einer einstellbaren Spurtiefe per optischem Signal mitgeteilt werden sollte. Aufgrund einer Innovation der Spurtiefenmessung innerhalb eines anderen Projektes (Akronym „OnTrack“, Horizon 2020 Fördernummer: 728029), die weitreichendere Funktionen bietet als der flexible Stab, wurde die Verbesserung des Prototyps nicht weiter verfolgt.

Abschließend war nach AP5 „Ausblick – Ermittlung des Dynamisierungspotentials“ vorgesehen, die bereits bestehende Gefährdungskarte zur Befahrbarkeit von Waldböden weiterzuentwickeln und dadurch eine weitergehende räumliche Differenzierung der niedersächsischen Waldstandorte zu erreichen. Dies konnte zumindest in Teilen dadurch realisiert werden, dass die Hangneigung als weiteres Differenzierungsmerkmal in das GIS der NLF inkludiert wurde. Da der Witterung und der dadurch bedingten Bodenfeuchtigkeit eine entscheidende Bedeutung für die Bodenpfleglichkeit von Maßnahmen zukommt, sollte geprüft werden, ob zudem aktuelle meteorologische Standortinformationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in die Karte/das digitale Informationssystem integriert werden können. Durch Verschneidung von Informationen aus der Standortkartierung, die Rückschlüsse auf die Gefährdung bzw. Sensitivität von Waldflächen erlauben, mit Daten zu aktueller und prognostizierter Witterung, würde eine standortsabhängige Vorhersage über wahrscheinliche Befahrbarkeitstage mit geringer Bodenfeuchte ermöglicht. Damit würde der Planungsprozess zu Holzernte und Bestandespflege verbessert, da günstige Zeitfenster auswählbar wären und somit eine Optimierung von Maßnahmenplanung bei gleichzeitiger Berücksichtigung bodenpflegerischer Bewirtschaftung erreicht würden. Da dieses Konzept in Kooperation mit einem weiteren externen Projektpartner erfolgen sollte, der sich im Verlauf aus dem Vorhaben zurückzog, konnte dieser Ansatz nicht verwirklicht werden. Um den essentiellen Einfluss der bodenhydraulischen Verhältnisse und deren Dynamik auf Befahrbarkeit und Verformung des Bodens künftig dennoch besser berücksichtigen zu können, wurde ein Folgeprojekt beantragt, das seit September 2022 vom Thünen-Institut bearbeitet wird (Akronym „CritTrails“, FNR Förderkennzeichen: 2220NR039X). Die NW-FVA bearbeitet aktuell mit dem Waldklimafonds/FNR-Vorhaben „TroWaK“ (Trockenheitsrisiken im Wald unter Klimawandel; WKF/FNR Förderkennzeichen: 2220WK92A4) zudem ein Projekt, welches die Kurzfristprognose der Wasserverfügbarkeit und von Dürreerisiken im Wald mittels der Entwicklung eines hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodells zum Ziel hat. Als Ergebnis sollen zukünftig routinemäßig Karten zur aktuellen Bodenwasserverfügbarkeit und zum aktuellen Schadensrisiko von Waldbeständen online bereitgestellt werden.

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### 3.1 Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
<p>AP 1</p> <p>Parameter und Standortauswahl</p>	<p>09/2017 bis 10/2017</p>	<p>Ziel vollständig erreicht.</p> <p>Die Auswahl potenziell geeigneter bodenphysikalischer, -chemischer und -mikrobiologischer Parameter (Punkt 1.1) erfolgte plangemäß und wurde noch um die kontinuierliche Messung der Bodenfeuchte (Bodenwasserspannung) ergänzt. Zudem wurden im Rahmen der Verlängerung die Respirationmessungen <i>in situ</i> um die Treibhausgase N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> erweitert, Untersuchungen zur Durchwurzelung der Böden durchgeführt, die Sauerstoffversorgung mittels Eisenstäben angesprochen sowie die Luftleitfähigkeit bestimmt. Des Weiteren wurde der Umfang der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitsmessungen erhöht. Die Auswahl zu untersuchender Waldstandorte und Festlegung der Messpunkte (Punkt 1.2) sollte in drei Kollektiven zu je 6 Rückegassen stattfinden: Das erste Kollektiv (Versuchsgassen 1-6) wurde im Herbst 2017 ausgewählt. Die Auswahl der verbleibenden Rückegassen (Feldbegehung/Erhebung feldbodenkundlicher Standortmerkmale; Versuchsgassen 7 – 18) fand im Spätsommer 2018 statt. Abweichend zur ursprünglichen Planung wurde die Auswahl der Kollektive 2 (Versuchsgassen 7-12) und 3 (Versuchsgassen 13-18) zusammengefasst. Aufgrund von Sturmwurfereignissen und Borkenkäferbefall, sind laufend Bäume im Bereich der Versuchsgassen ausgeschieden. Die Versuchsgassenpalette wurde daher 2021 um zwei Ersatz-Versuchsgassen erweitert.</p>
<p>AP 2</p> <p>Datenerhebung</p>	<p>11/2017 bis 12/2021</p>	<p>Ziel vollständig erreicht.</p> <p>Kartierungsarbeiten und Bodenprobenahmen (Punkt 2.1) der Kollektive 1, 2 und 3 (Versuchsgassen 1-18) des Teilvorhabens 1 wurden im Herbst/Winter 2017, 2018, 2019, 2020 und Frühling 2021 erfolgreich durchgeführt. Nach den Beprobungen fanden umfangreiche Laboranalysen statt.</p> <p>Die kontinuierliche Datenerhebung des Respirationversuchs <i>in situ</i> (ausschließlich CO<sub>2</sub>-Messung) wurde im Dezember 2020 abgeschlossen. Zwischen Frühling 2021 und Dezember 2021 wurden große Teile des Messstellennetzes zur erweiterten Gasmessung (CO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>O + CH<sub>4</sub>) genutzt (Verlängerungsantrag).</p> <p>Die Messungen der Bodenwasserspannung sowie die Durchführung des Versuchs zur Charakterisierung des Bodenluft- und -Wasserhaushaltes mittels Eisenstäben (Verlängerungsantrag) wurden im März 2022 bzw. im Dezember 2021 beendet.</p> <p>Alle Beprobungen und Analysen an den Netzbeuteln und des Säuleninkubationsversuchs konnten vollständig im vorgesehenen Zeitraum abgeschlossen werden.</p> <p>In Teilvorhaben 2 wurde zunächst der Status quo der bodenphysikalischen Ausgangsbedingungen erhoben. Nach erfolgreich durchgeführter Befahrung der Versuchsgassen (je 6 Stück in den Jahren 2017, 2019 und 2021) fand die Nachbeprobung der befahrenen Gassen statt. Im Zuge der Projektverlängerung wurde die Luftleitfähigkeit bis zum Frühling 2022 bestimmt.</p> <p>Die Messungen zur Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an Stechzylinderproben liefen kontinuierlich bis Sommer 2022, da der Probenumfang im Rahmen der Projektverlängerung erweitert wurde.</p> <p>Die Aufbereitung und Zusammenführung der erhobenen Feld- und Labordaten in Form einer Datenbank (Punkt 2.2)</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>wurde durchgeführt.</p> <p>Die Ergebnisse beider Teilvorhaben wurden nach einem einheitlichen Verfahren ausgewertet und allen Projektbeteiligten bereitgestellt.</p>
<p>AP 3</p> <p>Datenanalyse/ Erkenntnisgewinn</p>	<p>07/2019 bis 03/2022</p>	<p>Ziel vollständig erreicht.</p> <p>Die statistische Auswertung aller Versuchsergebnisse fand im Zuge der einheitlichen Betrachtung der Teilergebnisse beider Teilvorhaben statt.</p> <p>Die unter Punkt 3.1.2 geplante Bodenfunktionsbewertung sowie die Ableitung „ökologischer Leitplanken“ (3.2) wurde ebenfalls erreicht.</p>
<p>AP 4</p> <p>Erkenntnistransfer</p>	<p>04/2022 bis 07/2022</p>	<p>Ziel größtenteils erreicht.</p> <p>Punkt 4.1 „Forsttechnische Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte“ umfasst die „Konkretisierung von Handlungsempfehlungen“ (Punkt 4.1.1). Hierfür können einerseits die im Verbundvorhaben gewonnenen Erkenntnisse zu Eigenschaften von Fahrspurböden verschiedener Tiefen genutzt werden, andererseits sollten auch weitere Belange und Anforderungen an die Ausgestaltung von Bewirtschaftungsmaßnahmen und die Feinerschließung mit einfließen. Um dies auf breiterer Ebene zu diskutieren, wurde im März 2022 ein zweitägiger Expertenworkshop veranstaltet, bei dem Vertreter aus Wissenschaft und Praxis aus verschiedenen Bundesländern teilnahmen und bei dem Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen diskutiert wurden. Ein wichtiges Ergebnis dieses Austauschs ist die Feststellung, dass erheblicher Bedarf nach nationaler Vereinheitlichung der Anforderungen an Feinerschließungssysteme besteht. Im Rahmen des Workshops wurde daher der Beschluss gefasst, das Thema innerhalb eines größeren Formats weiter diskutieren und daran arbeiten zu wollen. Das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) hat sich diesbezüglich zur Organisation bereit erklärt.</p> <p>Zudem wurden die Ergebnisse des Verbundvorhabens auf der Tagung des Deutschen Forstvereins im Mai 2022 mit einer ganztägigen Exkursion zu den Versuchsflächen präsentiert und zur Diskussion gestellt. Ein weiterer, wichtiger Schritt zur Umsetzung der Ergebnisse in das Praxisgeschehen wurde im August 2022 unternommen: Bei einer eintägigen Exkursion zu den Versuchsflächen fand eine Präsentation der Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen vor Entscheidungsträgern der Betriebsleitung der Niedersächsischen Landesforsten statt, die rege diskutiert wurden. Bei diesem Treffen wurde die Überarbeitung des bestehenden Merkblattes „Bodenschutz bei der Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten“ (AG Bodenschutz 2015) sowie die Anpassung der darin enthaltenen Richtwerte zur Spurtiefe angeregt und positiv von den anwesenden Entscheidungsträgern aufgenommen. Da die Umsetzung der Handlungsempfehlungen und die Initiierung einer Arbeitsgruppe zur Fortentwicklung des genannten Merkblattes im Wesentlichen in Verantwortung des Landesforstbetriebs (Niedersachsen) liegt, wurde Punkt 4.2 „Entwicklung eines Managementsystems für eine ordnungsgemäße Waldbewirtschaftung“ im Rahmen der Projektlaufzeit nur teilweise erreicht.</p> <p>Als weitere Maßnahme des Praxistransfers wurden für die Aus- und Fortbildung in den Niedersächsischen Landesforsten bereits während des laufenden Verbundvorhabens Zwischenergebnisse genutzt. Mit Fertigstellung des Abschlussberichtes werden die Erkenntnisse in die Ausbildungsinhalte integriert und die Fortbildungen zur bodenschonenden Holzernte von den NLF intensiviert. Des Weiteren sind Veröffentlichungen und Berichte für die forstliche Fachpresse in Vorbereitung. Um</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>den Bodenschutz auf sehr feuchten Standorten weiter voranzubringen, wurden von den Niedersächsischen Landesforsten zudem Holzernteverfahren mit Seilkrananlagen für ebene Lagen getestet und weiterentwickelt.</p> <p>Bezüglich Punkt 4.1.2. haben sich im Projektverlauf Entwicklungen ergeben, die die Realisierung eines Einsatzes einer Messsensorik zur online-Messung der Fahrspurtiefe gemäß den ursprünglichen Vorstellungen erübrigten. So wurde von anderer Seite ein Messsystem entwickelt, das die Entwicklung der Fahrspurtiefe kontinuierlich und in wesentlich höherer Auflösung erlaubt, als dies mit dem im vorliegenden Verbundvorhaben geplanten „flexiblen Stab“ möglich wäre. Unter Leitung des KWF wurde das Projekt „OnTrack“ (Horizon 2020 Fördernummer: 728029) durchgeführt, im Zuge dessen ein Spurtiefenmessgerät entwickelt und erfolgreich getestet wurde. Dieses System weist deutliche Vorteile in Bezug auf Messgenauigkeit, Auflösung und Anwenderfreundlichkeit auf, sodass die Weiterentwicklung des eigenen Spurtiefengebers nicht fortgeführt wurde. Das Bestreben, einen Test-Einsatz des OnTrack-Systems auf den Versuchsflächen des Projektes zu realisieren und das Gerät zur Spurtiefenkartierung in einem exemplarischen Untersuchungsgebiet zu nutzen, konnte aufgrund mangelnder Verfügbarkeit des Gerätes leider nicht realisiert werden.</p>
<p>AP 5 Dynamisierungspotential</p>	<p>07/2020 bis 08/2022</p>	<p>Ziel teilweise erreicht.</p> <p>Die Weiterentwicklung der Gefährdungskarte zur Befahrbarkeit von Waldböden (Punkt 5.1) wurde mit der Integration von Hangneigungsklassen im Geoinformationssystem der Niedersächsischen Landesforsten (NLF) angegangen. Die Hangneigungsklassen wurden für alle NLF-Eigen- und Betreuungsflächen und für verschiedene Holzernteverfahren berechnet und in den Forstämtern und Revieren sowie den NLF-eigenen Maschinenstützpunkten verbindlich umgesetzt. Als weitere Verbesserung der Gefährdungskarte steht zudem die Integration der Erkenntnisse des Verbundvorhabens („ökologische Leitplanken“) in Aussicht (Punkt 5.1.1).</p> <p>Die Punkte 5.1.2 („Integration meteorologischer Standortsfaktoren zur Dynamisierung der Gefährdungskarte“) und 5.2 konnten während der Projektlaufzeit nicht erreicht werden. Wichtigster Grund hierfür ist, dass sich der ursprüngliche Partner, der im Wesentlichen für die „Erarbeitung eines Zukunftskonzeptes für die standorts- und witterungssensitive Vorhersage des Befahrungsrisikos“ (5.2) verantwortlich gewesen wäre, ersatzlos aus seinem Projekt (vorläufiger Arbeitstitel „ForestSoilAssist“, Antragsteller Beckmann, Technische Universität Dresden und Universität Potsdam) zurückgezogen hat und somit inhaltliche Grundlagen nicht zustande gekommen sind. Im November 2022 wurde an der NW-FVA mit dem Verbundvorhaben „Trockenheitsrisiken im Wald unter Klimawandel“ (Akronym „TroWaK, WKF/FNR, Förderkennzeichen: 2220WK92A4) begonnen, das eine deutschlandweite Echtzeitbewertung und Kurzfristprognose der Wasserverfügbarkeit im Wald mittels der Entwicklung eines hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodells zum Ziel hat. Die Ergebnisse sollen auch dafür genutzt werden, einen Beitrag für die Vorhersage der Bodenfeuchte in Rückegassen zu leisten. Allerdings zeigen die Ergebnisse des Verbundvorhabens „BoSchuHoErn“ eine starke Differenzierung des Wasserhaushaltes von Fahrspurböden und unbefahrenen Parzellen an. Um eine zielführende Beurteilung des Befahrungsrisikos zu erreichen, ist es daher notwendig, zusätzlich die Eigenschaften des</p>

<b>Arbeitspakete (AP)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Bearbeitungszeitraum</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
		Bodenwasserhaushaltes von Rückegassen sowie bisher ggf. unberücksichtigte Aspekte in das Prognosewerkzeug einzubinden. Zur Erzielung zeitnaher Fortschritte bei diesem Vorhaben wird seitens des TI seit September 2022 ein Folgeprojekt (Akronym „CritTrails“; FNR-Fördernummer: 2220NR039X) bearbeitet, dessen Erkenntnisse perspektivisch einem Managementsystem zur Dynamisierung des Befahrungsrisikos zugeführt werden sollen.

<b>Meilensteine (M)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Fälligkeit</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
M 1 Messparameter definiert und Messpunkte lokalisiert	10/2017	Ziel vollständig erreicht
M 2 Empirische Untersuchungen durchgeführt und Datenbasis generiert	12/2021	Ziel vollständig erreicht
M 3 Datenbasis ausgewertet und „ökologische Leitplanken“ für die Fahrspurtiefe definiert	03/2022	Ziel vollständig erreicht
M 4 Umsetzungsstrategie zum Erkenntnistransfer in die forstwirtschaftliche Praxis entwickelt	07/2022	Ziel größtenteils erreicht
M 5 Zukunftskonzept für ein Prognosemodell der Befahrbarkeit erarbeitet	08/2022	Ziel teilweise erreicht

### 3.2 Zusammenfassung

Die für die forstwirtschaftliche Nutzung des Waldes notwendige Erschließung wird in den meisten deutschen Landeswaldgesetzen als Kennzeichen ordnungsgemäßer Forstwirtschaft genannt, sofern sie bedarfsgerecht erfolgt. Da Befahrung des Waldbodens durch forstliche Maschinen unweigerlich mit Beanspruchungen des Bodens und Beeinträchtigungen der Bodenstruktur verbunden ist – und in Abhängigkeit vielfältiger Faktoren zudem unterschiedlich intensiv ausfällt – hat man sich darauf verständigt, den Maschineneinsatz auf Rückegassen zu begrenzen. Dadurch wird ein Großteil der Fläche vor den Auswirkungen der Befahrungstätigkeit geschützt. Dies ist auch darin begründet, dass die erstmalige Befahrung eines Bodens mit der verhältnismäßig größten Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften verbunden ist. Andererseits ist es durch die lokale Bündelung des Maschineneinsatzes folglich auch unvermeidbar, dass es innerhalb von Rückegassen zu Effekten auf Morphologie und Struktur des Bodens kommt, sodass ein gewisses Maß an Abweichung zu den vor Befahrung geschützten Arealen geduldet werden muss. Die verschiedenen Teilbereiche von Rückegassen (Fahrspuren, Randstreifen, Mittelstreifen, ggf. Randwülste) sind unterschiedlich von der Krafteinwirkung der Maschinenauflast beeinflusst. Infolgedessen ist es sinnvoll, zwischen diesen Kompartimenten zu unterscheiden und unzulässig von den Eigenschaften der Fahrspuren auf die gesamte Rückegasse zu schließen. Innerhalb der Fahrspuren findet allerdings die stärkste Veränderung statt, weshalb dort der Fokus dieser Arbeit lag.

Das Verbundvorhaben aus den Projektpartnern NW-FVA und TI untersuchte auf insgesamt 18 Rückegassen den Einfluss der Fahrspurtiefe auf bodenphysikalische, -chemische und -biologische Parameter. Auf dem im Solling auf etwa 400 m ü. NN gelegenen Untersuchungsstandort lagen als Bodentyp Braunerden aus Löss vor, die sich auf Buntsandstein entwickelten. Die Lössmächtigkeit auf den Versuchsflächen betrug mindestens 50 cm, die Flächen waren mit Hangneigungen zwischen ca. 5-15 % Grad schwach südlich bzw. nördlich exponiert und einheitlich mit einschichtigem, wüchsigem, aus Pflanzung hervorgegangenem Fichtenbaumholz im Alter von 77-95 Jahren (2022) bestockt. Jede Versuchsfläche wurde im Pärchendesign angelegt und in die Behandlungen *unbefahrene Referenzfläche* und *Fahrspur* geteilt. Dabei wurden die Rückegassen so ausgewählt, dass sich die Fahrspuren hinsichtlich der Spurtiefen differenzierten und sich durch Zuordnung zu den Klassen: *FS-A*):  $> 0 \leq 10$  cm, *FS-B*):  $> 10 \leq 20$  cm und *FS-C*):  $> 20 < 30$  cm eine Wiederholungsanzahl von 6 Flächen je Klasse ergab. Die Ergebnisse der erhobenen bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Messgrößen der Fahrspurbehandlungen wurden den Ergebnissen der Referenzflächen ( $n = 18$ ) gegenübergestellt, mit dem Ziel, Schwellenwerte für ökologisch tolerierbare Fahrspurtiefen abzuleiten.

#### **Befahrung von Rückegassen bewirkt Bodenverdichtung in allen Fahrspuren**

Aus den umfangreichen Untersuchungen wird deutlich, dass die Befahrung von Waldböden auf Rückegassen zur Ausbildung von Fahrspuren und zu Verdichtung des Bodens unter den gebildeten Spuren führt, die bis in den Unterboden reicht (bis 50 cm Tiefe des Mineralbodens untersucht) und sich in signifikant erhöhten Trockenrohdichten der Fahrspurböden gegenüber den unbefahrenen Referenzflächen niederschlägt. Alle Fahrspurklassen sind vom Prozess der Verdichtung betroffen, es bestehen jedoch Unterschiede im Grad der Ausprägung. In sämtlichen untersuchten Bodentiefen nimmt die **Trockenrohdichte** mit steigender Spurtiefe zu ( $FS-A < FS-B < FS-C$ ). Die höchsten Werte konnten dabei in der Mitte der Fahrspuren gemessen werden, während sie in den Randbereichen etwas niedriger lagen. Durch die befahrungsbedingte Erhöhung der Trockenrohdichte nahmen gleichzeitig das Gesamtporenvolumen sowie die Porenkontinuität und die Luftkapazität signifikant ab. Hier besteht eine negative Korrelation zwischen Spurtiefe und Porenziffer bzw. Luftkapazität: In allen Beprobungstiefen der Fahrspuren liegen Porenziffer und Luftkapazität deutlich unterhalb denen der Referenzparzellen und fallen umso geringer aus, je tiefer die Fahrspur ist. Als Resultat werden der Luft-, Wasser- und Wärmehaushalt der Böden von Rückegassen beeinflusst, wie an vielfältigen, nachfolgenden Messergebnissen deutlich wird.

#### **Der verringerte und weniger vernetzte Porenraum und die Störung des Bodenaufbaus beeinflussen den Luft- und Wasserhaushalt**

Die **Luftkapazität (LK)** ist Indikator für die potentielle Sauerstoffverfügbarkeit im Boden. Diese ist in allen Fahrspuren deutlich reduziert und weicht in *FS-C* sehr stark von der Referenz ab. In den Fahrspuren *FS-A* und *FS-B* ist ebenfalls eine erhebliche, signifikante Reduktion der Luftkapazität feststellbar. Die **nutzbare Feldkapazität (nFK)** ist ein Maß für die potentielle Bereitstellung von pflanzenverfügbarem Wasser und hängt von der Porosität des Bodens, der Trockenrohdichte und der Porenraumverteilung ab. Da die Lagerung der Bodenpartikel und der Porenraum befahrungsinduziert verändert werden, ist auch eine Wirkung auf den Porenraum gegeben. Während in den Fahrspuren eine Reduktion der Grobporen gegeben ist, nehmen die Mittel- und Feinporen zu, sodass eine Porenraumverschiebung zu beobachten ist. Diese führt dazu, dass bei der nFK keine erhebliche Veränderung des pflanzenverfügbaren Wassers im Vergleich zur Kontrolle zu beobachten ist und auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fahrspuren und den Referenzparzellen festzustellen sind. Tendenziell ist die nFK in den Fahrspuren allerdings leicht reduziert. Die potentielle Verfügbarkeit von Bodenluft für Pflanzen ist zusammenfassend in Fahrspuren deutlich geringer als

im unbefahrenen Waldboden, besonders, wenn die Spurtiefe 10 cm überschreitet (*FS-B* und *FS-C*). Die Verfügbarkeit von pflanzenverfügbarem Wasser ist dagegen nur leicht durch die Befahrung beeinflusst.

Trifft Niederschlag auf den Waldboden, kann Wasser in Fahrspurböden nur noch sehr langsam versickern, wodurch Staunässe und Erosion begünstigt werden. Dies ist anhand von Infiltrationsmessungen ableitbar, die eine Reduktion der gesättigten **hydraulischen Leitfähigkeit** um Faktoren zwischen 10 und > 100 offenlegen. Die Verringerung des Infiltrationsvermögens ist besonders in Fahrspuren der Klasse *FS-C* beträchtlich und unterscheidet sich nicht nur von der Referenz, sondern auch signifikant von den Fahrspurklassen *FS-A* und *FS-B*, obwohl es auch dort zu Abnahmen der Wasserleitfähigkeit kommt. Vergleichbar mit den Ergebnissen der Trockenrohichte ist feststellbar, dass die Leitfähigkeiten von Wasser im Zentrum der Fahrspuren am niedrigsten liegen und in Richtung der Randbereiche geringfügig zunehmen.

Dass der veränderte Porenraum die Infiltration von Niederschlag hemmt und stagnierendes Bodenwasser begünstigt, wird zudem anhand der **Bodenwasserspannung** im mehrjährigen Jahresverlauf evident, die in 0-6 cm des Mineralbodens gemessen wurde. Hier zeigt sich, dass Referenzparzellen (*Ref*) und Fahrspuren *FS-A* ähnliche Kurvenverläufe mit erheblicher Austrocknung in den Sommermonaten und Wiederbefeuchtung in den Wintermonaten aufweisen. In den Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C* ist ebenfalls ein mit den Jahreszeiten kongruenter Wechsel aus höherer und niedrigerer Bodenfeuchte gegeben. Die Bodenwasserspannung verläuft dort aber abgesetzt von den Referenzparzellen (*Ref*) und Fahrspurbehandlung *FS-A* auf deutlich niedrigerem Niveau, sodass in *FS-B* und insbesondere *FS-C* auch künftig höhere Bodenfeuchten bzw. geringere Bodenwasserspannungen zu erwarten sind. Allgemein kann geschlussfolgert werden, dass das Potential zu dauerhafter Vernässung, zumindest im Oberboden der Fahrspuren, ab Spurtiefen > 10 cm progressiv ansteigt.

Da die Porenmatrix des Bodens neben dem Transport von Wasser auch den Transport von Gasen ermöglicht und dieser gleichermaßen von der Beschaffenheit des Porensystems abhängig ist, wurde zudem die **Luftleitfähigkeit** bestimmt. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der hydraulischen Leitfähigkeit ist ein ausgeprägter Unterschied zwischen den untersuchten unbefahrenen Kontrollparzellen (*Ref*) und den Fahrspuren aller Klassen feststellbar. Zwar liegt die Luftleitfähigkeit über alle Tiefenstufen gemittelt auch auf den Referenzparzellen eher auf niedrigem Niveau, in den Fahrspurböden werden jedoch nur noch Bruchteile des Ausgangszustandes erreicht. Der stärkste Rückgang ist dabei in den Fahrspuren der Klasse *FS-C* gegeben, die sich jedoch kaum von den Fahrspuren *FS-A* unterscheiden. Unter allen Fahrspurbehandlungen erreicht Klasse *FS-B* die höchsten Luftleitfähigkeitswerte. Dies ist vermutlich durch Unterschiede in der Bodenart in Form eines höheren Sandgehaltes und dadurch bedingt niedrigeren Wassergehalten bei der Messung begründet.

Für den Austausch der Bodenluft mit der Atmosphäre und somit auch für die Nachlieferung/Diffusion von Sauerstoff sind die gefundenen Eigenschaften des Luft- und Wasserregimes der Fahrspur- und Referenzböden bedeutungsvoll, weil dadurch Einfluss auf Redoxprozesse wie die Atmung von Pflanzen und Bodenorganismen genommen wird. Als eine vom Redoxpotential bzw. der Sauerstoffverfügbarkeit abhängige **Reaktion** wurde das Verhalten von **blanken Eisenstäben** in Kontakt mit den Böden genutzt. Basierend auf dem Versuch sind im Jahresverlauf konstante Unterschiede zwischen den Fahrspurklassen und den nicht-befahrenen Parzellen gegeben. In den Referenzparzellen erscheint der Boden tiefgreifend durchlüftet und gut mit Sauerstoff versorgt, wohingegen Fahrspurböden deutliche Störungen der Durchlüftung aufweisen. Nach länger anhaltender Trockenphase konnten im Beprobungszeitraum Herbst Indizien dafür gefunden werden, dass eine Abtrocknung und Belüftung in den Fahrspuren bis 20 cm Tiefe (*FS-A* und *FS-B*) stattfindet, in den Böden mit Spurtiefen oberhalb der 20 cm-Marke (*FS-C*) jedoch unverändert und tiefenwirksam reduktive Bedingungen herrschen.

### **Der modifizierte Luft- und Wasserhaushalt und das Nahrungsangebot wirken sich auf Aktivität und Zusammensetzung der Bodenorganismen aus**

Dementsprechend ist es naheliegend, dass durch Befahrung des Waldbodens auch die **Emissionen von Treibhausgasen** (Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und Methan (CH<sub>4</sub>)) verändert werden, da die Freisetzung dieser Gase im Wesentlichen auf den Energiestoffwechsel von im Boden lebenden Organismen und Pflanzen zurückzuführen ist. Als Maß für die aerobe Atmung zeigen die CO<sub>2</sub>-Emissionsraten, dass sich *Ref* und *FS-A* ähnlich sind bzw. in *FS-A* leicht höhere CO<sub>2</sub>-Emissionsraten bestehen und davon abgesetzt die Bodenatmung in den Fahrspuren *FS-B* und *FS-C* im gesamten Jahresverlauf signifikant verringert ist. Während für die N<sub>2</sub>O-Flüsse keine ausgeprägten Muster feststellbar sind, erweist sich die Fahrspurtiefe als wichtige Einflussgröße für die Konsumption von Methan. Die in der Referenz vorliegende Senkenfunktion für das Treibhausgas CH<sub>4</sub> ist ganzjährig vorhanden. Sobald der Waldboden mit einer Fahrspur versehen ist, bewirkt dies eine eindeutige Abnahme der Methansenkenfunktion. Der Verlust ist in *FS-A* und *FS-B* ähnlich hoch, die Methanoxidation geht dagegen in *FS-C* nahezu vollständig verloren. In Einzelereignissen werden die Fahrspuren von Klasse *FS-C* sogar zu einer Methanquelle. In Fahrspurböden ist daher auf Veränderungen der Bodenorganismengemeinschaften zu schließen, die bei Spurtiefen > 20 cm besonders intensiv sind.

Veränderungen der **bodenbiologischen Eigenschaften** lassen sich neben den beschriebenen Wirkungen auf den Luft- und Wasserhaushalt, zu denen auch der Einfluss auf Oxidations-Reduktionsprozesse gehört, auch durch Aufbau und Zusammensetzung des Bodens erklären, die befahrungsbedingt verändert wurden. Dies gilt besonders in Bezug auf die Humusauflage, die in *FS-B* teilweise und in *FS-C* bis auf Relikte vollständig verloren gegangen ist. Durch Einarbeitung von Humusaflageresten in den oberen Mineralboden konzentriert sich die mikrobielle Biomasse in den Fahrspuren (*FS-C*), gemessen als mikrobiell gebundener Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor ( $C_{mik}$ ,  $N_{mik}$ ,  $P_{mik}$ ), auf die oberen 0-5 (10) cm des Bodens. Anhand des metabolischen Quotienten lässt sich eine geringere Effizienz der Mikroorganismen insbesondere in *FS-C* und in schwächerem Maße auch in *FS-B* feststellen, was als Indiz für eine erhebliche Störung des Lebensraums begriffen werden kann. Kohlenstoff- und Stickstoffverfügbarkeit sind in den *FS-C*-Böden ebenfalls bereichsweise verringert. In den *FS-A*-Böden bis 10 cm Spurtiefe ist dagegen allenfalls eine geringe Reduktion der mikrobiellen Biomasse sowie der Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden (0-5 cm) gegeben. Die Ergebnisse der Fahrspuren *FS-B* stehen hier zwischen den Ergebnissen der Fahrspuren *FS-A* und *FS-C*. Der teilweise Verlust der Humusauflage wirkt sich dort und in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm des Mineralbodens verringern auf  $C_{mik}$ ,  $N_{mik}$ ,  $P_{mik}$ , die Kohlenstoff- und Stickstoffverfügbarkeit bzw. steigernd auf den metabolischen Quotienten (geringere Effizienz der Mikroorganismen) im Vergleich zur Referenz aus.

Anhand von Untersuchungen zum **Abbau von Streu** (Netzbeutelversuch) stellt sich ein etwas geringerer Abbau des ausgebrachten Pflanzenmaterials auf den Fahrspurböden heraus, was als weiterer Hinweis für ungünstig veränderte Umweltbedingungen innerhalb der Fahrspuren gewertet werden kann, die auf Aktivität und möglicherweise auch auf Zusammensetzung der Zersetzergesellschaft wirken. Jedoch sind die Unterschiede in den Abbauraten zwischen den Fahrspurbehandlungen und zur Referenz gering und mit wenigen Ausnahmen auch nicht signifikant zu den Referenzparzellen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Abbau organischer Substanz in den Fahrspurböden im Vergleich zu den Referenzböden zwar leicht gehemmt ist, die Rückführung von Nährstoffen aus Pflanzenstreu auf allen Fahrspuren jedoch größtenteils erhalten bleibt.

### **Veränderungen von Menge und Zusammensetzung humoser Bodenhorizonte sowie Wechselwirkungen zwischen physikalischen und biologischen Eigenschaften beeinflussen den Bodenchemismus und die Nährstoffversorgung von Fahrspurböden**

Auch der **Bodenchemismus** wird durch die Tätigkeit von Forstmaschinen beeinflusst. Bedeutsam sind in diesem Zusammenhang ebenfalls die veränderten Mächtigkeiten der Humushorizonte, da sie auf der einen Seite in *FS-A* (in vorliegender Studie) zu höheren Humus- und somit Nährstoffvorräten führen und andererseits in *FS-B* und *FS-C* durch die Verringerung bzw. den Verlust der Humusauflage auch mit einer Abnahme respektive einem Wegfall eines wichtigen Nährstoffspeichers und Lebensraumes verbunden sind. In *FS-A* ist die mächtigere Humusauflage vermutlich Folge der Deponierung von Schlagabraum, der während Durchforstungsmaßnahmen zum Schutz des Bodens auf den Rückegassen abgelegt wurde. In Spurbearbeitung *FS-C* kommt es durch die befahrungsbedingte Inkorporation von Resten der Humusauflage in den oberen Mineralboden zu einer für den Standort ungewöhnlichen Anreicherung nährstoffreicher, humoser Bodensubstanz und infolgedessen zu einer Erhöhung der Nährelementgehalte C, N, P, S, Ca, K, Mg in den ersten 10 cm. Die Verringerung des Porenraumes bewirkt, durch eine Kombination aus stagnierender Bodenfeuchte und gedrosselter Sauerstoffnachlieferung, anaerobe Verhältnisse, die in Zusammenhang mit deutlichen Erhöhungen der pH-Werte, der Basensättigung, der austauschbaren Mangangehalte sowie Verringerungen der austauschbaren Aluminiumgehalte stehen. Die Bodenveränderungen sind in Fahrspuren der Klasse *FS-B* insgesamt weniger stark ausgeprägt als in *FS-C*, sodass auch die bodenchemische Wirkung geringer ist und insbesondere in der Humusauflage ( $L+O_r$ -Horizont) zum Tragen kommt. Dort sind sowohl Steigerungen von Stoffgehalten (K, Al, Fe) als auch Verringerungen (C, N, S, Ca) messbar, wohingegen das Bild im Mineralboden uneinheitlich ist und je nach Element und Tiefenstufe eher Variante *FS-A* bzw. *Ref* oder *FS-C* ähnelt. Auch Fahrspuren der Klasse *FS-A* sind nicht frei von Beeinflussung der Bodenchemie. Vergleichbar mit Behandlung *FS-B*, sind leichte Abweichungen der C-, N-, S-Gehalte (Verringerungen) und Al-, Fe-, K-Gehalte (Erhöhungen) in der  $L+O_r$ -Lage erkennbar. Im Mineralboden gestaltet sich das Bild im Wesentlichen indifferent. Wichtiger als die Auswirkungen auf die Gehalte sind die Steigerungen der Stoffvorräte durch die mächtigere Humusauflage in der Behandlung *FS-A*.

Die Zunahme des  $L+O_r$ -Horizontes, die hauptsächlich für die mächtigere Humusauflage in *FS-A* ist, ist womöglich auch der wichtigste Grund für die höheren Nährstoffausträge, die in *FS-A* (0-10 cm) innerhalb des im Labor durchgeführten **Säuleninkubationsversuches** gemessen werden konnten. Es ist annehmbar, dass Bodenorganismen das verbesserte Nahrungsangebot nutzen und es infolge verstärkter Bodenatmung (s.o.) zu intensiverer Humifizierung und Mineralisierung der organischen Substanz kommt, mit der höhere Stofffreisetzungen verbunden sind. Die Konzentrationen von  $NO_3^-$ -N,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ , ( $Na^+$ ) und  $Al^{3+}$  im aufgefangenen Sickerwasser der Bodenkerne von *FS-A* lagen entweder die meiste Zeit der Versuchsdauer oder über den gesamten Versuch konstant über den Werten der Referenzparzellen. Jedoch kam es in den Säulen der unbefahrenen Referenzen im Versuchsverlauf zu einem kontinuierlichen Anstieg vieler Stoffkonzentrationen, der durch die fehlende Interaktion Boden-Pflanze (Nährstoffaufnahme) bedingt sein könnte. In *FS-C* lag der Austrag der meisten untersuchten Elemente fortwährend auf dem niedrigsten Level

verglichen mit den anderen Fahrspurbearbeitungen und der Referenz. Ausnahme bilden die Konzentrationen von Kalium und Mangan, bei denen die höchsten ( $K^+$ ) bzw. mit *FS-A* vergleichbare Werte ( $Mn^{2+}$ ) analysiert wurden.

### **Bäume (Fichten) können Fahrspurböden schlechter durchwurzeln und infolgedessen weniger Wasser und Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen**

Anhand von **Wurzelzählungen** zeigt sich, dass Bäume und andere Pflanzen Schwierigkeiten haben, die verdichteten Fahrspurböden ähnlich intensiv zu erschließen, wie das auf den unbefahrenen Referenzparzellen der Fall ist. Über die gesamte untersuchte Bodentiefe von 50 cm ist die Anzahl der Grob- und Feinwurzeln in den Referenzparzellen signifikant am höchsten. Lediglich im Oberboden (0-5 cm) gibt es keinen Unterschied zwischen den Fahrspuren des Typs *FS-A* (0-10 cm) und der Referenz. Möglicherweise konnten die Wurzeln dort durch den Erhalt der mächtigen Humusaufgabe vor den Scherkräften geschützt werden, die bei intensiverer Spurbildung auf das Wurzelgeflecht wirken und zu Abrissen führen. Über den weiteren Tiefenverlauf (> 5 cm) nimmt die Durchwurzelung der Varianten *FS-A* und *FS-B* vergleichbar gegenüber der Referenz ab. In *FS-C* ist die Durchwurzelung häufig nochmals geringfügig schwächer ausgeprägt. In den Fahrspurböden liegt zudem der Anteil an abgestorbenen Wurzeln im Verhältnis zu lebenden Wurzeln höher als in den Referenzböden. Vor dem Hintergrund der festgestellten Bodenstrukturveränderungen und den Wirkungen auf den Luft- und Wasserhaushalt, erscheint das Ergebnis der geringeren Durchwurzelung in den Fahrspuren folgerichtig. In Variante *FS-C* kann davon ausgegangen werden, dass auch die tieferliegende Geländeoberkante Einfluss auf das Messergebnis nahm.

### **Verdichtung und Fahrspurbildung wirken sich (überwiegend) ungünstig auf die Funktionsfähigkeit des Bodens aus**

Um die vielfältigen und sehr unterschiedlich skalierten Messgrößen integrierend bewerten zu können, wurde ein Bewertungssystem entworfen, bei dem die Messgrößen Bodenfunktionen, wie z.B. der Lebensraumfunktion, zugeordnet wurden. Basis für die Bewertung der sog. „natürlichen Bodenfunktionen“ bildete das Referenzsystem „unbefahrener Waldboden“ mit seinen gegebenen Eigenschaften. Ergebnis der **Bodenfunktionsbewertung** anhand der analysierten Parameter ist der Befund, dass es in allen Fahrspurbearbeitungen zu einer überwiegend ungünstigen Beeinflussung von Bodenfunktionen kommt, wobei die Wirkung nach Teilfunktionen des Bodens differenziert werden muss. Am meisten betroffen sind die Funktion im Wasserhaushalt und die Lebensraumfunktion für Bodenorganismen und Pflanzen. Mit gewissem Abstand folgen die (neu eingeführte) Funktion Klimawirksamkeit und die Funktion des Puffervermögens für saure Einträge. Die geringste Einflussnahme unter den bewerteten Teilfunktionen findet auf das Potential und die Verfügbarkeit von Nährstoffen statt. Die Auswirkungen auf die Bodenfunktionen sind zudem je nach betrachteter Fahrspurtiefe verschieden und stehen in einem Zusammenhang zur Intensität der Verdichtung und der Veränderung von Bodeneigenschaften: Bereits in Fahrspuren der Klasse *FS-A* (0-10 cm) kommt es zu einer Verringerung der Funktionsfähigkeit des Bodens, die jedoch geringer ausfällt als jene in *FS-B* (10-20 cm). Überwiegend zeigt die Bodenfunktionsbewertung in *FS-B* höhere Übereinstimmung mit der Variante *FS-A*, je nach Teilfunktion gibt es bisweilen aber auch Tendenzen zu höherer Ähnlichkeit mit Fahrspuren > 20 cm (*FS-C*), in denen die Funktionsfähigkeit zweifelsfrei stark herabgesetzt ist.

### **Fahrspuren geringer Tiefe sind besonders sensibel gegenüber weiterer Eintiefung**

Die Reaktion von Fahrspurböden auf eine erneute Befahrung mit forstlichen Arbeitsmaschinen fällt je nach Ausgangslage der Spurtiefe sowie den verwendeten Maschinen (Harvester, Forwarder) unterschiedlich aus. Anhand der Messung der **Setzung des Mineralbodens** konnte festgestellt werden, dass insbesondere Fahrspuren mit Tiefen von 0-10 cm (*FS-A*) sehr sensibel auf eine wiederholte Befahrung unter feuchter bis nasser Witterung reagieren und es durch Setzung des Unterbodens leicht zu einer Zunahme der Fahrspurtiefe kommt. Der schwerere Forwarder (beladen, 36 Mg) hat dabei den größeren Effekt auf das Setzungsgeschehen als der Harvester (25 Mg). Auch in Fahrspuren der Klasse *FS-B* (10-20 cm) findet eine ausgeprägte Reaktion in Form von Setzung und Spurbildung statt. Obgleich bei Fahrspurtyp *FS-C* (20-30 cm) die geringste Bodensetzung gemessen wurde, zeigen die Ergebnisse eindrücklich, dass eine Befahrung von Rückegassen bei ungeeigneten Bedingungen zwangsläufig mit weiterer Spurbildung einhergeht. Der Versuch untermauert damit die bereits vielfach herausgestellte Bedeutung und Notwendigkeit der Beachtung vorangegangener und aktueller Witterung für das Spurbildungsgeschehen und die bodenpflegliche Bewirtschaftung.

### **Fahrspurtiefe und Bodenaufbau sind gut geeignete Indikatoren für angewandten Bodenschutz**

Die im Zuge der Setzungsmessung gewonnenen Erkenntnisse zur Reaktion der Böden auf erneute Befahrung legen nahe, dass der Erhalt von Spurtiefen  $\leq 10$  cm (*FS-A*) eine herausfordernde Daueraufgabe ist, die langfristig nur durch ein abgestimmtes Zusammenspiel aus Sensibilisierung der beteiligten Akteure (Aus- und Fortbildung), Arbeitsorganisation, standorts- und bodenfeuchteangepasste Arbeitsverfahren und die Ausnutzung einer breiten Palette an technischen Hilfsmitteln erreicht werden kann. Gleichzeitig bedarf es einer

Kontrollinstanz, die die Einhaltung der Fahrspurtiefen überwacht. Die Beachtung von Witterung und Bodenfeuchte sind für den Erfolg bodenschützender Bewirtschaftung essentiell. Während es unter feuchten bis nassen Bedingungen sehr schnell zu erheblicher Spurbildung und Veränderung von Bodeneigenschaften und -funktionen kommt, gelingt bodenpflegliche Befahrung ohne intensive Spurbildung bei gefrorenen und trockenen Böden mit geringerem Aufwand. Aus Sicht des Bodenschutzes ist aufgrund des sich wandelnden Klimas, das einen Rückgang von Perioden mit langanhaltendem Bodenfrost erwarten lässt, eine Verschiebung des Hauptholzeinschlagszeitraumes in vorwiegend trockene Zeiträume während der Sommermonate eine sinnvolle Strategie. Jedoch ist der Zielkonflikt mit anderen Interessensgruppen wie z.B. Naturschutz und Tourismus abzuwägen. Weiterentwicklungen im Bereich der bodenungebundenen Holzernte können ebenfalls einen Beitrag für eine bodenpflegliche Bewirtschaftung liefern. Beispielsweise sei hier der Einsatz von Seilkrananlagen auch in ebenem Gelände genannt. Hier besteht aber noch Entwicklungspotenzial zur Optimierung von Arbeitsabläufen und einer notwendigen Kostensenkung.

Seitens der forstlichen Akteure ist man sich der Tatsache bewusst, dass es durch den Einsatz von Maschinen zu Bodenstrukturveränderungen kommen kann, die Rückegassen bereichsweise in einen für den Anbau der überwiegenden Forstgehölze ungünstigen Bodenzustand versetzen. Zudem bestehen viele weitere Bodenfunktionen, die für das Ökosystem Wald von Bedeutung sind. Daher hat man es sich zum Ziel gesetzt, die befahrungsbedingten Bodenschäden möglichst gering zu halten und eine zumindest teilweise Regeneration der veränderten Böden in absehbarer Zeit zu ermöglichen. In der Vergangenheit sind vielfältige, aber teils sehr unterschiedliche Betriebsanweisungen zum bestmöglichen Schutz des Waldbodens erstellt worden. Als Maß zur Beurteilung bodenpfleglicher Bewirtschaftung wird häufig die Fahrspurtiefe herangezogen, deren Eignung und Klassifizierung im vorliegenden Forschungsvorhaben evaluiert wurde. Als **Resultat der Untersuchungen** kann ein Zusammenhang der Spurtiefe mit der Intensität der Veränderung bzw. Störung von Bodeneigenschaften herausgestellt werden, wodurch die Anwendbarkeit der Spurtiefe als Größe zur Bemessung von Bodenschutz bestätigt werden konnte. Nebst der Spurtiefe wird empfohlen, zusätzlich den Aufbau des Bodens als Maßstab für tolerierbare Rückegassenzustände zu berücksichtigen. Eine Störung des Bodenaufbaus drückt sich durch die Ausbildung randlicher Aufhäufungen (Randwulstbildung) neben den Fahrspuren bei gleichzeitigem Verlust der organischen Auflage aus und ist Folge lateraler Umlagerungsprozesse bei plastischer Reaktion des Rückegassenbodens auf die maschinelle Kraffteinwirkung. Durch Veränderungen des Bodenaufbaus mit mehr oder weniger vollständigem Verlust der Humusauflage wird die Funktionsfähigkeit des Spurbodens erheblich herabgesetzt und die ökologischen Eigenschaften zum Negativen verändert. Im Fall der vorliegenden Studie wurde ein vollständiger Verlust der Humusauflage nur bei gleichzeitig starker ( $> 20$  cm; *FS-C*) Eintiefung der Fahrspur beobachtet. Jedoch war auch bei Fahrspuren mit Spurtiefen zwischen 10-20 cm (*FS-B*) eine Beeinflussung des Bodenaufbaus durch seitliche Umlagerung von Bestandteilen der Humusauflage gegeben, wenn auch weniger intensiv. Während die „tolerierbare Fahrspurtiefe“ sich unter anderen Standortbedingungen durchaus von den Ergebnissen dieser Fallstudie unterscheiden kann, ist stark davon auszugehen, dass der Verlust eines intakten Bodenaufbaus standortübergreifend Abnahmen der Bodenfunktionalität anzeigt.

Vor dem Hintergrund der Funktion von Rückegassen als Infrastruktureinrichtung, erscheinen Rückegassen mit Fahrspurtiefen bis zu 10 cm (*FS-A*) tolerierbar. Unter den gegebenen standörtlichen Bedingungen weisen flache Fahrspuren (*FS-A*) hinsichtlich vieler Bodeneigenschaften und -funktionen Ähnlichkeit zum unbefahrenen Waldboden auf. Mit einer Zunahme der Spurtiefe über diese Schwelle hinaus, steigen auch Intensität der Störung und Abweichung vom Referenzzustand, sodass Fahrspuren  $> 10$  cm  $\leq 20$  cm (*FS-B*) möglichst zu vermeiden sind. Strikt vermieden werden sollten Fahrspuren mit Tiefen  $> 20$  cm (*FS-C*).

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

In der Regel bewirkt das Befahren von Waldböden Zustandsveränderungen insbesondere physikalischer Bodeneigenschaften, die unterschiedlich intensiv sein können. Der Bedarf, Bestände zu pflegen und Bäume zu ernten, ist unweigerlich mit Beanspruchung und Erschließung von Waldfläche verbunden, die, sofern sie bedarfsgerecht erfolgt, in den meisten Landeswaldgesetzen ausdrücklich als Kennzeichen ordnungsgemäßer Forstwirtschaft genannt wird.

Um den Waldboden auf möglichst großer Fläche vor Veränderungen durch Befahrungstätigkeit zu schützen, hat man sich darauf verständigt, den Maschineneinsatz auf Rückegassen zu begrenzen und flächiges Befahren zu unterlassen. Dieser Grundsatz hat in einigen Bundesländern ebenfalls Eingang in die Landeswaldgesetze gefunden (z.B.: Landeswaldgesetze Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein). Für einen effektiven und nachhaltigen Schutz der unbefahrenen Areale, müssen Rückegassen permanenten Charakter haben und somit dauerhaft genutzt werden.

Zwar sind Rückegassen Bestandteil der forstlichen Produktionsfläche, dennoch besteht ihre Hauptfunktion darin, als Infrastruktureinrichtung zu dienen, Maschinentätigkeit lokal zu begrenzen und die übrige Fläche vor Befahrung zu schützen. Untrennbar mit der Aufgabe als Infrastruktureinrichtung ist der Umstand verknüpft, dass der Boden von Rückegassen der Krafteinwirkung des Maschineneinsatzes ausgesetzt ist. Selbst bei pfleglichster Nutzung führt dies zu Beeinflussung der Bodenstruktur, sodass Rückegassen und insbesondere Fahrspurböden keine vollständige Übereinstimmung ihrer Eigenschaften mit nicht-befahrenen Waldarealen zeigen können. Gewisse Abweichungen zwischen Rückegassen und unbefahrenen Bereichen müssen daher hingenommen werden.

Die intensivste Wirkung der Befahrung findet im Kontaktbereich zwischen Rad/Laufwerk und Boden, also im Bereich der Fahrspuren statt. Maschinenführer sind daher dazu angehalten, versetztes Fahren zu unterlassen, um den Anteil stark beanspruchter Fläche möglichst klein zu halten. Durch die Verteilung der Spannungseinträge innerhalb des Bodens, bestehen jedoch auch Effekte auf die peripheren Areale zwischen und neben den Fahrspuren. Gleichwohl ist die Beeinflussung von Mittel- und Randstreifen um ein Vielfaches geringer als innerhalb der Fahrstreifen, sodass zwischen den Kompartimenten Fahrspuren/(Randwülste)/Mittelstreifen/Randstreifen differenziert werden muss und nicht pauschal von Eigenschaften der Fahrspuren auf die gesamte Rückegasse geschlossen werden kann.

In der Forstwirtschaft ist man sich der Bedeutung des Erhalts von Standorteigenschaften und der Notwendigkeit von vorsorgendem Bodenschutz bewusst. Dies wird einerseits an der Existenz von Rückegassen und andererseits an den vielfältigen Konzepten der Landesforstbetriebe zum bodenpfleglichen Maschineneinsatz deutlich. Es besteht ein Eigeninteresse, dem Schutz des Bodens einen hohen Stellenwert zu verleihen. Die entscheidende Frage dabei ist, wie man den Wald mit modernen Mitteln bewirtschaften und gleichzeitig den Boden so gut wie möglich schützen kann. Um prüfen zu können, ob eine Bewirtschaftungsmaßnahme pfleglich und bodenschonend abgelaufen ist, braucht es Indikatoren, mit denen eine unkomplizierte Einschätzung erfolgen kann. Eine einfach zu bestimmende, bei Befahrung stets anfallende und dauerhafte Messgröße ist die Spurtiefe.

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde mittels eines integrativen Ansatzes unter Verknüpfung bodenphysikalischer, -chemischer und -biologischer Messgrößen geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der morphologischen Ausprägung von Fahrspuren (= der Spurtiefe) und dem Bodenzustand – beurteilt anhand der Ausprägung der untersuchten Messgrößen – besteht, der es erlaubt, bodenpflegliche Befahrung durch simples Beurteilen der Spurtiefe abzuschätzen und somit einen Schwellenwert für tolerierbare Fahrspurtiefen abzuleiten. Die Frage nach der Schwellenwertsetzung zwischen einem durch Befahrung induzierten tolerablen im Gegensatz zu einem intolerablen Bodenzustand, den es zu vermeiden gilt, bildete das übergeordnete Leitmotiv des Verbundvorhabens. Die Ableitung der ökologischen Leitplanken wurde durch eine eigens entwickelte Bewertung der Bodenfunktionen unterstützt.

### 1. Parameter- und Standortsauswahl

Entsprechend des Projektplans sollten insgesamt 18 Rückegassen untersucht werden. Diese trugen ursprünglich die Bezeichnung „Situationen“ und wurden mit „S1-S18“ abgekürzt. Des Weiteren sollten die 18 Rückegassen in drei aufeinanderfolgenden Jahren in Kollektiven zu je 6 Stück ausgewählt werden. Vom Ursprungsplan wurde nach Auswahl der ersten 6 Situation im ersten Versuchsjahr abgewichen und im Folgejahr sämtliche verbliebenen 12 Rückegassen ausgewählt. Bei der Flächenauswahl wurde folgendermaßen vorgegangen:

Unter Nutzung des Forstlichen Geoinformationssystems der Niedersächsischen Landesforsten (NFP) fand zunächst eine grobe Vorauswahl potentiell geeigneter Flächen statt, bei der nachfolgende Kriterien erfüllt werden mussten: Es sollte sich um schwach geneigte Waldstandorte (5-15 % Hangneigung) mit Löss als Ausgangsmaterial der Bodenbildung handeln. Die Lössmächtigkeit sollte mindestens 50 cm betragen und der Skelettgehalt gleichzeitig möglichst niedrig liegen. Auch der Bodentyp sollte vergleichbar sein, sodass ausschließlich Braunerden verwendet wurden. Darüber hinaus bestand die Anforderung, dass die Waldflächen

in der Vergangenheit gleichermaßen gekalkt wurden. Hierfür wurden Informationen aus dem Kalkungskataster in die Flächenauswahl mit einbezogen (zweifach gekalkt, Anfang/Mitte 1990er Jahre + 2008). Bezüglich der Bestockung sollte es sich um wüchsige Fichtenreinbestände der Wuchsklasse Baumholz mit bestehendem Feinerschließungsnetz und Durchforstungsnotwendigkeit handeln, bei denen die letzte Befahrung etwa vergleichbar lange zurücklag.

Nach Verschneidung der Auswahlkriterien fiel die Wahl auf das Mittelgebirge/Waldgebiet Solling, nord-westlich von Göttingen gelegen. Dort fanden mehrere Waldbegehungen der zur Auswahl stehenden Flächen statt, bei der die Art und Weise der Anlage des Feinerschließungsnetzes und die „Fahrspursituation“ geprüft wurde. An die Fahrspuren wurde der Anspruch gestellt, dass sie über eine Distanz von mehreren Metern (etwa  $\geq 10$  m) hinsichtlich der Spurtiefe möglichst homogen beschaffen sein sollten. Zudem wurde im Rahmen der Begehungen eine Pürckhauerbepopung zur Ansprache der Horizontabfolge und zur Prüfung der Homogenität des Substrates und des Skelettgehaltes an mehreren Prüfpunkten innerhalb der Rückegassen durchgeführt.

Nach erfolgreicher Vorauswahl fand die Abgrenzung und Markierung von insgesamt 18 Situationen/Versuchsflächen statt, die nachfolgend als „Versuchsgassen“ (VG) bezeichnet wurden. Alle Versuchsflächen wurden im Pärchendesign angelegt und bestanden aus zwei Parzellen. Eine der Parzellen stellte einen Abschnitt einer Rückegasse (= Behandlung Fahrspur „FS“) in variabler Länge dar, die andere Parzelle wurde direkt angrenzend an den Fahrspurabschnitt im unbefahrenen Arbeitsblock zwischen zwei Rückegassen angelegt (= Behandlung Kontrolle „Ref“). Zur dauerhaften Abgrenzung der Parzellen wurden diese an den Eckpunkten mit Eichenpflocken versehen und mit Trassierband umrandet. Zudem wurde am südwestlichen Pfahl einer Parzelle ein Magnet in eine Tiefe von 10-15 cm unter Geländeoberkante (uGOK) eingebracht. In den Fahrspurbehandlungen wurden die Spurtiefen beidseitig (rechte und linke Spur) mittels einer Art Schiebelehre in Form eines umgedrehten „T“ manuell laufmeterweise gemessen. Die Spurtiefen differenzierten dabei je Versuchsfläche zwischen  $> 0$  cm und etwa 30 cm und wurden entsprechend der vorherrschenden Spurtiefen in eine der drei Fahrspurbehandlungen *FS-A*, *FS-B* und *FS-C* eingeteilt. Bei *FS-A* handelt es sich um Fahrspurbehandlungen mit Spurtiefen zwischen  $> 0 \leq 10$  cm, bei *FS-B* liegen die Fahrspurtiefen zwischen  $> 10 \leq 20$  cm und bei *FS-C* zwischen  $> 20 < 30$  cm. Je Fahrspurbehandlung (*FS-A*, *FS-B*, *FS-C*) ergibt sich somit eine Wiederholungsanzahl von  $n = 6$ . Bei der Auswertung wurden i.d.R. alle Referenzparzellen zur Behandlung *Ref* zusammengefasst und den drei Fahrspurbehandlungen gegenübergestellt, sodass sich für *Ref* eine Wiederholungsanzahl von  $n = 18$  ergibt. In einigen Fällen fand auch eine direkte Gegenüberstellung der Fahrspurbehandlungen mit den zugehörigen Referenzparzellen statt (Pärchenvergleich). Beispiel: Vergleich der Referenzparzellen von Gruppe A (*Ref-A*) mit den Fahrspurparzellen von A (*FS-A*). Die Anzahl der Wiederholungen in den Referenzen liegt im direkten Vergleich dann bei jeweils 6.

Beispiele für typische Erscheinungsbilder der Fahrspurbehandlungen sind in Abbildung 1 gezeigt.



**Abbildung 1: Beispiele für die Behandlungen *FS-A* (links), *FS-B* (Mitte) und *FS-C* (rechts).**

Innerhalb von Rückegassen – und auch in den ausgewählten Abschnitten – ist es charakteristisch, dass Morphologie und Fahrspurtiefe auf geringer Strecke größeren Schwankungen unterliegen sind. Versuchsflächenabschnitte wurden so ausgewählt, dass die Varianz der Fahrspurtiefen innerhalb des Abschnittes möglichst gering gehalten wurde. Auf einer Versuchsgasse lag der überwiegende Teil der untersuchbaren Laufmeter innerhalb der Spannweite der zugeordneten Gruppe (s.o.), bereichsweise kam es aber auch zu Über- und Unterschreitungen der Zielwerte. Zu Untersuchungszwecken wurden ausschließlich Laufmeter im Bereich der Ziel-Spannweite verwendet, außerhalb dieser liegende Laufmeter fanden keine Verwendung in den Gruppen *FS-A* und *FS-B*. Lediglich in Gruppe *FS-C* musste aufgrund von Schwierigkeiten ausreichend Flächen bzw. zusammenhängende, geeignete Abschnitte zu finden, vereinzelt auf Teilstücke mit größerer Fahrspurtiefe als 30 cm zurückgegriffen werden. Abbildung 2 und Abbildung 3 veranschaulichen die Anzahl verwendeter Laufmeter sowie die mittleren Spurtiefen und deren Standardabweichung in den Fahrspurbehandlungen. In Teilvorhaben 2 war der Flächenumfang des ersten Kollektivs S1-S6 sehr gering,

sodass die Anzahl verwendeter Laufmeter im Verhältnis niedrig liegt.

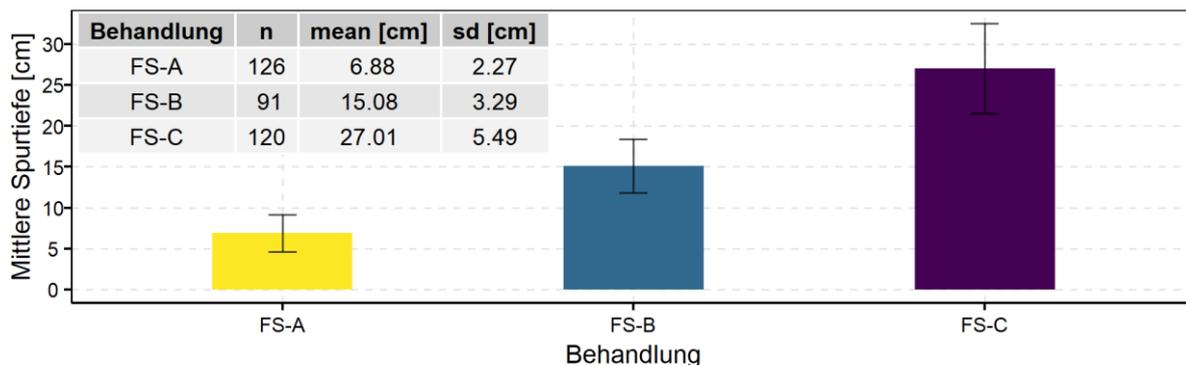


Abbildung 2: Anzahl verwendeter Laufmeter (n), Mittlere Spurtiefe (mean) und Standardabweichung (sd) in den Fahrspurbehandlungen FS-A, FS-B und FS-C von TV1.

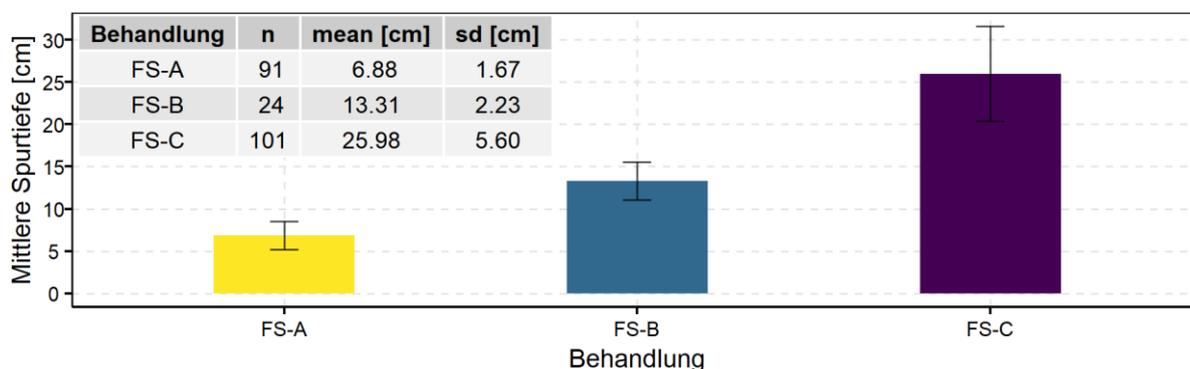


Abbildung 3: Anzahl verwendeter Laufmeter (n), Mittlere Spurtiefe (mean) und Standardabweichung (sd) in den Fahrspurbehandlungen FS-A, FS-B und FS-C von TV2.

Den Versuchsgassen wurden während der Vorauswahl laufende Nummern zugewiesen, aus denen zu einem späteren Zeitpunkt ausgewählt wurde. In Tabelle 1 ist ein Überblick über die im Projekt verwendeten Versuchsgassen und gleichzeitig eine Zuordnung zu den Gruppen A, B und C nach Teilvorhaben gegeben. Anhang 1 enthält Tabelle 19 mit den Versuchsgassenbezeichnungen, die zur Datenverarbeitung verwendet wurden.

Tabelle 1: Übersicht über Versuchsgassenbezeichnungen nach Behandlungsgruppen.

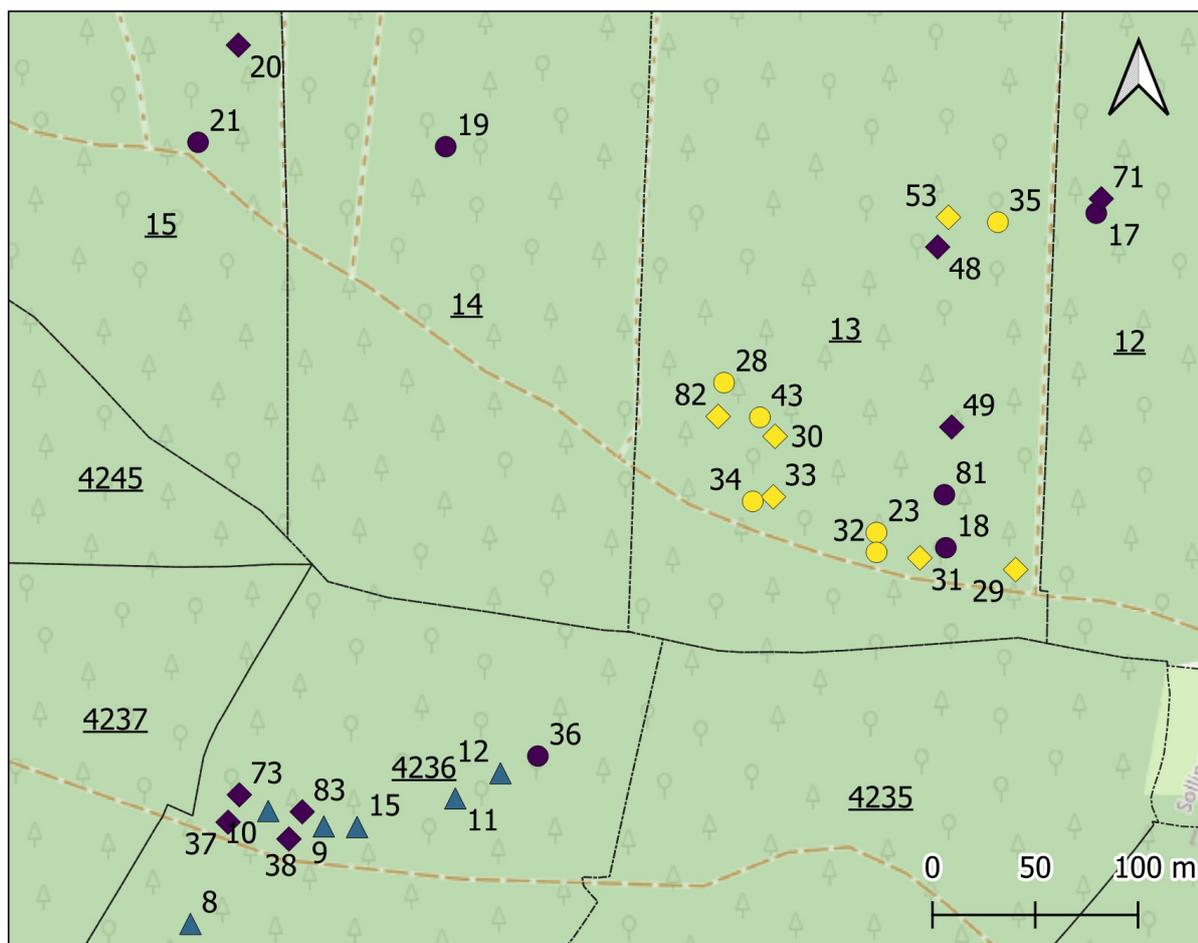
"Situationen" S7-S12		"Situationen" S1-S6		"Situationen" S13-S18	
Gruppe A (> 0 <= 10 cm)		Gruppe B (> 10 <= 20 cm)		Gruppe C (> 20 <= 30 cm)	
TV1	TV2	TV1	TV2	TV1	TV2
VG23	VG29	VG08	VG08	VG17	VG20
VG28	VG30	VG09	VG09	VG18	VG37
VG32	VG31	VG10	VG10	VG19	VG48
VG34	VG33	VG11	VG11	VG21	VG49
VG35	VG53	VG12	VG12	VG36	VG71
VG43	VG82	VG15	VG15	VG38	VG73
				VG81	
				VG83	

Geographisch betrachtet lag das erste Flächenkollektiv (S1-S6) im Forstamt 254 (Dassel), Revier 5 (Abbecke), Abteilung 4236, Unterabteilung a, Unterfläche 2, während sich die im Sommer 2018 ausgewählten Versuchsfelder der Situationen S7-S18 nördlich des ersten Kollektivs im Forstamt 254 (Dassel), Revier 6 (Sievershausen) in den Abteilungen 12 a1, 13 a1, 14 a1, 15 a befanden. Die Versuchsgassen lagen somit im Übergangsbereich zwischen dem Unteren Solling und dem Hohen Solling, auf einer Höhe von ~ 400 m ü. NN.

Abweichend zum Vorgehen bei der Versuchsflächenauswahl des ersten Kollektivs (S1-S6), wurde bei den Situationen S7-S18 darauf geachtet, für die beiden Teilvorhaben jeweils getrennte Versuchsflächenabschnitte auszuwählen, um eine reibungslose Befahrung (Setzungsmessung von TV2) ohne Beeinflussung anderer Versuche, beispielsweise dem Versuch zum Streuabbau („Netzbeutel“) oder zum Monitoring der Bodenrespiration, zu ermöglichen.

Aufgrund von Sturmwurfereignissen und Borkenkäferbefall fielen einige Bäume in Bereichen von Versuchsgassen aus und mussten entnommen werden. Zwei der Versuchsgassen entwickelten sich dadurch mehr oder weniger zu Freiflächen. Um die Respirationmessungen *in situ* an einem Kollektiv mit gleicher Anzahl je Behandlungsgruppe absolvieren zu können, mussten die Versuchsgassen VG21 und VG81 (beides tiefe Fahrspuren FS-C) durch Auswahl von Ersatzbereichen ersetzt werden. Diese trugen die Bezeichnungen VG38 und VG83.

Abbildung 4 zeigt die Lage der Versuchsgassen im Untersuchungsgebiet.



#### Untersuchte Fahrspuren

- |            |   |       |   |     |
|------------|---|-------|---|-----|
| ≤ 10 cm    | ● | TV1   | ◆ | TV2 |
| 10 ≤ 20 cm | ▲ | TV1+2 |   |     |
| > 20 cm    | ● | TV1   | ◆ | TV2 |

#### Zeichenerklärung

- ★ Untersuchungsgebiet
- Weg
- Abteilung



**Abbildung 4: Übersicht über die Lage der Versuchsgassen beider Teilvorhaben im Forstamt Dassel.**

Ursprünglich war gemäß Projektantrag vorgesehen – und nach dieser Planung wurde zu Projektbeginn auch vorgegangen – zwei der Versuchsgassen als „intensiv“ zu untersuchende Rückegassen zu deklarieren und dadurch eine höhere Anzahl an Proben + Tiefenstufen zu gewinnen. Des Weiteren sollten bodenbiologische Untersuchungen ausschließlich auf jenen Gassen des Typs „intensiv“ durchgeführt werden. Alle weiteren Situationen sollten im Rahmen des Projektes „extensiv“, d.h. mit geringerem Proben- sowie Analysenumfang, untersucht werden. Um ein statistisch größeres Spektrum an auswertbaren Daten und eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, wurde im Projektverlauf beschlossen, die Differenzierung nach „extensiv“ und „intensiv“ aufzugeben und stattdessen die bodenbiologischen Untersuchungen auf sämtliche 18

Versuchsgassen auszuweiten. Die Anzahl der Probenahmepunkte für die Entnahme von Bodenproben wurden dafür je Rückegasse von n = 6 auf n = 4 reduziert.

Die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden in allen 18 Versuchsgassen analog zu der Entscheidung gleichermaßen durchgeführt. Die Festlegung der Punkte orientierte sich stark an den Probenahmepunkten der ungestörten Stechzylinderentnahme. Aufgrund der kleinen Flächen und des geringen Platzbedarfs bei der Entnahme der Proben wurde auf die großflächige Messung per Laser verzichtet, da lediglich die Fahrspurtiefe am exakten Ort der Entnahme relevant war. Fahrspurtiefen anderer Orte und Positionen hätten das Ergebnis verfälscht und einen unklaren Zusammenhang zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften und Fahrspurtiefe geliefert.

### Datenerhebung

Das zweite Arbeitspaket umfasste Entnahmen von Bodenproben an den 18 Waldstandorten, an denen nachfolgend Analysen in den Laboren der NW-FVA und des TI vorgenommen wurden. Die Untersuchungen gliederten sich in einen bodenphysikalischen (TI, Teilvorhaben 2) und einen bodenchemischen/bodenmikrobiologischen (NW-FVA, Teilvorhaben 1) Teilaspekt. Neben der Gewinnung von Bodenproben wurden zahlreiche Versuche – sowohl *in situ* als auch in Laborexperimenten – mit überwiegend bodenkundlichem Kontext durchgeführt. Das methodische Vorgehen bei der Ausführung der verschiedenen Versuche wird nachfolgend eingehend beschrieben (II.2).

### Beprobung von Versuchsflächen

Die abgegrenzten Bereiche der Behandlung *Fahrspur* wurden nach Auswahl der ersten 6 Versuchsgassen (Situationen S1-S6) weiterführend in einen Bereich zur Erhebung der bodenphysikalischen Parameter und einen Bereich zur Erhebung der bodenmikrobiologischen/-chemischen Parameter unterteilt. Während des Zeitraumes vom 13.11.2017 bis 29.11.2017 fand die erste Probenahme *vor* Befahrung in den zugewiesenen Teilbereichen statt, bei der gestörte und ungestörte Bodenproben für die größtenteils im Labor zu ermittelnden Parameter entnommen wurden. Direkt im Anschluss, am 04.12.2017 und 08.12.2017, wurden die Fahrspurabschnitte der Situationen S1-S6 zum Zwecke der Bestimmung der Setzung des Mineralbodens einmalig mit einem Harvester und einem beladenen Forwarder befahren (Beschreibung siehe II.2.14). Das Vorgehen, Beprobungsbereiche des TI und der NW-FVA in der gleichen Rückegasse unterzubringen, stellte sich im Nachhinein als unvorteilhaft heraus, da die Spurtiefen in den 6 Versuchsgassen durch den Befahrungsversuch erwartungsgetreu verändert wurden. Aus den Fahrspuren, die vor dem Befahrungsversuch ursprünglich der Gruppe *FS-A* (0-10 cm) zugeordnet wurden, entwickelten sich aufgrund der Witterungsbedingungen (hohe Bodenfeuchte) Spurtiefen, die eine Einstufung in Gruppe *FS-B* (10-20 cm) erforderlich machten (siehe Entwicklung Spurtiefe der ersten 6 Versuchsgassen in Abbildung 77, Kapitel II.2.15). Diese wurden fortan als Vertreter der Fahrspurgruppe *FS-B* verwendet. Die Ergebnisse der Bodenproben der NW-FVA, die vor der Befahrung gewonnen wurden, konnten somit nicht mehr in Bezug zu nachfolgenden Versuchen gesetzt werden. Infolgedessen wurde die Herangehensweise abgeändert und bei den ausstehenden 12 Situationen getrennte Versuchsgassen für beide Vorhabenträger ausgewählt (vgl. Versuchsgassenbezeichnungen in Tabelle 1). Die fehlende Vergleichbarkeit der Bodenproben *vor* Befahrung mit Versuchen, die *nach* Befahrung stattfanden, machte eine weitere Beprobung erforderlich. Im Zuge der Verlängerungen des Projektes wurde der Probenumfang vergrößert und ein Teil der Fahrspurbehandlungen (sowie einige der Referenzbehandlungen) ein weiteres Mal beprobt. In Tabelle 2 werden die Zeitpunkte aller Bodenprobenahmen und Setzungsmessungen geordnet nach Teilvorhaben wiedergegeben.

**Tabelle 2: Termine der Bodenprobenahmen und Setzungsmessungen.**

Teilvorhaben	Ereignis	Zeitraum
TV1	Beprobung <i>vor</i> Befahrung S1-S6	04.12.2017 - 08.12.2017
	Beprobung S7-S12	15.10.2018 - 02.11.2018
	Beprobung <i>nach</i> Befahrung S1-S6	07.05.2019 - 20.05.2019
	Beprobung S13-S18	21.10.2019 - 08.11.2019
	Erweiterung Probenumfang S1-S18	05.10.2020 - 23.10.2020 01.03.2021 - 19.03.2021
TV2	Beprobungen S1-S6	29.11.2017 - 15.02.2018
	Beprobungen S7-S12	08.11.2018 - 20.09.2021
	Erweiterung Probenumfang S1-S18	06.10.2020 - 20.11.2021
	Setzungsmessung S1-S6	04.12.2021 + 08.12.2017
	Setzungsmessung S7-S12	22.05.2019
	Setzungsmessung S13-S18	14.04.2021

### Aufbereitung und Zusammenführung der erhobenen Feld- und Labordaten in einer Datenbank

Der Ablaufplan des Verbundvorhabens sah eine „Aufbereitung und Zusammenführung der erhobenen Feld- und Labordaten in Form einer Datenbank“ vor. Um Datensätze bei Bedarf verknüpfen zu können, wurde sich

auf eine gemeinsame Ordnungsstruktur für Tabellen festgelegt und diese auf die Mehrzahl vorhandener Tabellen/Datensätze angewandt. Dabei wurden die Daten beider Teilvorhaben vereinheitlicht, sodass eine übergreifende Auswertung aller Datensätze im Sinne der Fragestellung des Projektes erfolgen konnte. Zunächst fand die Festlegung der Nomenklatur der Fahrspuren und Untersuchungsflächen nach *FS-A*, *FS-B*, *FS-C* und *Ref* statt. Die Referenzparzellen können zudem noch in Abhängigkeit ihrer Zugehörigkeit zu den Fahrspurgruppen nach *Ref-A*, *Ref-B*, *Ref-C* unterschieden werden. Zur differenzierten Auswertung der großen Datenmengen wurden weitere Gruppierungsvariablen hinzugefügt, die sich aus den Metadaten der Probenahme ergeben und für beide Teilvorhaben gleichermaßen gültig sind (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Gruppierungsvariablen der Projektdaten beider Teilvorhaben zur integrativen Auswertung.**

<b>date.pn</b>	<b>vg</b>	<b>probenart</b>	<b>hor</b>	<b>beh</b>	<b>bef</b>	<b>strat</b>	<b>strat2</b>	<b>fs-tiefe.cm</b>
15.10.2018	VG08	HA	L+Of	FS	vor	<i>FS-B</i>	<i>FS-B</i>	14,3
15.10.2021	VG21	MB	5-10	WB	ohne	<i>Ref</i>	<i>Ref-C</i>	

Das Datum der Probenahme oder Untersuchung wurde unter der Bezeichnung *date.pn* festgehalten. Besonders Parameter, die jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, wurden mit Hilfe dieser zeitlichen Information ausgewertet. Eine weitere zeitliche Information enthält die Variable *bef*, die den Zeitpunkt einer Probenahme in Bezug zum Befahrungsversuch angibt und die Werte *vor*, *nach* oder *ohne* annehmen kann.

Als räumliche Komponente geht die Versuchsgassenbezeichnung *vg* mit ein, die über die Kartierung des Projektes mit den Zielgrößen der Fahrspurtiefen verknüpft ist. Da in beiden Teilvorhaben teilweise unterschiedliche Horizonte des Bodens beprobt wurden und Unterscheidungen nach der Probenahmetiefe unabdingbar waren, wurden die Variablen *probenart* und *hor* eingeführt. Während erstere zwischen Humusauflage (HA) und Mineralboden (MB) unterscheidet, liefert *hor* Informationen über den Horizont bzw. die Tiefenstufe in Bezug auf die Mineralbodenoberkante, in der eine Probe gewonnen wurde. Weitere räumliche Informationen beinhalten *beh*, *strat* und *strat2*. Bei der Behandlung *beh* handelt es sich um die Unterscheidung zwischen Fahrspur FS und Referenz Waldboden WB. *strat* und *strat2* leiten sich von Stratum ab und lassen wie oben beschrieben zwischen den Fahrspurklassen und Referenzen unterscheiden. Analog zu diesen Gruppen, aber noch feiner differenzierend, wurde die absolute Fahrspurtiefe unter *fs-tiefe.cm* berücksichtigt.

Für jeden gemessenen oder berechneten Parameter wurde zwangsläufig dieses einheitliche Schema zur Gruppierung hinzugefügt, sodass alle Parameter und Informationen in einer Tabelle zusammengeführt werden konnten. Die weitere Datenverarbeitung, deskriptive Statistik und Bewertung der gesammelten Informationen erfolgte auf Basis dieses Schemas.

## 2. Versuchsergebnisse

In Kapitel II.2 findet eine ausführliche Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse statt. Das Kapitel ist nach den durchgeführten Versuchen bzw. Messgrößen gegliedert. Zu berücksichtigen ist, dass sich die gezeigten Ergebnisse naturgemäß auf den Zeitpunkt beziehen, zu dem die Proben gewonnen und die Versuche durchgeführt wurden (2018-2021). Für die Versuchsflächen ist jedoch mit Ausnahme von Spurbefahrung *FS-B* und den Daten von TV2 *nach* Befahrung unbekannt, welche Zeitspanne seit letztmaliger Befahrung und Verdichtung zurückgelegt wurde. Es kann somit keine exakte Aussage zur Befahrungshistorie und Entstehung der verschiedenen tiefen Fahrspuren getroffen werden. Da es sich um bewirtschaftete Landeswaldflächen handelt ist allerdings davon auszugehen, dass die Rückegassen näherungsweise letztmalig innerhalb der letzten 10 Jahre (seit 2018) befahren wurden. Für die Ergebnisinterpretation ist der Bezugszeitpunkt von Bedeutung, da sich die Bodeneigenschaften der Fahrspurböden durch Regenerationsprozesse (obgleich diese sehr gering ausgeprägt sein können) oder durch erneute Befahrungereignisse im Zeitverlauf stetig verändern, sodass bei Untersuchung nach anderen Zeitspannen auch abweichende Ergebnisse erzielt werden können.

### 2.1 Korngrößenverteilung (TV2)

Als standortspezifische Kenngröße gilt die Textur des Bodens in Fragen der Befahrbarkeit von Rückegassen und den durch die Erntemaßnahmen hervorgerufenen bodenfunktionellen Veränderungen als wesentlicher Parameter. Sie liefert Hinweise zur Abschätzung der Resilienz des Bodens gegenüber schädlicher Bodenverdichtung und damit assoziierter Folgeprozesse. Je höher der Feinbodenanteil, desto empfindlicher reagiert der Boden auf statische und dynamisch Druckbelastungen der Fahrzeuge. Der Feinboden kann in den Fraktionen Sand, Ton und Schluff unterschieden werden. Je kleiner die Partikelfraktion, desto sensibler ist diese gegenüber einer Verdichtung oder Umlagerung im Boden bei Befahrung. Sand stellt aufgrund der größten Partikel die Fraktion dar, die als wenig kritisch anzusehen ist. Je höher der Anteil des Sands, desto geringer ausgeprägt ist die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens.

Assoziiert mit der Bodenart sind diverse bodenphysikalische, -chemische und -biologische Eigenschaften des Bodens. So lässt sich beispielsweise der Porenraum in struktur- und texturgeprägte Poren unterscheiden. Unterschiedliche Bodenarten weisen demnach deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf. Das Retentionsverhalten der Böden unterscheidet sich deutlich zwischen sand-, schluff- und tondominierten Böden. Je sandiger ein Boden, desto geringer ist die Wasserhaltefähigkeit und die nutzbare Feldkapazität. Die Luftkapazität ist im Gegensatz dazu eher erhöht.

Die bodenchemischen Verhältnisse werden ebenfalls durch die Textur beeinflusst. So hängt die Kationenaustauschkapazität als Bodenbewertungsmaß direkt vom Tongehalt des Bodens ab. Die Gasflüsse im Boden werden analog zur Wasser- und Luftleitfähigkeit positiv von einem höheren Sandgehalt beeinflusst. Die Durchlüftung des Bodens nimmt mit zunehmenden Schluff- und Tongehalt ab. Das Potential für hohe Nährstoffverfügbarkeiten ist im Gegensatz dazu bei tonigen und schluffhaltigen Böden höher.

Bodenbiologisch lässt sich auch ein Zusammenhang mit der Bodenart ziehen: Beispielsweise beeinflusst die Porenraumverteilung, die durch die Bodenart geprägt wird, den Lebensraum des Edaphons. Die Durchwurzelbarkeit eines Bodens ist nicht nur von dessen Trockenrohdichte, sondern auch der Partikelzusammensetzung abhängig. Je sandiger der Boden, desto besser ist dessen Durchwurzelbarkeit.

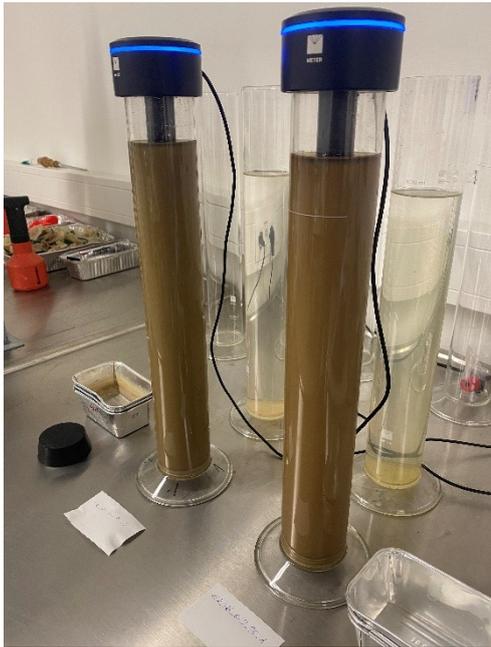
Bei der Standortakquise stellte die Bodenart eine der Leitgrößen dar, die für alle Rückegassen möglichst einheitlicher Natur sein sollte. Die Vergleichbarkeit aller Versuchsergebnisse sollte durch keine, oder nur gering ausgeprägte Unterschiede dieses standortspezifischen Parameters gewährleistet sein. Dennoch ist von einer natürlichen Streuung auszugehen, die allerdings in allen Fahrspuren gleichermaßen ausgeprägt sein sollte.

#### 2.1.1 Material & Methoden

Die Basis bodenkundlicher Untersuchungen stellt die Bestimmung der Bodenart dar, die durch eine Charakterisierung der Textur erfolgt in Form der Anteile der 3 Hauptbodenarten. Als einer der wesentlichen Parameter hinsichtlich der Sensitivität gegenüber befahrungsinduzierten Einflüssen ist der Feinboden von besonderer Relevanz. Dieser besteht aus den Fraktionen Ton, Schluff und Sand und deren Unterfraktionen und kann in verschiedenen Varianten grafisch dargestellt werden.

Neben der Entnahme ungestörter Bodenproben wurden ergänzend diverse in ihrer Struktur gestörte Mischproben (> 2 l Volumen) der Fahrspurböden und angrenzender Referenzparzellen in den Tiefenstufen 20 cm, 35 cm und 50 cm entnommen. Anhand dieser wurde anschließend die Korngrößenverteilung und daraus ableitend die Bodenart bestimmt. Dabei fand das auf einem Sedimentationsverfahren basierende PARIO-Messgerät der Firma Meter Group AG Anwendung (Durner et al. 2021, Miller et al. 2017), welches eine teilautomatisierte und standardisierte Bearbeitung des Versuches ermöglichte. Im Zuge des Versuches fand zunächst eine Probenvorbereitung nach DIN ISO 11277 statt: Neben der Entfernung des Skeletts

(> 2000 µm) und der organischen Substanz (mittels Oxidation durch Wasserstoffperoxid) wurde ein entsprechendes Dispergiermittel (Natriumhexametaphosphat) der Suspension beigefügt, welches die Klumpenbildung kleinster Tonpartikel verhindert. Nach Abschluss der Probenvorbereitung wurden diese bis zur Versuchsdurchführung maximal 2 Tage bei 4°C gelagert.



**Abbildung 5: PARIO-Messgerät im Labor des Thünen-Instituts für Agrartechnologie.**

Das danach angewendete Sedimentationsverfahren („PARIO-Plus“, Durner et al. (2021)) ermöglichte zunächst die Identifikation der Schlufffraktionen und anschließend die Bestimmung des Tonanteils. Nachdem die Suspension in den Sedimentationszylinder überführt und dort über Kopf mindestens 60 Sekunden homogenisiert wurde, wurde der Zylinder auf dem Tisch abgestellt. Nun wurde zügig das Messgerät in die Suspension getaucht. Ab diesem Zeitpunkt sedimentierten alle Partikel in unterschiedlicher Geschwindigkeit, die von deren Größe abhängig ist. Über Änderungen des Drucks, die auf den Drucksensor in Form der mit Bodenpartikeln versetzten Wassersäule lasten, kann – unter Zuhilfenahme weiterer Randbedingungen – die der Druckkurve zugrundeliegende Verteilung des Feinbodens berechnet werden. Nach ca. 3 h erfolgte eine manuelle Entnahme einer Teilprobe aus der Suspension zur genauen gravimetrischen Bestimmung des Tonanteils, der mittels des Sedimentationsverfahrens nicht ausreichend genau hätte bestimmt werden können. Nach dem Versuch wurde eine Nasssiebung zur Auftrennung der Sandfraktionen mit Sieben der Maschenweiten 63 µm, 200 µm und 630 µm durchgeführt. Der Skelettanteil wurde im Zuge der Aufbereitung des Rohmaterials durch Siebung bei 2000 µm ermittelt. Abschließend wurden automatisch generierte Datensätze des Messgerätes um die Sieb- und Tonfraktionsdaten erweitert, sodass eine Kornsummenkurve für Bodenpartikel im Bereich 2-2000 µm erstellt werden konnte.

Anhand der Massenanteile einzelner Fraktionen wurde die Bodenart im Körnungsdreieck für jede Probe dargestellt. An jeder Mischprobe wurden 3 parallele Untersuchungen abgewickelt.

### Auswertung

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung, basierend auf der Kurve des Drucks innerhalb der Suspension, erfolgte automatisiert innerhalb der Software mittels inverser Modellierung. Details sind der Betriebsanleitung des Messgerätes zu entnehmen (Durner et al. 2017). Alle Ergebnisse wurden aus der Software als Excel-Datei exportiert und mittels Excel *PowerQuery* in einer Datenbank zusammengeführt. In *RStudio* wurden die Massenanteile der Fraktionen Sand, Schluff und Ton aller Datensätze nach Fahrspuren bzw. Referenzparzellen, Probennahmetiefe sowie der räumlichen Exposition der Versuchsflächen ausgewertet. Einzelwerte jeder Messung wurden als Punktwolke im Korngrößendreieck unter Zuhilfenahme des Pakets „soiltxture“ dargestellt. Ergänzend wurden Mittelwerte nach Fraktionen je Tiefenstufe und Fahrspurklasse gebildet, die als gestapeltes Säulendiagramm illustriert wurden. Neben der Auswertung nach Fahrspurtiefe wurde auch ein Vergleich nach der Lage der Versuchsflächen angestellt. Analog zum bereits genannten Vorgehen wurde auch dies in Form von gestapelten Säulendiagrammen abgebildet.

### **2.1.2 Ergebnisse**

Die Korngrößenverteilung kann als Ableitung der Kornsummenkurve erstellt werden. Aus beiden können Fraktionen abgeleitet werden, die im Folgenden dargestellt sind. Zunächst sind in Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 die Ergebnisse aller Einzelmessungen in Korngrößendreiecken auf Grundlage der Deutschen Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (Abbildung 6, Ad-hoc-AG Boden (2005)) abgebildet. In Abbildung 10 sind die aus der Kornsummenkurve abgeleiteten Fraktionen als Anteil dargestellt.

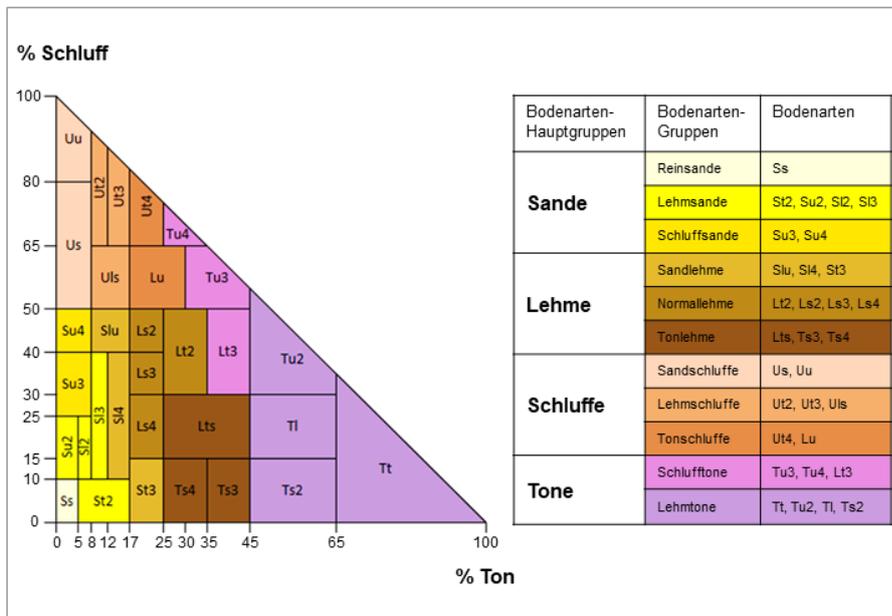


Abbildung 6: Korngrößendreieck nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA 5 und die Einteilung der Bodenart in Bodenarten-Hauptgruppen, Bodenarten-Gruppen und Bodenarten.

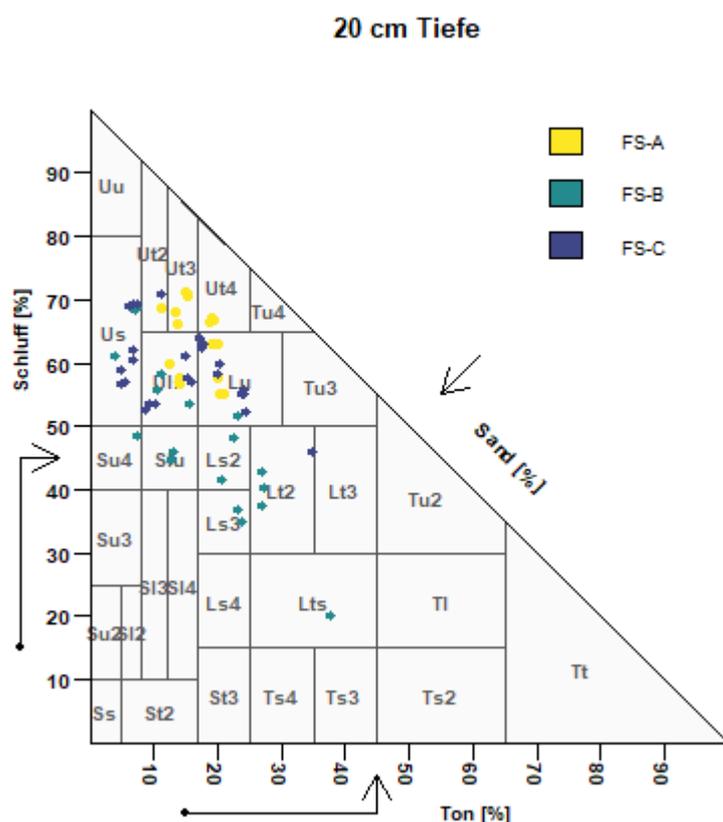


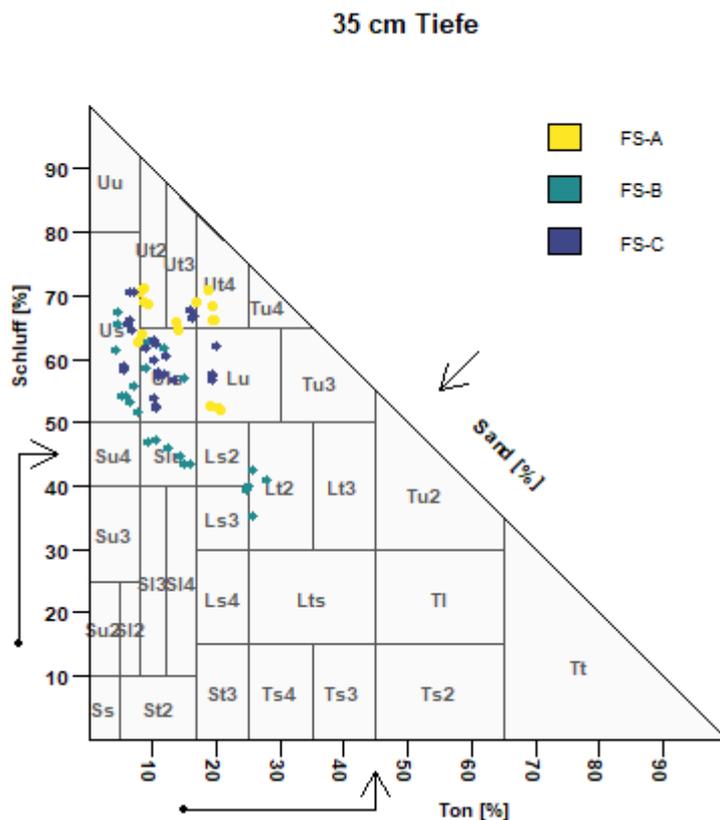
Abbildung 7: Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von FS-A, FS-B und FS-C in der Tiefenstufe 20 cm.

Die Befahrung von Böden beeinflusst in der Regel nicht die Textur des Bodens, kann aber in einem begrenzten Rahmen Umlagerungsprozesse zwischen Horizonten hervorrufen, mit der dann auch Auswirkungen auf die Bodentextur verbunden sind. Diese werden aber nur als oberflächlich lokal begrenzt angesehen, sodass aus diesem Grund die Bodenart eine konstante Randbedingung darstellt, die zur Beurteilung der Prozesse und deren Änderungen genutzt wird. Die mittlere Verteilung der Bodenarten aller Versuchsflächen zeigt ähnliche, aber in bestimmten Fraktionen auch abweichende Anteile der 3 Fraktionen auf. Der Sandanteil des Bodens stellt die weiteste Fraktion > 63 – 2000 µm dar, die besonders in den Varianten FS-B in 20 cm und 35 cm Tiefe höher repräsentiert ist als in den Versuchsgassen von FS-A und FS-C. Die Parzellen von FS-B liegen

vollständig im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes und sind gen Norden exponiert (Abbildung 11). Der Schluffanteil ( $> 2 - 63 \mu\text{m}$ ) aller Flächen schwankt nur geringfügig, sodass die Abweichungen zueinander geringer als bei Sand sind. Das Gleiche gilt für den Tongehalt ( $< 2 \mu\text{m}$ ), der relativ niedrig und in vergleichbarer, mittlerer Höhe liegt. Über die verschiedenen Tiefenstufen nimmt dieser allerdings leicht ab, wohingegen Sand und Schluff relativ konstant über die Tiefe verteilt sind.

Die Streuung zwischen den untersuchten Rückegassen innerhalb einer Gruppe ist ebenfalls variierend. Während in *FS-A* und *FS-C* die Bodenart weitestgehend im Bereich von *Ut3*, *Ut4*, *Us*, *Lu* und *Us* liegt, schwankt sie bei *FS-B* besonders stark und weicht bis in Bereiche der Sandlehme (*Lts*, *Ls3*) ab. Dieser Effekt ist in den Tiefenstufen 20 cm und 35 cm stark ausgeprägt, lässt sich allerdings in 50 cm Tiefe nur noch bedingt wiederfinden. Doch auch in dieser Tiefe lässt sich ein erhöhter Sandanteil erkennen, sodass es sich bei der Bodenart teilweise um die Hauptbodenart der Sande handelt, bei *FS-A* und *FS-C* eher um Schluffe.

Der Vergleich zwischen Fahrspur und entsprechender Referenzgruppe, bspw. *FS-B* und *Ref-B*, zeigt, dass es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Pärchen gibt. So sticht Variante *B* im höheren Sandgehalt in *FS* und *Ref* gleichermaßen gegenüber *A* und *C* heraus. Im weiteren Verlauf wird daher auf eine detaillierte Beschreibung der Textur von *Ref* verzichtet und lediglich auf die Ergebnisse in *FS* eingegangen.



**Abbildung 8:** Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von *FS-A*, *FS-B* und *FS-C* in der Tiefenstufe 35 cm.

### 50 cm Tiefe

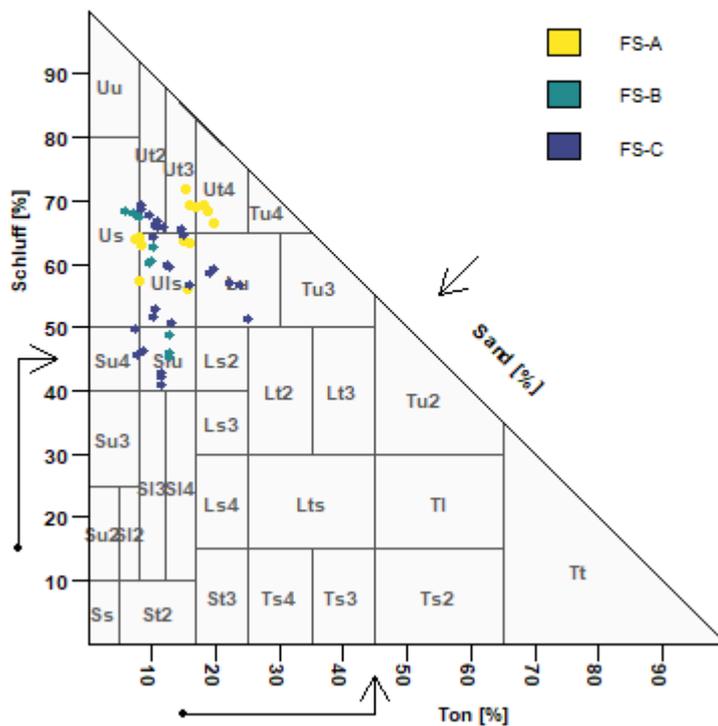


Abbildung 9: Korngrößendreieck mit den prozentualen Anteilen von Sand und Schluff und der Einordnung der Bodenart (nach KA 5). Dargestellt sind die Ergebnisse der Einzelmessungen von *FS-A*, *FS-B* und *FS-C* in der Tiefenstufe 50 cm.

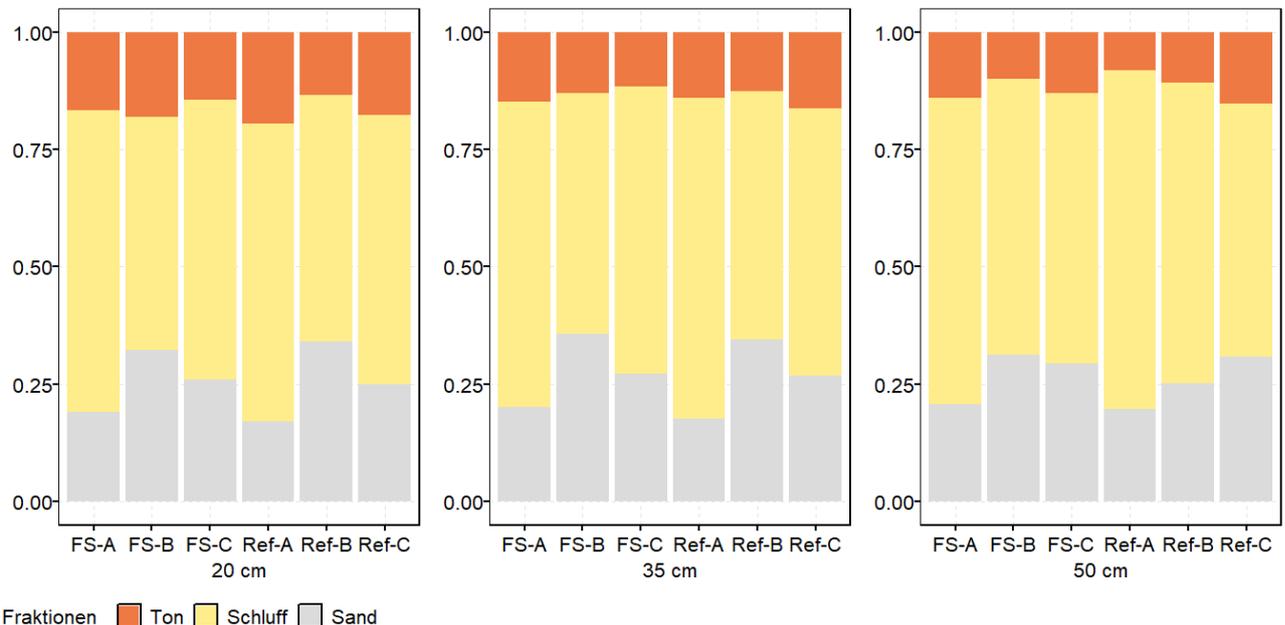
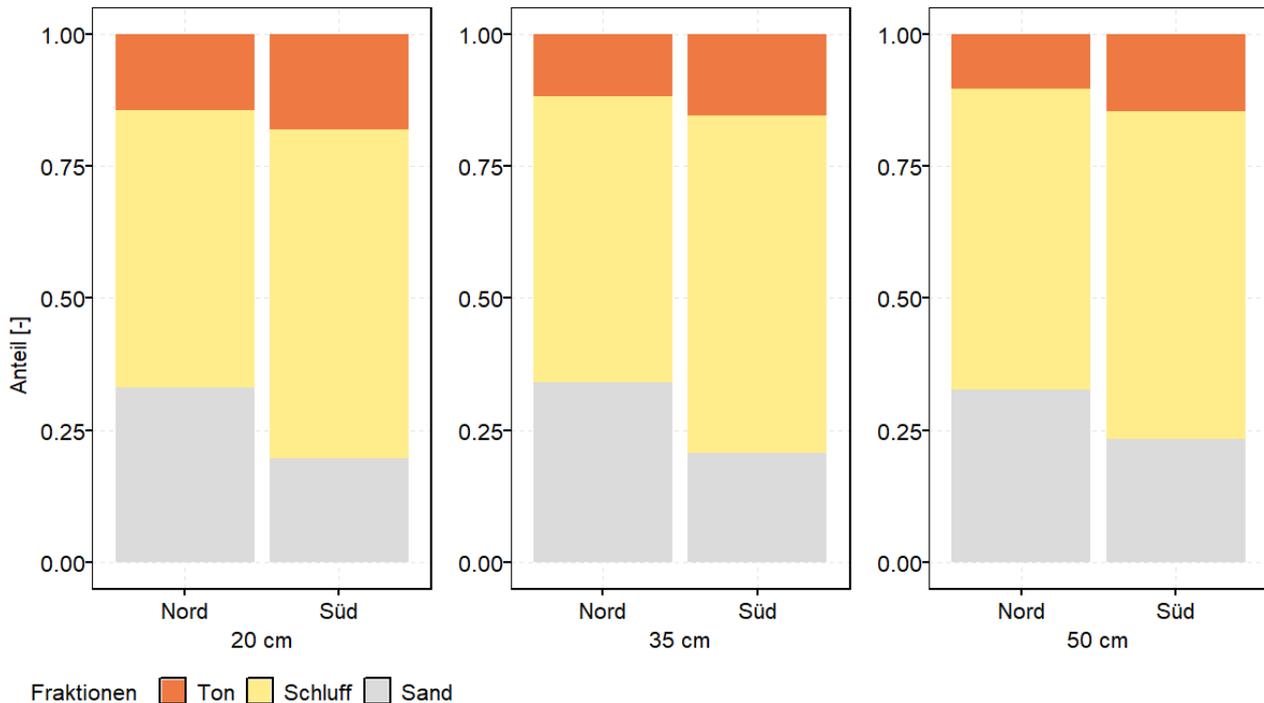


Abbildung 10: Mittlerer Anteil der Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand aller untersuchten Varianten *FS-A*, *FS-B*, *FS-C* und *Ref-A*, *Ref-B*, *Ref-C* in den Tiefen 20 cm, 35 cm und 50 cm (von links nach rechts) nach Untersuchung von je 3 Wiederholungsproben des Feinbodens mit dem PARIO Plus Verfahren, dargestellt als gestapelte Säulen.

In Abbildung 11 sind die Fraktionen nach deren Lage im Untersuchungsgebiet in Form der Exposition dargestellt. Im Süden liegen die nach Norden hin exponierten Flächen, im Norden umgekehrt (Abbildung 4). Bei der variantenübergreifenden Betrachtung fällt der Unterschied im Sandgehalt zu Lasten des Tonanteils auf, der bei den südexponierten Flächen (überwiegend *FS-A* und *FS-C*) erhöht ist. Auf den nordexponierten Flächen liegen alle Versuchsgassen von *FS-B* und nur wenige *FS-C* Fahrspuren. *FS-A* ist dort nicht vertreten.

Im Mittel schwanken die Bodenarten, also die Zusammenführung der 3 Fraktionen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA 5), zwischen Lehmschluffen *Ut2*, *Ut3*, *Uls* und selten Tonschluffen *Lu*. Im Fall von *FS-B* treten allerdings auch Schluffe *Su4* und Sandlehme *Slu* auf.



**Abbildung 11: Mittlere Korngrößenfraktionen des Feinbodens aller untersuchten Varianten differenziert nach der Exposition der Versuchsflächen „Nord“ (jeweils links) und „Süd“ (rechts) und den Probenahmetiefen 20 cm, 35 cm und 50 cm (von links nach rechts). Dargestellt sind die Mittelwerte aller Messungen mit dem PARIO Plus Verfahren der Anteile von Ton, Schluff und Sand als gestapelte Säulen, die in Summe 1 (100 %) ergeben.**

### 2.1.3 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der Korngrößenzusammensetzung zeigt, dass die Textur aller Versuchsflächen ähnlich ausgeprägt ist, es aber geringe Unterschiede der Versuchsflächen gibt. Besonders der Sandgehalt in *FS-B* und *Ref-B* weicht von den anderen Versuchsflächen ab. Aus diesem Grund wurden verschiedene Bodenarten in den Behandlungen identifiziert.

Hinsichtlich der Interpretation der nachfolgenden bodenphysikalischen (und auch -chemischen und -biologischen) Messgrößen ist dieser leicht abweichende Sandgehalt der nordexponierten Flächen zu beachten. In Bezug auf die bodenphysikalischen Eigenschaften bewirkt der etwas höhere Sandgehalt beispielsweise eine geringfügige aber messbare Beeinflussung der Wasserhaltekapazität und des Porenraums, sodass Bodenluft und Wasser schneller als in schluff- und tondominierten Böden transportiert werden können. Im weiteren Teil des Berichtes sind die Ergebnisse je Behandlung dargestellt, jedoch fand die statistische Auswertung der Daten der bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Bodenproben unter Berücksichtigung der angrenzenden Referenzparzellen der Fahrspurbehandlungen statt. Das Pärchendesign wurde im random-effects-term der verwendeten GLMM (Generalized Linear Mixed Models) einbezogen, sodass vorkommende auf die Textur zurückzuführende Standortunterschiede Eingang in die Auswertung fanden. In der abschließenden Bodenfunktionsbewertung fand ebenfalls ein paarweise Vergleich der Ergebnisse der Fahrspuren mit den zugehörigen unbefahrenen Referenzparzellen statt (z.B. *FS-A* vs. *Ref-A*). Zwischen den Pärchen konnten aber ohnehin keine Unterschiede bei der Textur festgestellt werden.

## 2.2 Trockenrohdichte (TV2)

**Forschungsfrage:** *Wie unterscheiden sich Fahrspuren unterschiedlicher Ausprägung von unbefahrenen Referenzparzellen in ihren bodenphysikalischen Eigenschaften, ausgedrückt durch den Parameter Trockenrohdichte und wie ist die kleinräumige Verteilung in unterschiedlichen Probenahmetiefen und Abständen zur Fahrspurmitte?*

**Hypothese:** Durch die unterschiedlich hohe maschinelle Belastung einer forstlichen Erntemaßnahme und die dadurch wirkenden Kräfte auf den Boden und dessen Aufbau entstehen Fahrspuren verschiedener Tiefen. Je stärker der Einfluss der Befahrung und die Eintiefung der Reifen in den Boden, desto stärker sind die strukturellen Eigenschaften des Bodens verändert und unterscheiden sich mit zunehmender Fahrspurtiefe stärker von unbefahrenen Referenzparzellen desselben Standorts. Der wasser- und luftgefüllte Porenraum

wird bei der Befahrung bei gleichzeitiger Zunahme der Trockenrohddichte verringert. Dies wirkt sich auf diverse bodenphysikalische Parameter aus, die Unterschiede zwischen den untersuchten Bereichen (in und zwischen den untersuchten Fahrspuren und auch in der kleinräumigen Verteilung zwischen Fahrspur und deren Randbereiche) offenlegen.

Wir nehmen an, dass die Trockenrohddichte in den tiefsten Fahrspuren (*FS-C*) die höchsten Werte annimmt und dass ein Gradient in der Intensität von *FS-A* über *FS-B* bis hin zum Maximum bei *FS-C* zu erkennen ist.

## 2.2.1 Material & Methoden

Die Bestimmung bodenphysikalischer Eigenschaften der Fahrspuren und unbefahrener Referenzen wurde an ungestörten, volumenbezogenen Proben in Form von 100 cm<sup>3</sup> (und später 250 cm<sup>3</sup>) Stechzylinderproben durchgeführt. Diese wurden sowohl in den Fahrspuren, den direkt angrenzenden Randbereichen als auch den unbefahrenen Referenzparzellen entnommen. Hinsichtlich der Beprobungstiefe wurden diese in 2,5 cm – 7,5 cm – 12,5 cm – 20 cm – 35 cm unterhalb der Oberkante des Mineralbodens gewählt. Die Tiefenangaben sind bezogen auf die Mitte der Zylinderhöhe von 5 cm. So entspricht beispielsweise die Zieltiefe 2,5 cm der Tiefenstufe 0-5 cm. Im Zuge der Projektverlängerung um 2 Jahre wurden ergänzende Untersuchungen durchgeführt, die eine Probenahme mit 250 cm<sup>3</sup> fassenden Zylindern erforderten und die in 20 cm – 35 cm – 50 cm Tiefe erfolgten. Eine Übersicht über die Tiefen und die Mindestanzahl entnommener Bodenproben in ungestörter Form je Versuchsgasse liefert Tabelle 4. An diesen Proben wurden die Laboranalysen durchgeführt, wobei zwischen den unterschiedlichen Zylindergrößen und den damit verbundenen Messverfahren zu differenzieren ist. Diese sind ergänzend in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 4: Übersicht über Mindestanzahlen entnommener ungestörter Stechzylinderproben in jeder Versuchsgasse im Teilvorhaben 2 zur Bestimmung der bodenphysikalischen Eigenschaften, differenziert nach Ort, Tiefe und Volumen des Zylinders. Zum Teil geht die Anzahl entnommener Proben deutlich über diese Werte hinaus, da die räumliche Verteilung ebenfalls erfasst wurde.**

Zylindervolumen (cm <sup>3</sup> ) / Tiefe (cm)	Fahrspur		Unbefahrene Referenz	
	100 cm <sup>3</sup>	250 cm <sup>3</sup>	100 cm <sup>3</sup>	250 cm <sup>3</sup>
2,5	5	-	3	-
7,5	5	-	3	-
12,5	5	-	3	-
20	10	5	5	3
35	10	4	5	3
50	10	4	5	3

Die Probenahme erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten. Die **100 cm<sup>3</sup>** Proben wurden **vor** den Befahrungsversuchen auf den bereits existierenden Rückegassen entnommen. **Nach** deren Befahrung erfolgte zeitnah, möglichst innerhalb von 2 Wochen, zum Teil aber auch etwas später, die erneute Entnahme weiterer Stechzylinder (im selben Umfang) um die Änderung der bodenphysikalischen Eigenschaften quantifizieren zu können.



**Abbildung 12: Gewinnung von 100 cm<sup>3</sup> fassenden Bodenproben mittels Stechzylindern bei Versuchen im Solling, Niedersachsen.**

Die Proben mit einem Volumen von **250 cm<sup>3</sup>** wurden lediglich **nach** allen durchgeführten Experimenten mit den Fahrzeugen entnommen, da im Zuge der Projektverlängerung bereits einige Fahrspuren unter Versuchsbedingungen befahren wurden und somit der Status vor dieser Befahrung nicht mehr auf allen Fahrspuren realisierbar gewesen wäre.

Alle Stechzylinder aus den unbefahrenen Referenzparzellen wurden parallel zu den Untersuchungen über einen längeren Zeitraum des Projektes unter möglichst feuchten, aber nicht zu nassen Bodenfeuchtigkeitsbedingungen entnommen. Unter der Annahme gleichbleibender bodenphysikalischer Eigenschaften des ungestörten Waldbodens wurde so die Probenahme zu verschiedenen Witterungsbedingungen, ausgedrückt durch unterschiedliche – aber nicht zu trockene Bodenzustände, durchgeführt.

Jeder Probenahme schloss sich eine einheitliche Bearbeitung der Proben an: Abhängig vom Zylindervolumen wurden

unterschiedliche Labormethoden gewählt. Einen Überblick über die Methodik liefert Tabelle 5. Zunächst fand eine Reinigung der Stechringe an den Außenwänden statt, um anhaftendes Material zu entfernen. Die Zylinder wurden mit Deckeln beidseitig verschlossen und bis zum nächsten Bearbeitungsschritt bei 4°C in einem Kühlraum gelagert, sodass biologische Prozesse möglichst geringgehalten wurden. Auch ein Austrocknen der Proben wurde durch das Abschließen der Schnittkanten mittels Metall- oder Kunststoffdeckeln verhindert.

**Tabelle 5: Bodenphysikalische Hauptparameter und deren Messverfahren an Bodenproben unterschiedlicher Zylindergrößen des Teilvorhabens 2.**

Parameter	100 cm <sup>3</sup> Stechzylinder	250 cm <sup>3</sup> Stechzylinder
Trockenrohdichte $\rho_B$ [g cm <sup>-3</sup> ]	Ofentrocknung, 24 h bei 105°C	Ofentrocknung, 24 h bei 105°C
gesättigte hydr. Leitfähigkeit $k_s$ [cm d <sup>-1</sup> ]	Laborpermeameter (©Eijkelkamp, Giesbeek, NL)	KSAT (©Meter Group AG, München)
Retentionsverhalten $\theta(h)$ [-] Porosität $\epsilon$ [-]	Sand- und Kaolinboxen, Drucktöpfe (©Eijkelkamp, Giesbeek, NL)	HYPROP2 (©Meter Group AG, München) (Pertassek et al. 2011)
Anteil org. Substanz	-	Ofentrocknung, 6 h bei 550°C

Nach der Probenahme wurden die Proben den Laboruntersuchungen zugeführt. Die **100 cm<sup>3</sup>** fassenden Zylinderproben wurden nach zwischenzeitlicher Lagerung im Kühlraum auf deren Unterseite mit einem Filtertuch abgeschlossen. Dieses Gaze war hoch durchlässig für Wasser und erlaubt einen Kontakt zwischen Probe und wasserabführendem Substrat (Sand oder Ton). Bei diesem Bearbeitungsschritt wurden etwaige Fehlstellen (cm<sup>3</sup>) abgeschätzt und eine Volumenkorrektur durchgeführt.

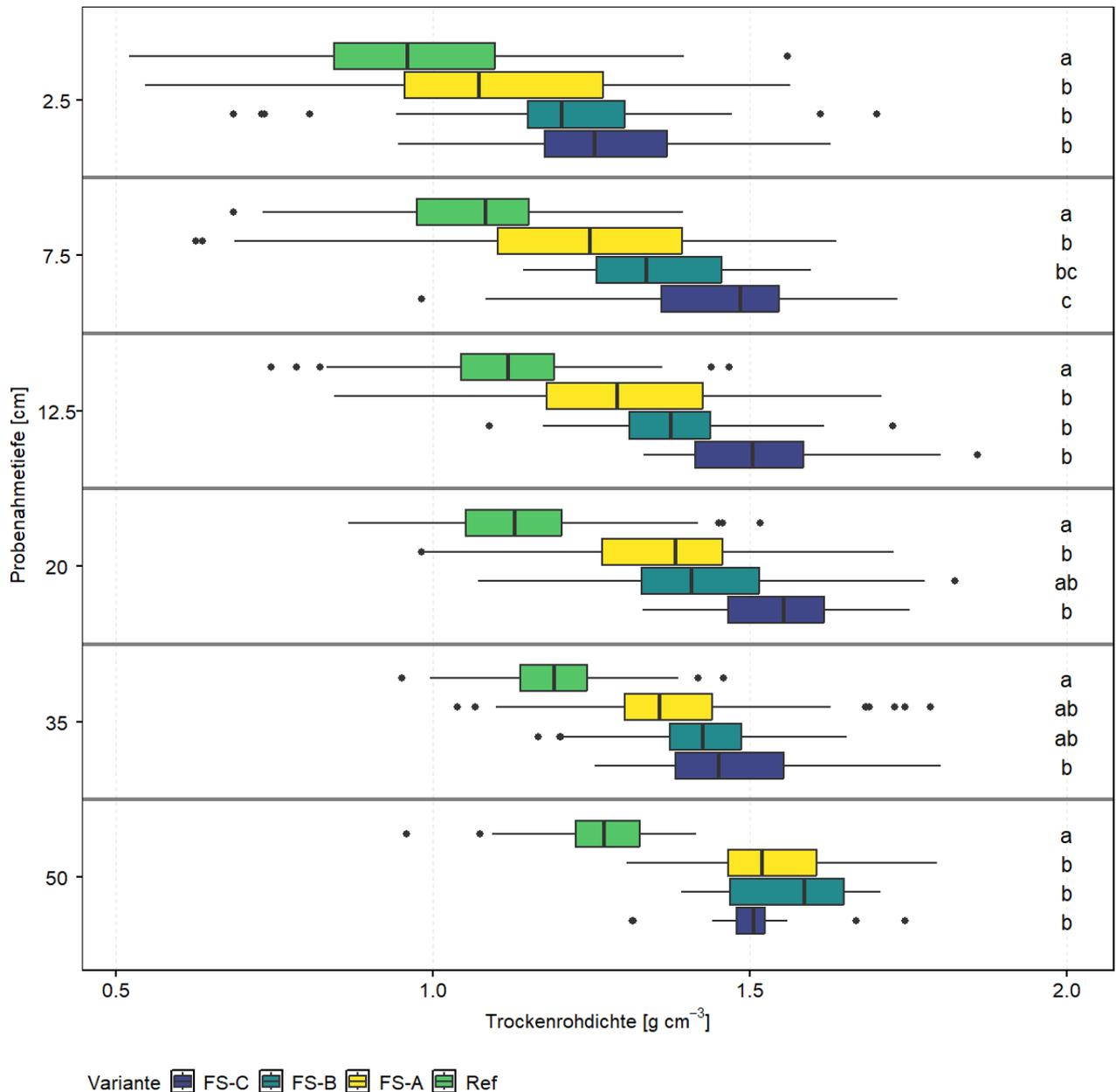
Nach Durchführung aller in Tabelle 5 genannten Messverfahren an den Bodenproben, fand die Trocknung bei 105°C und mindestens 24 h statt. Die Trockenrohdichte  $\rho_B$  (g cm<sup>-3</sup>) konnte nach  $\rho_B = \frac{m_f}{V_g}$ , mit  $m_f$  (g), der Masse der Festsubstanz des Bodens und  $V_g$  (cm<sup>3</sup>), dem gesamten Bodenvolumen, berechnet werden. Sie wurde zur Kalkulation weiterer bodenphysikalischer Kenngrößen (siehe II.2.3 und II.2.4) herangezogen.

## 2.2.2 Ergebnisse

Die primäre befahrungsinduzierte Wirkung auf die Bodenstruktur lässt sich durch eine Änderung der Trockenrohdichte (g cm<sup>-3</sup>) darstellen. In 6 Probenahmetiefen (bezogen auf den Abstand der Mineralbodenoberkante) wurden volumenbezogene Stechzylinderproben entnommen, anhand derer unter anderem die Trockenrohdichte (TRD) bestimmt wurde (Abbildung 13). Sie ist Basis der Beschreibung des bodenphysikalischen Zustands und stellt die Grundlage zur Berechnung und Ableitung weiterer Parameter wie Porosität dar. Die Daten entstammen Zylinderproben, die mit einem maximalen Abstand von 30 cm zur Reifenmitte innerhalb der Fahrspur entnommen wurden. So wurden Randeefekte der 70-90 cm breiten Fahrspur eliminiert.

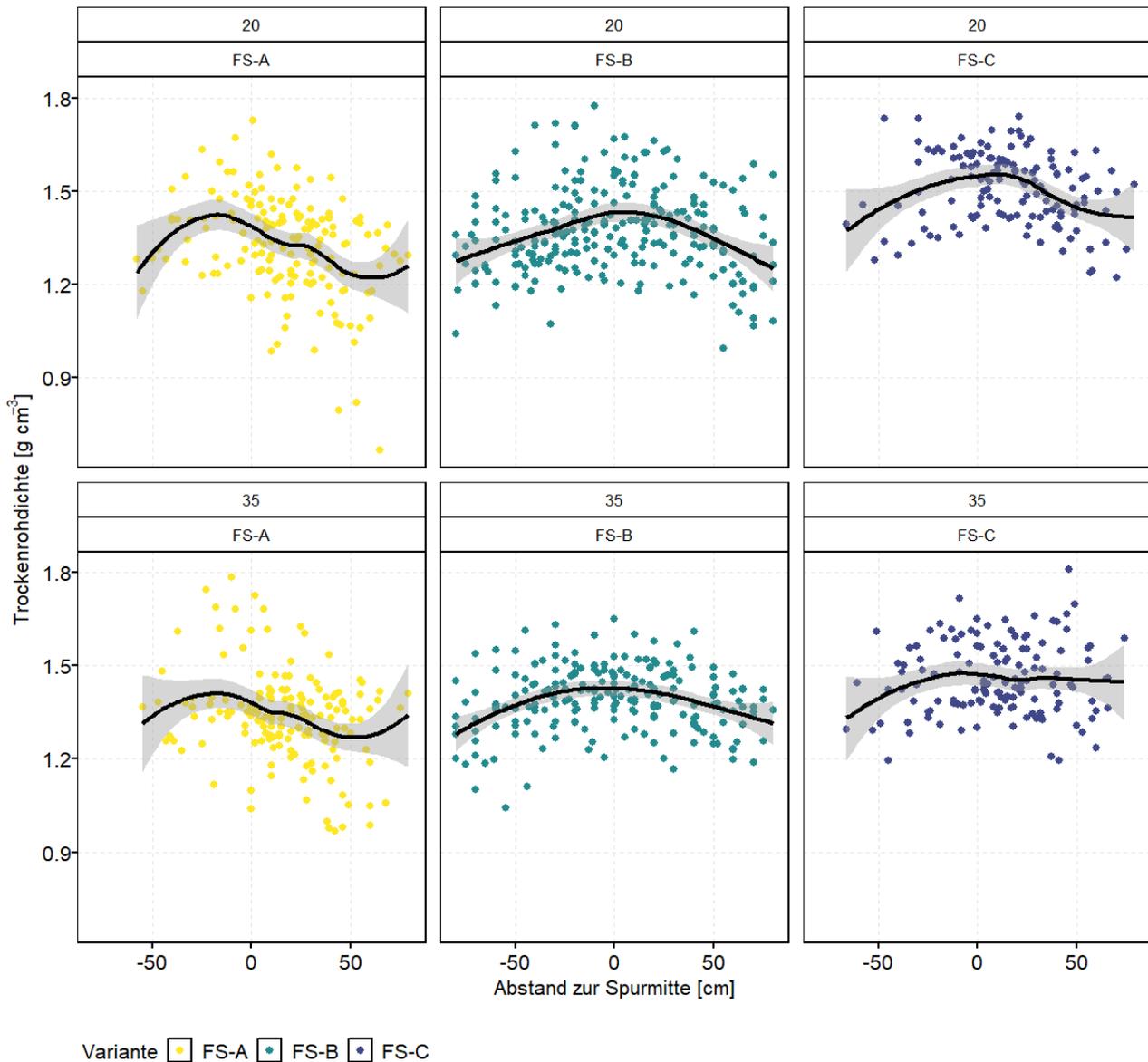
In sämtlichen Tiefenstufen treten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen *FS* und *Ref* auf. Dabei ist das Niveau der Trockenrohdichte in der unbefahrenen Referenz in allen Fällen deutlich unterhalb aller Fahrspurvarianten. Die Erhöhung der Trockenrohdichte ist mit dem Einfluss der schweren Maschinen auf den Boden der Rückegassen zu erklären. Innerhalb der untersuchten Gruppen lässt sich ein Trend erkennen: Die Mittelwerte der Trockenrohdichte nehmen von *FS-A* (0-10 cm) über *FS-B* (10-20 cm) hin zu *FS-C* (20-30 cm) in nahezu allen Tiefenstufen zu. Lediglich in 50 cm zeigt sich ein abweichendes Bild, welches sich mit dem nach unten hin abnehmendem Einfluss der Befahrung und der daraus resultierenden Abnahme der Effekte auf den Boden erklären lässt. Insgesamt streuen die Werte allerdings sehr stark, so dass sich außer zwischen Referenz und den Fahrspuren nicht immer signifikante Unterschiede absichern lassen.

Ausreißer treten in allen Tiefenstufen und Behandlungen auf. Besonders in den oberen Tiefenstufen des Bodens ist die Spannweite der Ergebnisse deutlich breiter als in tieferliegenden Bereichen. Dies ist durch einen oberflächlich hohen Anteil organischer Substanz im Boden, die bei der Befahrung z.T. auch in etwas tieferliegende Bereiche des Bodens mechanisch verlagert wurde, zu erklären. Nach oben hin abweichende Trockenrohdichten lassen sich durch z.T. in den Zylinderproben enthaltene Steine oder hohe Anteile des Bodenskeletts erklären, die aufgrund der hohen Dichte (und auch Masse) die Dichte der Gesamtprobe beeinflussen.



**Abbildung 13: Trockenrohddichte ( $\text{g cm}^{-3}$ ) in den Tiefenstufen bis 50 cm unterhalb der Mineralbodenoberkante, dargestellt als Boxplots aller Varianten *FS* und *Ref*. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Behandlungsunterschiede je Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

Während der Fokus anderer Untersuchungen oft ausschließlich auf der Darstellung der Trockenrohddichte innerhalb der Fahrspur lag, wurde im Projekt eine darüberhinausgehende Untersuchung der räumlichen Verteilung durchgeführt. Über die Breite der durch die Reifen verursachten Fahrspur hinausgehend wurden Proben unter Berücksichtigung des Abstandes zur Reifenmitte entnommen, sodass auch die Randbereiche betrachtet werden können (Abbildung 14). Die Fahrspuren selbst besitzen eine Breite von  $\sim 70$  cm, sodass die abgebildeten Werte mit einem Abstand von  $\sim > 35$  cm bzw.  $> -35$  cm außerhalb der Fahrspuren liegen. In Abbildung 14 ist für die ausgewählten Tiefenstufen 20 cm und 35 cm und alle drei Fahrspurklassen die Trockenrohddichte abgebildet, sodass sich deren kleinräumige Verteilung im Bereich der Rückegasse ableiten lässt. Der bereits dargestellte Trend der Zunahme der TRD von *FS-A* über *FS-B* zu *FS-C*, lässt sich analog zu Abbildung 13 erkennen. Darüber hinaus liegt das Maximum in allen Varianten nahe der Mitte der Fahrspur und nimmt in den Randbereichen ab. Lediglich in *FS-A* liegt das Maximum nicht direkt in der Fahrspurmitte.



**Abbildung 14:** Trockenrohddichte ( $\text{g cm}^{-3}$ ) in den ausgewählten Tiefenstufen 20 cm (oben) und 35 cm (unten) in Bezug zur Distanz zur Fahrspurmitte (cm), dargestellt als Scatterplots aller FS-Varianten mit geglättetem Mittel (schwarz) und dem 95 % Konfidenzintervall (grau).

### 2.2.3 Schlussfolgerungen

Die Erhöhung der Trockenrohddichte in den Fahrspuren lässt sich direkt durch die Einflüsse der Befahrung auf den Boden erklären. Die auf den Boden wirkenden Kräfte verändern das 3-Phasen-System aus Bodenmatrix, Luft und Wasser in deren Verhältnis. Durch die Zunahme der Festphase bei gleichzeitigem Rückgang des luft- und wassergefüllten Porenraumes tritt eine Erhöhung der Trockenrohddichte des Bodens auf. Obgleich die Zunahme der Trockenrohddichte unabhängig von der Fahrspurtiefe und in allen untersuchten Tiefenstufen stattfindet, zeigen die Untersuchungen auch einen Zusammenhang zwischen der Fahrspurtiefe und dem Ausmaß der Bodenverdichtung an (jedoch in den meisten Tiefenstufen nicht signifikant). In FS-C weicht dieser Parameter am stärksten von der Referenz ab, sodass von einer maximalen Beeinflussung der Bodenstruktur auszugehen ist. Oberflächlich ist dieser Einfluss am höchsten und nimmt mit der Tiefe hin ab. Dies lässt sich durch die „zwiebelartige“ Ausbreitung des durch die Reifen induzierten Bodendruckes auf den Boden erklären, der nach unten hin abnehmend ist. Durch die zwiebelartige Ausbreitung des Bodendruckes ist von einer Beeinflussung der Bodenstruktur auch abseits der Fahrspuren (Rand- und Mittelstreifen) auszugehen, wie mittels der Darstellung der Trockenrohddichten in Abhängigkeit vom Abstand zur Fahrspurmitte gezeigt werden konnte.

Die zuvor aufgestellten Hypothesen zum Einfluss der Fahrspurtiefe auf die Intensität der Veränderung der Trockenrohddichte können bestätigt werden. Insbesondere tiefe Fahrspuren des Typs FS-C (20-30 cm) sind den Untersuchungen zur Folge als besonders kritisch anzusehen, da diese bis (mindestens) 50 cm Bodentiefe signifikant am stärksten von Ref abweichen und somit eine tiefgreifende und intensive Bodenverdichtung anzeigen, die vermieden werden muss. Ähnliches gilt in verminderter Form auch für FS-B (10-20 cm). Aus

den Ergebnissen lässt ich jedoch auch der Schluss ziehen, dass es selbst bei schonender Bewirtschaftung mit geringen Fahrspurtiefen der Klasse FS-A (0-10 cm) zu Veränderungen der Bodenstruktur und Bodenverdichtung kommt.

### 2.3 Porenraumverteilung und nutzbare Feldkapazität (TV2)

*Forschungsfrage:* Gibt es Unterschiede im Porenraum und dessen Verteilung der untersuchten Fahrspurbehandlungen und wie hoch ist die potentiell pflanzenverfügbare Wassermenge, ausgedrückt als nutzbare Feldkapazität des Bodens?

Hypothese:

Durch die befahrungsinduzierte Verdichtung des Bodens sinkt analog das Gesamtporenvolumen. Poren werden durch die Befahrung komprimiert, wobei primär die weiten Grobporen beeinflusst und in ihrer Ausprägung verringert werden. Hinsichtlich der Verteilung des Porenraumes findet eine Verschiebung zu den Mittel- und auch Feinporen statt, die zu Lasten der Grobporen geht. Es lässt sich ein Gradient dieser Verschiebung in der Intensität von FS-A über FS-B bis hin zum Maximum bei FS-C erkennen. Als abgeleitete Größe aus dem Porenvolumen (und der Trockenrohichte) ist die Porenziffer in den Fahrspuren am geringsten, in Ref maximal ausgeprägt.

Berechnet aus der Porenraumverteilung und dem Anteil einzelner Porenraumklassen wird in den Fahrspuren die Luftkapazität (LK) deutlich, die nutzbare Feldkapazität (nFK) leicht reduziert sein, wobei der Gradient ebenfalls von FS-A über FS-B nach FS-C verläuft und dort das Minimum erreicht. Die den Pflanzen potentiell verfügbare Wassermenge ist aufgrund der niedrigen nFK in FS-C deutlich reduziert. Selbiges gilt für die potentielle Sauerstoffversorgung, ausgedrückt durch die LK.

#### 2.3.1 Material & Methoden

Der Porenraum des Bodens stellt den wasser- oder luftgefüllten Raum dar, der elementar für die Funktionalität des Bodens ist. Dort finden Transportprozesse statt, die wesentliche Systemeigenschaften darstellen. Der Porenraum lässt sich als Gesamtporenvolumen und als Verteilungsfunktion, abgeleitet aus der Retentionskurve für Wasser, darstellen. Aus der Zusammensetzung der Porenräume kann abhängig von der Porengröße und den damit verbundenen Bindungskräften des Wassers in diesen Poren die pflanzenverfügbare Wassermenge in Form der nutzbaren Feldkapazität (nFK) berechnet werden. Sie stellt die gebundene Wassermenge dar, die der Boden im Bereich der Mittelporen zwischen pF-Werten von 1,8 und 4,2 speichern kann. Sie wird als Differenz des Wassergehaltes beim permanenten Welkepunkt und der Feldkapazität definiert. Aufgrund der einfachen Entwässerung der weiten Grobporen (bis pF 1,8) ist die LK ein Maß für die potentielle Sauerstoffverfügung des Bodens für Pflanzen und Bodenlebewesen.

Die nutzbare Feldkapazität wurde anhand ungestörter, volumenbezogenen Zylinderproben (Tabelle 5) ermittelt, die in einer Kette aus Laborversuchen auch zur Bestimmung weiterer Laborparameter genutzt wurden (Tabelle 4). Die einzelnen Laborexperimente gliedern sich in ihrem Bearbeitungsablauf in diverse Zwischenschritte auf, die nicht in Gänze aufgeführt werden. Im Folgenden werden einzelne Verfahren beschrieben und die verwendeten Gerätschaften genannt. Die Einhaltung standardisierter Verfahren nach Vorgaben der Hersteller wurden stets beachtet.

Zunächst wurden die 100 cm<sup>3</sup> fassenden Proben in Sand gefüllten Boxen platziert und vollständig mit Wasser aufgesättigt. Dieser Prozess nahm eine Woche in Anspruch. Anschließend wurden die Proben schrittweise in Sandboxen an einer hängenden Wassersäule auf ein definiertes Potential entwässert (Tabelle 6). Bei jeder Stufe wurde die Masse der Gesamtprobe inkl. Zylinder ermittelt. Anschließend erfolgte die weitere Entwässerung in Kaolinboxen, die mittels Unterdruckpumpe betrieben wurden. In den Sand- und Kaolinboxen wurden die strukturgeprägten Grobporen entwässert. Die substratgeprägten Feinporen wurden in den Drucktöpfen mittels Überdrucks entwässert, zudem wurde als Zwischenschritt die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (II.2.4) durchgeführt.

Als nächster Laborversuch folgte die weitere schrittweise Entwässerung der Bodenproben in Drucktöpfen. Zur Minderung der Dauer bis zur Gleichgewichtseinstellung zwischen Bodenprobe und poröser Keramik, wurden die Zylinderproben zerstört und in Teilproben unterteilt. Anhand dieser wurden je 2 Proben je Drucktopf und Druckstufe auf das gewünschte Potential entwässert. Dadurch konnte bei jeder Stufe der gravimetrische Wassergehalt ermittelt werden. Die Zielgröße des volumetrischen Wassergehalts  $\theta$  benötigt als ergänzende Information noch die Trockenrohichte der Ursprungsprobe. Dieser Wert wurde anhand einer weiteren Teilprobe (bei der Zerstörung der bis dato ungestörten Zylinderprobe) ermittelt, die im Ofen getrocknet wurde. Anhand der Masse und des gravimetrischen Wassergehalts der Teilprobe kann die Trockenrohichte der gesamten Zylinderprobe errechnet werden. Über diese Teilschritte konnte der Wassergehalt bei verschiedenen Entwässerungsschritten berechnet werden. Eine Übersicht über die gewählten Potentiale, ausgedrückt als pF-Werte, und das verwendete Verfahren, liefert Tabelle 6. Diese Werte bilden die Stützstellen der Retentionskurven, die der weiteren Auswertung zugeführt wurden. Aus diesen konnten direkte Kennwerte

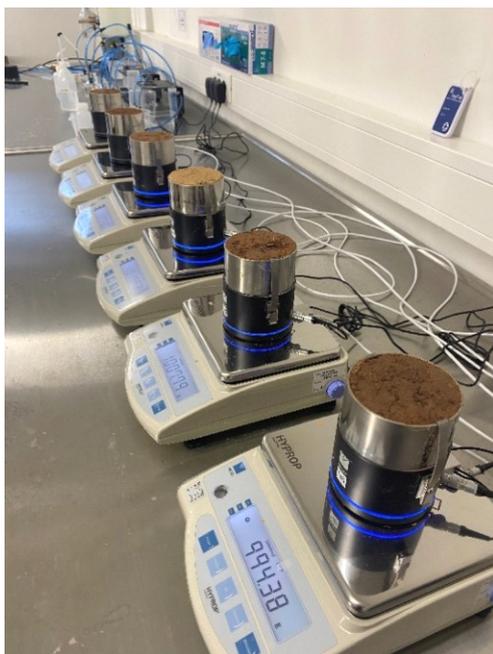
wie Luftkapazität, (nutzbare) Feldkapazität, Totwasser, Gesamtporenvolumen und Porenbereiche berechnet werden.

**Tabelle 6: Gewählte pF-Werte zur Charakterisierung des Retentionsverhaltens der Böden und die Verfahren zur Bestimmung dieser.**

pF	Bodenwasserspannung	Verfahren
1,0	-10 hPa	Sandbox
1,5	-32 hPa	
1,8	-63 hPa	
2,2	-158 hPa	Kaolinbox
2,5	-316 hPa	
3,0	-1000 hPa	Drucktopf
3,5	-3162 hPa	
4,2	-15849 hPa	

Die **250 cm<sup>3</sup>** fassenden Zylinderproben wurden mittels anderer Laborverfahren bearbeitet aber identische Parameter (siehe Tabelle 5) bestimmt: Zunächst wurde ebenfalls eine Volumenkorrektur durch Ermittlung etwaiger Fehlstellen durchgeführt. Anschließend wurden die Proben unterseitig durch ein wasserdurchgängiges Filtertuch verschlossen und auf einer durchlässigen gelochten Kunststoffplatte zur Aufsättigung im Wasserbad platziert. Der Wasserstand wurde nun sukzessive angehoben, um die Proben in den Zustand nahe der vollständigen Sättigung zu bringen.

Anschließend erfolgte ebenfalls die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (II.2.4). Nach Abschluss der Messung wurden die Proben kopfüber im Wasserbad platziert und für die Verdunstungsversuche im HYPROP vorbereitet: Mittels eines Tensiometerschaftbohrers wurden unter Zuhilfenahme der Bohrschablone zwei Bohrungen definierter Länge durchgeführt. Anschließend wurde der Messkopf des HYPROP kopfüber auf den Zylinder positioniert, sodass die beiden Tensiometer unterschiedlicher Länge Platz in den beiden Bohrungen fassen konnten und ein guter Kontakt zwischen Bodenmatrix und Tensiometerkeramik gewährleistet war. Anschließend wurden die Proben gedreht und mit dem Messkopf auf einer Waage platziert („multi scale mode“). Über die gesamte Messperiode zeichnete die Software nun sowohl die Saugspannung der Tensiometer (hPa) und die Masse (g) auf der Waage auf (Abbildung 15). Sobald der tensiometerspezifische Lufteintrittspunkt (bei ca. 8800 hPa) erreicht wurde, konnte die Messung beendet werden.



**Abbildung 15: Verdunstungsversuche an 250 cm<sup>3</sup> Stechzylinderproben und dem HYPROP2 Messgerät (©Meter Group AG).**

Im Trockenofen erfolgte nun die Bestimmung der Trockenmasse der Probe und daraus ableitend die Trockenrohdichte des Bodens. Danach konnten weitere Eigenschaften wie der Anteil organischer Substanz und der Skelettgehalt bestimmt werden: Jede Probe wurde zerkleinert, gemörsert und mittels eines 2000 µm Sieb der Feinboden vom Bodenskelett getrennt. Aus der Masse des Siebrückstands wurde der Skelettgehalt berechnet, der Siebdurchgang in Form des Feinbodens wurde zur Bestimmung der org. Substanz genutzt. Anhand zweier Teilproben, die mindestens 6 h bei 550°C verglüht wurden, konnte der Masseverlust und daraus der Anteil organischer Kohlenstoffverbindungen der Teil- und Gesamtprobe ermittelt werden.

#### Auswertung

Die Bearbeitung der Rohdaten aus den Versuchen der Sand- und Tonboxen sowie der Drucktöpfe fand zunächst in einer Excel-Tabelle statt, in der die Labordaten zusammengeführt wurden. Dieser Datensatz wurde mit Hilfe von *RStudio* weitergehend bearbeitet. Zunächst wurden nicht plausible oder unlogische Werte in Form von Ausreißern entfernt, die physikalische Grenzen über- oder unterschritten. Mittels des Pakets *dplyr* wurden Daten auf Zielebene (Stratum, Beprobungstiefe, etc.) zusammengeführt und Mittelwerte und Mediane berechnet. Als Filter wurde der Abstand des Entnahmeortes jedes Zylinders zur Fahrspurmitte angewendet. Proben, die einen Abstand von

maximal 30 cm zur Reifenmitte aufweisen, wurden als Proben „aus der Fahrspur“ betrachtet. Weiter entfernt genommene Proben wurden später ebenfalls berücksichtigt, aber lediglich bei der räumlichen Verteilung der Parameter.

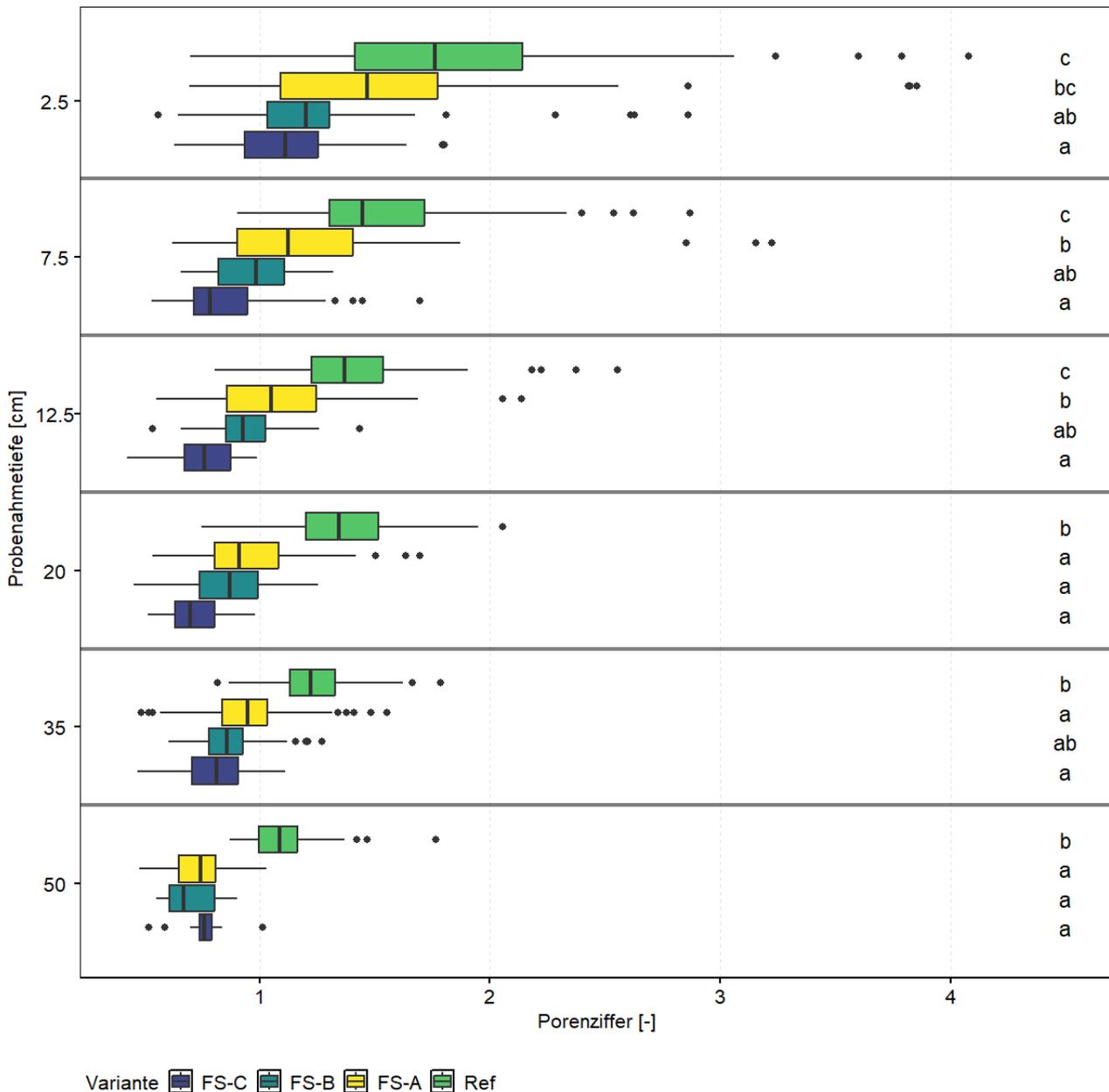
Die Auswertung der HYPROP Messungen erfolgte mittels der Software HYPROP-Fit (Pertassek et al. 2011). Nach Eingabe der Trockenmasse des Bodens wurde mittels inverser Modellierung das Modell an den Messdatensatz angepasst. Dabei fand das klassische van-Genuchten Modell Anwendung. Aus diesem Schritt wurden nicht nur modellspezifische Parameter abgeleitet, sondern auch ausgewählte Stützstellen der Retentionskurve ermittelt. Aus diesen konnte der Wassergehalt bei definierten pF-Werten ausgegeben werden, aus denen sich analog zu den bereits beschriebenen Versuchen Kennwerte ableiten ließen. Über den Export der Kennwerte in einer Excel-Datei konnten diese dem Datensatz aller Messungen zugeführt werden.

Die statistische Auswertung aller Ergebnisse erfolgte mittels Anwendung eines generalisierten gemischten linearen Modells in *RStudio* (im Paket *lme4*) mit der Funktion *glmer* (GLMM). Das Modell besteht aus 2 Termen, die einen *fixed effect* und einen *random effect* beinhalten. Bei den *fixed effects* wurden die Behandlung und der Horizont berücksichtigt. Bei den *random effects* die Verkettung aus Versuchsgasse und Behandlung sowie die Horizonte. Die Versuchsdaten wurden in logarithmierter Form in einer Gammaverteilung im Modell verarbeitet und die Regression, sowie die Residuen berechnet. Aus der Differenz zwischen *FS* und *Ref* wurden mittels des Pakets *emmeans* die Abweichungen auf Signifikanz getestet und gruppenweise Buchstaben zugeordnet (Tukey-Test).

### 2.3.2 Ergebnisse

Der Porenraum des Bodens ist für viele bodenfunktionale Eigenschaften relevant und lässt sich durch dessen Anteil in Form der Porosität (im Bereich von 0 bis 1) beschreiben. In Fragen der Bodenverdichtung kann die Porenziffer (Abbildung 16) mit Werten zwischen 0 und unendlich analog dazu Verwendung finden, da sie den Volumenanteil der Poren in Bezug zum Feststoffvolumen setzt, eine dimensionslose Größe ist und bei Änderungen des Gefüges, wie z.B. bei Bodenverdichtung, der Porosität vorzuziehen ist.

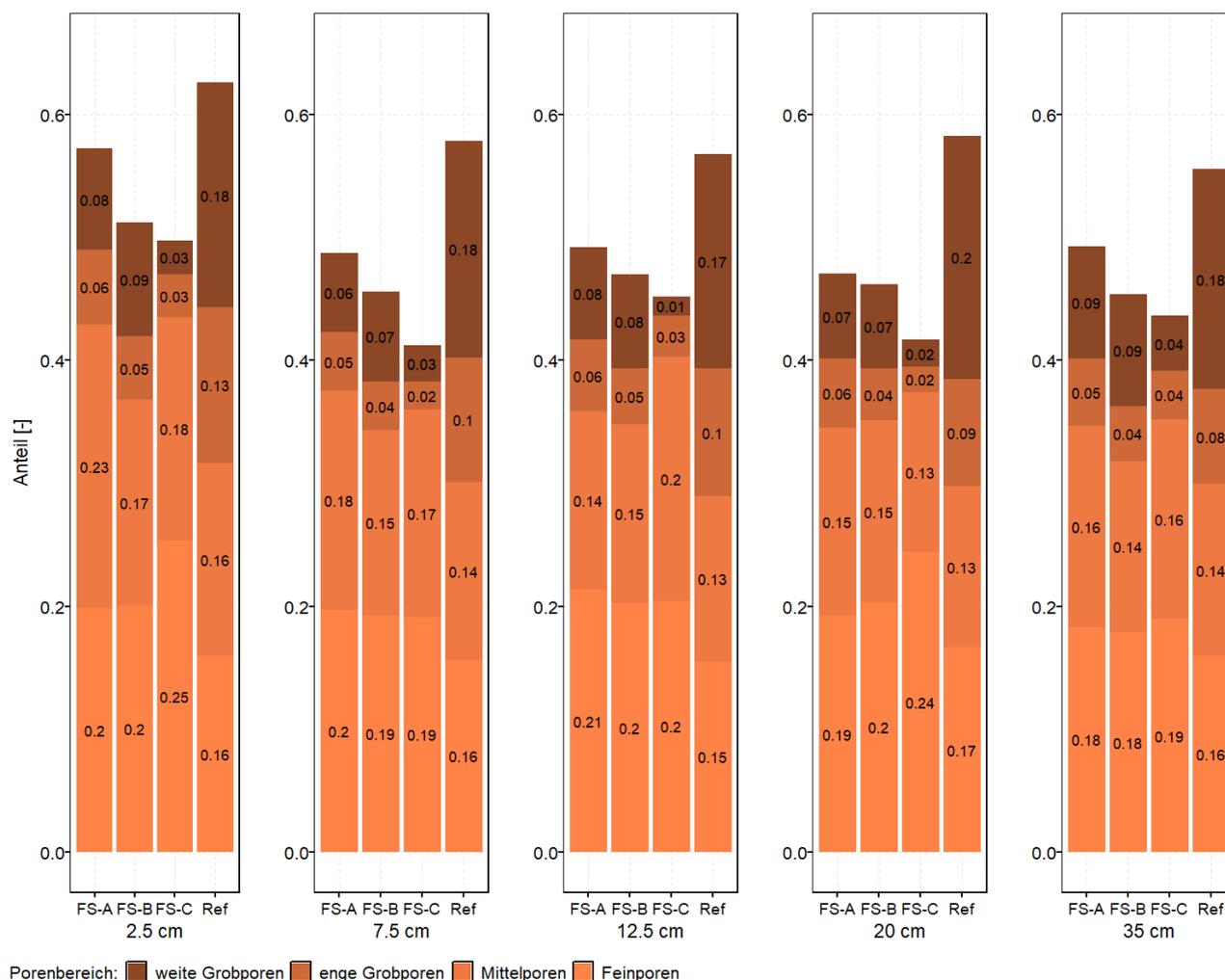
Die Ergebnisse liefern ein ähnliches Bild wie das der Trockenrohddichte. Die Unterschiede zwischen den Fahrspuren sind geringer als die der Fahrspuren zur Referenz. Letztere weicht deutlich von diesen ab und beinhaltet einen größeren Anteil luft- oder wassergefüllter Poren. Zwischen den befahrenen Parzellen tritt ebenfalls ein Gradient auf: Je tiefer die Fahrspur, desto ausgeprägter ist der Verlust an Poren. Dieser Zusammenhang ist jedoch nur in den Tiefenstufen 7,5 cm und 12,5 cm für den Vergleich zwischen *FS-A* und *FS-C* signifikant. Mit zunehmender Tiefe nimmt dieser Effekt ab, da die Lastübertragung der Fahrzeuge nicht mehr in vollem Maße bis in 50 cm Tiefe reicht und zu einer Abmilderung führt.



**Abbildung 16: Dimensionslose Porenziffer der Proben aus den Tiefen bis 50 cm der Fahrspuren FS-A (0-10 cm), FS-B (10-20 cm) und FS-C (20-30 cm) sowie der unbefahrenen Referenz Ref. Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben (rechts) dargestellt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

Neben dem Anteil der Poren lässt sich auch deren Größe und daraus ableitend deren Verteilung darstellen. Üblicherweise findet dies basierend auf den Retentionskurven jeder Einzelmessung in Form einer Kategorisierung statt, bei der die Poren gruppiert und vergleichend dargestellt werden (Abbildung 17). Dabei können die Proben in die Bereiche weite Grobporen (wGp), enge Grobporen (eGp), Mittelporen (Mp) und Feinporen (Fp) unterteilt werden. Die Höhe der gestapelten Balken entspricht der mittleren Porosität der Variante. Die mittlere Porosität nimmt im Trend mit zunehmender Untersuchungstiefe im Boden ab, da der Boden dichter gelagert und weniger Raum für Poren vorhanden ist. Zwischen den Behandlungen stehen die Unterschiede zur Referenz deutlich hervor: Die Porosität in Ref ist in Summe deutlich höher, sodass auch die Einzelfractionen erhöht sind. In den Fahrspuren hingegen ist besonders ein Verlust der wGp und eGp zu beobachten, die beispielsweise in 12,5 cm und 20 cm Tiefe nur noch ein Zehntel des ursprünglichen Anteils in FS-C annehmen. Beachtlich ist, dass es zu einer Zunahme der Mittel- und auch Feinporen kommt, sodass eine Verschiebung der Porenraumverteilung stattgefunden hat. In 2,5 cm Tiefe ist die Porosität aller Fahrspuren reduziert, doch weicht FS-A auf den ersten Blick nur leicht ab. Die differenzierte Betrachtung der Porenraumzusammensetzung in dieser Tiefe liefert ein exakteres Bild: die weiten Grobporen sind um 10 % reduziert und die kleineren Porenbereiche sind erhöht. Auch die engen Grobporen wurden in ihrem Anteil mehr als halbiert. Die Grobporen in FS-B ähneln sehr stark derer der Behandlung FS-A, weichen aber stark von FS-C ab. Dies gilt vor allem für die die weiten Grobporen, in geringerem Maße auch für die engen Grobporen. In den Tiefenstufen ab 7,5 cm fällt ein ähnliches Bild auf: Während die Grobporen aller Fahrspuren

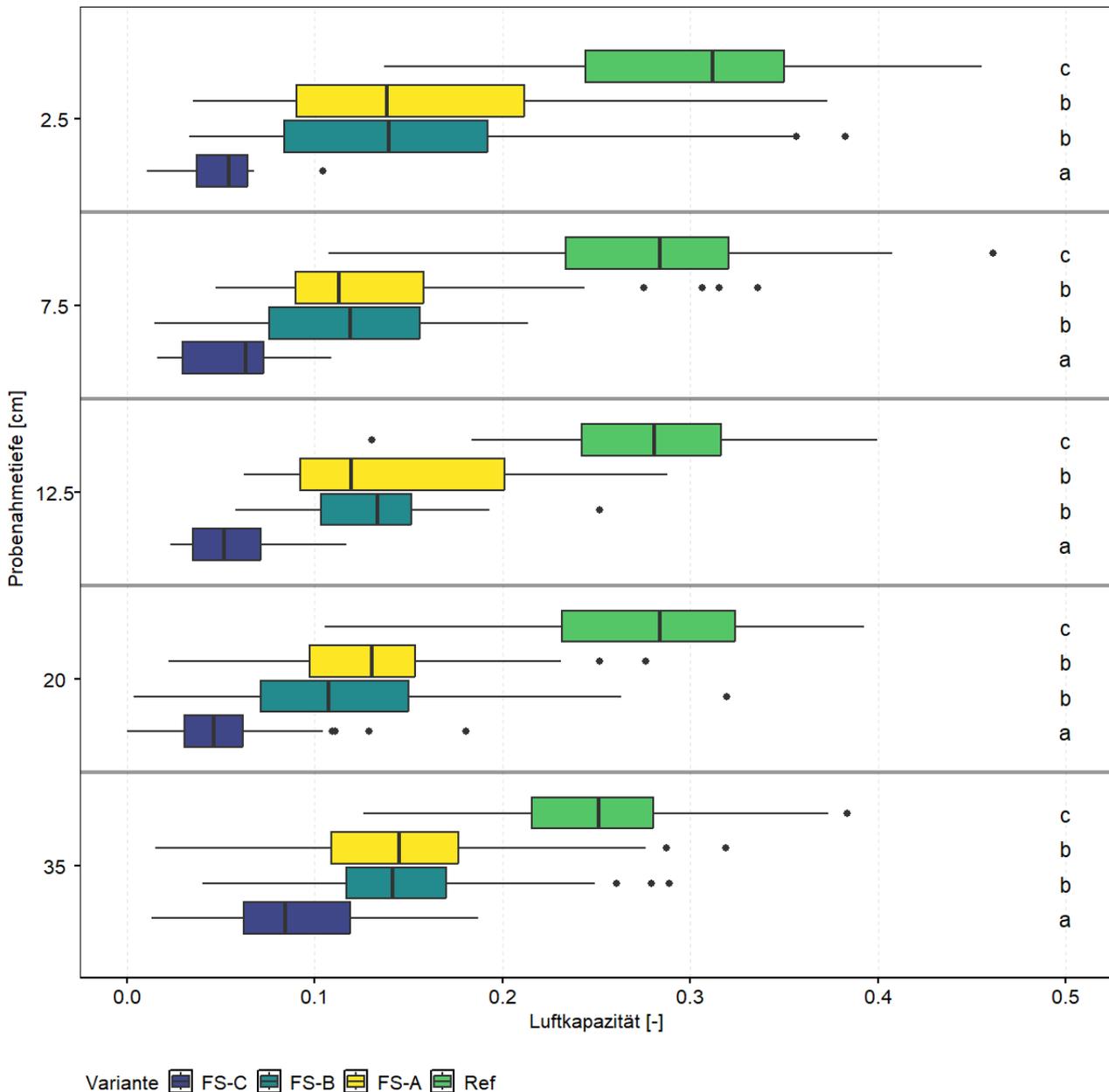
im Vergleich zu *Ref* reduziert sind, ist dieser Effekt in *FS-C* am deutlichsten ausgeprägt. Die Feinporen unterscheiden sich nicht signifikant und können – mit Ausnahme der Tiefenstufen 2,5 cm und 20 cm – als gering bis nicht verändert angesehen werden.



**Abbildung 17: Porenraumverteilung der Klassen weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen und Feinporen, abgeleitet aus den Retentionsdaten der ungestörten Bodenproben aus den Tiefen 2,5 cm – 7,5 cm– 12,5 cm– 20 cm– 35 cm.**

Die Luftkapazität (Abbildung 18) stellt das bei Feldkapazität ( $p_F 1,8$ ) mit Luft gefüllte Porenvolumen dar. Es lässt Rückschlüsse auf die potentielle Sauerstoffversorgung der Pflanzen zu. Sie wird als dimensionsloser Anteil des Porenwassers dargestellt und kann unter Zuhilfenahme von Horizontmächtigkeiten in mm oder auch in  $l\ m^{-2}$  umgerechnet werden. Aufgrund unterschiedlicher Mächtigkeit des lössgeprägten Bodens der Versuchsfelder und des durchgeführten Vergleichs verschiedener Tiefenstufen, ist im Folgenden der dimensionslose Anteil dargestellt.

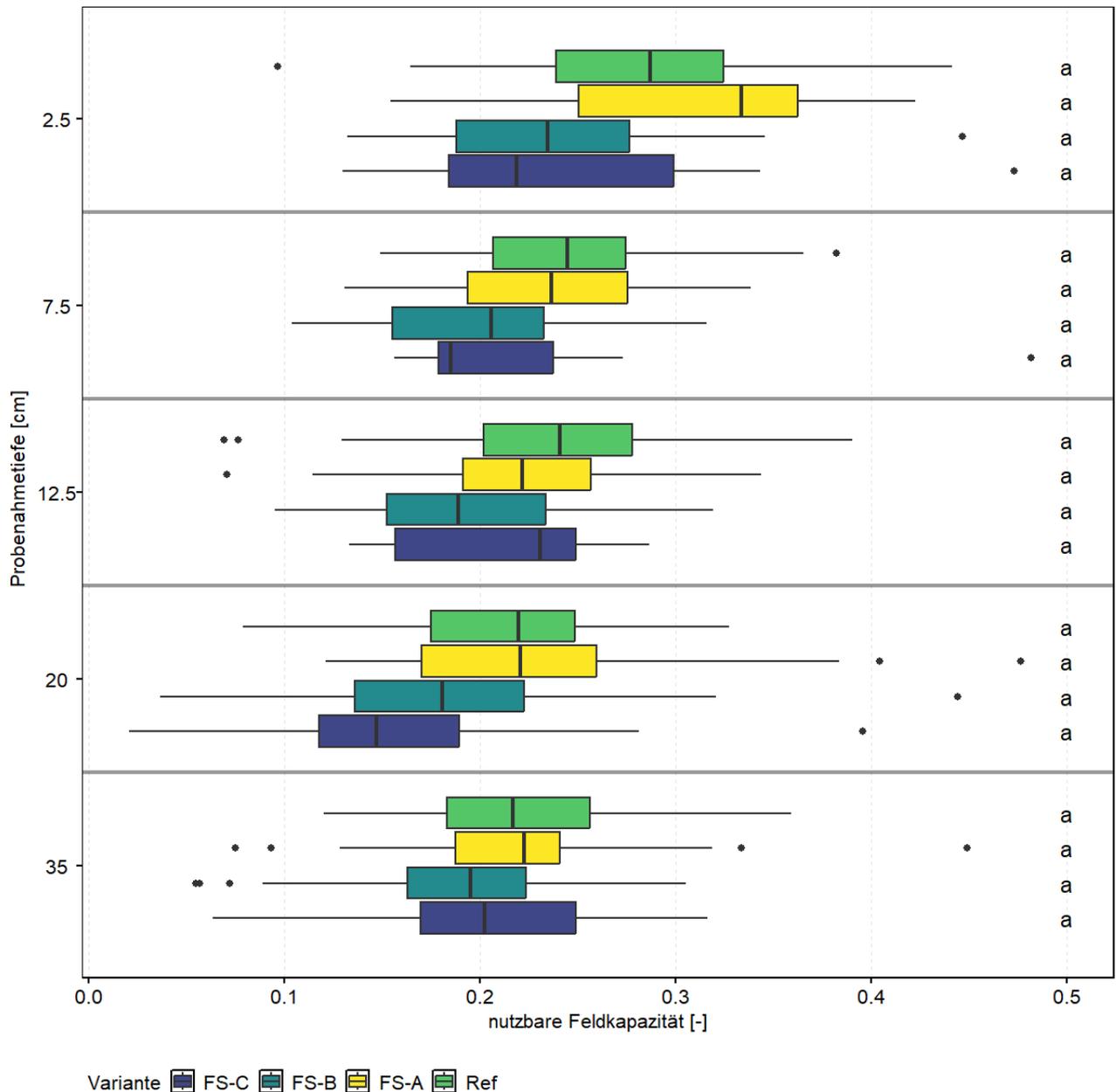
Der Vergleich der Ergebnisse zeigt deutliche Abweichungen der Luftkapazität von *FS* und *Ref* auf. Während diese im Mittel bei allen *Ref* Flächen über 0,25 liegt, schwankt die mittlere Luftkapazität von *FS* zwischen 0,05 und 0,15. Mit den geringsten Werten von unter 0,1 weicht *FS-C* (in allen Tiefenstufen) statistisch signifikant von *FS-A* und *FS-B* ab. Letztere Gruppen unterscheiden sich im Mittel in keiner Tiefenstufe.



**Abbildung 18: Anteil der Luftkapazität als dimensionslose Größe am Gesamtporenvolumen der Fahrspurböden und der Referenzparzellen bis 35 cm. Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben angezeigt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

Die nFK stellt als Kennwert die pflanzenverfügbare Menge des im Boden gebundenen Wassers dar und wird analog zur Luftkapazität als dimensionsloser Anteil dargestellt (Abbildung 19). Dabei wird das im Boden gebundene Wasser bei nFK in den Mittelporen und den engen Grobporen des Bodens gehalten und lässt sich durch den Wassergehalt des Bodens zwischen den pF-Werten 1,8 und 4,2, also der Differenz aus dem Wassergehalt bei den Kennwerten *Feldkapazität* und *Permanenter Welkepunkt*, berechnen. Weiterhin ist zu beachten, dass der Standort grundwasserfern ist. Bei den dargestellten Daten wurden analog zu den bereits gezeigten Ergebnissen lediglich Proben innerhalb der Fahrspuren (mit einem maximalen Abstand von 30 cm von der Reifenmitte) betrachtet. Die in den Randbereichen entnommenen Proben mit einem Abstand von mehr als 30 cm zur Reifenmitte wurden aufgrund des Fokus auf die Fahrspuren herausgefiltert.

Da die nFK eng an die Porosität und die Verteilung der Poren angelehnt ist, lassen sich damit zusammenhängende Effekte beobachten: Die Fahrspuren *FS-B* und *FS-C* weisen in allen Tiefenstufen (mit Ausnahme der Tiefenstufe 12,5 cm von Behandlung *FS-C*) eine leicht reduzierte nFK auf, ohne aber eine statistisch signifikante Unterschiede aufzuzeigen. Dieser Einfluss ist nach unten hin abnehmend und die Differenzen zwischen *FS-B/FS-C* und *FS-A/Ref* werden zunehmend geringer.



**Abbildung 19:** Anteil der nutzbaren Feldkapazität als dimensionslose Größe am Gesamtporenvolumen der Fahrspurböden und der Referenzparzellen bis 35 cm Tiefe. Signifikante Unterschiede je Tiefenstufe werden durch verschiedene Buchstaben angezeigt (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).

### 2.3.3 Schlussfolgerungen

Die Lasteinträge der forstlichen Fahrzeuge haben sich in den Fahrspuren direkt auf den Porenraum und dessen Verteilung ausgewirkt. Während primär weite und enge Grobproben komprimiert und somit zu Poren eines kleineren Durchmessers verschoben wurden, werden die Feinporen als wenig veränderlich angenommen. Dies deckt sich in weiten Teilen mit den Versuchsergebnissen. In den unbefahrenen Böden von *Ref* ist der Porenraum dagegen vielfältig und wenig uniform und es liegen dort breite Spannweiten an Porendurchmessern vor. Aus den befahrungsbedingten Verkleinerungen des Bodenporenraumes und den Auswirkungen auf die Porengrößenverteilung in den Fahrspuren, ergeben sich Verringerungen der pflanzenverfügbaren Wassermengen und es lassen sich Veränderungen des Bodenluft- und Wasserhaushaltes ableiten. Andererseits ist das Wasser in den kleineren Bodenporen stärker gebunden, wodurch innerhalb der Fahrspuren vermehrt mit stagnierendem Bodenwasser zu rechnen ist. Hieraus lässt sich im Bereich der Fahrspuren auch die Tendenz zu einer gewissen Standortveränderung in Richtung Pseudovergleyung erwarten, wie durch das vermehrte Vorkommen von Binsen und Seggen in den Fahrspurbereichen untermauert wird. Dies beeinflusst auch die Standortseignung für viele Forstgehölze. Des Weiteren ist ausgehend von den Veränderungen im Bereich des Bodenporenraumes zu berücksichtigen, dass negative Rückkopplungen zwischen vermehrt stagnierendem Bodenwasser und spurbildungsarmer Befahrbarkeit bestehen, da der Bodenwassergehalt eine wichtige Einflussgröße für den Spurbildungsprozess ist.

Hinsichtlich der Bodenfunktionalität sind zwei Dinge von besonderer Relevanz: Die deutliche Abnahme der Grobporen in FS-C (in allen Tiefenstufen) und die aus diesem Grund dort reduzierte Luftkapazität. Dadurch ist in diesen Fahrspuren das Vermögen der Wasserinfiltration und des Transports von Bodenluft deutlich vermindert. Gleichzeitig ist das potentiell pflanzenverfügbare Wasser nur leicht reduziert, da eine Porenraumverschiebung zu Lasten der Grobporen und zu Gunsten der Mittel- und Feinporen stattfindet. Die Variante FS-C ist aus den genannten Gesichtspunkten als besonders kritisch zu beurteilen, wohingegen FS-A (0-10 cm) und FS-B (10-20 cm) deutlich näher an der Referenz liegen. Dennoch handelt es sich um eine Beeinträchtigung dieser Bodeneigenschaften. Die Abnahme des Gesamtporenvolumens ist primär durch die Zerstörung der Grobporen bei der Befahrung begründet, die in FS-C zu Bedingungen führen, die sich ungünstig auf die Funktionsfähigkeit des Bodens auswirken -.

## 2.4 Gesättigte und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (TV2)

Forschungsfrage: Welche Auswirkungen haben die Veränderungen des strukturgeprägten Porenraumes auf das Transportverhalten von Wasser und Bodenluft und welche Unterschiede gibt es zwischen den Fahrspurtiefen? Wie ist die kleinräumige Verteilung?

Hypothese: Durch die Kompaktion des Bodens und die Zunahme der Trockenrohichte wird der Porenraum stark verändert. Der Anteil des sekundären Porenraumes ist deutlich reduziert und die Porenkontinuität eingeschränkt. Das Austauschvermögen von Bodenluft und Wasser ist im Falle des feinkörnigen Bodens deutlich beeinträchtigt und lässt sich durch die reduzierten Kennwerte der hydraulischen Leitfähigkeit im gesättigten und ungesättigten Zustand überprüfen.

### 2.4.1 Material & Methoden

Die Wasserleitfähigkeit im Boden kann im nahezu gesättigten Zustand und im teilgesättigten Zustand gemessen werden. Während ersteres in Laborversuchen an ungestörten Bodenproben durchgeführt wird, wird die ungesättigte Wasserleitfähigkeit *in situ* gemessen.

Bei den Labormessungen erfolgte eine (erneute) Aufsättigung der Proben mit vorher entgastem Wasser, nachdem diese die Arbeitsschritte in den Sand- und Kaolinboxen passiert hatten (siehe II.2.3.1). Dieses Wasser wurde mindestens 10 Minuten unter starker Blasenbildung zum Sieden gebracht und anschließend abgekühlt, bis es in die Wanne zur Aufsättigung überführt wurde. Als nächster Schritt folgte das Einspannen der gesättigten Zylinder in die kF-Apparatur und die Messung bei einem konstanten Überstau „constant head experiment“. Die Höhe des anliegenden Gradienten wurde möglichst klein gewählt und lag bei unter 1 cm. In Glasbüretten wurde das durch die Probe perkolierende Wasser aufgefangen und in regelmäßigen Zeitschritten der Füllstand abgelesen. Aus dem Zusammenhang kann unter Zuhilfenahme der Zylindergeometrie, der Wassertemperatur und des Gradienten die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit berechnet werden.

Als *in situ* Parameter wurde die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bestimmt. Zustände vollständiger Sättigung können nur unter Laborbedingungen annähernd erreicht werden. Unter natürlichen Bedingungen wird daher die ungesättigte Leitfähigkeit herangezogen, die als Funktion des Wassergehaltes und des Matrixpotentials des Bodens nicht linear verläuft. Aus diesem Grund ist sie abhängig vom aktuellen Wassergehalt des Bodens. Aus diesem Grund erfolgte die Messung zu verschiedenen Zeitpunkten über den Projektverlauf. So sollten von niedrigen bis hin zu sehr hohen Wassergehalten alle Zustände erfasst werden, für die eine mittlere ungesättigte Wasserleitfähigkeit kalkuliert wurde. Messungen des Wassergehalts haben aber gezeigt, dass die Fahrspuren im jahreszeitlichen Verlauf deutlich feuchter waren, sodass die Bemühungen, in den Behandlungen Messungen der ungesättigten Wasserleitfähigkeit bei vergleichbaren Wassergehalten durchzuführen, nur bedingt erreicht wurden. Sehr trockene Zustände konnten natürlich bedingt in den Fahrspuren nicht untersucht werden. Die Messungen wurden mittels MiniDisc-Infiltrometern (Meter Group AG) in den Tiefen 20 cm, 35 cm und 50 cm durchgeführt. Einen Überblick über die Anzahl der Parallelmessungen liefert Tabelle 7.

**Tabelle 7: Anzahl Einzelmessungen je Tiefenstufe mittels MiniDisc-Infiltrometer im TV2.**

Tiefe (cm)	FS	Ref
20	5	3
35	4	3
50	4	3

### Auswertung:

Die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit wurde durch eine Auswertung in Excel durchgeführt. Sobald ein konstanter Fluss innerhalb der Probe eingestellt war, konnte mittels linearer Regression im Datensatz die Flussrate unter Zuhilfenahme der Zylindergeometrie bestimmt werden. Als Ergebnis konnte die Wasserleitfähigkeit in Zentimeter je Tag bestimmt werden. Alle Ergebnisse wurden in Excel zusammengefasst und mittels *RStudio* dem Gesamtdatensatz hinzugefügt. Die Auswertung fand dort analog zum bereits beschriebenen Vorgang der anderen Parameter aus TV2 statt und wurde statistisch mittels eines gemischten linearen Modells ausgewertet. Daran anschließend konnte durch einen Tukey-Test der paarweise Vergleich auf Signifikanz untersucht werden.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgte in Form von Punktwolken auf einer x-y-Achse. Der geglättete Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall wurden mittels des *ggplot2*-Pakets und der Funktion *geom\_smooth* und dem Modell „*loess*“ berechnet und dargestellt.

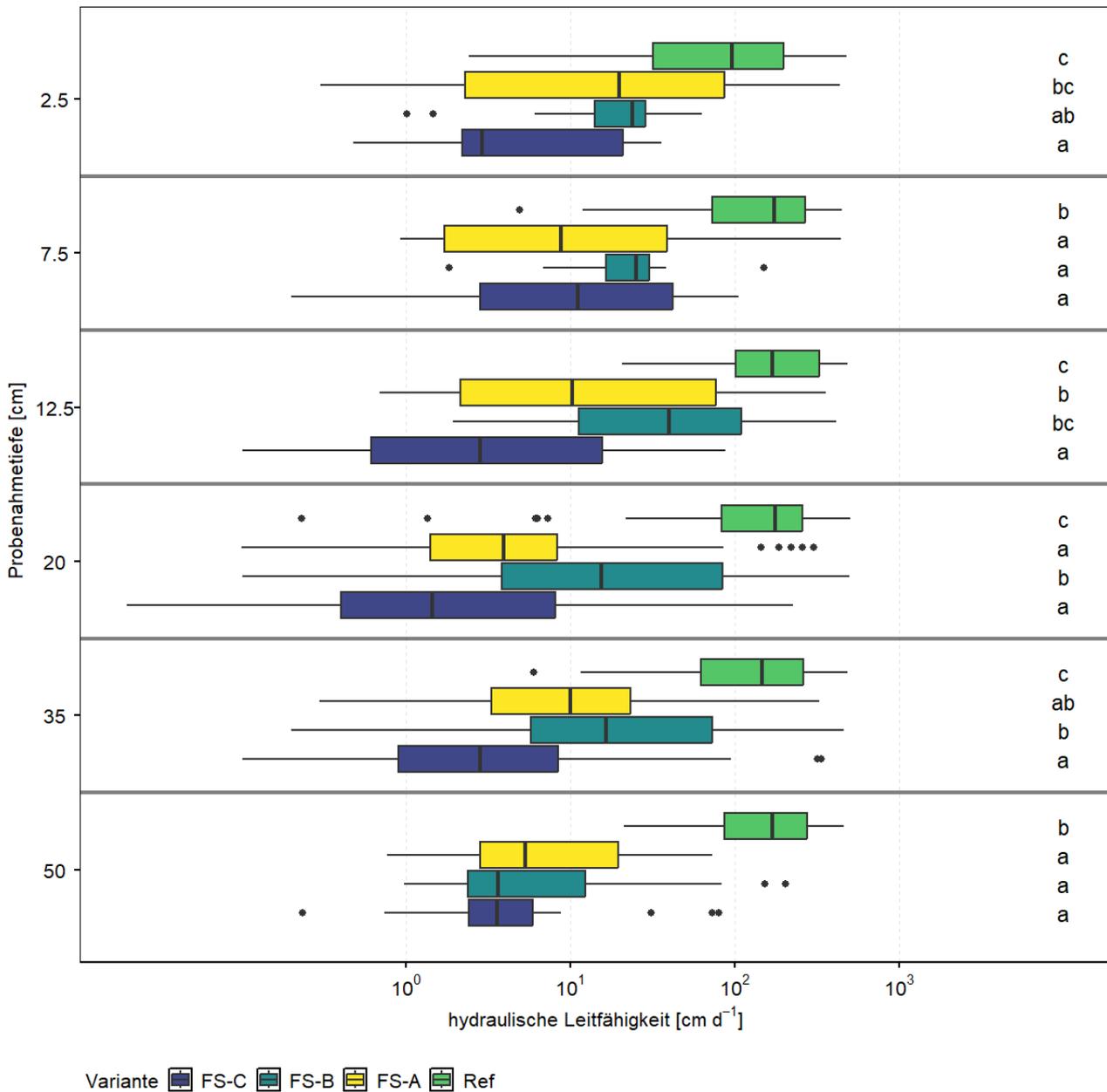
In einer Excel-Vorlage des Herstellers konnten die Rohdaten eingegeben und die Wasserleitfähigkeit im ungesättigten Zustand des Bodens (Van Genuchten 1980) berechnet werden. Durch Eingabe der Bodenart des jeweiligen Standorts (siehe 2.1 Korngrößenverteilung) wurden die entsprechenden van Genuchten Parameter genutzt, die für die Bodenart gültig sind. Ergänzend wurde der angelegte Gradient eingegeben, sodass mittels eines Fittings die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit kalkuliert werden konnte. Für jede Messung wurde diese Auswertung durchgeführt und das Ergebnis über ein Excel PowerQuery in einer Datenbank gespeichert. Die zusammenführende Auswertung aller Daten fand in *RStudio* statt: Die Aggregation auf Ebene der Versuchsgasse, Horizont und Stratum erfolgte anschließend zur Bestimmung statistischer Kennwerte wie Mittelwert, Median und Standardabweichung. Analog zu dem bereits beschriebenen Vorgehen wurde die statistische Auswertung mittels der gemischten linearen Modells und dem Tukey-post-hoc-Test durchgeführt.

### **2.4.2 Ergebnisse**

Der Transport von Wasser in einem Boden findet natürlicherweise unter Zuständen unvollständiger Sättigung statt. Diese ungesättigte Wasserleitfähigkeit ist eine Funktion des Wassergehaltes und muss für jeden Boden unter möglichst divergierenden Bodenfeuchten erhoben werden. Aufgrund des veränderten Porenraumes und des dadurch bedingten, anderen Wasserhaltevermögens der Fahrspuren, insbesondere der *FS-C* Varianten, waren deren Böden im Projektzeitraum von einer deutlich höheren Bodenfeuchte geprägt (siehe Abbildung 24). Aus diesem Grund zieht man neben der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als *in situ* Parameter die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit als im Labor bestimmten Parameter hinzu. Die Vergleichbarkeit der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist deutlich höher, auch wenn keine direkte Messung im natürlich gelagerten Boden stattfindet. Jedoch gibt die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit die Bedingungen *in situ* unter realen Bedingungen treffend wieder. In den folgenden Abbildungen sind die Leitfähigkeiten von Wasser im gesättigten (Abbildung 20) und ungesättigten (Abbildung 22) Zustand dargestellt, deren Werte in ihrer Höhe nicht direkt miteinander in Zusammenhang gesetzt werden dürfen. Beide Parameter wurden entweder direkt *in situ* in den Fahrspuren gemessen oder anhand von in den *FS* entnommenen Stechzylinderproben im Labor ermittelt.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Böden unterscheidet sich deutlich zwischen den Fahrspuren und den unbefahrenen Waldböden. Die absolute Höhe dieser Differenzen wird in der Grafik auf einer log-Achse dargestellt, da ansonsten die extrem niedrigen Werte der Fahrspuren untereinander (aufgrund deutlich höherer Wasserleitfähigkeiten bei *Ref*) nicht klar ersichtlich wären. Auf Basis der Ergebnisse des paarweisen Vergleichs (mit der jeweiligen Referenzbehandlung) weicht *Ref* in nahezu allen Tiefenstufen signifikant von den Fahrspuren ab. Lediglich in 2,5 cm und 12,5 cm Tiefe ist der Unterschied zu *FS-A* bzw. *FS-B* nicht signifikant. Der Unterschied innerhalb der Fahrspuren ist deutlich unklarer, auch wenn ein Trend zu geringeren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten mit zunehmender Fahrspurtiefe erkennbar ist. Dabei fällt neben dem beschriebenen Unterschied zur Referenz die höhere Ähnlichkeit zwischen *FS-A* und *FS-B* auf. Die Messwerte von *FS-C* (siehe Median) liegen dagegen in den meisten Tiefenstufen nochmals unterhalb der Werte der beiden anderen Fahrspurklassen und weichen in den Tiefen 12,5 cm bis 35 cm signifikant von diesen ab. Die Streuung des Parameters ist jedoch insgesamt sehr groß, sodass die Messergebnisse nicht immer signifikante Unterschiede darstellen.

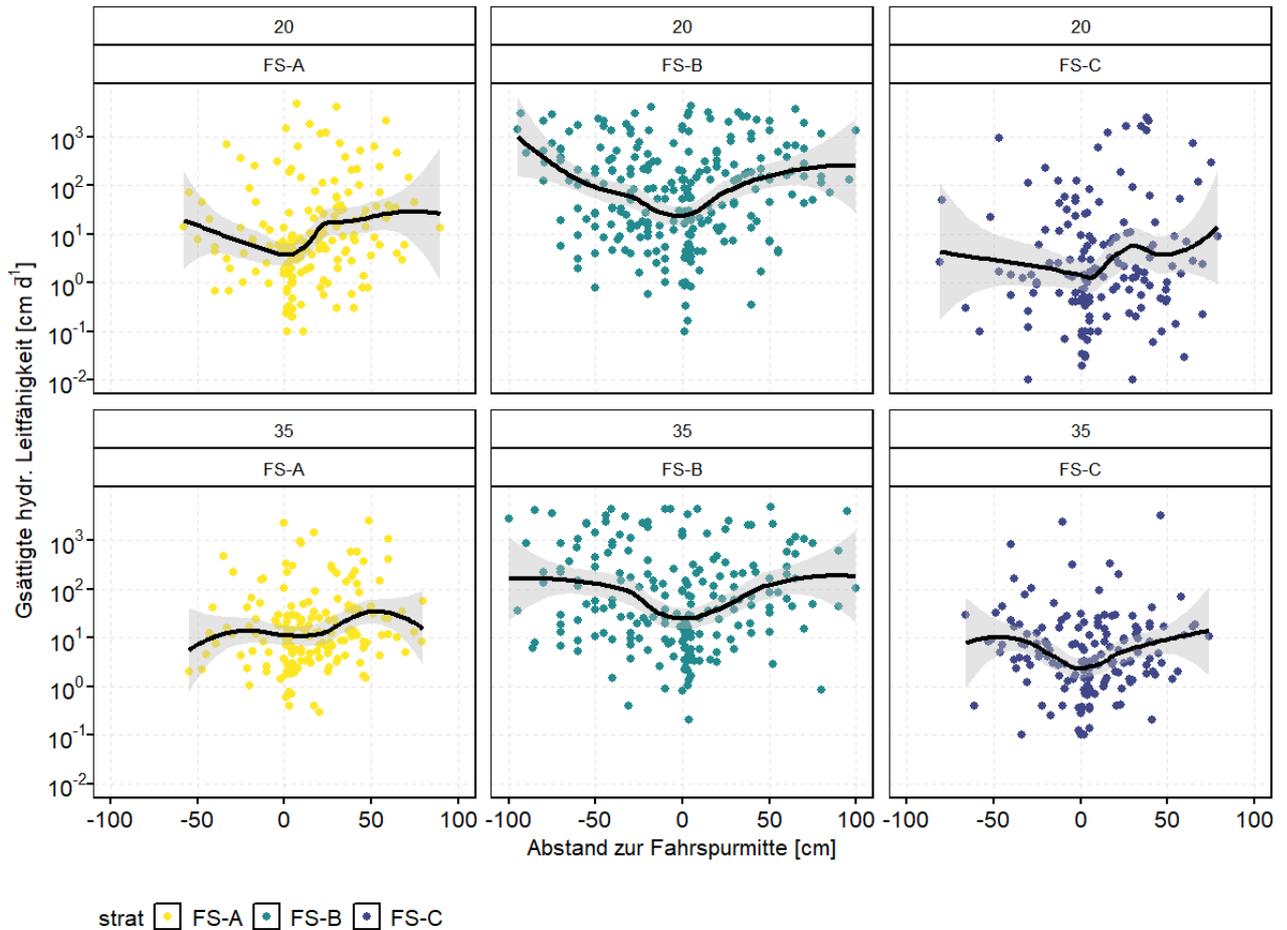
Die geringsten Medianwerte jeder Behandlung lassen sich im Bereich bei 20 cm Entnahmetiefe bei *FS-A* und *FS-C* feststellen. In *FS-B* liegt dieser Wert in 50 cm Tiefe.



**Abbildung 20: Mittlere gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (auf einer logarithmierten Achse) der untersuchten Varianten in den Probenahmetiefen bis 50 cm. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede je Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

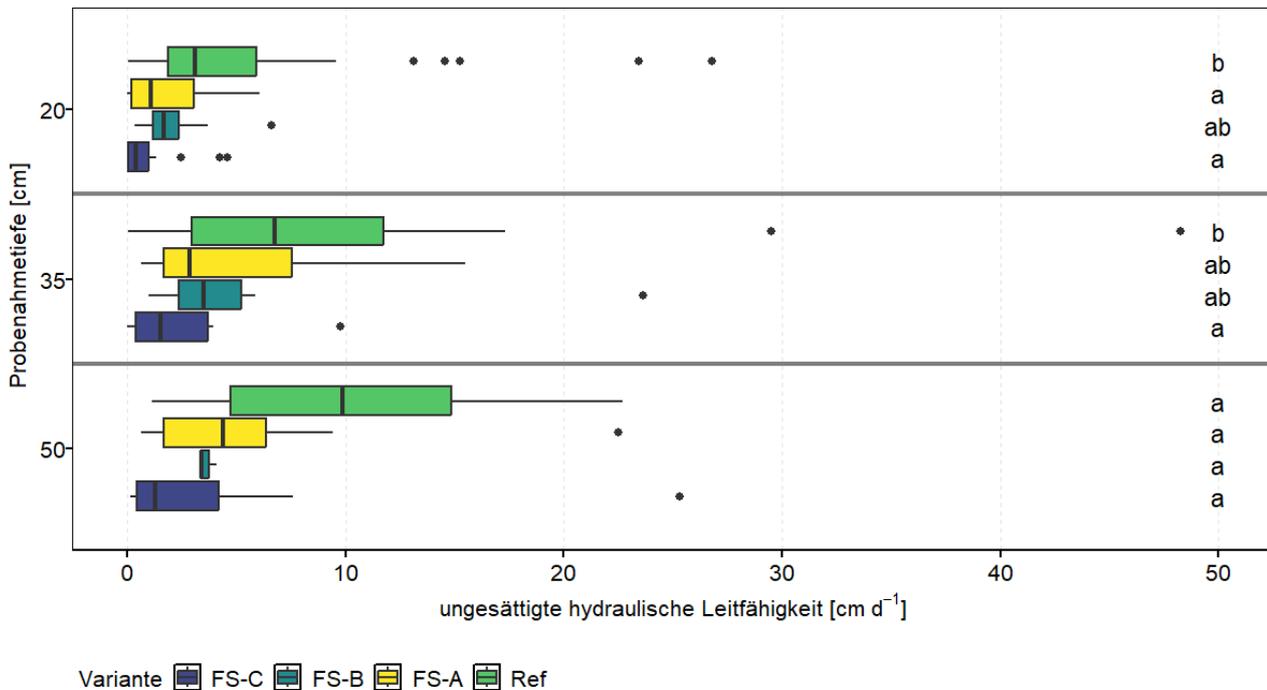
Die räumliche Verteilung des Parameters zeigt ein deutliches Bild auf (Abbildung 22). In der Mitte der Fahrspur ist bei allen Varianten und Tiefenstufen ein lokales Minimum vorhanden. In den Randbereichen nimmt die

Leitfähigkeit zum Teil deutlich zu. Besonders in *FS-B* ist das Muster besonders stark ausgeprägt, da dort Zylinder bis zu 100 cm entfernt der FS Mitte entnommen wurden.



**Abbildung 21: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (auf einer logarithmierten Achse) der untersuchten Varianten in den Probenahmetiefen 20 cm (oben) und 35 cm (unten) in Abhängigkeit zur Distanz zur Fahrspurmitte (cm). Ergänzend ist der geglättete Mittelwert (schwarz) und das 95% Konfidenzintervall (grau) angegeben.**

Die absoluten Werte der ungesättigten Wasserleitfähigkeit liegen unterhalb der Infiltrationsraten nahe Sättigung. Aufgrund der Problematik der großen Unterschiede im jahreszeitlichen Bodenwassergehaltes der Fahrspuren ist im Folgenden nicht die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes dargestellt, sondern analog zur gesättigten Leitfähigkeit als Mittel aller Messungen über alle Varianten und Zeitpunkte bzw. Wassergehalte. In der Tiefenstufen 20 cm liegen signifikante Unterschiede zwischen *FS-C* und *FS-A* und *Ref* vor – allerdings bestehen in keiner der Tiefenstufen Unterschiede zwischen den Fahrspuren untereinander.



**Abbildung 22: Mittlere ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit aller Untersuchungszeitpunkte und Varianten in den Probenahmetiefen 20 cm bis 50 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Behandlungsunterschiede je Tiefenstufe nach dem Tukey-Test an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

Zwar ist die Vergleichbarkeit aufgrund unterschiedlicher Wassergehalte nicht vollständig gegeben, doch liefert das gemeinsame Bild beider Messverfahren einen deutlichen Trend: Während der Ursprungszustand (*Ref*) in den Fahrspuren nicht erreicht wird, weicht besonders die tiefste Fahrspurklasse (*FS-C*) stark von diesem ab und weist – trotz der hohen Streuung – bei beiden Parametern und in nahezu allen Tiefenstufen als einzige Fahrspur signifikante Unterschiede zur Referenz auf. *FS-A* und *FS-B* unterscheiden sich deutlich weniger vom ungestörten Waldboden *Ref*, zeigen aber ebenfalls eine erheblich verringerte Infiltration von Wasser an.

### 2.4.3 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich der befahrungsinduzierte Einfluss auf das Infiltrationsverhalten von Wasser deutlich erkennen, auch wenn methodisch die Bestimmung der ungesättigten Leitfähigkeit *in situ* nicht unter allen natürlich vorkommenden Zuständen des Bodenwassergehaltes durchgeführt werden konnte. Trockene Zustände, wie sie in *Ref* vorkommen, konnten in *FS-C* und weniger drastisch auch in *FS-B* nicht beobachtet werden. Aufgrund der höheren *in situ* Wassersättigung bei *FS-C* und den dazu eher etwas trockeneren Zuständen bei *FS-B*, *FS-A* und insbesondere *Ref*, sind die Ergebnisse entsprechend zu beurteilen. Je höher die Wassersättigung, desto größer die Flussraten. Aus diesem Grund werden in den Ergebnissen die Werte bei den zuletzt genannten Varianten unterschätzt und sollten – gleiche Sättigungsverhältnisse angenommen – eher höhere Werte aufweisen, sodass die Differenzen noch deutlicher ausfallen. Als Grund sind die Poren zu nennen, die unter trockeneren Bedingungen nicht wassergefüllt sind und somit nicht zum Transport des Wassers zur Verfügung stehen. Unter der Annahme gleicher Wassersättigung hätte die ungesättigte Leitfähigkeit in *FS-C in situ* sehr wahrscheinlich deutliche geringere Werte als die gemessenen Werte angenommen.

Grundsätzlich lässt sich der Einfluss der Befahrung besonders stark durch diesen Parameter ausmachen: Der wasserführende Porenraum ist nicht nur stark reduziert, sondern im Falle der Fahrspuren ist auch die Porenkonnektivität stark eingeschränkt, sodass starke Abweichungen von *FS-C* zu *Ref* auftreten. Dies gilt in geringerem Maße auch für die beiden anderen Fahrspurbehandlungen. Nicht zuletzt bei der Betrachtung der Porenraumverteilung (II.2.3) fällt der Mangel an Grobporen auf, die maßgeblich für die Wasserleitfähigkeit verantwortlich sind. Das Infiltrationsvermögen ist also in allen Fahrspuren, aber besonders deutlich in *FS-C*, reduziert. Die reduzierte Wasserleitfähigkeit der Fahrspuren wird auch durch die Beurteilung der räumlichen Verteilung sichtbar. Das lokale Minimum liegt in allen Fällen in der Fahrspurmitte. In den weniger beeinflussten Randbereichen nehmen die Werte wieder zu, erreichen im Mittel aber nicht das Niveau von *Ref*.

Aufgrund der Spannweite der natürlichen Streuung des Parameters fallen zwar nur wenige signifikante Unterschiede auf, doch lässt sich anhand der Mittelwerte bzw. Mediane ein Trend geringerer Infiltrationsraten mit zunehmender Fahrspurtiefe erkennen. Lediglich in 50 cm Tiefe liegen die Werte in ähnlichen Bereichen, was durch den geringen Einfluss der Befahrung in dieser Tiefe zu erklären ist. Außerdem fällt *FS-B* mit zum

Teil höheren Werten auf. Dies ist vermutlich durch einen höheren Sandgehalt und dadurch ein verändertes Porensystem bedingt.

Im Vergleich zu den Fahrspuren liegt in den unbefahrenen Referenzparzellen ein von der Bodenoberfläche bis in die untersuchte Tiefenstufe von 50 cm kontinuierliches und gleichmäßig vernetztes und von Grobporen dominiertes Porensystem vor, wodurch sich konstante Infiltrationsraten in allen Tiefenstufen ergeben. Dies spricht für einen zügigen Transport von Niederschlag innerhalb des Bodens bei gleichermaßen schneller Wiederbelüftung nach Wassersättigung. In den Fahrspuren ist die Funktion des Wassertransports hingegen stark eingeschränkt, sodass es, wie bereits beim Bodenporensystem erwähnt, schnell zu stagnierender Nässe und eingeschränkter Sauerstoffversorgung und ökologischen Folgewirkungen kommt. Auch hinsichtlich Bodenabtrag im Rahmen von Erosionsereignissen ist das verringerte Infiltrationsvermögen bedeutungsvoll, wenn Wasser nicht zügig innerhalb des Bodens weitergeleitet werden kann. Bodenerosion durch hohen Oberflächenabfluss sollte jedoch erst ab einer gewissen Hangneigung sowie freiliegendem Mineralboden relevant sein, wie dies in Fahrspuren mit gestörtem Bodenaufbau, also den Fahrspuren der Klassen FS-B (10-20 cm) und insbesondere FS-C (20-30 cm), der Fall ist.

## **2.5 Bodenfeuchtedynamik (TV1)**

*Forschungsfrage: Welche Wirkungen der Befahrung bestehen auf die Bodenwasserspannung?*

Hypothese: Die Abnahme des Porenvolumens, insbesondere von luft- und wasserführenden Grobporen, nimmt Einfluss auf die Permeabilität von Fahrspurböden. Die Perkolation von Haft- und Sickerwasser wird gehemmt, wodurch Fahrspurböden höhere Bodenfeuchten als nicht verdichtete Bodenbereiche der unbefahrenen Waldböden aufweisen und sich von diesen, mit Ausnahme niederschlagsreicher Perioden, unterscheiden. Hinzu kommt, dass bei Vorhandensein einer vollständig oder überwiegend intakten Humusauflage das Niederschlagswasser nach Auftreffen auf die Bodenoberfläche zunächst innerhalb der Humusauflage verteilt und aufgrund eines besseren Wasserretentionsverhaltens länger dort gehalten wird. Das Wasser muss bis zum Erreichen des Mineralbodens größere Distanzen zurücklegen, während es bei Fehlen der Humusauflage direkt und in größeren Mengen auf den Mineralboden auftrifft. Aufgrund von graduellen Abstufungen der Bodenverdichtung verschiedener Fahrspurtiefen, verbunden mit Wirkungen auf Infiltration und Perkolation, ist deshalb folgender Zusammenhang annehmbar: Je geringer die verbliebene Restmächtigkeit der Humusauflage bzw. je tiefer die Fahrspur, desto größer die Anzahl an Tagen mit höheren Bodenfeuchten im Vergleich zum ungestörten Waldboden in gleicher Tiefe des Mineralbodens (Bezugspunkt: aktuelle Mineralbodenoberfläche).

## 2.5.1 Material & Methoden



**Abbildung 23: Datenlogger und Sensoren (A), Leerrohr als Überführungshilfe für Sensorkabel (B), Zubereitung von Lössschlämpe (C) und ein neben einer Respirationshaube eingebauter Sensor (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).**

Da die Feuchte des Bodens Einfluss auf die Aktivität der Mikroorganismen nimmt und der Bodenwasserhaushalt ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von Rückegassen ist, wurden die Messkammern der Bodenrespirationmessung in unmittelbarer Nähe um Sensoren ergänzt (Abbildung 23, D), die eine kontinuierliche Messung der Bodenwasserspannung ermöglichten. Zu diesem Zweck wurden 11 Datenlogger des Typs „Watermark Monitor 900M“ der Firma Irrrometer Company, Californien beschafft (Abbildung 23, A) und insgesamt 77 Bodenfeuchtesensoren „Irrrometer Watermark 200SS“ + 11 Bodentempersensoren „Irrrometer 200TS Watermark“ gleichmäßig auf die Versuchsflächen verteilt. Auf Flächen der Gruppe A wurden 22 Sensoren, in jenen der Gruppe B 25 Sensoren und in Gruppe C 30 Sensoren installiert. Das Messsystem zeichnete im Zeitraum 03.2019 – 03.2022 kontinuierlich Daten (Messintervall 1 h) auf, die in regelmäßigen Abständen von 2-3 Monaten ausgelesen wurden. Im Versuchsverlauf mussten mehrfach Reparaturen an Kabeln vorgenommen werden, die auf Tierfraß oder umgestürzte Bäume zurückzuführen waren.

Bei der Installation des Messsystems wurde so vorgegangen, dass die Sensoren in einer Distanz von etwa 10 cm zu ausgewählten Messkammern in möglichst nördlicher Richtung in den Boden eingebracht wurden. Die Messtiefe betrug ca. -6 cm des Mineralbodens, was auf den Versuchsflächen etwa dem Oberboden (Aeh-Horizont) entsprach. Um die Sensoren gleichmäßig in diese Tiefe zu setzen, wurde zuvor in jeder Versuchsgasse behandlungsweise (FS/Ref) und in mehrmaliger Wiederholung die Mächtigkeit der Humusaufgabe bestimmt. Danach wurde an jedem Messpunkt ein Pürckhauer bis in die Tiefe eingeschlagen, die der Mächtigkeit der Humusaufgabe entsprach und dann eine Bodenprobe entnommen. Der gewonnene Pfropfen wurde verworfen, da der Pürckhauereinsatz nur der Vorbereitung des Messpunktes diente. Daraufhin wurde das Bohrloch etwa zur Hälfte mit Löss eingeschlämmt (auf < 2 mm gesiebtes autochthones Material), der zuvor mit Wasser zu einem Brei vermengt wurde. Danach wurde ein über mehrere Stunden mit frischem Wasser aufgesättigter Bodenfeuchtesensor in den Messpunkt eingesetzt, bis auf den Grund des Bohrloches gedrückt und der Sensor danach vollständig mit Lössschlämpe überdeckt (Abbildung 23, C). Nach Ausstattung aller Messpunkte mit Sensoren wurden mehrere Sensorkabel gebündelt und an den vorgesehenen Datenlogger angeschlossen. Zu diesem Zweck mussten teils Rückegassen überquert werden die weiterhin dem forstwirtschaftlichen Betrieb zur Verfügung stehen und nicht durch die Untersuchungen eingeschränkt werden sollten. Zur Vermeidung von Beschädigungen der Kabel durch Überfahrung wurden etwa 30 cm tiefe

Schürfe in horizontaler Linie über die zu überquerenden Gassen gegraben, danach Leerrohre eingesetzt und die gebündelten Kabelstränge hindurchgeführt (Abbildung 23, B).

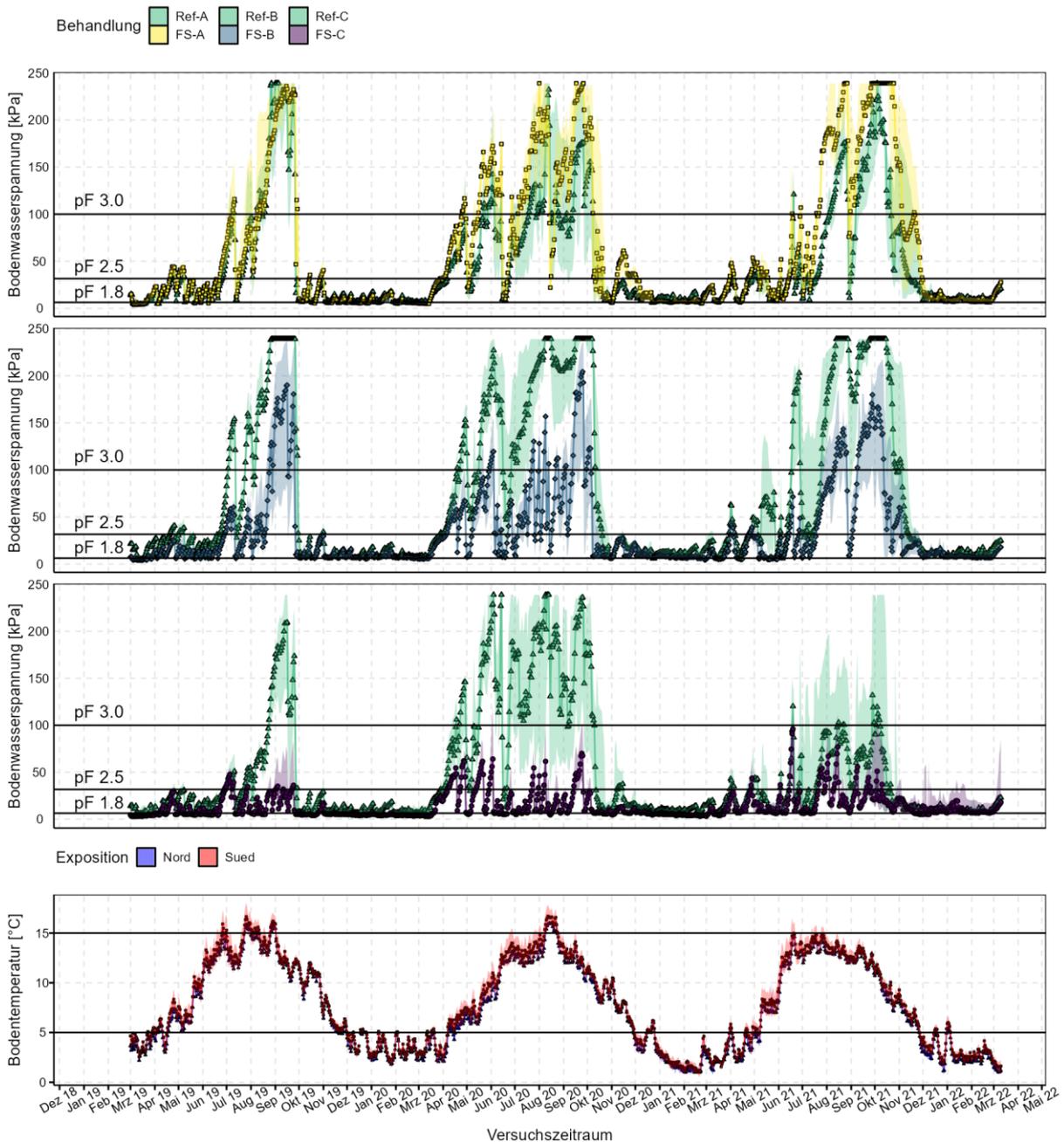
#### Auswertung

Die Daten, die mit Hilfe der „Watermark“-Datenlogger gewonnen wurden, wurden in regelmäßigen Abständen von 2-3 Monaten ausgelesen, aufbereitet und anschließend in einer Microsoft-Access-Datenbank gesammelt. In R wurden zunächst alle Messwerte > 239 kPa aus dem Datensatz ausgeschlossen, da solche Werte als Fehlercodes in den Datenloggern abgespeichert werden. Erreichte der Boden einen Austrocknungsgrad, der oberhalb des Messbereiches der Sensoren lag, wurde vom Dantellogger automatisch der Wert 239 kPa eingetragen. Dementsprechend sind Maximalwerte von 239 kPa nicht als die tatsächliche, sondern als die *mindestens* vorliegende Bodenwasserspannung zu verstehen.

Das Messsystem zeichnete die Daten der Bodenfeuchte im Takt von 1 h auf, die anschließend behandlungsweise als Mediane auf die Ebene eines Tages-Wertes aggregiert wurden. Als Streuungsmaße wurden zudem die 25 %- und 75 %-Quantile ermittelt. Dieser Weg wurde gewählt, um den Umstand zu berücksichtigen, dass es sich, wie beschrieben, teils um zensierte Werte handelte (max. 239 kPa), sodass keine Mittelwertbildung möglich war.

An 11 weiteren Sensoren wurde zusätzlich die Bodentemperatur (°C) in den Referenzparzellen aufgezeichnet. Die Temperaturwerte wurden geräteintern zu Korrekturzwecken benötigt, um die Messwerte der Bodenwasserspannungs-Sensoren anzupassen, deren Signal (Widerstand) temperaturabhängig ist. Die Verteilung der Versuchsflächen – und somit der Datenlogger – auf nördlich und südlich exponierte Hänge (vgl. Abbildung 4) wurde genutzt, um die Daten der Bodentemperaturverläufe in zwei Kollektive aufzuteilen. Entsprechend der Exposition (Nord und Süd) wurden die Daten ebenfalls nach Tageswerten aggregiert, jedoch wurden hierfür Mittelwerte inklusive 95 %-Konfidenzintervallen berechnet.

## 2.5.2 Ergebnisse



**Abbildung 24:** Verlauf der Mediane der Bodenwasserspannung (kPa)  $\pm$  25 %- und 75 %-Quantile sowie der Bodentemperatur ( $^{\circ}$ C)  $\pm$  95 %-Konfidenzintervalle zwischen März 2019 und März 2022. Die Daten wurden in einer Tiefe von 6 cm des Mineralbodens gemessen und repräsentieren somit die Feuchtedynamik im Oberboden (Aeh-Horizont). Das Messsystem ist auf Maximalwerte von 239 kPa limitiert (zensierte Werte). Zu Einordnungszwecken sind in den Diagrammen der Bodenwasserspannung die Saugspannungswerte für pF 1,8 (6,3 kPa), pF 2,5 (31,62 kPa) und pF 3,0 (100 kPa) als horizontale Linien eingetragen sowie beim Bodentemperaturverlauf bei  $5^{\circ}$ C und  $15^{\circ}$ C. Die nach Behandlungen farblich differenzierte Schraffierung im Hintergrund gibt die Streuung der Messdaten wieder. In den ersten drei Diagrammen ist jeweils der direkte Vergleich der Bodenwasserspannungsdynamik der Fahrspurbehandlungen (FS-A, FS-B und FS-C) zu den jeweiligen Referenzparzellen (Ref-A, Ref-B und Ref-C) aufgetragen. Das vierte Diagramm zeigt die gemessenen Bodentemperaturen nach südlicher bzw. nördlicher Exposition.

Betrachtet man die Kurvenverläufe von Bodenwasserspannung und -temperatur (Abbildung 24), wird ersichtlich, dass erhebliche Unterschiede zwischen den Wintermonaten (etwa Oktober/November bis März/April) und den Sommermonaten (etwa April/Mai bis September/Oktober) bestehen. Während die Bodentemperaturen in den Wintermonaten häufig unter die  $5^{\circ}$ C-Marke fallen, liegen die Bodenwasserspannungen gleichzeitig in einem Bereich um pF1,8 oder darunter, woraus zu schließen ist, dass der Großteil des Bodenporenraumes mit Wasser gefüllt ist. Zwischen den Behandlungen bestehen während Zeiträumen mit hoher Wassersättigung keine relevanten Unterschiede. Sobald die Bodentemperaturen ansteigen, etwa ab März/April, vollzieht sich auch eine Veränderung der Bodenfeuchte. Innerhalb der Referenzparzellen kommt es im Sommerhalbjahr zu kontinuierlicher Austrocknung der Böden, die durch

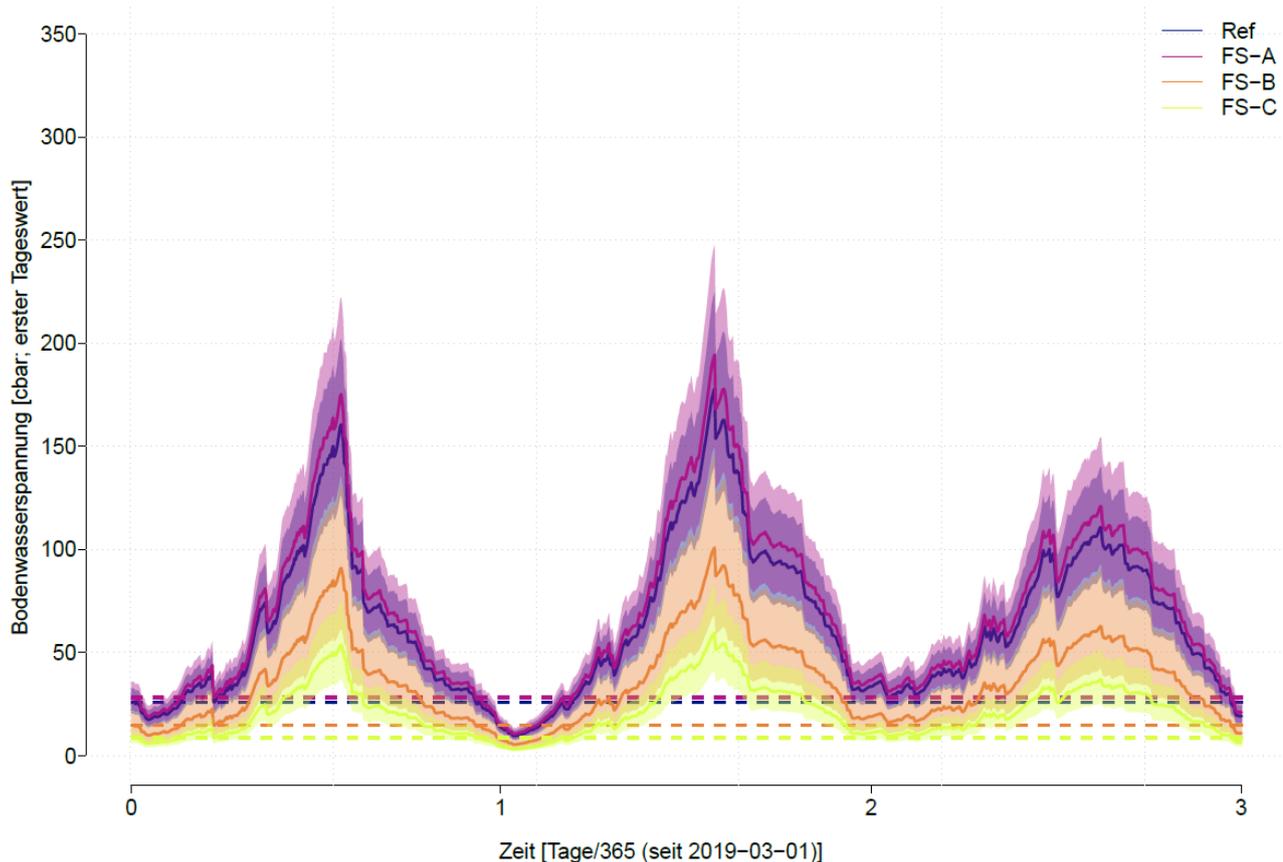
Zunahmen der Bodenwasserspannung reflektiert werden und in Matrixpotentialen deutlich oberhalb der pF 3,0-Marke resultieren. Die Bodentemperaturen erreichen Werte von etwa 15-16°C (Hochsommer, Juli bis September). In unregelmäßigen Abständen werden die Entwicklungen durch Niederschlagsereignisse gebremst bzw. in ihrer Richtung umgekehrt.

Die Gegenüberstellung der Bodenfeuchtedynamiken der Fahrspurbehandlungen und ihren zugehörigen Referenzparzellen zeigt bedeutsame Unterschiede der Fahrspuren insbesondere im Austrocknungsgeschehen auf. In Fahrspurbehandlung *FS-A* ist ein überwiegend kongruenter Verlauf der Bodenwasserspannung mit den unbefahrenen Referenzparzellen *Ref-A* erkennbar, wobei in den Jahren 2020 und 2021 häufig sogar höhere Bodenwasserspannungen (= geringere Bodenfeuchten) in diesen Fahrspuren gemessen werden konnten. Dies steht im Kontrast zu den Fahrspuren, deren Spurtiefe oberhalb der 10 cm-Schwelle liegen. In Fahrspuren des Tiefenbereiches >10 cm und ≤ 20 cm (*FS-B*) ist eine Differenzierung zu den unbefahrenen Referenzparzellen *Ref-B* feststellbar, die sich, nach anfänglicher Ähnlichkeit zu den Referenzparzellen, während der Sommermonate vollzieht. Der Oberboden bleibt hier deutlich feuchter, trocknet weniger intensiv aus und erreicht zu keinem Zeitpunkt die Bodenwasserspannungswerte der Referenzparzellen. Dieser Effekt ist in verstärkter Form beobachtbar in Rückegassen mit Fahrspurtiefen zwischen > 20 cm und ≤ 30 cm (*FS-C*). Die Bodenwasserspannung verharrt während des gesamten Untersuchungszeitraumes auf niedrigem Niveau und überschreitet in den Sommermonaten nur gelegentlich die Schwelle von pF 2,5. Demzufolge liegen in Fahrspuren des Typs *FS-C* dauerhaft feuchte bis nasse Bedingungen vor.

### **Analyse von Einflussvariablen auf die Bodenwasserspannungsdynamik von Rückegassen**

Mit Hilfe statistischer Modellierung wurden die Daten der Bodenwasserspannung in Zusammenhang mit meteorologischen Informationen der Untersuchungsregion (Übergang Unterer Solling zu Hoher Solling; Höhe ~ 400 m ü NN) gebracht (Methodik siehe Anhang 2). Dazu wurden die stündlichen Messwerte der Watermarksensoren auf den ersten Messwert des Tages reduziert und mit der Meteorologie des Vortags, die ebenfalls in Tagesauflösung vorlag, verschnitten. Die meteorologischen Variablen wurden mit dem NW-FVA R-Paket KSPclimpredict (Schmidt-Walter et al. 2021) aus für die Fläche regionalisierten Daten berechnet. Ziel war es, durch Auftrennung des „Wetters“ in verschiedene meteorologische Einflussvariablen, deren Effekt auf die unterschiedliche Bodenfeuchtedynamik der Versuchsbehandlungen besser verstehen zu können.

Ergebnis des Auswertungsprozesses ist die Feststellung, dass die Dynamik der Bodenwasserspannung in den Behandlungen u.a. durch unterschiedliche Initialwerte beeinflusst wird (Effekt des *first timepoint*, Tabelle 20 in Anhang 2). Gründe für die Verschiedenheit dieses *first timepoint*-Effekts – und damit der unterschiedlichen Dynamiken – liegen vermutlich vorwiegend in den variierenden Eigenschaften der Behandlungen hinsichtlich des Bodenaufbaus und der Verdichtung sowie deren Wirkung vor dem Beginn des Experiments. Überträgt man die Wirkung des *first timepoint* der Referenzparzellen in einem hypothetischen Szenario auf die Fahrspurbehandlungen und schließt gleichzeitig die in den Behandlungen unterschiedlich wirkenden Einflüsse des Wetters aus, wird ersichtlich, dass die Behandlungen eine deutlich verschiedene Entwicklung der Bodenfeuchte im Jahres- bzw. Versuchsverlauf nehmen, die auf den Effekt des *first timepoint* zurückzuführen ist (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Modellierter Verlauf der Bodenwasserspannung unter Ausschluss von meteorologischen Variablen.**

Andererseits ergibt die Analyse einen differenzierten Einfluss der betrachteten Wettervariablen auf das Geschehen von Abnahme und Zunahme der Bodenwasserspannung in den Versuchsbehandlungen (Anhang 2). Als Einflussvariablen mit eher geringerer Wirkung auf die Bodenfeuchte stellen sich die Tagesmitteltemperatur (*temp\_dmean*, Tabelle 24 in Anhang 2), der Wasserdampfdruck (*vapdm*, Tabelle 21 in Anhang 2) und die Windgeschwindigkeit (*wsdm*, Tabelle 23) heraus, die alle drei negativ mit der Bodenfeuchte bzw. positiv mit der Bodenwasserspannung zusammenhängen. Auch die Unterschiede zwischen den Behandlungen sind bei diesen Variablen eher gering.

Es zeigt sich im Mittel eine leicht höhere Zunahme der Bodenwasserspannung durch eine Erhöhung der Tagesmitteltemperatur auf den Böden der Referenzparzellen (trotz höherer Überschirmung) verglichen mit den Fahrspurbehandlungen, die hohe Ähnlichkeit untereinander aufweisen. Ein ähnlicher Effekt ist beim Einfluss des Wasserdampfdruckes zu beobachten. Die Wirkung auf die Referenzböden ist im Mittel etwas höher als auf die Fahrspurböden, unter denen wiederum kaum bedeutende Unterschiede gefunden werden konnten. Etwas stärker ist der allgemeine Effekt der Windgeschwindigkeit auf die Bodenfeuchte. Bringt man die Posteriori-Mittelwerte in eine Reihenfolge, nimmt der Einfluss von  $FS-A < FS-B < Ref < FS-C$  zu. Fahrspurböden C trocknen im Mittel demnach durch den Einfluss des Windes stärker ab als Fahrspuren A und B und ähneln stark den Referenzparzellen. FS-A und FS-B unterscheiden sich ebenfalls, aber weniger.

Den größten Einfluss der Wettervariablen auf die Verringerung der Bodenfeuchte nimmt die Komponente Globalstrahlung (*globrad*, Variation im Jahresverlauf, Tabelle 22 in Anhang 2). Dies ist auf alle Varianten zutreffend. Gleichwohl gibt es kleine Abstufungen zwischen den vier Versuchsbehandlungen. Der stärkste Effekt geht dabei auf FS-A, direkt gefolgt von Ref und mit geringem Abstand auf FS-B aus, wobei die Behandlungen im Mittel nah beieinander liegen. Lediglich FS-C ist ein Stück weit abgesetzt von den anderen Varianten.

Als Ursache für das unterschiedliche Abtrocknungsverhalten von Referenz- und Fahrspurparzellen werden neben den bereits erwähnten, verschiedenen Verdichtungsintensitäten der Flächen, die in Zusammenhang mit der Verringerung des Porenraumes und seiner Vernetzung stehen und damit den Transport von Wasser sowie den Gasaustausch beeinflussen, auch Unterschiede bei der Exposition und der Durchwurzelung der Böden sowie der Mächtigkeit der Humusaufgabe und der Aktivität von Bodenorganismen angenommen.

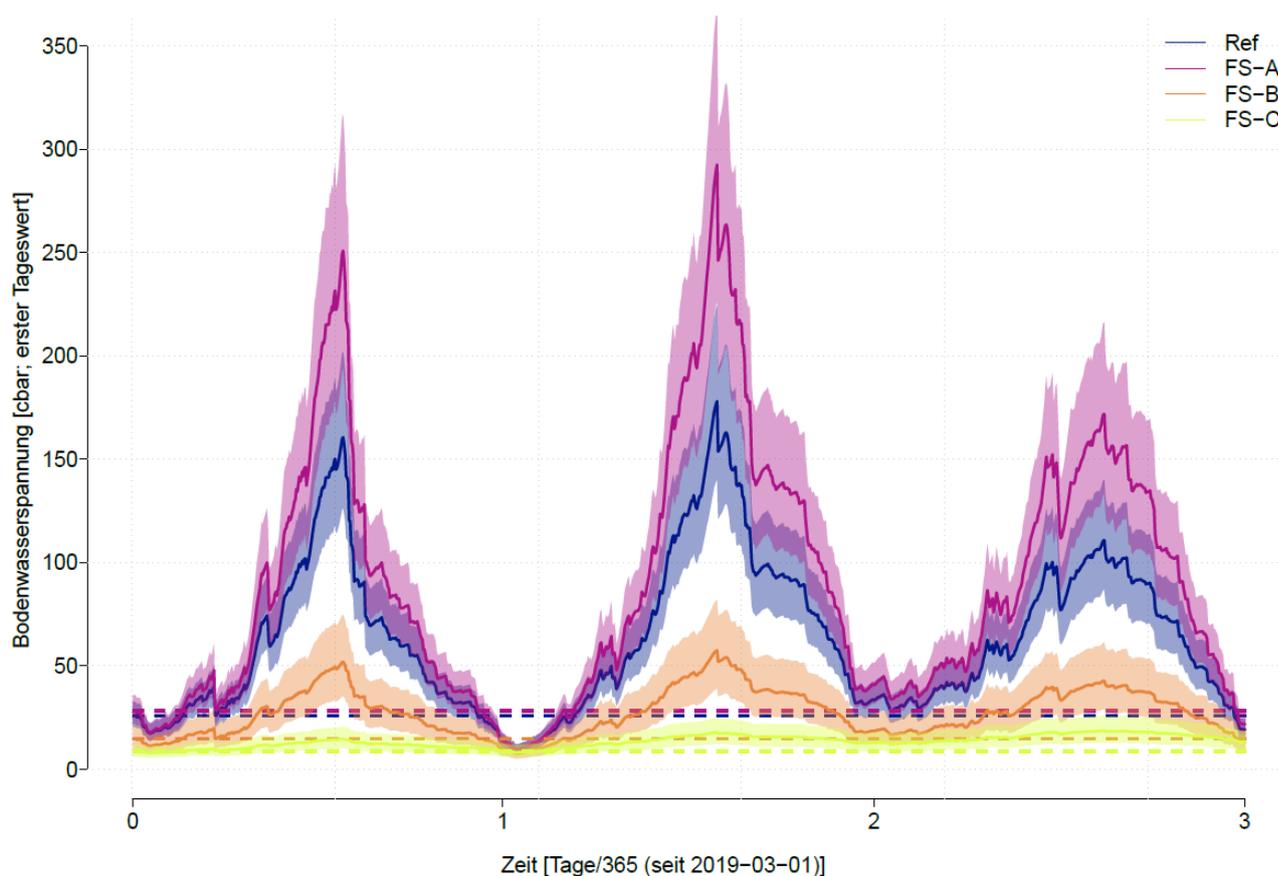
Die Flächen der Fahrspurvariante B, und demnach auch ein Teil der Referenzparzellen, befinden sich auf dem nördlich exponierten Teil des Untersuchungsgebietes, Variante A und großteils auch C dagegen auf dem südlich exponierten Hang. Die Exposition beeinflusst damit das kleinräumige Klima auf den Versuchsflächen,

wie es auch an den unterschiedlichen Bodentemperaturverläufen deutlich wird (Abbildung 24), obgleich die Temperaturunterschiede zwischen den beiden Expositionen nur sehr gering sind.

Pflanzen (Bäume) nutzen einen Teil der Globalstrahlung zur Photosynthese. Der gefundene Einfluss der Globalstrahlung auf die Abtrocknung der Böden steht damit naheliegend in Verbindung mit der photosynthetischen Aktivität der Waldbäume und infolgedessen deren Aufnahme von Wasser aus dem Boden. Die Untersuchungen zur Wurzelverteilung (siehe Abbildung 69) legen verschiedene Durchwurzelungsintensitäten der Fahrspurböden und Referenzparzellen offen. Die höchste Wurzelanzahl konnte in den Referenzparzellen gefunden werden. Gefolgt von den Behandlungen *FS-A*, *FS-B* und *FS-C*. In *FS-C* lag die Anzahl Gesamtwurzeln (Grob- + Feinwurzeln) im Mittel um über 50 % unter dem Wert der Referenzparzellen, wodurch sich der geringere Einfluss der Globalstrahlung auf die Verringerung der Bodenfeuchte in dieser Fahrspurklasse erklären lassen könnte.

Gegenläufiger Prozess zur Austrocknung des Bodens ist die Wiederbefeuchtung durch Niederschlag und damit die Abnahme der Bodenwasserspannung (*rain\_pred*, Tabelle 25 in Anhang 2). Vergleichbar mit der Globalstrahlung, zeigt sich auch hier die größte Wirkung des Niederschlags auf die Bodenfeuchte in der Reihenfolge *FS-A*, *Ref*, *FS-B* und mit etwas Abstand *FS-C*. Die deutlich trockeneren Böden von *Ref* und *FS-A* reagieren auf das Niederschlagsgeschehen mit stärkerem Abfall der Bodenwasserspannung als die ohnehin feuchteren Böden von *FS-B* und *FS-C*.

Unter Berücksichtigung der betrachteten meteorologischen Einflussfaktoren und des Startpunktes (*first timepoint*) ergibt sich nachfolgender Verlauf der Bodenwasserspannung, bei dem die Limitierung des Messsystems auf maximal 239 kPa (zensierte Werte) modellbasiert herausgerechnet wurde (Abbildung 26). Bei dem modellierten Verlauf der Bodenwasserspannung fällt auf, dass insbesondere bei Fahrspurbehandlung *FS-A* deutlich höhere Saugspannungen während der Sommermonate der Jahre 2019 und 2020 (Jahr 1 und 2) errechnet werden.



**Abbildung 26: Modellierter Verlauf der Bodenwasserspannung in Zusammenhang mit dem variablen Einfluss von meteorologischen Variablen.**

### 2.5.3 Schlussfolgerungen

Bei der Bodenwasserspannung wurde die Hypothese formuliert, dass Fahrspurböden aufgrund verringerter Permeabilität höhere Bodenfeuchten als der unbefahrene Waldboden aufweisen. Ausnahme bilden sehr niederschlagsreiche Zeiträume. Diese Annahme konnte für die Behandlungen *FS-B* und *FS-C* bestätigt werden. Lediglich während der Winterzeiträume konnten keine deutlichen Unterschiede zu den *Ref*-Parzellen

gefunden werden, da die Böden während dieser Perioden ähnliche Feuchten aufwiesen. Dies gilt auch für *FS-A*. Für die gefundenen Ergebnisse sind die unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften der Fahrspurböden entscheidend. In *FS-A* zeigte sich jedoch, dass es während der Sommermonate eher zu geringeren Bodenfeuchten verglichen mit den Referenzparzellen (*Ref-A*) kommt. Dies scheint auch die Annahme zu bestätigen, dass die Mächtigkeit der Humusauflage das Ergebnis der Bodenwasserspannung beeinflusst. In den Fahrspuren *FS-A*, mit intakter und mitunter mächtigerer Humusauflage als in *Ref*, muss Niederschlag eine weitere Distanz zurücklegen, bis er in den Mineralboden eindringen und dort die Feuchte erhöhen kann. Auflagehumus kann zudem sehr viel Wasser speichern bzw. zurückhalten. In *FS-B* und vor allem *FS-C* ist die zurückzulegende Strecke aufgrund der verringerten Auflagenmächtigkeit bzw. des Fehlens der Humusauflage dagegen sehr gering, sodass der Mineralboden in vergleichbarer Tiefe bei Niederschlägen leichter wiederbefeuchtet wird und daher höhere Bodenfeuchten im Mineralboden begünstigt werden.

Aus den Untersuchungen zur Bodenwasserspannung kann insgesamt gefolgert werden, dass die Fahrspurtiefe eine bedeutsame Einflussgröße für die Dynamik des Bodenwasserhaushaltes ist. Das Potential, in Fahrspuren von Rückegassen dauerhaft vernässte Bereiche mindestens innerhalb des Oberbodens (0-6 cm) zu erhalten, steigt in Fahrspuren mit Tiefen > 10 cm (*FS-B* und *FS-C*) progressiv an. Eine Beeinflussung des Wasserhaushaltes in tieferen Bereichen des Bodens wurde nicht untersucht, erscheint aber wahrscheinlich.

## 2.6 Luftleitfähigkeit (TV2)

Forschungsfrage: Inwiefern unterscheidet sich die Luftleitfähigkeit in den Fahrspuren untereinander und zur Referenzparzelle des unbefahrenen Waldbodens und lässt sich ein Effekt im Tiefenverlauf erkennen?

Hypothese: Die Luftleitfähigkeit der Fahrspuren ist aufgrund der Störungen des Porenraumes deutlich reduziert. Mit zunehmender Bodentiefe reduziert sich der Wert. Absolut sind die Werte in *FS-C* am geringsten, gefolgt von *FS-B* und *FS-A*.

### 2.6.1 Material & Methoden

Der Transport von Luft und Wasser findet innerhalb des Bodens im Porenraum statt. Die bereits beschriebene Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit kann unter gesättigten und ungesättigten Zuständen erfolgen, in der Natur tritt aber sehr oft letzteres zu. Analog dazu wird Bodenluft im Boden bewegt. Das Transportvermögen für Luft ist vom Sättigungsgrad der Poren mit Wasser abhängig. Die im Folgenden dargestellte pneumatische Luftleitfähigkeit beschreibt das potentielle Gasaustauschvermögen des Bodens als für die Pflanzen verfügbares Maß an Sauerstoff.

Neben bodenphysikalischen Untersuchungen im Labor erfolgte die Bestimmung ausgewählter Parameter durch direkte Messungen vor Ort in den Fahrspurböden. Ziel der Versuche war es, die Bedingungen *in situ* zu quantifizieren.

Gemessen wurde die pneumatische Luftleitfähigkeit mit dem PL-300 Luftleitfähigkeitsmessgerät der Firma Umwelt-Geräte-Technik (UGT GmbH). In ausgehobenen Gruben innerhalb der Fahrspur und der unbefahrenen Referenzparzellen wurden tiefenspezifische Messungen durchgeführt. Je Variante wurden 4 Versuchsgassen und in Summe 4 Referenzparzellen untersucht, in denen je 3 Gruben ausgehoben wurden. Zwecks Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen den Teilvorhaben fanden die Luftleitfähigkeitsmessungen in denselben Bodengruben statt, in denen auch die Wurzelverteilung erhoben wurde. Die Messhaube mit einer Höhe von 4 cm wurde mittels eines eigens angefertigten Schlagadapters oberflächlich in den Boden geschlagen. Beginnend mit der Mineralbodenoberkante wurde in den Tiefenstufen 0-4 cm, 5-9 cm, 10-14 cm, 15-19 cm, 20-24 cm und 25-29 cm gemessen. 3 Wiederholungen wurden je Stufe und Plot angestrebt, doch ließen es die Gegebenheiten des Bodens nicht immer zu, sodass z.T. auch weniger Messungen in einer Tiefe erfolgten. In Summe konnten 12 Punkte jeder Behandlung *FS-A*, *FS-B*, *FS-C* und *Ref* untersucht werden. Gestörte Mischproben des Bodens ergänzten die *in situ* Messungen der Luftleitfähigkeit, da diese nicht nur vom Porenraum des Bodens, sondern auch von dessen Wassersättigung abhängen. Aufgrund dessen konnte der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Untersuchung in jeder Tiefenstufe durch gravimetrische Trocknung im Ofen (24 h bei 105°C) ermittelt werden.

#### Auswertung

Die Auswertung der Luftleitfähigkeit fand nach Vorgaben des Herstellers (UGT GmbH) statt, die die Berechnungsgrundlage zur Verfügung gestellt haben. Das Gerät liefert die entsprechenden Werte für Kammer- und Drosseldruck, die in eine Formel eingegeben werden. Ergänzend werden die geometrischen Randbedingungen der Messhaube eingegeben, sodass die Luftleitfähigkeit berechnet werden konnte.

Die Zusammenführung aller Daten fand in MS Excel statt, in der die Ergebnisse auch berechnet wurden. In *RStudio* wurde die weitergehende Darstellung im Tiefenverlauf durchgeführt. Zusätzlich wurden die gravimetrisch erhobenen Wassergehalte je Stratum und Horizont zusammengefasst und Mittelwerte und der Median ausgegeben. Multipliziert mit dem entsprechenden Mittelwert der Trockenrohddichte (der jeweiligen

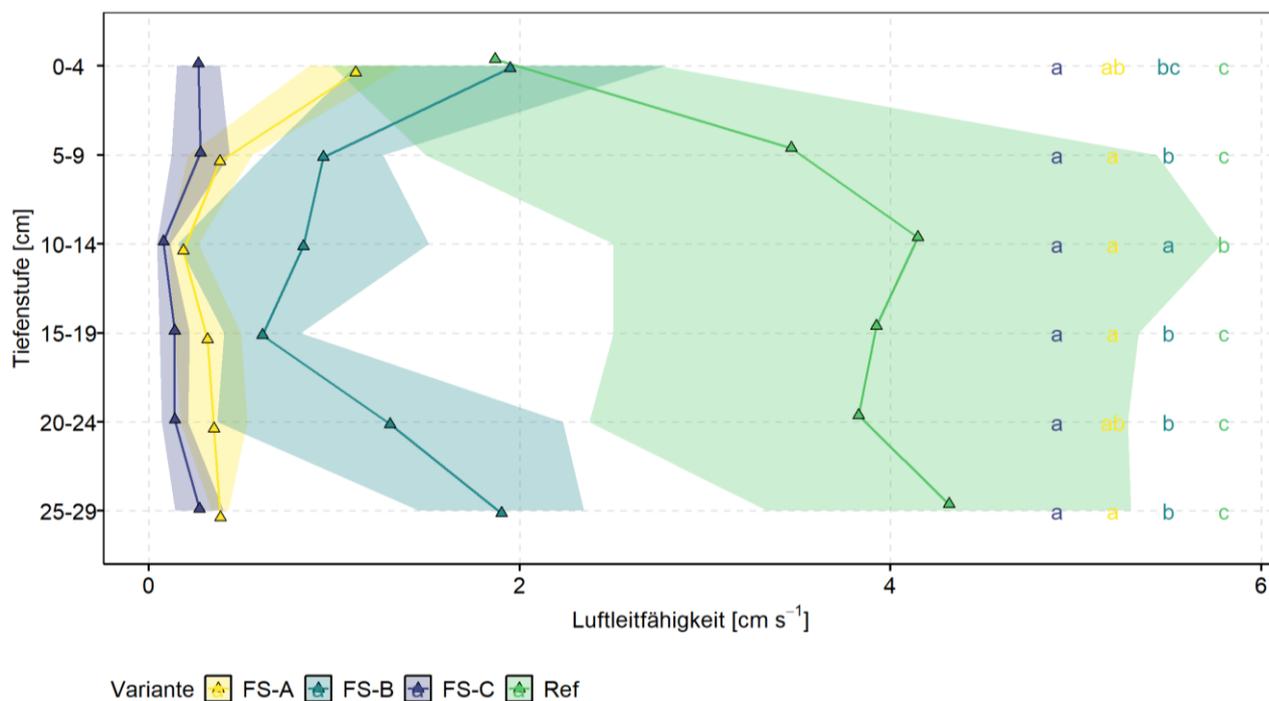
Variante) aus II.2.2 konnte der gravimetrische Wassergehalt zum Messzeitpunkt in den volumetrischen Wassergehalt umgerechnet werden.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels eines linear mixed models (LMM) und anschließendem Tukey-post-hoc-Test, bei dem die Daten der Fahrspurbehandlungen mit denen der Referenzflächen verglichen wurden. Die Messwerte der Referenzflächen wurden in vier Versuchsgassen gewonnen. Diese waren jedoch nicht gleichmäßig auf die Fahrspurbehandlungen verteilt, sodass Behandlungspärchen unberücksichtigt blieben.

## 2.6.2 Ergebnisse

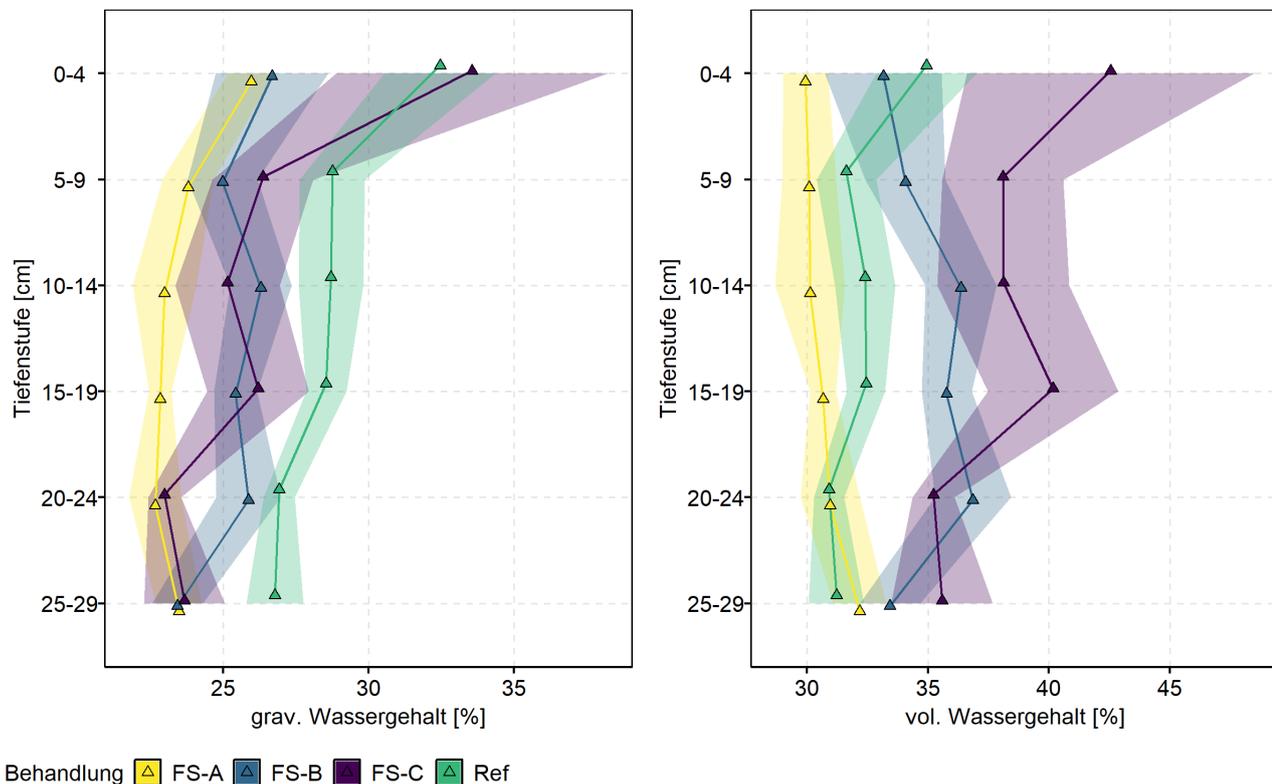
In der vadosen Zone des Bodens ist der Wassergehalt neben der Porenraumverteilung für den Lufttransport und nachgelagerte Austauschprozesse verantwortlich. Aus diesem Grund handelt es sich auch bei der pneumatischen Luftleitfähigkeit (cm pro Sekunde) um einen Wert, der als Funktion des Wassergehaltes angegeben wird. Mangels Variabilität und Verfügbarkeit sehr trockener Zustände wurde nicht die ganze in der Natur vorkommende Bandbreite der Bodenwassergehalte erfasst, sondern der Versuch nur zeitlich begrenzt durchgeführt. Die Ergebnisse zum volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt sind in Abbildung 28, die der Luftleitfähigkeit in Abbildung 27 aufgeführt.

Die Luftleitfähigkeit nimmt in allen Varianten sehr geringe Werte an (Abbildung 27). Die Referenz hat ein erhöhtes Vermögen Bodenluft zu transportieren und es zeigt sich dort ein Tiefengradient mit zunehmenden Leitfähigkeiten in den unteren Tiefenstufen. Im Gegensatz dazu ist die Luftleitfähigkeit in allen Fahrspuren sehr niedrig und bewegt sich nahe der Messgrenze des Gerätes. In besonders reduzierter Form sticht FS-C hervor. Das Ergebnis der Fahrspuren FS-C unterscheidet sich jedoch nicht nennenswert von den Fahrspuren FS-A. In vielen Tiefenstufen lassen sich daher keine signifikanten Unterschiede zwischen FS-A und FS-C detektieren. Beachtlich ist in diesem Zusammenhang, dass die Böden von FS-A während der Messung besonders trocken waren, wodurch eher größere Unterschiede zu FS-C zu erwarten wären. Dagegen unterscheidet sich FS-B mit in allen Tiefenstufen höheren Luftleitfähigkeiten häufig signifikant von den beiden anderen Fahrspurklassen. Die höheren Luftleitfähigkeiten sind dort vermutlich auf die leicht abweichende Bodentextur mit etwas höheren Sandgehalten zurückzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Wassergehalte (Abbildung 28) ist die Vergleichbarkeit insgesamt jedoch erschwert.



n = 4

**Abbildung 27:** Luftleitfähigkeit der untersuchten Varianten bis 27 cm Tiefe unterhalb der Mineralbodenoberkante, dargestellt als logarithmierter Wert in cm pro Sekunde und dem gleitenden Mittelwert je Stratum. Verschiedene Buchstaben je Tiefenstufe zeigen signifikante Behandlungsunterschiede an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).



**Abbildung 28:** Tiefenverlauf des gravimetrischen (links) und volumetrischen (rechts) Wassergehalts in den Fahrspuren und den Referenzparzellen ( $n = 4$ ) bei Messung der Luftleitfähigkeit. Der volumetrische Wassergehalt wurde auf Basis der mittleren Trockenrohddichte aller Fahrspuren der entsprechenden Gruppe und Tiefe berechnet. Die Trockenrohddichten nicht untersuchter Tiefen wurden auf Basis linearer Interpolation approximiert.

### 2.6.3 Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der aufgestellten Hypothesen lassen sich diese nur bedingt bestätigen: Während die Referenzparzellen die größten Luftleitfähigkeitsraten basierend auf einem intakten Porensystem mit einer funktionierenden Konnektivität aufweisen, weichen die Fahrspuren deutlich davon ab. Die tiefsten Fahrspuren *FS-C* sind aufgrund der sehr niedrigen Werte als deutlich kritisch anzusehen. Ähnlich niedrige Werte sind allerdings auch in *FS-A* zu beobachten, was der Hypothese widerspricht. Zwar wurden verringerte Werte erwartet, doch sollte laut Hypothese *FS-B* zwischen den genannten Varianten liegen. Die Luftleitfähigkeit in *FS-B* ist jedoch entgegen den Erwartungen höher als in *FS-A*. Dies könnte auf den höheren Sandgehalt in *FS-B* zurückzuführen sein, der auch als Ursache für die höhere gesättigte Wasserleitfähigkeit angenommen wird. Es ist anzunehmen, dass Unterschiede in der Bodenart durch ein anderes Porensystem Änderungen in der Luftleitfähigkeit hervorrufen. Es ist zudem annehmbar, dass der geringfügig höhere Sandgehalt in *FS-B* trotz höheren Wassergehalts während der Befahrung zu einer weniger stark ausgeprägten Scherung von Bodenporen und somit besserem Erhalt der Porenkonnektivität bei geringerer Tortuosität der Poren in diesen Fahrspurböden verglichen mit den etwas schluffreicheren Böden von *FS-A* und *FS-C* geführt hat. Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die Luftleitfähigkeit in allen Fahrspuren gestört ist und somit nachteilig für das Pflanzenwachstum und an oxidative Bedingungen angepasste Bodenorganismen ist. Aufgrund des nicht eindeutigen Gradienten lässt sich für diesen Parameter aber keine kritische Grenze der Fahrspureintiefung ausmachen.

## 2.7 Eisenstabreaktion (TV1)

**Forschungsfrage:** Welche Unterschiede hinsichtlich der Sauerstoffversorgung zwischen Fahrspurböden und unbefahrenen Waldflächen lassen sich mit Hilfe der Reaktion blanker Eisenstäbe ableiten?

**Hypothese:** Die Reaktion unbehandelter, blanker Eisenstäbe findet in Abhängigkeit der Zusammensetzung des mit Wasser bzw. Luft gefüllten Porenraumes statt. Infolge von Verdichtungsunterschieden zwischen Fahrspuren und unbefahrenen Referenzparzellen, verfügen Fahrspuren über ein verringertes Porenvolumen, das deren Wasserhaushalt beeinflusst. Durch stagnierendes Bodenwasser ist die Nachlieferung von  $O_2$  in Fahrspurböden gehemmt, wodurch Oxidationsreaktionen von Eisenstäben (Rostbildung) in geringerem Umfang stattfinden als in den gut mit Sauerstoff versorgten, unbefahrenen Kontrollparzellen. Das Merkmal „Patina“ („Anlaufen“ von Eisenstäben), das auf geringe Sauerstoffkonzentrationen schließen lässt, tritt in Fahrspuren indes in den Vordergrund. Die Verringerung des Rostanteils, bzw. Zunahme der Patinaausbildung,

steht dabei in Zusammenhang mit der Fahrspurtiefe, da die Sauerstoffversorgung mit zunehmender Fahrspurtiefe abnimmt. Besonders nach langanhaltenden Trockenphasen lassen sich eindeutige Unterschiede zwischen den Behandlungen feststellen.

### 2.7.1 Material & Methoden



**Abbildung 29: Eisenstäbe im fabrikneuen, blanken Zustand (A) sowie nach 14-tägiger Exposition in Fahrspuren mit vorwiegend grau-stumpfer Patinaausbildung (B) und unbefahrenen Referenzparzellen, bei denen das Merkmal Rost (rötlich-braun) dominiert (C) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).**

Die Eisenstabmethode stellt ein simples Verfahren dar, das dazu geeignet ist, einen Beitrag zur Charakterisierung der Redoxbedingungen bzw. insbesondere der Sauerstoffversorgung von Böden zu leisten. Durch Zählen der Hammerschläge, die zum Eintreiben eines Stabes in einen Boden benötigt werden, kann die Methode zudem genutzt werden, um grobe Unterschiede im Verdichtungsgrad zu detektieren (Eindringwiderstand, ähnlicher einer Rammsondierung). Wesentliche Inspiration zur Anwendung der Methode in verdichteten Fahrspurböden sowie Hinweise zur Durchführung gehen auf Fründ (2020) zurück und sind dort nachzulesen. Zuvor wurde die Methode bereits zu verschiedenen Fragestellungen erprobt (Owens et al. 2008, Müller-Inkmann et al. 2016, Fründ und Averdick 2016, Dittrich et al. 2017).

Für die Versuchsdurchführung wurde das Gesamtkollektiv aller zur Verfügung stehenden Versuchsgassen (18 Stück, beide Behandlungen *Ref* und *FS*) genutzt. Je Versuchsgassenbehandlung wurden 4 geeignete Laufmeter (bzw. Quadratmeter in den Referenzparzellen) ausgewählt und jeder in 4 Transekte im Abstand von 15 cm zueinander unterteilt, wobei, bei den Fahrspuren, zwischen den beiden äußeren Transekten und der Fahrspuraußenkante jeweils etwa 5 cm Abstand eingehalten wurde.

Jedes Transekt wurde einem Beprobungszeitraum zugeordnet, der den Jahreszeiten entsprach (die Beprobung begann im Frühling), wobei die Abfolge der Transekte (also der Jahreszeiten) in jedem der 4 Laufmeter variierte, um den Einfluss möglicher Unterschiede innerhalb der Fahrspurposition aufgrund von Variabilität der Verdichtung zwischen Spurmitte und Spurrand (siehe Abbildung 14) zwischen den Replikaten einer Jahreszeit möglichst gleich zu halten. Je Versuchsgassenbehandlung und Jahreszeit wurden somit 4\*3 Eisenstäbe ausgebracht, während des gesamten Versuchsdurchlaufs 1728 Stück.

Zur Durchführung des Versuchs wurden je Transekt 3 Probepunkte im Abstand von etwa 35 cm zueinander festgelegt. In jeden dieser Probepunkte wurden zuvor über 10 min im Ethanolbad (> 95 Gew.-%) gereinigte und auf 32 cm abgelängte Eisenstäbe (unlegierter Baustahl S235JRC+C, Werkstoff 1.0122 nach EN 10277, Abbildung 29, A) mit einem Durchmesser von 5 mm und angespitztem Ende (60°) bis in eine Tiefe von -30 cm

unter Geländeoberkante (uGOK) durch gleichmäßige Hammerschläge eingeschlagen und dabei die Anzahl der benötigten Schläge gezählt. Der Überstand von 2 cm wurde später genutzt, um die Stäbe aus dem Boden zu ziehen. Um den aktuellen Bodenzustand zu erfassen wurde eine Expositionszeit von 14 Tagen gewählt. Dieser Zeitraum wurde zuvor in Vorversuchen eruiert und im Vergleich zu anderen Zeiträumen für den vorliegenden Zweck als am geeignetsten befunden.

Während des Expositionszeitraumes reagierten die Eisenstäbe mit der umgebenden Bodenmatrix in Abhängigkeit der Sauerstoffsättigung und des Wassergehalts des Bodens (Abbildung 29, B+C). Die Reaktion der Stäbe ist dabei unterschiedlich und zeichnet sich durch variable Anteile und Ausprägungsgrade der verschiedenen Erscheinungsformen aus und kann als Hinweis für oxidative bzw. reduktive Bodenverhältnisse verwendet werden. Nach Owens et al. (2008) bilden die Eisenstäbe unter wassergesättigten Bodenbedingungen und niedriger Sauerstoffkonzentration in der Bodenlösung (ca.  $< 2 \text{ mg l}^{-1}$ ) keinen Rost, sondern dunkel gefärbte Überzüge aus. Fründ (2020) beschreibt diese als „grau bis schwarz, matt, stumpf“ und ordnet ihnen die Bezeichnung „Patina“ zu. In feuchten Böden mit Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenluft von etwa  $> 5 \%$  entwickeln sich auf den Eisenstäben flächige Eisenoxid-/Oxyhydroxid-Überzüge („Rost“) intensiver Färbung (7.5 YR 4/4 bis 5/8), während sich die Berostungsintensität bei Sauerstoffkonzentrationen zwischen 2-5 % variabel gestaltet und auf punktuelle Unterschiede der Sauerstoffkonzentrationen hinweist (Owens et al. 2008). Liegen dagegen trockene Bodenverhältnisse mit hohen Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenluft vor ( $> 12 \%$ ), tritt die Ausbildung von Berostungsmerkmalen zurück, die Eisenstäbe verbleiben „unverändert, blank“ (Fründ 2020). Für die Erfassung und Auswertung der Erscheinungsformen wurden die von Fründ (2020) verwendeten Bezeichnungen („Blank“, „Patina“, „Rost“) übernommen.

Nach dem Ziehen der Stäbe mit Hilfe einer Wasserpumpenzange wurden diese unverzüglich und vorsichtig mit einem feinen Pinsel und demineralisiertem Wasser gereinigt, mit Zellstoff trocken getupft und dann direkt in einen auf  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  vorgeheizten Trockenschrank übergeben, in dem sie über einen Zeitraum von 12 h trockneten. Direkt im Anschluss erfolgte eine tiefenstufenweise Beurteilung der Merkmalsausprägung der Eisenstäbe in 2 cm Abschnitten nach einem visuellen Verfahren. Dabei wurden die Anteile der Merkmale „Blank“, „Patina“ und „Rost“ je Segment nach einem 5-stufigen Klassensystem (0 %, 1-25 %, 26-50 %, 51-75 %, 76-100 %) angesprochen. Nach Beurteilung sämtlicher Stäbe wurden diese regeneriert und für die Wiederverwendung im nächsten Beprobungszeitraum vorbereitet. Dies umfasste im Wesentlichen das Abschleifen der Stäbe mit Schleifpapier verschiedener Körnungen (180, 240) und die anschließende, erneute Reinigung im Ethanolbad.

### Auswertung

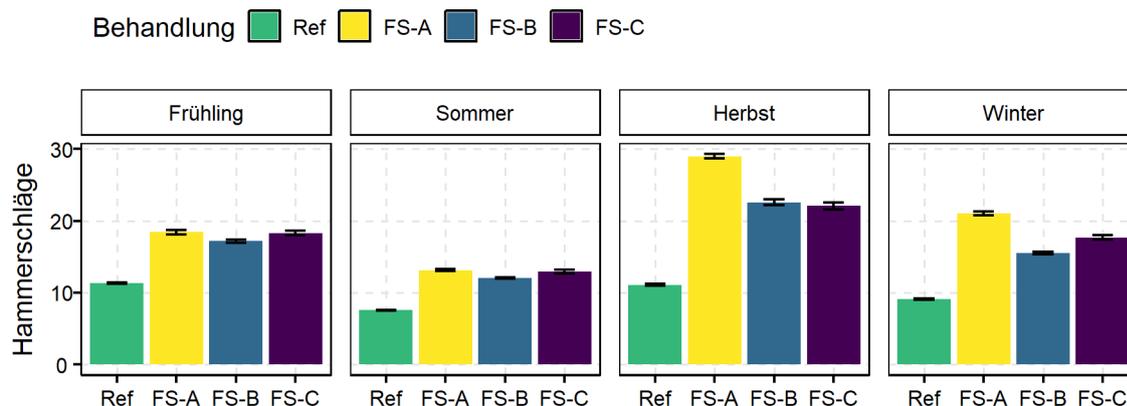
Die Daten zur Merkmalsausprägung der Eisenstäbe (Blank, Patina, Rost) wurden aus Formularbögen per Makro in eine MS-Excel-Tabelle übertragen, dort aufbereitet und anschließend an R übergeben, wo sie weiter verarbeitet wurden. In R wurde der Datensatz in einem mehrstufigen Prozess aggregiert. Im ersten Schritt fand die Berechnung der Häufigkeiten der Zuordnungen in die Bewertungsklassen (0 % = Klasse 0, 1-25 % = Klasse 1, 26-50 % = Klasse 2, 51-75 % = Klasse 3, 76-100 % = Klasse 4) je Merkmal statt, wobei die Daten nach Jahreszeit, Behandlung, Versuchsgasse, Stabwiederholung je Laufmeter und Tiefenstufe zusammengefasst wurden. Diese Häufigkeiten wurden anschließend zu einem häufigkeitsgewichteten Mittelwert verrechnet.

Beispiel: An den drei Stäben eines Laufmeters (4 Laufmeter mit je 3 Eisenstäben = 12 Eisenstäbe je Versuchsgasse) der Behandlung FS-A wurde in Versuchsgasse VG23 während des Beprobungszeitraumes „Frühling“ in Tiefenstufe 0-2 cm das Merkmal „Patina“ folgendermaßen angesprochen: Klasse 0: 0 x, Klasse 1: 0 x, Klasse 2: 0 x, Klasse 3: 2 x, Klasse 4: 1 x. Aus der Häufigkeitsverteilung dieser Beurteilung wurde der gewichtete Mittelwert errechnet:  $(0 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 4) / 3 = 3,33$ . Nachfolgend fand eine Mittelwertbildung aus den vier laufmeterweise gewichteten Mittelwerten auf Ebene der Versuchsgassen statt (Versuchsgasse = echte Wiederholung). Diese Werte wurden in einem letzten Aggregationsschritt in einen arithmetischen Mittelwert  $\pm$  Standardfehler je Jahreszeit, Behandlung, Tiefenstufe und Merkmal zusammengefasst (Ref: n = 18, FS-A: n = 6, FS-B: n = 6, FS-C: n = 6). Das Ergebnis der merkmalsweisen Berechnung des Tiefenverlaufs ist in Abbildung 31 dargestellt. Beachtet werden muss, dass der auf der x-Achse ablesbare Klassenwert nicht dem realen prozentualen Anteil der Merkmale am Gesamterscheinungsbild entspricht, sondern, wie beschrieben, aus Verrechnung von Merkmalsklassen zustanden gekommen ist, die ihrerseits eine Spannweite von Merkmalsausprägungen zusammenfassen.

Für die statistische Auswertung wurden die 2 cm-Tiefenstufen in drei Tiefenstufen-Gruppen zusammengefasst ( $> 0 \text{ cm}$  und  $\leq 10 \text{ cm}$ ,  $> 10 \text{ cm}$  und  $\leq 20 \text{ cm}$ ,  $> 20 \text{ cm}$  und  $\leq 30 \text{ cm}$ ) und die daraus abgeleiteten häufigkeitsgewichteten Mittelwerte mit Hilfe gemischter linearer Modelle (R-Paket lme4::lmer) analysiert. Die Versuchsbehandlungen wurden dabei als *fixed-effects* und die Versuchsgassen als *random-effects* berücksichtigt. Unter Verwendung der R-Pakete emmeans (Lenth 2021) und multcomp (Hothorn et al. 2008) wurden abschließend multiple Vergleiche angestellt.

## 2.7.2 Ergebnisse

Zur Exposition der Eisenstäbe im Gelände wurden diese mit einem Schonhammer durch gleichmäßige Schläge in den Boden getrieben. Die Anzahl der benötigten Schläge wurden dabei stabweise gezählt und können als grobe Orientierungsgröße für Unterschiede im Verdichtungsgrad der Böden genutzt werden.



**Abbildung 30: Mittlere Anzahl zum Eintreiben benötigter Hammerschläge  $\pm$  95%-Konfidenzintervalle nach Jahreszeiten und Behandlungen.**

Aus Abbildung 30 geht hervor, dass unabhängig von den Versuchszeiträumen (Jahreszeiten) in den Böden der unbefahrenen Referenzparzellen erwartungsgemäß die geringsten Anzahlen an Schlägen benötigt wurden, um die Eisenstäbe 30 cm tief in den Boden zu schlagen. Während der Versuchszeiträume Frühling (März 2021) und Sommer (Juni 2021), in denen im Verhältnis hohe Bodenfeuchten vorlagen, wurden in den Fahrspuren grob 60 % mehr Schläge benötigt, zwischen den Fahrspurbehandlungen waren die Unterschiede jedoch gering. Die Diskrepanz zwischen unbefahrenen Waldparzellen und den Fahrspuren nahm unter trockeneren Bodenbedingungen während des Zeitraumes Herbst (September 2021) deutlich zu, sodass in den Fahrspuren von *FS-B* und *FS-C* etwa doppelt so viele und in *FS-A* sogar etwa + 160 % Schläge notwendig waren. Im Untersuchungszeitraum Winter (Dezember 2021) war die Schlagzahl bei *FS-A* mit + rd. 130 % immer noch deutlich erhöht, in Fahrspurbehandlung *FS-C* dagegen wurden weiterhin rd. doppelt so viele Schläge benötigt, in Variante *FS-B* verringerte sich der Mehraufwand auf etwa + 75 %. Im Vergleich zur Messung der Trockenrohdichten (II.2.2) findet sich allerdings kein Zusammenhang zwischen den benötigten Hammerschlägen und der Fahrspurtiefe. Die Methodik zeigt daher nur an, dass es eine Verdichtung gibt, aber nicht wie stark diese ausgeprägt ist. Ursache für den fehlenden Zusammenhang liegt vermutlich in den unterschiedlichen Bodenfeuchten der Fahrspurböden, die den Eindringwiderstand beeinflussen.

Klassen: 0 = 0 % 1 = 1-25 % 2 = 26-50 % 3 = 51-75 % 4 = 76-100 %

Behandlung Ref FS-A FS-B FS-C

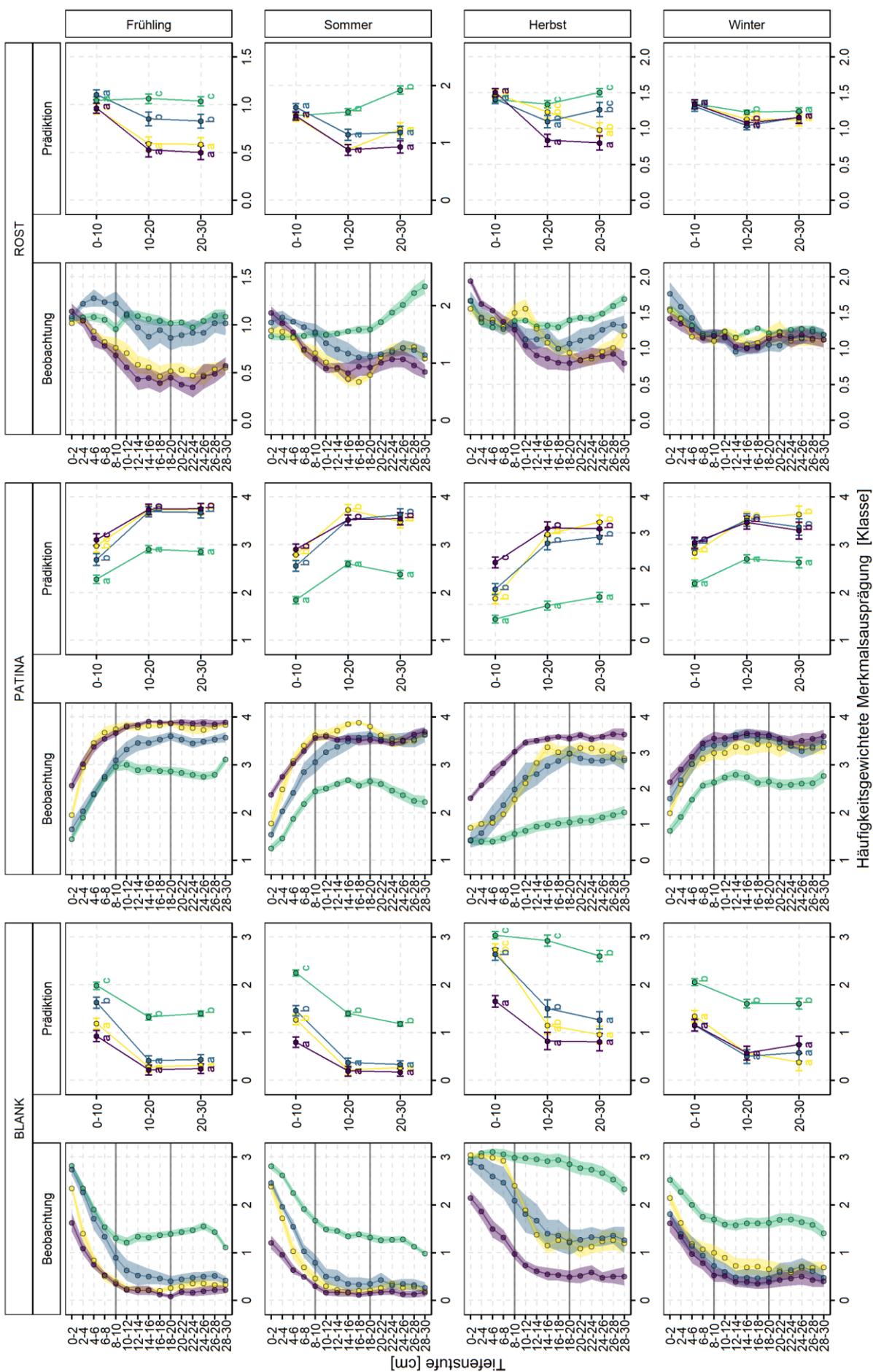


Abbildung 31: Häufigkeitsgewichteter Tiefenverlauf der Ausprägungen der Merkmale „Blank“, „Patina“ und „Rost“ von blanken Eisenstäben nach 14-tägiger Exposition während der vier Untersuchungszeiträume Frühling, Sommer, Herbst und Winter ± Standardfehler (farbliche Schraffierung im Hintergrund). Die beobachteten Werte

(„Beobachtung“) sowie das Ergebnis der Modellprädiktionen („Prädiktion“) aus der statistischen Analyse der zusammengefassten Tiefenstufen  $> 0$  cm bis  $\leq 10$  cm,  $>10$  cm bis  $\leq 20$  cm und  $> 20$  cm bis  $\leq 30$  cm (Mittelwerte; estimated marginal means) werden gegenübergestellt. Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen je Tiefenstufe an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5$  %).

Die verdichtungsbedingten Unterschiede beim Eindringwiderstand (benötigte Hammerschläge) schlagen sich auch in den Reaktionen der Eisenstäbe während des Kontakts mit dem Drei-Phasen-System Boden nieder. Während der Zeiträume mit hoher Bodenfeuchte, insbesondere im Frühling und Winter, aber auch im Sommer 2021 (vgl. Abbildung 24), fand am Großteil der Eisenstäbe eine Reaktion statt, wodurch das Merkmal „Blank“, das als Indikator für das Fehlen von Wasser betrachtet werden kann, ab einer Bodentiefe von etwa 10 cm mehr oder weniger vollständig zurück tritt (Abbildung 31). Lediglich in den ersten 10 cm des Bodens scheinen noch Bereiche des Porensystems wasserarm bis wasserfrei bzw. mit Luft gefüllt zu sein. Infolge der hohen Sättigungsgrade mit Wasser, reagieren die Eisenstäbe während dieser Untersuchungszeiträume vorwiegend mit der Ausprägung hoher Anteile von „Patina“ – dem Merkmal, das auf geringe Sauerstoffkonzentrationen in der Bodenluft / dem Bodenwasser schließen lässt – bei gleichzeitig geringster Intensität des Merkmals „Blank“. Das Merkmal „Rost“ – für dessen Entwicklung (Oxidationsreaktion) sowohl Wasser als auch ausreichend Sauerstoff vorhanden sein muss – hatte zu allen Untersuchungsperioden den geringsten Anteil an der Oberflächenveränderung der Eisenstäbe. Nach länger anhaltender, trockener Witterungsperiode, wie dies durch die vorangegangenen Sommermonate im Beprobungszeitraum Herbst der Fall war, veränderten sich infolge abnehmender Bodenwassergehalte auch die Reaktionen der Eisenstäbe in Richtung höherer „Blank“- und geringerer „Patina“-Anteile, während die Rostbildung keine Veränderungen zeigte.

Hinsichtlich der Behandlungen gibt es insbesondere bedeutende Unterschiede zwischen den unbefahrenen Referenzparzellen (*Ref*) und den Fahrspuren im Allgemeinen, wohingegen sich die Fahrspurböden untereinander relativ ähnlich sind. Auf den *Ref*-Parzellen ist der Anteil an Stabbereichen, auf denen keine Reaktion stattfand („Blank“), zu allen Zeiträumen und Tiefenstufen signifikant am höchsten, bei gleichzeitig signifikant geringsten Anteilen der Anhaftungen des Typs „Patina“. Obgleich anhand von Rostausbildungen nur geringe Unterschiede zwischen Fahrspuren und Referenzparzellen gefunden werden konnten, besteht die Tendenz, dass innerhalb des Unterbodens ( $> 10$  cm Bodentiefe) der unbefahrenen Referenzparzellen zumindest während der Zeitpunkte Frühling, Sommer und Herbst der höchste Rostbesatz an den Eisenstäben ausgebildet wird. Das Zusammenspiel der Merkmalsausprägungen sowie deren zeitliche Kontinuität lassen darauf schließen, dass die nicht befahrungsbedingt verdichteten Referenzböden im Vergleich zu den Fahrspurböden deutlich intensiver mit Luft und somit Sauerstoff versorgt werden, wie sich dies auch aus der Beschaffenheit des Porensystems und der Leitfähigkeiten ableiten lässt (siehe Abbildung 17 sowie Abbildung 20 und Abbildung 21).

Im Kontrast dazu stehen die Ergebnisse der Fahrspuren, aus denen eine eingeschränkte Bodenbelüftung und Sauerstoffversorgung insbesondere des Unterbodens geschlossen werden können. Hier zeigt sich, dass – mit Ausnahme des Zeitraumes Herbst sowie der ersten 10 cm unter Geländeoberfläche – stets Reaktionen der Eisenstäbe unter Ausbildung grau-schwarz gefärbter, stumpfer „Patina“ ablaufen, die Flächenanteile zwischen 51-100 % annehmen. Dementsprechend liegt der „Blank“-Anteil in den Fahrspuren auf niedrigem Niveau oder ist kaum vorhanden. Hervorzuheben ist jedoch, dass der obere Bodenbereich  $< 10$  cm bedingt durch die geringere Diffusionsstrecke sich von tiefergelegenen Bereichen des Bodens dahingehend unterscheidet, dass dort höhere „Blank“- und „Rost“- sowie geringere „Patina“-Anteile feststellbar sind und vielfach eine Annäherung der Stabeigenschaften der Fahrspuren zu den Eigenschaften der Referenzparzellen stattfindet. Die Tendenz zur Annäherung der Merkmalsausprägungen ist darüber hinaus besonders während des Beobachtungszeitraumes Herbst nach langanhaltender Trockenheit feststellbar. Hier kommt es innerhalb der ersten 10 cm des Bodens der Fahrspuren der Typen A und B zu Abnahmen der Merkmalsanteile von „Patina“ und zu Zunahmen der „Blank“-Anteile, was für einen Anstieg der Luft- bzw. Sauerstoffversorgung zu diesem Zeitpunkt spricht. Der Effekt bleibt jedoch auf Fahrspuren  $\leq 20$  cm beschränkt und konnte für Fahrspuren  $> 20$  cm (*FS-C*) nicht bzw. nur in sehr abgeschwächter Form festgestellt werden, sodass die „Patina“- und „Blank“-Anteile in 0-10 cm von *FS-C* signifikant niedriger bzw. höher zu den beiden anderen Fahrspurbehandlungen liegen.

Erwähnenswert ist auch, dass Fahrspurbehandlung *FS-B* während des Beobachtungszeitraumes Frühling insbesondere in den ersten 10 cm des Bodens, aber auch in größerer Tiefe, sich von den beiden anderen Spurbehandlungen absetzt und im oberen Bereich des Bodens kaum Unterschiede zur Variante Referenz zeigt. In abgeschwächter Form ist dies auch während des Zeitraumes Sommer feststellbar und lässt vermuten, dass Standortsunterschiede in Form abweichender Bodenarten zwischen den süd- und nordexponierten Flächen bestehen, wobei die Spuren der Variante *FS-B* ausschließlich auf dem nordexponierten Hang verteilt lagen.

### 2.7.3 Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Hypothese kann bestätigt werden, dass die mit einer ausreichenden Sauerstoffversorgung in Verbindung stehende Rostbildung innerhalb der Fahrspurböden in deutlich geringerem Umfang stattfindet als

in den Referenzböden und stattdessen die Ausprägung von Patina in den Fahrspurböden das vorherrschende Merkmal ist. Dagegen weicht der erwartete Zusammenhang zwischen Spurtiefe und Ausmaß der Patinaausbildung zumindest während der Zeiträume mit tendenziell höherer Bodenfeuchte von der Annahme ab. Hier konnten kaum Unterschiede zwischen den Fahrspuren gefunden werden – das Merkmal Patina ist in allen drei Fahrspurbehandlungen ähnlich dominant, was auf vergleichbar niedrige Sauerstoffversorgung der Fahrspurböden schließen lässt.

Die durchweg geringen „Blank“- und indes hohen „Patina“-Anteile auf den Eisenstäben der Fahrspurböden bei gleichzeitig geringer Rostentwicklung zeigen tiefgreifende (mindestens bis in 30 cm Bodentiefe) Durchlüftungsstörungen bzw. einen Mangel an Sauerstoffzufuhr an, von dem ausgehend eine Wirkung auf Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln und infolgedessen auf das Redoxpotential der Böden zu erwarten ist. In Fahrspuren, die Tiefen von 20 cm nicht überschreiten (FS-A + FS-B), scheint nach Zeiträumen geringer Niederschläge und hoher Temperaturen, die eine Austrocknung der Böden begünstigen (Ende Sommer/Herbst), tendenziell eine Wiederbelüftung ausgehend von der Bodenoberfläche stattzufinden, was in Fahrspuren > 20 cm (FS-C) unter den gegebenen Bedingungen (2021) nicht festgestellt werden konnte.

## 2.8 Gasflussmessungen (TV1)

*Forschungsfrage: Welchen Einfluss hat die Befahrung auf die Respiration und den Gasaustausch von Bodenorganismen, d.h., welcher quantitative Effekt auf die Emissionen der Spurengase CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> ist messbar?*

*Hypothese:* Veränderungen des Luft- und Wasserhaushaltes und des Nahrungsangebotes (organische Substanz) von Fahrspurböden nehmen Einfluss auf die Aktivität der Mikroorganismengesellschaft, was sich im Kohlenstoffumsatz niederschlägt. Durch verminderte Bodenrespiration (*in situ*) und den eingeschränkten Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre andererseits, sind auf Fahrspurböden während des überwiegenden Teils des Jahres niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen mit den nicht verdichteten Waldböden messbar. Lediglich während länger anhaltender Trockenzeiträume mit hohen Luft- und Bodentemperaturen, kehrt sich das Verhältnis ins Gegenteil (Auflösung des verdichtungsinduzierten Anstaus von Gasen innerhalb der Fahrspurböden), sodass auf Fahrspuren höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen messbar sind. Durch zunehmend anoxische bzw. anaerobe Verhältnisse werden Veränderungen der mikrobiellen Stoffwechselprozesse hervorgerufen, sodass es zu erhöhten N<sub>2</sub>O-Emissionen und verringerten CH<sub>4</sub>-Aufnahmen kommen kann.

## 2.8.1 Material & Methoden



**Abbildung 32:** Auf der Versuchsfläche aufgestellte und verschlossene Respirationshauben (A+B), Methode der Überführung einer Gasprobe in eine Sammelspritze (C) sowie zur Befüllung vorbereitete Exetainer während einer Beprobung *in situ* (D) (Fotos: © Siebrecht, U.).

Die Messung der Bodenatmung ( $\text{CO}_2$ -Produktion zwischen zwei bzw. mehreren Zeitpunkten) erfolgte unter Verwendung von dauerhaft auf der Versuchsfläche installierten Messkammern (Abbildung 32, A+B). Dabei handelte es sich um auf eine Länge von 30 cm gekürzte Abschnitte von Abwasserrohren aus Polyvinylchlorid, die während der Messung mit einem Deckel verschlossen wurden. Je Versuchsgasse wurden insgesamt 10 Messkammern installiert, jeweils 5 innerhalb der Behandlung *Fahrspur* und 5 weitere in der *Referenz*. Die Messhauben wurden beim Einbau etwa 6-8 cm in den Boden eingesetzt, um die Humusaufgabe zu durchstoßen und einen sicheren und dauerhaften Stand zu gewährleisten. Zur Bestimmung des exakten Volumens wurde anschließend in jeder Haube an vier Stellen (kreuzweise) die Innenwandhöhe gemessen.

Insgesamt war somit die Herstellung von 180 Messhauben sowie die Fertigung derselben Anzahl an Verschlussdeckeln (8 mm Stärke) notwendig. Um den Dichtschluss der Hauben während einer Messung sicherzustellen, wurde auf der Unterseite der Verschlussdeckel eine Lage Moosgummi (5 mm) aufgeklebt. Auf der Oberseite wurden die Deckel mit zwei Löchern durchbohrt, in die zwei Winkelschraubstutzen eingesetzt wurden. An diesen wurden während der ersten Messkampagne zwischen 2018-2020 zwei Schläuche übergeschoben, die mit dem  $\text{CO}_2$ -Messgerät (Vaisala Handheld  $\text{CO}_2$  Meter GM70) verbunden waren. Über eine Pumpe saugte das Gerät die zu analysierende Luft aus der Messkammer an und maß anschließend die  $\text{CO}_2$ -Konzentration mittels eines NDIR-Sensors. Das aus dem Gerät ausströmende Gas wurde nachfolgend wieder in die Kammer zurückgeführt.

Im Versuchsjahr 2018 konnten ausschließlich die Situationen S1-S6 (siehe Tabelle 1), bestehend aus Rückegassen mit Fahrspuren des Typs *FS-B* (10-20 cm) und deren Referenzparzellen (*Ref-B*), beprobt werden, da noch nicht alle Versuchsflächen ausgewählt waren. In 2018 fand die Messung der Bodenatmung in einem Intervall von 7 Tagen statt. Ab Januar 2019 stand das Gesamtkollektiv aller Versuchsgassen und Messpunkte zur Verfügung (180 Messkammern) und das Messintervall wurde aufgrund des erheblichen Arbeitsaufwandes bis Dezember 2020 auf 14 Tage verlängert, wobei in *FS-B* und *Ref-B* noch bis etwa Ende Februar 2019 im wöchentlichen Intervall gemessen wurde.

Der Messvorgang lief im Detail folgendermaßen ab: Nach Aufsuchen eines Probepunktes (Messkammer) wurden mit einem digitalen Barometer und einem digitalen Einstich-Thermometer der aktuelle Luftdruck (hPa)

und die Lufttemperatur (°C) bestimmt. Das Vaisala-Messgerät (CO<sub>2</sub>-Messgerät) verfügt über eine integrierte Temperatur- und Luftdruckkompensation, die eine regelmäßige Eingabe der beiden Messgrößen erforderlich machen, um korrekte Ergebnisse zu erhalten. Bei Veränderung dieser Variablen um 1 hPa bzw. 1°C wurden die Werte im Gerät stets angepasst. Nachfolgend wurde das Einstich-Thermometer genutzt, um die aktuelle Bodentemperatur zu bestimmen. Hierfür wurde die Nadel in etwa 10 cm Entfernung zur Messkammer etwa 10 cm vertikal in den Boden gedrückt. Zur eigentlichen Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde der Haubendeckel zunächst dazu genutzt, um durch mehrfaches Wedeln einen Luftaustausch in der Messkammer zu erreichen. Anschließend wurde die Messkammer mittels des Deckels verschlossen, der In- und Output-Schlauch der Pumpe auf die Winkelstutzen aufgesetzt und die Pumpe eingeschaltet. Bei Erreichen eines konstanten Messwertes nach einer Spülzeit von etwa 1-2 min wurde der angezeigte Initial-Wert in ppm (parts per million) CO<sub>2</sub> abgelesen. Danach wurden – zusammen mit der Uhrzeit – alle erhobenen Werte in ein vorbereitetes Formular eingetragen, die Schläuche von den Stutzen abgezogen und diese mit Silikongummis verschlossen. Nach einer Anreicherungszeit von etwa 1-2 h (variabel je nach Wegstrecke) wurde der Messvorgang (außer Bodentemperaturmessung) wiederholt und die End-Konzentration bestimmt.

Mit Ende des Jahres 2020 wurde die regelmäßige Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung mittels des portablen Messgeräts (Vaisala) eingestellt.

Zwischen März 2021 und Dezember 2021 erfolgte eine modifizierte Beprobung eines Teilkollektives der Messhauben (108 Stück) nach veränderter und zuvor in Vorversuchen geprüfter Methode, um zusätzlich die Gasflüsse von N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> zu erfassen. Hierfür wurde das Messstellennetz auf 108 Messkammern reduziert (18 Versuchsgassen \* 2 Behandlungen \* 3 Hauben). Jeder Messzylinder wurde zudem mit Verschlussvorrichtungen versehen und ein mehrfach verwendbares Drei-Lagen-Silikonseptum über ein gebohrtes Loch auf den Haubendeckel aufgeklebt. Durch dieses „pooling“-Verfahren konnte der Probenumfang verringert und weiterhin alle 18 Versuchsgassen und Behandlungen beprobt werden, sodass die Anzahl an Wiederholungen statistisch ausreichend blieb (Ref. n = 18; FS-A, FS-B und FS-C: n = 6).

Das Probenahmeschema wurde dahingehend verändert, dass 20 ml Probenluft mittels einer gasdichten Spritze (Firma SGE) nach vier Zeitpunkten gewonnen und dann in mit N<sub>2</sub> gespülte und evakuierte Glasbehälter (Exetainer 12 ml, Firma Labco) überführt wurden (Abbildung 32, C+D). Die gasdichte Spritze war mit einem 3-Wege-Hahn versehen, an dem eine Kanüle angebracht war, die über das auf den Haubendeckel geklebte Silikonseptum in die Messkammer eingeführt wurde. Vor der Probengewinnung wurde das Haubenvolumen – wie beschrieben – durch mehrfaches Wedeln mit dem Deckel durch frische Außenluft ersetzt und dann der Deckel über die Verschlussvorrichtungen abgeschlossen. Nach Einstechen der Kanüle über das Septum bzw. vor jeder Probengewinnung, fand eine dreifache Spülung der Spritze durch Aufziehen und Rückführen der Luft in die verschlossene Messkammer statt. Statt jede Messhaube einzeln zu beproben, wurden die zu analysierenden Gasproben aller Messhauben einer Versuchsgassenbehandlung und Zeitpunkt (3 Hauben je Behandlung) zunächst in einer 100 ml Gasspritze (Firma SGE), an der ebenfalls ein 3-Wege-Hahn montiert war, gebündelt, dadurch homogenisiert und erst dann ein Teilvolumen (20 ml) in einen vorbereiteten Exetainer überführt, in dem dann ein leichter Überdruck entstand. Insgesamt wurde eine Anreicherungsdauer von 30 min gewählt und im Abstand von 10 min Gasproben nach dem geschilderten Vorgehen gewonnen (4 Zeitpunkte: 0 min, 10 min, 20 min, 30 min). Nach Lagerung der Proben im Kühlraum bei etwa 8°C fand die nachfolgende Analyse (CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Konzentrationen) an einem stationären Gaschromatographen an der Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften statt.

### Auswertung

Die Daten, die zwischen 2018-2020 mit Hilfe des mobilen Messgerätes zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gesammelt wurden, wurde folgendermaßen ausgewertet: Die im Feld erfassten Werte zu Uhrzeit, Luft- und Bodentemperatur sowie Luftdruck wurden aus den Formularen mit Hilfe eines Makros in eine MS-Excel-Tabelle übertragen und dort mit weiteren Probeninformationen, wie beispielsweise dem Haubenvolumen, verknüpft. Anschließend fand in MS-Excel die Berechnung von haubenweisen arithmetischen Mittelwerten für die Bodentemperatur, der Lufttemperatur und den Luftdruck aus den Anfangs- und Endmessungen statt. Diese Mittelwerte wurden verwendet, um zusammen mit den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Anfangs- und Endmessungen die CO<sub>2</sub>-Flüsse (mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) für jede Haube nach untenstehenden Formeln (z.B. Badeck et al. 2007) zu berechnen. Nach Einlesen der Datensätze in R wurden diese ab März 2019 mit Daten zur Bodenwasserspannung verknüpft (Mediane von Versuchsgasse, Behandlung und Zeitpunkt der Respirationsmessung) und dann zunächst auf Ebene der Versuchsgassen und Messwiederholung gemittelt (je Versuchsgassen ein arithmetischer Mittelwert aus Gasflüssen von 5 Messhauben). Anschließend fand eine weitere arithmetische Mittelwertbildung je Behandlung (Fahrspurbehandlungen: n = 6, Referenz: n = 18) statt.

Entsprechend der Abwandlung der Methode der Probenahme wurde auch das Vorgehen bei der Auswertung des Datensatzes des Versuchsjahres 2021 angepasst, in dem, wie oben beschrieben, neben CO<sub>2</sub> zusätzlich die Gase N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> mithilfe eines stationären Gaschromatographens (GC) analysiert wurden. Vergleichbar mit den Versuchsjahren 2018-2020, erfolgte nach der Probenahme im Feld eine Übertragung der erfassten Probeninformationen zu Uhrzeiten, Luft- und Bodentemperaturen und Luftdruck in eine MS-Excel-Tabelle, wo sie mit weiteren Informationen verknüpft und arithmetische Mittelwerte der genannten Parameter aus Anfangs-

und Endmessungen bestimmt wurden. Aus den Rohdaten der GC-Analyse fanden in MS-Excel zunächst Berechnungen der Gaskonzentrationen je Probe und Messzeitpunkt statt. Für diese Berechnungen wurden (je Messserie = Probenahmezeitpunkt) Regressionsfunktionen aus den Peakflächen von vier Prüfgasen mit bekannten Stoffkonzentrationen abgeleitet (Kalibrationsfunktion). Für CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O wurde die bestmögliche Anpassung im untersuchten Wertebereich durch quadratische, für CH<sub>4</sub> durch lineare Regression erreicht (R<sup>2</sup> > 0,99). Aufgrund geringer Variation der Injektionsmengen bei der Analyse durch den Gaschromatographen wurden sowohl die Daten der Standardgase als auch der Analyten auf einen einheitlichen Probenschleifendruck normiert (Injektionsmengen-Normalisierung). In R fand eine Plausibilitätsprüfung der Daten je Probenahmezeitpunkt statt, bei der nötigenfalls fehlerhafte Messwerte entfernt wurden. Anschließend wurden aus den vier zusammengehörenden Messwerten je Probe (Gaskonzentrationen in den Hauben zu den Zeitpunkten 0 min, 10 min, 20 min und 30 min) die Steigung berechnet (lineare Regression). Unter Verwendung der nachstehenden Formeln (Gleichung 1 und Gleichung 2) wurden dann die Gasflüsse abgeleitet, die zu Darstellungszwecken anschließend in arithmetische Mittelwerte je Behandlung (Fahrspurbearbeitungen: n = 6, Referenz: n = 18) verrechnet wurden.

### Gasflussberechnung

$$F_{Gas} = \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{(M_{Gas} \times V_H)}{V_m \times A} \times R$$

#### **Gleichung 1: Formel zur Berechnung der Gasflüsse**

mit:

$F_{Gas}$  = Gasfluss [ $\mu\text{g}$  bzw.  $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ]

$\frac{\Delta c}{\Delta t}$  = Konzentrationsanstieg bzw. -abfall pro Stunde [ $\text{ppmV h}^{-1}$  bzw.  $\text{ppbV h}^{-1}$ ]

$M_{Gas}$  = Molmasse für CO<sub>2</sub>-C [ $12 \text{ g mol}^{-1}$ ]; N<sub>2</sub>O-N [ $28 \text{ g mol}^{-1}$ ]; CH<sub>4</sub>-C [ $12 \text{ g mol}^{-1}$ ]

$V_H$  = Volumen der Haube [l]

$V_m$  = Molvolumen für CO<sub>2</sub> [ $22,26 \text{ l mol}^{-1}$ ]; N<sub>2</sub>O [ $22,25 \text{ l mol}^{-1}$ ], CH<sub>4</sub> [ $22,38 \text{ l mol}^{-1}$ ]

$A$  = Bodenfläche der Haube [ $\text{m}^2$ ]

$$R = \frac{p_a \times 273,15 \text{ K}}{1013,25 \text{ hPa} \times (273,15 \text{ K} + T_a)}$$

#### **Gleichung 2: Reduktionsfaktor zur Berechnung des Gasvolumens auf Normbedingungen**

mit:

$R$  = Reduktionsfaktor [dimensionslos]; Berechnung des Gasvolumens auf Normbedingungen (0°C und 1013 hPa)

$p_a$  = aktueller Luftdruck zum Zeitpunkt der Probenahme [hPa]

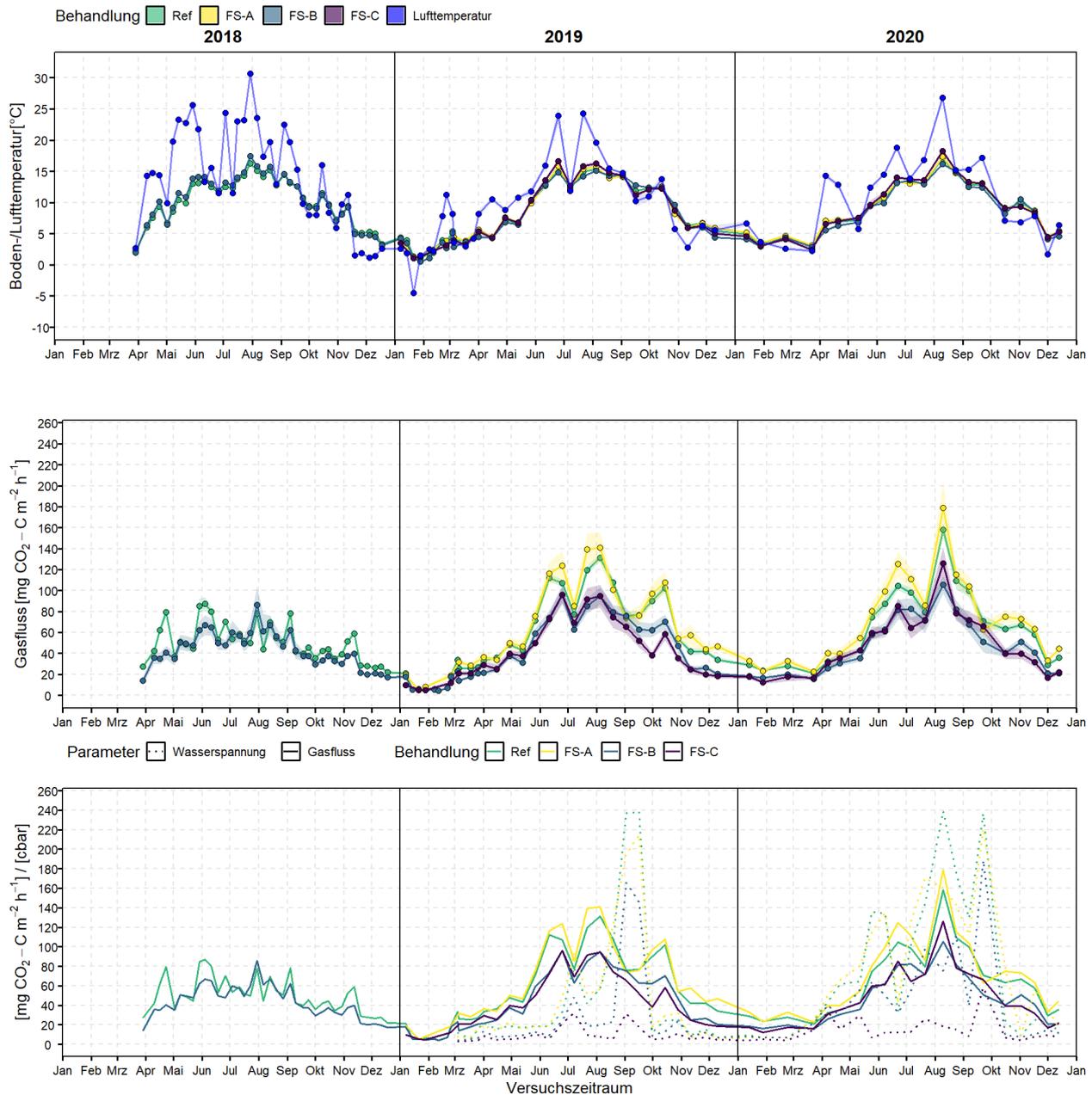
$T_a$  = aktuelle Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Probenahme [°C]

Der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Freisetzung zwischen März 2019 bis Dezember 2020 wurde in R mittels eines verallgemeinerten additiven gemischten Modells (GAMM, R-Paket *mgcv* (Wood 2011)) analysiert. Bei der Analyse stand die Frage im Vordergrund, ob bzw. in welchen Zeiträumen bedeutende Unterschiede hinsichtlich der Bodenatmung der Behandlungen bestehen und welchen Einfluss die Bodenwasserspannung auf die Gasfreisetzung nimmt. Im Modell wurde daher der Gasfluss in Abhängigkeit der Behandlungen modelliert und dabei die Bodentemperatur sowie der Median der Bodenwasserspannung als nicht-lineare Prädiktoren genutzt. Die potenzielle Korrelation durch die Gruppierung der Messungen (Wiederholungen an den Hauben, Hauben gruppiert in Versuchsgassen) wurde durch die Einbeziehung von *random intercepts* für die Hauben-ID und die Versuchsgassen-ID berücksichtigt. Eine potenzielle zeitliche Korrelation durch longitudinale Messungen wurde mit einer autoregressiven Korrelationsstruktur erster Ordnung (Funktion *corAR1* in Paket *mgcv*) berücksichtigt. Als Verteilungsmodell wurde eine Gammaverteilung mit log-Link-Funktion genutzt. Das Modell erzielte ein angepasstes R<sup>2</sup> von 0,69. Des Weiteren wurden zwei Hilfsmodelle (GAM) - zur Erstellung geeigneter Prädiktionen aus dem Hauptmodell - eingesetzt, mit denen Tageswerte für die Bodentemperatur und die Bodenwasserspannung über den gesamten Versuchsverlauf behandlungsweise prädiziert wurden (angepasstes R<sup>2</sup> von 0,91 bzw. 0,53). Der Datensatz des Jahres 2018 wurde aufgrund der oben beschriebenen Besonderheiten gesondert ausgewertet. Für diesen stand auch keine Information zur Bodenwasserspannung zur Verfügung, da diese erst ab März 2019 gemessen wurde. Hier erzielte das Modell ein angepasstes R<sup>2</sup> von 0,48, das Hilfsmodell der Bodentemperatur einen Wert von 0,91.

Um die paarweisen Differenzen im geschätzten Erwartungswert der Bodenatmung zwischen den Behandlungen über die Zeit hinweg abschätzen zu können, wurden mit der Funktion *gam.mh* aus dem *mgcv*-Paket Ziehungen aus der Posteriori-Verteilung der Modellparameter generiert (wie z.B. für eine ähnliche Analyse beschrieben in Baayen et al. (2008)). Anhand dieser Ziehungen ist es möglich, posteriori-Wahrscheinlichkeiten für paarweise, gerichtete Differenzen (Abbildung 35) im geschätzten bedingten Erwartungswert,  $E(CO_2 - C \mid \text{Behandlung})$ , zwischen zwei Behandlungsausprägungen zu berechnen. Hierbei ergeben sich für die Vergleiche  $P_{\text{posterior}}(E(CO_2 - C \mid \text{Ref}) > E(CO_2 - C \mid \text{FS} - C))$ ,  $P_{\text{posterior}}(E(CO_2 - C \mid \text{Ref}) > E(CO_2 - C \mid \text{FS} - B))$ ,  $P_{\text{posterior}}(E(CO_2 - C \mid \text{FS} - A) > E(CO_2 - C \mid \text{FS} - B))$  und  $P_{\text{posterior}}(E(CO_2 - C \mid \text{FS} - A) > E(CO_2 - C \mid \text{FS} - C))$  über den gesamten Versuchszeitraum Wahrscheinlichkeiten von numerisch 100 %.

## 2.8.2 Ergebnisse

### Versuchsjahre 2018-2020



**Abbildung 33: Mittlerer Verlauf von Luft- und Bodentemperatur (obere Grafik), beobachteter CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungs-Gasfluss (Bodenatmung, mittlere Grafik) sowie eine Zusammenstellung aus den Mittelwerten der Bodenrespiration und den Medianen der Bodenwasserspannung (untere Grafik) der Jahre 2018-2020. Die schattierten Bereiche im Hintergrund der Ganglinien der mittleren Grafik geben zudem Information über die Streuung der Daten als  $\pm$  ein Standardfehler.**

Hinsichtlich der Temperaturverläufe ist feststellbar, dass die Bodentemperaturen erwartungsgemäß der Dynamik der Lufttemperaturen folgen und einen typischen Jahresverlauf mit höheren Werten während der

Sommermonate (etwa April/Mai bis September/Oktober) und geringeren Werten während der Wintermonate (etwa Oktober/November bis März/April) aufweisen (Abbildung 33). Die Lufttemperaturen sind dabei größeren kurzfristigen Schwankungen unterlegen als die Bodentemperaturen und erreichen darüber hinaus auch höhere bzw. niedrigere Werte als die Bodentemperaturen, deren Entwicklung mit gewisser zeitlicher Verzögerung erfolgt und glatter verläuft. Zwischen den Behandlungen bestehen nur geringe Bodentemperaturunterschiede von wenigen Zehntel °C, mit der Tendenz, dass in Fahrspurbehandlung FS-C etwas geringere Bodentemperaturen in den Wintermonaten und leicht höhere in den Sommermonaten gemessen werden konnten.

**Tabelle 8: Mittlerer Gasflüsse (CO<sub>2</sub>) ± Standardabweichung nach Jahreszeiten und Behandlungen der Jahre 2018-2020.**

Behandlung	Jahr	Zeitraum	Messwiederholungen	CO <sub>2</sub> -C-Flux [mg CO <sub>2</sub> -C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]
Ref-B	2018	Mai-Oktober	27	54,4 ± 15,9
FS-B	2018	Mai-Oktober	27	50,4 ± 13,8
Ref-B	2018	November-April	11	41,3 ± 19,1
FS-B	2018	November-April	11	27,4 ± 10,2
Ref-B	2018	Gesamtjahr	38	50,6 ± 17,7
FS-B	2018	Gesamtjahr	38	43,7 ± 16,5
Ref	2019	Mai-Oktober	13	89,8 ± 26,1
FS-A	2019	Mai-Oktober	13	95,2 ± 30,1
FS-B	2019	Mai-Oktober	13	69,1 ± 18,2
FS-C	2019	Mai-Oktober	13	64,2 ± 21,4
Ref	2019	November-April	18	23,5 ± 14,7
FS-A	2019	November-April	12	31,6 ± 16,4
FS-B	2019	November-April	18	16,5 ± 9,5
FS-C	2019	November-April	12	19,2 ± 10,2
Ref	2019	Gesamtjahr	31	51,3 ± 38,8
FS-A	2019	Gesamtjahr	25	64,7 ± 40,3
FS-B	2019	Gesamtjahr	31	38,6 ± 29,7
FS-C	2019	Gesamtjahr	25	42,6 ± 28,3
Ref	2020	Mai-Oktober	11	89,8 ± 30,1
FS-A	2020	Mai-Oktober	11	99,3 ± 34,4
FS-B	2020	Mai-Oktober	11	66,9 ± 20,6
FS-C	2020	Mai-Oktober	11	69,7 ± 23,1
Ref	2020	November-April	10	35,8 ± 14,8
FS-A	2020	November-April	10	40,4 ± 16,4
FS-B	2020	November-April	10	26 ± 11,6
FS-C	2020	November-April	10	23,9 ± 9,5
Ref	2020	Gesamtjahr	21	64,1 ± 36,2
FS-A	2020	Gesamtjahr	21	71,3 ± 40,3
FS-B	2020	Gesamtjahr	21	47,4 ± 26,7
FS-C	2020	Gesamtjahr	21	47,9 ± 29,2

Bedeutendere Unterschiede sind bei der Bodenrespiration festzustellen: Im Allgemeinen steht die CO<sub>2</sub>-Freisetzung in engem Zusammenhang mit der Bodentemperatur als wichtige Steuerungsgröße für die Aktivität der Bodenorganismen, sodass niedrigere Emissionen im Winter (geringste Werte etwa im Februar) und höhere im Sommer (höchste Werte im August) gemessen werden konnten. Im Versuchsjahr 2018, in dem mit den Gasmessungen Ende März begonnen wurde, lässt sich bereits der Trend erkennen, dass in FS-B während der überwiegenden Zeit des Jahres weniger CO<sub>2</sub> aus den Fahrspuren verglichen mit Ref-B freigesetzt wurde (siehe auch Tabelle 8). Der beschriebene Trend bestätigte sich auch in den Folgejahren 2019 und 2020, in denen die Bodenatmung, im Winter- wie im Sommerzeitraum, sowohl in der Behandlung FS-B als auch in FS-C, durchgehend niedriger ausfiel als in den Vergleichsparzellen Ref, was in Relation einer verringerten aeroben Bodenatmung in FS-B und FS-C von jeweils etwa -21 % entspricht (Durchschnitt aus den Mittelwerten der Gesamtjahre 2019-2020). Gegenteilig verhält es sich in Fahrspurbehandlung FS-A, in der über den gesamten Beobachtungszeitraum im Mittel ca. +19 % CO<sub>2</sub> emittiert wurde.

Übereinstimmend mit der Darstellung der beobachteten Werte (vgl. Abbildung 33), liegen die mittels eines verallgemeinerten additiven gemischten Modells modellierten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten der Jahre März 2019-Dezember 2020 (Abbildung 34) von FS-B und FS-C – gemäß der Modell-Koeffizienten – mit im Mittel

42 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (FS-B) respektive 37,5 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (FS-C) deutlich unter den Werten von FS-A und Ref. In FS-A wird mit 62 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> dagegen ein höheres Niveau als in Ref (56,5 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) erreicht.

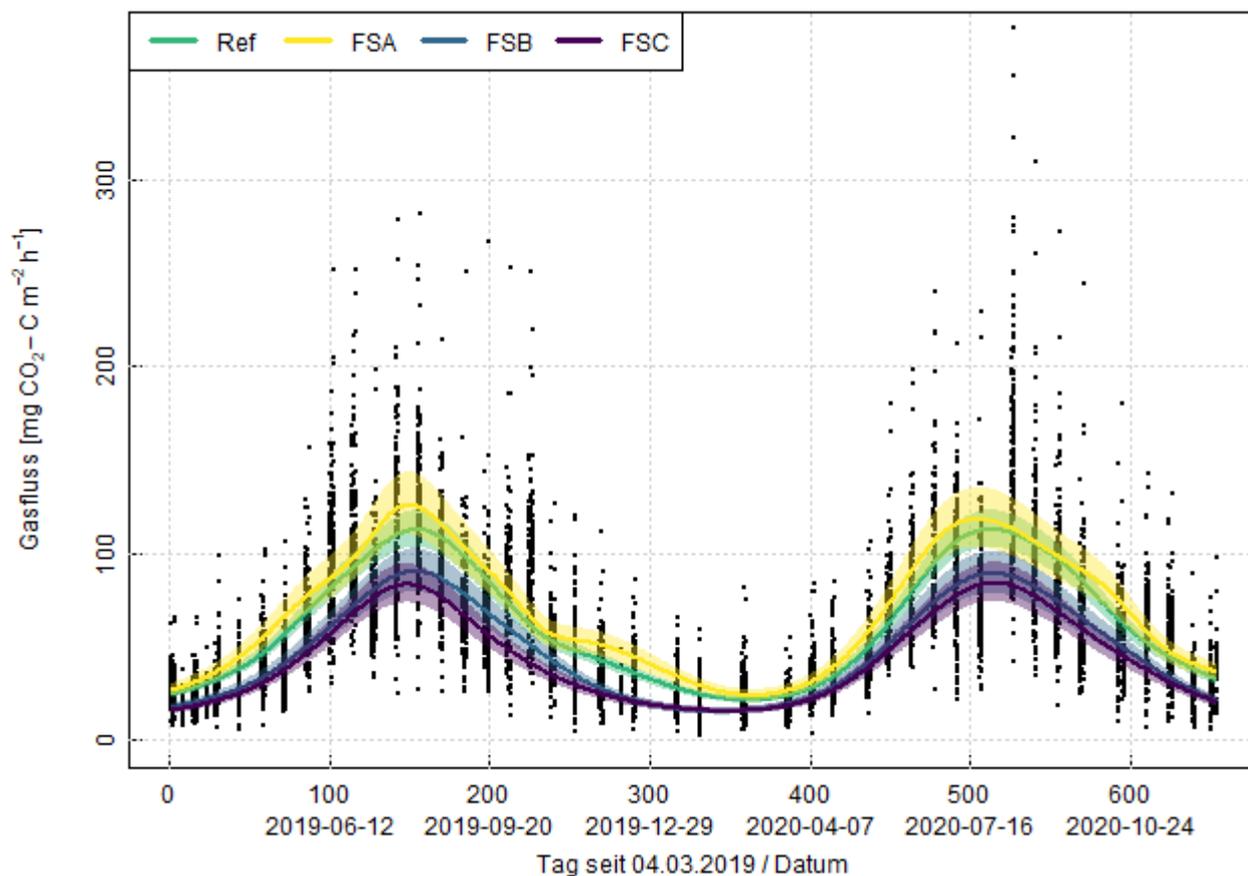
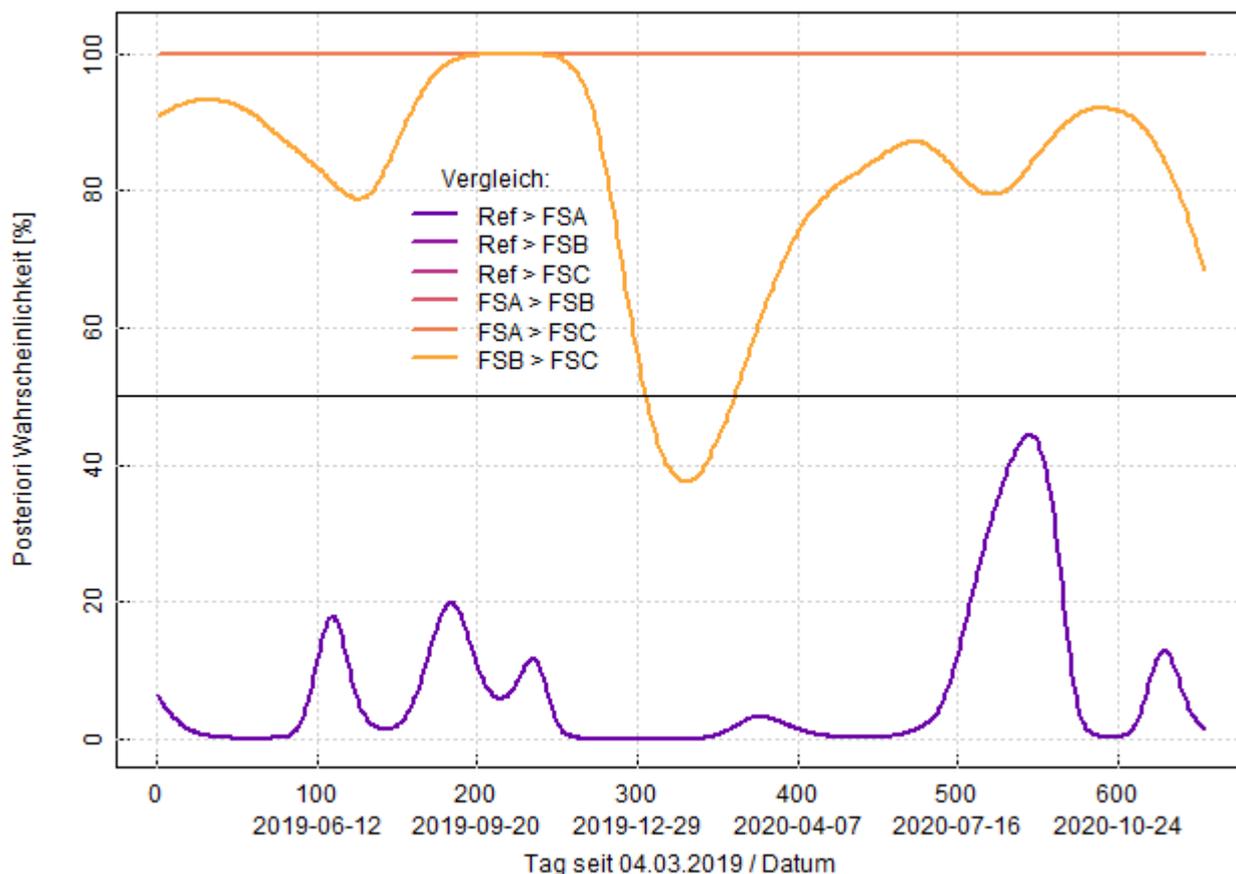


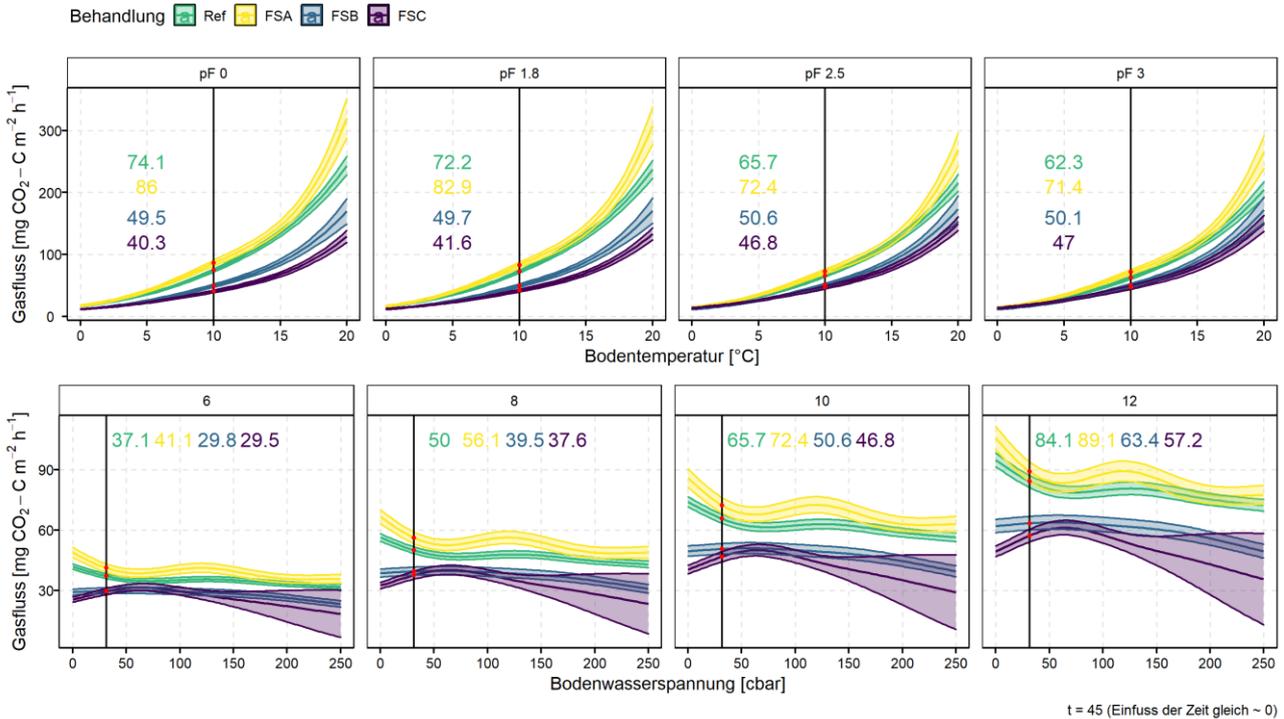
Abbildung 34: Modellierter Verlauf der behandlungsweisen CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungen der Jahre 2019-2020 mit simultanen Unsicherheitsintervallen in Abhängigkeit von Bodenwasserspannung und -temperatur.



**Abbildung 35: Posteriori-Wahrscheinlichkeiten für alle paarweisen Differenzen des modellierten Verlaufs der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung der Jahre 2019-2020. Die posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Vergleiche von Ref>FS-B, Ref>FS-C und FS-A>FS-B verlaufen wie die des Vergleichs FS-A>FS-C während des gesamten Beobachtungszeitraumes bei 100 %, weswegen die einzelnen Ganglinien nicht sichtbar und durch den Vergleich FS-A>FS-C überdeckt werden.**

Der geschätzte Erwartungswert der Bodenatmung in FS-B und FS-C ist damit, im Vergleich zu Ref und FS-A, nachweislich verringert (Abbildung 35). Der Vergleich zwischen FS-B und FS-C dagegen zeigt zwar ebenfalls, dass in FS-B während der überwiegenden Versuchsdauer mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ( $\geq 80\%$ ) mehr CO<sub>2</sub> aus den Fahrspuren 10-20 cm (FS-B), verglichen mit Fahrspuren 20-30 cm (FS-C), freigesetzt wurde, jedoch dieser Trend während der Wintermonate Mitte Dezember 2019 (Tag 284) – Ende April 2020 (Tag 421) an Eindeutigkeit verlor bzw. zwischen dem 04.01.2020 (Tag 306) und dem 27.02.2020 (Tag 360) sogar zeitweilig indifferente Verhältnisse bzgl. des Unterschieds bestanden oder sich dieser kurzzeitig mit geringem Ausmaß ins Gegenteil kehrte (Wahrscheinlichkeit  $< 50\%$ ). Der geschätzte bedingte Erwartungswert der Bodenatmung ist bei wenig intensiver Fahrspurbildung (Fahrspuren 0-10 cm, FS-A) verglichen mit der unbefahrenen Referenz (Ref) während des gesamten Versuchszeitraumes 2019-2020 tendenziell vergrößert  $P_{posterior}(E(CO_2 - C \vee Ref) > E(CO_2 - C | FS - A)) \leq 20\%$ . Ausnahme bildet der Zeitraum 18.08.2020 – 08.09.2020, innerhalb dieser 21 Tage übersteigt dieser Vergleich eine Wahrscheinlichkeit von 40 %, jedoch mit größerer Unsicherheit bezüglich des Vorzeichens der Differenz  $E(CO_2 - C \vee Ref) - E(CO_2 - C | FS - A)$  im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Differenzen.

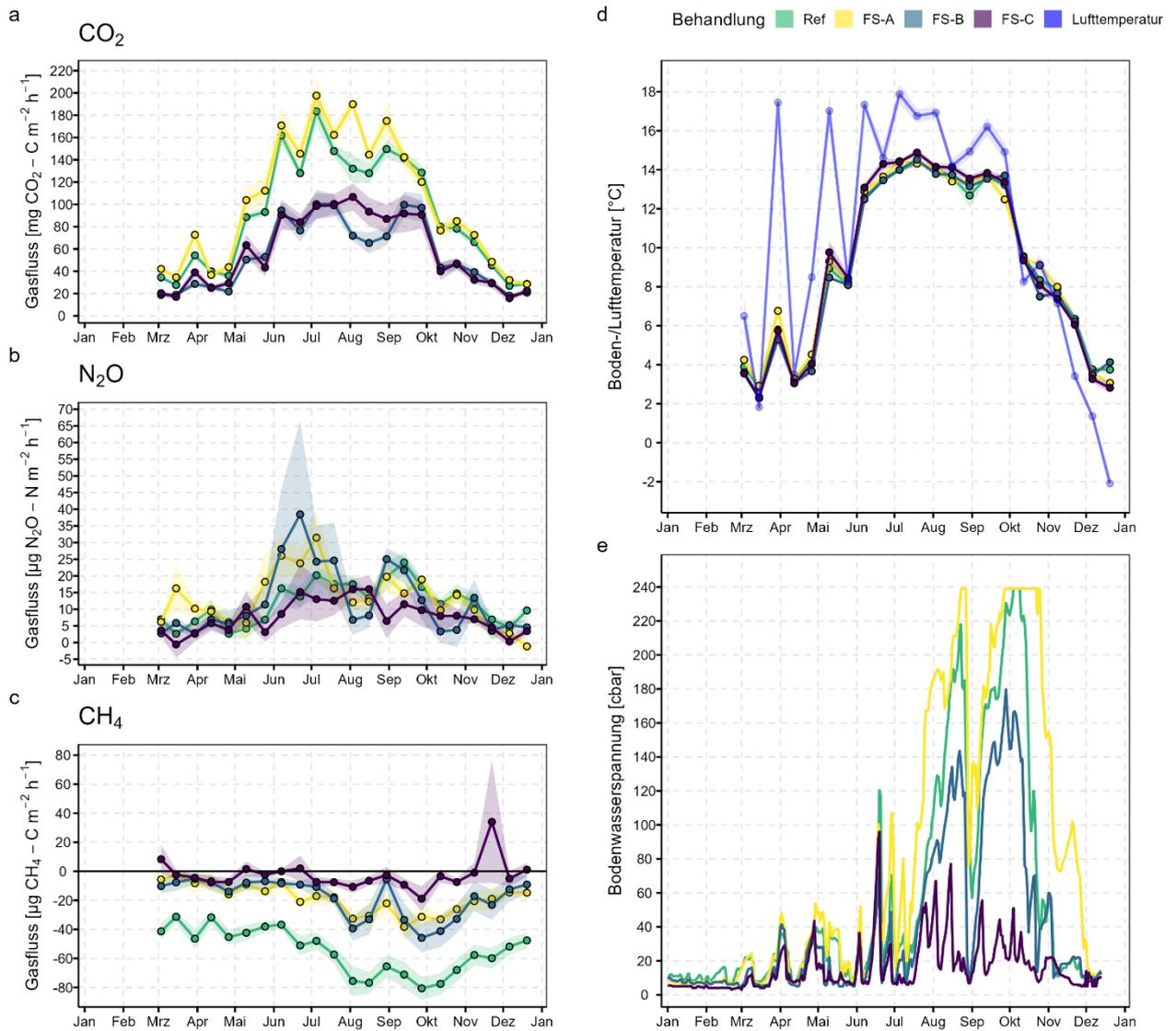
Die Modellierung wurde zudem genutzt, um die Einflüsse von Bodentemperatur und Bodenwasserspannung auf die Freisetzung von CO<sub>2</sub> zu prüfen (Abbildung 36).



**Abbildung 36: Einfluss variierender Bodenwasserspannung und Bodentemperatur auf die CO<sub>2</sub>-Flüsse in den Behandlungen.** Der obere Teil der Abbildung zeigt modellierte CO<sub>2</sub>-C-Gasflüsse unter variierenden Bodenwasserspannungen (Zunahme der Bodenwasserspannung von pF 0  $\hat{=}$  0 kPa bis pF 3  $\hat{=}$  100 kPa; Anstieg entspricht einer Austrocknung der Böden) und zunehmenden Bodentemperaturen, wobei zur Veranschaulichung des Effekts das Ergebnis des CO<sub>2</sub>-C-Flusses bei einer Bodentemperatur von 10°C angegeben ist. Im unteren Teil der Abbildung ist ebenfalls die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzungen bei ansteigender Trockenheit dargestellt, jedoch in Abhängigkeit unterschiedlicher Bodentemperaturen (6°C, 8°C, 10°C und 12°C). Die angegebenen Gasflüsse beziehen sich auf den Zeitpunkt t = 45 Tage (seit 04.03.2019), zu dem der modellierte Einfluss der Zeit gleich 0 ist.

Aus Abbildung 36 geht eine unterschiedliche Reaktion der Böden auf Veränderungen der Bodenfeuchte hervor. Es zeigt sich, neben dem grundsätzlichen Effekt ansteigender Gasflüsse bei zunehmenden Bodentemperaturen, der unter allen dargestellten Bodenfeuchten gegeben ist, dass bei konstant 10°C Bodentemperatur in den Behandlungen *Ref* und *FS-A* eine Zunahme der Bodenwasserspannung von pF 0 zu pF 3 mit einer Abnahme der Gasfreisetzung (CO<sub>2</sub>) verbunden ist, eine Veränderung der Bodenfeuchte in diesem Wertebereich in Fahrspur *B* (10-20 cm) dagegen keinen Effekt auf das freigesetzte CO<sub>2</sub> hat. In Fahrspurbehandlung *FS-C* (20-30 cm) bewirken trockenere Bodenbedingungen stattdessen eine Zunahme der Gasflüsse, mit einem angedeuteten Optimum bei 60-70 kPa Wasserspannung. Dies verändert sich jedoch bei Werten der Bodenwasserspannung, die ~ 100 kPa überschreiten, wie dies im Gesamtverlauf der CO<sub>2</sub>-C-Freisetzung bei 10°C (untere Abbildung, zweites Panel von rechts) gegeben ist. Während der Gasfluss in Behandlung *Ref* bei 10°C ab Bodenwasserspannungen > 100 kPa relativ konstant bleibt, steigt er in *FS-A* (0-10 cm) zwischen 100 und 150 kPa erneut an und fällt anschließend zunehmend ab. In Behandlung *FS-B* ist bei Bodenfeuchten > 100 kPa von einer leichten, aber kontinuierlich abnehmenden CO<sub>2</sub>-Produktion auszugehen. Dies gilt auch für *FS-C*. Dort besteht jedoch mehr Unsicherheit über den zu erwartenden Verlauf des Gasflusses. Vergleichbare Muster sind auch bei niedrigeren und höheren Bodentemperaturen gegeben.

## Versuchsjahr 2021



**Abbildung 37: Ergebnis der Gasflussmessungen des Jahres 2021 differenziert nach den mittleren, beobachteten Gasflüssen von  $\text{CO}_2$  (a),  $\text{N}_2\text{O}$  (b) und  $\text{CH}_4$  (c). Die Streuung der Messdaten (Standardfehler) wird durch die farbliche Schraffierung im Hintergrund der Ganglinien repräsentiert. Zudem zeigt die Abbildung die Verläufe der Boden- und Lufttemperatur (d) sowie der Mediane der Bodenwasserspannung (e).**

Aufgrund des hohen Einflusses der Temperatur auf die Aktivität der Bodenorganismen (und Pflanzen), steht der Verlauf der Bodenatmung ( $\text{CO}_2$ ) und der  $\text{CH}_4$ -Emissionen in engem Zusammenhang zur Entwicklung der Bodentemperatur (Abbildung 37). Für  $\text{CO}_2$  bedeutet dies eine vergleichsweise niedrige Bodenatmung während der Wintermonate (November – April) und eine hohe während des Sommers (Mai – Oktober). Bei  $\text{CH}_4$  ist ebenfalls eine Zunahme der Methanoxidation in den Sommermonaten zu erkennen (Behandlung *Ref*). Beim Spurengas  $\text{N}_2\text{O}$  ist dieser Zusammenhang nicht vorhanden.

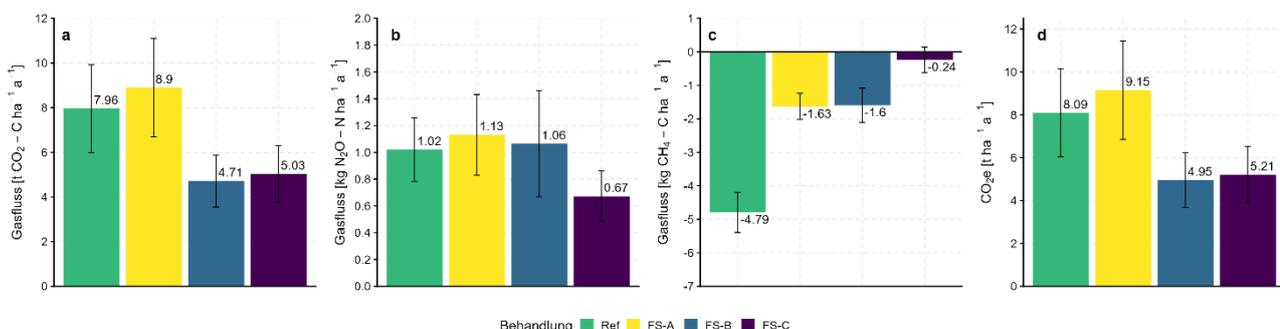
**Tabelle 9: Mittlere Gasflüsse (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) ± Standardabweichung des Jahres 2021 differenziert nach Jahreszeiten und Behandlungen.**

Behandlung	Jahr	Zeitraum	Messwiederholungen	CO <sub>2</sub> -C-Flux [mg CO <sub>2</sub> -C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]	N <sub>2</sub> O-N-Flux [µg N <sub>2</sub> O-N m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]	CH <sub>4</sub> -C-Flux [µg CH <sub>4</sub> -C m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]
Ref	2021	Mai-Oktober	13	126,1 ± 32,6	15 ± 5,3	-60,7 ± 15,9
FS-A	2021	Mai-Oktober	13	140,2 ± 38,4	17 ± 6,6	-23,2 ± 9,8
FS-B	2021	Mai-Oktober	13	74 ± 21,3	16,7 ± 11	-22,6 ± 15,2
FS-C	2021	Mai-Oktober	13	79,5 ± 23	10,6 ± 3,8	-5,9 ± 5,4
Ref	2021	November-April	9	39,9 ± 13,2	6,8 ± 3,2	-46 ± 10,1
FS-A	2021	November-April	9	45,8 ± 16,4	7 ± 5,1	-12 ± 6,3
FS-B	2021	November-April	9	24,6 ± 6,9	5,6 ± 3,3	-11,9 ± 5,6
FS-C	2021	November-April	9	25,6 ± 7,6	3,4 ± 2,4	1,8 ± 13
Ref	2021	Gesamtjahr	22	90,8 ± 50,6	11,6 ± 6,1	-54,7 ± 15,4
FS-A	2021	Gesamtjahr	22	101,6 ± 56,6	12,9 ± 7,7	-18,6 ± 10,1
FS-B	2021	Gesamtjahr	22	53,8 ± 30	12,2 ± 10,2	-18,2 ± 13,2
FS-C	2021	Gesamtjahr	22	57,5 ± 32,5	7,7 ± 4,9	-2,7 ± 9,8

Die Unterschiede zwischen den Referenzparzellen und den Fahrspurbehandlungen in den CO<sub>2</sub>-C-Flüssen im Jahr 2021 (Abbildung 37, a) ähneln den Unterschieden, die in den Jahren 2018-2020 gefunden wurden (vgl. Abbildung 33). Demzufolge besteht ein ausgeprägter Unterschied zwischen *Ref* & *FS-A* einerseits und *FS-B* und *FS-C* andererseits (siehe auch Tabelle 9). Mit wenigen Ausnahmen wurden während des gesamten Beobachtungszeitraumes 2021 in Fahrspuren *FS-A* (0-10 cm) die höchsten Raten der Bodenatmung gemessen (im Jahresmittel ca. 102 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>; rd. + 12 % zu *Ref*). Die freigesetzten Mengen CO<sub>2</sub> liegen aber nahe an den unbefahrenen Referenzböden, auf denen im Jahresmittel ca. 91 mg CO<sub>2</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> emittiert wurden. In Fahrspurböden, die 10 cm bzw. 20 cm Tiefe überschreiten (*FS-B* und *FS-C*), ist dagegen eine anhaltende Reduktion der Bodenatmung festzustellen, die sich in Respirationsraten äußern, die im Jahresmittel grob 60 % der Fahrspurbehandlung *Ref* entsprechen.

Die Produktion von N<sub>2</sub>O (Abbildung 37, b) hingegen ist durch eine zeitliche Variabilität geprägt, die kein einheitliches Muster ergibt und insgesamt nur zu geringen Unterschieden zwischen den Behandlungen führt. Besonders die Fahrspurbehandlungen *FS-A*, *FS-B* sowie *Ref* weisen bei den gemittelten Gasflüssen (Tabelle 9) hohe Ähnlichkeiten im Jahresverlauf auf, sodass die mittleren N<sub>2</sub>O-Flüsse sowohl während der Sommermonate mit im Mittel rd. 15-17 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> als auch der Wintermonate nahe beieinander liegen (rd. 6-7 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Lediglich bei vereinzelt Messterminen, im Wesentlichen zwischen Juni-Juli 2021, stieg die N<sub>2</sub>O-Produktion bei den Behandlungen *FS-A* und *FS-B* sprunghaft an. Der Anstieg blieb aber teils auf einzelne Versuchsgassen beschränkt, wodurch sich der hohe Standardfehler in Behandlung *FS-B* erklärt. Indizien für permanent veränderte N<sub>2</sub>O-Flüsse während des Jahresverlaufs sind in Behandlung *FS-C* zu erkennen, in denen die N<sub>2</sub>O-Flüsse mit wenigen Ausnahmen auf niedrigstem Niveau und insgesamt etwa 30 % niedriger als in *Ref* liegen.

Die Befahrung des Waldbodens auf Rückegassen nimmt indes starken Einfluss auf die mikrobielle Methanoxidation in allen Fahrspurböden (Abbildung 37, c). Während in den unbefahrenen Referenzparzellen ein konstanter Methanabbau erfolgt, der im gesamten Jahresverlauf unabhängig vom Messtermin gegeben ist und im Jahresmittel bei ca. -55 µg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> liegt, ist in den Fahrspurbehandlungen ein beträchtlicher Rückgang der CH<sub>4</sub>-Aufnahme um ca. 65 % (*FS-A* + *FS-B*) bzw. 95 % (*FS-C*) nachweisbar. Der Rückgang ist bei den Behandlungen *FS-A* und *FS-B* nahezu identisch ausgeprägt (Mittelwert 2021: rd. -18 µg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Fahrspuren zwischen 20-30 cm (*FS-C*) heben sich nochmals von diesen ab und zeigen einen beinahe vollständigen Verlust der CH<sub>4</sub>-Oxidation (Jahresmittelwert: rd. -3 µg CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Zudem kommt es in Fahrspuren der Behandlungen *FS-C* zu Ereignissen, bei denen sich die Böden zu Methanquellen wandeln. Diese traten jedoch nur sehr vereinzelt und punktuell in wenigen Versuchsgassen auf.

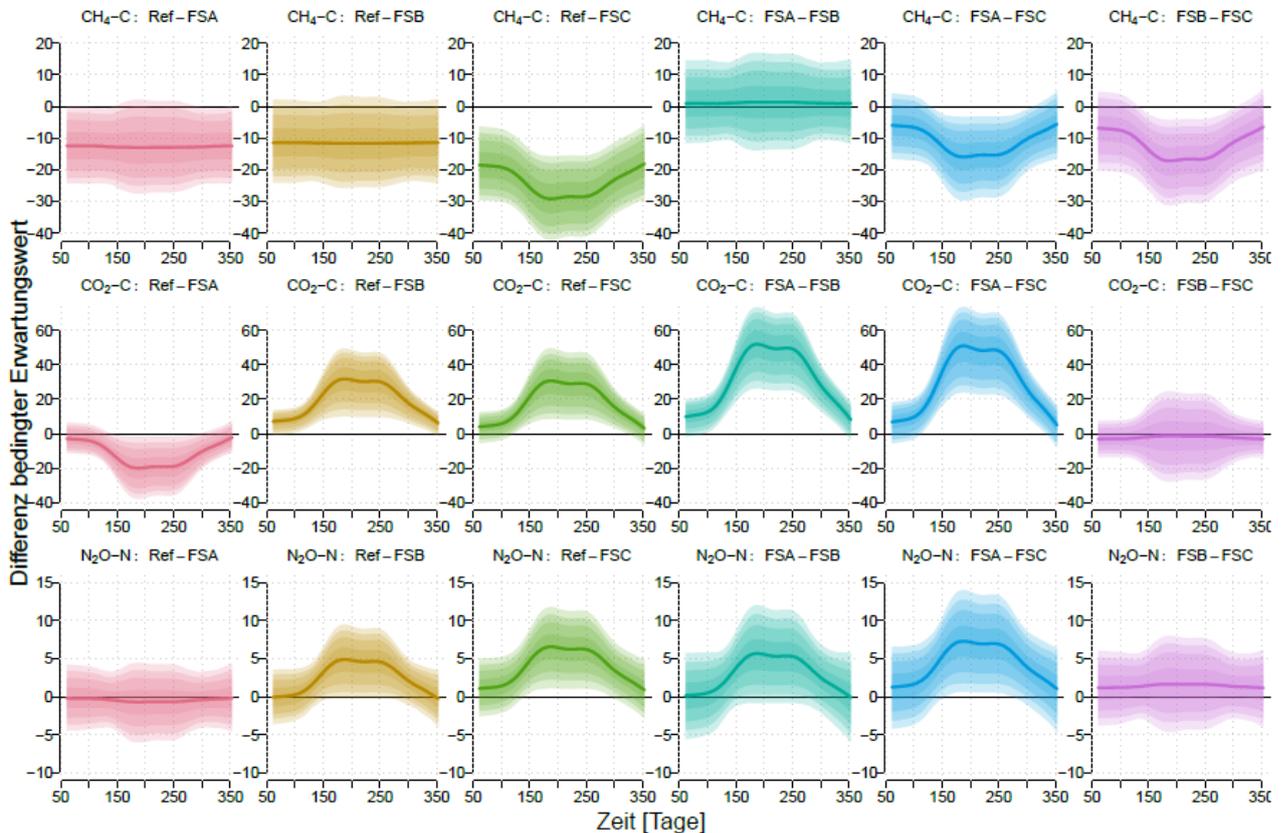


**Abbildung 38: Mittlere CO<sub>2</sub>-C- (a), N<sub>2</sub>O-N (b), CH<sub>4</sub>-C-Emissionen (c) sowie CO<sub>2</sub>e-Emissionen (d) in Tonnen bzw. Kilogramm je Jahr und Hektar ± 95%-Konfidenzintervall abgeleitet aus den Messergebnissen des Jahres 2021.**

Die Umrechnungen in mittlere Flussraten je Hektar und Jahr verdeutlichen die beschriebenen Unterschiede und ökosystemaren Auswirkungen zwischen den Behandlungen. Drückt man das Ergebnis der Messungen

der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> (Abbildung 38 a, b, c) als CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>e) aus (Abbildung 38 d), ergibt sich ein Bild, das nahe an dem mittleren jährlichen CO<sub>2</sub>-Fluss (Abbildung 38 a) liegt, da CO<sub>2</sub> das mengenmäßig bedeutendste Gas ist. Dementsprechend zeigt die Befahrung in Rückegassen mit Fahrspuren bis 10 cm (FS-A) unter Berücksichtigung der Unsicherheit keine deutliche Änderung der jährlichen, hektarweisen CO<sub>2</sub>e-Emissionen, während in Rückegassen mit Fahrspuren oberhalb der Schwelle von 10 cm (FS-B und FS-C) eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um rd. 3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente gegeben ist.

Die Daten der Gasflussmessungen wurden mit Hilfe Bayesianischer statistischer Modellierung weiter analysiert, um auf Ebene der Behandlungsvergleiche genauer auf Unterschiede im Zeitverlauf eingehen zu können. Die Methode der Datenauswertung ist in Anhang 3 nachzulesen.



**Abbildung 39: Posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die behandlungsweisen Differenzen der modellierten CO<sub>2</sub>-C-, N<sub>2</sub>O-N- und CH<sub>4</sub>-C-Emissionen des Jahres 2021 im Zeitverlauf. Eine Posteriori-Verteilung ist eine direkte Wahrscheinlichkeitsaussage für die Unsicherheit, die, bedingt auf die genutzten Daten und das verwendete Modell, bezüglich einer unbekannteren Größe besteht. Die mittlere, verstärkte Linie innerhalb der Plots stellt den zentralen Wert innerhalb der Posteriori-Verteilung dar und gibt den wahrscheinlichsten Behandlungsunterschied wieder. Ober- und unterhalb der zentralen Linie liegt ein Anteil von jeweils 50 % der posteriori-Wahrscheinlichkeit dafür, dass der wahre Behandlungsunterschied oberhalb bzw. unterhalb dieses Wertes liegt. Die Intervalle besitzen von „heller“ (außen) zu „dunkler“ (innen) Spannweiten von 2,5 %, 2,5 %, 5 %, 15 % und 25 %. Für Werte außerhalb des gesamten Intervalls besteht eine Posteriori-Wahrscheinlichkeit von 0 %. Beinhaltet eine Schattierung die Nulllinie nicht, handelt es sich um einen eindeutigen Behandlungsunterschied (Differenz zwischen den Gasflüssen zweier Behandlungen größer bzw. kleiner als Null).**

Im Allgemeinen ist eine Tendenz zu jahreszeitlicher Dynamik der Behandlungsunterschiede festzustellen. Ausgehend von den Wintermonaten – grob im Zeitraum der Tage 50-100 (20.02.2021 – 11.04.2021) und 300-350 (28.10.2021 – 17.12.2021) – in denen sich die Wahrscheinlichkeiten häufig der Null-Marke (= kein Unterschied) annähern bzw. kleiner werden, ist während des Zeitraumes der Tage 100-300 häufig eine deutliche Zunahme der Wahrscheinlichkeiten für Unterschiede in den Gasflüssen zwischen den Behandlungen zu erkennen (Abbildung 39). Demzufolge sind ausgeprägte Behandlungsunterschiede insbesondere während der Sommermonate zu erwarten, während des Winters unterscheiden sich Fahrspurböden und Referenzparzellen mit höchster Wahrscheinlichkeit nur geringfügig voneinander.

Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-Freisetzungen zwischen Referenzparzellen und Fahrspuren fällt eindeutig aus (mittlerer Teil von Abbildung 39): Mit Ausnahme der Tage zu Beginn und Ende des Versuchs – die den Wintermonaten entsprechen (s.o.) – liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Referenzparzellen mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 100 % unterhalb (FS-A) bzw. oberhalb denen der Fahrspurbearbeitungen (FS-B und FS-C). Gleiches gilt auch für den Fahrspurenvergleich zwischen den Behandlungen FS-A & FS-B sowie FS-A & FS-C, aus dem eine nahezu 100 %ige Wahrscheinlichkeit für höhere Gasflüsse in Variante FS-A hervorgeht, während die Gasflüsse in FS-B & FS-C mit höchster Wahrscheinlichkeit indifferent sind.

Ein insgesamt ähnliches Bild zeichnet auch der Vergleich der N<sub>2</sub>O-Gasflüsse (unterer Teil von Abbildung 39). Hier ist jedoch hervorzuheben, dass der Unterschied zwischen *Ref* und *FS-A* mit höchster Wahrscheinlichkeit 0 entspricht, während in den Referenzparzellen verglichen mit den Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C* zumindest während der Sommermonate (etwa zwischen den Tagen 150-250) mit an numerisch 100 % grenzender Wahrscheinlichkeit mehr N<sub>2</sub>O (ca. 5 µg N<sub>2</sub>O-N m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) emittiert wird. Die Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C* sind sich dabei zwar ähnlich, ein geringfügig höherer Gasfluss in *FS-B* ist aber am wahrscheinlichsten.

Bezüglich des Treibhausgases CH<sub>4</sub> ist insbesondere der gefundene Unterschied zwischen den Referenzparzellen und Fahrspuren ≥ 20 cm (*FS-C*) durch hohe Evidenz gekennzeichnet (oberer Teil von Abbildung 39). Während des gesamten Jahres 2021 lag der CH<sub>4</sub>-Flux mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 100 % unterhalb des Levels der Referenzparzellen. Niedrigere CH<sub>4</sub>-Flüsse sind zwar auch in den Fahrspuren *FS-A* und *FS-B* am wahrscheinlichsten, jedoch besteht zumindest eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür (~ 2,5 %), dass die Differenz zwischen *Ref* und *FS-A* bzw. *FS-B* gleich 0 bzw. positiv ist. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang auch, dass sich die Fahrspurbehandlungen *FS-A* und *FS-B* mit höchster Wahrscheinlichkeit sehr ähnlich sind – d.h. die CH<sub>4</sub>-Gasflüsse in beiden Behandlungen in vergleichbarer Dimension verringert sind. Dagegen ist es, zumindest während des Sommers, sehr wahrscheinlich (etwa 100 %), dass die CH<sub>4</sub>-Oxidation in Behandlung *FS-C* nochmals geringer liegt als in Behandlung *FS-B*.

### 2.8.3 Schlussfolgerungen

Der angenommene Zusammenhang zwischen verdichtungsbedingten Fahrspureigenschaften und der Freisetzung von CO<sub>2</sub>, wonach es auf Fahrspurböden während des größten Teils eines Jahres zu verringerter Bodenatmung kommt, ist zumindest bei Fahrspuren > 10 cm (*FS-B* und *FS-C*) zutreffend. Für Behandlung *FS-A* muss die Hypothese jedoch aufgrund der überwiegend höheren Gasflüsse verglichen mit *Ref* verworfen werden. Nicht eindeutig ist der Befund hinsichtlich der Hypothese, dass es während langanhaltender Trockenzeiträume (Abnahme der Bodenfeuchte) zu höheren CO<sub>2</sub>-Flüssen auf den Fahrspuren kommt. Eine Überschreitung der Gasflüsse in den Fahrspuren gegenüber den Referenzparzellen kann im Wesentlichen nicht festgestellt werden, was zu einer Ablehnung der Hypothese führt. Gleichwohl zeigt sich eine Beeinflussung der Bodenrespiration durch die Bodenfeuchte (Wasserspannung) zumindest in den Fahrspurbehandlungen *FS-A* und *FS-C*, bei denen es mit zunehmender Austrocknung der Böden zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Freisetzungen bis zu einem bestimmten Level kommt. Eine weitere Abnahme der Bodenfeuchte darüber hinaus führt hingegen zu einem erneuten Rückgang der CO<sub>2</sub>-Flüsse. Eine weitere Annahme ging von verringerten CH<sub>4</sub>-Aufnahmen und gesteigerten N<sub>2</sub>O-Emissionen aus den Fahrspurböden aus. Hinsichtlich der Methanoxidation kann die Hypothese bestätigt werden – auf allen Fahrspurböden nimmt die CH<sub>4</sub>-Aufnahme drastisch ab. Gesteigerte Lachgasfreisetzungen (N<sub>2</sub>O) können indes im Wesentlichen nicht festgestellt werden und beschränken sich auf wenige, unregelmäßige Ereignisse in den Spurbearbeitungen *FS-A* und *FS-B*. In Fahrspuren > 20 cm (*FS-C*) kommt es stattdessen zu Verringerungen der Distickstoffoxid-Freisetzungen, sodass dieser Teil der aufgestellten Hypothese verworfen wird.

Aus den Untersuchungen zur Bodenrespiration stellt sich insgesamt eine gesteigerte Bodenatmung in Fahrspuren der Behandlung *FS-A* heraus. Hauptgrund für diesen Effekt könnte in der mächtigeren Humusaufgabe (siehe Abbildung 43) liegen, die wahrscheinlich auf die gezielte Ablage von Schlagabraum zurückzuführen ist (Reisigmatte). Dies führt zu einer Erhöhung des Nahrungsangebotes für die Bodenmikroorganismen, gleichzeitig bleibt der Lebensraum durch Erhalt des Bodenaufbaus größtenteils intakt. Infolgedessen kommt es zu einem Wachstum der Mikroorganismenpopulationen bei gleichzeitig verstärktem Abbau der akkumulierten organischen Substanz, wodurch sich die CO<sub>2</sub>-Flüsse aus dem Boden erhöhen. Es ist zudem anzunehmen, dass verdichtungsinduzierter Anstau von Gasen innerhalb der Fahrspurböden von *FS-A* am wenigsten bedeutungsvoll ist, da in *FS-A* die im Verhältnis zu den anderen Fahrspurbehandlungen geringste Bodenverdichtung und höchsten Leitfähigkeiten gemessen wurden (Abbildung 13 und Abbildung 20). In den Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C* sind insgesamt Bedingungen gegeben, von denen eine wesentlich ungünstigere Beeinflussung der Boden(mikro)organismen anzunehmen ist. Durch starke Verdichtung des Bodens, Störung des Bodenaufbaus, Verlust humoser Bodenhorizonte, Verringerung von Leitfähigkeiten für Luft- und Wasser werden sowohl Lebensraum als auch Nahrungsgrundlage in eine Richtung verändert, die stark von den Eigenschaften des Ursprungszustands – dem unbefahrener Waldboden (*Ref*) – abweichen. In deren Folge kommt es zu einer Verringerung der mikrobiellen Biomasse (siehe Seite 89) und annehmbar auch zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung. Aufgrund der veränderten Standortseigenschaften, von denen auch eine gehemmte O<sub>2</sub>-Diffusion zu erwarten ist (siehe Hinsichtlich der aufgestellten Hypothesen lassen sich diese nur bedingt bestätigen: Während die Referenzparzellen die größten Luftleitfähigkeitsraten basierend auf einem intakten Porensystem mit einer funktionierenden Konnektivität aufweisen, weichen die Fahrspuren deutlich davon ab. Die tiefsten Fahrspuren *FS-C* sind aufgrund der sehr niedrigen Werte als deutlich kritisch anzusehen. Ähnlich niedrige Werte sind allerdings auch in *FS-A* zu beobachten, was der Hypothese widerspricht. Zwar wurden verringerte Werte erwartet, doch sollte laut Hypothese *FS-B* zwischen den genannten Varianten liegen. Die Luftleitfähigkeit in *FS-B* ist jedoch entgegen den Erwartungen höher als in *FS-A*. Dies könnte auf den höheren Sandgehalt in *FS-B* zurückzuführen sein, der auch als Ursache für die höhere gesättigte Wasserleitfähigkeit

angenommen wird. Es ist anzunehmen, dass Unterschiede in der Bodenart durch ein anderes Porensystem Änderungen in der Luftleitfähigkeit hervorrufen. Es ist zudem annehmbar, dass der geringfügig höhere Sandgehalt in *FS-B* trotz höheren Wassergehalts während der Befahrung zu einer weniger stark ausgeprägten Scherung von Bodenporen und somit besserem Erhalt der Porenkonnektivität bei geringerer Tortuosität der Poren in diesen Fahrspurböden verglichen mit den etwas schluffreicheren Böden von *FS-A* und *FS-C* geführt hat. Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die Luftleitfähigkeit in allen Fahrspuren gestört ist und somit nachteilig für das Pflanzenwachstum und an oxidative Bedingungen angepasste Bodenorganismen ist. Aufgrund des nicht eindeutigen Gradienten lässt sich für diesen Parameter aber keine kritische Grenze der Fahrspureintiefung ausmachen.

Eisenstabreaktion (TV1), Kapitel II.2.7 und **Luftleitfähigkeit (TV2)**, Kapitel II.2.6), geht eine Wirkung auf das Bodenleben und deren Metabolismus aus – folglich kommt es zu einer Abnahme der aeroben Atmung, die sich in einer verringerten  $\text{CO}_2$ -Freisetzung niederschlägt. Indiz für veränderte Bodenmikroorganismengemeinschaften liefert auch der starke Rückgang der Methanaufnahme in den Fahrspurböden, die sehr wahrscheinlich auf einen Rückgang bzw. Verlust methanotropher Mikroorganismen zurückzuführen ist. In Fahrspurbehandlung *FS-C* erscheinen die Auswirkungen auf das Boden-Mikrobiom besonders stark zu sein. Punktuelle Ereignisse, in denen die Fahrspurböden von *FS-C* zu Quellen für  $\text{CH}_4$  wurden, lassen darauf schließen, dass das Redoxpotential des Bodens sich in Richtung stark reduktiver Verhältnisse verändert haben muss, bei denen methanogene Bakterien (Anaerobier) durch anaerobe Atmungsprozesse  $\text{CH}_4$  freisetzen. Hinweise für niedrige Redoxpotentiale ergeben sich neben den Befunden der Eisenstäbe auch aus den  $\text{N}_2\text{O}$ -Flüssen, die in Behandlung *FS-C* am niedrigsten ausfallen. Diese Beobachtung ist typisch, da sich unter anaeroben Bedingungen zwei wesentliche Prozesse, die zu Lachgasbildung führen, ändern. Einerseits läuft bei hohem Anteil wassergefülltem Porenraum die Denitrifikation von Nitrat zu molekularem  $\text{N}_2$  ohne größere Freisetzungen des Zwischenprodukts  $\text{N}_2\text{O}$  ab. Andererseits ist die Nitrifikation, also die bakterielle Oxidation von Ammonium zu Nitrat, unter Sauerstoffmangel gehemmt. Daher ist weniger Substrat für die Denitrifikation vorhanden, was zu ebenfalls zu geringeren Lachgasflüssen führt.

Unter Betrachtung der Gasflüsse als integrativem Indikator für den Ablauf ungestörter Prozesse im Boden, weist *FS-A* die geringste Beeinträchtigung auf, die – verglichen mit *Ref* – insbesondere durch eine geringere Methanaufnahmerate zum Ausdruck kommt. Bei Behandlung *FS-B* tritt neben einer ebenfalls ähnlich niedrigeren Methanoxidation noch eine Abnahme der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung hinzu, die auf eine weitergehende Störung natürlicher Bodenprozesse hinweist. *FS-C* hingegen zeigt bei allen Gasflüssen eine deutliche Abweichung zum unbefahrenen Boden auf, die als eine erhebliche Störung der Bodenprozesse zu beurteilen ist.

## 2.9 Bodenbiologische Eigenschaften (TV1)

*Forschungsfrage:* Welche Wirkung geht auf die Höhe und Verhältniszahlen des mikrobiellen Biomasse-C, -N und -P, die Basalatmung, den metabolischen Quotienten und die Kohlenstoffverfügbarkeit aus?

*Hypothese:* Durch Veränderungen des Porenraumes bedingte Verringerungen des Gasaustausches und des Evaporationsvermögens von Fahrspurböden werden sauerstoffarme bzw. anaerobe Verhältnisse hervorgerufen. Diese stehen in Verbindung mit Veränderungen der mengen- und anteilmäßigen Zusammensetzung der organischen und mineralischen Bodensubstanz und nehmen Einfluss auf die Mikroorganismen der Fahrspurböden. Daher unterscheiden sich die mikrobielle Biomasse und die Elementverhältnisse der Mikroorganismen in Fahrspuren von denen der Mikroorganismen in ungestörten Waldböden. Die Elementverhältnisse in der Biomasse der Mikroorganismen werden enger. Das verminderte Nahrungsangebot in Kombination mit ungünstigeren Lebensbedingungen (Bodenverdichtung) in den Fahrspurböden reduziert einerseits die Basalatmung sowie den Anteil des mikrobiellen Biomasse-Kohlenstoffs am organischen Kohlenstoff (Kohlenstoffverfügbarkeit). Andererseits nimmt die Effizienz der Kohlenstoffmineralisation durch die Bodenmikroorganismen ab, wodurch sich das Niveau des metabolischen Quotienten erhöht.

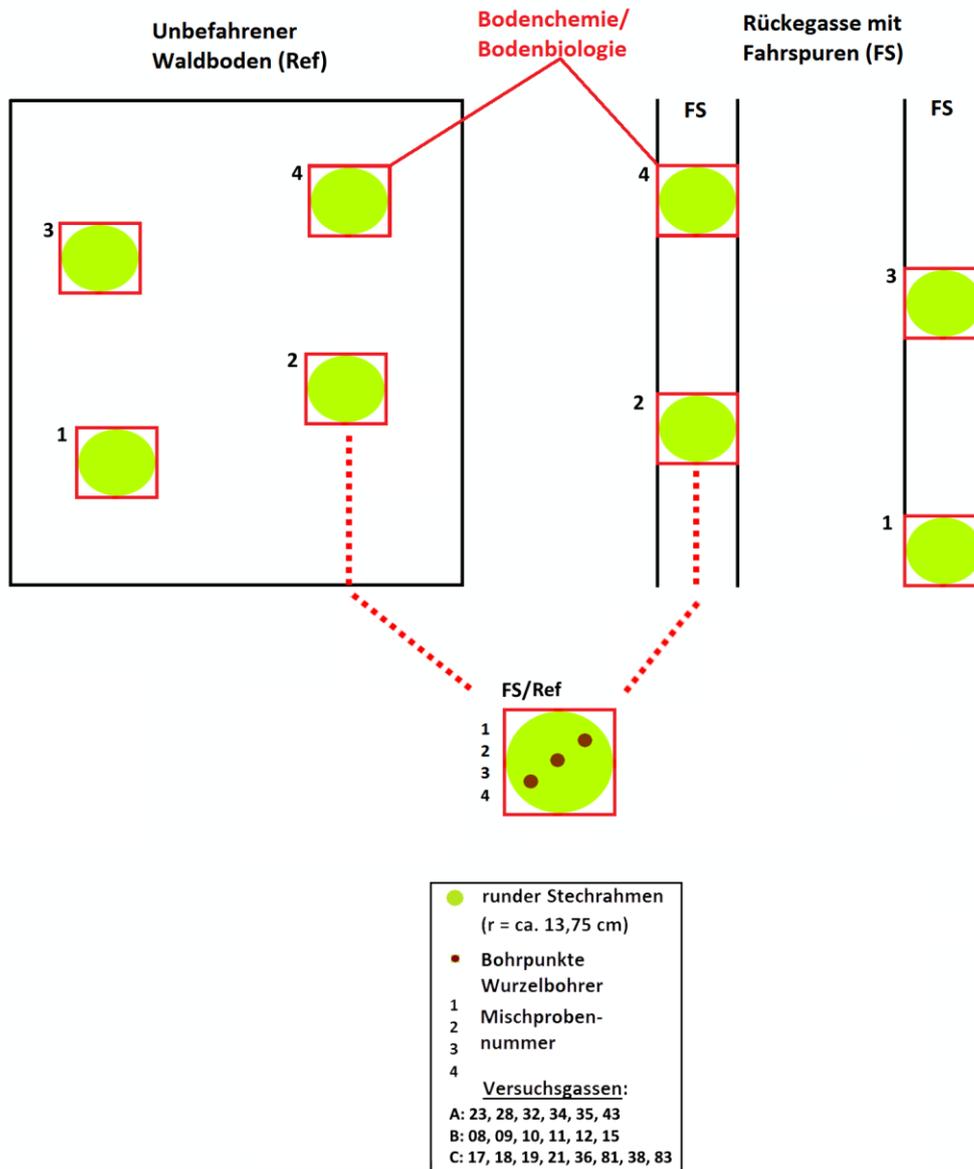
## 2.9.1 Material & Methoden



**Abbildung 40: Beprobung der Humusauflage (A), Vorbereitung von Bodenproben (B), Beprobung des Mineralbodens mit einem Wurzelbohrer (C) und Separation entnommener Bodenkerne in Tiefenstufen (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).**

Das methodische Vorgehen bei der Probengewinnung gestaltete sich folgendermaßen: Aus den 18 Versuchsgassen wurden in beiden Behandlungen Fahrspur (*FS*) und unbefahrener Waldboden (*Ref*) Bodenproben aus der Humusauflage – den Horizonten  $L+O_r$  ( $L$  und  $O_r$ -Horizont wurden lediglich bei der ersten Beprobung getrennt, anschließend vereinigt) und  $O_h$  – sowie dem Mineralboden in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm unter Mineralbodenoberkante gewonnen. Die Humusauflage wurde durch Eintreiben eines runden Humustopfes (r ca. 13,75 cm, Abbildung 40, A) beprobt, in dem die einzelnen Auflagehorizonte abgesammelt und horizontweise abgepackt wurden. Nach Entnahme der gesamten Humusauflage wurde ein Wurzelbohrer nach MURACH bis in eine Tiefe von etwa 20 cm eingeschlagen und die gewonnene Mineralbodenprobe in drei 5 cm-Abschnitte unterteilt und danach in PE-Beutel gefüllt (Abbildung 40, C+D). Dieser Vorgang wurde dreifach wiederholt, sodass eine Mineralbodenprobe aus insgesamt drei Einstichen mit dem Wurzelbohrer bestand. Bei Fahrspuren der Behandlung *FS-C* blieb die Beprobung auf den Mineralboden beschränkt, da die Humusauflage dort befahrungsbedingt nicht mehr vorhanden war.

Der beschriebene Vorgang der Probenahme wurde je Versuchsgasse und Behandlung an insgesamt 4 Probestellen (in Fahrspuren nur in Laufmetern, deren Spurtiefe innerhalb der Spannweite der Fahrspurklasse lag, dem die Versuchsgasse zugewiesen wurde) wiederholt, sodass 4 eigenständige Proben = Replikate aus einer Behandlung gewonnen wurden. Das Schema der Probenahme ist in Abbildung 41 veranschaulicht.



**Abbildung 41: Schema der Entnahme gestörter Bodenproben in Fahrspuren und unbefahrenem Waldboden von TV1.**

Im Anschluss an die Feldarbeiten wurden die Proben in einem Kühlraum bei 4°C zwischengelagert und dann zur Analyse vorbereitet (Abbildung 40, B). Während Proben der Humusaufgabe auf < 6,3 mm gesiebt und homogenisiert wurden, fand bei Mineralbodenproben eine Siebung auf < 2 mm statt. Anschließend wurden die Wassergehalte bestimmt. Vor der Analyse bodenbiologischer Parameter wurden die Proben für 5 Wochen bei 8°C inkubiert. An jenen Proben, die im Oktober/November 2018, 2019 und 2020 gewonnen wurden (Tabelle 2 und Tabelle 10), fand nach den Schritten der Probenvorbereitung zudem eine Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität (WHK) und nachfolgend die Einstellung einheitlicher Wassergehalte von 60 % der maximalen WHK (vollständig aufgesättigte Proben, die über mehrere Stunden auf einem Quarzsandfilter entwässert wurden) statt.

Die an den Proben durchgeführten bodenchemischen und bodenbiologischen Analysen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

**Tabelle 10: Übersicht über bestimmte bodenbiologische und -chemische Messgrößen und zugrundeliegende Methoden**

Versuch	Parameter	Probenart	Methode nach HFA*	Labormethode NW-FVA**
Bodenchemie	Humusvorrat	Humusauflage	A2.6	HV5.1
Bodenchemie	pH-Wert in H <sub>2</sub> O	Humusauflage + Mineralboden	A3.1.1.2	pHH2O6.1
Bodenchemie	pH-Wert in CaCl <sub>2</sub>	Humusauflage + Mineralboden	A3.1.1.7	pHCaCl2_6.1
Bodenchemie	Gesamtgehalte C + N	Humusauflage + Mineralboden		ATNULL
Bodenchemie	Gesamtgehalte P + S über HNO <sub>3</sub> -Druckaufschluss	Mineralboden	A3.3.4	DAN1.1
Bodenchemie	Gesamtgehalte P, S, Ca, Mg, Na, K, Mn, Fe, Al über Königswasseraufschluss	Humusauflage	A3.3.3	OAKW2.1
Bodenchemie	Effektive Kationenaustauschkapazität KAK <sub>eff</sub> Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , H <sup>+</sup>	Mineralboden	A3.2.1.1	AKE1.1
Bodenbiologie	Mikrobiell gebundener Kohlenstoff C <sub>mik</sub> & Mikrobiell gebundener Stickstoff N <sub>mik</sub>	Humusauflage + Mineralboden		CNMIK1.1 & CNMIKF1.1
Bodenbiologie	Mikrobiell gebundener Phosphor P <sub>mik</sub>	Humusauflage + Mineralboden		PMIK1.1 & PMIKF1.1
Bodenbiologie	Basalatmung (CO <sub>2</sub> )	Humusauflage + Mineralboden		CO2ATM2.1

\* = Handbuch Forstliche Analytik (HFA) (Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2014)

\*\* = König und Fortmann (2020)

Anzahl Proben, Analysenumfänge, beprobte Versuchsflächen sowie Behandlungen variierten zu den verschiedenen Probenahmeterminen. Eine Übersicht darüber gibt Tabelle 11.

**Tabelle 11: Zusammenstellung von Beprobungspunkten und Probenumfängen zu verschiedenen Zeitpunkten.**

Versuchsgasse	Datum	Zeitpunkt	Probentyp*	Behandlung	n
VG08, VG15	Winter 2017	Vor Befahrung	B + C	FS + Ref	234
VG09, VG10, VG11, VG12	Winter 2017	Vor Befahrung	C	FS + Ref	144
VG17, VG18, VG81, VG19, VG21, VG28, VG32, VG23 VG34, VG43, VG35, VG36	Winter 2018 Winter 2019	Ohne Befahrung	B + C	FS + Ref	433
VG08, VG09, VG10, VG11 VG12, VG15	Frühling 2019	Nach Befahrung	B + C	FS	120
VG08, VG09, VG10, VG11 VG12, VG15	Frühling 2019	Nach Befahrung	B	Ref	120
VG08, VG10, VG35, VG28	Winter 2020	Ohne Befahrung	B	FS	120
VG38, VG83	Winter 2020	Ohne Befahrung	B + C	FS	24
VG28, VG35	Winter 2020	Ohne Befahrung	B	Ref	40
VG12, VG15, VG19, VG32 VG23	Frühling 2021	Ohne Befahrung	B	FS	92
VG09, VG43	Frühling 2021	Ohne Befahrung	B	Ref	40

\*B = Bodenbiologische Analysen; C = Bodenchemische Analysen

**1367**

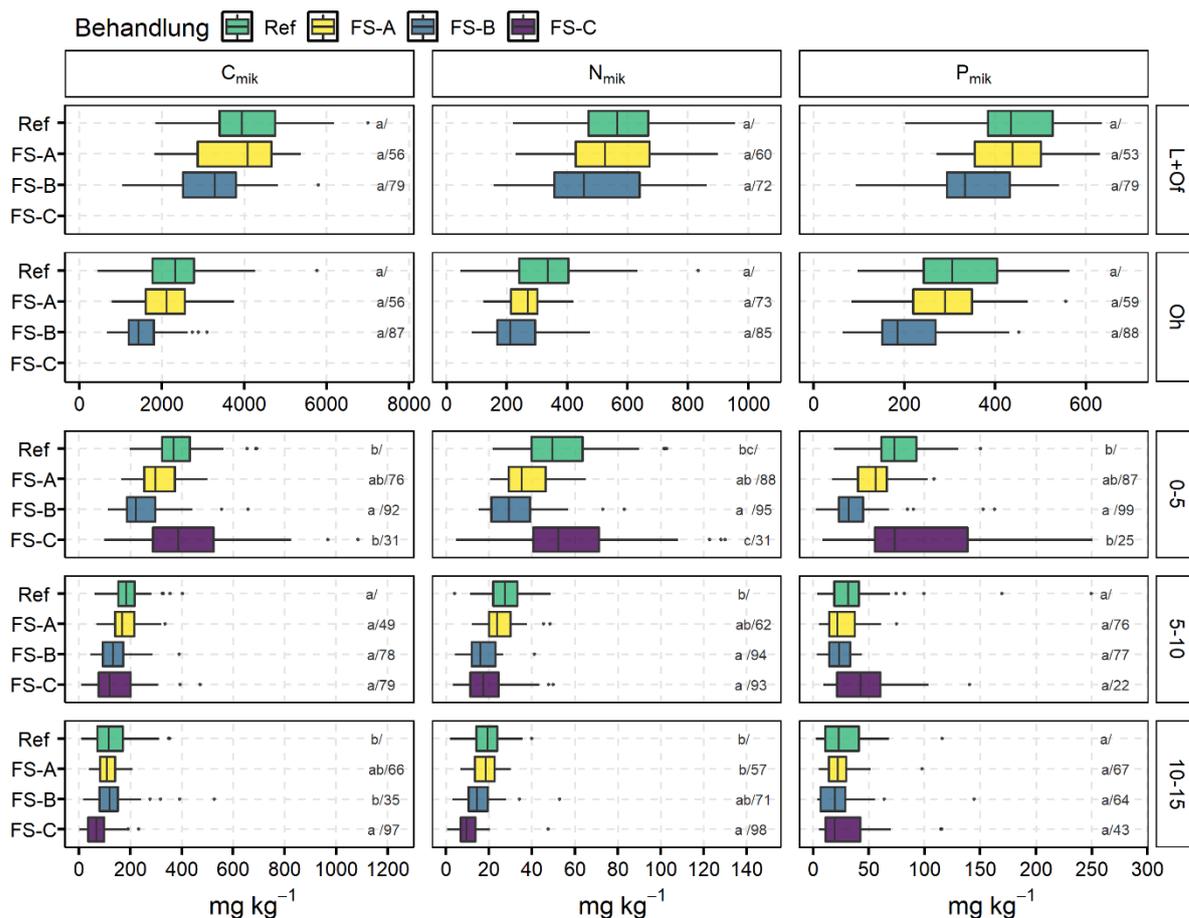
### Auswertung

Die bodenbiologischen und –chemischen Messgrößen, die an den gestörten Bodenproben analysiert wurden, wurden in einem mehrstufigen Prozess ausgewertet. Die Sammlung der Datensätze, Vorratsberechnungen und Bestimmungen von Quotienten erfolgte in MS-Excel. Für die Vorratsbestimmungen in Mineralbodenhorizonten wurden Trockenrohdichten verwendet, die seitens des Thünen-Instituts (TV2) erhoben und zur Verfügung gestellt wurden. Die Ergebnisse aus mehreren Stechzylindern je Tiefenstufe (1-8 Werte, i.d.R. 3 Datensätze) wurden zu diesem Zweck zu einer mittleren Trockenrohdichte verrechnet. Nach Übergabe der Datensätze an R, wurden die Daten der ersten Probenahme (Winter 2017) von der Auswertung ausgeschlossen (der erfasste Zustand wurde durch erneute Befahrung verändert) und parameterweise die Datenverteilung geprüft. Einzelne, extreme Ausreißer wurden aus den Datensätzen entfernt. Zur Darstellung der massengewichteten Mittelwerte wurden zunächst mittlere Stoffvorräte je Versuchsgasse und Horizont berechnet, diese zu Gesamtvorräten addiert und durch den Feinbodenvorrat geteilt, um den mittleren, massengewichteten Stoffgehalt je Behandlung wiederzugeben. Bei Behandlung Ref liegt die Anzahl Wiederholungen bei n = 18, bei den Fahrspurbehandlungen bei n = 6.

Für die Statistik wurden generalisierte gemischte lineare Modelle (GLMM, R-Paket *lme4* (Bates et al. 2015)) genutzt. Mit Hilfe der Funktion `lme4::glmer()`, wurden parameterweise Modelle gefittet, in denen die Interaktionen aus Horizont und Behandlung als *fixed effects* und die Horizonte und Versuchsgassen-

Behandlungen als *random effects* genutzt wurden. Innerhalb der *random effects* wurde die *nested structure* von Horizonte *within* Versuchsgassenbehandlungen berücksichtigt. Die Daten gingen über eine Gammaverteilung mit log-Link-Funktion in die Modelle ein. Aus den parameterweisen Modellen wurden a-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen und -Differenzen für die Behandlungsunterschiede abgeleitet und zudem Signifikanztests durchgeführt. Die Ergebnisse der Wahrscheinlichkeiten der a-posteriori-Differenzen „Ref-FS > 0“ wurden dann zusammen mit den Buchstaben zur Signifikanz aus der Inferenzstatistik in die Ergebnisplots eingetragen. Vereinfacht ausgedrückt bedeuten a-posteriori Wahrscheinlichkeiten um 50%, dass kein Unterschied zwischen Referenz und Fahrspurbehandlung beobachtet wurde. Hohe Wahrscheinlichkeiten indizieren Differenzen von Referenz > Fahrspurbehandlung und niedrige Wahrscheinlichkeiten zeigen das Gegenteil an (Referenz < Behandlung).

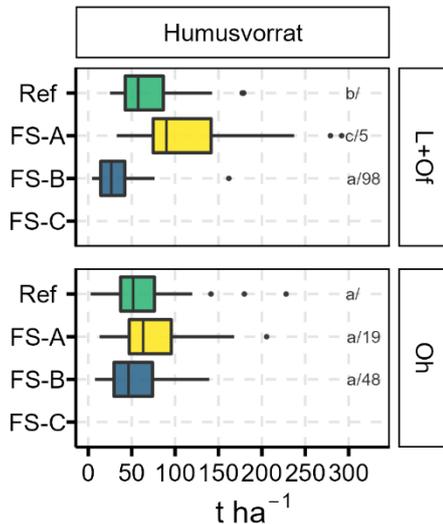
## 2.9.2 Ergebnisse



**Abbildung 42:** Gehalte an C<sub>mik</sub>, N<sub>mik</sub> & P<sub>mik</sub> in den Horizonten L+O<sub>f</sub> & O<sub>h</sub> sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

Neben den Untersuchungen zur Respiration von Bodenorganismen (II.2.8.2; ein Teil der freigesetzten Gase stammt auch aus autotropher Respiration der Pflanzen) bildete die Bestimmung der mikrobiell gebundenen Gehalte von Kohlenstoff (C<sub>mik</sub>), Stickstoff (N<sub>mik</sub>) und Phosphor (P<sub>mik</sub>) eine wichtige Grundlage zur Charakterisierung der Fahrspurböden verschiedener Tiefen sowie der unbefahrenen Referenzparzellen, da diese Messgrößen genutzt werden können, um indirekt Aussagen über Auswirkungen auf die mikrobielle Biomasse zu treffen (Abbildung 42). Über den gesamten untersuchten Tiefenbereich sind die Wirkungsmuster bei den drei Messgrößen sehr ähnlich. Den Analysen zur Folge bestehen keine signifikanten Unterschiede in den Auflagehorizonten L+O<sub>f</sub> und O<sub>h</sub> bei C<sub>mik</sub> als auch N<sub>mik</sub> und P<sub>mik</sub>. Dennoch ist insbesondere in Fahrspurbehandlung FS-B eine tendenzielle Verringerung der C<sub>mik</sub>-, N<sub>mik</sub>- und P<sub>mik</sub>-Gehalte in beiden Humushorizonten festzustellen. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf dem unbefahrenen Boden (Ref) eine höhere mikrobielle Biomasse vorliegt als in FS-B, liegt in den Humushorizonten annähernd zwischen ca. 70-90 %, in Variante FS-A ist der Effekt schwächer ausgeprägt, sodass näherungsweise die Werte der Referenzparzellen erreicht werden. Die Ergebnisse können daher als Indizien für eine Wirkung der Befahrung auf das mikrobielle Bodenleben in der Humusaufgabe gewertet werden, die jedoch erst ab einer Fahrspurtiefe > 10 cm greifen.

Eine herausragende Beeinflussung besteht bei Fahrspuren > 20 cm Tiefe (*FS-C*): Hier kommt es zu einem nahezu vollständigen Verlust der Humusaufgabe durch die Befahrungstätigkeit und infolgedessen zu einem Schwund des Lebensraumes für Bodenorganismen, wie an den fehlenden Messwerten in beiden Auflagehorizonten zu erkennen ist. Aus den Ergebnissen der Humusvorratsbestimmungen (Abbildung 43) lässt sich erkennen, dass der Verlust der Humusaufgabe ein Prozess ist, der bereits bei Fahrspuren zwischen 10-20 cm (*FS-B*) beginnt und dort zu signifikanten Verringerungen des Vorrats in der Streu- + Fermentationslage (*L+O<sub>r</sub>*-Horizont) führt, aber im Wesentlichen auf diesen Horizont beschränkt bleibt. Der Effekt ist auf laterale Verdrängung der Humusaufgabe während des Befahrungsgeschehens durch Radschlupf und Eingraben der Forstmaschinen zurückzuführen.



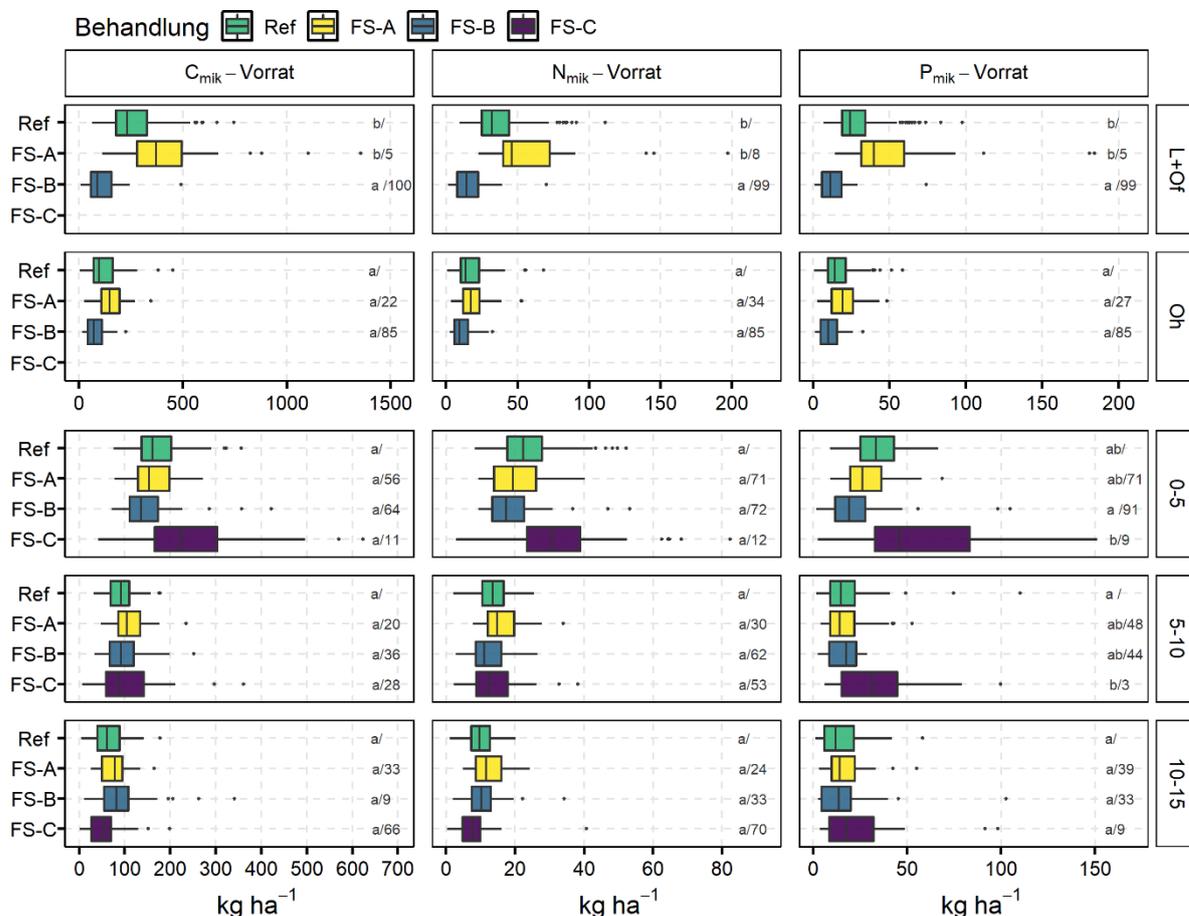
**Abbildung 43: Humusvorräte in den Horizonten *L+O<sub>r</sub>* & *O<sub>h</sub>*. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont nach dem Tukey-Test an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-*FS* > 0“ angeben.**

In Fahrspurbehandlung *FS-A* zeichnet sich ein gegenläufiger Prozess ab: Hier konnte eine nennenswerte Steigerung der Auflagenmächtigkeit bereits während der Beprobungen im Feld festgestellt werden, bei denen in manchen Versuchsgassen enorme Mengen schwach bis mäßig zersetzte Pflanzenbestandteile gewonnen wurden (*L+O<sub>r</sub>*-Horizont). Hochgerechnet auf einen Humusvorrat in Tonnen je Hektar ergeben sich dadurch signifikante Steigerungen der Humusvorräte in Fahrspurbehandlung *FS-A* (im Mittel rd.  $114 \text{ t ha}^{-1}$ ; *Ref*:  $69 \text{ t ha}^{-1}$ ), wobei der *O<sub>h</sub>*-Horizont nur schwach von den Erhöhungen betroffen ist.

Da trotz Umlagerung der Humusaufgabe in (nicht untersuchte) seitliche Randwülste Reste des stark humosen Materials im Bereich der Fahrspuren verbleiben bzw. diese in Teilen untrennbar mit mineralischen Bodenpartikeln verknetet werden, kommt es in Fahrspuren des Typs *FS-C* zu einer leichten Erhöhung der organischen Substanz in den ersten 5-10 cm des Mineralbodens (Ergebnisse  $C_{\text{org}}$ , siehe II.2.11.2). Folglich konzentriert sich die mikrobielle Biomasse –  $C_{\text{mik}}$  ist stark korreliert mit  $C_{\text{org}}$  – in Behandlung *FS-C* auf den Oberboden bzw. insbesondere auf die Tiefenstufe 0-5 cm. Im Median und in den Signifikanztests konnten hier keine Unterschiede zu den  $C_{\text{mik}}$ ,  $N_{\text{mik}}$ - und  $P_{\text{mik}}$ -Gehalten der unbefahrenen Referenzparzellen (*Ref*) gefunden werden, jedoch verdeutlicht die große Spannweite der Boxplot-Whisker, dass es in manchen Versuchsgassen zu erheblichen Störungen der Bodenmikroorganismen kommt, die entweder zu sehr geringen oder hohen Messwerten führen. Die Konzentration des Bodenlebens auf den Oberboden wird auch durch Betrachtung der Tiefenstufen 5-10 cm und 10-15 cm verdeutlicht, in denen, mit Ausnahme von  $P_{\text{mik}}$ , Verringerungen der mikrobiell gebundenen Gehalte an C und N in den Fahrspuren *FS-C* und teils auch in *FS-B* festzustellen sind. Somit setzt sich in Behandlung *FS-B* der bereits in der Humusaufgabe konstatierte Trend zu geringeren  $C_{\text{mik}}$ ,  $N_{\text{mik}}$  und  $P_{\text{mik}}$ -Gehalten auch im Mineralboden fort, wo es in den ersten fünf Zentimetern zu einer signifikanten Abnahme der Gehalte kommt. Eine Tendenz zu verringerten Gehalten in der ersten untersuchten Tiefenstufe besteht auch in Fahrspuren mit Tiefen zwischen 0-10 cm (*FS-A*), ohne aber zu statistisch absicherbaren Unterschieden verglichen mit den Referenzparzellen zu führen. Im Unterboden (> 5 cm) hat die Befahrung in Rückegassen, in denen die Humusaufgabe erhalten und der Bodenaufbau intakt bleibt (*FS-A*), keinen Einfluss auf die mikrobielle Festlegung von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor.

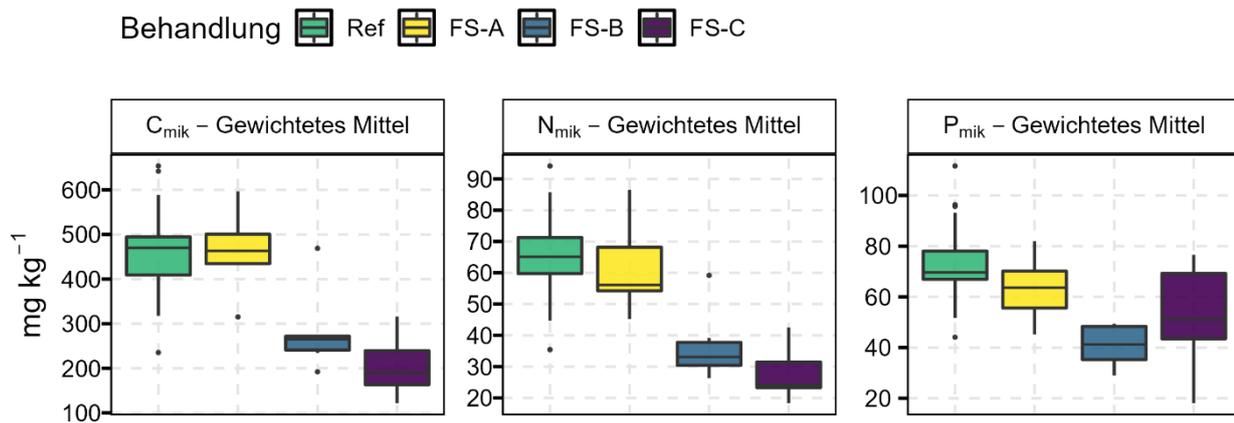
Ein bedeutungsvoller Effekt der Befahrung von Rückegassen besteht – wie obenstehend erläutert – auf den Aufbau des Bodens und die Lagerung der Bodenpartikel. Schematisch betrachtet steigen die seitliche Verdrängung von Auflagenmaterial und die Verdichtung des Bodens bzw. Erhöhung der Trockenrohdichte (Abbildung 13) mit zunehmender Fahrspurtiefe an. Die Verringerungen der Horizontmächtigkeiten in der Humusaufgabe (ab 10 cm Spurtiefe; *FS-B* + *FS-C*) bewirken einen Rückgang der Humusvorräte, andererseits steigen die Mineralbodenvorräte verdichtungsbedingt deutlich an. Die Berechnung von Stoffvorräten erfolgt

über die Verknüpfung von Bodenmassen und Stoffgehalten. Infolgedessen werden sämtliche Stoffvorräte stark durch den Effekt der Materialverdrängung und Veränderungen der Mineralbodenmassen geprägt, die Unterschiede der Gehalte zwischen den Behandlungen teils nivellieren oder verstärken. Als Beispiel dafür können die Vorräte von  $C_{mik}$ ,  $N_{mik}$  und  $P_{mik}$  dienen (Abbildung 44). Da das gezeigte Ergebnis im Wesentlichen auf befahrungsbedingte Veränderungen der Bodenmasse zurückzuführen ist, werden die Ergebnisse der Vorratsdarstellungen im Weiteren nicht näher erläutert.



**Abbildung 44:** Vorräte an  $C_{mik}$ ,  $N_{mik}$  &  $P_{mik}$  in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

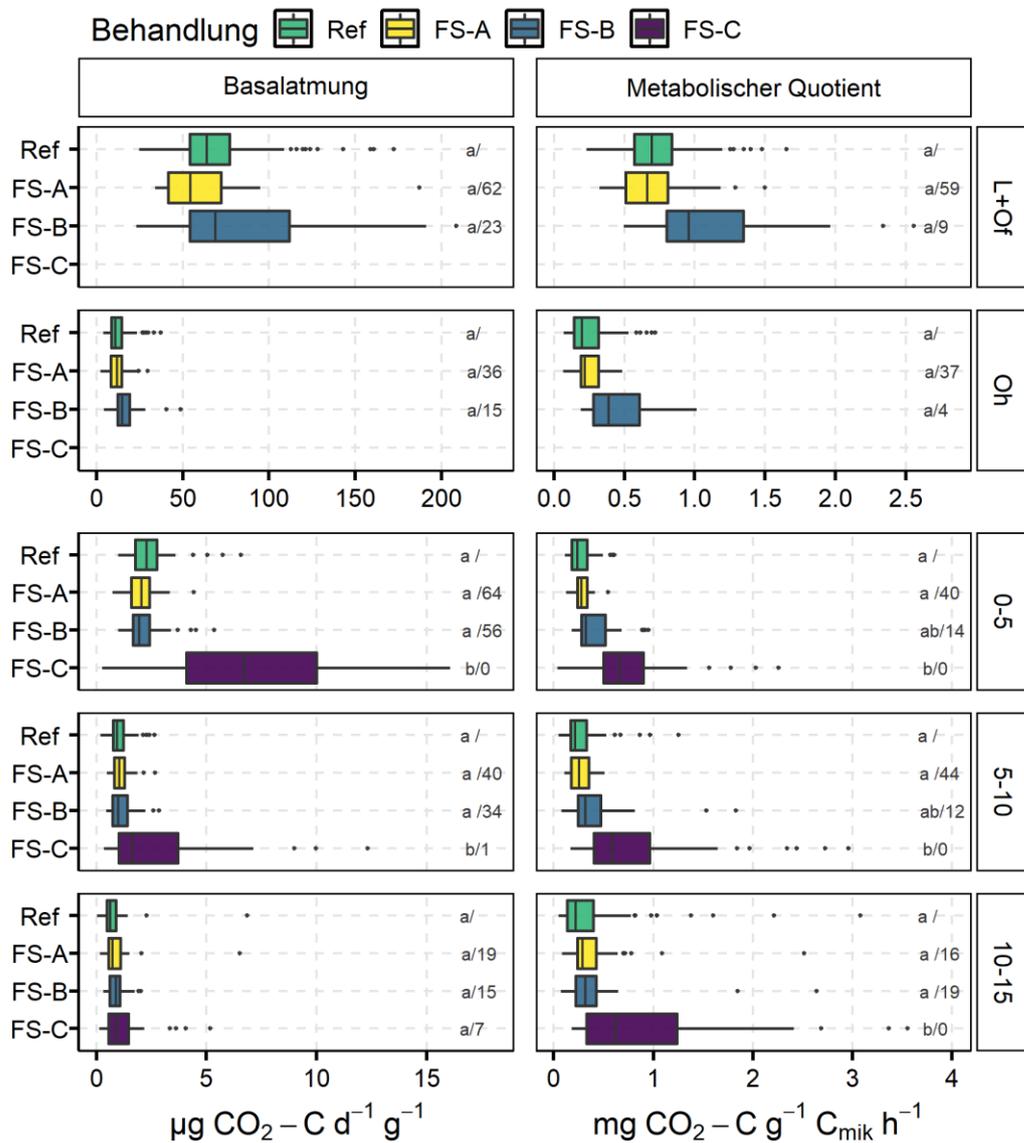
Stattdessen soll die Auswirkung der Befahrung auf die massengewichteten, mittlere  $C_{mik}$ -,  $N_{mik}$ - und  $P_{mik}$ -Gehalte betrachtet und dadurch die bestehende Wirkung auf Gehalte und Vorräte integrativ veranschaulicht werden: Abbildung 45 verdeutlicht den massiven Einfluss des teilweisen (FS-B) bzw. vollständigen (FS-C) Verlustes der Humusaufgabe auf die mikrobielle Biomasse in Fahrspuren > 10 cm Tiefe. In diesen beiden Fahrspurbehandlungen kommt es zu einer drastischen Abnahme (etwa einer Halbierung) der mittleren C-, N-, und P-Gehalte, die aus Mikroorganismen stammen. In Behandlung FS-A dagegen werden die leichten Verringerungen des mikrobiell gebundenen C, N und P (vgl. Gehalte, Abbildung 42) durch den höheren Humusvorrat ausgeglichen, sodass kaum Unterschiede zur Referenz bestehen.



**Abbildung 45: Mittlere, massengewichtete C<sub>mik</sub>-, N<sub>mik</sub>- & P<sub>mik</sub>-Gehalte über die Horizonte L+O<sub>r</sub>, O<sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm.**

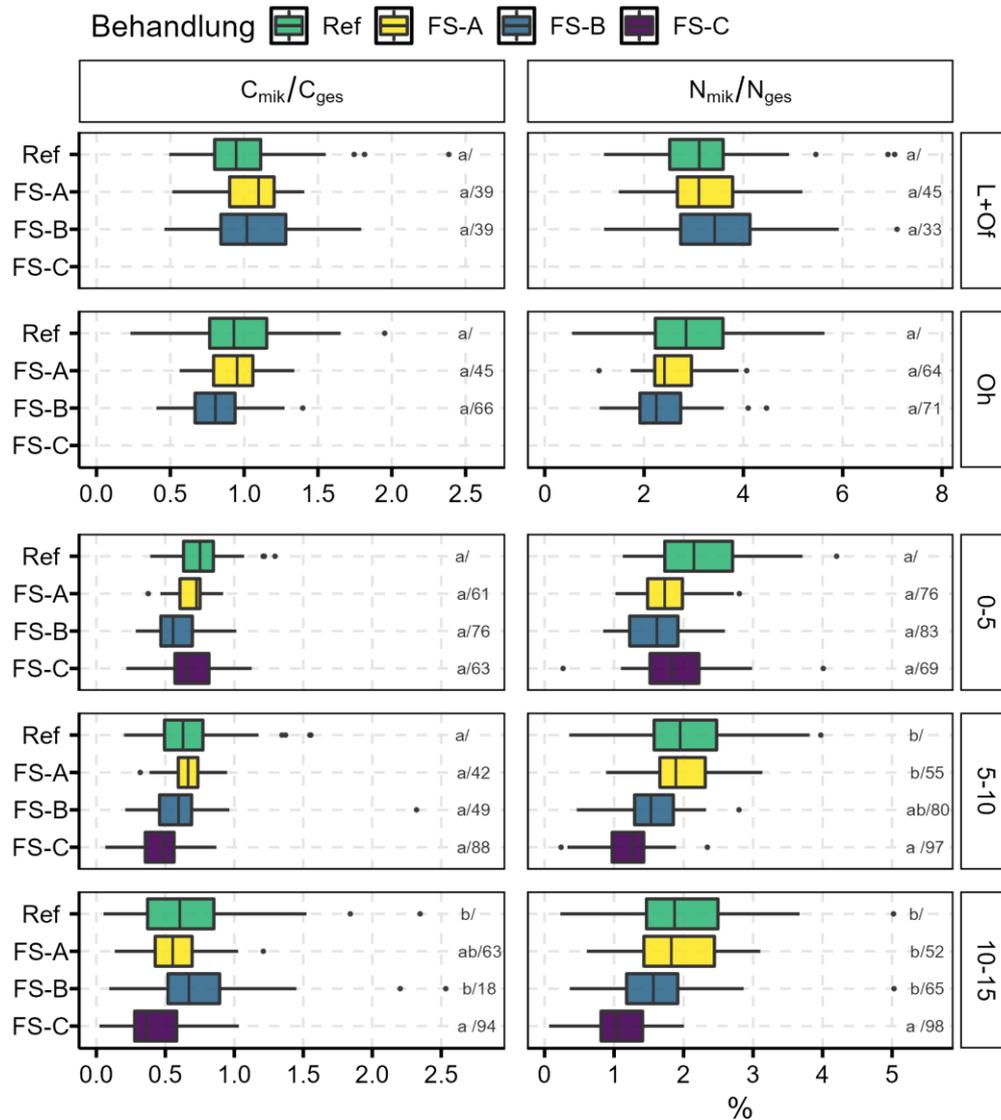
Betrachtet man die Atmung der Mikroorganismen (CO<sub>2</sub>), die unter Laborbedingungen nach 8-wöchiger Inkubation bei 8°C gemessen wurde, sticht ausschließlich das Ergebnis der Basalatumung der Proben heraus, die aus 0-5 cm und 5-10 cm unter Geländeoberkante der Fahrspuren > 20 cm (FS-C) gewonnen wurden (Abbildung 46). Hier zeigt sich eine signifikante Steigerung der Basalatumung. In Tiefenstufe 0-5 cm wurden in FS-C im Mittel 7,25 µg CO<sub>2</sub>-C d<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup> durch aerobe Atmung der Bodenmikroorganismen freigesetzt, in einigen Proben wurden sogar Werte gemessen, die mehr als dem 6-fachen der Proben aus den Referenzparzellen entsprechen, in denen im Mittel lediglich 2,35 µg CO<sub>2</sub>-C µg d<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup> emittiert wurden. Die Mehrzahl der Proben aus anderen Fahrspurbehandlungen und Horizonten/Tiefenstufen verhalten sich dagegen annähernd so wie die Proben der Referenzparzellen (Ref).

Das Ergebnis der Basalatumung kann ins Verhältnis zum mikrobiell gebundenen Kohlenstoff (C<sub>mik</sub>) gesetzt werden, um einen Indikator für die Effizienz der Mikroorganismen-tätigkeit bzw. einen Stressindikator zu erhalten (metabolischer Quotient, Abbildung 46). In den Proben, die aus den unbefahrenen Referenzparzellen (Ref) stammen, ergeben sich in allen Horizonten/Tiefenstufen geringe metabolische Quotienten, die als Ausdruck stabiler und effizienter mikrobieller Abbauprozesse gewertet werden können. Im Gegensatz dazu stehen die Werte insbesondere der aus FS-C stammenden Bodenproben. Hier zeigt sich anhand der signifikant erhöhten metabolischen Quotienten, dass je Einheit C<sub>mik</sub> wesentlich mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, worauf auf eher ineffiziente Umsätze geschlossen werden kann. Statistisch nicht signifikant sind die Werte aus den Spurbearbeitungen FS-A und FS-B. Dennoch ergeben sich auch hier, insbesondere in Behandlung FS-B, in nahezu allen Horizonten/Tiefenstufen Erhöhungen dieser Verhältnis-zahlen und weisen somit auf die verdichtungsbedingte Belastung der Bodenmikroorganismen hin. Die Wahrscheinlichkeiten, in Ref höhere Werte zu erhalten als in FS-B, liegen mit 4 % (O<sub>h</sub>-Horizont) bis 19 % (10-15 cm) auf sehr niedrigem Niveau und verdeutlichen den Unterschied zwischen unbefahrenen Referenzparzellen und den verdichteten Fahrspuren von Rückegassen.



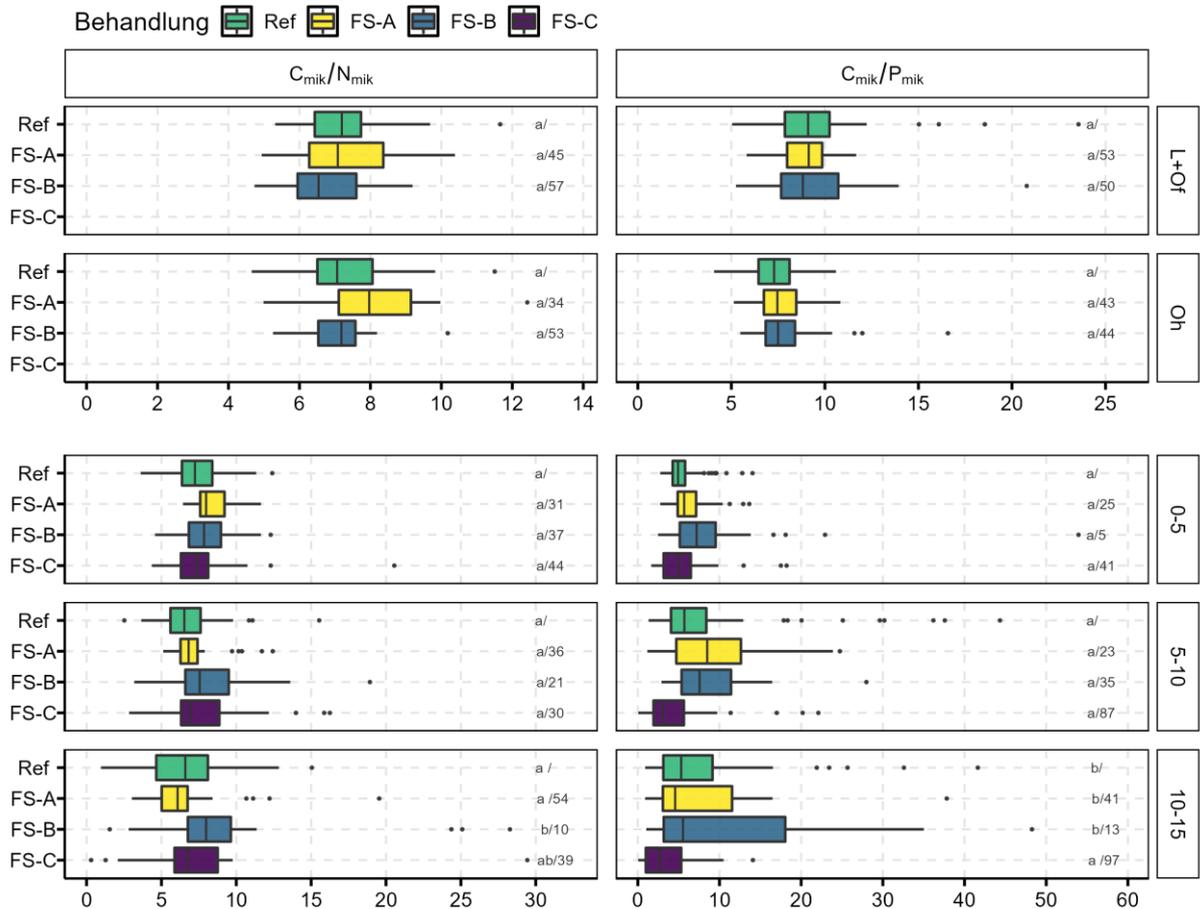
**Abbildung 46: Basalrespiration und Metabolischer Quotient in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.**

Weitere Indikatoren zur Beurteilung von Umweltveränderungen auf das mikrobielle Bodenleben bilden die Verhältniszahlen aus mikrobiell gebundenem C und N ( $C_{mik}$ ,  $N_{mik}$ ) und den Boden-Gesamtgehalten von Kohlenstoff und Stickstoff (vgl. Abbildung 47). Diese gestalten sich im Wesentlichen unauffällig und führen eher zu geringen Unterschieden zwischen Referenzparzellen und Fahrspurbehandlungen bzw. bleiben die Unterschiede auf einzelne Horizonte/Tiefenstufen und Behandlungen beschränkt. Während die Quotienten in der Humusaufgabe sehr nahe beieinander liegen und zu vernachlässigbaren Unterschieden zwischen den Behandlungen führen, zeigen die Ergebnisse der Kohlenstoff- und Stickstoffverfügbarkeit der Mineralbodenproben ein ähnliches Muster wie die Daten der mikrobiellen Biomasse. Zwischen Fahrspuren bis 10 cm (FS-A) und unbefahrenen Referenzparzellen (Ref) besteht kein Unterschied, in den Behandlungen FS-B und insbesondere FS-C nehmen  $C_{mik}/C_{ges}$  und  $N_{mik}/N_{ges}$  verglichen mit Ref ab. Insbesondere die Stickstoffverfügbarkeit im Unterboden (5-15 cm Tiefe) tiefer Fahrspuren (FS-C) liegt signifikant niedriger als in der Referenzparzelle ( $\sim -1\%$ ).



**Abbildung 47:**  $C_{mik}/C_{ges}$ - und  $N_{mik}/N_{ges}$ -Quotienten in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

Die Elementverhältnisse von Kohlenstoff zu Stickstoff ( $C_{mik}/N_{mik}$ ) und Kohlenstoff zu Phosphor ( $C_{mik}/P_{mik}$ ) in den Mikroorganismen selbst zeigen ebenfalls im Wesentlichen nur geringe bis keine Behandlungsunterschiede an (Abbildung 48). Dies gilt vor allem für die Humusaufgabe und den Oberboden. Im Unterboden (ab Tiefenstufe 5-10 cm) erhöhen sich die Quotienten von Kohlenstoff zu Stickstoff in den Fahrspuren, die tiefer als 10 cm sind (FS-B und FS-C), in Behandlung FS-B in der untersten, beprobten Tiefenstufe (10-15 cm) sogar signifikant. Eine ähnliche Wirkung besteht hier auch auf  $C_{mik}/P_{mik}$ . Fahrspurbehandlung FS-C sticht zudem in allen Mineralbodentiefenstufen mit den geringsten  $C_{mik}$ -Anteilen im Verhältnis zum mikrobiell gebundenen Phosphor hervor.



**Abbildung 48:**  $C_{mik}/N_{mik}$ - und  $C_{mik}/P_{mik}$ -Quotienten in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS  $> 0$ “ angeben.

### 2.9.3 Schlussfolgerungen

Vor Beginn der Untersuchungen wurde angenommen, dass sich die Fahrspurböden hinsichtlich der mikrobiellen Biomasse sowie den Elementverhältnissen von den Eigenschaften der Referenzparzellen unterscheiden. Diese Hypothese kann nur in Teilen bestätigt werden und ist in Abhängigkeit der Fahrspurbehandlung sowie der betrachteten Tiefenstufen und Parameter differenziert zu beurteilen. Zieht man die massengewichteten, mittleren  $C_{mik}$ -,  $N_{mik}$ - und  $P_{mik}$ -Gehalte heran, ist festzustellen, dass in Fahrspurböden insbesondere eine Beeinflussung der mikrobiell gebundenen Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte stattfindet.  $P_{mik}$  wird ebenfalls verändert, jedoch weniger als die beiden anderen Messgrößen. Für Behandlung FS-A ist die Hypothese aufgrund hoher Ähnlichkeiten zu den Ref-Böden nicht zutreffend – hingegen kann sie für die Behandlungen FS-B und FS-C bestätigt werden. In diesen beiden Fahrspurbehandlungen kommt es zu einer deutlichen Verringerung der mikrobiellen Biomasse. Im Wesentlichen keinen signifikanten Einfluss nimmt die Spurtiefe auf die Elementverhältnisse in den Mikroorganismen, sodass dieser Teil der Hypothese zu verwerfen ist. Gleichfalls nicht zutreffend ist die angenommene Wirkung auf die Basalatmung sowie die Kohlenstoffverfügbarkeit. Hier wurde davon ausgegangen, dass es in den Fahrspurböden zu einer Verringerung der Basalatmung und der Kohlenstoffverfügbarkeit kommt. Hinsichtlich der Basalatmung ist dies in den Behandlungen FS-A und FS-B nicht zutreffend – es konnten geringfügige Steigerungen festgestellt werden. In FS-C konnte sogar eine starke Zunahme der Basalatmung beobachtet werden, sodass diese Hypothese zu verwerfen ist. Bei der Kohlenstoffverfügbarkeit zeigt sich, dass es zumindest im Unterboden von Behandlung FS-C tendenziell zu einer Verringerung kommt. Obgleich das Ergebnis des metabolischen Quotienten ausschließlich für die Mineralbodentiefenstufen der Behandlung FS-C signifikant ist (Erhöhung) und damit dem erwarteten Zusammenhang entspricht, besteht auch in den Spurböden FS-A und FS-B eine Neigung zur Steigerung der metabolischen Quotienten. Jene Hypothese ist somit teilweise zutreffend.

Die beschriebenen Ergebnisse der Wirkung der Befahrung auf Eigenschaften der mikrobiellen Biomasse stehen zu großen Teilen in Zusammenhang mit dem befahrungsbedingten Effekt auf den Aufbau des Bodens. Kommt es während der Befahrung zu seitlicher Verdrängung und Verlagerung von Bodenmaterial durch das zunehmende Einsinken von Forstmaschinen sowie ggf. Erosionsereignisse im Nachgang von

Bewirtschaftungsmaßnahmen, werden der lokale Bodenaufbau und die Nährstoffausstattung stark verändert. Die Einarbeitung und Vermengung humoser Bodensubstanz mit mineralisch geprägten Horizonten kann ebenfalls Folge der Befahrung sein und eine Veränderung des Standorts in den Fahrspuren hervorrufen. Begleiterscheinung der Störung des über lange Zeiträume entwickelten Bodens ist eine schlagartige Veränderung des Lebensraumes für Bodenorganismen, in deren Folge das Bodenleben mit verringerter mikrobieller Biomasse und geringeren Respirationsraten reagiert und es zu veränderter Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit für die Mikroorganismen kommt. In Behandlung *FS-C* geht die Humusaufgabe und somit die Lebensgrundlage für Arten, die auf diesen Bodenbestandteil angewiesen sind, faktisch vollständig verloren. Es ist anzunehmen, dass der Wandel der Bodenbeschaffenheit und des Luft-, Wasser- und Wärmehaushalts besonders zu Ungunsten aerober Bodenorganismen geschieht, wohingegen Arten, die an sauerstoffarme oder anaerobe Bedingungen angepasst sind, profitieren. Aus dem Vergleich mit der unbefahrenen Referenzparzelle lässt sich ableiten, dass eine relevante Störung des Bodenlebens ab Fahrspurtiefen von > 10 cm (*FS-B*) beginnt und im weiteren Verlauf zunehmend intensiver wird, sodass Fahrspurböden mit Tiefen > 20 cm (*FS-C*) erheblich gestört sind. Gegensätzlich dazu verhalten sich jene Fahrspuren, bei denen sich die Befahrungswirkung auf eine Komprimierung des Bodens beschränkt, Humusaufgabe sowie die gewachsene Abfolge von Ober- und Unterboden aber erhalten bleiben, wie dies in Fahrspurbehandlung *FS-A* mit Spurtiefen zwischen 0-10 cm der Fall ist. Hier ist die Beeinflussung der Bodenmikroorganismen eher gering und vernachlässigbar. Aus den Untersuchungen gehen erheblich gesteigerte Humusvorräte in Fahrspurbehandlung *A* hervor, die sich am plausibelsten durch die gezielte Ablage von Schlagabraum (Reisigmatte) während Pflegemaßnahmen der Vergangenheit erklären lassen und vermutlich einen Beitrag zum Schutz des Bodenaufbaus und des Lebensraumes Boden geleistet haben.

## **2.10 Streuabbau (TV1)**

*Forschungsfrage:* Inwieweit wird die Abbaudynamik der organischen Substanz (Fichtenstreu) als Maß für die Nährstoffrückführung modifiziert?

*Hypothese:* Der veränderte Wasser- und Gashaushalt, verbunden mit der Wirkung auf die Mikroorganismengemeinschaft von Fahrspurböden, führt zu geringeren Streuabbauraten verglichen mit unbefahrenen Waldböden, wodurch die Nährstoffrückführung aus organischer Substanz vermindert wird. Dieser Effekt ist bei schwachen Fahrspuren, die noch eine Humusaufgabe besitzen, weniger stark ausgeprägt als bei Fahrspuren, deren Humusaufgabe teilweise oder komplett zur Seite geschoben wurde.

## 2.10.1 Material & Methoden



**Abbildung 49: Gewinnung (A) und Sortierung (B) von Fichtenstreu sowie Ausbringung (C) und Einholung (D) von Netzbeuteln (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).**

Zur Durchführung des Versuches zum Streuabbau wurde am 11.01.2018 (S1-S6) und am 19.09.2018 (S7-S18) autochthone Bestandesstreu auf den Versuchsflächen (Revier 5, Abt. 4236 [S1-S6]; ,Revier 6, Abt. 12-15 [S7-S18]) gesammelt (Abbildung 49, A). Basierend auf der Versuchsplanung, wurden im ersten Versuchsjahr (Situationen S1-S6) insgesamt 600 Netzbeutel (6 Versuchsgassen x 2 Behandlungen x 2 Maschenweiten x 5 Wiederholungen x 5 Netzbeutel) befüllt und innerhalb der Behandlungen exponiert. Für die Situationen S7-S18 wurden 720 Netzbeutel gefertigt und ausgebracht (12 Versuchsgassen x 2 Behandlungen x 2 Maschenweiten x 5 Wiederholungen x 3 Netzbeutel). Ein einzelner Netzbeutel besaß eine Grundfläche von 0,01 m<sup>2</sup> (Abmessungen: 10 cm x 10 cm) und wurde mit einer standortadäquaten Masse Fichtenstreu befüllt. Die Masse der auszubringenden Fichtenstreu je Beutel wurde aus der vor Ort gewonnenen Menge Fichtenstreu abgeleitet und betrug bei den Situationen S1-S6 4,55 g Beutel<sup>-1</sup> (entspricht einer Streumenge von 4,55 t ha<sup>-1</sup>). Zur Wahrung der Vergleichbarkeit wurde in den Situationen S7-S18 die gleiche Einwaage verwendet.

Bei der Streuentnahme und -verarbeitung wurde folgendermaßen vorgegangen: Rechnerisch ergab sich aus der vorgesehenen Anzahl Netzbeutel eine zu beprobende Grundfläche von 6,0 m<sup>2</sup> (S1-S6) bzw. 7,2 m<sup>2</sup> (S7-S18). Um zu gewährleisten, dass nach Entnahme von Teilproben zur Bestimmung der Wassergehalte und zu Testzwecken (Befüllung Netzbeutel) die für 6 m<sup>2</sup> bzw. 7,2 m<sup>2</sup> typische Menge Fichtenstreu zur Verfügung stand, wurde eine Fläche von 7 m<sup>2</sup> bzw. 8 m<sup>2</sup> beprobt, um eine gewisse „Reserve“ vorzuhalten. Die insgesamt 15 m<sup>2</sup> zu beprobende Fläche wurde randomisiert über alle Versuchsflächen (über mehrere Abteilungen) verteilt und ein jeder Probepunkt wiederum in 4 Quadranten zu je 0,25 m<sup>2</sup> segmentiert, sodass insgesamt 60 Teilproben gewonnen wurden. Dies diente dem Zweck, Informationen über die standortspezifische Variabilität der Streumengen zu gewinnen. Die Flächen zur Entnahme der Bestandesstreu wurden unmittelbar an die Versuchsabschnitte angrenzenden Bereichen des unbefahrenen Waldbodens ausgewählt und mittels Pflanzstäben abgegrenzt. Anschließend wurde die Förna (L-Horizont) vorsichtig händisch und unter Verwendung einer Maurerkelle abgesammelt, in Schüsseln vorkonzentriert und dann in PE-Tüten gefüllt. Nach der Gewinnung der Fichtenstreu wurde diese weiterverarbeitet (Aussortieren unerwünschter Bestandteile wie z.B. Feinreisig oder Zapfenschuppen, Abbildung 49, B), Wassergehalte zur Ermittlung des Humusvorrates und der Trockensubstanz bestimmt und die Streu anschließend bei 4°C im Kühlraum gelagert.

Zur Herstellung der Netzbeutel wurden zwei Typen von Siebgewebe (Polyamid) mit variierenden Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm) verwendet. Das Siebgewebe wurde unter Zuhilfenahme einer Schablone in kleinere Abschnitte mit den Maßen 11 cm x 22 cm zerteilt. Diese wurden übereinandergeschlagen und mittels eines Folienschweißgerätes an zwei der drei Überlappungsbereiche zusammengeschweißt. Zur Gewährleistung eindeutiger Identifizierung wurde ein farbliches Markierungssystem entwickelt, bestehend aus thermisch miteinander verbundenen Bügelperlen, die zusammen mit der Nadelstreu in die Netzbeutel eingebracht wurden. Die Befestigung der Netzbeutel auf der Bodenoberfläche erfolgte mittels sog. „Erdnägel“ (Polyethylen), die durch einen Polyamid-Ring, der wiederum mittels einer Polyamid-Schnur an die Netzbeutel geschweißt wurde, in den Boden gedrückt wurden (Abbildung 49, C). Die Befüllung sowie Ausbringung der 600 Netzbeutel (S1-S6) fand Ende April/Anfang Mai 2018 statt, während die 720 Netzbeutel der Situationen S7-S18 im Oktober 2018 ausgebracht wurden.

Die erste Rückholung der Beutelpärchen, bestehend aus einem grobmaschigen (1.000 µm) und einem feinmaschigen (50 µm) Netzbeutel, fand nach 5-monatiger Exposition im Gelände statt (Abbildung 49, D), ab der zweiten Einholung wurde ein Turnus von 4 Monaten eingehalten. Nach Beginn des Versuches wurden je 60 (S1-S6) bzw. 30 (S7-S18) Netzbeutel zu folgenden Terminen eingeholt:

S1-S6: 08.10.2018, 11.02.2019, 11.06.2019, 10.10.2019, 11.02.2020

S7-S18: 11.03.2018, 10.07.2019, 11.11.2019

Bei der Entnahme der exponierten Beutel im Gelände wurde sorgfältig darauf geachtet, Anhaftungen wie Gräser und Moose zu entfernen und sowohl bei Entnahme als auch Transport die Verluste durch Herausfallen von Fichtenstreu aus den Beuteln so gering wie möglich zu halten. Dies wurde durch Transport der Netzbeutel in ausreichend dimensionierten PE-Beuteln sichergestellt. Nach Rücklauf der Netzbeutel an die NW-FVA, wurden die Brutto-Gewichte (Beutel + Inhalt) gewogen und die Netzbeutel danach bei 60°C über 24 h getrocknet. Nach Abkühlung in Exsikkatoren fand eine erneute Wägung der Gesamtbeutelmasse und nach Entleerung des Beutelinhaltes die Bestimmung der Streumasse statt.

Neben der Bestimmung des Masseverlustes wurde an allen Streubeuteln zusätzlich eine Analyse der Anteile organischer/anorganischer Substanz mittels der Methode des Glühverlustes durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurde die Fichtenstreu nach Wägung in Porzellantiegel überführt und bei einer Temperatur von 550°C über 30 Minuten im Muffelofen verglüht. Zuvor und danach fand eine erneute Wägung des Materials statt.

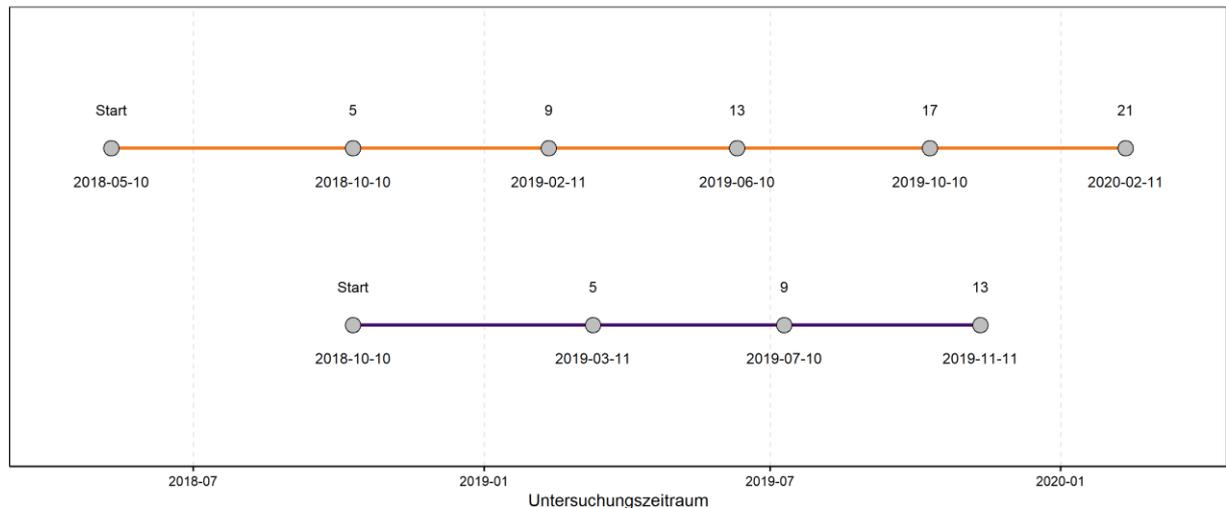
### Auswertung

Im Zuge der Auswertung des Versuchs zum Abbau von Fichtenstreu (Netzbeutelversuch) erfolgte zunächst eine Plausibilitätsprüfung der Datensätze in MS-Excel. Dabei wurden Streubeutel von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen, an denen während der Probeneinholung oder -verarbeitung Defekte am Polyamidgewebe wie beispielsweise Risse festgestellt wurden, durch die es zu nicht näher bestimmbar Streuverlust gekommen sein könnte. Ein Analyseschritt umfasste die Bestimmung des Glühverlustes, mit dem die beutelweisen Streumassen um den anorganischen Glührückstand (Asche) bereinigt wurden. Stark „verunreinigte“ Streubeutel, bei denen der Beutelinhalt nach Abzug des Glührückstandes > 5 % über der Ausbringungsmasse lag (ebenso um den Glührückstand bereinigt) fanden ebenfalls keinen Eingang in die weitere Auswertung. Für die Statistik in R wurden Teildatensätze nach Situationen und Maschenweiten gebildet und diese mittels linearer gemischter Modelle (lme4::lmer) analysiert. Die Streurückstände wurden dabei in Abhängigkeit von Einholungszeiträumen und Behandlungen (*fixed effects*) modelliert, die Versuchsgassen wurden als *random effects* gesetzt.

### **2.10.2 Ergebnisse**

Aus organisatorischen Gründen konnten die ca. 1.300 Streubeutel nicht zeitgleich auf den Versuchsgassen ausgebracht werden, sondern teilten sich in zwei Kollektive (Abbildung 50). In den Situationen S1-S6 (entspricht Fahrspurbehandlung *FS-B* + *Ref-B*) wurde der Versuch im Mai 2018 begonnen und nach sukzessiver Einholung der Beutel an fünf Terminen im Abstand von 5 bzw. 4 Monaten im Februar 2020 beendet. Bei den Versuchsgassen S7-S18 (*FS-A* + *Ref-A* und *FS-C* + *Ref-C*) konnte erst im Oktober 2018 mit dem Versuch begonnen werden. Die Laufzeit wurde auf drei Einholungszeitpunkte verringert, sodass der Versuch in diesen Situationen bereits im November 2019 abgeschlossen wurde. Infolge der unterschiedlichen Untersuchungszeiträume zwischen den beiden Kollektiven ist ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen von Behandlungen *FS-B* einerseits und *FS-A* + *FS-C* andererseits nicht möglich.

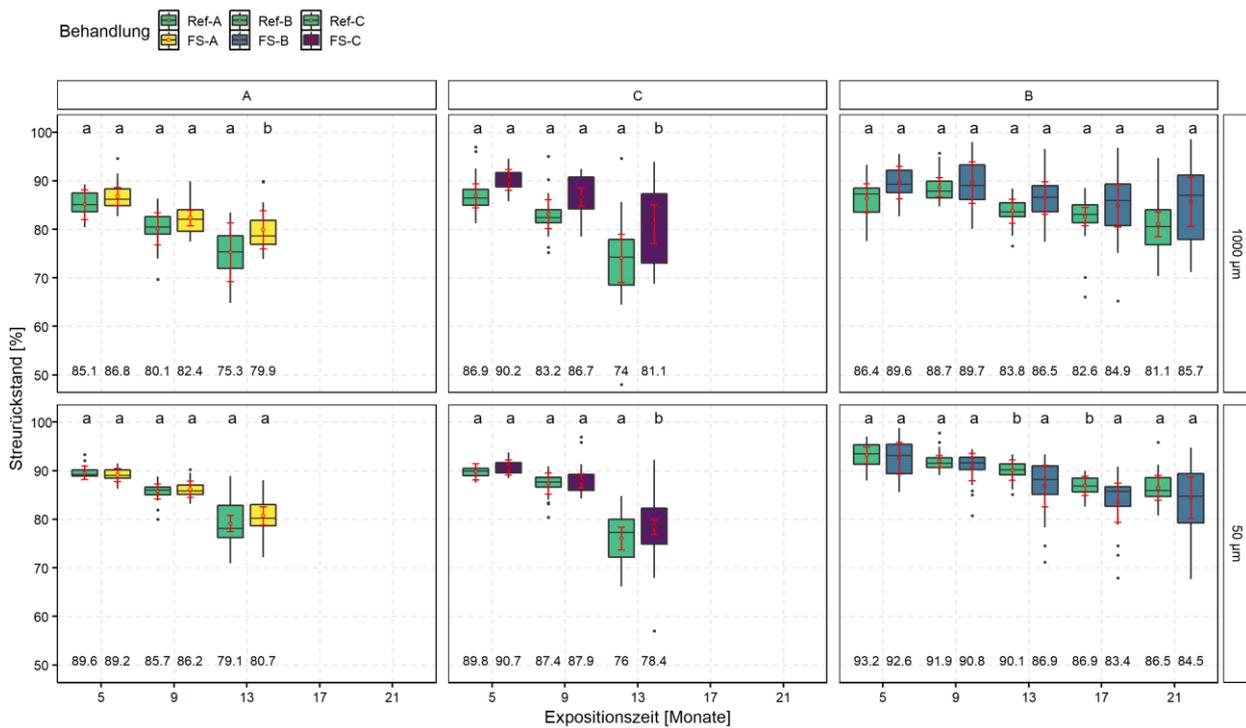
Behandlung   FS-A + FS-C   FS-B



**Abbildung 50: Überblick über die Untersuchungszeiträume des Netzbeutelversuchs nach Behandlungen.**

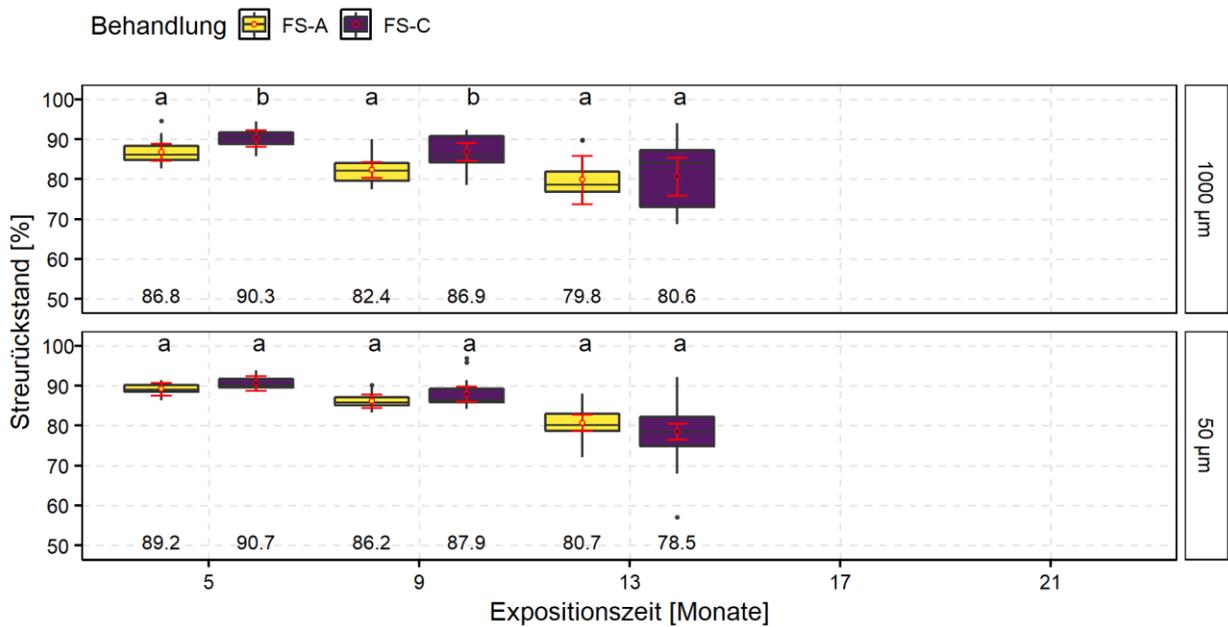
Erwartungsgemäß zeigt der Versuch zum Abbau organischer Substanz einen generellen Trend zur Abnahme der ausgebrachten Fichtenstreu im Zeitverlauf, der in allen Behandlungen und Maschenweiten gegeben und im Wesentlichen auf die Aktivität bzw. Zersetzung durch Bodenorganismen zurückzuführen ist (Abbildung 51). Im Allgemeinen sind auch die Verläufe der Streubeutel mit grober Maschenweite (1.000 µm) mit denen der feinen Maschenweite (50 µm) – die gewählt wurde, um die Größenklasse der Mesofauna vom Erreichen der Fichtenstreu auszuschließen – vergleichbar, wobei der Streuabbau in den grobmaschigen Polyamidbeuteln in der Regel rascher erfolgte, sodass zu den Probenahmezeitpunkten überwiegend größere Streumengen in den feinmaschigen Beuteln bestimmt wurden.

Der Vergleich der Streurückstände zwischen den Netzbeuteln der unbefahrenen Referenzparzellen und denen der Fahrspurbehandlungen fällt eindeutig aus und zeigt mit Ausnahme weniger Zeitpunkte höhere Streurückstände in den Fahrspuren, die auf geringere Abbauraten der exponierten Fichtenstreu innerhalb dieser verdichteten Bereiche schließen lassen. Die Größenordnung der Unterschiede ist zwar eher gering, führt in den Behandlungen *FS-A* und *FS-C* nach 13 monatiger Versuchsdauer jedoch zu signifikant niedrigeren Beutelinhalten der auf den unbefahrenen Waldparzellen exponierten Netzbeutel grober Maschenweite (*Ref-A*: ~ -4,6 %, *Ref-C*: ~ -7,1 %). In *FS-C* besteht dieser Effekt auch bei den feinmaschigen Streubeuteln. Bei den Streubeuteln der Maschenweite 50 µm, die auf den Fahrspuren mit 10-20 cm Spurtiefe (*FS-B*) ausgebracht waren, ergab sich dagegen während der gesamten Laufzeit ein vom restlichen Versuch abweichendes Bild: Die Streurückstände zwischen *FS-B* und *Ref-B* lagen von Beginn an auf vergleichbarem Level, nach 17 monatiger Exposition unterschritt der verbliebene Streuinhalt der auf den Fahrspuren ausgelegten Beutel allerdings um ca. 3,5 % das Ergebnis der Behandlung *Ref-B*, sodass innerhalb der Fahrspuren mehr Streu abgebaut wurde.



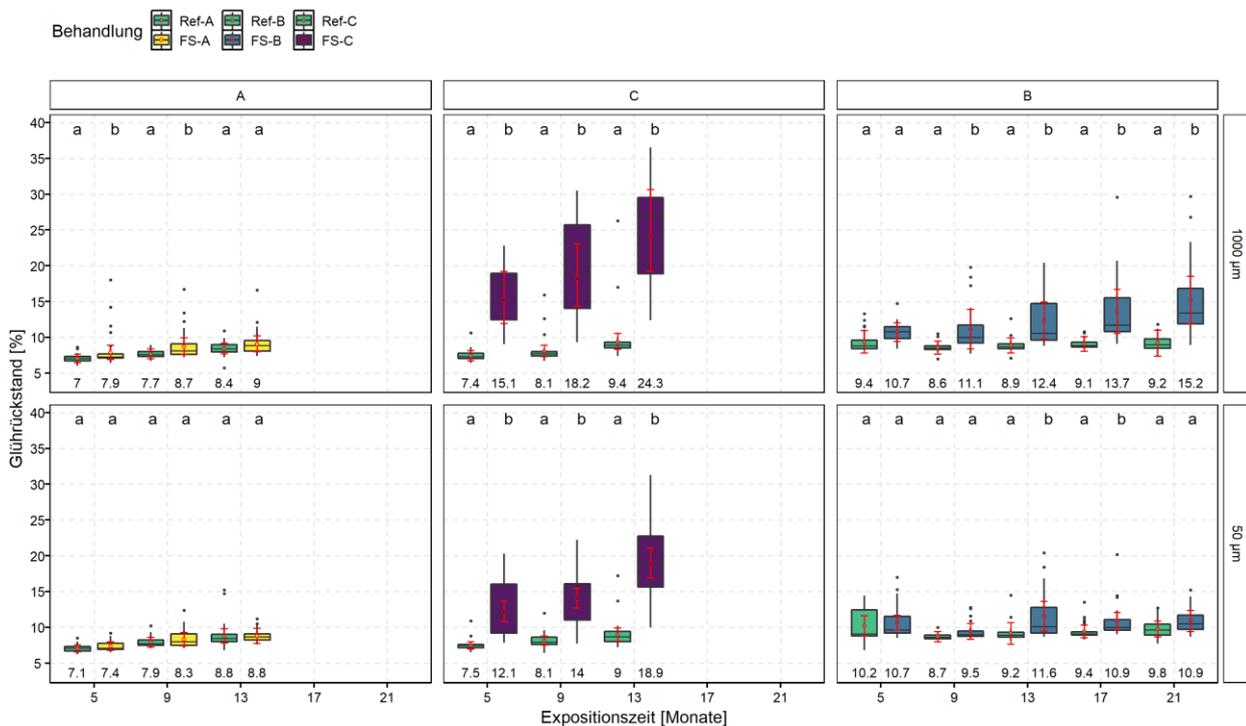
**Abbildung 51: Streurückstände nach 13 bzw. 21 Monaten Expositionszeit differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm) und Fahrspuren (S1-S6 und S7-S18; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen  $\pm$  95 %-Konfidenzintervalle (*estimated marginal means*; Werte bei y = 50 dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq$  5 %).**

Ein Behandlungsvergleich der Fahrspuren ist aufgrund der unterschiedlichen Versuchszeiträume nur für die Behandlungen FS-A und FS-C möglich (Abbildung 52). Der direkten Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Fahrspurbehandlungen lässt sich entnehmen, dass während aller Zeitpunkte, zu denen Streubeutel rückgeholt und die enthaltenen Streumassen bestimmt wurden, in den grobmaschigen Beuten mit 1.000 µm Maschenweite im Mittel  $\sim$  2,9 % weniger Streu in den Fahrspuren > 20 cm (FS-C) abgebaut wurde als in den Fahrspuren mit 0-10 cm (FS-A). Für die Zeitpunkte 5- und 9-monatiger Exposition ist das Ergebnis signifikant, nach 13 Monaten Auslage auf den Versuchsflächen gleicht sich das Ergebnis beider Behandlungen jedoch an und der vorherige statistische Unterschied geht verloren. Hinsichtlich der Beutel mit 50 µm Maschenweite besteht im Gegensatz zu den grobmaschigen Netzbeuteln ein nur geringer, vernachlässigbarer Unterschied, sodass sich beide Spurbbehandlungen sehr ähnlich sind.



**Abbildung 52:** Vergleich der Streurückstände zwischen den Behandlungen *FS-A* und *FS-C* differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen  $\pm$  95 %-Konfidenzintervalle (*estimated marginal means*; Werte bei  $y = 50$  dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5$  %).

Im Zusammenhang mit dem Versuch zum Streuabbau wurde der Glührückstand analysiert und der sich daraus ergebende Glührückstand berechnet (Abbildung 53). Bereits während des Einsammelns der Streubeutel im Wald ließ sich eine verstärkte Verunreinigung der Streubeutel in tiefen Fahrspuren (*FS-C*) durch vermutlich auf Erosion zurückzuführende Einschwemmung von Mineralboden feststellen. Der subjektive Eindruck während der Beutelrückholung bestätigte sich nach den Analysen des Glührückstandes. Hier zeigen vor allem die aus den Fahrspuren *FS-B* und *FS-C* stammenden Streubeutel der Maschenweite 1.000 µm signifikant höhere Glührückstände, die etwa dem 2-2,6 fachen der unbefahrenen Referenzparzellen entsprechen. Auch die Streubeutel der Maschenweite 50 µm sind betroffen. Der Effekt nimmt mit steigender Fahrspurtiefe zu, besteht jedoch nicht in Fahrspuren des Typs *A* (0-10 cm), in denen die Ergebnisse zwischen *Ref-A* und *FS-A* im Wesentlichen sehr ähnlich sind. Infolge der mit der Fahrspurtiefe korrelierten Störung des Bodenaufbaus, die ab Spurtiefen > 10 cm zu einer zunehmenden Freilegung des Mineralbodens führt, kann angenommen werden, dass das durch oberflächlich fließendes Wasser hervorgerufene Bodenerosionspotential über Fahrspuren *FS-B* hin zu *FS-C* drastisch zunimmt, während Referenzen und Fahrspuren *FS-A* vermutlich von den Prozessen unberührt bleiben. Die Daten der Glührückstände wurden zwar zur Korrektur der Beutelinhalte verwendet und sehr stark verunreinigte Streubeutel von der Auswertung ausgeschlossen, dennoch ist unklar ob bzw. inwieweit die Ergebnisse des Streuabbaus in *FS-B* und *FS-C* durch den Prozess des Materialeintrages geprägt oder verändert wurden.



**Abbildung 53: Glührückstände nach 13 bzw. 21 Monaten Expositionszeit differenziert nach Maschenweiten (1.000 µm und 50 µm) und Fahrspuren (S1-S6 und S7-S18; n = 6). Die roten Symbole (unausgefüllte Punkte) innerhalb der Boxen repräsentieren Mittelwerte aus Modellprädiktionen ± 95 %-Konfidenzintervalle (*estimated marginal means*; Werte bei y = 3 dargestellt). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Einholungszeitpunkt an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %).**

### 2.10.3 Schlussfolgerungen

Vor der Versuchsdurchführung wurde angenommen, dass der verdichtungsbedingt veränderte Luft- und Wasserhaushalt sowie dessen Wirkung auf die Mikroorganismengemeinschaften in den Fahrspurböden zu geringerem Streuabbau verglichen mit den unbefahrenen Referenzparzellen führt. Diese Hypothese kann für Streubeutel mit grober Maschenweite (1.000 µm) bestätigt werden – ein geringerer Streuabbau induziert auch eine verminderte Nährstoffrückführung aus der organischen Substanz (Streu), wie vermutet wurde. Verworfen werden muss die Hypothese jedoch für feinmaschige Netzbeutel (50 µm), da das Ergebnis hier weniger eindeutig ausfällt und in FS-B teilweise sogar das Gegenteil anzeigt. Es wurde hypothetisch auch davon ausgegangen, dass der Effekt verminderten Streuabbaus bei Rückegassen mit geringer Spurtiefe (FS-A), bei denen eine geringere Beeinflussung der Humusaufgabe erwartet wurde, weniger stark ausgeprägt ist als in den Fahrspurbehandlungen FS-B und FS-C. Dies kann aufgrund der Datenlage sowie der methodischen Schwierigkeiten nicht als gesichert gelten, obwohl die Gegenüberstellung des Streuabbaus der grobmaschigen Netzbeutel zumindest an zwei von drei verglichenen Zeitpunkten eine Bestätigung der Hypothese liefert.

Insgesamt lässt sich aus dem Netzbeutelversuch tendenziell ein verringerter Streuabbau in den Fahrspurbehandlungen ableiten, der folgerichtig erscheint, wenn man die Verdichtung der Fahrspurböden, den teilweisen Verlust der Humusaufgabe und Störung des Bodenaufbaus sowie deren Auswirkungen auf den Lebensraum Boden in Betracht zieht. Die Intensität der Veränderung von Bodenstruktureigenschaften und Bodenaufbau nimmt im Allgemeinen von FS-A über FS-B hin zu FS-C zu. Dies schlägt sich aber nur bedingt im Umsatz der Streu nieder, sodass lediglich ein sehr schwach ausgeprägter (negativer) Zusammenhang zwischen Spurtiefe und Streuabbau besteht. Der Abbau organischer Substanz – zumindest von frischem Material – bleibt demnach auf Fahrspuren größtenteils erhalten. Ein gesicherter Zusammenhang zur Fahrspurtiefe besteht nicht. Das gezeigte Bild ist allerdings auf die untersuchten Jahre und die Versuchsdauer beschränkt, unbekannt ist die weitere zeitliche Dynamik, die sich nach 13 bzw. 21 Monaten ergeben hätte. Es ist anzunehmen, dass sich die zwischen Fahrspuren und Referenzparzellen bestehenden Unterschiede im weiteren Zeitverlauf vergrößert hätten, zumal sich signifikante Differenzen zumindest bei Fahrspuren von FS-A und FS-C erst im letzten Zeitraum (13 Monate) gezeigt haben. Vorstellbar ist, dass die aus anderen Versuchen (Respirationsmessungen, Eigenschaften der mikrobiellen Biomasse) abzuleitenden negativen Wirkungen auf das Bodenleben vor allem nach langer Zeit zum Tragen kommen könnten, da annehmbar bestimmte Akteure der (mikrobiellen) Zersetzerkette in geringerer Populationsgröße vorhanden oder vollständig ausgefallen sein könnten. Die zeitlich zunehmende Rekalzitranz der organischen Substanz (Fichtenstreu) könnte gerade bei Veränderungen der Artenstruktur für die Dynamik des Streuabbaus bedeutungsvoll sein und besonders nach

längerer Zeitdauer zu größeren Unterschieden im Streuabbau zwischen unbefahrenen Referenzparzellen und Fahrspuren führen.

Weitere Effekte, die auf den Streuabbau und das gezeigte Ergebnis Einfluss nehmen, sind der unterschiedliche Wasserhaushalt der Fahrspuren und Referenzparzellen sowie die verschiedene Exposition der Versuchsflächen. Bei den Streubeuteln der Maschenweite 50 µm, die in den Fahrspuren *FS-B* ausgelegt waren, deutet sich ein teils höherer Streuabbau verglichen mit den unbefahrenen Referenzparzellen an. Dies ist vermutlich sowohl auf die höhere Bodenfeuchte in diesen Fahrspuren als auch auf eine Art „Schwammefekt“ des feinmaschigen Gewebes zurückzuführen. Hinzu kommt, dass die Versuchsflächen *Ref-B* und *FS-B* nördlich exponiert liegen, im Gegensatz zu den Flächen von Gruppe *A* und *C*, die auf dem gegenüberliegenden, südlich exponierten Hang angelegt wurden. Aufgrund der beschriebenen methodischen Herausforderungen ist eine Bewertung der Fahrspurtiefe auf den Streuabbau nur eingeschränkt möglich.

## **2.11 Bodenchemische Eigenschaften (TV1)**

*Forschungsfrage: Wie wirkt sich die Befahrung forstlicher Rückegassen auf einem Lössstandort im Solling auf die Nährstoffgehalte und -vorräte von Fahrspurböden verschiedener Tiefen im direkten Vergleich zum unbefahrenen Boden des Waldbestandes aus?*

Hypothese: Mit zunehmender Fahrspurtiefe ist eine Abnahme der Mächtigkeiten des Auflagehumus und des humosen Oberbodens zu verzeichnen. Dies geht einher mit einer Verringerung des organischen Kohlenstoffvorrats in den Fahrspurböden. Durch die (teilweise) Entfernung der Humusauflage und des humosen Oberbodens sowie die veränderten Streuabbaubedingungen in Fahrspurböden, verändert sich die Menge und Zusammensetzung der organischen Substanz sowie die Aktivität und Biomasse der Mikroorganismengemeinschaft. Dies hat einen Einfluss auf die Elementgehalte, -verhältnisse und -vorräte im Boden.

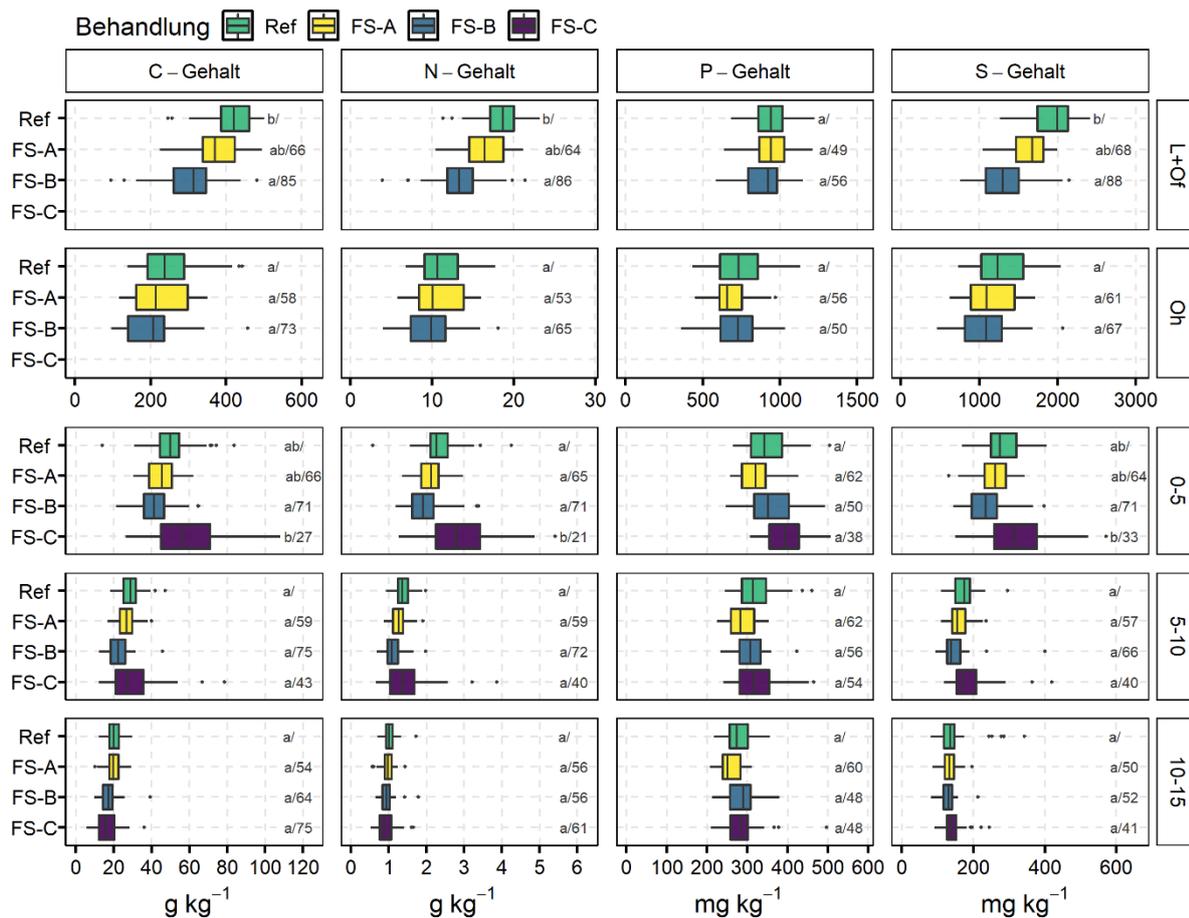
### **2.11.1 Material & Methoden**

Siehe II.2.9.1.

### **2.11.2 Ergebnisse**

Auf Darstellungen der elementweisen Vorräte wird aufgrund des Umfangs sowie der ebenfalls im Kapitel der Ergebnisse der Bodenbiologie (II.2.9.2) bereits ausgeführten Punkte verzichtet.

Abbildung 54 stellt die Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelgehalte der vier Versuchsbehandlungen nach Horizonten und Tiefenstufen dar. Mit Ausnahme des Phosphors ist für C, N und S ein vergleichbares Muster erkennbar, das auf Korrelationen der Elementgehalte untereinander zurückzuführen ist. Aufgrund der typischen Verteilung organischer Bodensubstanz im vertikalen Bodenaufbau, mit hohen Anteilen humoser Substanz in der Humusauflage und dem Oberboden und abnehmenden Gehalten mit zunehmender Bodentiefe, liegen in der Humusauflage die höchsten Gehalte an Kohlenstoff sowie Stickstoff und Schwefel vor – im Mineralboden nehmen die Gehalte tiefenstufenweise degressiv ab.

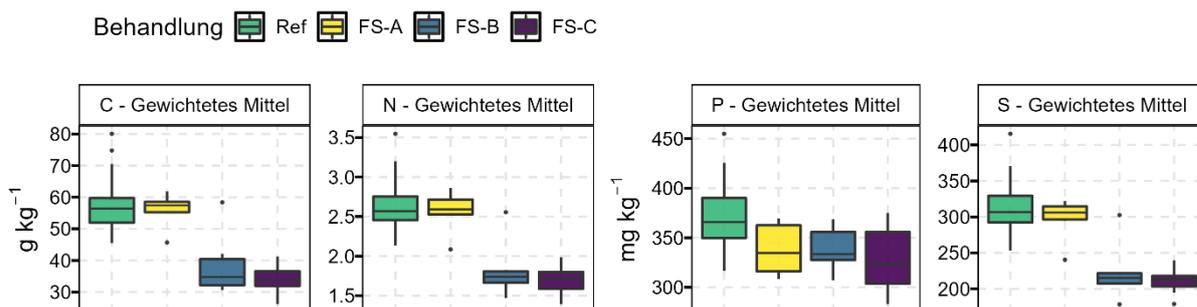


**Abbildung 54:** C-, N-, P- und S-Gehalte bodenchemischer Proben in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

Innerhalb der Humusaufgabe bleibt der Einfluss der Befahrung zu größten Teilen auf den obersten Horizont des Bodens, den L+Of-Horizont, beschränkt. Hier sind leichte, nicht signifikante Abnahmen der Stoffgehalte bei FS-A gegeben. Erst ab Fahrspurtiefen > 20 cm (FS-B) bewirkt die maschineninduzierte Spurbildung eine signifikante Abnahme der C-, N- und S-Gehalte (Mittelwert C-Gehalte: Ref: rd. 417 g kg<sup>-1</sup>, FS-B: rd. 304 g kg<sup>-1</sup>). Die Phosphorgehalte verbleiben dagegen von Veränderungen unberührt. Wie oben (II.2.9.1) und den Ergebnissen der Bodenbiologie beschrieben, konnten in FS-C keine Proben aus der Humusaufgabe gewonnen werden, da diese befahrungsbedingt aus den Fahrspuren in periphere Bereiche umgelagert wurde und infolgedessen nicht mehr bzw. nur noch in Rückständen vorhanden war. Entsprechend wird das Ergebnis der Mineralbodenproben von FS-C durch die häufig intensiv eingearbeiteten Humusreste, die über sehr hohe organische Kohlenstoffgehalte verfügen – siehe Ergebnisse der Humusaufgabe von Ref –, geprägt. In den Tiefenstufen 0-5 cm und teils 5-10 cm kommt es zu erheblichen Steigerungen der C-, N- und S-Gehalte (die statistische Auswertung zeigt, dass die Gehalte in der Tiefenstufe 0-5 cm mit hohen Wahrscheinlichkeiten in FS-C größer als in den Referenzparzellen sind), die allerdings im Mittel und Median keine signifikanten Unterschiede zu den Referenzparzellen sowie FS-A ergeben. In Behandlung FS-A können, wie in der Humusaufgabe, auch im Mineralboden keine bedeutenden Unterschiede zur Referenzparzelle gefunden werden, die Gehalte sind dort lediglich leicht verringert. Eine stärkere Abnahme ist erst ab Spurtiefen zwischen 10-20 cm (FS-B) gegeben, im Wesentlichen aber auf die ersten 10 cm des Mineralbodens beschränkt. Der Mineralbodenphosphor weicht von dem geschilderten Schema etwas ab, sodass es in Behandlung FS-A zu leichten, statistisch nicht signifikanten Abnahmen der Gehalte kommt. In Behandlung FS-B bleiben die Phosphorgehalte im Mineralboden verglichen mit der Referenz gleich, in FS-C, mit Ausnahme der ersten Tiefenstufe, ebenso.

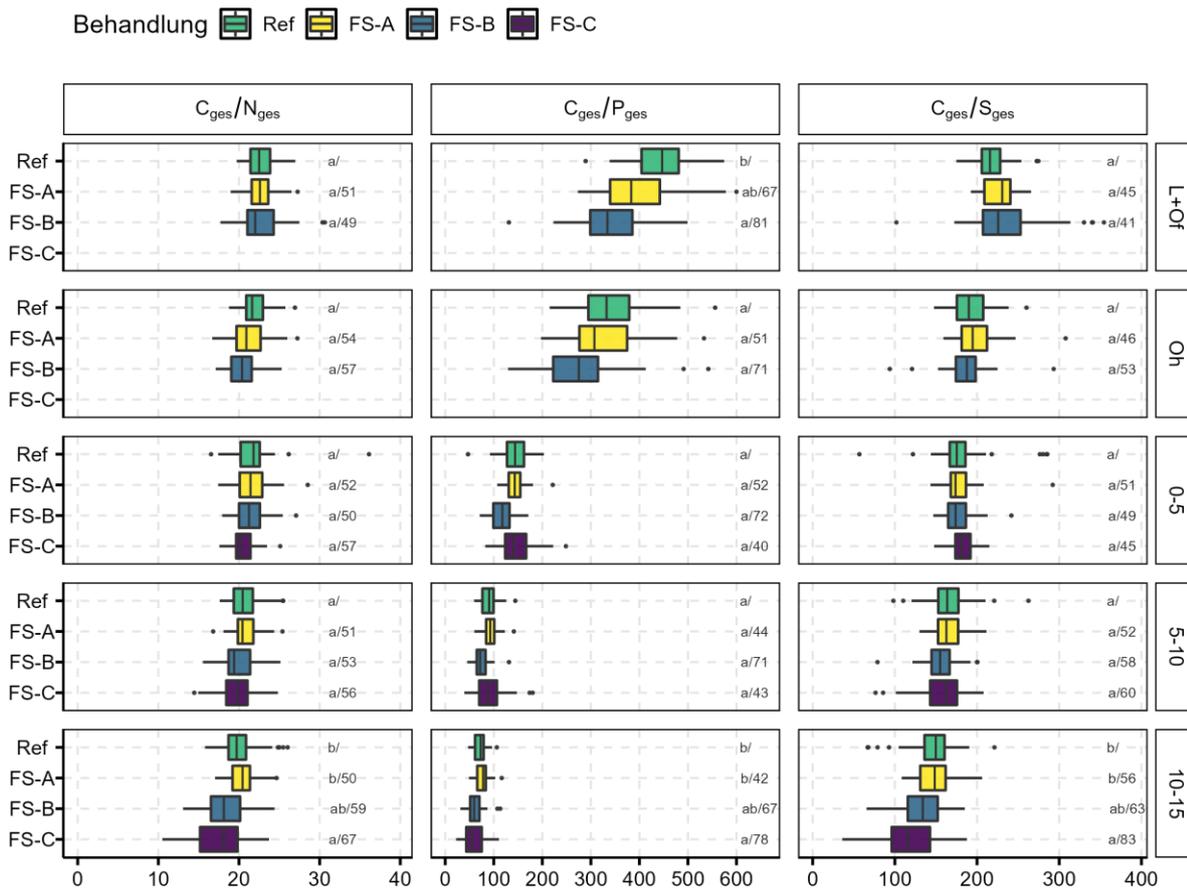
Berücksichtigt man die befahrungs- und infolgedessen verdichtungsbedingten Unterschiede bei den Humusvorräten und Bodenmassen (siehe dazu Ergebnisse der Bodenbiologie (II.2.9.2) und Trockenrohdichte (II.2.2)) und drückt die Kohlenstoff-, Stickstoff-, Schwefel- und Phosphorgehalte als massengewichtete, mittlere Gehalte aus, wird ersichtlich, dass die morphologischen Veränderungen der Rückegassen bei Spurtiefen bis zu 10 cm (FS-A) zu keinen Veränderungen dieser Elementgehalte innerhalb der Fahrspuren führen (Abbildung 55). In Fahrspuren größer 10 cm Tiefe ist indes ein starker, lokaler Rückgang der mittleren

Stoffgehalte zu verzeichnen. Anders verhält sich der Phosphor, bei dem die Abnahme deutlich schwächer ausfällt.



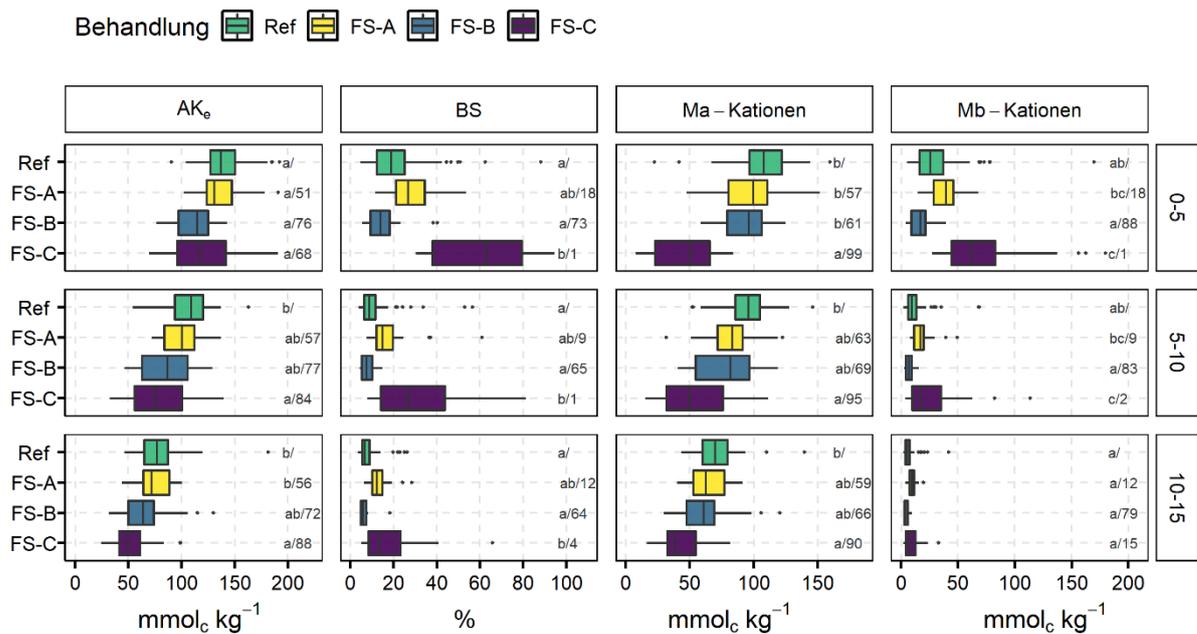
**Abbildung 55: Mittlere, massengewichtete C-, N-, P- und S-Gehalte über die Horizonte L+O<sub>f</sub>, O<sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm.**

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 10-15 cm, in der im Mittel leicht geringere C/N- und C/S-Verhältnisse in FS-C bestimmt wurden (signifikant), kommt es innerhalb der Fahrspuren zu keinen Veränderungen der C:N- und C/S-Quotienten, die ebenso keine ausgesprochene Tiefendifferenzierung aufweisen (Abbildung 56). Das C/P-Verhältnis verhält sich, wie die Phosphorgehalte, abweichend, und zeigt eine Profildifferenzierung und zudem signifikante Zunahmen der Phosphorgehalte im Verhältnis zu den Kohlenstoffgehalten im L+O<sub>f</sub>-Horizont von Behandlung FS-B, die in abgeschwächter Form auch im O<sub>h</sub>-Horizont und den Mineralbodentiefenstufen gegeben sind. In Behandlung FS-C unterscheidet sich das C/P-Verhältnis im Oberboden, ähnlich wie die C-, N-, P- und S-Gehalte nicht von der Referenz, im Unterboden ist es dagegen etwas enger (nicht signifikant).



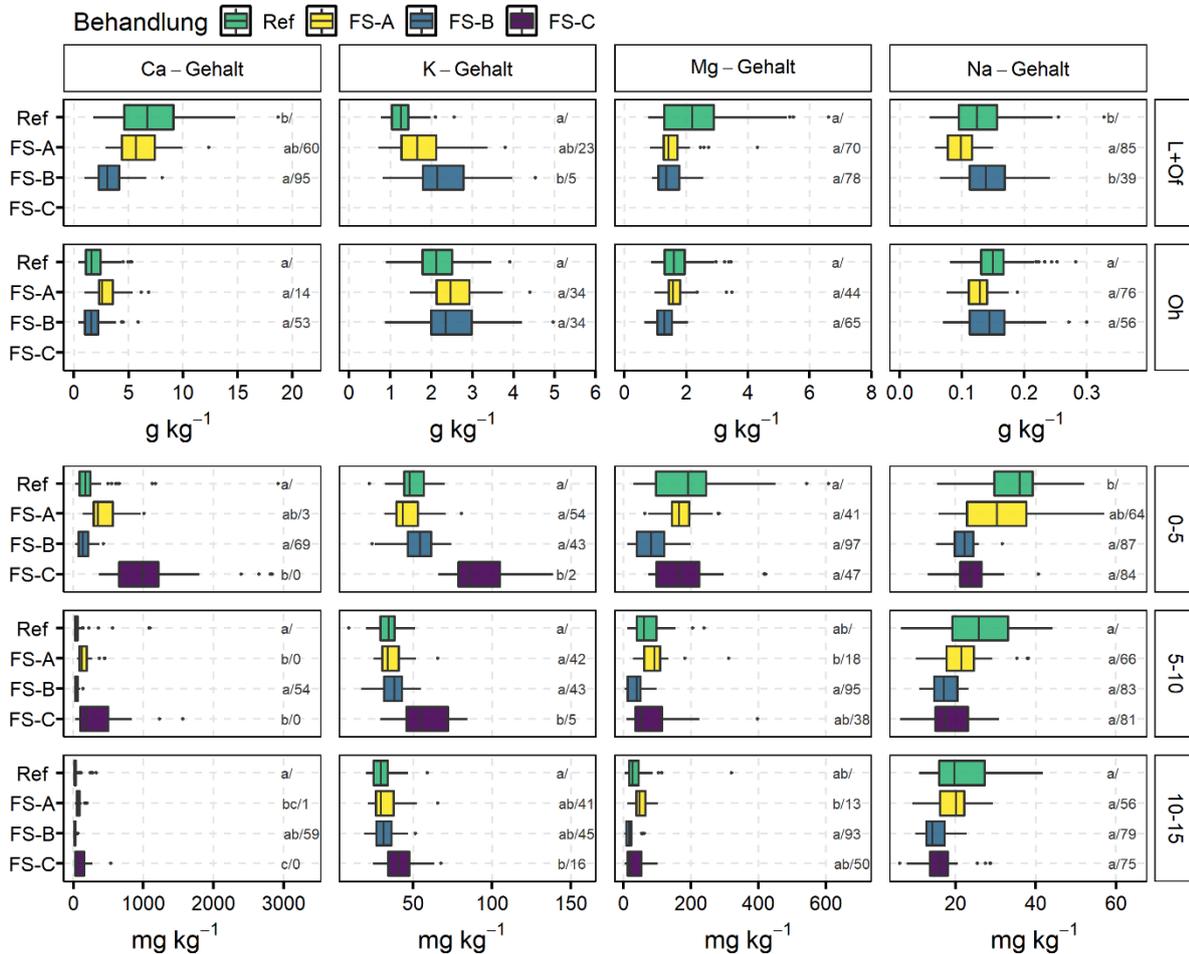
**Abbildung 56:** C/N-, C/P- und C/S-Quotienten in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

Betrachtet man die Wirkung der Befahrung auf die kurzfristige Nährstoffverfügbarkeit (effektive Kationenaustauschkapazität  $AK_e$ ) im Mineralboden des insgesamt eher mäßig mit Nährstoffen versorgten Standorts, sind teilweise signifikante, wenn auch geringe, Unterschiede zwischen den Behandlungen ersichtlich (Abbildung 57). In Fahrspuren mit schwacher Tiefe (FS-A) liegt die  $AK_e$  annähernd im Wertebereich der Referenzen, im Gegensatz zu mittelstark (FS-B) und stark ausgefahrenen Fahrspuren (FS-C), in denen bei gegebenem pH-Wert in allen Tiefenstufen weniger Kationen gebunden sind. In den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-15 cm ist die gefundene Abnahme signifikant für den Vergleich FS-C - Ref. Indes bewirkt intensive Spurbildung > 20 cm (FS-C) eine starke, signifikante Veränderung des Kationenbelags zugunsten basischer Kationen (Mb-Kationen) in den ersten 10 cm des Mineralbodens, wohingegen saure Kationen (Ma-Kationen) gleichsam signifikant abnehmen. Folglich steigt der prozentuale Anteil der Base-Kationen am Gesamtkationenbelag (Basensättigung BS) in allen untersuchten Mineralbodentiefenstufen von FS-C drastisch und signifikant an (etwa eine Verdreifachung in 0-10 cm und eine Verdoppelung in 10-15 cm). Bei den Behandlungen FS-A und FS-B gestaltet sich das Muster weniger eindrücklich. Bezüglich der Ma-Kationen ist auch in Fahrspuren bis 20 cm ein Trend zur Abnahme gegeben, der jedoch nicht signifikant und weniger stark ausgeprägt ist. Mb-Kationen werden in FS-A und FS-B insbesondere in den ersten beiden Tiefenstufen beeinflusst, in Behandlung FS-B besteht hohe Wahrscheinlichkeit für geringere Werte als in der unbefahrenen Kontrolle (Ref), in Behandlung FS-A stattdessen hohe Wahrscheinlichkeit für leichte Zunahme der Gesamtladung basischer Kationen. Dieses Schema spiegelt sich auch in der Basensättigung wider.



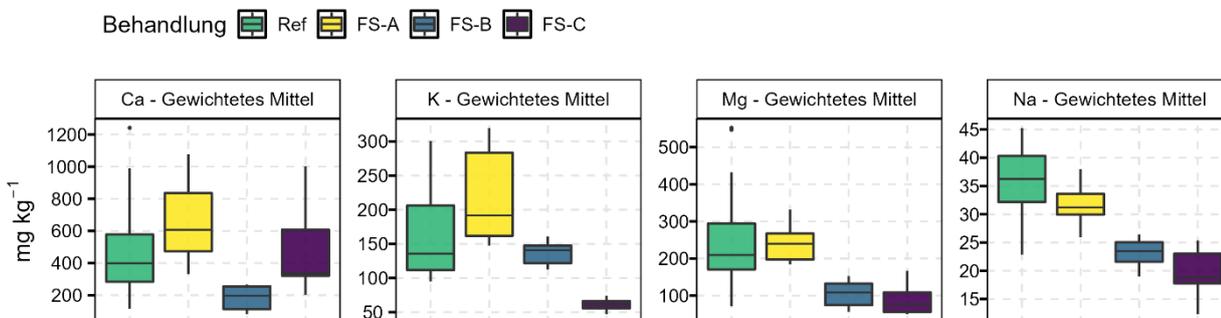
**Abbildung 57: Effektive Kationenaustauschkapazität (AK<sub>e</sub>), Basensättigung (BS), saure-Kationen (Ma-Kationen) und basische Kationen (Mb-Kationen) in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.**

Die Veränderungen der Mb-Kationen und der Basensättigung im Mineralboden von FS-C sind zu größten Teilen auf erhebliche, signifikante Steigerungen der austauschbar gebundenen Gehalte von Calcium und Kalium in allen Tiefenstufen, insbesondere 0-5 cm, zurückzuführen (Abbildung 58). Für FS-A ist der Vergleich mit der Referenz ebenfalls signifikant in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-15 cm, die Zunahme ist dort jedoch weniger intensiv und nur auf Calcium beschränkt. Spurbehandlung FS-B verhält sich indifferent zur unbefahrenen Referenz. Die Wirkungen auf die Mineralbodengehalte von Magnesium und Natrium fallen dagegen anders aus: Verallgemeinert liegen die Gehalte von Magnesium der vier Behandlungen auf ähnlichem Niveau, bei Natrium besteht in FS-B und FS-C ein Trend zu geringeren Werten in allen Tiefenstufen. Im Oberboden ist die Verringerung signifikant, in Behandlung FS-A besteht insgesamt kein Befahrungseffekt auf das einwertige Natriumion im Mineralboden, dafür aber im L+O<sub>r</sub>-Horizont, in dem signifikant weniger Natrium enthalten ist. Bis auf diese und wenige andere Ausnahmen, wie die statistisch signifikanten Abnahmen von Calcium bzw. Zunahmen von Kalium im L+O<sub>r</sub>-Horizont von FS-B, bleiben die Nährstoffgehalte von Ca, K, Mg und Na in der Humusaufgabe (Königswasseraufschluss), bei denen es sich um kurz- bis mittelfristig verfügbare Nährstoffe handelt, von Befahrungseffekten im Wesentlichen unberührt.



**Abbildung 58:** Ca-, K-, Mg- und Na-Gehalte in den Horizonten L+O<sub>f</sub> & O<sub>h</sub> (mittels Königswasseraufschluss analysiert) sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm (Bestimmung durch NH<sub>4</sub>Cl-Perkolationsanalyse). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

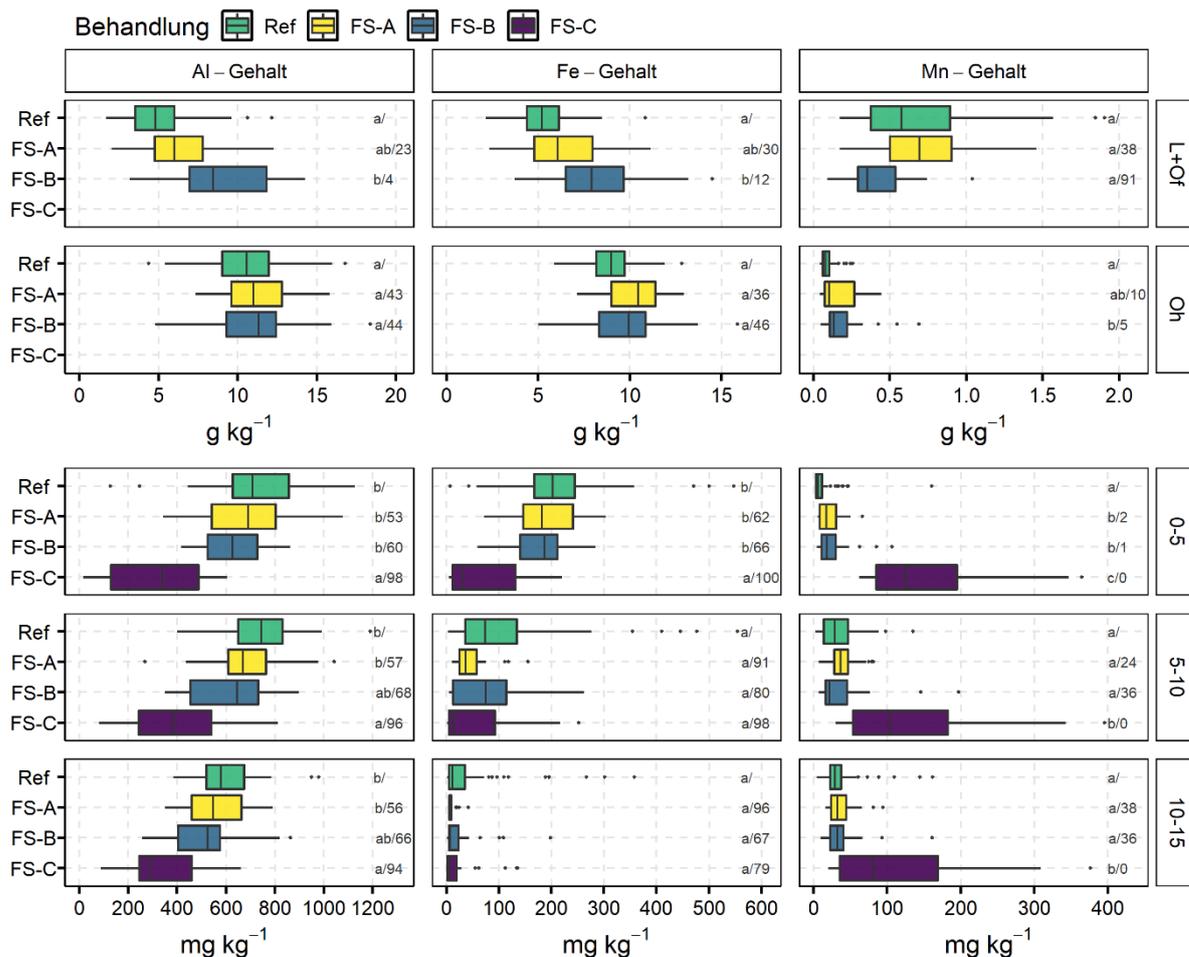
Die Darstellung als massengewichtete, mittlere Stoffgehalte (Abbildung 59) zeigt vor allem einen beträchtlichen Rückgang des Makronährelements Kalium in Behandlung FS-C an, wohingegen in Fahrspur A im Median eine Steigerung gegeben ist. Bei beiden Entwicklungen handelt es sich zu größten Teilen um Effekte der veränderten Humusaufgaben. Bei Calcium kommt es in den ersten 15 cm des Mineralbodens + Humusaufgabe nur bei Fahrspurbehandlung FS-B zu Auswirkungen auf den Stoffgehalt. Demgegenüber bewirkt eine Erhöhung der Fahrspurtiefe zunehmende Verarmung des Bodens an Natrium und in FS-B und FS-C ebenso an Magnesium.



**Abbildung 59:** Mittlere, massengewichtete Ca-, K-, Mg- und Na-Gehalte über die Horizonte L+O<sub>f</sub>, O<sub>h</sub> sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm.

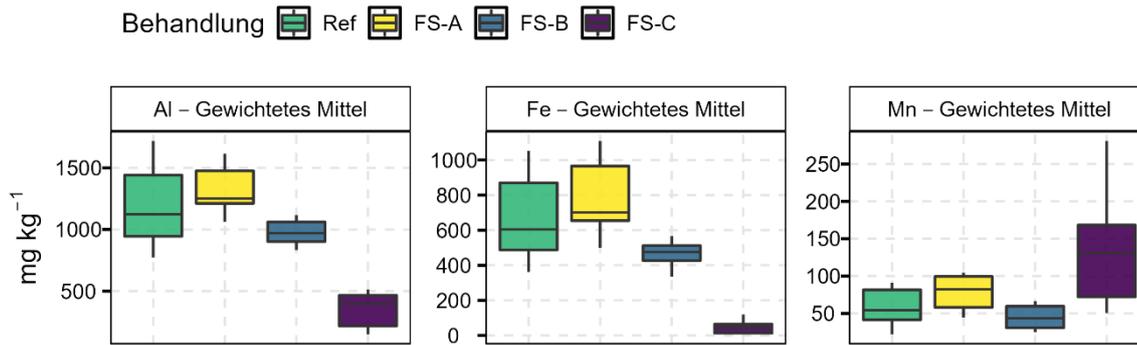
Die Abnahme sauer wirkender Kationen (Ma-Kationen) in Behandlung FS-C kommt vor allem durch den beträchtlichen, signifikanten Rückgang des adsorbierten Aluminiums in allen Mineralbodentiefenstufen

zustande und wird teils, wie in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm, ebenfalls durch verringerte Fe-Ladungen bzw. –Gehalte bedingt (Abbildung 60). In den beiden anderen Fahrspurbehandlungen fehlt dieser Effekt weitestgehend, sodass hier kaum größere Unterschiede zu den Referenzparzellen gemessen werden konnten. Im L+O<sub>r</sub>-Horizont der Humusaufgabe sind hingegen signifikante Steigerungen der kurz- und mittelfristig-verfügbaren Aluminium- und Eisengehalte in Fahrspuren zwischen 10-20 cm und in schwacher, aber nicht signifikanter Form, auch in FS-A gegeben. Der O<sub>h</sub>-Horizont bleibt von größeren Auswirkungen unberührt. Anders gestaltet sich dies beim Mikronährelement Mangan, bei dem im O<sub>h</sub>-Horizont von FS-B signifikante Zunahmen gemessen wurden, die ebenfalls in der Mineralbodentiefenstufe 0-5 cm gegeben sind. In Fahrspuren zwischen 0-10 cm Tiefe (FS-A) bleibt der Manganengehalt mit Ausnahme ebenfalls der Tiefenstufe 0-5 cm, in denen die austauschbare Ladung zunimmt, vergleichbar mit den Referenzparzellen. Einen starken Gegensatz zu den anderen Fahrspurbehandlungen bilden Fahrspuren der Tiefenklasse 20-30 cm (FS-C), in denen die Kationenaustauscher erheblich höhere Gehalte an Mangan in allen Tiefenstufen adsorbieren. Mit einer Steigerung, die in der Tiefenstufe 0-5 cm fast dem 13-fachen der Referenzparzelle entspricht, ist das Ergebnis der verstärkten Mangan-Adsorption in allen Tiefenstufen signifikant und die Wahrscheinlichkeit, dass die unbefahrenen Referenzparzellen höhere Werte als FS-C haben, liegt bei 0 %.



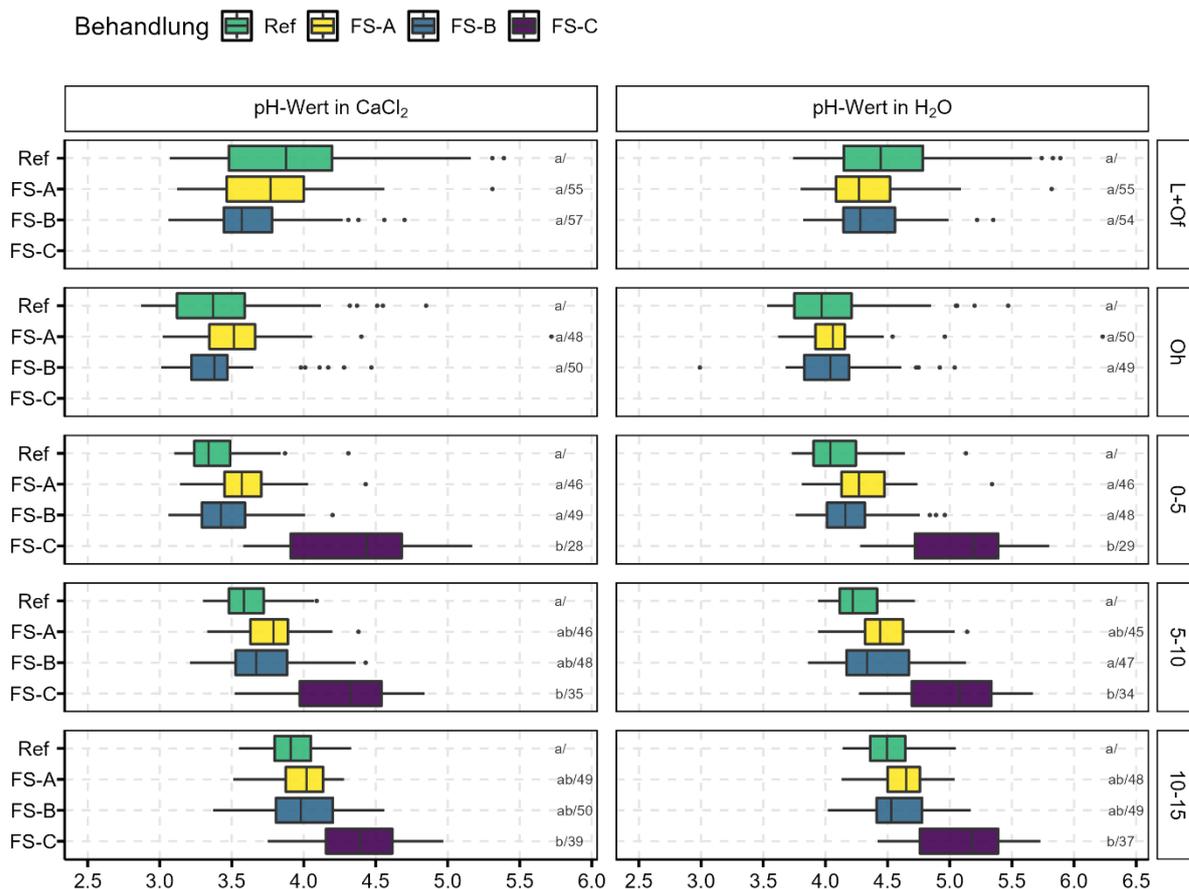
**Abbildung 60:** Al-, Fe- und Mn-Gehalte in den Horizonten L+O<sub>r</sub> & O<sub>h</sub> (mittels Königswasseraufschluss analysiert) sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm (Bestimmung durch NH<sub>4</sub>Cl-Perkolations). Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.

Diese starke Auswirkung der Befahrung auf die Nährstoffausstattung von Fahrspurböden schlägt sich auch in den massengewichteten Stoffgehalten nieder, bei denen eine bedeutende Erhöhung der mittleren Manganengehalte in FS-C heraussticht, die Veränderungen in den Fahrspurbehandlungen FS-A und FS-B jedoch moderat sind (Abbildung 61). Ähnlich intensive Effekte bestehen auch auf die mittleren Aluminium- und Eisengehalte, allerdings in umgekehrter Form. Bei diesen Elementen haben die Veränderung des Bodenaufbaus zusammen mit der Bodenverdichtung leichte (FS-B) bzw. starke Abnahmen der massengewichteten Stoffgehalte, in besonderem Maße bei Fe, zur Folge, während in Behandlung FS-A leichte Erhöhungen zu erkennen sind.



**Abbildung 61: Mittlere, massengewichtete Al-, Fe- und Mn-Gehalte über die Horizonte L+Of, Oh sowie die Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm.**

Mit Ausnahme der L+Of-Horizonte der Fahrspurbehandlungen *FS-A* und *FS-B*, in denen eine tendenzielle Verringerung der pH-Werte in H<sub>2</sub>O und CaCl<sub>2</sub> gemessen wurde, ist in allen anderen Horizonten und Tiefenstufen eine Erhöhung der pH-Werte in den Fahrspuren von Rückegassen verglichen mit dem unbefahrenen Waldboden (*Ref*) festzustellen (Abbildung 62). Bei Fahrspuren bis 20 cm Tiefe (*FS-A* und *FS-B*) ist der pH-Wert-Anstieg überwiegend moderat, bei Fahrspuren > 20 cm (*FS-C*) handelt es sich dagegen um starke Verringerungen der Wasserstoffionen-Aktivität, die in der Tiefenstufe 0-5 cm im Mittel fast einer pH-Wert-Stufe entspricht (pH in H<sub>2</sub>O der Tiefenstufe 0-5 cm: *Ref*: 4,10; *FS-C*: 5,09) und in allen drei Tiefenstufen hochsignifikant ist.



**Abbildung 62: pH-Werte in H<sub>2</sub>O und CaCl<sub>2</sub> in den Horizonten L+Of & Oh sowie den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Parameter und Horizont/Tiefenstufe an (GLMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau ≤ 5 %), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.**

Während der Befahrung von Rückegassen findet im Bereich der Kontaktfläche Rad-Boden in Abhängigkeit vielfältiger Einflussfaktoren ein Spurbildungsprozess statt, der auf den Rückegassen Fahrspuren verschiedener Ausprägungsgrade und morphologischer Erscheinungsbilder hinterlässt. Ziel der im vorliegenden Verbundvorhaben vorgenommenen Klassifizierung von Fahrspuren anhand ihrer Tiefe ist die Prüfung auf Eignung als Indikatorvariable für das forstpraktische Handlungsgeschehen. Für diesen Zweck wurden, wie anhand der vorstehenden Ergebnisse dargestellt, unter anderem gestörte Bodenproben aus der Humusauflage und dem Mineralboden gewonnen. Die Beprobung wurde, wie üblich, ausgehend von der Bodenoberfläche beim L+Of-Horizont begonnen und setzte sich im Anschluss an den Oh-Horizont im Mineralboden fort. Aufgrund des Charakters der Fahrspurklassen, die sich in 10 cm-Schritten in ihren Spurtiefen voneinander unterscheiden sowie der verschiedenen Verdichtungsintensitäten der Fahrspurböden, führte die vertikal gerichtete Mineralbodenprobenahme ausgehend von der Mineralbodenoberkante einerseits dazu, dass die beprobten, starren Tiefenstufen in den Fahrspurbehandlungen in Bezug zur Referenzparzelle auf unterschiedlichem Höhenniveau gewonnen werden mussten und der variable Verdichtungseffekt andererseits die Beprobung ungleicher Bodenmassen bewirkte. Dieser Effekt hat einen gewissen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Tiefenstufen zwischen den Behandlungen, zumal es an den stärker verdichteten Beprobungspunkten zu Verdünnungen der Proben mit jeweils aus tieferliegenden Bereichen des Bodens stammendem Mineralboden gekommen sein dürfte, mit denen auch Auswirkungen auf die analysierten Messgrößen verbunden sein könnten.

Eine festgestellte Wirkung der Befahrung von Rückegassen, ist die durch Radschlupf hervorgerufene Durchmischung und Verknüpfung von Humusresten und mineralischer Bodensubstanz etwa in den ersten 10 cm des Bodens von FS-C, die einen Beitrag zu Veränderungen vieler Nährelementgehalte im Mineralboden dieser Fahrspurbehandlung leisten. Da die Humusauflage wesentlich höhere Gehalte an Nährstoffen enthält als der Mineralboden, bewirkt die Durchmischung die Einbringung nährstoffreichen Materials in tiefere Bodenbereiche, die dort teils zu größeren Steigerungen der Stoffgehalte führen, wie dies beispielsweise bei Calcium und Kalium der Fall ist. Darüber hinaus sind im Mineralboden von FS-C drastische Veränderungen des Kationenbelags an den Kationenaustauschern festzustellen, die sich, neben den geschilderten Veränderungen der basischen Kationen, in starken Steigerungen insbesondere der Mangangehalte sowie

Abnahmen der Aluminiumgehalte und der Protonenkonzentrationen niederschlagen. Die Veränderungen des Bodenchemismus sind als Folge der Umgestaltungen des Bodenaufbaus und der intensiven Verdichtung des Mineralbodens zu verstehen, die erheblichen Einfluss auf den Luft- und Wasserhaushalt dieser Fahrspurböden nehmen und die abiotischen Bedingungen verändern, auf die eine Reaktion der Bodenorganismen erfolgt. Geringere Leitfähigkeiten für Luft- und Wasser durch die verdichtungsbedingte Abnahme des Porenraumes führen in den Fahrspurböden zu Modifikationen der Sauerstoffdiffusion, die in *FS-C* aufgrund des dauerhaften Wasserstaus annehmbar besonders stark ausgeprägt sind. Die herabgesetzte Nachlieferung von Sauerstoff führt somit schnell zu einer Limitierung der aeroben Atmung mit  $O_2$  als Elektronenakzeptor, wodurch die Bodenmikroorganismen, sofern dazu befähigt, auf alternative Elektronenakzeptoren zur Aufrechterhaltung ihres Energiestoffwechsels umsteigen. Die Nutzung alternativer, oxidierter Verbindungen erfolgt dabei in einer Reihenfolge, die durch die Thermodynamik der Redoxpaare bestimmt wird (Ottow 2011). Infolge der mikrobiell getriebenen Reduktion von Manganoxiden, die sich an die Reduktion verfügbaren Nitrats anschließt, kommt es vermutlich zu einer vermehrten Freisetzung reduzierten Mangans ( $Mn^{2+}$ ) in die Bodenlösung und nachfolgender Gleichgewichtseinstellung mit den Kationenaustauschern, wodurch die Gehalte an adsorbierten  $Mn^{2+}$ -Ionen zunehmen. Ein zusätzlicher Beitrag zur Einstellung der genannten Prozesse, wird vermutlich durch den vermischungsbedingten Eintrag organischer Bodensubstanz geleistet, der zu einer Beschleunigung der mikrobiellen Abbauprozesse führt. Unklar ist in diesem Zusammenhang, weshalb Eisen nicht ein mit Mangan vergleichbares Muster zeigt, da auch Eisenoxide unter anoxischen Bedingungen als alternative Elektronenakzeptoren durch die Mikroorganismen genutzt werden können, wodurch eine Freisetzung von  $Fe^{2+}$  geschieht. Folgerichtig erscheint dagegen die Reaktion der pH-Werte in *FS-C*, die einen deutlichen Anstieg in den Mineralbodenhorizonten zeigen und Ausdruck niedrigerer Redoxpotentiale sind, die durch die vermehrten Reduktionsprozesse zustandekommen, bei denen es zu einem Protonenverbrauch und somit pH-Wert-Veränderungen kommt (Blum 2012). Die Veränderungen des Lösungsgleichgewichts und der pH-Wert-Veränderungen sind auch als Ursache der erheblich verringerten Gehalte adsorbierten Aluminiums und in deren Folge Erhöhungen der Basensättigung zu nennen. Ebenfalls ist die im Gegensatz zu den C-, N- und S-Gehalten (starke Verringerung bei *FS-B* und *FS-C*) festgestellte nur schwache Abnahme der Phosphorgehalte in den Fahrspurbehandlungen möglicherweise Ausdruck der mikrobiell getriebenen Reduktionsprozesse.

Weniger schlüssig erscheint dagegen die festgestellte Abnahme der effektiven Kationenaustauschkapazität in den Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C*, da, zumindest in *FS-C*, bedingt durch den Eintrag organischer Bodensubstanz sowie die pH-Wert-Erhöhungen, eher von einer Steigerung der (pH-Wert-abhängigen) effektiven Kationenaustauschkapazität auszugehen wäre. Mögliche Ursache für diesen Effekt könnte in der erheblichen Verdichtung der mineralischen Bodensubstanz liegen, die denkbar dazu geführt haben könnte, dass trotz Siebung der Bodenproben auf  $< 2$  mm, verdichtete Mikroaggregate im gesiebten Probenmaterial verblieben, in denen ein geringerer Ionenaustausch mit dem Extraktionsmittel ( $NH_4Cl$ ) verglichen mit dem nicht (*Ref*) bzw. weniger verdichteten Boden (*FS-A*) erfolgte.

### 2.11.3 Schlussfolgerungen

Eine Arbeitshypothese ging von einer Verringerung der Mächtigkeiten des Auflagehumus und des humosen Oberbodens mit zunehmender Fahrspurtiefe aus, die zu Abnahmen des Kohlenstoffvorrates in den Fahrspurböden bzw. zu Veränderungen von Menge und Zusammensetzung der organischen Substanz führt, die in Interaktion mit den Boden(mikro)organismen Einfluss auf die Elementgehalte, -verhältnisse und -vorräte nehmen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte eine Abnahme der Humus- und somit auch der Kohlenstoffvorräte in Fahrspuren der Klassen *FS-B* und *FS-C* festgestellt werden, sodass die getroffene Annahme für diese beiden Varianten verifiziert werden konnte. Abzulehnen ist sie hingegen für Behandlung *FS-A*, in der keine Einflussnahme der Befahrung auf die Auflagenmächtigkeit stattfindet. Bewirtschaftungsereignisse in der Vergangenheit haben dort sogar zu einer Steigerung der  $L+O_f$  und  $O_h$ -Lagen geführt. In diesen Fahrspuren wurde die Humusaufgabe durch Befahrung zudem lediglich komprimiert, jedoch nicht umgelagert. Eine Beeinflussung der Eigenschaften der Humusaufgaben bzw. des Oberbodens auf Nährelementgehalte und Stoffvorräte findet dennoch in allen Fahrspurvarianten statt. Während in *FS-A* eine Art protektive Wirkung der mächtigen und intakten Humusaufgabe auf Bodeneigenschaften und -prozesse besteht, die zu einem mehr oder weniger Erhalt von Nährelementgehalten, -verhältnisse und -vorräten führt, wirkt sich die Verringerung bzw. der Verlust humoser Bodensubstanz (Aufgabe, Oberboden) in *FS-B* und *FS-C* störend auf die Nährstoffeigenschaften dieser Fahrspurböden aus. Überwiegend kommt es zu Verringerungen, teils aber auch zu Steigerungen der Nährelementgehalte. In *FS-C* ist zudem die Vermengung von Resten der Humusaufgabe mit mineralisch geprägter Bodensubstanz bedeutend. Besonderen Einfluss auf die Stoffvorräte in Fahrspuren nimmt die Erhöhung der Trockenrohdichte. Durch Komprimierung von Bodensubstanz nimmt diese je Betrachtungseinheit zu und erhöht somit häufig – jedoch nicht bei jedem Nährelement – die Nährstoffvorräte im Mineralboden. In *FS-B* und *FS-C* wird die überwiegende Steigerung innerhalb des Mineralbodens jedoch in den meisten Fällen durch die Abnahme bzw. den Verlust des nährstoffreichen Auflagehumus übertroffen, sodass es dort insgesamt i.d.R. zu Abnahmen der massengewichteten Stoffgehalte kommt. Die Hypothese der Einflussnahme der Spurtiefe auf Elementgehalte und -vorräte kann somit insgesamt bestätigt werden. Jedoch sind die gefundenen Effekte auch nicht ausschließlich eine Wirkung veränderter Humusgehalte,

sondern auch eine Folge biologisch-chemischer Wechselwirkungen innerhalb des Bodens. Zu verwerfen ist der Teil der Hypothese, der eine Einflussnahme auf die Elementverhältnisse vermutete, die sich, mit wenigen Ausnahmen, kaum verändert haben.

Die Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen zeigen Unterschiede in der Wirkung der Befahrung auf Ebene der chemischen Eigenschaften der Fahrspuren verschiedener Tiefen, die, wie die Effekte auf das Bodenleben, in erheblichem Zusammenhang zur Störung des Bodenaufbaus und der Intensität der Verdichtung und deren Rückwirkung auf das Porensystem (Luft- und Wasserhaushalt) stehen. Es bestehen jedoch auch Wechselwirkungen zwischen den Effekten auf das Bodenleben und dem Bodenchemismus, die, insbesondere bei Fahrspurtiefen oberhalb der 20 cm-Marke (FS-C), zu erheblichen Abweichungen der stofflichen Eigenschaften vom unbefahrenen Ausgangszustand (*Ref*) führen und letztendlich eine Standortsveränderung (Pseudovergleyung) bewirken. Die Auswirkungen der Befahrungen auf die chemischen Bodeneigenschaften fallen in Behandlung FS-B schwächer aus. Je nach Messgröße integrieren mittelstark ausgeprägte Fahrspuren (FS-B) Eigenschaften der Behandlung FS-C als auch FS-A und nehmen somit gewissermaßen eine Mittelstellung ein. Fahrspuren mit Tiefen bis zu 10 cm (FS-A) weisen dagegen überwiegend Eigenschaften auf, die den Referenzparzellen nahekommen, sodass der Befahrungseffekt in diesen als eher gering einzuordnen ist.

## 2.12 Säuleninkubationsversuch (TV1)

*Forschungsfrage: Welche Input-Output-Beziehungen zwischen Nährelementeinträgen und Nährelementausträgen lassen sich an ungestörten Bodensäulen aufstellen, d.h., welche Makro- und Mikronährelemente werden in Fahrspurböden akkumuliert und welche werden eluiert?*

Hypothese: Geringere Mineralisierungsraten und das veränderte Porensystem haben zur Folge, dass in Fahrspurböden insgesamt geringere Mengen Nährelemente im Bodenwasser gelöst und mittels Sickerwasser in tiefere Bodenbereiche verlagert werden können. Dies wird reflektiert durch geringere Nährstoffkonzentrationen im Eluat verdichteter Bodensäulen im Vergleich mit nicht verdichteten Bodensäulen. Durch die vermehrt reduktive Bedingungen in Fahrspurböden mit der verbundenen Wirkung auf die Umsätze der Mikroorganismengemeinschaft, sind im Perkolat der verdichteten Bodensäulen höhere Anteile reduzierter, mobiler Verbindungen wie  $Fe^{2+}$  und  $Mn^{2+}$  messbar.

## 2.12.1 Material & Methoden



Abbildung 63: Gewinnung ungestörter Bodensäulen (A+B), Vorbereitung und Installation einer Säule in der Haltevorrichtung (C) und Aufbau des Messsystems in Kühlkammer (D) (Fotos: © Siebrecht, U., Sparrer, J.).

### Probenahme

Zur Durchführung des sog. „Säuleninkubationsversuches“ wurden aus den Behandlungen *FS-A*, *FS-C* und *Ref 3* Versuchsgassen ausgewählt und dort jeweils 3 ungestörte Bodensäulen/Monolithe in Plexiglaszylindern (Polymethylmethacrylat) mit einer Länge von 30 cm, einem Innendurchmesser von rd. 14,5 cm und einer

Wandstärke von ca. 3 mm auf verschiedenen Laufmetern bzw. Bereichen innerhalb der ungestörten Referenzparzellen gewonnen (Abbildung 63, A+B). *FS-B* wurde aufgrund der limitierten Anzahl zur Verfügung stehender Plexiglaszylinder ausgespart. In *FS-A* wurden die Versuchsgassen VG32, VG23, VG34, in *FS-C* VG17, VG19, VG81 und in *Ref* VG17, VG19, VG32/23 beprobt. Weitere drei Zylinder wurden als Blindproben verwendet, in die ausschließlich die in allen Säulen genutzten Filtermaterialien eingesetzt wurden, um daraus einen möglichen Austrag von Stoffen quantifizieren zu können. Bei den Filtermaterialien handelte es sich um eine ca. 30 mm mächtige Lage mehrfach zunächst mit 10-%iger HCl-Lösung und anschließend mit demineralisiertem Wasser gespülten Quarzsandes sowie eines Polyamidgewebes mit 50 µm Maschenweite, das grobe Fraktionen davon abhalten sollte, die Abflussbohrung und das Schlauchsystem zuzusetzen.

Die Gewinnung der 27 ungestörten Bodenmonolithe fand zwischen dem 20.11.2018 und 04.12.2018 statt. Vor der Beprobung wurden die Plexiglaszylinder mittels dauerhaftem Filzstift so markiert, dass die gleichmäßige Entnahme einer 20 cm langen Bodensäule (Humusaufgabe + Mineralboden) gewährleistet werden konnte. Nach Aufsuchen eines Probepunktes wurde der speziell zur Durchführung der Probenahme angefertigte Stahlschneidering auf die Rohrunterseite aufgesetzt und das Gefäß auf der Bodenoberfläche positioniert. Mit Hilfe eines Messers wurde die Humusaufgabe an der Außenkante des Schneidringes bis in eine Tiefe von etwa 5 cm uGOK senkrecht durchtrennt. Anschließend wurde eine Holzbohle auf die Oberkante des Plexiglasrohres gelegt und durch Herunterdrücken für einen stabilen Stand der Konstruktion gesorgt. Danach wurde der Plexiglaszylinder unter Verwendung eines Gummihammers mit mehreren, lockeren Schlägen vorsichtig etwa 3-5 cm in den Boden getrieben. Traten während des Eintreibens Hindernisse wie Baumwurzeln auf, wurden diese mit einer Säbelsäge durchtrennt. Nach dem Eintreiben wurde der Plexiglaszylinder ringsherum bis knapp über die Unterkante des Stahlscheiderings vorsichtig ausgegraben. Die genannten Arbeitsschritte wurden bis zum Erreichen der Endteufe wiederholt und der gesamte Zylinder abschließend mittels Spaten aus dem Boden gehoben, beschriftet und transportsicher verpackt. Nach der Probenahme wurden die Plexiglaszylinder inklusive des ungestörten Bodens weiter für die Versuchsdurchführung vorbereitet. Dies umfasste im Wesentlichen das Einbringen einer gleichmäßigen Quarzsandschicht inklusive des runden Polyamidgewebefilters auf der Unterseite der Bodensäule sowie das Einsetzen der Plexiglaszylinder in die dafür vorgesehene Rahmenkonstruktion (Abbildung 63, C) mit anschließender Abdichtung der Rohraußenkanten durch eine Silikonfuge und einen Silikonchtring. Vor Beginn des Versuchs wurden die Monolithe im Kühlraum gelagert und mit 200 ml demineralisiertem Wasser beregnet und vor Austrocknung geschützt.

### **Künstliche Kronentraufe**

Zur Versuchsdurchführung war des Weiteren die Herstellung einer künstlichen Kronentraufe notwendig, um die Monolithe dem Untersuchungsgebiet entsprechend regelmäßig beregnen zu können. Das entstandene Perkolat wurde zu Analysen der Beschaffenheit des Sickerwassers genutzt und sollte Aufschluss über mögliche Unterschiede bei Nährstoffausträgen liefern.

Die Zusammensetzung der künstlichen Kronentraufe wurde hergeleitet über Mittelwertbildung von Messwerten der Dauerbeobachtungsfläche Solling F1 (Hochsolling, Alter Fichte Oberstand (2019) = 138 a;  $B^{\circ} = 0,8$ ) der Jahre 2012-2016 (Tabelle 12). Dabei wurden die Konzentrationen des  $\text{NO}_2\text{-N}$  dem  $\text{NO}_3\text{-N}$  hinzugeschlagen und organischer Stickstoff  $\text{N}_{\text{org}}$  durch  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  entsprechend der Anteile von  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  am Gesamtstickstoff  $\text{N}_{\text{ges}}$  substituiert. Nach der Mittelwertbildung der Stoffkonzentrationen und der Substitution der Stickstofffraktionen erfolgte zu Kontrollzwecken eine Berechnung der Ionenbilanz, wobei die Konzentrationen in Ladungen ( $\text{mmol}_c$ ) umgerechnet wurden. Nach Bilanzierung stellte sich ein geringfügiger Kationenüberschuss bzw. Anionenmangel heraus. Der Anionenmangel wurde anschließend anteilmäßig über  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  ausgeglichen. Nach Rückrechnung der Ladungen wurde ein geringfügiger Anionenüberschuss ( $0,067 \text{ mg l}^{-1}$ ) festgestellt, der im Rezept der künstlichen Kronentraufe auf  $\text{Cl}_2$  übertragen wurde. Nach Herstellung der Stammlösung (für 300 l) aus verschiedenen Salzen waren zudem Fällungen zu beobachten, die durch leichte Ansäuerung der Lösung durch Zugabe von 5 ml Ameisensäure wieder gelöst wurden. Nach Verbrauch der ersten Stammlösung wurde eine weitere Charge nach gleicher Rezeptur hergestellt. Sowohl die Stammlösungen als auch daraus hergestellte Verdünnungen, die als künstliche Kronentraufe zu Beregnungszwecken verwendet wurden, wurden regelmäßig durch Analysen kontrolliert (Tabelle 12).

**Tabelle 12: Mittlere Stoffkonzentrationen der Kronentraufe auf der Level-II-Fläche "Solling F1" der Jahre 2012-2016 (Daten: NW-FVA) sowie der daraus abgeleiteten Rezeptur einer künstlichen Kronentraufe und deren Analyseergebnisse.**

Parameter	Mittelwert	SD*	Rezeptur	Analyse 1	Analyse 2
	Solling F1	Solling F1	KT*	KT	KT
Beobachtungszeitraum	2012-2016	2012-2016		12.04.2018	12.11.2019
Fluss [l m <sup>-2</sup> ]	712,60	50,25			
pH	5,15	0,23	5,15	3,79	3,69
Na <sup>+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	1,87	0,36	1,87	1,85	1,87
K <sup>+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	2,97	0,32	2,97	2,92	2,97
Ca <sup>2+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,61	0,11	0,61	0,62	0,60
Mg <sup>2+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,23	0,04	0,23	0,22	0,21
Fe <sup>3+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,014	0,001	0,014	0,019	0,008
Mn <sup>2+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,172	0,029	0,172	0,171	0,175
Al <sup>3+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,017	0,003	0,017	0,011	0,013
Cl <sup>-</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	3,59	0,66	4,60	4,75	4,70
NO <sub>3</sub> -N [mg l <sup>-1</sup> ]	1,57	0,24	2,39	2,39	2,35
NO <sub>2</sub> -N [mg l <sup>-1</sup> ]	0,09	0,05			
NH <sub>4</sub> -N [mg l <sup>-1</sup> ]	2,39	0,43	2,68	2,69	2,71
SO <sub>4</sub> -S [mg l <sup>-1</sup> ]	1,18	0,24	1,51	1,56	1,59
PO <sub>4</sub> -P [mg l <sup>-1</sup> ]	0,099	0,049	0,127	0,139	0,132
P <sub>ges</sub> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,107	0,049			
N <sub>ges</sub> [mg l <sup>-1</sup> ]	4,544	0,636			
N <sub>org</sub> [mg l <sup>-1</sup> ]	0,490	0,121			
S <sub>ges</sub> [mg l <sup>-1</sup> ]	1,329	0,244			

\*SD = Standardabweichung; KT = Kronentraufe

## Versuchsdurchführung

Der Versuch selbst wurde ab Anfang Februar 2019 bis April 2020 durchgeführt. Die insgesamt 27 Monolithe + 3 Blindsäulen wurden entsprechend der Jahresmitteltemperatur des Sollings bei konstanter Temperatur von 8°C in einer Klimakammer inkubiert (Abbildung 63, D) und wöchentlich mit einer Masse künstlicher Kronentraufe von rd. 224 g Säule<sup>-1</sup> in 3 Gaben (zu verschiedenen Wochentagen) zu je rd. 75 g Säule<sup>-1</sup> beregnet. Dies entsprach der mittleren Masse Kronentraufe der Solling F1-Fläche in Höhe von rd. 713 l m<sup>-2</sup>.

Die Beregnung erfolgte über 100 ml Polyethylen-Spritzen, an denen 3-Wege-Hähne aufgesetzt waren. Diese wurden zu den vorgesehenen Zeitpunkten mittels eines Dispensers mit der künstlichen Kronentraufe befüllt und anschließend in oberhalb der Säulen angebrachte Holzleistenrahmen eingesetzt und die 3-Wege-Hähne so weit geöffnet, dass die künstliche Kronentraufe an zentraler Stelle tropfenweise auf die Bodenoberfläche der Monolithe traf.

Die durch die Säulen perkolierende künstliche Kronentraufe mit den bekannten Nährelementkonzentrationen stand in Wechselwirkung mit der Bodenmatrix, durch die sie perkolierte. Das entstandene Sickerwasser wurde regelmäßig über ein an der Unterseite der Säulen angebundenes Schlauchsystem abgepumpt und in 1 bzw. 2 Liter Glaskolben aufgefangen (Abbildung 63, D). Dazu war das Schlauchsystem an einer Vakuumpumpe angeschlossen, die zweimal täglich für je 1 Stunde mit einem Unterdruck von ca. -0,01 bar freies Wasser absaugte, das sich innerhalb des Quarzsandfilters angesammelt hatte. Je Kalenderwoche wurden sämtliche Säulen an einem Tag mit den zugehörigen Deckeln luftdicht verschlossen. Daraufhin erfolgte das Absaugen des Perkolats mit einem Unterdruck von rd. -0,3 bar über einen Zeitraum von 9 Stunden. Dies diente dem Zweck, die Monolithe gleichmäßig auf ein Matrixpotential von pF 2,5 zu entwässern, Feldkapazität einzustellen und grobe Poren für den Gastransport freizugeben. Das Prozedere wurde wöchentlich und zwei Tage vor der Gasprobenahme durchgeführt. Vor Gasprobenahmen fand keine weitere Beregnung mehr statt.

Die Vakuumflaschen wurden im Turnus von 2 Wochen (vor Gasprobenahmen) geleert und dabei die aufgefangene Masse Perkolat je Säule bestimmt. Das Eluat wurde dann der Analyse zugeführt, wobei die Parameter pH-Wert, gelöster organischer Kohlenstoff und Stickstoff (DOC und DON), NH<sub>4</sub><sup>+</sup> und NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sowie die in der Kronentraufe enthaltenen Kationen und Anionen analysiert wurden. Zuvor fand eine Filtration über einen Membranfilter statt.

Die Säulen konnten durch Aufsetzen von Deckeln, auf denen wiederum ein mit einer Durchbohrung versehenes Polymethylmethacrylat-Röhrchen aufgeklebt war und an dessen oberem Ende sich eine Gewindekappe mit eingebettetem, dreilagigen Gummiseptum befand, luftdicht verschlossen werden. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden die Säulen alle 14 Tage über einen Zeitraum von 1 Stunde verschlossen. Direkt nach Verschluss der Säulen und nach Anreicherung über einen Zeitraum von 1 h, wurden mittels einer gasdichten Glasspritze (Firma SGE) Gasproben aus den Headspace der Zylinder entnommen. Der Spritzeninhalt wurde in Exetainer (12 ml, Firma Labco) überführt, an denen die im Gas enthaltenen Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> an einem Gaschromatographen der Universität Göttingen, Fakultät Agrarwissenschaften analysiert wurden. Das Probenahmeschema war im Wesentlichen vergleichbar mit der für die Respirationmessungen geschilderten Methode des Jahres 2021 (siehe oben; II.2.8.1). Jedoch wurde jede Säule einzeln beprobt, sodass die Herstellung von Mischproben in einer Sammelspritze entfiel.

Nach Abschluss des Hauptversuchs, wurde die Versuchsanlage abgebaut und die Bodenmonolithe aus den Plexiglaszylindern freigesetzt. Daraufhin erfolgte, analog zur Beprobung des Bodens *in situ* (II.2.9.1), eine horizont- bzw. tiefenstufenweise Gewinnung von Bodenproben (L+O<sub>r</sub>, O<sub>h</sub>, 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm Horizonte/Tiefenstufen), die der weiteren bodenbiologischen und –chemischen Analyse zugeführt wurden. Sämtliche Proben sowie die zu Versuchszwecken eingebaute Quarzsandschicht an der Unterkante der Säulen wurden gewogen (frisch und nach Trocknung) und diese zusammen mit Bodenmaterial > 15 cm unter Mineralbodenoberkante entsorgt. Aus den Gewichten der Quarzsandmengen wurde im Zuge der Berechnung der Stoffausträge ein Korrekturfaktor erstellt, um den Einfluss der quarzsandbürtigen Verunreinigung des Eluats quantitativ berücksichtigen zu können.

### Auswertung

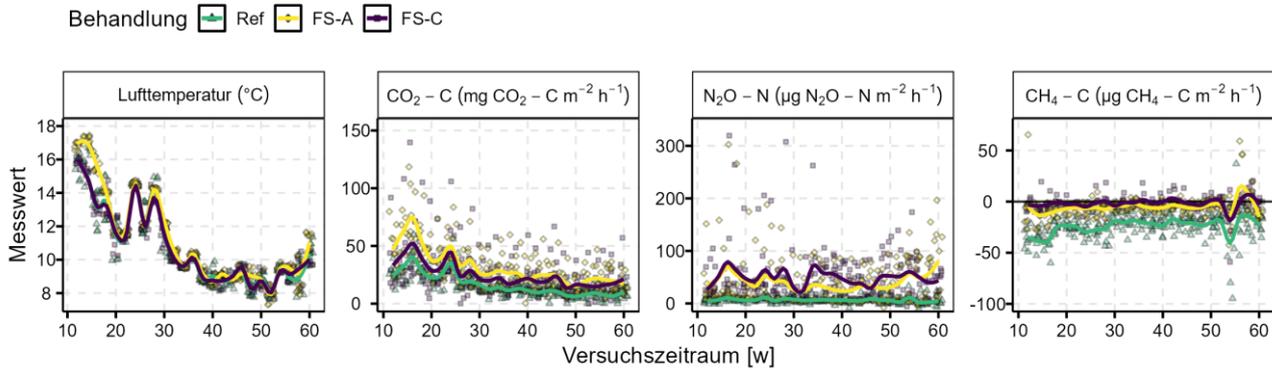
Die Datenverarbeitung der Gasanalysen wurde analog der Methode der Respirationmessungen *in situ* der Jahre 2018-2020 (siehe oben) durchgeführt.

Die Daten der Sickerwasserkonzentrationen wurden weiterführend dazu genutzt, um kumulierte Stoffausträge der Behandlungen gegenüberzustellen. Hierfür wurden zunächst mittlere Stoffkonzentrationen je Versuchsgasse und Messzeitpunkt berechnet und diese anschließend mit der Sickerwassermenge zu kumulierten Stoffausträgen je Hektar und Jahr verknüpft. Mittels parameterweiser Mixed Models (lme4::lmer) wurden dann die Gesamtausträge in Abhängigkeit der Behandlungen (*fixed factor*) modelliert, wobei die Versuchsgassen als *random factors* in das Modell eingingen. Für die Bestimmung der bodenbürtigen Austräge wurden zudem die über die künstliche Kronentraufe zugeführten Nährstoffe berücksichtigt und von den Gesamtausträgen abgezogen. Die Statistik der applizierten Kronentraufe, der Sickerwassermengen und Wasserverluste wurden über Regressionsanalysen durchgeführt.

## **2.12.2 Ergebnisse**

### Gasflüsse

Den in Abbildung 64 dargestellten mittleren Lufttemperaturen ist zu entnehmen, dass das konstante Einhalten der angestrebten 8°C während der Probenahmen nicht gewährleistet werden konnte, sodass die Lufttemperaturen in Orientierung an die Außentemperaturen schwankten (Luftzufuhr in die Klimakammer durch Betreten und Verlassen des Raumes sowie Personenaufenthalt). Bei der Bodenatmung (CO<sub>2</sub>) ist neben einer beträchtlichen Streuung der Gasflüsse ein konstanter Unterschied zwischen den Bodensäulen der unbefahrenen Referenzparzellen und jenen der Fahrspuren festzustellen, wobei die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus den Referenzsäulen im Mittel stets die geringsten Werte annehmen, im Gegensatz zu den Säulen, die in den Fahrspuren des Typs *FS-A* gewonnen wurden. Hier zeigen sich, mit wenigen Ausnahmen, im Mittel die höchsten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten. Fahrspurbehandlung *FS-C* nimmt eine Mittelstellung ein und liegt zwischen *Ref* und *FS-A*, jedoch häufig näher dem Verlauf von *FS-A*. Im Fortgang der etwa 60 Wochen besteht eine Tendenz zu geringer werdenden Gasflüssen bei allen Behandlungen, die sich an der Entwicklung der Lufttemperaturen orientiert. Eine gewisse Ähnlichkeit besteht auch im Fortschritt der mittleren Ganglinien der Lachgas-Emissionen (N<sub>2</sub>O), zumindest in Bezug auf den Vergleich der Fahrspurbehandlungen und der Referenzparzellen. Aus den Bodensäulen von *Ref* konnten nahezu keine N<sub>2</sub>O-Flüsse gemessen werden, im Gegensatz zu den Fahrspursäulen, in denen es zu konstanter N<sub>2</sub>O-Freisetzung kam. Im Fahrspurvergleich sind sich *FS-A* und *FS-C* ähnlich, im Mittel lagen die Werte in *FS-C* jedoch häufig höher als in *FS-A*. Ein Zusammenhang mit dem Verlauf der Lufttemperatur scheint bei N<sub>2</sub>O nicht zu bestehen, ebenso nicht bei CH<sub>4</sub>. Die Kurvenverläufe von Methan (CH<sub>4</sub>) weisen ebenfalls größere Unterschiede zwischen Fahrspurböden und Referenzböden aus. In den Referenzsäulen besteht ein konstant negativer CH<sub>4</sub>-Fluss, wohingegen die Methanoxidation in den verdichteten Fahrspursäulen nahezu zum Erliegen kommt, was durch das beständige Oszillieren der mittleren Verlaufslinien von *FS-A* und *FS-C* um die Nulllinie zum Ausdruck kommt. Während einzelner Messereignisse sind in *FS-A* positive CH<sub>4</sub>-Gasflüsse zu erkennen, die allerdings in *FS-C* eine größere Häufigkeit aufweisen und auf einzelne Säulen zurückzuführen sind. Im Allgemeinen sind sich die CH<sub>4</sub>-Flüsse zwischen *FS-A* und *FS-C* recht ähnlich, wobei die gemittelte Verlaufslinie eine nochmals geringfügig verringerte Methanaufnahme in den aus *FS-C* stammenden Bodensäulen anzeigt.



**Abbildung 64:** An ungestörten Bodensäulen gemessene Entwicklung der Gasflüsse von  $\text{CO}_2\text{-C}$ ,  $\text{N}_2\text{O-N}$  und  $\text{CH}_4\text{-C}$  sowie der Lufttemperatur während der Probenahmen im Zeitverlauf (08.05.2019 [Woche 12] bis 16.04.2020 [Woche 60]). Dargestellt sind sowohl die beobachteten Messwerte (Punktwolken) als auch die daraus abgeleiteten, mittleren Verläufe (ggplot2::geom\_smooth() nach der Methode „loess“).

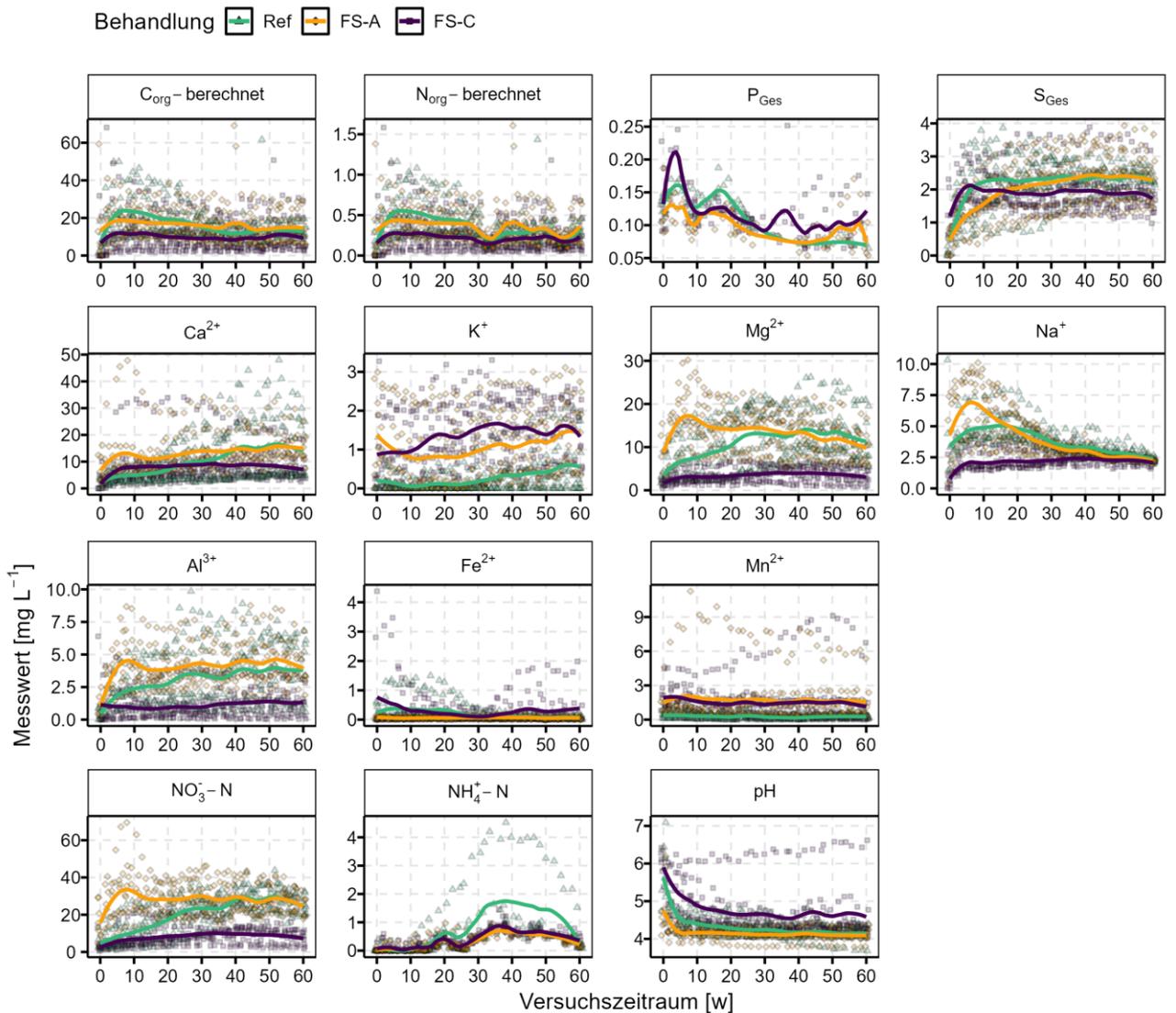
### Perkolate

Direkt vorgelagert zu den Gasanalysen, fand die Probenahme des aufgefangenen Sickerwassers statt, dessen Analysenergebnisse in Abbildung 65 zusammengestellt sind und, vergleichbar mit den Gasflüssen, sowohl die Rohdaten als auch daraus abgeleitete mittlere Konzentrationsverläufe zeigen (gleiche Methode wie bei den Gasflüssen). Je nach Messgröße fällt entweder eine höhere Ähnlichkeit zwischen *Ref* und *FS-A* oder zwischen *FS-A* und *FS-C* auf.

Betrachtet man die Entwicklung der abgeleiteten organischen Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen des Eluats, ist – neben einer großen Streuung der Daten – die Tendenz zu erkennen, dass aus den Bodensäulen der Fahrspurbehandlung *FS-C*, die durch den Verlust der Humusaufgabe größtenteils aus Mineralboden bestand, im Mittel konstant der geringste Austrag gelöster organischer Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen stattfand, das Sickerwasser der Fahrspuren *FS-A* und Referenzparzellen dagegen vergleichbar höhere Konzentrationen aufweist. Während Ammonium-Stickstoff ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) mit Ausnahme einer einzelnen Referenzsäule, die starken Einfluss auf den gemittelten Konzentrationsverlauf von *Ref* nimmt, unbedeutend ist, zeigt der pH-Wert gegenteiliges Verhalten zu den berechneten organischen Kohlenstoff- und Stickstoffausträgen. Auch hier bewirken insbesondere, aber nicht ausschließlich, hohe pH-Werte in einer Einzelsäule von *FS-C*, dass deren Ergebnis im Mittel oberhalb der Vergleichswerte von *Ref* und *FS-A* liegt, zwischen denen es wiederum sehr hohe Ähnlichkeit gibt.

Neben Ammonium-Stickstoff wurde auch Nitrat-Stickstoff ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) im aufgefangenen Perkolat bestimmt, der große Unterschiede zwischen den Behandlungen offenbart. Der Nitrat-N-Austrag aus *FS-C* ist während des gesamten Versuchs einheitlich gering verglichen mit dem Ergebnis von *Ref* und *FS-A*, wo er im Mittel rd. um das 2,5- bis 3,5-fache über dem Wert von *FS-C* lag. In den Säulen von *FS-A* lag die  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ -Konzentration von Versuchsbeginn an auf einem wesentlich höheren Level als in *FS-C*, in den Referenzparzellen dagegen stieg der ausgetragene Nitrat-Stickstoff, ausgehend von geringen Sickerwasserkonzentrationen, kontinuierlich an, bis er nach ca. 40 Wochen im Mittel etwa das gleiche Niveau der Säulen der Fahrspurbehandlung *FS-A* erreichte. Die hohen Nitrat-Stickstoff-Frachten in *FS-A* stehen sehr wahrscheinlich in Zusammenhang mit den gesteigerten Humusvorräten (siehe Abbildung 43), von denen auszugehen ist, dass sie aus gezielt abgelegten Reisigmatten stammen. Bei Gesamt-Schwefel und -Phosphor ist das Phänomen der starken Differenzierung zwischen den Behandlungen nicht gegeben, obgleich es zumindest bei Schwefel ebenso zu einem Anstieg der Konzentrationen während des Versuchs kam, sodass der Schwefelaustrag aus den *FS-C*-Säulen ab etwa 30 Wochen unterhalb der beiden Vergleichsgruppen lag. Die Phosphor-Austräge sind indes sehr gering und vernachlässigbar.

Mit dem Anionen-Austrag verbunden sind Auswaschungen von Kationen, deren größter Anteil von Calcium, Magnesium und Aluminium stammt und bei denen die Verläufe der Messwerte mehr oder weniger kongruent zu denen der Nitratausträge sind bzw. ein vergleichbares Muster zeigen. Das Natrium-Ion weicht hingegen von diesem Schema ab – hier kommt es zu kontinuierlichen Abnahmen der Messwerte bei *FS-A* und *Ref*, bei *FS-C* lagen die Sickerwasserkonzentrationen nach anfänglichem, leichten Anstieg konstant und unterhalb der beiden anderen Behandlungen. Mengenmäßig und im Hinblick auf Behandlungsunterschiede unbedeutend, sind die analysierten Eisenkonzentrationen im Eluat der Bodensäulen, die mit Ausnahme weniger Säulen, insbesondere von *FS-C*, im Bereich weniger Zehntel Milligramm je Liter liegen. Vergleichbar mit den Ergebnissen der Bodenchemie (siehe oben; II.2.11.2), nimmt die befahrungsbedingte Verdichtung und Veränderung des Bodenaufbaus Einfluss auf das Verhalten von Mangan und Kalium, deren Austräge in beiden Fahrspurbehandlungen im Mittel zweifelsfrei über den Konzentrationen der unbefahrenen Waldböden (*Ref*) liegen. Abweichend zu den gestörten Bodenproben besteht bei den Sickerwasserkonzentrationen dieser Ionen jedoch ein Effekt sowohl auf *FS-C* als auch auf *FS-A*.



**Abbildung 65: An ungestörten Bodensäulen gemessene Entwicklung der Sickerwasserkonzentrationen verschiedener Analyten im Zeitverlauf (13.02.2019 [Woche 0] bis 16.04.2020 [Woche 60]). Dargestellt sind sowohl die beobachteten Messwerte (Punktwolken) als auch die daraus abgeleiteten, mittleren Verläufe (ggplot2::geom\_smooth() nach der Methode „loess“).**

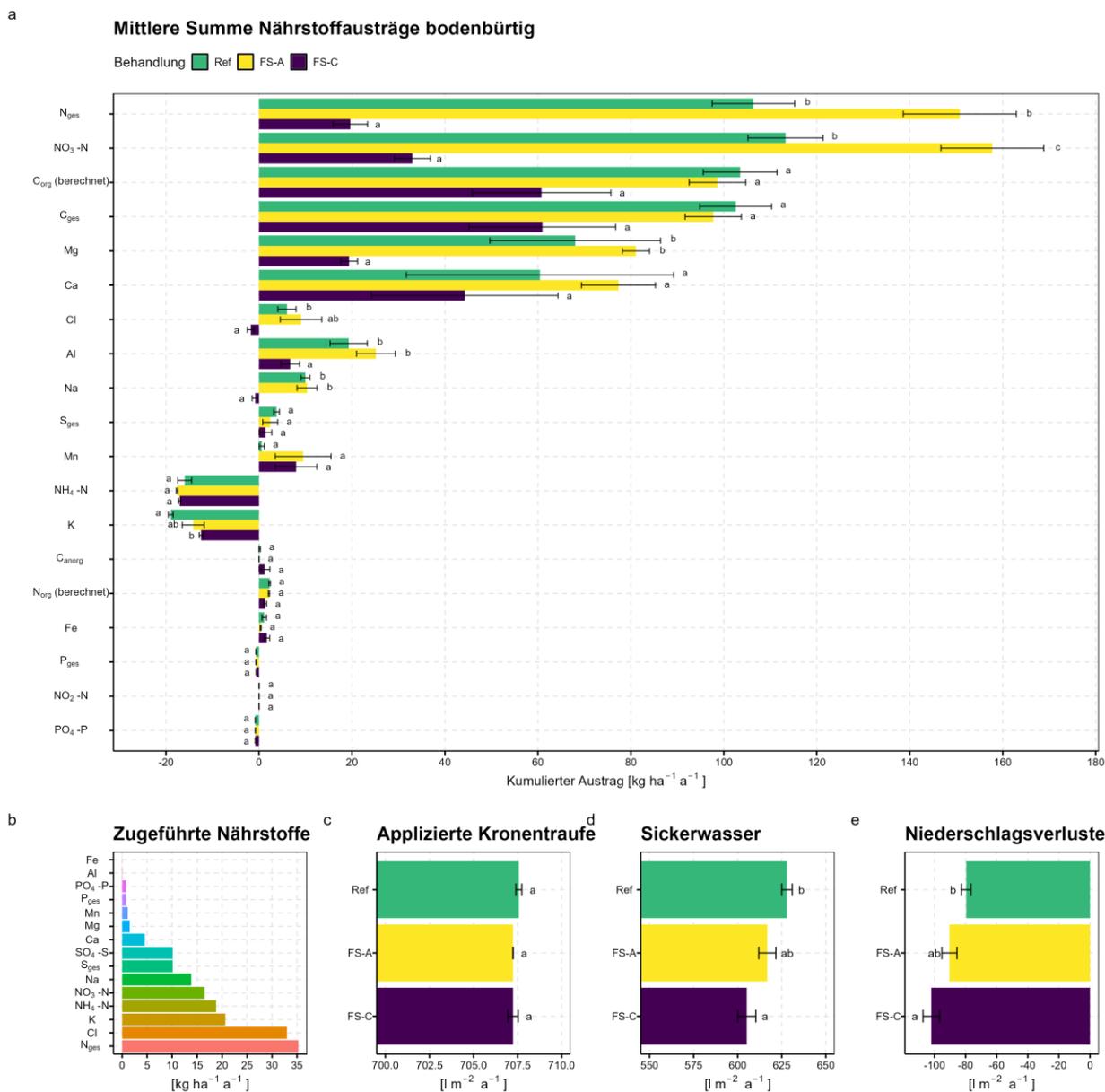
Nach Ende des Säuleninkubationsversuchs fand eine Bodenbeprobung der Säulen statt. Die Ergebnisse ähneln denen der umfangreichen Bodenanalyse (Kapitel II.2.9 und II.2.11), sodass auf eine Darstellung verzichtet wird.

### Stoffflüsse

Während die über Berechnung zugeführten Mengen „Kronentraufe“ mit etwa  $707 \text{ l m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  (Abbildung 66 c) sowie der darin enthaltenen Nährstoffe (Abbildung 66 b) bei allen Behandlungen gezielt gleich waren und in Menge der mittleren Kronentraufe (Jahresniederschlag) der Versuchsflächen entsprach (Abgeleitet aus nahegelegener Level-II-Dauerbeobachtungsfläche *Solling F1*, siehe Tabelle 12), führten variable Bodenverdichtung und Bodenaufbau in den Fahrspursäulen dazu, dass dort, insbesondere in *FS-C* (signifikant), geringere Mengen Sickerwasser aufgefangen werden konnten (Abbildung 66 d). Die Differenz aus applizierter Kronentraufe und aufgefangenem Perkolat muss folglich insbesondere durch Evaporation (Abbildung 66 e) und – zu geringeren Teilen – Transpiration (aufwachsende Keimlinge wurden stets entfernt) aus den Säulen entwichen sein oder war nach Abschluss des Versuchs noch in den Bodenkernen enthalten.

Hinsichtlich der Nährstoffausträge ist – entsprechend der Stoffkonzentrationen im Sickerwasser (siehe oben) – ein beträchtlicher, signifikanter Unterschied zwischen den Behandlungen *Ref* und *FS-A* sowie den Fahrspuren *FS-C* beim Gesamtstickstoff ( $N_{\text{ges}}$ ) festzustellen, der zu größten Teilen auf Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) zurückzuführen ist und aus der Bodensubstanz freigesetzt wurde (Abbildung 66 a). Der bodenbürtige Nitrat-N-Austrag in *FS-A* entspricht etwa dem 4,5-fachen des Wertes der Fahrspurbehandlung *FS-C*. Das Muster ähnlicher Austräge zwischen *FS-A* und *Ref* und indes niedrigerer Frachten bei *FS-C* ergibt sich ebenso bei Magnesium und Aluminium (signifikant) und in abgeschwächter Form auch bei Kohlenstoff ( $C_{\text{ges}}$  bzw.  $C_{\text{org}}$ ) und Calcium. Bei Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) und Natrium ( $\text{Na}^+$ ) wirkten die aus den *FS-C*-Fahrspuren entnommenen

Bodensäulen als Senken für diese Stoffe, im Gegensatz zu den Bodensäulen von *FS-A* und *Ref*, in denen es zu geringen und zwischen den Behandlungen vergleichbaren Austrägen kam. Ebenfalls als Stoffsenken wirkten die Böden aller Behandlungen für Ammonium-Stickstoff ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), Phosphor ( $\text{P}_{\text{ges}}$  bzw.  $\text{PO}_4^{3-}$ ) und für Kalium ( $\text{K}^+$ ), wobei in den *FS-C*-Säulen signifikant weniger Kalium durch die Bodensubstanz zurückgehalten wurde als in den beiden anderen Behandlungen. Eine Gemeinsamkeit zwischen *FS-A* und *FS-C* besteht bei den bodenbürtigen Mangan-Austrägen ( $\text{Mn}^{2+}$ ), die sich in ähnlicher Höhe von den unbefahrenen Referenzparzellen abheben, in denen Mangan kaum mit dem Sickerwasser ausgetragen wird. Mengenmäßig unbedeutend, da nur im Bereich weniger Gramm bis Kilogramm je Hektar und Jahr liegend, sind die Frachten anorganischen Kohlenstoffs ( $\text{C}_{\text{anorg}}$ ), organischen Stickstoffs ( $\text{N}_{\text{org}}$ ), Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) und Gesamtschwefel ( $\text{S}_{\text{ges}}$ ).



**Abbildung 66:** Auf ungestörte Bodensäulen applizierte Mengen Kronentraufe (c) + Nährstoffe (b), aufgefangene Sickerwassermengen (d), Wasserverluste durch Evaporation und Rückhalt (e) sowie Nährstoffausträge aus ungestörten Bodensäulen (a), jeweils  $\pm$  Standardfehler. Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).

Als Laborversuch bot der Versuch mit ungestörten Bodensäulen aus einem Teil der Versuchsgassen und Behandlungen die Möglichkeit, diese unter vergleichbaren Bedingungen zu untersuchen, obwohl die Verdichtung des Bodens innerhalb der Fahrspuren Schwierigkeiten bei der Probenahme mit sich brachte. Anhand der Gasflussmessungen konnten höhere  $\text{CO}_2$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Flüsse in den Säulen der Fahrspurbehandlungen *FS-A* und *FS-C* verglichen mit den Referenzparzellen festgestellt werden, die im Falle der Bodenatmung ( $\text{CO}_2$ ) von *FS-A* deckungsgleich mit dem Ergebnis der *in situ*-Respirationsmessungen (siehe oben, II.2.8.2) sind. Hingegen widerspricht die in *FS-C* ebenfalls gesteigerte und die Werte der Referenz überschreitende Bodenatmung dem Ergebnis der über mehrere Jahre gemessenen Bodenatmung im Wald. Dort zeigten sich stets die geringsten  $\text{CO}_2$ -Flüsse in den Fahrspuren  $> 10\text{ cm}$  (*FS-B* und *FS-C*). Die Erklärung für die Verschiedenheit der Befunde liegt vermutlich im Wesen des Versuchs begründet. Durch die Entnahme

der Bodensäulen aus dem Pedon wurden einerseits trotz größter Bemühungen gewisse, wenn auch nur leichte, Störungen in der Bodenstruktur verursacht, sodass eine völlige Ungestörtheit unrealistisch erscheint. Andererseits fehlt den Säulen der natürliche Anschluss des umgebenden Bodens, wodurch im Bereich Boden-Plexiglasinnenwand nicht mit Sicherheit von einem vollständigen Dichtschluss ausgegangen werden kann. Beide Faktoren, insbesondere die nicht in allen Bereichen sicherstellbare Abdichtung, haben vermutlich zu einer Vergrößerung der Oberfläche zwischen Boden und Atmosphäre in den Randbereichen der Säulen geführt, an der Austauschprozesse stattfinden konnten, die *in situ* nicht möglich sind (Gaswechsel ausschließlich über Bodenoberfläche).

Während auf den Versuchsflächen neben geringerer Organismenaktivität bzw. verändertem Metabolismus der Mikroorganismen vermutlich auf verringertes Diffusionsvermögen zurückzuführender Gasstau innerhalb des Bodens ursächlich für geringere CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten ist, konnte an den gesteigerten Oberflächen der Säulen der Gasaustausch verbessert werden und somit annehmbar im Boden gestaute Gase, wie CO<sub>2</sub>, besser bzw. in höheren Raten aus dem Boden entweichen. Andererseits trägt womöglich auch die dadurch verbesserte, periphere O<sub>2</sub>-Versorgung zu einer Steigerung der Bodenatmung bei. Des Weiteren ist bei den CO<sub>2</sub>-Flüssen eine stetige Abnahme im Versuchsverlauf gegeben, deren Ursache wahrscheinlich in dem fehlenden Eintrag frischer, abbaubarer organischer Substanz durch das Fehlen von insbesondere Pflanzen (Streueintrag, Wurzelexsudation) liegt.

Die Erhöhung der am Austausch beteiligten Bodenoberfläche sollte gleichermaßen auch für die N<sub>2</sub>O-Freisetzung von Bedeutung sein. Jedoch kann sie nicht als alleinige Erklärung für relativ konstante N<sub>2</sub>O-Flüsse in den Säulen beider Fahrspurbehandlungen dienen, die auf den Versuchsflächen im Wald in dieser Ausprägung nicht festgestellt wurden. Hier könnte zudem ein Effekt der kontinuierlichen Beregnung und der infolgedessen hohen Wassersättigung des verdichtungsbedingt verringert bzw. veränderten Porenraumes einen Beitrag dazu geleistet haben, das Redoxpotential partiell in einem Bereich zu halten, der zu gesteigerter, anhaltender Denitrifikation mit Lachgasproduktion geführt hat. Die Beregnung erfolgte an 3 Tagen je Woche, um den mittleren Jahresniederschlag, der rechnerisch auf den Versuchsflächen fällt, gleichmäßig über die Versuchslaufzeit zu verteilen – ein Szenario, das unter natürlichen Bedingungen nicht in dieser Form gegeben ist und dementsprechend kontinuierlich-ähnliche Bodenfeuchten schafft. Durch die künstliche Kronentraufe wurden durch Substitution der Stickstoffspezies zudem leicht höhere Nitrat-Stickstoff-Frachten in die Bodensäulen eingebracht, als dies unter den Bedingungen im Wald der Fall ist.

Dass das Ergebnis der Methanoxidation dagegen im Wesentlichen deckungsgleich mit dem Feldversuch ist (in *Ref* ausgeprägte Methanaufnahme, die in den Fahrspuren mehr oder weniger verloren geht), erscheint plausibel, da sich die Bedingungen durch den Versuchsaufbau mit Ausnahme der möglicherweise verbesserten O<sub>2</sub>-Verfügbarkeit in den Randbereichen der Säulen nicht in eine Richtung verändert hat, die für die Aktivität und Entwicklung methanoxidierender Mikroorganismen vorteilhaft wäre (intensive Bodenverdichtung; hohe Wassersättigung; fehlender Temperaturgradient). Zudem ist annehmbar, dass eine gestörte Organismengemeinschaft, zumal unter unnatürlichen Laborbedingungen ohne Austausch mit der Umgebung, sich nur langsam in Richtung ungestörter Bedingungen (*Ref*) entwickeln würde.

Der Effekt der Bodenverdichtung sowie Einflussnahme der Befahrung auf den Aufbau des Bodens wirkt sich auch auf die gewonnenen Mengen Sickerwasser sowie der enthaltenen Stoffkonzentrationen aus. So ist die Verringerung der Sickerwassermengen – und infolgedessen höhere Verluste durch Evaporation und Rückhalt in den Bodensäulen – in den Fahrspurbehandlungen, besonders in *FS-C*, mutmaßlich auf die reduzierten hydraulischen Leitfähigkeiten (siehe Kapitel II.2.4) bedingt durch das modifizierte Porensystem zurückzuführen. Insbesondere Grob- und Mittelporen sind durch die Verdichtung stark beeinflusst. Daher konnte durch Anlegen des gleichen Unterdrucks ein geringerer Anteil des Porenvolumens entwässert werden, was die geringere Perkolatmenge erklärt.

Eine bedeutendere Wirkung besteht jedoch in Bezug auf die Nährstofffrachten, die beträchtliche Austräge von insbesondere Nitrat-Stickstoff sowie Magnesium und Calcium anzeigen – jedoch nur in Fahrspurbehandlung *FS-A* und den Referenzsäulen, nicht aber in den Säulen von *FS-C*. Entscheidender Unterschied zwischen diesen drei Behandlungen liegt in den variablen Mächtigkeiten des Auflagehumus und des Oberbodens, die in *Ref* standortstypisch ausgeprägt sind, während in den Fahrspursäulen eine Beeinflussung durch die Befahrung besteht. In Fahrspurbehandlung *FS-A* konnte eine gesteigerte Mächtigkeit der L+O<sub>r</sub>-Lage sowohl im Wald als auch durch Analysen des Humusvorrats gefunden werden (siehe Ergebnisse Bodenbiologische Eigenschaften (TV1) in Kapitel II.2.9.2), von der auszugehen ist, dass sie durch Ablage von Schlagabraum als sogenannte Reisigmatte entstanden ist. Die höhere Lagenmächtigkeit war auch in den Bodensäulen gegeben und förderte dort die mikrobielle Mineralisierung dieser organischen Substanz, in deren Folge es zu einer vermehrten Nährstofffreisetzung gekommen sein dürfte, die in Teilen mit dem Sickerwasser aus den Säulen ausgetragen wurden. Aus Gesichtspunkten der Nährstoffnachhaltigkeit ist diese Feststellung als ungünstig und zu vermeiden zu beurteilen. Durch den befahrungsbedingten Verlust des Großteils der humosen Horizonte, aus der sich ebenso Verluste des Lebensraumes sowie der mikrobiellen Biomasse ableiten lassen, zeigt sich in Fahrspurböden > 20 cm (*FS-C*) das Gegenteil.

Jedoch nimmt auch der Versuchsaufbau Einfluss auf das Ergebnis: Durch Herauslösen der ungestörten Säulen aus dem Kontinuum Boden fehlt einerseits ein Austausch mit der Umgebung, andererseits wurde auch

ein entscheidender Akteur – die Pflanzen – aus dem Experiment ausgeschlossen. Das Fehlen von Pflanzen, die mit ihren Wurzeln Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen, hat sehr wahrscheinlich einen Beitrag zu derart hohen Nährstoffausträgen geleistet. Ein Indiz dafür liefert auch das Ergebnis der ungestörten Referenzsäulen, bei denen es erst im Verlauf des Versuchs zu einem kontinuierlichen Anstieg der Stoffkonzentrationen kam, wohingegen zu Beginn des Experiments, als der Ausschluss von Pflanzen durch die Probenahmen erst eine geringe Zeitspanne zurücklag, noch geringe Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser gemessen wurden. Aus den Untersuchungen der Durchwurzelung der Böden (siehe unten; Kapitel II.2.13.2) ist bekannt, dass die Referenzparzellen über eine intensivere Durchwurzelung verfügen als die Fahrspurböden, welche freigesetzte Nährstoffe unter natürlichen Bedingungen in stärkerem Maße aufnehmen können sollten.

### 2.12.3 Schlussfolgerungen

Eine Hypothese zum Säuleninkubationsversuch ging davon aus, dass die Bodenverdichtung in den Fahrspursäulen mit einem geringeren Stofftransport im Sickerwasser verbunden ist, der sich im Allgemeinen in niedrigeren Nährelementkonzentrationen des aufgefangenen Eluats niederschlägt. Für die Säulen, die in den Fahrspuren FS-C gewonnen wurden, kann die Hypothese größtenteils bestätigt werden. Mit Ausnahme von Kalium und Mangan, lagen die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser überwiegend am niedrigsten oder auf vergleichbarem Niveau mit den unbefahrenen Referenzsäulen. Für Behandlung FS-A stellt sich die Annahme als nicht zutreffend heraus. Hier zeigte sich ein gegenteiliger Effekt, der vermutlich auf die mächtigeren Humusaufgaben und verstärkte Mineralisierung zurückzuführen ist. Die Sickerwasserkonzentrationen der Säulen aus schwach ausgeprägten Fahrspuren wiesen konstant die höchsten oder zu Ref ähnliche Stoffkonzentrationen auf, unterschieden sich bei K und Mn jedoch nur geringfügig zu den Säulen aus FS-C. Aufgrund der Annahme vermehrt reduktiver Bedingungen in den verdichteten Bodensäulen wurde vor Versuchsbeginn davon ausgegangen, dass sich im Perkolat dieser erhöhte Fe<sup>2+</sup>- und Mn<sup>2+</sup>-Konzentrationen messen lassen würden. Hinsichtlich der Mangankonzentrationen kann diese Hypothese bestätigt werden, nicht jedoch für Eisen, das zwar für FS-C Tendenz zu höheren Konzentrationen zeigt, im Wesentlichen aber indifferent zu den beiden anderen Behandlungen ist.

Obwohl durch den Säuleninkubationsversuch wichtige Hinweise über die Wirkung der Befahrung im Hinblick auf Stoffausträge gewonnen werden konnten, ist das Laborexperiment nur eingeschränkt auf die Verhältnisse im Wald übertragbar, wie vor allem durch das Fehlen von Pflanzen/Bäumen und die in Teilen widersprüchlichen Ergebnisse der Gasanalysen deutlich wird. Jedoch legt der Versuch – wie bereits die Ergebnisse der umfangreichen Bodenproben (Kapitel II.2.9.2 und II.2.11.2) – Unterschiede in der Nährstoffversorgung bzw. -verfügbarkeit der Behandlungen offen, die in Fahrspuren bis 10 cm (FS-A) Ähnlichkeit (bisweilen sogar günstigere Verhältnisse) mit den Referenzparzellen aufweisen. In Fahrspurböden mit Tiefen größer 20 cm (FS-C) wandeln sich die Bedingungen hingegen in eine Richtung, die bzgl. der verfügbaren Nährstoffmengen (neben zahlreichen weiteren als ungünstig zu bewertenden Eigenschaften) eine Verschlechterung des Standorts für Pflanzen darstelle. Allerdings beziehen sich die Beobachtungen auch ausschließlich auf die Fahrspuren selbst. Humose Bodenbestandteile der Humusaufgabe und des Oberbodens sind befahrungsbedingt nicht verloren gegangen im eigentlichen Sinne, sondern lediglich räumlich umgelagert worden, sodass mittels der durchgeführten Versuche kein vollständiges Bild über die Wirkung von Befahrung auf die Eigenschaften von Rückegassen gezeichnet werden kann.

### 2.13 Durchwurzelung (TV1)

Forschungsfrage: *Welchen Einfluss nimmt die Spurtiefe auf Anzahl und Verteilung von Grob- und Feinwurzeln im Mineralboden?*

Hypothese: Die befahrungsinduzierte Verdichtung schafft auf Fahrspuren Bedingungen, die sich nachteilig auf die Durchwurzelbarkeit der Böden auswirken. In der Folge kommt es zu einer Abnahme der Anzahl sowohl grober als auch feiner Wurzeln in allen Tiefenstufen der Fahrspurböden verglichen mit den unbefahrenen Referenzparzellen. Da das Ausmaß der Bodenstrukturveränderungen mit der Fahrspurtiefe zunimmt und in tieferen Fahrspuren eine intensivere Schädigung der Wurzelsysteme erfolgt, besteht ein negativer Zusammenhang zwischen der Fahrspurtiefe und der Wurzelanzahl.

### 2.13.1 Material & Methoden



Abbildung 67: Profilwand einer unbefahrenen Referenzparzelle (A) und einer Fahrspur mit befestigtem Zählrahmen (B) (Fotos: © Valenzik, K.).

Um Anzahl und Verteilung von Grob- und Feinwurzeln sowie abgestorbener Wurzeln im Mineralboden zu erfassen, fanden Untersuchungen zur Durchwurzelung der Fahrspurböden (Abbildung 67, B) sowie unbefahrener Referenzparzellen statt (Abbildung 67, A). Die Wurzelzählungen erfolgten in Schürfgruben in Form von Wurzelabrissen, die an zuvor frisch mit einem Spaten abgestochenen und sauber präparierten Profilwänden sichtbar wurden. Zu diesem Zweck wurden je Stratum (*Ref*, *FS-A*, *FS-B*, *FS-C*) vier Versuchsgassen ausgewählt und in jeder der Versuchsgassenbehandlungen wiederum 3 Schürfgruben gegraben, sodass insgesamt 48 Schürfgruben mit den Maßen von ca. 90 cm Breite und 60 cm Tiefe angelegt wurden (4 Straten \* 4 Versuchsgassen \* 3 Schürfe). Bei der Schürfgrubenanlage wurde darauf geachtet, dass sich innerhalb von 5 Metern zur Grube mindestens ein Baum befand.

Zur Zählung der Wurzeln wurde ein eigens dafür hergestellter Zählrahmen verwendet. Dieser besaß 40 Zählquadrate der Maße 5 cm (tief) \* 15 cm (breit), angeordnet in 4 Spalten und 10 Reihen. Daraus ergab sich eine Fläche von etwa 3000 cm<sup>2</sup>, auf der sämtliche Wurzeln differenziert nach Tiefenstufe und Spalte gezählt werden konnten (40 Zählbereiche). Vor Beginn einer Zählung wurde an jeder Profilwand ein Foto erstellt und anschließend der Zählrahmen mittig an der Profilwand so montiert, dass die Oberkante der ersten Reihe der Oberkante des Mineralbodens entsprach. Anschließend fand, in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung 5 (Ad-hoc-AG Boden 2005), eine Zählung der Wurzeln mit Differenzierung nach Wurzelgrößen ( $\leq 2$  mm = Feinwurzeln;  $> 2$  mm = Grobwurzeln) statt. Abgestorbene Wurzeln wurden gesondert gezählt und bei Grobwurzeln wurde der Versuch unternommen, anzusprechen, ob es sich um Baumwurzeln handelt. Steine und deren Bedeckungsgrad je Zählquadrat wurden ebenfalls aufgenommen. An jeder Profilwand wurde zudem in den ersten 8 Reihen einer der beiden zentralen Spalten des Zählrahmens eine Messung des Scherwiderstandes (Scherfestigkeit) mittels eines Scherflügels (Firma Geonor) durchgeführt.

Für das Vorhaben wurde eine Studentin der Universität Göttingen (Frau Karen Valenzik, Bachelor of Science Forstwissenschaften) gewonnen, die die Ergebnisse der Untersuchungen in ihrer Abschlussarbeit verwertet hat.

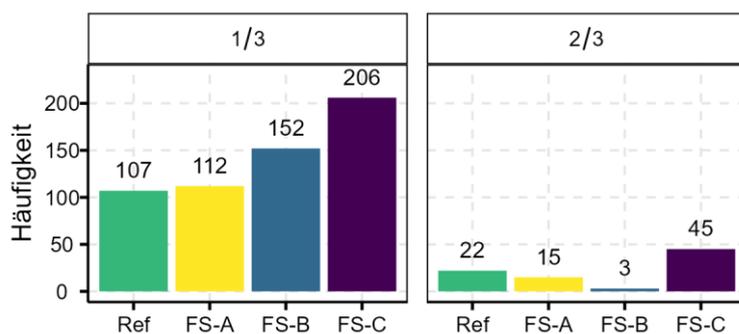
#### Auswertung

Es kann angenommen werden, dass Bäume auf die befahrungsinduzierte Bodenverdichtung in den Rückegassen mit Veränderungen der Durchwurzelungsintensität in den Fahrspuren reagieren. Die zur Prüfung dieser Hypothese gewonnenen Daten wurden in R tiefenstufenweise (5 cm-Stufen) durch Nutzung von Mixed Models (*lme4:lmer*) analysiert, wobei die gezählten Wurzelanzahlen mit der Interaktion von Behandlung und Tiefenstufe als Prädiktoren (*fixed effects*) und die Wiederholungen *within* Versuchsgassen als *random effects* modelliert wurden. Bei der Auswertung der als Summen aggregierten Wurzeln wurde vergleichbar vorgegangen, jedoch wurden die Daten im Vorhinein über Tiefenstufen, Behandlungen, Versuchsgassen und Wiederholungen gemittelt und dann Summen über die untersuchten Tiefenstufen nach Behandlungen, Versuchsgassen und Wiederholungen gebildet. Die Tiefenstufen entfielen dann aus dem

Interaktionsterm. Neben den Signifikanztests wurden zudem a-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen und -Differenzen für Behandlungsunterschiede abgeleitet (siehe II.2.9.1).

### 2.13.2 Ergebnisse

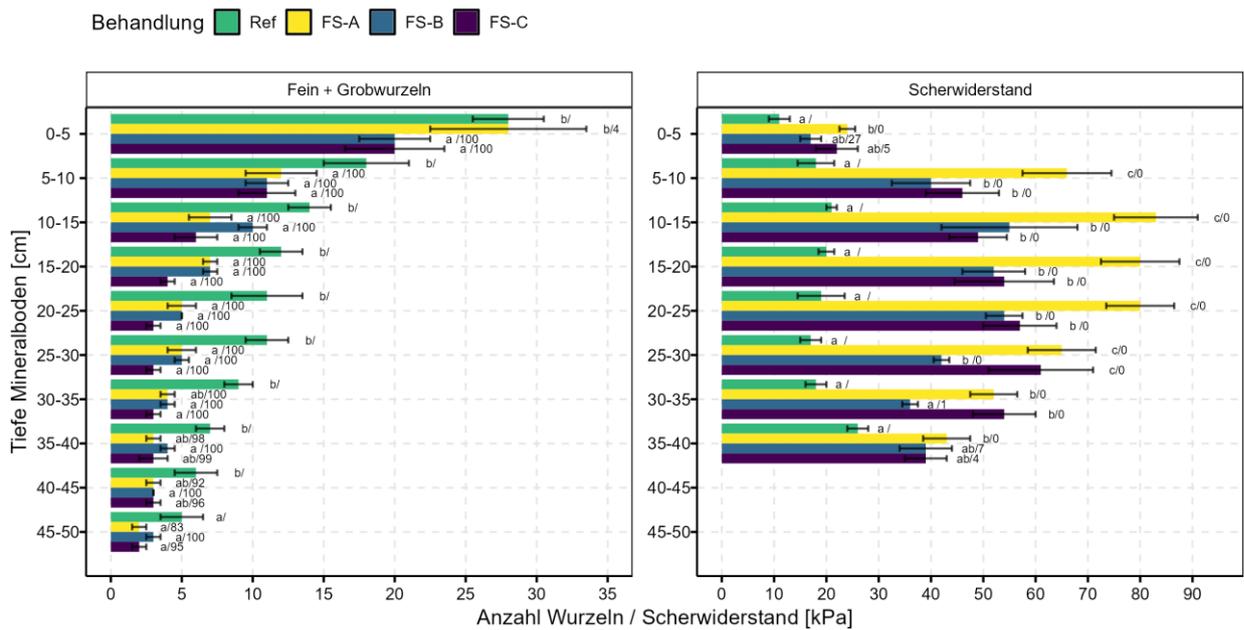
Neben den Wurzeln wurde auch das Bodenskelett visuell erfasst, sofern durch größere Grobbodenfraktionen nennenswerte Anteile der Zählquadranten ( $> 1/3$  Bedeckung) dadurch ausgefüllt wurden, die möglicherweise Einfluss auf das Ergebnis der Durchwurzelung des Bodens genommen haben (Abbildung 68). Der Anteil durch Skelett bedeckter Quadranten wurde grob in Drittel-Stufen unterschieden, eine vollständige Ausfüllung ( $3/3$ ) konnte jedoch in keiner der Profilwände festgestellt werden, sodass diese Kategorie nicht dargestellt ist. In den meisten Fällen handelte es sich um Anteile von etwa  $1/3$  Bedeckung, in denen statt Feinboden und Wurzeln Grobboden erkennbar war. Zu einem erheblich geringeren Anteil nahm das Bodenskelett Anteile von  $2/3$  an. Bei beiden Klassen fällt eine hohe Übereinstimmung zwischen den Referenzparzellen (*Ref*) und den Fahrspuren des Typs A (0-10 cm) auf, zwischen denen es nahezu keinen Unterschied gibt. Erst ab Fahrspurtiefen  $> 10$  cm (*FS-B* und *FS-C*) steigt der Skelettanteil sprunghaft an und liegt in der Fahrspurbehandlung *FS-C* der Klasse  $1/3$ %-Bedeckungsanteil fast doppelt so hoch wie in den unbefahrenen Referenzparzellen. Gleiches gilt für die Kategorie  $2/3$ -Skelettanteil, bei der es in *FS-B* allerdings kaum Nennungen gibt.



**Abbildung 68:** Häufigkeiten von Grobboden in Profilwänden von Wurzelzählgruben, dessen Flächenanteil mindestens  $1/3$  der Maße der Zählquadranten ( $5 \times 10$  cm) entsprach. Differenziert wurde nach Drittel-Flächenanteilen, wobei eine vollständige Ausfüllung ( $3/3$ ) nicht festgestellt werden konnte. Je Behandlung wurden 480 Zählquadrate angesprochen.

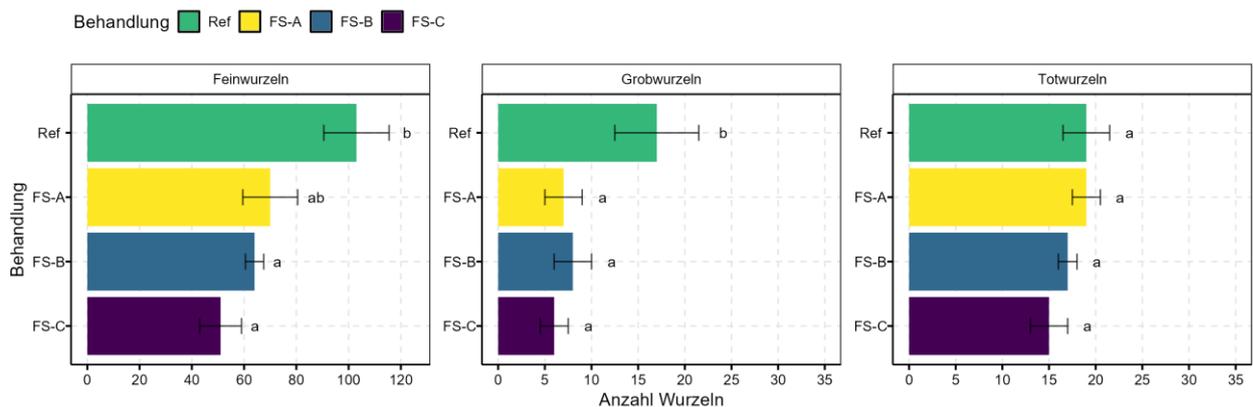
Die Durchwurzelung der Mineralböden, dargestellt als mittlere Anzahl aus Fein- und Grobwurzeln je Tiefenstufe, zeigt eine charakteristische Profildifferenzierung mit abnehmenden Wurzelzahlen bei zunehmender Bodentiefe in allen Behandlungen (Abbildung 69). Darüber hinaus ist ein ausgeprägter, signifikanter Unterschied zwischen den unbefahrenen, locker gelagerten Böden der Referenzflächen und den verdichteten Fahrspuren gegeben, der sich in stark verringerten Wurzelanzahlen der Fahrspurböden niederschlägt. Das Gros der Wurzeln konzentriert sich auf die ersten 5 bis 10 cm des Mineralbodens, in denen in *Ref* und *FS-A* im Mittel die gleiche Wurzelanzahl festgestellt wurde, wenn auch in *FS-A* eine höhere Varianz besteht. Bereits ab dem Oberboden (0-5 cm) ist die mittlere Wurzelanzahl in den Fahrspurvarianten *FS-B* und *FS-C* dagegen signifikant verringert. Gleiches gilt auch für alle weiteren Tiefenstufen, die wesentlich schlechter mit Pflanzenwurzeln durchsetzt sind, sobald es sich um einen Fahrspurboden (unabhängig von dessen Tiefe) handelt. Mit Ausnahme der ersten 15 cm des Mineralbodens, liegt die Durchwurzelung von *FS-A* und *FS-B* auf ähnlich verringertem Niveau und nimmt nochmals leicht ab (nicht signifikant), sobald es sich um Fahrspurbehandlung *FS-C* (20-30 cm) handelt.

Im Zuge der Wurzelzählung wurde auch eine Messung des Scherwiderstandes bis in eine Tiefe von 40 cm unter Mineralbodenoberkante vorgenommen. In der Behandlung Referenz liegt der Scherwiderstand in allen Tiefenstufen erwartungsgemäß signifikant am niedrigsten (Ausnahme: Tiefenstufen 0-5 cm, 30-35 cm und 30-40 cm, in denen kein signifikanter Unterschied zu *FS-B* und *FS-C* [hier nur in Tiefenstufe 35-40 cm], jedoch zu *FS-A* besteht). Die Fahrspurbehandlungen stellen einen erheblichen Gegensatz zu den unbefahrenen Referenzen dar und weisen, ausgenommen des Oberbodens (0-5 cm), Scherfestigkeiten auf, die einem Vielfachen der Referenzparzellen entsprechen. Während die Fahrspurbehandlungen *FS-B* und *FS-C* signifikant höhere Werte als *Ref* besitzen, sind sie sich im Tiefenbereich 5-25 cm untereinander sehr ähnlich. In Fahrspurbehandlung *FS-B* nehmen die Werte im Bereich 25-35 cm im Vergleich zu *FS-C* ab, in Fahrspuren der Variante *FS-C* bleiben sie hingegen auf vergleichbarem Level zu den darüber liegenden Tiefenstufen und nähern sich erst in der letzten Tiefenstufe (35-40 cm) wieder Behandlung *FS-B* an. Die höchsten Scherwiderstände konnten in den schwach ausgeprägten Fahrspuren *FS-A* gemessen werden, die ab einer Tiefe von 5 cm bis einschließlich 25 cm selbst die Scherfestigkeit der mäßig bis stark vertieften Fahrspuren (*FS-B* und *FS-C*) übertreffen. Lediglich ober- und unterhalb dieses Tiefenbereichs besitzen sie Vergleichbarkeit mit den anderen Fahrspurbehandlungen.



**Abbildung 69: Mittlere Anzahl Fein- + Grobwurzeln und Scherwiderstand  $\pm$  Standardfehler in Abhängigkeit von der Bodentiefe (n = 4). Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen je Tiefenstufe an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ), während Zahlen die posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die Differenz „Ref-FS > 0“ angeben.**

Zur Veranschaulichung der Befahrungswirkung auf die Durchwurzelung wurden aus den Daten der Tiefenstufen behandlungsweise Summen für die Fein-, Grob- und „Totwurzeln“ gebildet (Abbildung 70). Bei „Totwurzeln“ handelt es sich um grobe Wurzeln mit einem Durchmesser > 2 mm, die mit Sicherheit als abgestorben identifiziert werden konnten. In der Regel waren dies Baumwurzeln (Fichte) mit Durchmessern weit oberhalb der 2 mm-Marke. Die überwiegende Anzahl aller gezählten Wurzeln wurden der Kategorie *Feinwurzeln* zugeordnet. Die Diskrepanz zwischen den unbefahrenen Böden (*Ref*) – im Mittel liegt die Anzahl Feinwurzeln hier bei etwa 100 Wurzeln – und den Fahrspuren ist groß und führt zu signifikanten Behandlungsunterschieden zwischen *Ref* und *FS-B* (~ 64 Feinwurzeln) sowie *FS-C* (~ 51 Feinwurzeln). Keine statistische Abweichung besteht hingegen zur Fahrspurbehandlung *A* (~ 70 Feinwurzeln). Die Grobwurzeln zeigen im Prinzip den gleichen Zusammenhang, hier ist die Anzahl Wurzeln in den Fahrspurbehandlungen um etwa 60 % verringert. Bei den Totwurzeln gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den Behandlungen, mit der Tendenz zu abnehmenden Totwurzelsummen in den Fahrspuren > 10 cm (*FS-B* und *FS-C*). In Relation zu den lebenden Fein- und Grobwurzeln nehmen die abgestorbenen Wurzeln in den verdichteten Fahrspurböden jedoch in ähnlicher Höhe zueinander zu.



**Abbildung 70: Mittlere Summe Wurzeln differenziert nach Fein- (< 2mm Ø), Grob- (> 2mm Ø) und Totwurzeln (> 2mm Ø)  $\pm$  Standardfehler (n = 4). Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen an (LMM, Tukey post-hoc-Test, Signifikanzniveau  $\leq 5\%$ ).**

### 2.13.3 Schlussfolgerungen

Dem Versuch zur Bestimmung der Wurzelzahlen lag die Hypothese zugrunde, dass in allen Tiefenstufen der Fahrspurböden sowohl Fein- als auch Grobwurzeln in geringerer Anzahl vorhanden sind als in den unbefahrenen Referenzparzellen. Das Ergebnis zeichnet ein differenzierteres Bild, sodass die Hypothese in

dieser Eindeutigkeit nicht zutreffend ist. Jedoch zeigt sich, dass die Annahme für den Tiefenbereich 5-30 cm bestätigt werden kann. Hier konnte eine signifikant höhere Durchwurzelung (Fein- + Grobwurzeln) der Referenzparzellen festgestellt werden. Ausnahme für diesen Befund bildet der Oberboden (Tiefenstufe 0-5 cm), in dem die Durchwurzelung der *Ref*-Parzellen gleichauf mit *FS-A* liegt. Sowie die Tiefenstufen ab > 30 cm, in denen zwar im Mittel ebenfalls mehr Wurzeln in den unbefahrenen Böden (*Ref*) gefunden wurden, die Differenz jedoch nicht zu allen Fahrspurbehandlungen signifikant ist. Des Weiteren wurde von einem negativen Einfluss der Fahrspurtiefe auf die Wurzelanzahl ausgegangen. Diese Annahme muss aufgrund fehlender Signifikanz zwischen den Fahrspurbehandlungen ebenfalls verworfen werden. Wie obenstehend erläutert, ist dennoch eine Tendenz zu abnehmender Durchwurzelung der Fahrspuren mit zunehmender Spurtiefe erkennbar, die insbesondere in der abnehmenden Summe Feinwurzeln zum Ausdruck kommt.

Für die Beurteilung der Durchwurzelungsintensität wurden insgesamt 48 Schürfgruben gegraben und die an den Profilwänden freigelegten Wurzeln nach Größenklassen gezählt. Die Untersuchungen weisen auf substanzielle Unterschiede zwischen den unbefahrenen Referenzparzellen mit lockerer Bodenlagerung und den von Verdichtung und Bodenstrukturveränderungen betroffenen Fahrspurböden hin. Die Durchwurzelung steht jedoch nur bedingt in Zusammenhang mit der Fahrspurtiefe, zeigt aber Verringerungen der Fein- und Grobwurzeln an, die in den Rückegassen mit intensiver Fahrspurbildung (*FS-B* und vor allem *FS-C*) am stärksten ausgeprägt sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Durchwurzelung eine integrative Messgröße ist, die auf Bodenveränderungen, die für das Wurzelwachstum vieler Pflanzen (zumindest Fichte) unzutraglich sind, sensibel reagiert und Störungen proportional reflektiert. Somit erscheint das Ergebnis unter Betrachtung anderer Untersuchungsergebnisse, wie der Intensität der Bodenverdichtung (Kapitel II.2.2) und den Veränderungen des Luft- und Wasserhaushaltes (Kapitel II.2.3, II.2.4, II.2.5, II.2.6 und II.2.7), die in weiten Teilen eine Tendenz zu gradueller Veränderung von Bodeneigenschaften mit zunehmender Spurtiefe anzeigen, schlüssig. Wie auch für die anderen Versuche geltend, ist jedoch anzunehmen, dass das Ergebnis der Durchwurzelungsunterschiede auch durch die im Vergleich zu den Referenzen tieferliegenden Profile der Fahrspuren beeinflusst wird. Dies wird am ansteigenden Skelettanteil in den Fahrspuren > 10 cm (*FS-B* und *FS-C*) deutlich, der für eine größere Nähe der oberflächennahen Horizonte/Tiefenstufen zum Ausgangsgestein spricht (höherer Anteil Gesteinszersatz). Die Fichte ist als ausgesprochener Flachwurzler bekannt, sodass größere Profilvertiefungen in den Fahrspuren dort auch zu erheblicheren Schädigungen des Hauptwurzelsystems durch Wurzelabriss und Verluste geführt haben dürften, die nicht ohne Weiteres durch die Bäume kompensiert werden können. Darüber hinaus nimmt die Durchwurzelung in größeren Bodentiefen generell ab (vgl. *Ref*), was neben den für das Wurzelwachstum stärker negativ modifizierten Bodeneigenschaften vermutlich auch einen Beitrag zu geringeren Wurzelzahlen in Behandlung *FS-C* geleistet hat.

Obwohl ein nennenswerter Teil der gezählten Wurzeln von Fichten und anderen Bäumen stammen sollte, bleibt die genaue Artenzugehörigkeit, deren Bestimmung nicht Bestandteil der Untersuchungen war, im Unklaren. Ein Teil der Wurzeln, besonders der Feinwurzeln in den oberen Tiefenstufen, kann dementsprechend auch von krautigen Pflanzen stammen.

Das Ergebnis des Scherwiderstandes zeigt zwar im Allgemeinen höhere Scherfestigkeiten in den Fahrspurböden der Rückegassen an, die im Einklang mit anderen bodenphysikalischen Ergebnissen stehen. Dass die höchsten Messwerte jedoch mit signifikantem Abstand zu den beiden anderen Fahrspurbehandlungen in *FS-A* gemessen wurden, erscheint zunächst un schlüssig. Hierbei handelt es sich vermutlich insbesondere um einen Einfluss der Bodenfeuchte auf das Messergebnis. Nachweislich verfügen die Fahrspuren *FS-B* und *FS-C* über kontinuierlich höhere Bodenfeuchten als jene der Behandlung *FS-A* (Kapitel II.2.5). Die Untersuchungen wurden zudem Anfang Herbst vorgenommen, als die Böden tiefenwirksam ausgetrocknet waren. Besonders stark ausgeprägt war die Trockenheit den Ergebnissen der Untersuchungen der Bodenwasserspannung in Fahrspuren der Variante *FS-A*, wodurch sich die höheren Scherfestigkeiten erklären lassen würden.

Die Verringerungen der Durchwurzelungsintensitäten von Fahrspurböden sind einerseits als direkte Folge von Schädigungen des Wurzelsystems durch Überrollungen forstlicher Maschinen und andererseits als indirekte Wirkung der Verdichtung der Böden und Veränderungen der Bodenstruktur zu verstehen. Durch im Bereich der Fahrspuren geringere Wurzelmassen wird das Potential der Bäume gesenkt, Wasser und Nährstoffe aus diesem Bereich des Bodens aufzunehmen. Geringer ausgeprägte Durchwurzelungen schwächen auch das Vermögen zur Verankerung im Boden und nehmen daher Einfluss auf die Stabilität der Bäume. Darüber hinaus bieten geschädigte Wurzeln eine Angriffsfläche für Pathogene. Im Gegensatz zu anderen Messgrößen zeigt die Durchwurzelung bereits bei Fahrspuren mit Tiefen zwischen 0-10 cm (*FS-A*) einen deutlichen Befahrungseffekt an, obwohl die Wurzelzahlen den Referenzen noch am nächsten kommen. Ein teilweiser Schutz der Wurzeln erscheint somit am ehesten möglich, wenn während der Befahrung lediglich Fahrspuren geringer Tiefen unter Erhalt der Humusaufgabe und des Bodenaufbaus erzeugt werden. Fahrspuren mit größerer Eintiefung (*FS-B* und *FS-C*) wirken hingegen zweifelsfrei negativ auf die Durchwurzelung des Mineralbodens.

## 2.14 Setzungsmessung (TV2)

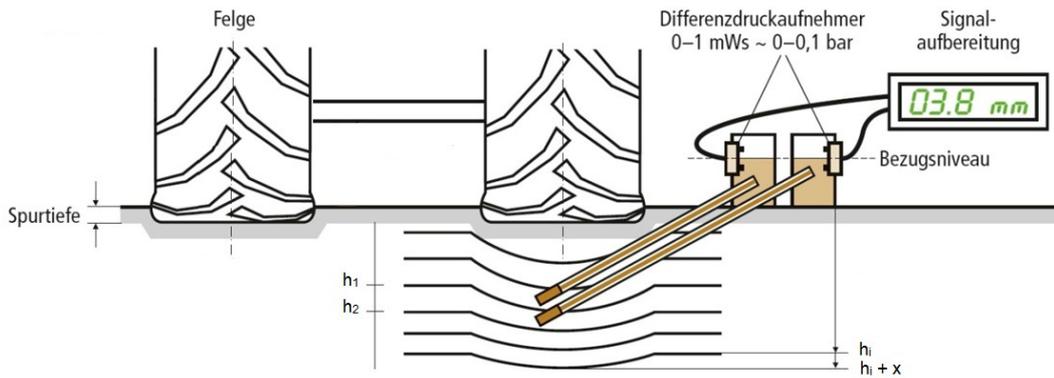
*Forschungsfrage: Wie resilient gegenüber weiterer Eintiefung und zunehmender Änderungen der bodenphysikalischen Eigenschaften sind die Fahrspurböden bestehender Rückegassen bei der Befahrung dieser mit forstlichen Erntemaschinen und wie sind die Unterschiede zwischen unterschiedlich tiefen Fahrspuren, den eingesetzten Fahrzeugen und der Einfluss in unterschiedlicher Messtiefe?*

Hypothese: In der Vergangenheit genutzte Fahrspuren wurden durch mehrfache Befahrung schwerer Maschinen in ihren bodenphysikalischen Eigenschaften bereits stark beeinflusst und unterscheiden sich signifikant vom ursprünglich gelagerten Waldboden. Je flacher die Fahrspur, desto größer ist das Potential weiterer Eintiefung bzw. je tiefer die Fahrspur, desto geringer fallen die weiteren Änderungen bei erneuter Befahrung aus. Fahrzeuge mit höheren Rad- und Achslasten übertragen signifikant höhere Kräfte in den Boden, die sich zwiebel förmig im Boden ausbreiten. Aus diesem Grund ist von einer größeren Setzung durch den schwereren Rückezug auszugehen, der deutlich mehr Veränderungen im Boden hervorruft. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Einfluss beider Fahrzeuge auf die Struktur des Bodens ab, sodass die Setzung ebenfalls abnimmt.

### 2.14.1 Material & Methoden

Die dynamische Setzung des Bodens wurde im Zuge von Befahrungsversuchen ermittelt, die an drei verschiedenen Zeitpunkten auf jeweils 6 Versuchsgassen bestimmt wurde. Am 04. und 06.12.2017, am 23.05.2019 und 14.04.2021 erfolgte die Befahrung der Versuchsgassen unter kontrollierten Bedingungen. Dabei wurde beidseitig der Fahrspur je eine Grube (im Abstand von 80 cm Abstand) ausgehoben, von denen ausgehend lateral, unter Zuhilfenahme einer Lehre und einer Einschlagstange aus Metall, Löcher in den Boden geschlagen wurden. Die Stange wurde so weit in den Boden eingeschlagen, dass deren Spitze mittig unter der jeweiligen Reifenmitte der Fahrzeugseite endete. Durch die Lehre und die an die Fahrspurtiefe angepasste seitliche Grube wurde die Zieltiefe erreicht. In jeweils 20 cm und 35 cm Tiefe unterhalb der Fahrspur konnten in die präparierten Löcher die Schläuche der Setzungsmessung geschoben werden. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 71 dargestellt. Je Tiefenstufe wurden 4 Schläuche als Wiederholungen installiert. Exemplarisch ist die Durchführung der Setzungsmessung bei den Versuchen im Solling in Abbildung 72 aufgeführt.

Bei der verwendeten hydrostatischen Setzungsmessung handelt es sich um eine Eigenentwicklung des Thünen-Institutes. Auf Basis des Funktionsprinzips einer Schlauchwasserwaage wurde ein System entwickelt, welches ein wassergefülltes Schlauchsystem, bestehend aus einem äußeren und einem inneren Schlauch, beinhaltet. Die Schlauchenden sind an einem hochauflösenden Differenzdrucksensor angeschlossen, der Lageänderungen der Schlauchspitze in Form von Druckänderungen sichtbar macht. Diese werden in Höhenänderungen (in Millimetern) umgerechnet und in hoher zeitlicher Auflösung aufgezeichnet. Weitere Details sind in Nolting et al. (2006) aufgeführt.



**Abbildung 71: Schematische Darstellung der unter einer Fahrspur installierten Setzungsmessung des Thünen-Institutes für Agrartechnologie (Nolting et al. 2006).**



**Abbildung 72: Draufsicht der Setzungsmessung (links), eingebaut bei Befahrungsversuchen (rechts) im Dezember 2017 im Solling, Niedersachsen.**

Nach Installation der Messvorrichtung begann die Überfahrt der Fahrzeuge: Zunächst fuhr ein Harvester, gefolgt von einem beladenen Forwarder, einmalig über die Messstelle. Der Beladungszustand wurde unter Zuhilfenahme einer Fuhrwerkswaage eingestellt und an praxisübliche Bedingungen angepasst. Bodenseitig war der Beladungszustand als kritisch zu betrachten, da der Wassergehalt feuchte bis nasse Zustände aufwies. Dieses „worst case“-Szenario sollte das maximal mögliche Maß an Veränderungen bei einer einfachen Überfahrt darstellen. Unter trockenen Bedingungen besteht die Annahme von geringeren Einflüssen der Fahrzeuge auf den Boden. Alle Befahrungsversuche erfolgten mit denselben Maschinen und gleichbleibender Bereifung. Die Beladung des Rückzuges erfolgte basierend auf dem ersten Befahrungsversuch für alle Versuche einheitlich. Neben einem 3-Achs-Harvester wurde ein 4-achsiger Rückzug eingesetzt. Technische Eigenschaften der verwendeten Fahrzeuge sind in Tabelle 13 gegeben.

**Tabelle 13: Technische Parameter der in den Befahrungsversuchen genutzten Fahrzeuge und den gemessenen Daten zu Reifeninnendruck und Radlast.**

<b>Technischer Parameter</b>	<b>Harvester</b>	<b>Forwarder</b>
Hersteller und Typ	<i>John Deere 1210G</i>	<i>John Deere 1270G</i>
Masse	25 Mg (inkl. Wasser im Reifen)	Leer: 21 Mg Beladen: 35 Mg
Bereifung	Vorne: <i>Nokian Forestking TR52 710/45-26,5</i> Hinten: <i>Nokian Forest Rider 710/55 R34</i>	<i>Alliance 710/45-25,5</i>
Reifeninnendruck	Vorne: 3,5 bar Hinten: 5,0 bar	3,5 bar (vorn) / 5,0 bar (hinten)
Achsen	3	4
Radlast (vorne nach hinten)	3,87 Mg 4,10 Mg 4,65 Mg	3,09 Mg / 3,02 Mg (leer/voll) 3,06 Mg / 3,07 Mg 2,12 Mg / 5,62 Mg 2,36 Mg / 5,93 Mg

#### **2.14.2 Ergebnisse**

Die Setzung des Bodens stellt den einzigen im Projektverlauf gemessenen Parameter dar, der die direkte Reaktion des Bodens während der Überfahrt mit forstlichen Fahrzeugen aufzeigt. Er liefert Hinweise über die fortschreitende Eintiefung bereits bestehender Fahrspuren, wenn diese unter widrigen Bedingungen („worst case Szenario“) befahren werden und lässt Rückschlüsse auf die perspektivische Entwicklung der Fahrspurtiefe zu.

In Abbildung 73 ist die Setzung des Bodens nach je einfacher Überfahrt mittels des genutzten Harvesters und des voll beladenen Forwarders (Tabelle 13) dargestellt. Dabei lässt sich einerseits zwischen den Fahrspuren und Messtiefen als auch zwischen den Fahrzeugen differenzieren: Mit zunehmender Fahrspurtiefe nimmt die Höhe der gemessenen Setzung ab. Flache Fahrspuren *FS-A* neigen deutlich stärker zu weiterer Vertiefung als Fahrspuren mit Spurtiefen oberhalb von 10 cm (*FS-B + FS-C*). In allen Fällen wurden stärkere Effekte in 20 cm als in 35 cm Bodentiefe festgestellt. Aufgrund der zwiebelförmigen Druckausbreitung im Boden nehmen die wirkenden Kräfte mit zunehmender ab.

Wegen der unterschiedlichen Radlasten beider Fahrzeuge (Tabelle 13), hervorgerufen durch die starken Unterschiede in der Gesamtmasse der Maschinen, tritt zwischen den eingesetzten forstlichen Maschinen eine voneinander abweichende Setzung des Bodens auf: der leichtere Harvester verursacht in allen Fällen eine geringere Setzung als der Forwarder, wobei dessen Hinterachsen unterhalb des Rungenkorbes die höchsten Achs- und Radlasten aufweisen.

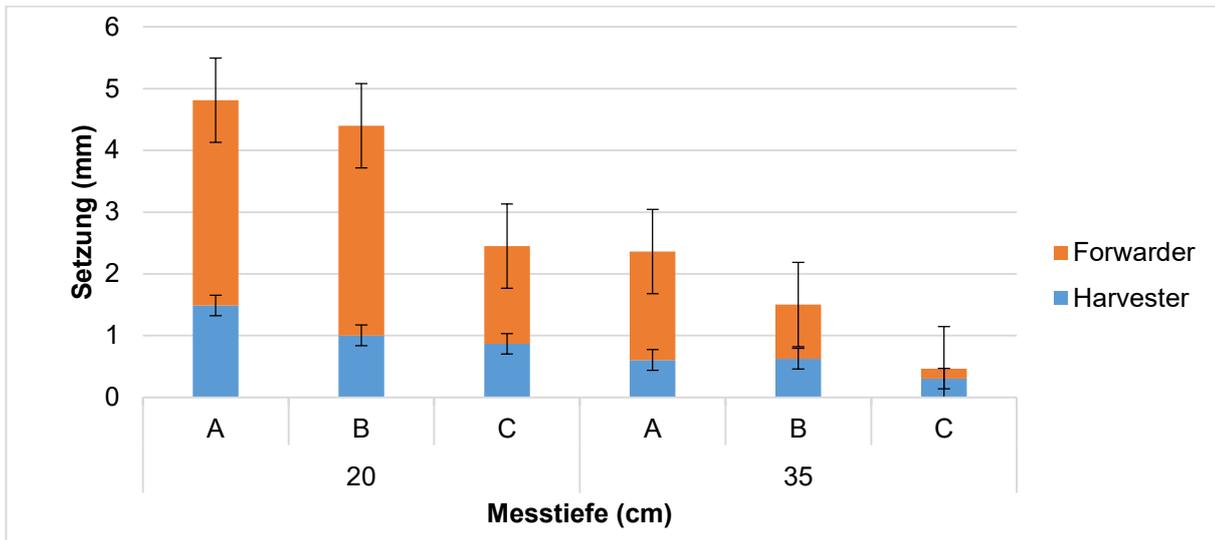


Abbildung 73: Kumulierte mittlere Setzung des Bodens (in mm) der bereits verdichteten Fahrspuren FS-A, FS-B und FS-C nach einfacher Überfahrt eines Harvesters und eines Forwarders in 20 cm und 35 cm Messtiefe.

In Abbildung 74 und Abbildung 78 ist der mittlere volumetrische Wassergehalt in den Fahrspuren zum Zeitpunkt der Befahrung in den Installationstiefen der Setzungsmessung (20 cm und 35 cm) dargestellt. Zudem enthalten die Abbildungen die mittlere Porosität der Fahrspurböden in der entsprechenden Tiefe (roter Balken), die als maximal möglicher Wassergehalt zu verstehen ist. Demnach war der Boden in allen Fahrspuren in 20 cm Tiefe feuchter als in 35 cm. Weiterhin fällt der Trend zunehmender Feuchte mit steigender Fahrspurtiefe von FS-A über FS-B nach FS-C auf bzw. die geringer werdende Differenz zwischen Wassergehalt und maximaler Sättigung. Trotz vergleichsweise geringster Bodenfeuchte zeigen die Fahrspuren FS-A (0-10 cm) die höchste Bodensenkung.

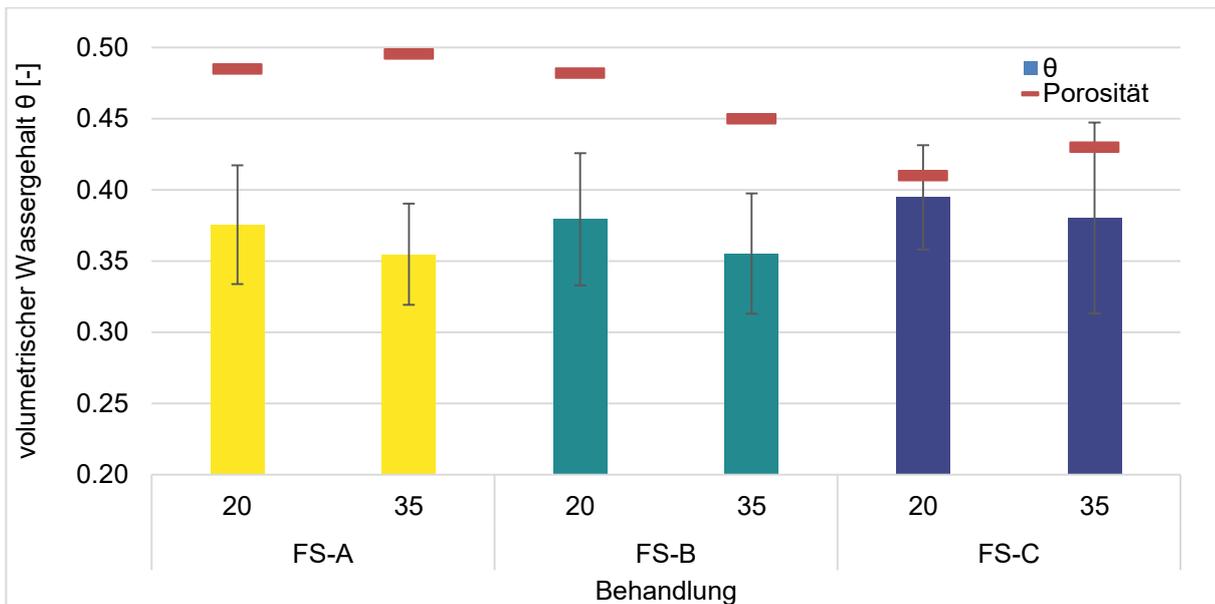
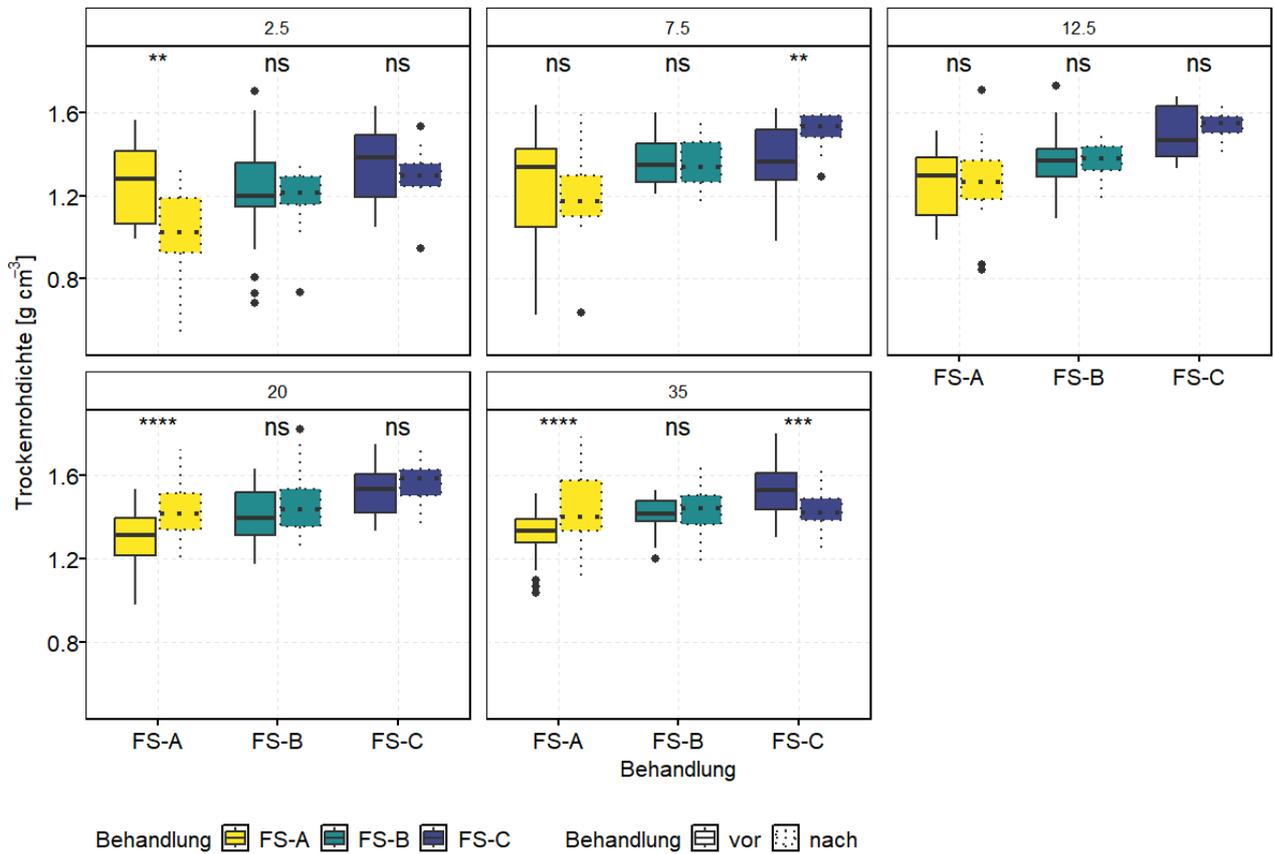


Abbildung 74: Mittlerer volumetrischer Wassergehalt der befahrenen Fahrspuren in 20 cm und 35 cm Tiefe mit Angabe der mittleren Porosität (maximal möglicher Wassergehalt).

Als direkte Folge der durch die Befahrung verursachten bodenphysikalischen Änderungen im Boden lässt sich die Trockenrohdichte zu den Zeitpunkten vor und nach Befahrung darstellen (Abbildung 75). In den Tiefen bis 12,5 cm lassen sich nur wenige signifikante Unterschiede ausmachen, wie die Erhöhung der Trockenrohdichte in 7,5 cm Tiefe von FS-C. In Tiefenstufe 2,5 (0-5 cm) findet in FS-A sogar eine signifikante Verringerung der Trockenrohdichte nach Befahrung.

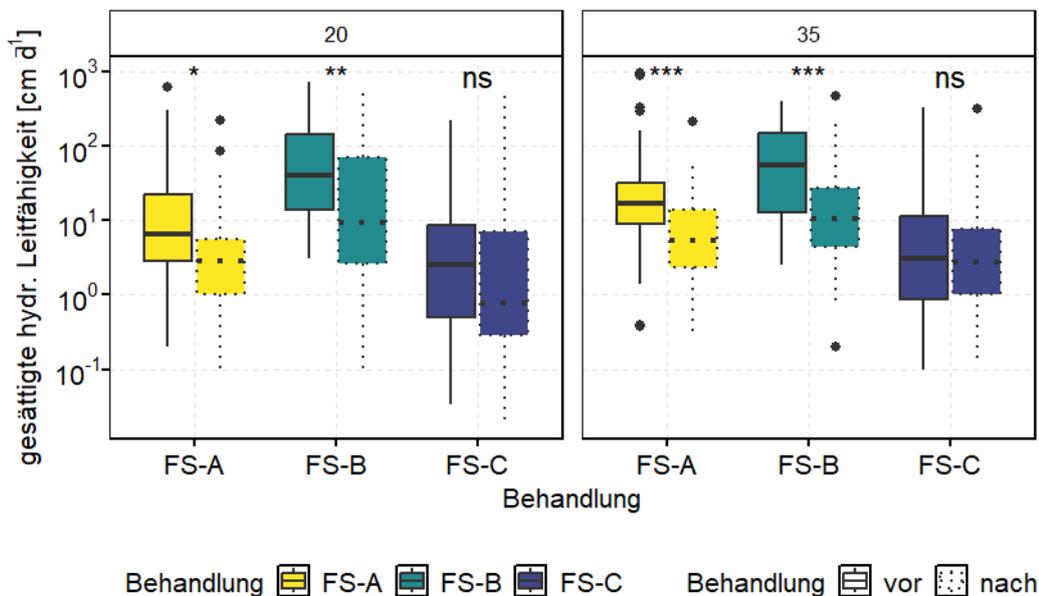
In den darunterliegenden Tiefen lassen sich dagegen signifikante Steigerungen der Trockenrohdichte in FS-A beobachten. In FS-B ist dies nicht der Fall, in FS-C ist eine Abnahme des Messwertes gegeben. Ergänzend ist, analog zu den Ergebnissen der Trockenrohdichte aus II.2.2, der allgemeine Trend zunehmender Werte mit steigender Fahrspur- und Bodentiefe ersichtlich.



**Abbildung 75: Trockenrohdichte in den Tiefenstufen 2,5 cm bis 35 cm jeder Fahrspurbehandlung zum Zeitpunkt vor und nach der Befahrung unter Versuchsbedingungen. Ergänzend sind die Ergebnisse des t-Tests je Tiefenstufen angegeben.**

Vergleichbar mit der Trockenrohdichte kann die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit als weitere bodenphysikalische Eigenschaft vor und nach der Befahrung quantifiziert werden (Abbildung 76). Aufgrund des Versuchsdesigns sind lediglich Ergebnisse der Tiefenstufen 20 cm und 35 cm dargestellt.

In allen Tiefenstufen und Varianten ist eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit festzustellen, die in den flachen bis mittleren Fahrspuren *FS-A* und *FS-B* signifikant ist. In *FS-C* findet keine signifikante Veränderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit statt. Bemerkenswert ist die starke Abnahme in *FS-A*, die nach der Befahrung nahezu identische Werte von *FS-C* vor Befahrung erreicht.



**Abbildung 76: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit vor und nach der Befahrung der Versuchsflächen im Zuge der Setzungsmessung. Angegeben sind die Ergebnisse aus den Tiefenstufen 20 cm und 35 cm mit den Ergebnissen des t-Tests.**

### 2.14.3 Schlussfolgerungen

In Summe können die aufgestellten Hypothesen bestätigt werden, wonach der schwerere Forwarder einen größeren Einfluss auf die Setzung des Bodens hat als der leichtere Harvester, bei dem eine geringere weitere Bodensetzung nach einmaliger Befahrung hervorrufen wurde. Es lässt sich daher ableiten, dass eine Beziehung zwischen dem Gewicht der eingesetzten Maschine und dem Grad der Verformung und Setzung des Bodens besteht.

Das Konzept der zwiebelförmigen tiefenabhängigen Druckausbreitung im Boden während der Befahrung kann zudem im Wesentlichen bestätigt werden: Mit zunehmender Installationstiefe der Messsensorik, nimmt die Wirkung der Kraftübertragung ab, sodass in höheren Bodentiefen eine geringere Bodensetzung gemessen wird als in oberen Bereichen des Bodens.

Die Untersuchungen der Bodensetzung stellen auch einen Einfluss der bestehenden Fahrspurtiefe auf die weitere Zunahme der Spurtiefe heraus. In den bereits sehr tiefen Fahrspuren des Typs *FS-C* (20-30 cm) ist lediglich eine geringere weitere Bodensetzung bei erneuter Überfahrt mit beiden Fahrzeugen zu beobachten, da der Boden in seiner Struktur bereits massiv beeinträchtigt ist und eine weitere Verdichtung nur noch in geringem Umfang stattfinden kann. Insbesondere die Fahrspuren *FS-A* mit geringer Spurtiefe als Ausgangslage (0-10 cm) als auch solche mit mäßig ausgeprägter Fahrspurtiefe *FS-B* (10-20 cm) haben dagegen ein grundlegend höheres Potential für weitere Fahrspurtiefenzunahme. Hieraus lässt sich eine besondere Sensibilität solcher Fahrspuren gegenüber weiterer Spurtiefenzunahmen bei erneuten Befahrungereignissen folgern (siehe auch II.2.15). Dies gilt in höchstem Maße für die Befahrung unter Bedingungen mit hoher Bodenfeuchte. Der langfristige Erhalt von Fahrspurtiefen  $\leq 10$  cm (*FS-A*) bzw. die kontinuierliche Vermeidung von Fahrspurtiefen jenseits der 10 cm-Schwelle (*FS-B* und *FS-C*) ist somit eine herausfordernde Daueraufgabe, die eine beständige Beachtung der Witterung als auch den Einsatz standortsangepasster, möglichst leichter Forsttechnik sowie durchdachte Arbeitsverfahren erfordern, um die Spurtiefe in einem vertretbaren Bereich zu halten. Die Fahrzeugmasse ist also ein wesentlicher Aspekt beim Maschineneinsatz, der unter Aspekten des physikalischen Bodenschutzes Beachtung finden muss. Eine Befahrung unter widrigen Bedingungen ist somit strikt zu vermeiden und insbesondere flache Fahrspuren (*FS-A*) sind im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes zu schützen.

Hinsichtlich der Änderung bodenphysikalischer Eigenschaften durch die erneute Befahrung existierender Fahrspuren unterschiedlicher Tiefe, lässt sich bezüglich der Resilienz gegenüber weiterer, negativer Veränderung feststellen, dass lediglich Fahrspuren des Typs *FS-C* keine erhebliche weitere Veränderung zeigen. Dies ist gleichermaßen Ausdruck einer bereits stark ausgeprägten Schädigung.

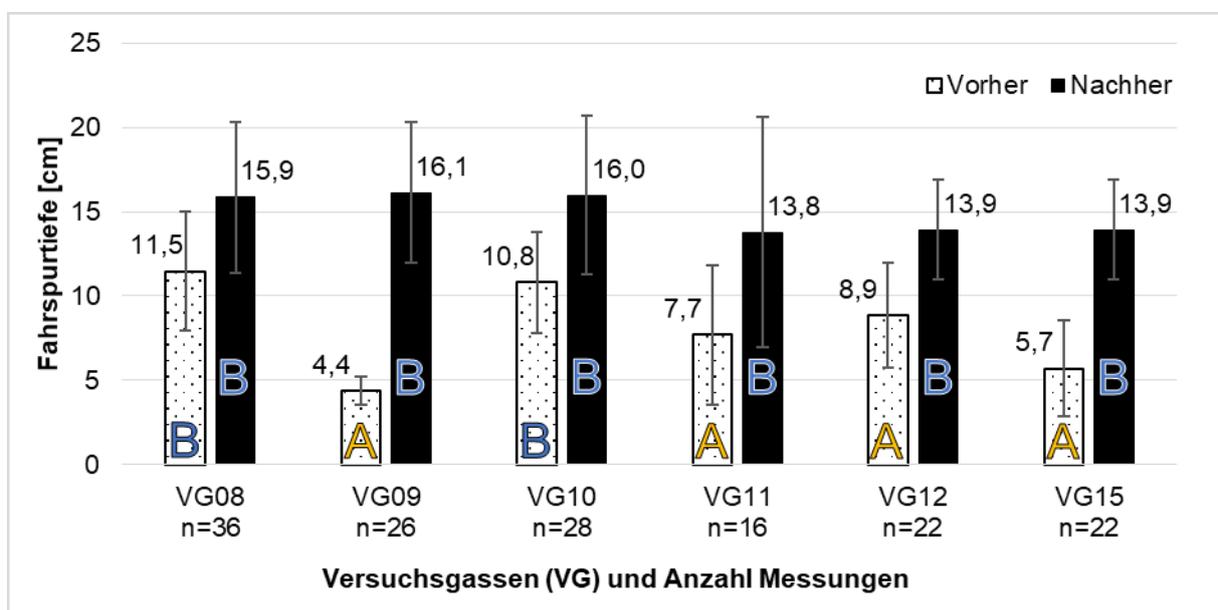
## 2.15 Entwicklung von Fahrspurtiefe und Humusaufgabe durch erneute Befahrung (TV1)

### 2.15.1 Material & Methoden

Die Versuchsgassen der Situationen S1-S6 wurden von beiden Vorhabenbeteiligten genutzt und im Rahmen der Setzungsmessung im November/Dezember 2017 erneut mit Forstmaschinen (Harvester + beladener Forwarder; Eigenschaften siehe II.2.14) befahren. Vor und während der Versuchsdurchführung waren durch Schneeregen Bedingungen gegeben, die zu tiefgreifend hohen Bodenfeuchten führten und die Anfälligkeit des Standorts gegenüber Spurbildung und plastischer Bodensetzung erhöhten (Abbildung 78). Es wurden gezielt feuchte bis nasse Witterungsbedingungen abgewartet, um den Einfluss der Befahrung auf die Entwicklung der Spurtiefe unter möglichst ungünstigen Bedingungen zu untersuchen. Vor und nach Durchführung der Befahrung fand eine Bestimmung der laufmeterweisen Spurtiefen sowohl auf der linken als auch der rechten Fahrspurseite statt. Ebenfalls vor und nach der Befahrung wurden gestörte Bodenproben gewonnen, bei denen auch die Mächtigkeit der Auflagehorizonte gemessen wurde.

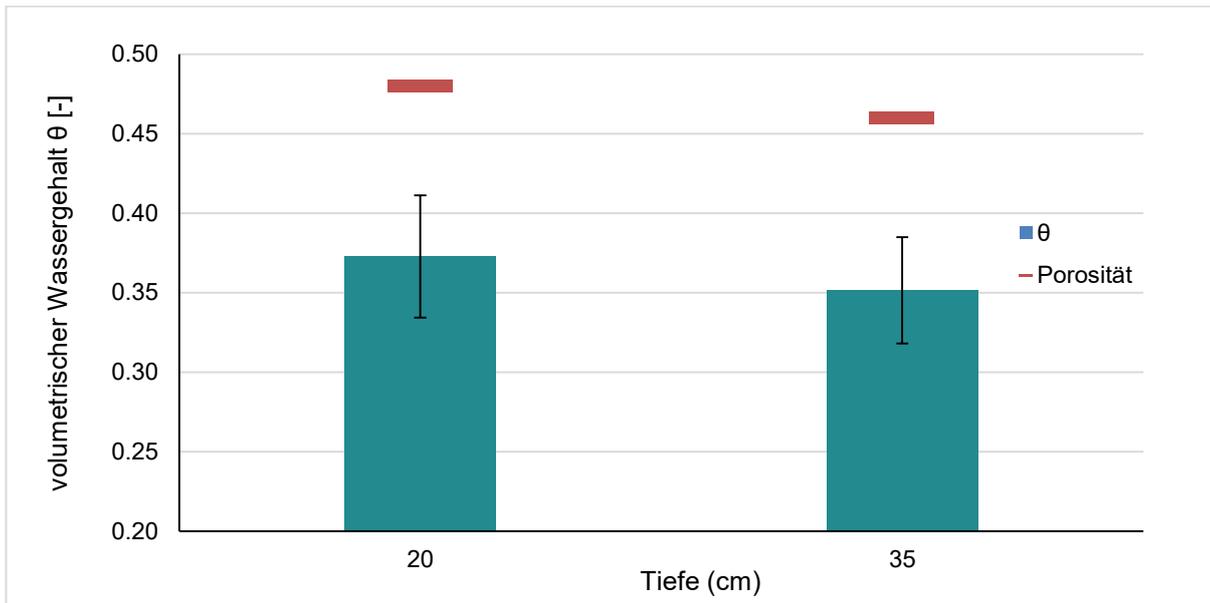
### 2.15.2 Ergebnisse

Während des Versuchs zur Setzung des Mineralbodens durch einmalige Überrollung mittels beider Forstmaschinen war bereits visuell eine ausgeprägte Spurbildung zu beobachten, die sich auch durch nachfolgende Messungen bestätigen ließ (Abbildung 77).



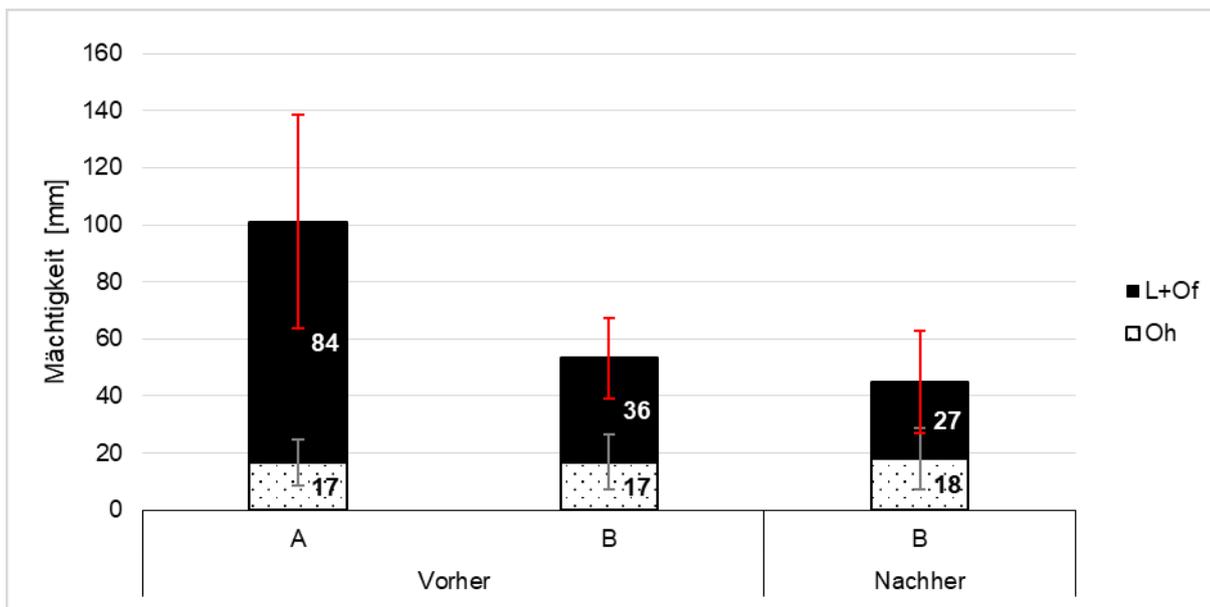
**Abbildung 77: Entwicklung der Fahrspurtiefe in den Fahrspuren der Situationen S1-S6 durch einmalige Überfahrt mit einem Harvester (25 Mg) und einem beladenen Forwarder (35 Mg) bei sehr ungünstigen Witterungsverhältnissen (hohe Bodenfeuchte). Mittelwerte aus linker + rechter Fahrspurseite (Anzahl Fahrspurlaufmeter = Anzahl Messwerte).**

Vier der sechs Versuchsgassen hatten vor dem Befahrungereignis eine Spurtiefe < 10 cm (VG09, VG11, VG12, VG15) und entsprachen der Behandlungsvariante *FS-A* (0-10 cm), bei zweien lag die Spurtiefe dagegen bereits knapp oberhalb der 10 cm-Marke (VG08, VG10; entsprechend *FS-B* (10-20 cm)). Durch die Befahrung fand teils eine drastische Steigerung der Spurtiefe (z.B. VG09) und Nivellierung der vorherigen Spurtiefen aller Versuchsgassen auf ein relativ einheitliches Tiefenniveau zwischen etwa knapp 14 bis 16 cm Spurtiefe statt, sodass alle sechs Versuchsgassen nach Abschluss des Versuchs der Behandlungsvariante *FS-B* entsprachen.



**Abbildung 78:** Mittlerer volumetrischer Wassergehalt in den Fahrspuren *FS-B* in 20 cm und 35 cm Tiefe mit Angabe der mittleren Porosität bzw. der maximal möglichen Wassersättigung (roter Balken).

Der Spurbildungsprozess war besonders geprägt durch Umlagerungen von humoser Bodensubstanz vorwiegend aus der Humusauflage (Abbildung 79).



**Abbildung 79:** Entwicklung der Horizontmächtigkeiten der Humusauflage in den Fahrspuren der Situationen S1-S6 durch einmalige Überfahrt mit einem Harvester (25 Mg) und einem beladenen Forwarder (35 Mg) bei sehr ungünstigen Bedingungen. Anzahl Messwerte: A-Vorher = 19, B-Vorher = 13, B-Nachher = 24.

Jene Fahrspuren, die vor dem Befahrungsversuch dem Typ *FS-A* entsprachen (siehe oben), reagierten am stärksten auf die einmalige Überfahrt während der äußerst ungünstigen Witterungsbedingungen mit Verlusten von im Mittel mehr als der Hälfte des L+Of-Horizontes (hohe Mächtigkeit der L+Of-Lage in Gruppe A-Vorher vermutlich durch Reisigmatte bedingt), während in den Versuchsgassen, die bereits vorher *FS-B* zugeordnet wurden (VG08, VG10), keine nennenswerten Veränderungen im Vergleich zu den Messungen „nachher“ (Nachher-B) festgestellt werden konnten. Vom Spurbildungsgeschehen unbeeinflusst blieb der Oh-Horizont.

### 2.15.3 Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Spurtiefenentwicklung bestätigt der Setzungsmessungsversuch den erwarteten Einfluss der Witterungsbedingungen auf das Spurbildungsgeschehen. Unter ungünstiger Witterung, d.h. feuchten bis nassen Bedingungen, kann es sehr leicht zu einer erheblichen Vergrößerung der bestehenden Spurtiefe kommen. In vorstehendem Beispiel reichte bereits eine einzelne Überfahrt mittels eines Harvesters und eines beladenen Forwarders bei wassergesättigtem Boden aus, um die Fahrspuren ausgehend von variablen Tiefen

auf ein relativ einheitliches Niveau zwischen ~ 14 - 16 cm zu vergrößern, das gemäß der Klassifizierung der Fahrspurklasse *FS-B* entspricht. Die Berücksichtigung der Witterung ist demnach eine entscheidende Einflussgröße für bodenpflegliche Bewirtschaftung und zur Erreichung anzustrebender bzw. zur Vermeidung abzulehnender Fahrspurtiefen. Darüber hinaus zeigt das Ergebnis, dass die Spurtiefenzunahme bei Rückegassen mit geringen Fahrspurtiefen (*FS-A*) deutlich größer ist als jene bei Rückegassen mit bereits mäßig starken Spurtiefen (*FS-B*). Hieraus lässt sich – wie bei der Bodensetzungsmessung – eine besondere Sensibilität schwach ausgeformter Fahrspuren (*FS-A*) gegenüber weiterer Spurtiefenzunahme ableiten, die in eine gesteigerte Sorgfaltspflicht mündet, wenn Fahrspuren der Klasse *FS-A* dauerhaft erhalten bzw. nicht überschritten werden sollen. Die Versuchsergebnisse zeigen eine intensive Veränderung von Bodeneigenschaften in den Fahrspuren *FS-B* und besonders *FS-C* an, sodass diese bei erneuter Befahrung weniger sensitiv gegenüber weiterer Spurtiefenzunahme reagieren.

Während der Überrollung der Maschinen über den Boden findet ein Verdichtungsprozess statt, bei dem die Humusaufgabe zunächst komprimiert und dann je nach Intensität des Radschlupfes bzw. Scherbewegungen des Fahrwerkes zunehmend seitlich umgelagert wird. Die Maschinen „graben sich in den Boden ein“. Folgerichtige Konsequenz der Befahrung und des Spurbildungsprozesses ist somit eine zunehmende Abnahme der Mächtigkeiten der Humusaufgabe und – je nach Ausmaß der Spurbildung – Störung unterhalb der Humusaufgabe folgende Mineralbodenhorizonte. Veränderungen von Horizontmächtigkeiten sind vor allem bei schwach ausgeprägten Fahrspuren *FS-A* bedeutend, da diese häufig über einen mehr oder minder intakten Bodenaufbau verfügen. In Fahrspuren der Klassen *B* und *C* ist die Spurbildung und damit der Umlagerungsprozess von Auflagen- und Mineralbodenmaterial dagegen bereits weiter fortgeschritten, sodass dementsprechend geringere Veränderungen bei erneuter Befahrung und Zunahmen der Spurtiefen stattfinden. Wie in den vorgelagerten Kapiteln gezeigt, ist die Kombination aus Bodenverdichtung und Störung des Bodenaufbaus mit vielfältigen Wirkungen verbunden, die vermieden werden müssen, um einen bestmöglichen Schutz des Bodens und Erhalt von Bodenfunktionen zu gewährleisten (siehe auch II.2.17 und II.2.18).

## **2.16 Verteilung von Spurtiefen in einem exemplarischen Untersuchungsgebiet (TV1+TV2)**

### **2.16.1 Material & Methoden**

Im Zuge der Bearbeitung des Verbundvorhabens entstand ein Interesse, neben der Beurteilung der Spurtiefe als möglichem Schlüsselindikator bodenpfleglicher Befahrung zudem Kenntnis darüber zu erlangen, welche Spurtiefen bestehende Rückegassen aufweisen. Obgleich es grundsätzlich interessant wäre, diese Informationen auf großer Fläche zu kennen, konnten im Rahmen einer Bachelorarbeit Daten dazu auf einem kleinen Flächenausschnitt gewonnen werden. Zu diesem Zweck wurden per Zufallsauswahl mehrere mit Fichte bestockte Abteilungen (Wuchsklasse Baumholz) im Waldgebiet Solling ausgewählt, die in ihren Bodeneigenschaften vergleichbar zu den Versuchsflächen des vorliegenden Vorhabens waren (siehe oben, II.1). Auf den Abteilungen wurden sämtliche Rückegassen abgelaufen und dabei die Fahrspurtiefen gemessen. Der Verlauf der Rückegassen wurde mit Hilfe einer Software (Avenza) digital erfasst und später in GIS verarbeitet. Für die Beurteilung der Spurtiefen wurde das gleiche Gerät (mechanischer Tiefengeber; TI-Prototyp in Form eines „umgedrehten T“) verwendet, mit dem die laufmeterweise Erfassung der Spurtiefen auf den Versuchsflächen erfolgte. Die Eingänge der Rückegassen (etwa 15 m) wurden von der Beurteilung ausgespart. Der erhobene Spurtiefenwert diente der Einordnung in ein vorher festgelegtes Klassensystem: Unterschieden wurde nach den Spurtiefenklassen 0-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-30 cm und > 30 cm. Nach Messung der Spurtiefe wurde solange weitergelaufen, bis sich die Tiefe dergestalt veränderte, dass eine erneute Messung und Einordnung erforderlich war. Die zurückgelegte Distanz (Rückegassenabschnitt mit gleicher Spurtiefe) wurde dabei mit der Software erfasst. Als weitere Beurteilungsklasse wurde die Kategorie „Reisig“ festgelegt, die zur Anwendung kam, wenn eine Spurtiefenmessung aufgrund abgelegter Reisigmatte nicht möglich war.

### **2.16.2 Ergebnisse**

Um einen Eindruck über die Verteilung von Fahrspurtiefen zu erhalten, wurden per Zufallsauswahl sechs Abteilungen im Waldgebiet Solling herausgegriffen. Tabelle 14 gibt einen Überblick über die forstorganisatorische Zuordnung der Flächen und ihrer Größen.

Demnach wurden drei Abteilungen in Forstamt 268 sowie drei weitere in Forstamt 254 ausgewählt, die jeweils in verschiedenen Revieren lagen. Die gesamte untersuchte Fläche betrug rd. 137 ha.

**Tabelle 14: Übersicht über Abteilungen im Solling, in denen die bestehenden Fahrspurtiefen von Rückegassen untersucht wurden.**

Forstamt	Revier	Abteilung	Fläche [ha]
268	3	2031	23,18
268	2	2142	20,33
268	7	16	23,66
254	6	13	23,42
254	4	3413	18,75
254	7	114	28,14
<b>Summe</b>			<b>137,48</b>

Entsprechend der Verteilung der Spurtiefen in Tabelle 15 liegt der Großteil der untersuchten Fahrspurlaufmeter (lediglich die linke Spurseite wurde begutachtet) mit 19.645 m in der Spurtiefenklasse 0-10 cm. Dies entspricht einem Anteil von rd. 57 %. Weitere rund 14 % der Fahrspuren besitzt eine Spurtiefe zwischen > 10 bis ≤ 20 cm. Spurtiefen im Bereich > 20 cm bis ≤ 30 cm machen mit 777 m einen Anteil von 2,3 % aller festgestellten Laufmeter aus. Das Vorkommen von Fahrspuren, die > 30 cm sind, ist in den untersuchten Abteilungen auf lediglich 0,1 % beschränkt und macht somit den geringsten Anteil aus. Jedoch war es auf etwa 26 % der Fahrspurlaufmeter aufgrund von abgelegtem Schlagraum nicht möglich eine exakte Spurtiefe zu ermitteln. In den davon betroffenen Bereichen ist die tatsächliche Spurtiefe unbekannt.

**Tabelle 15: Fahrspurtiefenverteilung in den untersuchten Abteilungen des Sollings.**

Spurtiefenklasse	Länge [lfm]	Anteil [%]
0-10 cm	19645	57,1
10-15 cm	3880	11,3
15-20 cm	998	2,9
20-30 cm	777	2,3
> 30 cm	32	0,1
Reisigauflage	9080	26,4
<b>Summe</b>	<b>34412</b>	<b>100</b>

### 2.16.3 Schlussfolgerungen

Zieht man einen Vergleich der Ergebnisse der Spurtiefenverteilung mit den Anweisungen des aktuellen Merkblattes zum Bodenschutz in den Niedersächsischen Landesforsten (AG Bodenschutz 2015), das für die bindigen Böden der Gefährdungsstufen II-IV Spurtiefen von maximal 20 cm auf 90 % der Rückegassenlänge vorsieht, ist zu konstatieren, dass der zulässige Soll-Zustand auf den untersuchten Waldflächen vollständig erreicht wurde.

Aufgabe des vorliegenden Verbundvorhabens ist es, durch empirische Untersuchung von Fahrspurböden verschiedener Tiefen gegebenenfalls Empfehlungen für die Anpassung der bestehenden Schwellenwerte auszusprechen. Um den Bodenschutz auf Rückegassen noch weiter zu verbessern, ist – gemäß der Untersuchungsergebnisse – eine Überarbeitung des bestehenden Merkblattes mit einer Reduktion des Richtwertes angeraten.

Aus den Ergebnissen lässt sich die deutliche Tendenz entnehmen, dass auf dem überwiegenden Anteil der Rückegassen-Fahrspuren (exklusiv der Mündungsbereiche auf Forststraßen und Rückewege [15 m]) in der Vergangenheit so gewirtschaftet wurde, dass Fahrspuren mit vertretbaren Spurtiefen (0-10 cm) entstanden sind. Bereiche, auf denen aufgrund der Spurtiefe mit sehr starker Veränderung von Bodeneigenschaften und -funktionen zu rechnen ist (Spurtiefen > 20 cm; siehe Ergebnisse), sind flächenmäßig unbedeutend. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass auf einem nicht unerheblichen Anteil der Rückegassen (rd. 16,5 %) eine Überschreitung des erstrebenswerten Schwellenwertes von maximal 10 cm Spurtiefe (vgl. Kapitel Ableitung „ökologischer Leitplanken“ für die Fahrspurtiefe; II.2.18) stattgefunden hat und infolgedessen mit einer Beeinflussung von Bodeneigenschaften und -funktionen zu rechnen ist, die als zu vermeiden zu bewerten ist. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Dauerhaftigkeit der verursachten Bodenveränderungen hinzuweisen. Lässt man die Bereiche der Rückegassen außer Acht, auf denen wegen intensiver Reisigbedeckung keine verlässliche Beurteilung der darunterliegenden Spurtiefen stattfinden konnte, nimmt dies Einfluss auf die relativen Anteile der Spurtiefenklassen und die ableitbare Zustandsbeschreibung der untersuchten Rückegassen: Auf grob 2/3 der untersuchten Fahrspurlänge liegt die Spurtiefe mit ≤ 10 cm im hinnehmbaren Bereich, während auf etwa 1/3 Länge Verbesserungsbedarf besteht.

## 2.17 Bodenfunktionsbewertung (TV1+TV2)

Arbeitspaket 3.1.2 (siehe V.1.2) sah eine bodenfunktionale Bewertung der ermittelten Zustandsänderungen vor. Zur Realisierung der Aufgabe erschien es zweckmäßig, einen Bewertungsrahmen zu verwenden, bei dem eine große Bandbreite der ermittelten Messgrößen genutzt werden kann. Da im Zuge des Rechercheprozesses nach einem geeigneten, ggf. adaptierbaren Bewertungssystem festgestellt wurde, dass eine Verwendung der bestehenden Bewertungsrahmen mit Schwierigkeiten verbunden und diese nicht ohne Einschränkungen nutzbar sind, wurde ein eigener Bewertungsansatz entworfen. Dieser gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Arbeitsschritte und mündet in eine Bewertung, bei der die Wirkung der Versuchsbehandlungen in Bezug auf verschiedene Bodenfunktionen gegenübergestellt wird. Der methodische Ansatz und das erzielte Ergebnis werden im Folgenden näher beschrieben.

### 2.17.1 Material & Methoden

Messgrößen besitzen naturgemäß verschiedene Einheiten und sind unterschiedlich skaliert. Um eine gemeinsame Nutzbarkeit und Vergleichbarkeit zu erreichen, wird ein Maß benötigt, das diesen Umstand ausklammert. Als einfaches Mittel bietet sich die Transformation in relative Abweichungen (%) an. Hierfür wiederum ist ein geeignetes Bezugssystem erforderlich, das diesem Zweck dienen kann. Das Versuchsdesign des vorliegenden Projektes ist in zusammengehörigen Pärchen organisiert, bei denen der eine Teil des Pärchens eine Fahrspur einer Rückegasse (FS) und der andere Teil eine unbefahrene Referenzparzelle (Ref) darstellt. Es gibt drei verschiedene Behandlungen = Fahrspurtiefenklassen (FS-A, -B, -C) mit je sechs Wiederholungen ( $n = 6$ ). Insgesamt existieren folglich 18 sog. „Versuchsgassenpaare“ ( $FS_{A,B,C} + Ref_{A,B,C}$ ).

#### Auswahl Messgrößen

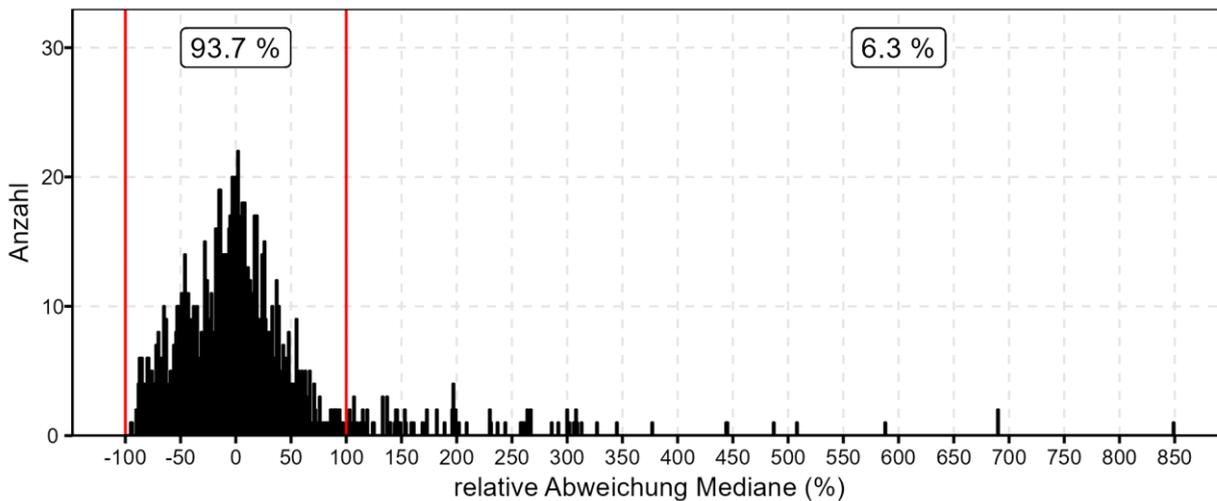
Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl an Messgrößen bestimmt. Um ein überschaubares Set an Parametern mit hoher Eignung und Aussagekraft zu erhalten, wurde eine Auswahl vorgenommen. Diese umfasste die Verringerung der Messgrößen um redundante Parameter, die entweder in mehreren Versuchen gemessen wurden oder Verrechnungsgrößen darstellten, beispielsweise die Nutzung von Gehalten zu Ungunsten von Vorräten. Parameter mit mangelnder Aussagekraft aufgrund unzureichender Datenlage, wie etwa die Anzahl gezählter Totwurzeln, oder solche, die für den vorliegenden Bewertungsansatz nicht sinnvoll nutzbar waren, wie die Bodenarten oder die Skelettgehalte, fanden keine Berücksichtigung. Bei den verbliebenen Messgrößen wurde strikt darauf geachtet, ausschließlich nicht-korrelierte Parameter zu verwenden. Hierfür wurden Korrelationsanalysen zwischen den Messgrößen innerhalb der Bodenchemie- und Bodenbiologiedaten sowie unter den Bodenphysikdaten durchgeführt. Jeder Humusauflagenhorizont bzw. jede Mineralbodentiefe wurde getrennt betrachtet. Ergaben sich Korrelationen zwischen Messgrößen von  $r > 0,5$ , die statistisch signifikant waren, wurde einer der miteinander korrelierten Parameter von der Verwendung ausgeschlossen. Bei nicht signifikanten Korrelationen wurde als Schwelle zur Verwendung ein Korrelationskoeffizient von  $r > 0,7$  genutzt. Zudem wurde darauf geachtet, dass letztendlich nur Messgrößen in das Bewertungssystem Eingang fanden, für die in keinem der Horizonte bzw. Tiefenstufen Korrelationen oberhalb der genannten Schwellenwerte detektiert wurden.

#### Bestimmung absoluter und relativer Abweichungen

Im ersten Schritt des Bewertungsverfahrens wurden für alle erhobenen Messgrößen die absoluten Abweichungen der Spurbearbeitungen zu den zugehörigen Referenzparzellen ermittelt und diese anschließend in relative Abweichungen umgerechnet. Als Grundlage wurde der Median verwendet und die Daten nach Versuchen, Horizonten/Tiefenstufen und ggf. Zeitraum gruppiert. „Zeitraum“ ist eine Gruppierungsvariable, die beispielsweise bei den Gasflüssen Verwendung fand, um bei den Daten nach „Vegetationsperiode“ und „Nichtvegetationsperiode“ zu unterscheiden. Da für die Humusauflagenhorizonte der Behandlung FS-C keine Messwerte erhoben werden konnten, da die Humusaufgabe in Fahrspuren diesen Typs de facto befahrungsbedingt verloren gegangen ist, dieses wichtige Ergebnis im Bewertungsverfahren jedoch unbedingt berücksichtigt werden sollte, wurden für alle genutzten Messgrößen der Humusaufgabe von FS-C die Abweichungen gleich -100 % gesetzt.

Beispiel für die Bestimmung absoluter und relativer Abweichungen: Für die Messgröße Kohlenstoffgesamtgehalt ( $C_{ges}$ ) wurde innerhalb der Behandlung FS-A (Fahrspur 0-10 cm) im Median  $45,68 \text{ g kg}^{-1} C_{ges}$  in der Tiefenstufe 0-5 cm ermittelt. In der Behandlung Ref-A (Referenz von A) derselben Tiefenstufe liegt der Median bei  $45,79 \text{ g kg}^{-1} C_{ges}$ . Die absolute Differenz der Vergleichspärchen liegt bei  $-0,11 \text{ g kg}^{-1} C_{ges}$  in Tiefenstufe 0-5 cm. Dieser Wert wurde nun in eine relative Abweichung (%) umgerechnet. Im vorliegenden Beispiel liegt das Ergebnis bei rd.  $-0,24 \% C_{ges}$  in FS-A verglichen mit Ref-A.

Die ermittelten relativen Abweichungen stellen die Grundlage im nachfolgenden Bewertungsprozess dar. Etwaige Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Spurbearbeitungen werden auf der Prozentskala reflektiert und die verschiedenen Messgrößen vergleichbar gemacht. Je weiter ein Messwert vom Nullpunkt = dem behandlungsweisen Referenzzustand entfernt ist, desto größer ist die relative Abweichung und somit die Veränderung.

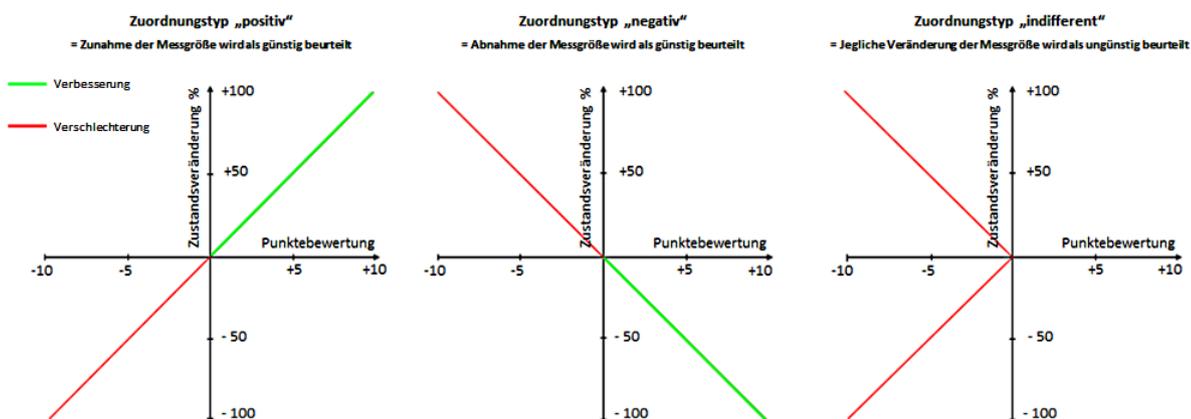


**Abbildung 80: Häufigkeitsverteilung der relativen Abweichungen der Fahrspur-Mediane von den zugehörigen, unbefahrenen Referenzparzellen (Ref-A, Ref-B, Ref-C).**

Die überwiegende Anzahl aller ermittelten Abweichungen (rd. 94 %) bewegte sich zwischen -100 % und + 100 % (Abbildung 80). Dies legte den Schluss nahe, ein Bewertungssystem zu schaffen, das sich im Wesentlichen auf diesen Wertebereich konzentriert. Da Bewertungsklassen innerhalb eines Klassensystems im Idealfall so gesetzt werden, dass Klassensprünge durch empirische Untersuchungen/statistische Verfahren begründbar sind, diese Herleitung im vorliegenden Fall aber nicht möglich war, wurde auf die Nutzung eines Klassensystems verzichtet und stattdessen die relativen Abweichungen gleitend in ein einfaches Punktesystem überführt. Dieses Punktesystem stellt eine Übersetzung der relativen Abweichungen durch Division mit 10 (Zehntel der relativen Abweichungen) dar. Um eine begrenzte Skala zu erhalten, wurde der Wertebereich des Punktesystems auf Maximal-/Minimalwerte von + 10 Punkten bzw. -10 Punkten begrenzt und errechnete Punktebewertungen ober- bzw. unterhalb dieser Marken auf die Werte +10 Punkte bzw. -10 Punkte gesetzt.

### Zuordnung der Messgrößen und Punktebewertung

Die Punktebewertung wurde genutzt, um mittels einer Skala darzustellen, ob eine „Verbesserung“ oder eine „Verschlechterung“ eingetreten ist und soll somit Rückschlüsse auf Veränderungen des Zustands und dessen Intensität ermöglichen. Um dies zu erreichen, musste für jede Messgröße separat geprüft und festgelegt werden, ob sich der Bodenzustand verbessert bzw. verschlechtert, wenn die Messgröße = relative Abweichung größer bzw. kleiner wird. Die Zuordnung fand auf Basis der erhobenen Messgrößen statt und stellte einen gutachterlichen Prozess dar.



**Abbildung 81: Bestimmung der Bewertungsrichtung je Parameter und Ableitung der Punktebewertung aus der relativen Abweichung.**

Aus Abbildung 81 geht hervor, dass im Rahmen des Bewertungsverfahrens drei „Zuordnungstypen“ (Bewertungsrichtungen) festgelegt wurden. Entscheidend für diese Zuordnung ist eine vorherige Festlegung des angestrebten Zielzustandes bzw. des Referenzsystems, da dies die Entscheidungsfindung maßgeblich beeinflusst. Der Zielzustand wurde als ein „standortstypisches Waldökosystem“ (d.h. ein Waldökosystem wie es sich unter gegebenen standörtlichen Bedingungen und Bewirtschaftungsweise im unbefahrenen, nicht oder

nur kaum von Bodenverdichtung betroffenen Forst entwickelt hat; Behandlung Ref) festgelegt. Alle Festlegungen sind daher vor dem Hintergrund dieser Perspektive zu verstehen.

Messgrößen, bei denen eine Zunahme der Messgröße als günstig beurteilt wurde, wurden dem Zuordnungstyp „positiv“ zugeordnet. Jene, bei denen eine Abnahme günstig erschien, dem Zuordnungstyp „negativ“. Zudem gab es Messgrößen, bei denen eine Richtungsentscheidung nicht möglich war, gleichwohl Abweichungen vom Ausgangszustand jedoch Veränderungen darstellen, die Störungen anzeigen und daher, unabhängig von einer Zu- oder Abnahme, als ungünstig beurteilt wurden. Diese entsprachen dem Zuordnungstyp „indifferent“.

Nach Zuweisung der Messgrößen zu den Zuordnungstypen fand die Bewertung der relativen Abweichungen statt. Hierfür wurde die ermittelte Zustandsveränderung = relative Abweichung je nach Ausprägungsrichtung (Zu- oder Abnahme) in positive bzw. negative Punkte übersetzt. Positive Bewertungspunkte reflektieren Verbesserungen des Bodenzustandes, Negativpunkte dagegen Verschlechterungen.

Beispiele:

Unter Berücksichtigung des o.g. Zielzustandes (standortstypisches Waldökosystem) wurde dem Zuordnungstyp „positiv“ beispielsweise die Basensättigung zugeordnet. Sofern die Basensättigung einer Behandlung relativ zur zugehörigen Referenzparzelle beispielsweise um +50 % zunahm, wurde dies als Verbesserung gewertet und in +5 Punkte übersetzt. Nahm sie dagegen um -50 % ab, führte dies zu einer Bewertung mit -5 Punkten (Verschlechterung des Zustands).

Dem Zuordnungstyp „negativ“ wurde u.a. die Trockenrohdichte zugewiesen. Hier führt eine Abnahme um -50 % zu +5 Punkten (Verbesserung), wohingegen eine Zunahme von +50 % in -5 Punkten resultierte (Verschlechterung).

Bei der Bodenwasserspannung war die Richtungsentscheidung „indifferent“. Unabhängig davon, ob die relative Abweichung +50 % oder -50 % beträgt, mündete die Bewertung in -5 Punkte (Veränderung des Zustands  $\hat{=}$  Verschlechterung).

Einen Überblick über die im Bewertungsverfahren genutzten Messgrößen und deren Zuteilung gemäß der „Zuordnungstypen“ gibt Abbildung 82. Es geht hervor, dass mit Ausnahme der Bodenwasserspannung für alle Parameter eine Bewertungsrichtung entsprechend Abbildung 81 bzw. eine Zuweisung zu den Zuordnungstypen „positiv“ und „negativ“ erfolgte.

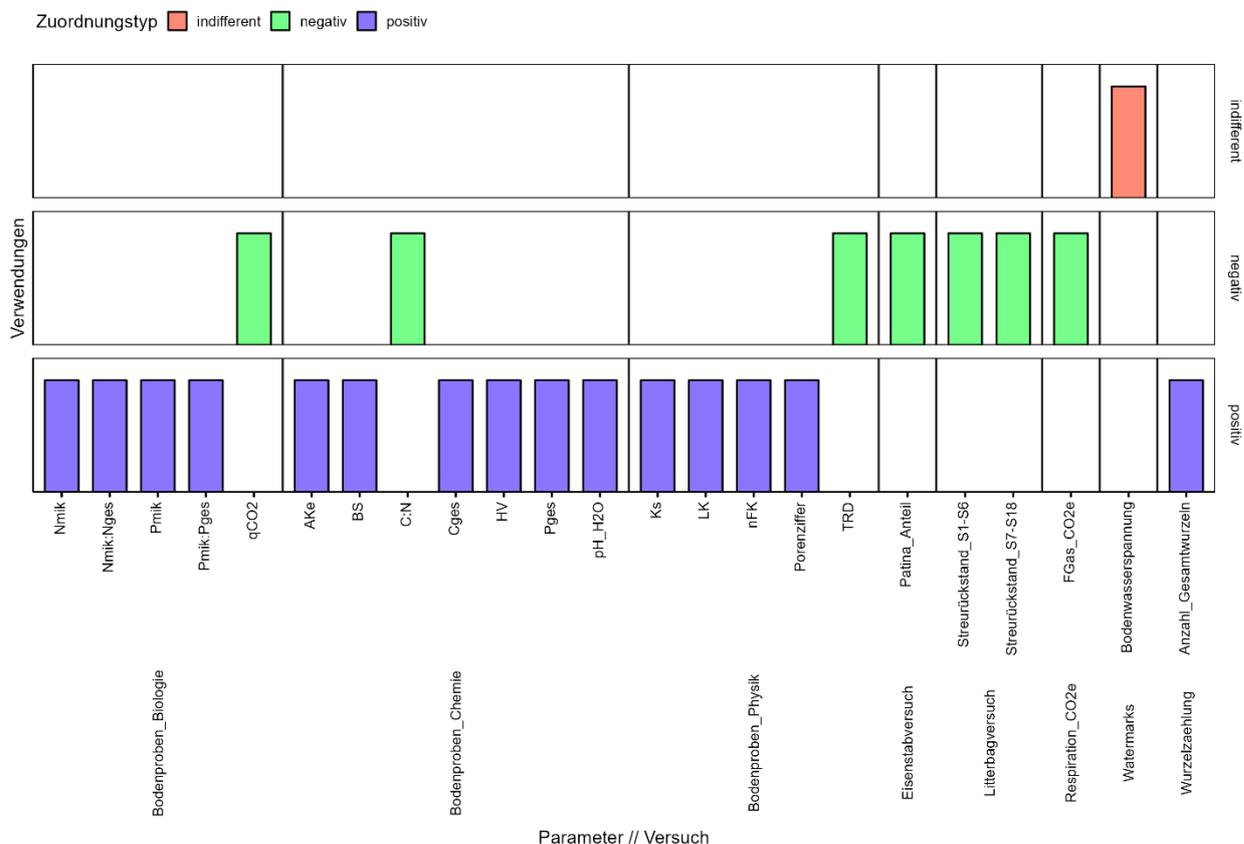


Abbildung 82: Übersicht über verwendete Parameter und deren Zuweisung zu den "Zuordnungstypen".

## Korrektur der Punktebewertung

Bisher wurde zur Bewertung der Unterschiede zwischen den Versuchsbehandlungen lediglich der Median als statistisches Maß herangezogen. Um Unterschiede in der Punktebewertung, die aus den relativen Abweichungen auf Grundlage der Mediane hervorgehen, nicht zu überschätzen und der Streuung der Daten Rechnung zu tragen, wurden zusätzlich die Konfidenzintervalle berücksichtigt. Hierfür wurden in der Statistiksoftware R (R Core Team 2021) mit Hilfe des Paketes „DescTools“ (Signorell et al. 2021) Konfidenzintervalle für den Median hergeleitet. Anschließend wurde der Grad der Überlappung zwischen Behandlungspärchen für jeden Parameter horizont-/tiefenstufenweise bestimmt. Mögliche Werte liegen dabei zwischen 0 und 1. Null bedeutet: Median der Fahrspurbehandlung größer oder kleiner der Referenzparzelle und es findet keine Überlappung der Konfidenzintervalle statt. 1 bedeutet: Median der Fahrspurbehandlung ist identisch mit der Referenzparzelle und es findet eine vollständige Überlappung der Konfidenzintervalle statt. Der Grad der Überlappung wurde als Korrekturfaktor genutzt, um das vorangegangene Ergebnis der Punktebewertung nötigenfalls anzupassen (Punkte korrigiert = Punkte \* (1-Korrekturfaktor)).

## Auswahl zu bewertender Bodenfunktionen und Zuordnung der Messgrößen

Der Boden stellt eine Vielzahl von Funktionen bereit. Lediglich ein Teil aller Funktionen ist innerhalb des Vorhabens von Interesse bzw. kann mithilfe der erhobenen Messgrößen bewertet werden. Der Fokus der Bewertung lag auf den sog. „natürlichen Bodenfunktionen“. Einen Überblick über bewertete Bodenfunktionen gibt Tabelle 16, die im Ursprung auf Lambrecht et al. (2003) zurückgeht.

**Tabelle 16: Überblick über bewertete Bodenfunktionen (verändert nach Lambrecht et al. (2003)).**

Funktionsgruppe	Bodenfunktionen nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 u. 2 BBodSchG	Bodenfunktionen (Kurzfassung)	Bodenteilfunktionen	Teilfunktionskürzel
Natürliche Bodenfunktionen	Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen	Lebensraumfunktion	Lebensraum für Pflanzen	1
			Lebensraum für Bodenorganismen	2
	Bestandteil des Naturhaushaltes, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen	Funktion als Bestandteil des Naturhaushaltes	Funktion des Bodens im Wasserhaushalt	3
			Funktion des Bodens im Nährstoffhaushalt	4
			Klimawirksamkeit des Bodens	5
	Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers	Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium (Puffer-, Filter- und Umwandlungsfunktion)	Puffervermögen des Bodens für saure Einträge	6

Bodenfunktionen lassen sich weiter in sog. Bodenteilfunktionen untergliedern (Tabelle 16). Im Rahmen des Bewertungsprozesses wurde der Bodenfunktion „Funktion als Bestandteil des Naturhaushaltes“ eine weitere, nicht originäre Teilfunktion mit der Bezeichnung „Klimawirksamkeit des Bodens“ hinzugefügt. Dies geschah vor dem Hintergrund, die erhobenen Daten zu den Gasflüssen adäquat mit berücksichtigen zu können.

Auf Basis von Tabelle 16 wurden sämtliche ausgewählte Messgrößen, die für die Bewertung genutzt werden sollten (siehe Abbildung 82), den Bodenteilfunktionen zugeordnet. Der Zuordnungsprozess geschah nach gutachterlicher Einschätzung. Mehrfachnutzungen waren dabei erlaubt. Das Ergebnis der Zuordnung ist in Abbildung 83 dargestellt.

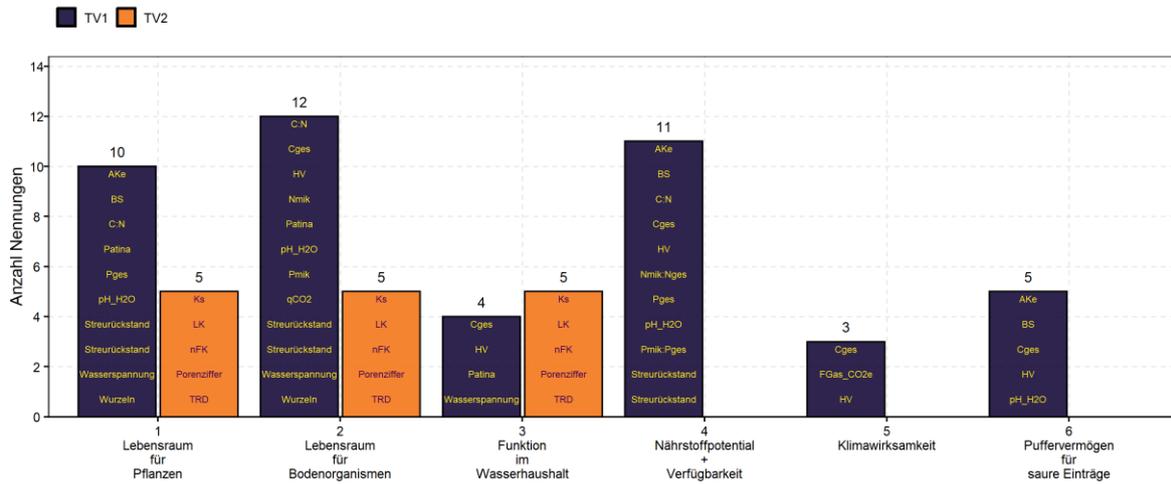


Abbildung 83: Übersicht über die Zuordnung von Messgrößen zu den bewerteten Bodenteilfunktionen.

### Aggregation der Punktebewertung

Der finale Schritt im Bewertungsverfahren war die Zusammenfassung der messgrößen- sowie horizont-/tiefenstufenweisen Punktebewertungen zu einem Ergebnis je Teilfunktion sowie zu einem Gesamtergebnis. Bezüglich des Ergebnisses auf Ebene der Teilfunktionen wurden zunächst Mittelwerte aus den korrigierten Punktebewertungen stratifiziert nach Teilfunktion, Behandlung und Parameter berechnet. Aus diesen behandlungsweise gemittelten Punktebewertungen je Teilfunktion und Parameter wurden dann Median- und Mittelwert berechnet und graphisch dargestellt. Ein Beispiel für die Aggregation der Punktebewertungen findet sich in Tabelle 17. Die statistischen Lagemaße *Mittelwert* (rote Zahlen) und *Median* (schwarze Zahlen) der Boxplots wurden abschließend als weitere Information in die Abbildungen eingefügt.

Tabelle 17: Beispiel für die Berechnung der mittleren Punktebewertungen zur Darstellung des Bewertungsergebnisses nach Teilfunktionen (hier: Ergebnis für FS-A in Teilfunktion „Puffervermögen für saure Einträge“).

Parameter und Horizont/Tiefenstufe	Korrigierte Punktebewertung	Parameter	Mittelwert Horizonte/Tiefenstufen
<b>Ake*</b>			
0-5	0	Ake	0,00
5-10	0	BS	2,37
10-15	0	Cges	0,00
<b>BS*</b>			
0-5	0,88	HV	1,48
5-10	2,14	pH_H2O	-0,13
10-15	4,08		
<b>Cges*</b>			
0-5	0		
5-10	0		
10-15	0		
<b>HV*</b>			
L+Of	2,95		
Oh	0		
<b>pH_H2O*</b>			
L+Of	-0,26		
Oh	0		
			<b>Mittelwert Boxplot</b> <span style="color: red;">0,74</span>
			<b>Median Boxplot</b> 0,00

- \*  
 Ake = Effektive Kationenaustauschkapazität  
 BS = Basensättigung  
 Cges = Kohlenstoff-Gesamtgehalt  
 HV = Humusvorrat  
 pH\_H2O = pH-Wert in H<sub>2</sub>O

Tabelle 17 ist zu entnehmen, dass zur Bewertung der Bodenteilfunktion „Puffervermögen für saure Einträge“ die Messgrößen Ake, BS, Cges, HV und pH\_H2O (Abkürzungserläuterungen siehe Tabelle 17) herangezogen

wurden. Je Messgröße wurde für den beprobten Horizont bzw. Tiefenstufe eine Punktebewertung in Abhängigkeit von der relativen Abweichung des Medians des Messergebnisses der Fahrspur von der zugehörigen Referenzparzelle mit nachfolgender Punktekorrektur errechnet (wie oben beschrieben; hier als Beispiel für *FS-A* im Vergleich zu *Ref-A*). Die mittleren Punktebewertungen je Horizont/Tiefenstufe und Parameter wurden anschließend in einen Mittelwert je Messgröße verrechnet (rechter Teil von Tabelle 17). Die Mediane- und Mittelwerte aller zur Beschreibung der betreffenden Teilfunktion herangezogenen Parameter (im Beispiel sind das AKe, BS, Cges, HV und pH\_H2O) wurden wiederum mittels Boxplots dargestellt (siehe Abbildung 84).

Für die Darstellung des Gesamtergebnisses (Abbildung 85) wurden die teilfunktionsweisen mittleren Punktebewertungen (Mittelwerte; in den Boxplots als rote Zahlen dargestellt) ein weiteres Mal mittels Boxplots gruppiert nach Behandlungen zusammengefasst (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Beispiel für die Berechnung der mittleren Punktebewertungen zur Darstellung des Ergebnisses der Gesamtbewertung (hier: Ergebnis für *FS-A*).**

Behandlung	Teilfunktion	Mittelwert
FS-A	1	-1,09
	2	-1,05
	3	-1,33
	4	0,27
	5	0,49
	6	0,74

Mittelwert Boxplot            -0,33  
Median Boxplot                -0,39

### 2.17.2 Ergebnisse

Abbildung 84 gliedert die auf den parameterweisen relativen Abweichungen der Mediane und deren Verrechnung in eine Punktebewertung erzielten Bewertungsergebnisse auf der übergeordneten Ebene nach Bodenfunktionen und differenziert diese nach Teilfunktionen. Aufgrund der Möglichkeit, durch die Bewertungsmethode sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen auszuweisen, teilen sich die y-Achsen der Teilfunktionsplots in einen Bereich mit positiven (Verbesserung) sowie negativen Ganzzahlen (Verschlechterung) auf. Die Nulllinie repräsentiert das Ergebnis der zugehörigen Referenzparzellen. Ist das Ergebnis einer Fahrspurbehandlung nicht verschieden zur gegenübergestellten Referenz, entspricht die Abweichung sowohl relativ als auch als Punktebewertung Null.

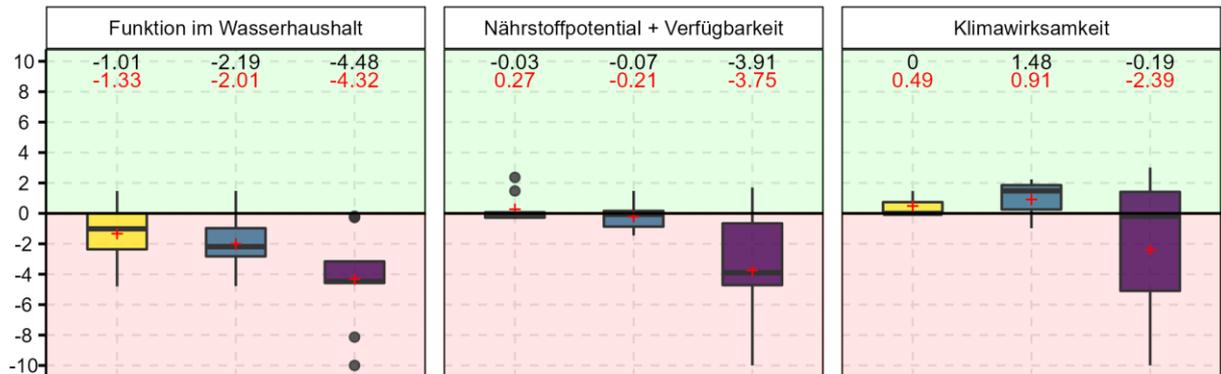
Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die bewerteten Teilfunktionen in Abhängigkeit der Fahrspurtiefe unterschiedlich stark beeinflusst werden. Die geringste Beeinflussung besteht in Bezug auf das Nährstoffpotential bzw. die Verfügbarkeit von Nährstoffen, wo es in Fahrspuren bis zu 10 cm Tiefe (*FS-A*) kaum zu Abweichungen zu den verglichenen unbefahrenen Referenzparzellen kommt. Im Mittel ist hier sogar eine schwache Verbesserung des Nährstoffpotentials gegeben (Mittelwert: +0,27 Punkte). Ähnlich verhält es sich in Fahrspuren zwischen 10-20 cm Tiefe (*FS-B*), in denen im Mittel bzw. Median lediglich eine leichte Verschlechterung stattfindet (Mittelwert: -0,21 Punkte). In Fahrspuren mit Tiefen zwischen 20-30 cm (*FS-C*) lässt sich aus dem Bewertungsergebnis indes eine eindeutige, mittlere Verschlechterung aus den zugrundeliegenden Messgrößen ableiten. Für das Bewertungsergebnis von *FS-C* spielt bei allen Teilfunktionsergebnissen, in denen der Humusvorrat Verwendung fand (vgl. II.2.9.2, Abbildung 43 „Humusvorrat“), der Verlust des Auflagehumus eine große Rolle, der, wie oben erläutert, mit einer Abweichung von -100 % und somit -10 Punkten bewertet wurde.

Des Weiteren gibt es Funktionen, in denen der erfasste Bodenzustand im Mittel zu einer rechnerischen Verbesserung führt, wie das Ergebnis der Teilfunktionen „Klimawirksamkeit“ der Fahrspurbehandlungen *FS-A* und *FS-B* und „Puffervermögen für saure Einträge“ in Fahrspurbehandlung *FS-A* (Mittelwert). Auch bei Behandlung *FS-C* reichen Teile der Boxen und Whisker in den positiven Wertebereich hinein und zeigen damit eine Verbesserung einzelner in diese Funktion eingehender Parameter an, obgleich das Gesamtergebnis des Mittelwertes bzw. Medians eine verschlechternde Wirkung bei diesen beiden Teilfunktionen ergibt. Im Falle der Bewertung des „Puffervermögens für saure Einträge“ von *FS-B* fällt das Ergebnis indifferent aus. In *FS-A* steigert die – im Vergleich zur Referenz – höhere Basensättigung des Mineralbodens das „Puffervermögen gegenüber sauren Einträgen“. Das Ergebnis der Teilfunktionen „Klimawirksamkeit“ ist in *FS-A* auf den festgestellten, höheren Humusvorrat des L+O<sub>r</sub>-Horizontes verglichen mit den Referenzen zurückzuführen, durch dessen Erhöhung es lokal (innerhalb der Fahrspuren) zu einer Akkumulation und einem Rückhalt kohlenstoffreicher organischer Substanz kommt, die in Bezug auf die klimatische Wirkung schematisch als positiv gewertet wurde. Bei *FS-C* und *FS-B* sind die teilweise als Verbesserung gewerteten

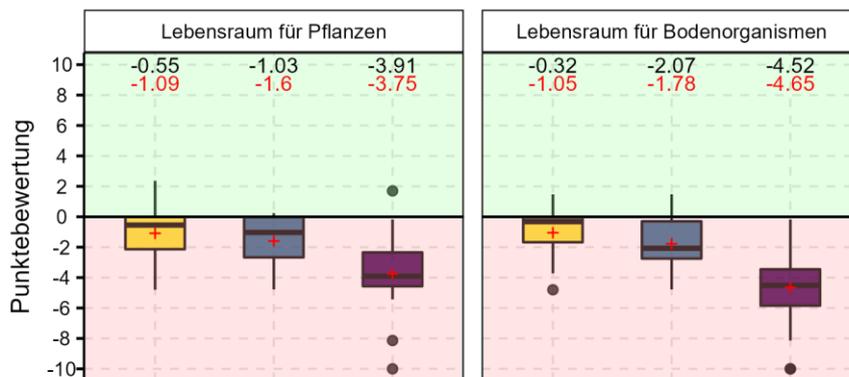
Bodeneigenschaften der Teilfunktion „Klimawirksamkeit“ stattdessen insbesondere auf die geringeren Respirationraten (CO<sub>2e</sub>) in diesen Fahrspuren zurückzuführen.

## Funktion als Bestandteil des Naturhaushalts

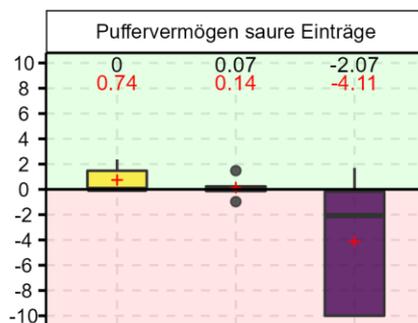
Behandlung  FS-A  FS-B  FS-C  Verbesserung  Verschlechterung



## Funktion als Lebensraum



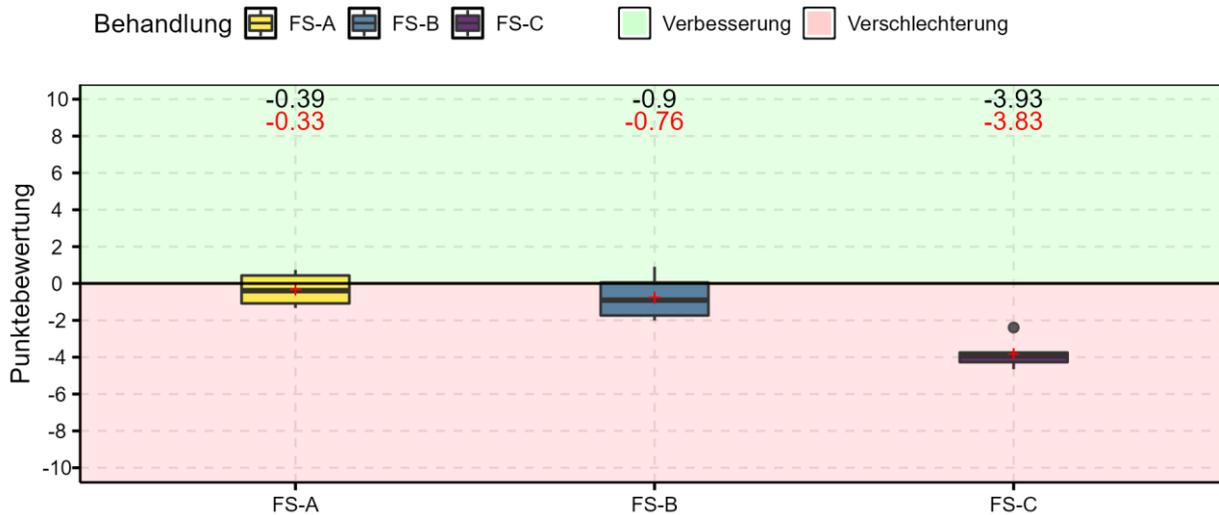
## Funktion als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium



**Abbildung 84: Bodenfunktionsbewertung gegliedert nach Teilfunktionen. Boxen repräsentieren die enthaltenen Parameter = Mittelwerte aus Punktebewertungen über Horizonte/Tiefenstufen und ggf. Zeiträume. Schwarze Zahlen oberhalb der Boxplots zeigen die Mediane der Boxplots, rote Zahlen die Mittelwerte.**

Am stärksten werden in Fahrspuren von Rückegassen die Funktion im Wasserhaushalt sowie die Funktion als Lebensraum für Bodenorganismen und Pflanzen verändert. Zudem besteht ein Trend zur Zunahme der Verschlechterung in der Reihenfolge  $FS-A < FS-B < FS-C$ . Die Verschlechterungen der Funktionsfähigkeit im Wasserhaushalt der Fahrspurböden sind auf die unmittelbare Wirkung der Verdichtung (erhöhte Trockenrohdichten) auf das Porensystem des Bodens zurückzuführen (Abnahmen des Porenvolumens und der Luftkapazität), die Veränderungen weiterer bodenphysikalischer Eigenschaften wie der Fähigkeit, Wasser zu speichern (nutzbare Feldkapazität) und zu leiten (ungesättigte Wasserleitfähigkeit) hervorrufen. Reflektiert werden die bodenphysikalischen Auswirkungen der Bodenverdichtungen ebenso durch Veränderungen der Jahrgänge der Bodenwasserspannung und der Luft- bzw. Sauerstoffversorgung der Böden, wie dies anhand der (dauerhaft) erhöhten Patina-Anteile der Eisenstäbe deutlich wird. Die Effekte der Befahrung, die auf der abiotischen Ebene der Bodenphysik messbar sind, prägen den Boden als Lebensraum, in dem eine Reaktion der Bodenorganismen und Pflanzen erfolgt, die als eine Verschlechterung im Vergleich zu den ursprünglichen Bedingungen zu werten ist. So zeigen die Organismen, die innerhalb der Fahrspurböden leben, Abweichungen von den unbefahrenen Parzellen bei der Bodenatmung, dem Streuabbau und den mikrobiell gebundenen Gehalten von Stickstoff und Phosphor. Pflanzen reagieren mit einer verringerten Durchwurzelung

der Böden. Darüber hinaus bestehen Wechselwirkungen zwischen den Effekten der Befahrung (Vermischung von Bodensubstanz) und den physikalischen und biologischen Folgewirkungen, die auch chemische Bodeneigenschaften verändern (Kationenaustauschkapazität, Basensättigung, C/N-Verhältnis, pH-Wert) und wiederum die Lebensbedingungen der Bodenorganismen und Pflanzen beeinflussen.



**Abbildung 85: Bodenfunktionale Gesamtbewertung. Boxen enthalten die Mittelwerte der Punktebewertungen der Teilfunktionen. Schwarze Zahlen oberhalb der Boxplots zeigen die Mediane der Boxplots, rote Zahlen die Mittelwerte.**

### 2.17.3 Schlussfolgerungen

Obwohl es in allen Fahrspuren in der Gesamtschau der betrachteten und bewerteten Bodenfunktionen zu einer generellen Abnahme der Funktionsfähigkeiten kommt, nimmt die Fahrspurtiefe einen Einfluss auf das Ausmaß der Funktionsveränderung (Abbildung 85). Ab Fahrspurtiefen > 20 cm (FS-C) kommt es mit Ausnahme weniger Messgrößen zu einem eindeutigen und beträchtlichen Rückgang der Funktionsfähigkeit des Waldbodens, die eine klare Verschlechterung darstellt. In den Fahrspuren der Variante FS-A (0-10 cm) ist der Boden zwar ebenfalls verdichtet und Bodeneigenschaften des Luft- und Wasserhaushaltes sind verändert, der Bodenaufbau bleibt aber erhalten und die Veränderungen der Bodeneigenschaften sind weniger intensiv als in den Varianten oberhalb von 10 cm Spurtiefe, sodass die Gesamtbewertung von FS-A im Wesentlichen einen Erhalt von Bodenfunktionen anzeigt. Zu einer Verschlechterung der Funktionsfähigkeit kommt es ebenfalls in Fahrspuren zwischen 10-20 cm Tiefe (FS-B). Die Fahrspuren dieses Typs zeigen jedoch deutlich höhere Übereinstimmung mit der Variante FS-A als mit FS-C und sind daher als eine Art Übergangsform zwischen den Rückegassen mit kleineren bzw. größeren Fahrspurtiefen zu betrachten. Die Eigenschaft von Fahrspuren der Variante FS-B, eine Art Übergangsform zwischen den Fahrspuren mit schwach (FS-A) bzw. stark ausgeprägter Spurtiefe (FS-C) darzustellen, begründet sich im Wesentlichen in der fehlenden Eindeutigkeit hinsichtlich des Erhalts bzw. Verlusts der Humusaufgabe und des Bodenaufbaus bei diesen Fahrspuren. Je nach standörtlichen Ausgangsbedingungen (Mächtigkeiten von Humusaufgabe und Oberboden) und Wirkungsgeschehen der Befahrung (Intensität der Verdichtung und lateraler Verdrängung organisch geprägter Bodenbestandteile) wurde der lokale Aufbau des Bodens innerhalb dieser Fahrspuren unterschiedlich intensiv verändert, sodass sich Fahrspuren zwischen 10-20 cm Spurtiefe (FS-B) entweder eher den Eigenschaften der Variante FS-A oder FS-C annähern, was durch die Mittelstellung der Messergebnisse und die abgeleitete Wirkung auf die Bodenfunktionen reflektiert wird.

Das vorstehend erläuterte Bewertungsverfahren und seine Ergebnisse beruhen auf in den empirischen Versuchen gewonnenen Messergebnissen der Fahrspurbehandlungen, die als relative Abweichungen vom unbefahrenen Referenzzustand zu diesem in Bezug gesetzt wurden. Bei der Bewertungsmethode handelt es sich somit im Grunde um eine Übersetzung der Analyseergebnisse. Parameterweise wurde gutachterlich festgelegt, welche Entwicklung eine Messgröße nehmen muss, um diese als eine Verbesserung bzw. Verschlechterung zu beurteilen. Diese gutachterliche Einschätzung ist abhängig vom zugrunde gelegten Ziel- bzw. Referenzzustand. Verändert man diesen, verändert sich auch das Bewertungsergebnis (Beispiel: wie ist eine Erhöhung der Basensättigung vor dem Hintergrund eines oligotrophen Standorts als Ziel-/Referenzzustand zu bewerten?). Somit ist das Bewertungsergebnis nicht ohne Anpassung auf Standorte mit einem abweichenden Referenzzustand übertragbar. Es muss ferner beachtet werden, dass die Bewertungsergebnisse ausschließlich für Fahrspuren gelten. Rückegassen besitzen mit Randstreifen, Mittelstreifen und ggf. Randwülsten neben den Fahrspuren noch weitere Kompartimente, die für eine Gesamtbewertung von Rückegassen mit einbezogen werden müssten. Den Untersuchungen entsprechend, berücksichtigt die Methode auch ausschließlich im Rahmen des Verbundvorhabens erhobene Parameter, die, wie die Festlegung der Bewertungsrichtung, gutachterlich den Teilfunktionen zugeordnet wurden. Die Liste

der verwendeten Messgrößen erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder abgesicherte Eignung zur Durchführung einer Bodenfunktionsbewertung, sodass es durchaus sinnvoll sein kann, andere bzw. weitere Parameter zur Bewertung von Bodenfunktionen heranzuziehen. Bestimmte Effekte, wie die günstige Bewertung der Klimawirksamkeit von Fahrspuren der Kategorie **FS-A**, die insbesondere auf erhöhte Humusvorräte infolge von Reismatten zurückzuführen sind (lokale Kohlenstoffsequestrierung), sind einerseits vermutlich keine verallgemeinerbare Eigenschaft schwach ausgeprägter Fahrspuren (0-10 cm) und zudem nur ein temporär begrenztes Phänomen. Weiterhin bezieht sich die Bewertung direkt auf die Fahrspur. Ob es allerdings Auswirkungen auf die umgebende Landschaft über den unmittelbar verdichteten Bereich hinaus gibt, wurde bisher nicht untersucht. Somit wäre eine „landschaftsökologische Bewertung“, die Rückkopplungsprozesse wie z.B. den Einfluss der Störung des Bodenlebens (Verringerung mikrobieller Biomasse; oder: wie werden Mykorrhizen beeinflusst?) auf Stoffkreisläufe oder die Auswirkungen der Bodenverdichtung auf den Wasserhaushalt im Gesamtwaldökosystem und die damit verbundene Wirkung auf das Wachstum und die Stabilität von Bäumen und Beständen und auf andere Umweltprozesse berücksichtigt, eine sinnvolle Erweiterung der hier vorgestellten Bewertung der Fahrspur. Da ein Verständnis auf dieser Ebene jedoch bisher fehlt bzw. im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht wurde, bleiben derartige Überlegungen im Bewertungsschema unberücksichtigt.

## 2.18 Ableitung „ökologischer Leitplanken“ für die Fahrspurtiefe (TV1+TV2)

Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen ist der Befund, dass die **Spurtiefe** in Zusammenhang mit der Intensität der Zustandsveränderung von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen steht und daher eine **probate Orientierungsgröße zur Bemessung tolerierbarer bzw. zu vermeidender Bodennutzung** darstellt. Als eine Funktion einer Vielzahl von Einflussfaktoren bildet sie die direkte, punktuelle Wirkung ab und gibt die tendenziell sukzessiv verlaufende Veränderung von Bodeneigenschaften wieder.

In Bezug auf die Ableitung ökologischer Leitplanken für die Fahrspurtiefe auf lössgeprägten Böden wird nachfolgende Empfehlung gegeben, die keine Allgemeingültigkeit besitzt und unter Umständen für sandige und tonige Substrate anders ausfallen würde. Wie einleitend (siehe II Ausführliche Darstellung der Ergebnisse) beschrieben, ist durch die inhärente Funktion einer Rückegasse grundsätzlich mit Abweichungen der unbefahrenen Areale zu den Fahrspurböden zu rechnen. Des Weiteren sind Eigenschaften von Fahrspuren nicht auf die gesamte Rückegassenbreite von (üblicherweise) 4 m zutreffend, sondern lokal begrenzt.

- ❖ Gering ausgeprägte Fahrspuren (**Spurtiefe  $\leq 10$  cm; FS-A**) ähneln in einigen Bodeneigenschaften und -funktionen den unbefahrenen Referenzflächen und sind daher **tolerierbar**.
- ❖ Tiefe Fahrspuren (**Spurtiefe  $> 20$  cm; FS-C**) zeigen zahlreiche Merkmale intensiver Störung und Verringerung der Funktionsfähigkeit und sind daher **strikt zu vermeiden**.
- ❖ Mäßige Fahrspuren (**Spurtiefe  $> 10$  cm  $\leq 20$  cm; FS-B**) nehmen eine Mittelstellung ein und vereinen sowohl Merkmale gering als auch tief ausgeprägter Fahrspuren in sich und sind **möglichst zu vermeiden**.

Während des Spurbildungsprozesses (Eingraben der Maschine), der an der Oberfläche beginnt und sich stetig in größere Tiefen des Mineralbodens fortsetzt, ist eine zunehmende Translokation von Bodenmaterial insbesondere von Humusaufgabe und humoser Oberbodenhorizonte aus den Fahrspuren in randliche Aufhäufungen (Randwülste) verbunden, womit eine erhebliche ökologische Wirkung auf den Spurboden verbunden ist. Der laterale Umlagerungsprozess humoser Bodenbestandteile ist für viele Bodeneigenschaften und die Ableitung der Spurtiefen-Schwellenwerte maßgeblich. Jedoch ist eine zentimetergenaue Angabe von Beginn und Abschluss des Vorgangs auch aufgrund der Standortvariabilität von Oberboden und Humusaufgabe nicht möglich, sodass empfohlen wird, **neben dem Richtwert für die Spurtiefe zusätzlich den Erhalt des Bodenaufbaus zu berücksichtigen**. Dies bedeutet, dass Erscheinungen wie das Auftreten von Umlagerungsprozessen, Verlust von Humusaufgabe/humoser Bodenhorizonte und Grundbruch vermieden werden müssen. Trotz der Bedeutung, die Umlagerungsprozesse auf punktuelle Bodeneigenschaften haben, ist zu bedenken, dass umgelagertes Bodenmaterial nicht verloren gegangen, sondern räumlich an anderer Stelle deponiert wurde (Randwülste).

Die übergeordnete Arbeitshypothese, dass der maßgebende Einflussfaktor zur Bewertung einer zu vermeidenden Bodenveränderung in dem Erhalt bzw. Verlust eines intakten Bodenaufbaus liegt, konnte durch die Untersuchungsergebnisse bestätigt werden. Daraus leitet sich die Empfehlung ab, zur Beurteilung der Bodenpfleglichkeit eines Befahrungereignisses neben der Intensität der Spurtiefe als Orientierungsgröße zudem den Aufbau des Bodens heranzuziehen. Beim intakten Bodenaufbau handelt es sich um die Abfolge sowie die Mächtigkeiten der Bodenhorizonte des unbefahrenen (ungestörten bzw. störungsarmen) Waldbodens. Die Hypothese ging ferner davon aus, dass ein Zusammenhang zwischen dem Maß der Abweichung vom ungestörten Bodenaufbau und den Bodeneigenschaften der Fahrspurböden besteht, die durch die Fahrspurtiefe im Wesentlichen reflektiert werden, was bestätigt werden konnte. Während

Fahrspuren der Variante *FS-A* ( $\leq 10$  cm) dadurch gekennzeichnet sind, dass die Bodenhorizonte durch Maschinenüberfahrt verdichtet wurden – was zweifelsohne eine Umgestaltung von Struktureigenschaften bedeutet –, bleibt die Horizontabfolge erhalten. Trotz Veränderung insbesondere bodenphysikalischer Eigenschaften ist die Wirkung auf viele chemische und biologische Bodeneigenschaften sowie Bodenfunktionen moderat. In Fahrspuren der Variante *FS-C* ( $> 20$  cm) ist der Spurbildungsprozess so weit vorangeschritten, dass neben wesentlich stärkerer Bodenstrukturveränderung und Modifikation bodenphysikalischer Eigenschaften ein vollständiger Verlust der Humusaufgabe und zudem eine mechanische Durchmischung oberer Mineralbodenbereiche stattgefunden hat. Besonders die chemischen und biologischen Bodeneigenschaften werden durch die erhebliche Störung des Bodenaufbaus und den Verlust nährstoffreicher, humoser Bodenhorizonte beeinflusst, zudem kommt es in Interaktion mit den physikalischen Gegebenheiten zu einer lokalen Degradation des Standorts mit Verschlechterung der Bodenfunktionen. Bodenaufbau und -eigenschaften von Spurbildung *FS-B* ( $> 10$  cm  $\leq 20$  cm) weisen Merkmale auf, die bereits eine deutliche Abkehr vom unbefahrenen Referenzzustand sowie einigen Eigenschaften von Spurbildung *FS-A* erkennen lassen, jedoch weniger extrem verändert sind als in Fahrspuren *FS-C*. Sie stellen daher eine Übergangsform zwischen beiden Varianten dar.

Wegen der zweifelsfreien Legitimität und dem im Grundsatz sinnvollen Ansatz, Befahrung auf Rückegassen zu konzentrieren, sind Veränderungen von Bodeneigenschaften in Rückegassen unvermeidbar. Der Verdichtungsprozess geht zu Lasten der Poren des Bodens und steht damit in unmittelbarem Zusammenhang zum Luft-, Wasser-, Wärme-, und Nährstoffhaushalt, wodurch es letztendlich zu einer lokalen Veränderung des Standortes mit Einfluss auf den Lebensraum von Bodenorganismen und Pflanzen kommt. Dies beeinflusst wiederum das Potential der Waldbäume, sich im Boden zu verankern und Wasser und Nährstoffe aufzunehmen. Die tendenzielle Veränderung des Standorts zugunsten spezialisierter Lebensformen ist mit den Ansprüchen der meisten Baumarten nur bedingt deckungsgleich und aufgrund der nicht unerheblichen Flächenanteile von Rückegassen am Gesamtwald sowie der Persistenz von Verdichtungsmerkmalen bedeutungsvoll.

Neben der Lebensraumfunktion wird durch Befahrung mit schweren Forstmaschinen allerdings auch die Funktion des Bodens im Wasser- und Nährstoffhaushalt sowie dessen Klimawirksamkeit beeinflusst. Diese Veränderungen sind vor dem Hintergrund des Klimawandels von großer Bedeutung. Starkregenereignisse werden zukünftig zunehmen, so dass das Wassermanagement im Wald an Wichtigkeit zunimmt. In Falllinie verlaufende, stark verdichtete Rückegassen, die ein mangelndes Infiltrationsvermögen aufweisen, leiten das Wasser bei Regen aus den Beständen auf die Waldwege und erhöhen damit die Hochwassergefahr in der Umgebung. Zudem führt Erosion zu einem Verlust humosen- und nährstoffreichen Bodenmaterials, das an anderer Stelle wiederum den Abfluss des Wassers behindern kann. Gering verdichtete Rückegassen mit einem intakten Bodenaufbau, können durch das höhere Wasserspeichervermögen des Bodens (Vorhandensein einer Humusaufgabe und höhere nFK) verglichen mit stark verdichteten Rückegassen bei Starkregen vermutlich mehr Wasser in den Boden leiten und somit im Bestand halten, was die Hochwassergefahr in der Umgebung wahrscheinlich vermindern würde.

Obwohl in den Fahrspuren eine deutliche Beeinflussung der Treibhausgasemissionen gemessen wurde, erscheint die Bedeutung von Fahrspuren hinsichtlich der Klimawirksamkeit relativ gering. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass lediglich die Fahrspuren betrachtet wurden – alle weiteren Bestandteile von Rückegassen wie Rand- und Mittelstreifen und ggf. Randwülste wurden nicht untersucht, sodass keine abschließende Beurteilung der Treibhausgasbilanz von Rückegassen erstellt werden kann. In Fahrspuren der Variante *FS-C* wurde zwar eine drastische Reduktion der Methanaufnahme festgestellt, dies ging aber, im Vergleich zur Referenz, gleichzeitig mit wesentlich geringeren Respirationsraten ( $\text{CO}_2$ ) einher. In einer Treibhausgasbilanz erscheinen somit die *FS-B*- und *FS-C*-Varianten günstiger als der unbefahrene Waldboden oder *FS-A* Fahrspuren. Es bleibt daher festzuhalten, dass eine intensivere Befahrung, d.h. Fahrspuren der Klassen *FS-B* und *FS-C*, in dieser Studie keinesfalls zu einer Erhöhung der Netto-Treibhausgasemissionen führte. Dagegen weisen die Ergebnisse von *FS-A* auf eine leichte Steigerung der Treibhausgasemissionen hin, die auf erhöhte Bodenatmung zurückzuführen und sehr wahrscheinlich Folge der dort mächtigeren Humusaufgabe (Reisigmatte) sind. Die in allen Fahrspuren, in besonderem Maße aber in *FS-C* beobachtete, drastische Reduktion der Methanaufnahme ist für eine klimatische Bilanz auf der gegebenen Fläche somit von untergeordneter Bedeutung, weist aber deutlich auf veränderte Bodenprozesse hin. Dennoch kann der Erhalt der Methansenkenfunktion des Bodens eine lohnenswerte Investition in die Klimawirksamkeit des Waldes sein, was am wirkungsvollsten durch die Vermeidung von Fahrspuren  $> 20$  cm (*FS-C*) erreicht werden kann.

Mit Verdichtung, Veränderung der Bodenstruktur und Intensität der Spurbildung können zudem Folgewirkungen wie die bereits erwähnte Sensitivität gegenüber Verschlammung und Bodenerosion sowie Pfützenbildung (Sekundärbiotopbildung) verbunden sein, die letztendlich die weitere Befahrbarkeit von Rückegassen – und bei intensiverer Ausprägung auch die Begehbarkeit der Waldfläche – beeinträchtigen können. Da Bodenverformungen auf Rückegassen üblicherweise nicht durch Gegenmaßnahmen beseitigt werden, handelt es sich um Merkmale, die sowohl direkt nach dem Maschineneinsatz als auch längerfristig sichtbar bleiben und sich auf die Akzeptanz der Bewirtschaftung auswirken können. Ferner wurde in der vorliegenden Studie lediglich die Fahrspur, als wahrscheinlich am stärksten beanspruchter Teil der Gasse,

betrachtet. Über andere Teile der Rückegasse sowie eine landschaftsökologische Bewertung von Rückegassen auf Waldökosysteme (s. II.2.17) können keine endgültigen Aussagen getroffen werden.

Das Konzept, die Spurtiefe als Bemessungsgrundlage für ökologisch vertretbare Bewirtschaftungsmaßnahmen zu nutzen, dient dem Zweck, eine Vereinbarkeit von insbesondere Nutzfunktion und Schutzfunktion zu erreichen und nachteiligen Wirkungen, die aus der Überbeanspruchung der Bodennutzung resultieren können, vorzubeugen und dadurch Standorteigenschaften langfristig und flächenhaft zu erhalten. Die Spurtiefe kann allerdings nur dann als ein Maß zur Beurteilung der Bodenpfleglichkeit herangezogen werden, solange sie unmittelbarer Ausdruck der Wirkung der Befahrung bleibt und nicht durch kaschierende Maßnahmen morphologisch verändert wird, da ansonsten die Indikatorfunktion beeinflusst und der Grundgedanke konterkariert wird.

Aus den Untersuchungen zur Bodensetzung wird deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen rezenter Spurtiefe und zu erwartender Setzung = weiterer Spurvertiefung besteht. Während das setzungsbedingte Spurbildungsgeschehen in Fahrspuren größerer Tiefe (> 20 cm; *FS-C*) eher gering ist, reagieren Böden unter schwach ausgeprägten Fahrspuren (0-10 cm; *FS-A*) besonders sensibel auf erneute Befahrungseignisse, sofern förderliche Bedingungen, insbesondere hohe Bodenfeuchten + hohe maschinelle Lasteinträge, gegeben sind. Auch mäßig ausgeprägte Fahrspuren (10-20 cm; *FS-B*) zeigen noch nennenswerte Zunahmen der Bodensetzung unter entsprechenden Bedingungen. Die Erreichung bzw. der Erhalt erstrebenswerter Spurtiefen (0-10 cm) erfordert somit, neben einer Sensibilisierung beteiligter Akteure, langfristige und konsequente Anstrengungen im Bereich der Arbeitsorganisation, der Auswahl von Arbeitsverfahren und technischen Hilfsmitteln sowie die Berücksichtigung zurückliegender und prognostizierter Witterung.

### **Ausblick**

Der während der Durchführung einer Bewirtschaftungsmaßnahme vorherrschenden Bodenfeuchte und der Witterung kommen für die Bodenpfleglichkeit herausragende Bedeutung zu. Unter feuchten und insbesondere nassen Bedingungen ist eine den Boden schützende Befahrung in besonderem Maße erschwert und es stellen sich hohe Anforderungen an Organisation und Kommunikation zwischen den Beteiligten – zu vermeidende Veränderungen von Bodeneigenschaften, die sich ungünstig auf die Funktionsfähigkeit des Waldbodens im Bereich der Fahrspuren auswirken, treten besonders schnell ein und sind dann sehr dauerhaft. Dagegen ist Bodenschutz auf Rückegassen bei geringen Bodenfeuchten und trockener Witterung mit vertretbarem Aufwand erreichbar, da Spurbildung und Setzung des Mineralbodens in wesentlich geringerem Umfang stattfinden. Darüber hinaus erhöht sich die Flexibilität der beteiligten Akteure an die Ausgestaltung der Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Um eine bodenpflegliche Bewirtschaftung unter trockenen Boden- und Witterungsbedingungen zu erleichtern, besteht ein Bedarf, den Forstämtern unkompliziert nutzbare Entscheidungshilfen zur Verfügung zu stellen, mit denen sie die Befahrbarkeit der Waldböden bei geplanten Maßnahmen möglichst kurzfristig einschätzen können. Aus diesem Grund wird derzeit sowohl an der NW-FVA als auch am TI an zwei synergistischen Projekten gearbeitet, mit denen eine deutschlandweite Echtzeitbewertung und Kurzfristprognose der Wasserverfügbarkeit im Wald mittels der Entwicklung von hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodellen erreicht werden soll. Es ist vorgesehen, die Eigenheiten des Wasserhaushaltes von bereits bestehenden Rückegassen im Prognosewerkzeug zu berücksichtigen und durch die Vorhersage der Bodenfeuchte in Rückegassen einen Beitrag zur Beurteilung des Befahrungsrisikos leisten.

Unter anderem aus Gründen des Bodenschutzes wurde in der Vergangenheit vielfach angestrebt, Waldpflege- und Erntemaßnahmen im Winterzeitraum durchzuführen, da Böden bei ausreichend tiefem Bodenfrost eine beeinträchtigungsarme bis –freie Befahrung ermöglichen. Derartige Bedingungen sind unter sich verändernden klimatischen Bedingungen jedoch zunehmend kaum mehr vorhanden. Stattdessen erhöht sich im Winterzeitraum bei tiefgreifend hohen Bodenfeuchten und ausbleibendem Frost die Anfälligkeit des Bodens gegenüber zu vermeidender, befahrungsbedingter Bodenveränderungen. Unter Berücksichtigung, dass Befahrungseignisse üblicherweise auf einzelne bis wenige Maßnahmen je Dekade beschränkt sind, ist aus Perspektive des Bodenschutzes die Anpassung der bisher üblichen Holzeinschlagszeiträume in Richtung von Sommermonaten mit trockener Witterung und geringen Bodenfeuchten eine sinnvolle Strategie. Jedoch ist der Zielkonflikt mit anderen Interessensgruppen wie z.B. Naturschutz und Tourismus abzuwägen.

Zusätzlich sollten die Techniken der Holzernte und -rückung weiterentwickelt werden. In der Vergangenheit wurde dies beispielsweise mittels eines sogenannten Schreitharvester versucht. Diese Innovation der Holzerntetechnik konnte sich jedoch nicht durchsetzen. Möglichkeiten, Verbesserungen bei der bodenschonenden Bewirtschaftung zu erzielen, sind aber auch im Bereich der bodenungebundenen Holzernte gegeben. So könnte eine Adaption von Arbeitsverfahren mittels Seilkran, die üblicherweise in Hanglagen zum Einsatz kommen, an ebene Geländebedingungen erfolgen. Dadurch könnte auf vielen Flächen die Befahrungsintensität reduziert und der Boden von den Auswirkungen geschützt werden. Um eine zu den etablierten Verfahren wirtschaftlich konkurrenzfähige Alternativen zu bieten (Kosten), sind Optimierungen im Bereich der Arbeitsabläufe notwendig.

## Kernaussagen auf Basis der empirischen Untersuchungen

- 1) Die Spurtiefe kann als Orientierungsgröße zur Beurteilung bodenpfleglicher Befahrung herangezogen werden.
  - a. In der Regel rufen Befahrungen des Waldbodens Zustandsveränderungen in Form von Abweichungen der bodenphysikalischen Eigenschaften hervor, die sich direkt oder indirekt auf die chemischen und biologischen Verhältnisse auswirken.
  - b. Gering ausgeprägte Fahrspuren ( $\leq 10$  cm) entsprechen in ihrer Funktionalität am ehesten den Bodenteilfunktionen der unbefahrenen Referenzparzelle und sind aus bodenökologischer Sicht tolerierbar.
  - c. Mäßige Fahrspuren ( $> 10-20$  cm) weichen zunehmend stärker von der ungestörten Referenz ab und sind möglichst zu vermeiden (Ausnahme).
  - d. Tiefe Fahrspuren ( $> 20$  cm) zeigen zahlreiche Merkmale intensiver Störung und Verringerung der Funktionsfähigkeit und sind strikt zu vermeiden.
  - e. Die Intensität der Beeinflussung von Bodenfunktionen ist von der jeweiligen Teilfunktion abhängig. Für Spurtiefen  $\leq 10$  cm gilt:
    - i. Geringe Beeinflussung: Nährstoffpotential und -verfügbarkeit, Klimawirksamkeit, Puffervermögen saurer Einträge
    - ii. Stärkere Beeinflussung: Lebensraum für Bodenorganismen, Lebensraum für Pflanzen
    - iii. Am stärksten beeinflusst: Funktion im Wasserhaushalt
  - f. Die Ergebnisse sind allerdings nicht allgemeingültig und gelten lediglich auf lössgeprägten Böden.
- 2) Die Horizontierung bzw. der Aufbau des Bodens sollten als zusätzliches Beurteilungskriterium von Fahrspuren herangezogen und durch die Befahrung nicht verändert werden.
  - a. Die Konnektivität des Porenraums zwischen Humusauflage und Mineralboden ist entscheidend für einen ungestörten Gasaustausch und die Infiltration von Wasser. Oberflächenabfluss wird dadurch gering und der Wasserrückhalt in der Fläche erhalten.
  - b. Die Humusauflage stellt einen Retentionsraum von Wasser dar, sie beeinflusst Evapotranspiration und Erosion und puffert Temperaturschwankungen.
  - c. Die organische Substanz ist ein wichtiger Kohlenstoff- und Nährstoffspeicher.
  - d. Die Humusauflage ist ein wichtiger Lebensraum für Bodenorganismen und Pflanzen.
- 3) Die Spurtiefe sollte immer gemeinsam mit dem Bodenaufbau betrachtet werden, da der Erhalt von Bodeneigenschaften und -funktionen erheblich mit einem intakten Bodenaufbau verknüpft ist.

### **3. Verwertung**

#### **3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Seitens beider Zuwendungsempfänger (NW-FVA, TI) wurden weder Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen getätigt, noch wurden Schutzrechte erteilt.

#### **3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Aus wirtschaftlicher Perspektive sollen die in diesem Verbundvorhaben gewonnenen Erkenntnisse des Zusammenhangs „Maschine – Befahrung – Bodeneigenschaften und -funktionen“ einen Beitrag zum Bodenschutz liefern, der sich – sofern die Empfehlungen berücksichtigt werden – indirekt durch wenig bis mäßig beeinträchtigte Waldböden mit Rückwirkung auf gesunde, stabile und leistungsstarke Waldökosysteme sowie zahlreiche weitere Ökosystemdienstleistungen auch als ökonomischer Nutzen bezahlbar machen sollte.

#### **3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Der Beitrag des Verbundvorhabens soll neben der wissenschaftlichen Erkenntnis auch in Gestalt einer Weiterentwicklung des Merkblattes der bodenschonenden Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten erfolgen und somit als Basis für einen überarbeiteten Leitfaden für die mechanisierte Holzernte dienen. Im Zuge der Bearbeitung des Verbundvorhabens wurde bereits eine Verbesserung der bestehenden Gefährdungskarte zur Befahrbarkeit von Waldböden in Niedersachsen vorgenommen (Integration von Hangneigungsklassen), die dem Anwender in der Praxis eine Hilfestellung bei der Bewirtschaftungsplanung bieten soll. In den Niedersächsischen Landesforsten werden die Forschungsergebnisse für Aus- und Fortbildung der Mitarbeiter genutzt. Die Fortbildungen werden mit dem Vorliegen der vollständigen Ergebnisse intensiviert.

Innerhalb der NW-FVA werden die Erkenntnisse des Verbundvorhabens aktuell und zukünftig dazu genutzt, um Forst-Referendare/-innen und Forstinspektor-Anwärter/-innen während ihrer Grundausbildung weiteres Wissen über den Zusammenhang von Maschineneinsatz, Fahrspurtiefen und der verbundenen Wirkung auf die Böden von Rückegassen zu vermitteln. Die Seminare finden im jährlichen Turnus für die Trägerländer der NW-FVA statt.

#### **3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Untersuchungen des vorliegenden Projektes beschränken sich hinsichtlich der Böden auf lössgeprägte, schluffdominierte Standorte mit Bodenarten überwiegend im Bereich *Ut2*, *Ut3*, *Us*, *Uls* und *Lu*. In manchen Versuchsgassen liegt der Sandgehalt auch höher. Beim Bodentyp handelt es sich um Braunerden. Die Auswahl der Flächen begründet sich vor allem durch die hohe Verbreitung und auch die Anfälligkeit der Standorte gegenüber Gefügeveränderungen und Verdichtung. Dementsprechend besitzen die gewonnenen Ergebnisse keine Allgemeingültigkeit, sondern sind auf jene und vergleichbare Standorte beschränkt. Eine Vielzahl von Wäldern stocken jedoch auch auf Standorten mit anderen Bodenarten und Bodentypen, bei denen zu erwarten ist, dass sie verschieden auf Befahrungseignisse reagieren. Je nach Empfindlichkeit der Standorte und der Wirkung von Bodenverdichtung auf diesen ist annehmbar, dass vergleichbare Untersuchungen zu abweichenden Ergebnissen führen und somit auch andere Schlussfolgerungen nach sich ziehen würden. Um flächendifferenzierte Schwellenwerte für tolerierbare Fahrspurtiefen zu erreichen, die je nach vorherrschenden Bedingungen lockerer oder restriktiver ausfallen könnten, wäre es demnach erstrebenswert, ähnliche Untersuchungen – ggf. mit reduziertem und angepassten Indikatorensatz – auch auf anderen Standorten durchzuführen, die sich beispielsweise durch andere Korngrößenverteilungen (wesentlich ton- oder sandgeprägtere Standorte) oder Unterschiede im Wasserregime auszeichnen, da ansonsten die Wissensbasis lückenhaft bleibt. Weiterhin sollten die Untersuchungen auf unterschiedliche topografische Situationen ausgedehnt werden.

Von Interesse wäre im Kontext einer weiteren, nachfolgenden Phase auch die Untersuchung der Anbaufähigkeit forstlicher Gehölze auf verdichteten Fahrspurböden. In Abhängigkeit der im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse über mögliche Unterschiede zwischen Fahrspurböden verschiedener Tiefen sowie ggf. nachfolgender Umsetzung in Bodenschutzkonzepten oder durch andere forstpolitische Erwägungen, sind in Zukunft theoretisch Veränderungen in der bisherigen Bewirtschaftungspraxis in Bezug auf den Umfang von Feinerschließungsnetzen (Rückegassenabstände), Befahrungintensität, Befahrungszeitpunkt, Technik der Holzernte etc. denkbar. Veränderungen in diesen Bereichen, beispielsweise durch Erhöhung der Rückegassenabstände, würden die Rückgabe von Rückegassen und Fahrspurböden für die Holzproduktion bedeuten. Je nach Zustand dieser Flächen (Verdichtungsintensität, Ausmaß von Bodenfunktionsveränderungen) ergäben sich unterschiedliche Voraussetzungen für den Anbau von Forstgehölzen. Interessant wäre in diesem Zusammenhang daher zu untersuchen, wie verschiedene Gehölze

(insbesondere heimische Baumarten) mit unterschiedlich intensiv verdichteten und in ihren Eigenschaften veränderten Böden zurechtkommen. Möglicherweise bestehen Unterschiede hinsichtlich des Anwuchserfolgs, der Ertragsleistung, der Vitalität und Stabilität oder anderer Eigenschaften, die sich auch auf den Gesamtbestand auswirken könnten. Es ist davon auszugehen, dass Vitalität und Wachstumseigenschaften von Bäumen ideale integrative Messgrößen darstellen, mit denen die Auswirkungen veränderter Bodeneigenschaften und –funktionen treffend reflektiert und somit besser bewertet werden können. Sofern hierzu Unterschiede gewonnen werden könnten, die auf den Rückegassenzustand und die Intensität der Fahrspureintiefung zurückzuführen wären, würde dies die Bedeutung der Einhaltung bestimmter Rückegassen- und Fahrspurzustände (beispielsweise Fahrspuren der Klasse FS-A mit maximal 10 cm Tiefe und Erhalt des Bodenaufbaus) untermauern, da Auswirkungen auf die Produktionsfunktion von Böden für künftige Nutzungen ein (zusätzliches) schwerwiegendes Argument für einen hohen Stellenwert von Bodenschutz bei der Bewirtschaftung wäre.

Aktuell bestehen erhebliche Defizite in der Vorhersage des Wassergehaltes und des Bodenwasserhaushaltes von Rückegassen. Im vorliegenden Verbundvorhaben war daher in Zusammenarbeit mit einem externen Partner und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) vorgesehen, ein Prognosemodell für die Befahrbarkeit von Waldböden zu entwickeln, das jedoch durch Rückzug des hauptverantwortlichen Partners nicht zustande gekommen ist. Die Entwicklung eines Prognosemodells wäre aber weiterhin erstrebenswert und wurde beispielsweise auch bei einer Expertenrunde zum Thema „Physikalischer Bodenschutz“ der FNR in Berlin diskutiert (26.03.2019), in der das Wissensdefizit in Bezug auf die bodenhydrologischen Verhältnisse in Rückegassen verdeutlicht wurde. Aus diesem Grund hat das Thünen-Institut für Agrartechnologie einen Folgeantrag bei der FNR gestellt (Akronym „CritTrails“), der sich inhaltlich mit der jährlichen Dynamik des Wassergehaltes in Fahrspuren beschäftigt. Das Vorhaben wurde mittlerweile bewilligt und ist aktuell in Bearbeitung (FNR-Fördernummer 2220NR039X). Seitens des Thünen-Instituts für Agrartechnologie fand im Jahr 2018 eine erste und im Jahr 2019 eine zweite Messkampagne zu diesem Kontext statt, bei der eine erste Datengrundlage gewonnen werden konnte. In den beiden Messkampagnen wurden signifikante Unterschiede im Bodenwasserhaushalt zwischen Fahrspur und Waldboden identifiziert. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den Untersuchungen zur Bodenwasserspannung im vorliegenden Verbundvorhaben (siehe Bodenfeuchtedynamik (TV1), Kapitel II.2.5) und legen einerseits generelle Unterschiede zwischen Fahrspur und unbefahrenem Waldboden offen, stellen andererseits aber auch die Bedeutung der Spurtiefe auf die Bodenfeuchtedynamik heraus. Derzeit wird in anderen Projekten, unter anderem gefördert von der FNR, der Fokus auf die Vorhersage des Wassergehaltes in unbefahrenen Waldböden, nicht aber in Fahrspuren gelegt (Beispiel Projekt TroWak, FNR). Dieses Wissensdefizit soll zukünftig mit Hilfe des CritTrails-Projekts durch eine genaue Betrachtung der Fahrspuren unterschiedlicher Standorte beseitigt werden. Dabei soll das existierende AMBAV-Modell zur Abschätzung der Bodenfeuchte unter Ackerkulturpflanzen auf den Wald erweitert werden und für typische Waldbestände (z.B. Fichten-, und Buchenreinbestände sowie Mischbestände etc.) Prognosen über die Entwicklung der Bodenfeuchte ermöglichen. Diese Informationen sind von besonderer Wichtigkeit, um die Befahrbarkeit von Böden vorherzusagen, da dem Parameter Wassergehalt vor dem Hintergrund des Bodenschutzes besondere Bedeutung zukommt (II.2.18). So können für unterschiedliche Bestände Befahrbarkeitstage ermittelt werden, die in der Hiebsplanung berücksichtigt werden können. Eine Steigerung der Effizienz des gesamten Ablaufs sowie eine zielsichere Erreichung bodenpfleglicher Bewirtschaftung könnte durch ein valides Prognosemodell erreicht werden und somit einen erheblichen Fortschritt in der Hiebsplanung der Forstwirtschaft bewirken.

#### 4. Erkenntnisse von Dritten

Eine umfassende Beurteilung der durch forstliche Erntemaßnahmen verursachten Veränderungen der Bodeneigenschaften von Fahrspurböden unter Verknüpfung mit der Spurtiefe fand in der Vergangenheit wenig statt. In diesem Verbundvorhaben wurden Auswirkungen sowohl auf die Bodenphysik als auch auf die Bodenbiologie und die Bodenchemie erfasst, analysiert sowie untereinander und mit der Fahrspurtiefe in Beziehung gesetzt. Dieses in der Forstwissenschaft in diesem Umfang bisher nicht durchgeführte Vorgehen bei der Untersuchung von Fahrspurböden wurde in der Vergangenheit in mehreren Literaturstudien gefordert. So konnten beispielsweise Cambi et al. (2015) in einer ausführlichen Literaturstudie feststellen, dass bereits viele Studien im Wald zum Kontext der maschinellen Holzernte und deren Folgen durchgeführt wurden. Allerdings bestehen gleichzeitig große Defizite: während über die bodenphysikalischen und hydraulischen Auswirkungen viele Kenntnisse vorhanden sind, fehlt oft zugehöriges Wissen zu Bodenchemie und Bodenbiologie, welches damit verknüpft wird. Nach Cambi et al. (2015) ist es von hoher Wichtigkeit diese Wissenslücken zu schließen, um die Folgen des Holzeinschlages ganzheitlich bewerten, Strategien zum Schutz des Bodens und des Ökosystems entwickeln und Böden nach Schädigung wiederherstellen zu können.

Im Verlauf der Bearbeitung des Verbundvorhabens wurden weiterhin Studien zur vorliegenden Thematik von dritter Seite publiziert, jedoch keine, die aus Projekten mit einem ähnlichen Versuchsdesign und Zielsetzung hervorgingen, wie es in diesem Verbundvorhaben durchgeführt wurde. Vielmehr wurden weiterhin überwiegend Ergebnisse veröffentlicht, die sich inhaltlich mit den Auswirkungen von Befahrung auf die Bodenphysik befassen, sowie einige zur Wirkung auf bodenbiologische und -chemische Eigenschaften. Eine ganzheitliche Untersuchung bei gleichzeitiger Verknüpfung mit der Spurtiefe fand nach unserem Wissen bis dato nicht statt. Vielmehr wurde dies in diversen neueren Studien als Aufgabe der Zukunft gefordert (Hansson et al. 2018, Toivio et al. 2017).

Eine Auswahl an aktuellen Studien, deren Inhalte den vorliegenden Untersuchungen thematisch nahestehend und für das Verbundvorhaben von Relevanz sind, wird nachfolgend gegeben. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist erweiterbar.

Eine wichtige Feststellung bei der Recherche von Erkenntnissen Dritter ist, dass im Verlauf der Projektlaufzeit (sowie auch vor Beginn des Vorhabens) viele Veröffentlichungen zu Rückegassen entstanden sind, die jedoch häufig die Spurtiefe außer Acht lassen. Die fehlende Berücksichtigung der Spurtiefe bei Untersuchungen von Rückegassen ist ein wichtiges Defizit, da die Ergebnisse des Verbundvorhabens zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Bodeneigenschaften und -funktionen und der Spurtiefe besteht. Eine Beschreibung und Beachtung der Beschaffenheit der Rückegassenmorphologie und der Spurtiefe auf die Bezug genommen wird, sollte bei künftigen Untersuchungen unbedingt erfolgen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Ohne diese Verknüpfung ist es naheliegend, dass verschiedene Autoren teils zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen.

##### *Welche Faktoren beeinflussen die Fahrspurtiefe?*

Das Ausmaß der Spurbildung während einer Bewirtschaftungsmaßnahme bzw. Befahrung eines Waldstandortes ist eine Funktion zahlreicher Einflussfaktoren. Herausragende Bedeutung kommt unter anderem der vorherrschenden Bodenfeuchte zu. In einem Befahrungsexperiment stellten Tavankar et al. (2021) den Einfluss der Bodenfeuchte und der Befahrungsintensität auf die Spurtiefe, den Eindringwiderstand und die Porosität des Bodens heraus. Nach einem Befahrungsszenario mit einem Forwarder (eine Überfahrt ohne und eine mit Beladung) lag die Spurtiefe auf dem feuchten Standort mit 11,7 cm etwa das 1,65-fache über der des trockenen Standorts (7,1 cm). Bei einem Versuch mit drei Überfahrten blieb die Spurtiefe bei Uusitalo et al. (2020) bei geringem volumetrischen Wassergehalt (VWC) unterhalb von 10 cm und zeigte darüber hinaus einen annähernd linearen Zusammenhang bis zu einem VWC von 45 % (nahezu Wassersättigung des Bodens). Neben dem VWC erwiesen sich die kumulierte Häufigkeit an Überfahrten, die Trockenrohdichte und insbesondere die Mächtigkeit der Humusaufgabe als signifikante Prädiktoren für die Vorhersage von Spurtiefen. Ein weiteres, aktuelles Beispiel für den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Intensität von Fahrspuren liefern auch die Untersuchungen von Hoppelmann et al. (2022), die auf Standorten mit geringem Grundwasserflurabstand („depth-to-water-values“ < 1 m) die höchste Dichte an stark ausgeprägten Fahrspuren fanden. Eine logistische Regression bestätigte, dass die Wahrscheinlichkeit, starke Fahrspuren zu erhalten, bei hohen Grundwasserständen stark zunimmt. Die Autoren nennen jedoch auch noch weitere wichtige Einflussgrößen, wie beispielsweise die bereits erwähnte Befahrungsintensität (Anzahl der Überfahrten). Die beispielhaft genannten Studien bestätigen und untermauern somit die im vorliegenden Bericht gezeigten Ergebnisse sowie die vorgebrachte Forderung nach Berücksichtigung der Bodenfeuchte bei der Befahrung von Rückegassen und die Verschiebung von Holzeinschlägen in Perioden des Jahres mit trockener Witterung zum Schutz des Bodens.

Ergebnisse zum Einfluss der Befahrungsintensität auf Bodenveränderungen und Spurbildung wurden zuletzt auch von weiteren Autoren veröffentlicht (Baek et al. 2022, Dymov et al. 2022, Pandur et al. 2022). Pandur et al. (2022) stellten neben der größten Spurtiefenzunahme nach der ersten Überfahrt mittels eines Forwarders eine Überschreitung der Spurtiefe von 10 cm nach 20 Überrollungen fest (trockene Bedingungen und hohe Tragfähigkeit). Bei Dymov et al. (2022) war trotz Bodenfrost bis in ca. 15 cm Bodentiefe bereits nach drei

Überfahrten eine Spurtiefe von im Mittel 11 cm erreicht und nach insgesamt 10 Überfahrten resultierte die Spurtiefe in einem Mittelwert von 27 cm. Die Bedeutung der Überrollungshäufigkeit wird auch durch Naghdi et al. (2022) herausgestellt. Die Autoren nahmen bei geringer Bodenfeuchte eine Anzahl von drei Überfahrten als eine Art Schwellenwert war, oberhalb dessen sich die Spurtiefe bei der Befahrung mit einem schweren Traktor fast verdoppelte. Sie stellten zudem fest, dass die Fahrgeschwindigkeit eine wichtige Einflussgröße für die Spurvertiefung ist. Diese nahm bei geringerer Fahrgeschwindigkeit stärker zu als bei höherer, was durch die Untersuchungen von Sadeghi et al. (2022) bestätigt wird, in deren Studie unabhängig von der Anzahl der Überfahrten eine geringere Fahrgeschwindigkeit zu einer substanziell größeren Zunahme der Trockenrohdichte und Abnahme der Porosität des Bodens führte als bei höheren Geschwindigkeiten.

#### *Welche Eigenschaften haben verdichtete Fahrspurböden?*

Infolge der Befahrung kommt es zu vielfältigen Beeinflussungen von Bodeneigenschaften und -funktionen innerhalb der Fahrspuren bzw. auf den Rückegassen. Neben den in diesem Bericht vorgestellten Ergebnissen wurden in der jüngeren Vergangenheit auch von anderen Autoren Untersuchungen zur Thematik veröffentlicht. Einen Zusammenhang zwischen der Spurtiefe und bodenphysikalischen Eigenschaften konnten Ilintsev et al. (2022) zeigen. In ihrer Studie fanden sie einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen der Spurtiefe und der Trockenrohdichte, einen signifikant negativen Zusammenhang zur Porosität des Bodens sowie einen moderat negativen Zusammenhang zur Luftkapazität. Die geringsten bodenphysikalischen Veränderungen fanden in Fahrspuren mit geringer Tiefe (1-15 cm) statt. Diese unterschieden sich signifikant von mitteltiefen (15-30 cm) und sehr tiefen Fahrspuren (> 30 cm). Ihre Empfehlung lautet daher, mitteltiefe und sehr tiefe Fahrspuren zu vermeiden. Mit Ausnahme der Tiefenabgabe (1-15 cm, statt, wie in vorliegendem Verbundvorhaben, 0-10 cm Tiefe als Schwellenwert) und des Umfangs der Messgrößen, steht dieses Ergebnis und seine Schlussfolgerung im Einklang mit den Ergebnissen des Verbundvorhabens.

Im Kontext der Wirkung der Befahrung auf insbesondere bodenphysikalische Messgrößen reiht sich auch die Metaanalyse zahlreicher Studien von Nazari et al. (2021) ein, die zeigt, dass sich die Trockenrohdichte auf verdichteten Waldböden insgesamt um etwa 9 % erhöht, im Unterschied zur gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Porosität des Bodens, die sich um ~ -10 % respektive ~ -40 % verringern. Die größte Beeinflussung dieser Messgrößen findet bei sehr häufigen Überfahrten (> 20) statt. In der Studie wird auch der Einfluss auf den mikrobiell gebundenen Kohlenstoff benannt, bei dem eine Verringerung lediglich für Unterböden (Bodentiefe > 30 cm) gefunden werden konnte. Diese beträgt knapp – 30 %. Schack-Kirchner et al. (2007) fanden in Befahrungsversuchen mit 9-facher Überfahrt heraus, dass sowohl feuchte als auch trockene Böden mit einer Erhöhung der Trockenrohdichte bei gleichzeitiger Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit reagieren. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit sank von über 250 mm h<sup>-1</sup> auf ein Minimum von circa 10 mm h<sup>-1</sup> ab.

Als Folge der Erhöhung der Trockenrohdichtung durch befahrungsinduzierte Effekte lassen sich diverse Folgeerscheinungen feststellen, die ebenfalls in anderen Studien untersucht wurden. So nahm die Porosität als direkt mit der Trockenrohdichte in Verbindung stehender Parameter deutlich ab (Ilintsev et al. 2022, Hansson et al. 2018, Toivio et al. 2017). Auf Basis von Messdaten eines bodenhydrologischen Monitorings haben Hansson et al. (2019) in einer Modellsimulation festgestellt, dass in 23 % bis 82 % der Tage der Wachstumsperiode die Porosität die kritische Grenze von 0,10 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> unterschritt.

Wie obenstehend erläutert, spielt für die Spurbildung u. A. der Wassergehalt des Bodens eine besondere Rolle. Der Wassergehalt des Bodens von Fahrspuren wiederum wird jedoch auch durch die verdichtungsbedingten Auswirkungen auf das Porensystem modifiziert, sodass sich verdichtete Fahrspurböden in ihrem Wasserhaushalt von unbefahrenen Flächen unterscheiden (Hansson et al. 2019). Anhand von kontinuierlichen Untersuchungen der Bodenwasserspannung konnten Fründ und Averdiek (2016) zeigen, dass der Anteil der Messungen mit Bodenwasserspannungen über 300 hPa (Drainage von Grobporen) in der unbefahrenen Fläche in allen drei Untersuchungsjahren deutlich über denen der Fahrspuren lagen. In den Fahrspuren war der Wassergehalt demnach stets höher. Vergleichbare Ergebnisse konnten selbst auch gewonnen werden, wobei festzustellen war, dass die Abweichung der Dynamik der Bodenfeuchte der Fahrspuren von den unbefahrenen Parzellen in Zusammenhang mit der Spurtiefe steht. Während Fahrspuren bis 10 cm Tiefe Ähnlichkeit zu den unbefahrenen Parzellen aufwiesen, waren die Fahrspuren > 10 cm umso feuchter, je tiefer die Spur ausgeprägt war.

Das veränderte Porensystem von verdichteten (Fahrspur-) Böden hat nicht nur Auswirkungen auf die Speicherung und den Transport von Wasser innerhalb des Bodens zur Folge, sondern modifiziert ebenso die Infiltration von Wasser in den Boden. Folgerichtig erscheinen daher die Ergebnisse von Zemke et al. (2019), die eine erhebliche Beeinflussung des Oberflächenabflusses auf den verdichteten Fahrspurböden von Rückegassen (Bodenklasse Andosol) feststellen konnten. Dieser war auf den Rückegassen um den Faktor 8,5 höher, während die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit um ~ 36 % verringert war. Verringerungen der gesättigten und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit konnten auch im vorliegenden Verbundvorhaben festgestellt werden.

Durch die Befahrung auf den Rückegassen werden auch Aufbau und Zusammensetzung des Bodens verändert. Solgi et al. (2015) sowie Naghdi et al. (2016) konnten zeigen, dass mit zunehmender Überrollungshäufigkeit eine Zunahme der Fahrspurtiefe und eine Abnahme der Bedeckung mit Humusauflage

bzw. der Streumenge verbunden ist. Eine Abnahme der Mächtigkeit der Humusaufgabe bei zunehmender Fahrspurtiefe wurde auch seitens der Verbundvorhabenbeteiligten angenommen und stellte sich als zutreffend heraus.

Die Befahrung von Rückegassen wirkt sich nach Naghdi et al. (2016) und Solgi et al. (2019) zudem auf den organischen Kohlenstoffgehalt von Fahrspurböden (Mineralböden) aus, der zusammen mit dem N-Gehalt gegenüber der ungestörten Parzelle signifikant verringert war. Gleiches geben sie für die Gehalte von P und K an. Darüber hinaus konnten die Autoren einen Gradienten hinsichtlich der Befahrungsintensität (Anzahl an Überfahrten) nachweisen.

Als Maßnahme des Bodenschutzes werden auf Rückegassen häufig Matten aus Schlagabraum von gefälltten Bäumen angelegt (sog. Reisigmatten), von denen bekannt ist, dass sie eine gewisse protektive Wirkung besitzen und beispielsweise der Störung des Bodenaufbaus bzw. des vorstehend genannten Verlustes der Humusaufgabe entgegenwirken oder diese abmildern können. Jedoch kommt es durch Ablage von Reisig auch zu einer Konzentration von nährstoffreichem Material auf den Rückegassen, die die Nährstoffausstattung des Bodens beeinflussen kann. Untersuchungen zur Wirkung von Reisigmatten auf Nährelementgehalte und – Vorräte in Böden von Rückegassen wurden in der nahen Vergangenheit von Stutz et al. (2015) und Stutz et al. (2017) veröffentlicht und zeigten, dass durch Armierung der Gassen mit Ernterückständen erhebliche Mengen an Nährelementen dort akkumuliert werden, wodurch die Vorräte von K, Ca und P im Mineralboden über das Maß des unbefahrenen Bodens hinaus ansteigen. Hinweise für eine Einflussnahme der Nährstoffausstattung und Stoffflüsse von Fahrspurböden bedingt durch Reisigmatten, die bei zurückliegenden Holzerntemaßnahmen angelegt wurden, wird in vorliegendem Projekt auch für Fahrspuren der Klasse FS-A (0-10 cm) angenommen. Erheblich höhere Humusvorräte in dieser Fahrspurklasse führen dort beispielsweise zu gesteigerten Raten der Bodenatmung (CO<sub>2</sub>-Flüsse).

Shabaga et al. (2017) untersuchten, ähnlich wie in vorliegendem Verbundvorhaben, die Auswirkungen von variabel verdichteten und gestörten Fahrspurböden auf CO<sub>2</sub>-Flussraten sowie Nährelementgehalte und -vorräte. Sie konnten dabei geringere CO<sub>2</sub>-Flüsse aus den Fahrspurböden verglichen mit den unbefahrenen Flächen messen. Verringerungen von bodenbürtigen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Rückegassen stellten auch Lontsi et al. (2020) fest und wurden ebenso von Vantellingen und Thomas (2021) gemessen und von diesen auf anaerobe Bedingungen und geringere Durchwurzelung zurückgeführt. Beide Autorengruppen, sowie auch Hofbauer et al. (2022), fanden auf Rückegassen zudem signifikante Abnahmen der Methanaufnahmen bzw. die Entstehung von Methanemissionen. Das Ausmaß von Methanemissionen steht nach Vantellingen et al. (2022) in Zusammenhang mit dem zeitlichen Abstand zu Holzerntemaßnahmen sowie der Intensität der Befahrung (Rückegassen- bzw. Fahrspurzustand) und der Lage im Relief (Oberhang, Unterhang etc.). Hohe Methanemissionsraten waren den Autoren zur Folge ein Jahr nach der Holzerntemaßnahme messbar und nahmen im Verlauf der Folgejahre kontinuierlich ab. Nach 15 Jahren hatten sich die Böden erneut zu Methansenken entwickelt, jedoch erreichten die Methan-Oxidationsraten nicht das Level des unbefahrenen Bodens. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen sind im Wesentlichen deckungsgleich mit denen der vorstehend genannten Autoren. So konnten Verringerungen der CO<sub>2</sub>-Flüsse aus den Fahrspurböden > 10 cm (FS-B und FS-C) festgestellt werden. Die Spurtiefe beeinflusst zudem das Ausmaß der Methanoxidation. Diese ist besonders in Fahrspuren > 20 cm (FS-C) stark herabgesetzt, zeitweilig sind vereinzelt Methanfreisetzungen messbar gewesen. Bei den eigenen Untersuchungen blieb der Zeitpunkt nach dem letzten Befahrungereignis jedoch aufgrund fehlender Kenntnis darüber unberücksichtigt, obgleich dies nach der Studie von Vantellingen et al. (2022) eine wichtige Information zur Erklärung und Beurteilung der gefundenen Ergebnisse wäre. Der Rückgang oder Verlust der Methanoxidation bzw. die Entstehung von Methanemissionen steht in Zusammenhang mit der Artenstruktur von im Boden lebenden Mikroorganismen. Changey et al. (2022) konnten zeigen, dass die Methanaufnahme in verdichteten Böden niedriger liegt als in nicht verdichteten und die Häufigkeit der Gen-Abundanzen von Methanotrophen und Methanogenen durch die Bodenverdichtung und jahreszeitliche Dynamik beeinflusst wird. Die Häufigkeit der Gene der Methanoxidierer war mit Ausnahme der Jahreszeiten Winter (0-10 cm Tiefe) und Sommer (10-20 cm Tiefe) im verdichteten Boden signifikant niedriger als in der Kontrolle, wohingegen die archaeale Gen-Abundanz der Methanogenen beider untersuchter Tiefenstufen der verdichteten Böden höher lag als in den nicht verdichteten Referenzparzellen.

Die Wirkung der Verdichtung bleibt nicht auf Bodeneigenschaften beschränkt, sondern nimmt auch Einfluss auf das Wachstum von Gehölzen. Im Jahr 2020 wurden von Mariotti et al. (2020) Ergebnisse einer Metastudie zum Wachstum von Bäumen auf verdichteten Waldböden nach Forsteinsätzen veröffentlicht und negative Auswirkungen aufgezeigt. Die Studie verdeutlicht das Zusammenspiel physikalischer, chemischer und biologischer Parameter in den Waldböden, die befahrungsinduzierte Änderungen erfahren. Die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung der Parameter wird in dieser Studie ebenfalls gefordert und bestätigt das Versuchsdesign des vorliegenden Verbundvorhabens.

#### *Wie kann man die Spurtiefe und ihre Änderung messen?*

Zur Beurteilung des morphologischen Rückegassenzustands während bzw. nach eines Befahrungereignisses wurden zuletzt verschiedene Methoden untersucht und erprobt. Beispielsweise haben Marra et al. (2018) Fahrspuren unter kontrollierten Bedingungen befahren und diese sowohl mittels eines

Laserscannern als auch manuell vermessen. Die Ergebnisse beider Verfahren korrelierten stark miteinander, sodass die Autoren folgerten, dass automatisierte Messverfahren mittels Laser aufgrund genauerer Messergebnisse bei gleichzeitiger Zeitersparnis zu bevorzugen sind, obgleich lasergestützte Messverfahren auch deutlich höhere Investitionskosten bedeuten.

Weiterhin wurde durch das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF) eine Studie initiiert und abgeschlossen, in der ebenfalls eine lasergestützte Messung der Fahrspurtiefe erfolgreich durchgeführt wurde. Die Ergebnisse des Projektes „OnTrack“ ergeben einen wesentlichen Fortschritt in der Erfassung von Fahrspurtiefen und deren Verteilung. Im Zuge des vorliegenden Vorhabens stand auch in Aussicht, einen am Thünen-Institut entwickelten Prototypen (Messschieber in Form eines umgedrehten „T“, der auch für die manuelle Spurtiefenmessung in diesem Verbundvorhaben verwendet wurde) weiterzuentwickeln. Die Ergebnisse des „OnTrack“-Projektes übertreffen jedoch die Fähigkeiten des Thünen-Prototypen, sodass dessen Weiterentwicklung nicht weiter verfolgt wurde.

In einem weiteren Versuch von Marra et al. (2021) testeten diese den Nutzen von Drohnen-Aufnahmen zur Bestimmung der Spurtiefe in Rückegassen. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass eine akkurate Erfassung von Spurtiefen mittels dieser Technik möglich ist und zu den manuellen Messungen vergleichbare Ergebnisse liefert.

Einen anderen Ansatz wählten Haas et al. (2018), der Rückschlüsse auf die Verlagerung von Boden in den Fahrspuren liefert. Mittels Metalltracern, die in Fahrspuren in ausgewählten Tiefenstufen vergraben und deren Position bestimmt wurde, konnte deren Lageänderung identifiziert werden, indem diese nach einer Befahrung erneut detektiert wurden. Dafür wurde ein Metalldetektor genutzt. In diesen Versuchen konnte allerdings nur die horizontale Verlagerung ermittelt werden, die im Median 10 cm betrug. Maximale Werte von mehreren Metern wurden allerdings ebenso beobachtet.

Bei der Bewertung von etwaigen Schädigungen des Bodens wurden ebenso Fortschritte erzielt. Hierfür haben beispielsweise Riggert et al. (2019) ein Bewertungsschema vorgestellt, bei dem durch visuelle Ansprache von Bodenverformungen auf befahrungsbedingte Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften geschlossen werden kann. Das Modell bleibt jedoch auf die Disziplin der Bodenphysik beschränkt und lässt ökologische Veränderungen außer Acht.

#### *Welche Zeitspannen nimmt die Regeneration von Bodenverdichtungen im Wald ein?*

Ein umfangreiches Betätigungsfeld im Bereich der Forschung zur Verdichtung von Rückegassen nimmt der Aspekt der Regenerationsfähigkeit von Waldböden und die Frage nach den Zeitspannen ein, die für die Wiederherstellung ursprünglicher Bodeneigenschaften benötigt werden. Dementsprechend werden hierzu regelmäßig Veröffentlichungen erstellt, wobei die Aussagen zu den Regenerationsdauern kontrovers diskutiert werden und zwischen den Autoren und den untersuchten Waldflächen teils erheblich variieren.

DeArmond et al. (2021) werteten 121 Studien zum Themenbereich aus verschiedenen Waldbiomen mit dem Befund aus, dass die Mehrzahl der Studien, die sich auf Zeitspannen der Bodenregeneration von einer Dekade oder weniger bezogen, zu dem Schluss kamen, dass *intensiv* befahrene Rückegassen sich innerhalb dieser Periode nicht regenerierten. Rückegassen mit geringer Befahrungsintensität erholten sich dagegen vollständig. Unter Berücksichtigung aller betrachteten Waldbiome bestehen die Folgen der Verdichtung mindestens für zwei bis fünf Dekaden nach den Holzerntemaßnahmen (verringerte Baumhöhen und -volumina auf Rückegassen). Sie geben auch an, dass die Untersuchungen der letzten 50 Jahre im globalen Maßstab anzeigen, dass eine Regeneration stattfindet – wenn auch nur langsam.

Exempel für aktuelle Studien mit Untersuchungszeiträumen von wenigen Jahren wurden von Jankovský et al. (2019), Jourgholami et al. (2020) und Nasirian et al. (2022) veröffentlicht. Diese geben an, dass die untersuchten Zeitspannen von 5-7 Jahren entweder zu keiner signifikanten Regeneration verglichen mit den unbefahrenen Referenzen geführt hatten, oder sich der Status der Bodenverdichtung bzw. untersuchter chemischer und physikalischer Messgrößen noch nicht auf das Ausgangsniveau zurück entwickelt hatten. Bei Nasirian et al. (2022) konnten jedoch nach 7 Jahren keine signifikanten Unterschiede mehr bei der Menge der organischen Substanz zwischen Rückegasse und Referenzparzelle gefunden werden.

Studien, die den Regenerationszustand nach mehr als 10 Jahren prüften, wurden beispielsweise von DeArmond et al. (2019) und Tavankar et al. (2022) durchgeführt. Beide Autorengruppen befassten sich neben physikochemischen Bodeneigenschaften mit der Anzahl bzw. den ökologischen Eigenschaften von Sämlingen und jungen Bäumen, die auf verdichteten Rückegassen wuchsen. DeArmond et al. (2019) kamen nach 24 bzw. 30 Jahren Regenerationszeit zu dem Ergebnis, dass die Anzahl junger Bäume (> 150 cm) je Quadratmeter in den Rückegassen immer noch geringer war als in den Referenzflächen und sich zudem zwischen den Fahrspuren mehr junge Bäume befanden als in den Fahrspuren. Trotz partieller Erholung des gestörten Bodens (Ferralsol, Brasilien) schlussfolgern die Autoren, dass 30 Jahre für eine vollständige Regeneration nicht ausreichen. Tavankar et al. (2022) berichten nach 30 Jahren Regenerationszeit von einem positiven Trend bei der Entwicklung von Eigenschaften des Bodens und der Sämlinge, die sich in Dichte und Artenvielfalt vollständig erholt hatten, jedoch in ihrer Qualität noch nicht an jene der unbefahrenen Flächen heranreichten. Sie stellen zudem heraus, dass der Zeitbedarf für die Erholung von der vorangegangenen Befahrungsintensität und auch der Hangneigung abhängig ist.

Anhand von Bestimmungen der Feinwurzeldichte, der Makroporen und der Gasdiffusion untersuchte Schäffer (2022) den Regenerationserfolg von Schluff- und Lehmsubstraten. Nach zurückliegender Befahrung von 10 oder mehr Jahren, zeigten die meisten Böden den Beginn der Bodenstrukturholung innerhalb der ersten 10 cm an. Der Autor verweist jedoch auf die hohe Persistenz der Unterbodenverdichtung und schlussfolgert insgesamt, dass Zeitspannen von fast 40 Jahren für die Erholung der Bodenfunktionalität von schluffig-lehmigen Böden mit geringer biotischer Aktivität nicht ausreichend sind und leitet daraus einen Bedarf an Bodenschutzstrategien, deren Anwendung und striktem Monitoring sowie gegebenenfalls aktive Maßnahmen zur Regenerationsförderung ab. Ein Beispiel für eine aktive Maßnahme zur Förderung der Bodenregeneration ist in Jourgholami et al. (2021) gegeben, bei der die Wirkung von zwei Maßnahmen, die Inkorporation von Streu in den Boden vor Befahrung sowie das Mulchen nach Befahrung, geprüft wurde. Diese führten nach zwei Jahren zwar nicht zu einer vollständigen Erholung von Bodeneigenschaften, bewirkten jedoch eine Beschleunigung des Regenerationsprozesses. Den Befund des Beginns der Erholungsdynamik ausgehend von der Bodenoberfläche stellen auch Mohieddin et al. (2019), die den Eindringwiderstand auf Fahrspuren auf einem Podsol und einer Parabraunerde mittels einer Chronosequenz untersuchten. Unter Verwendung eines Modells berechneten die Autoren Zeitspannen für eine vollständige Erholung von 54 (Parabraunerde) bzw. 70 Jahren (Podsol) und liegen somit außerhalb einer Dauer von 50 Jahren für die Erholung der Böden von der befahrungsinduzierten Verdichtung.

Auch die Unterscheidung zwischen Ober- und Unterboden ist hinsichtlich des Regenerationsvermögens des Bodens zu beachten. So fanden Fernández et al. (2019) in ihrer Studie heraus, dass technische Maßnahmen und die Pflanzung von Schwarzerlen zwar zu einer Verbesserung der Bodenstruktur führten, dies aber lediglich im Oberboden der Fall war. Tieferliegende Verdichtung des Unterbodens ist ein langanhaltendes Problem, welches nicht sensitiv gegenüber Renaturierungsmaßnahmen zu sein scheint.

Dass die Zeit ein entscheidender Faktor für die Reperation von Bodeneigenschaften ist, ist naheliegend, da diese auch eine der Einflussvariablen der Bodenbildung ist (z.B. Eitel 2001). Entsprechend ist davon auszugehen, dass sich auch Rückegassen in ihrer Gesamtheit sowie ihre Fahrspuren im Verlauf der Zeit in Morphologie und Tiefe der Fahrspuren verändern. Erkenntnisse zur Veränderung von Spurtiefen im Zeitverlauf konnten von Ilintsev et al. (2020) gewonnen werden. Ausgehend von im Mittel rd. 36 cm Spurtiefe ein Jahr nach einer Holzerntemaßnahme, geben die Autoren an, dass sich die Spurtiefe in deren Untersuchungsgebiet nach 15 Jahre auf einen Mittelwert von ca. 18 cm verringerte.

Die Auswahl an vorgestellten Veröffentlichungen zur Regeneration von Verdichtungen von Waldböden gibt einen Einblick in die Wirkung und die Dauerhaftigkeit der verursachten Bodenstrukturveränderungen, die für die Funktionalität, Stabilität und Produktivität des Boden- wie auch Waldökosystems bedeutungsvoll sind. Gleichzeitig verdeutlichen sie die Wichtigkeit von vorsorgenden Schutzmaßnahmen, um schädliche Bodenveränderungen zu verhindern bzw. möglichst gering zu halten. Der vorsorgende Bodenschutz umfasst verschiedene Maßnahmen, die einen Beitrag leisten, von der Bewirtschaftung ausgehende Gefährdungen auf den Boden zu minimieren. Mittels der Auswertung von ~ 100 wissenschaftlichen Veröffentlichungen, konnten Labelle et al. (2022) u. A. zeigen, dass Karten zur Befahrbarkeit ein hilfreiches Instrument zur Reduzierung von Bodenschäden sind, insbesondere dann, wenn sie mit regelmäßig aktualisierten meteorologischen Informationen verknüpft werden. Dieser Befund stützt die aus dem vorliegenden Verbundvorhaben angestrebte, nachfolgende Überarbeitung des bestehenden Merkblattes der Niedersächsischen Landesforsten zum Schutz des Waldbodens bei Befahrung (AG Bodenschutz 2015), die auch eine Anpassung der enthaltenen Schwellenwerte für schluff- und tongeprägte Standorte sowie eine weitere Verbesserung der bestehenden Gefährdungskarte zur Befahrbarkeit von Waldböden umfassen soll. Verbesserungen bei der Vorhersage von geeigneten Befahrbarkeitstagen, sollen im Rahmen des bereits erwähnten Folgeprojektes (Thünen-Institut, Akronym „CritTrails“, FNR Fördernummer 2220NR039X) vorangetrieben werden.

## 5. Veröffentlichungen

### 5.1 Teilvorhaben 1

#### **Forstwissenschaftliche Tagung – Göttingen** (September 2018)

Poster Titel: „Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte“

#### **Jahrestagung DVFFA Sektion Waldernährung – Davos** (Juni 2019)

Poster Titel: „Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte“

#### **Forstwissenschaftliche Tagung – online** (Februar 2021)

Vortrag Titel: „Fahrsputtiefe als Einflussgröße von Bodenwasserspannung, Bodenrespiration und mikrobiellen Parametern in Rückegassen“

#### **Jahrestagung DVFFA Sektion Waldernährung – Nürnberg** (September 2022)

Vortrag Titel: „Sputtiefe als Einflussgröße für bodenbiologische und chemische Eigenschaften von Fahrsperböden in Rückegassen“

#### **Fachbeitrag AFZ – Der Wald** (ausstehend Frühling 2023)

#### **Ggf. Fachbeitrag AFJZ oder Waldökologie online** (ausstehend Frühling 2023)

### 5.2 Teilvorhaben 2

#### **BoNaRes Konferenz – Berlin** (Februar 2018)

Poster Titel: „Investigation and assessment of soil functions – derivation of solution strategies for a soil-protective timber harvest“

#### **EGU Tagung – Wien (Österreich)** (April 2018)

Poster Titel: „Soil protection in highly mechanized timber harvest – influence of forestry vehicles on morphology and soil physics of skid trails“

#### **Forstwissenschaftliche Tagung – Göttingen** (September 2018)

Poster Titel: „Bodenschutz in der hochmechanisierten Holzernte – Einfluss forstlicher Fahrzeuge auf die Morphologie und Bodenphysik in Rückegassen“

#### **Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft – Bern (Schweiz)** (August 2019)

Poster Titel: „Influence of forestry vehicles on *in situ* retention characteristics of forest soils“

#### **EGU Tagung – Wien (Österreich)** (April 2023)

Poster Titel: „The deeper the lane, the stronger the changes: Soil physical properties of forest skid trails and their spatial distribution“

#### **Wissenschaftliches Paper**

Soil physical properties of different lane depths in forestry skid trails and their spatial distribution (ausstehend Frühling 2023)

#### **Wissenschaftliches Paper**

Soil hydraulic retention characteristics of compacted skid trail soils (Arbeitstitel) (ausstehend Winter 2023/2024)

#### **Wissenschaftliches Paper**

Soil water content prediction in skid trails (Arbeitstitel) (ausstehend Herbst 2024)

### 5.3 Teilvorhaben 1 + 2

#### Expertenworkshop Bodenschutz (März 2022)

##### Teilnehmer/Vertreter aus folgenden Institutionen:

- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz
- Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg
- Fraunhofer Institut Magdeburg – Geschäftsfeld Logistik und Fabrikssysteme
- Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Göttingen
- Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
- Landesforst Mecklenburg-Vorpommern
- Lehranstalt für Forstwirtschaft Schleswig-Holstein/Hamburg
- Niedersächsisches Forstplanungsamt
- Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
- Staatsbetrieb Sachsenforst
- Thünen-Institut für Agrartechnologie Braunschweig
- Thüringenforst
- Universität Freiburg
- Universität Göttingen

Vortrag TV1: „Fahrspurtiefe als Einflussgröße bodenbiologischer, -chemischer und -ökologischer Kenngrößen“

Vortrag TV2: „Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen – Ableitung von Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte. Teilvorhaben 2: Bodenphysikalische Eigenschaften“

Vortrag TV1+TV2: „Bodenfunktionsbewertung im Projekt BoSchuHoErn“

#### Exkursion im Rahmen der 70. Forstvereinstagung (Mai 2022)

Vortrag TV1: „Fahrspurtiefe beeinflusst bodenphysikalische, -biologische und chemische Bodeneigenschaften“

Vortrag TV2: „Ergebnisse Projekt „BoSchuHoErn“ – Teilvorhaben 2: Bodenphysikalische Daten und Messensorik“

#### Betriebsleitung Niedersächsische Landesforsten (August 2022)

Vortrag TV1: „Fahrspurtiefe beeinflusst bodenphysikalische, -biologische und chemische Bodeneigenschaften“

Vortrag TV2: „Ergebnisse Projekt „BoSchuHoErn“ – Teilvorhaben 2: Bodenphysikalische Daten und Messensorik“

### III. Quellenverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5)*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland und unter Mitwirkung von Fachkollegen aus dem Bodenschutz, 5. Aufl.
- AG Bodenschutz (2015): Bodenschutz bei der Holzernte in den Niedersächsischen Landesforsten
- Ampoorter, E., de Schrijver, A., van Nevel, L., Hermy, M. und 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, Nr. 5 (Juli): 533–542. doi: 10.1007/s13595-012-0199-y
- Baayen, R.H., Davidson, D.J. und Bates, D.M. (2008): Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language* 59, Nr. 4. Special Issue: Emerging Data Analysis (1. November): 390–412. doi: 10.1016/j.jml.2007.12.005
- Bachmann, G., König, W. und Utermann, J., Hrsg. (2015): Hin zu einer Bodenschutzstrategie. Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen (Brüssel, 16.4.2002, KOM(2002) 179 endgültig). In: *Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, 1.: Berlin: Erich Schmidt
- Badeck, F.W., Beese, F., Berthold, D., Einert, P., Jochheim, H., Kallweit, R., Konopatzky, A. et al. (2007): FOREST FOCUS Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen des Kohlenstoffumsatzes in Waldökosystemen und deren Böden. Abschlussbericht
- Baek, K., Lee, E., Choi, H., Cho, M., Choi, Y. und Han, S. (2022): Impact on Soil Physical Properties Related to a High Mechanization Level in the Row Thinning of a Korean Pine Stand. *Land* 11, Nr. 3 (März): 329. doi: 10.3390/land11030329
- Bates, D., Maechler, M. und Walker, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01
- Blum, W.E.H. (2012): *Bodenkunde in Stichworten*. 7., neu bearb. Aufl. Hirt's Stichwortbücher. Stuttgart: Borntraeger
- BMELV, Hrsg. (2011): Waldstrategie 2020, Nachhaltige Waldbewirtschaftung - eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
- Bürkner, P.-C. (2017): brms: An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *Journal of Statistical Software*, 80(1), 1-28. doi: 10.18637/jss.v080.i01
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F. und Marchi, E. (2015): The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338 (Februar): 124–138. doi: 10.1016/j.foreco.2014.11.022
- Changey, F., Aissaoui, G., Plain, C., Ranger, J., Legout, A., Zeller, B., Epron, D. und Lerch, T.Z. (2022): Prolonged Effect of Forest Soil Compaction on Methanogen and Methanotroph Seasonal Dynamics. *Microbial Ecology* (21. November). doi: 10.1007/s00248-022-02149-8 <https://doi.org/10.1007/s00248-022-02149-8> (zugegriffen: 21. Dezember 2022)
- DeArmond, D., Emmert, F., Lima, A.J.N. und Higuchi, N. (2019): Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research* 189 (1. Juni): 207–216. doi: 10.1016/j.still.2019.01.010
- DeArmond, D., Ferraz, J.B.S. und Higuchi, N. (2021): Natural recovery of skid trails: a review. *Canadian Journal of Forest Research* 51, Nr. 7 (Juli): 948–961. doi: 10.1139/cjfr-2020-0419
- Dittrich, F., Averdiek, A. und Fründ, H.-C. (2017): Eisenstäbe als Indikatoren der Bodenbelüftung – Erfahrungen bei der Beurteilung landwirtschaftlicher Flächen. In: *Jahrestagung der DBG, Kommission I: Horizonte des Bodens*, 5. Göttingen

- Durner, W., Alina, M., Thomas, P. und Sascha C, I. (2021): Determining the particle-size distribution of soil materials with the integral suspension pressure (ISP) method-lessons learned from PARIO measurements. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU21-9092
- Durner, W., Huber, M., Yangxu, L., Steins, A., Pertassek, T., Göttlein, A., Iden, S.C. und von Unold, G. (2017): Testing the ISP method with the PARIO device: Accuracy of results and influence of homogenization technique. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 9422
- Dymov, A.A., Startsev, V.V., Gorbach, N.M., Severgina, D.A., Kutuyavin, I.N., Osipov, A.F. und Dubrovsky, Yu.A. (2022): Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science* 55, Nr. 11 (1. November): 1633–1646. doi: 10.1134/S1064229322110023
- Eitel, B. (2001): *Bodengeographie*. Hrsg. Duttmann, R, Glawion, R, Popp, H und Schneider-Sliwa, R. Das Geographische Seminar. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH
- Fernández, J.F., Rubin, L., Hartmann, P., Puhlmann, H. und von Wilpert, K. (2019): Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. *Forest ecology and management* 431: 54–62
- Froehlich, H.A. (1979): Soil compaction from logging equipment: Effects on growth of young ponderosa pine. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 34, Number 6: 276–278
- Fründ, H.-C. (2020): Erprobung von Eisenstäben zum Erkennen von Bodenbelüftungsstörungen in Buchenbeständen auf Keuper im Steigerwald. Unveröffentlichtes Manuskript, zu beziehen bei: hc.fruend@gmx.de. Osnabrück, 20. Januar
- Fründ, H.-C. und Averdiek, A. (2016): Soil aeration and soil water tension in skidding trails during three years after trafficking. *Forest Ecology and Management* 380 (November): 224–231. doi: 10.1016/j.foreco.2016.09.008
- Greacen, E. und Sands, RR. (1980): Compaction of Forest Soils: A Review. *Australian Journal of Soil Research* 18. doi: 10.1071/SR9800163
- Haas, J., Fenner, P.T., Schack-Kirchner, H. und Lang, F. (2018): Quantifying soil movement by forest vehicles with corpuscular metal tracers. *Soil and Tillage Research* 181 (1. September): 19–28. doi: 10.1016/j.still.2018.03.012
- Hansson, L., Šimůnek, J., Ring, E., Bishop, K. und Gärdenäs, A.I. (2019): Soil Compaction Effects on Root-Zone Hydrology and Vegetation in Boreal Forest Clearcuts. *Soil Science Society of America Journal*
- Hansson, L.J., Koestel, J., Ring, E. und Gärdenäs, A.I. (2018): Impacts of off-road traffic on soil physical properties of forest clear-cuts: X-ray and laboratory analysis. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33, Nr. 2 (17. Februar): 166–177. doi: 10.1080/02827581.2017.1339121
- Heppelmann, J.B., Talbot, B., Antón Fernández, C. und Astrup, R. (2022): Depth-to-water maps as predictors of rut severity in fully mechanized harvesting operations. *International Journal of Forest Engineering* 33, Nr. 2 (4. Mai): 108–118. doi: 10.1080/14942119.2022.2044724
- Hildebrand, E.E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 102, Nr. 1 (Dezember): 111–125. doi: 10.1007/BF02741844
- Hofbauer, A., Michel, K. und Kitzler, B. (2022): Impact of forest management and soil compaction on soil GHG fluxes of a temperate forest. Copernicus Meetings. doi: 10.5194/egusphere-egu22-7651 <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-7651.html> (zugegriffen: 21. Dezember 2022)
- Hothorn, T., Bretz, F. und Westfall, P. (2008): Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50(3), 346-363
- Ilintsev, A., Bogdanov, A., Nakvasina, E., Amosova, I., Koptev, S. und Tretyakov, S. (2020): The natural recovery of disturbed soil, plant cover and trees after clear-cutting in the boreal forests, Russia. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 13, Nr. 6: 531. doi: 10.3832/ifor3371-013

- Ilintsev, A., Nakvasina, E., Högbom, L. und Bogdanov, A. (2022): Influence of ruts on the physical properties of Gleyic Retisols after logging machinery passage. *Scandinavian Journal of Forest Research* 37, Nr. 4 (19. Mai): 254–263. doi: 10.1080/02827581.2022.2085785
- Jankovský, M., Allman, M., Allmanová, Z., Ferenčík, M. und Vlčková, M. (2019): Changes of key soil parameters five years after forest harvesting suggest slow regeneration of disturbed soil. *Journal of Sustainable Forestry* 38, Nr. 4 (19. Mai): 369–380. doi: 10.1080/10549811.2018.1549500
- Jourgholami, M., Khajavi, S. und Labelle, E.R. (2020): Recovery of Forest Soil Chemical Properties Following Soil Rehabilitation Treatments: an Assessment Six Years after Machine Impact. *Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 41, Nr. 1 (31. Januar): 163–175. doi: 10.5552/crojfe.2020.620
- Jourgholami, M., Khoramizadeh, A., Lo Monaco, A., Venanzi, R., Latterini, F., Tavankar, F. und Picchio, R. (2021): Evaluation of Leaf Litter Mulching and Incorporation on Skid Trails for the Recovery of Soil Physico-Chemical and Biological Properties of Mixed Broadleaved Forests. *Land* 10, Nr. 6 (Juni): 625. doi: 10.3390/land10060625
- Labelle, E.R., Hansson, L., Högbom, L., Jourgholami, M. und Laschi, A. (2022): Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: a Comprehensive Review. *Current Forestry Reports* 8, Nr. 1 (1. März): 20–37. doi: 10.1007/s40725-021-00155-6
- Lambrecht, H., Rohr, A., Kruse, K. und Angersbach, J. (2003): *Länderfinanzierungsprogramm „Wasser und Boden“ Themenschwerpunkt „Empfehlung zur Klassifikation von Böden für räumliche Planungen“ - Zusammenfassung und Strukturierung von relevanten Methoden und Verfahren zur Klassifikation und Bewertung von Bodenfunktionen für Planungs- und Zulassungsverfahren mit dem Ziel der Vergleichbarkeit - Im Auftrag der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). Endbericht.* Hannover: Planungsgruppe Ökologie + Umwelt GmbH
- Lebert, M. und Böken, H. (2015): Kriterien zur Erkennung von Bodengefügeschäden. In: *Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, hrsg. Bachmann, G, König, W und Utermann, J, 2.: Berlin: Erich Schmidt
- Lemoine, N.P. (2019): Moving beyond noninformative priors: why and how to choose weakly informative priors in Bayesian analyses. *Oikos* 128, Nr. 7: 912–928. doi: 10.1111/oik.05985
- Lenth, R.V. (2021): emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.6.1. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Lontsi, T.R., Corre, M.D., Iddris, N.A. und Veldkamp, E. (2020): Soil greenhouse gas fluxes following conventional selective and reduced-impact logging in a Congo Basin rainforest. *Biogeochemistry* 151, Nr. 2 (1. Dezember): 153–170. doi: 10.1007/s10533-020-00718-y
- Lüscher, P., Frutig, F., Sciacca, S., Spjevak, S. und Thees, O. (2010): *Physikalischer Bodenschutz im Wald - Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen.* Hrsg. Eidg. Forschungsanstalt WSL. 2. Aufl. Merkblatt für die Praxis 45. Birmensdorf
- Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E. und Marchi, E. (2020): Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 462 (15. April): 118004. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118004
- Marra, E., Cambi, M., Fernandez-Lacruz, R., Giannetti, F., Marchi, E. und Nordfjell, T. (2018): Photogrammetric estimation of wheel rut dimensions and soil compaction after increasing numbers of forwarder passes. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33, Nr. 6 (18. August): 613–620. doi: 10.1080/02827581.2018.1427789
- Marra, E., Wictorsson, R., Bohlin, J., Marchi, E. und Nordfjell, T. (2021): Remote measuring of the depth of wheel ruts in forest terrain using a drone. *International Journal of Forest Engineering* 32, Nr. 3 (2. September): 224–234. doi: 10.1080/14942119.2021.1916228
- Miller, A., Pertassek, T., Steins, A., Durner, W., Göttlein, A., Petrik, W. und von Unold, G. (2017): The new PARIOTM device for determining continuous particle-size distributions of soils and sediments. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 16452

- Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaissi, A. und Horen, H. (2019): Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management* 449 (1. Oktober): 117472. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117472
- Müller-Inkmann, M., Averdiek, A. und Fründ, H.-C. (2016): Eisenstäbe zur Erfassung der Bodenbelüftung. *AFZ-DerWald* 8: 22–24
- Naghdi, R., Solgi, A. und Ilstedt, U. (2016): Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. *Geoderma* 265 (1. März): 12–18. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.11.009
- Naghdi, R., Solgi, A., Rahmani, P. und Tsioras, P.A. (2022): Combined effects of ground pressure, traffic intensity, and travel speed levels on selected soil physical properties. Preprint. In Review. doi: 10.21203/rs.3.rs-2103114/v1 <https://www.researchsquare.com/article/rs-2103114/v1> (zugegriffen: 21. Dezember 2022)
- Nasirian, A., Jourgholami, M. und Heidari, A. (2022): Effects of timber extraction on soil physical properties and organic carbon recovery during seven years after trafficking in Gorazbon District in Kheyroud Forest. *Forest and Wood Products* 75, Nr. 2 (23. August): 95–105. doi: 10.22059/jfwp.2021.329570.1184
- Nazari, M., Eteghadipour, M., Zarebanadkouki, M., Ghorbani, M., Dippold, M.A., Bilyera, N. und Zamanian, K. (2021): Impacts of Logging-Associated Compaction on Forest Soils: A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change* 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.780074> (zugegriffen: 27. Oktober 2022)
- Nolting, K., Brunotte, J., Lorenz, M. und Sommer, C. (2006): Bodenverdichtung: Bewegt sich was? - Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. *2006* 61, Nr. 4 (28. August): 2. doi: 10.15150/lt.2006.1093
- Ottow, J.C.G. (2011): *Mikrobiologie von Böden: Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer
- Owens, P.R., Wilding, L.P., Miller, W.M. und Griffin, R.W. (2008): Using iron metal rods to infer oxygen status in seasonally saturated soils. *CATENA* 73, Nr. 2 (April): 197–203. doi: 10.1016/j.catena.2007.07.009
- Pandur, Z., Korseak, H., Šušnjar, M., Landekić, M., Šporčić, M. und Bačić, M. (2022): Effect of forwarder multipassing on forest soil parameters changes. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 15, Nr. 6: 476. doi: 10.3832/ifor4138-015
- Pertassek, T., Peters, A. und Durner, W. (2011): HYPROP Data Evaluation Software, User's Manual. *Umwelt Monitoring Systeme GmbH, München, Germany*
- R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Riggert, R., Fleige, H. und Horn, R. (2019): An Assessment Scheme for Soil Degradation Caused by Forestry Machinery on Skid Trails in Germany. *Soil Science Society of America Journal* 83, Nr. S1: S1–S12. doi: 10.2136/sssaj2018.07.0255
- Sadeghi, S., Solgi, A. und Tsioras, P.A. (2022): Effects of traffic intensity and travel speed on forest soil disturbance at different soil moisture conditions. *International Journal of Forest Engineering* 33, Nr. 2 (4. Mai): 146–154. doi: 10.1080/14942119.2022.2055442
- Schack-Kirchner, H., Fenner, P.T. und Hildebrand, E.E. (2007): Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest. *Soil Use and Management* 23, Nr. 3: 286–293. doi: 10.1111/j.1475-2743.2007.00096.x
- Schack-Kirchner, H. und Hildebrand, E.E. (1994): Bodenschäden beim Harvester- und Forwardereinsatz. *Forst & Technik* 6: 18–19
- Schäffer, J. (2022): Recovery of Soil Structure and Fine Root Distribution in Compacted Forest Soils. *Soil Systems* 6, Nr. 2 (Juni): 49. doi: 10.3390/soilsystems6020049

- Schmidt-Walter, P., Köhler, M. und Nuske, R. (2021): KSPclimpredict: Predict Daily Climate Parameters, Beginning and End of Vegetation Period, and Forest Fire Danger. R package version 0.5.4. <https://git.nw-fva.de/KSP/KSPclimpredict>
- Shabaga, J.A., Basiliko, N., Caspersen, J.P. und Jones, T.A. (2017): Skid trail use influences soil carbon flux and nutrient pools in a temperate hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 402 (15. Oktober): 51–62. doi: 10.1016/j.foreco.2017.07.024
- Shepperd, W.D. (1993): The Effect of Harvesting Activities on Soil Compaction, Root Damage, and Suckering in Colorado Aspen. *Western Journal of Applied Forestry* 8, Nr. 2 (1. April): 62–66. doi: 10.1093/wjaf/8.2.62
- Signorell, A. und mult. al. (2021): DescTools: Tools for descriptive statistics. R package version 0.99.44. <https://cran.r-project.org/package=DescTools>
- Solgi, A., Naghdi, R., Marchi, E., Laschi, A., Keivan Behjou, F., Hemmati, V. und Masumian, A. (2019): Impact Assessment of Skidding Extraction: Effects on Physical and Chemical Properties of Forest Soils and on Maple Seedling Growing along the Skid Trail. *Forests* 10, Nr. 2 (Februar): 134. doi: 10.3390/f10020134
- Solgi, A., Naghdi, R. und Nikooy, M. (2015): Effects of Skidder on Soil Compaction, Forest Floor Removal and Rut Formation. *Madera y Bosques* Vol. 21, Num. 2: 147–155
- Stutz, K., Schack-Kirchner, H., Kändler, G., Landes, L., Linz, M., Warlo, H. und Lang, F. (2017): Available Nutrients Can Accumulate in Permanent Skid Trails. *Forests* 8 (23. September): 358. doi: 10.3390/f8100358
- Stutz, K., Schack-Kirchner, H., Kändler, G. und Lang, F. (2015): Phosphorus in accumulated harvest residues on skid trails. *Forest Ecology and Management* 356 (15. November): 136–143. doi: 10.1016/j.foreco.2015.07.025
- Tavankar, F., Nikooy, M., Ezzati, S., Jourgholami, M., Latterini, F., Venanzi, R. und Picchio, R. (2022): Long-term assessment of soil physicochemical properties and seedlings establishment after skidding operations in mountainous mixed hardwoods. *European Journal of Forest Research* 141, Nr. 4 (1. August): 571–585. doi: 10.1007/s10342-022-01461-9
- Tavankar, F., Picchio, R., Nikooy, M., Jourgholami, M., Latterini, F. und Venanzi, R. (2021): Effect of soil moisture on soil compaction during skidding operations in poplar plantation. *International Journal of Forest Engineering* 32, Nr. 2 (4. Mai): 128–139. doi: 10.1080/14942119.2021.1878802
- TMLNU, Hrsg. (2008): Bodenschutz und Holzernte. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz, und Umwelt (TMLNU)
- Toivio, J., Helmisaari, H.-S., Palviainen, M., Lindeman, H., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M. und Uusitalo, J. (2017): Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 405 (1. Dezember): 22–30. doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.022
- Uusitalo, J., Ala-Ilomäki, J., Lindeman, H., Toivio, J. und Siren, M. (2020): Predicting rut depth induced by an 8-wheeled forwarder in fine-grained boreal forest soils. *Annals of Forest Science* 77, Nr. 2 (20. April): 42. doi: 10.1007/s13595-020-00948-y
- Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal* 44, Nr. 5: 892–898
- Vantellingen, J., Gorgolewski, A.S. und Thomas, S.C. (2022): Post-harvest recovery of soil methane oxidation on skid trails and landings in a managed northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 515 (1. Juli): 120202. doi: 10.1016/j.foreco.2022.120202
- Vantellingen, J. und Thomas, S.C. (2021): Skid Trail Effects on Soil Methane and Carbon Dioxide Flux in a Selection-Managed Northern Hardwood Forest. *Ecosystems* 24, Nr. 6 (September): 1402–1421. doi: 10.1007/s10021-020-00591-8
- Wood, S.N. (2011): Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* 73(1):3-36

- Yao, Y., Vehtari, A., Simpson, D. und Gelman, A. (2018): Using Stacking to Average Bayesian Predictive Distributions (with Discussion). *Bayesian Analysis* 13, Nr. 3 (September): 917–1007. doi: 10.1214/17-BA1091
- Zemke, J.J., Enderling, M., Klein, A. und Skubski, M. (2019): The Influence of Soil Compaction on Runoff Formation. A Case Study Focusing on Skid Trails at Forested Andosol Sites. *Geosciences* 9, Nr. 5 (Mai): 204. doi: 10.3390/geosciences9050204

#### IV. Anhang Schlussbericht

##### Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Versuchsgassenbezeichnungen .....	164
Anhang 2: Methodik und Ergebnisse der Modellierung der Bodenwasserspannung .....	164
Anhang 3: Methodik der Modellierung der Gasflussmessungen des Jahres 2021 .....	168

##### Anhang 1: Versuchsgassenbezeichnungen

Tabelle 19: Übersicht über Versuchsgassenbezeichnungen nach Behandlungsgruppen differenziert nach den Bezeichnungen in der Übersichtskarte und in den Datensätzen.

"Situationen" S7-S12			"Situationen" S1-S6		"Situationen" S13-S18		
Gruppe A (> 0 <= 10 cm)			Gruppe B (> 10 <= 20 cm)		Gruppe C (> 20 <= 30 cm)		
TV1	TV2		TV1	TV2	TV1	TV2	
Datensatz+Karte	Datensatz	Karte	Datensatz+Karte	Datensatz+Karte	Datensatz+Karte	Datensatz	Karte
VG23	VG18e	VG53	VG08	VG08	VG17	VG17b	VG71
VG28	VG28b	VG82	VG09	VG09	VG18	VG18c	VG49
VG32	VG29	VG29	VG10	VG10	VG19	VG18d	VG48
VG34	VG31	VG31	VG11	VG11	VG21	VG20	VG20
VG35	VG33a	VG33	VG12	VG12	VG81	VG37a	VG37
VG43	VG33b	VG30	VG15	VG15	VG36	VG37b	VG73
					VG38		
					VG83		

##### Anhang 2: Methodik und Ergebnisse der Modellierung der Bodenwasserspannung

Von Holger Sennhenn-Reulen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

**Indikatorfunktion** Für die Notation wird im Folgenden die Indikatorfunktion genutzt:

$$I_{\{\text{Bedingung}\}} := \begin{cases} 0, & \text{Bedingung ist erfüllt} \\ 1, & \text{Bedingung ist nicht erfüllt} \end{cases}$$

### 1 Datenstruktur

Die gemessenen Werte der Bodenfeuchte mittels der Watermark-Sensoren werden im Folgenden allgemein als  $y_{i,t}$  bezeichnet. Die Werte sind positiv und nach oben bei dem Wert 239 cbar (kPa) zensiert. Ein hoher Wert bedeutet „Boden mit geringer Wassersättigung“ (trocken), ein niedriger Wert bedeutet „Boden mit hoher Wassersättigung“ (feucht bis nass).

Bezüglich der Indexnotation steht  $i$  für die Beobachtungseinheit – den Sensor (Variable *sensor*) – und  $t$  steht für den Zeitpunkt, gemessen zwischen dem 1. März 2019 und dem 31. März 2022. Durch diese wiederholten, longitudinalen Beobachtungen einzelner Beobachtungseinheiten spricht man auch von einer Zeitreihenstruktur der Daten.

#### 1.1 Tägliche Auflösung der Messungen

Die Watermarksensoren waren so eingestellt, dass sie Daten in stündlicher Auflösung aufzeichneten. Für die vorliegende Analyse werden jedoch nur der erste Wert eines Tages genutzt, um zu stark autokorrelierte Messungen zu vermeiden. Ein weiterer Grund ist, dass die Veränderung der Bodenfeuchte mit dem Wetter des Vortages in Verknüpfung gebracht wird. Die meteorologischen Informationen liegen in Tagesauflösung vor, weswegen für stündlich aufgelöste Veränderungen der Bodenfeuchte immer 24 aufeinanderfolgende Werte der Wettereinflüsse konstant wären und demnach mit den Veränderungen nicht in Bezug gebracht werden könnten.

### 2 Statistische Modellierung

In der statistischen Datenanalyse bzw. Modellierung soll ein plausibles Modell für den unbekanntem Prozess gefunden werden, der die Daten erzeugt haben könnte. Dafür soll das Konzept der Zufallsvariable genutzt werden, hier mit  $Y_{i,t}$  bezeichnet, für die wir eine Verteilung  $F_Y$  suchen, die dann künstliche Realisationen,  $\tilde{y}_{i,t}\{y_i, t$ , erzeugen kann, die in den „wesentlichen Merkmalen“ von den tatsächlichen Messungen  $y_{i,t}$  nicht zu unterscheiden sind (dies wird z.B. durch *Posterior Predictive Checks* überprüft). Eine Verteilung  $F_Y$  in bekannter Form, jedoch noch ohne Anpassung der Verteilungsparameter an die Daten, wird als Verteilungsmodell bezeichnet.

## 2.1 Gamma-Verteilung

Wir nutzen die *Gammaverteilung* als Verteilungsmodell:

$$\mathcal{M} : Y_{i,t} \sim \text{Gamma}(\mu_{i,t}, \alpha).$$

Die Dichte der Gammaverteilung in  $\theta = (\mu, \alpha)$ -Parametrisierung ist gegeben durch:

$$p(y) = \frac{(\alpha/\mu)^\alpha}{\Gamma(\alpha)} y^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\alpha y}{\mu}\right),$$

dabei wird im Wesentlichen der bedingte Erwartungswert über Kovariableninformationen modelliert. Dies wird über parameterspezifische lineare Prädiktoren erzielt.

Die Messungen können nicht an jedem Tag komplett beobachtet werden. Ab einer Austrocknung des Bodens von  $> 239$  cbar (kPa), liefern die Sensoren nur noch die Information „239 cbar (kPa)“. Der tatsächliche Wert der Bodenfeuchte könnte auch oberhalb dieser Schwelle liegen. Statt eines einzelnen Messwertes, erhalten wir demnach für jede Beobachtungseinheit zu jedem Tag ein Messvektor mit zwei Elementen,  $(y_i, z_i)$ , wobei das Element  $y_i$  dieses Vektors den Wert der Bodenfeuchte angibt und das weitere Element,  $z_i$ , Information darüber gibt, ob dieser Wert einer tatsächlichen ( $z_i = 0$ ), oder einer zensierten Beobachtung ( $z_i = 1$ ) entspricht. Das zweite Element wird auch als *Zensierungsindikator* bezeichnet.

$$z_i := \mathbb{I}_{\{y_i \geq 239\}} := \begin{cases} 1, & y_i \geq 239 \\ 0, & y_i < 239 \end{cases}$$

Für eine unzensierte Beobachtung erhalten wir den Likelihoodbeitrag:

$$L_i = p(y_i)$$

aus der oberen Dichte der Gammaverteilung und für eine zensierte Beobachtung:

$$L_i = \int_{239}^{\infty} p(\xi) \partial \xi.$$

## 2.3 Logarithmische Linkfunktion

Für den Erwartungswert  $\mu_{i,t}$  arbeiten wir mit der logarithmischen-Linkfunktion, da  $\mu_{i,t}$  positiv ist:

$$\mu_{i,t} = \exp(\eta_{\mu,i,t}).$$

wobei die Exponentialfunktion,  $\exp(\dots)$ , die inverse Funktion der logarithmischen Linkfunktion ist. Dieselbe Positivität muss auch für den zweiten Verteilungsparameter  $\alpha$  eingehalten werden.

## 2.4 Modellierung des bedingten Erwartungswertes

Ein jeder Sensor  $i$  gehört zu einer Fahrspurbehandlung  $k_i$ :

$$k_i \in \{\text{Ref}, \text{FS-A}, \text{FS-B}, \text{FS-C}\}.$$

Zum Zeitpunkt 1, also am Tag der ersten Messung, haben wir keine Information bezüglich des Wetters und der Bodenfeuchte vor diesem Tag. Der bedingte Erwartungswert muss hier also frei geschätzt werden:

$$\mu_{i,1} = \exp\left(\beta_{0,0} + \beta_{0,\text{FS-A}} \mathbb{I}_{\{k_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{0,\text{FS-B}} \mathbb{I}_{\{k_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{0,\text{FS-C}} \mathbb{I}_{\{k_i=\text{FS-C}\}} + \sum_{j=1}^J \left(\mathbb{I}_{\{\text{sensor}_i=j\}} \gamma_j\right)\right)$$

Mit  $\beta$  bezeichnet man die Regressionsparameter (in der frequentistischen Modellierung gemischter Modelle als *fixed effects* bezeichnet), mit  $\gamma$  die Koeffizienten aus einem Gruppierungsterm (in der frequentistischen Modellierung gemischter Modelle als *random effects* bezeichnet). In der Summendarstellung für die Koeffizienten  $\gamma_j$  des Gruppierungsterms – die Gruppierungsvariable ist hier die Sensor-ID *sensor*  $i$  benannt – bezeichnet  $J$  die Anzahl der Sensoren/Gruppen. Dabei nehmen wir die gewöhnliche Normalverteilungsannahme an die Gruppierungstermkoeffizienten  $\gamma$  an:

$$\gamma_j \sim N(0, \sigma_\gamma^2).$$

Wir erhalten demnach:

$$E(Y_{i,1}) = \mu_{i,1}$$

Am Tag 2 erhalten wir einen neuen Bodenfeuchtwert,  $(y_i, z_i)$ , und dazu auch die Werte zu fünf Wettervariablen des Vortags:

$$(y_{i,2}, z_{i,2})^T, x_{1,i,1}, \dots, x_{5,i,1}$$

Dabei sind

$x_1 = \text{exp\_vapdm\_vt\_scaled}$ : wir nehmen an, dass ein hoher Wert die Bodenfeuchte verringert.

vapdm ist der Wasserdampfdruck, welcher mit der Transpiration korreliert ist.

$x_2 = \text{exp\_globrad\_vt\_scaled}$ : wir nehmen an, dass ein hoher Wert die Bodenfeuchte verringert.

Die Globalstrahlung globrad wird aus Sonnenscheindauer, Tageslänge und extraterrestrischer Strahlung nach der ANGSTRÖM-Formel berechnet.

$x_3 = \text{exp\_wsdm\_vt\_scaled}$ : wir nehmen an, dass ein hoher Wert die Bodenfeuchte verringert.

wsdm ist die Windgeschwindigkeit.

$x_4 = \text{exp\_temp\_dmean\_vt\_scaled}$ : wir nehmen an, dass ein hoher Wert die Bodenfeuchte verringert.

dmean ist die Tagesmitteltemperatur.

$x_5 = \text{exp\_rain\_pred\_vt\_scaled}$ : wir nehmen an, dass ein hoher Wert die Bodenfeuchte erhöht.

rain\_pred ist der Niederschlag je Tag.

Dabei ist z.B.:

$$\text{exp\_rain\_pred\_vt}_{i,t} = -1 + \exp\left(\frac{\text{rain\_pred\_vt}_{i,t}}{\max(\text{rain\_pred\_vt})}\right),$$

und weiterhin:

$$\text{exp\_rain\_pred\_vt\_scaled}_{i,t} = \frac{\text{exp\_rain\_pred\_vt}_{i,t}}{\text{sd}(\text{exp\_rain\_pred\_vt})}$$

All diese Wettereinflussvariablen wurden mit dem NW-FVA R-Paket KSPclimpredict (Schmidt-Walter et al. 2021) aus für die Fläche regionalisierten Wetterdaten berechnet. Mit diesen und weiteren Regressionsparametern berechnen wir ein 'Update' des bedingten Erwartungswertes über:

$$\begin{aligned} \mu_{i,2} = & \exp(\log(\mu_{i,1}) + \\ & + x_{1,i,1} \cdot \exp\left(\beta_{1,0} + \beta_{1,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{1,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{1,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{2,i,1} \cdot \exp\left(\beta_{2,0} + \beta_{2,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{2,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{2,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{3,i,1} \cdot \exp\left(\beta_{3,0} + \beta_{3,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{3,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{3,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{4,i,1} \cdot \exp\left(\beta_{4,0} + \beta_{4,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{4,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{4,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) - \\ & - x_{5,i,1} \cdot \exp\left(\beta_{5,0} + \beta_{5,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{5,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{5,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) \end{aligned}$$

Für jeden weiteren Zeitschritt gelangt man zu einem Update auf den aktuellen Zustand durch:

$$\begin{aligned} \mu_{i,t+1} = & \exp(\log(\mu_{i,t}) + \\ & + x_{1,i,t} \cdot \exp\left(\beta_{1,0} + \beta_{1,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{1,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{1,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{2,i,t} \cdot \exp\left(\beta_{2,0} + \beta_{2,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{2,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{2,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{3,i,t} \cdot \exp\left(\beta_{3,0} + \beta_{3,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{3,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{3,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) + \\ & + x_{4,i,t} \cdot \exp\left(\beta_{4,0} + \beta_{4,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{4,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{4,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) - \\ & - x_{5,i,t} \cdot \exp\left(\beta_{5,0} + \beta_{5,FS-A} I_{\{k_i=FS-A\}} + \beta_{5,FS-B} I_{\{k_i=FS-B\}} + \beta_{5,FS-C} I_{\{k_i=FS-C\}}\right) \end{aligned}$$

#### 2.4.1 Schätzung des zweiten Verteilungsparameters

Der zweite Verteilungsparameter  $\alpha$  wird direkt geschätzt.

## 2.5 Prioriverteilungen

Wir nutzen schwach informative Priors (*weakly informative priors*, Lemoine (2019)).

$$\begin{aligned}
 \beta_{0,0} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{0,FS-A} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{0,FS-B} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{0,FS-C} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{1,0} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{1,FS-A} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{1,FS-B} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{1,FS-C} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 &\dots \dots \\
 \beta_{5,0} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{5,FS-A} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{5,FS-B} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \beta_{5,FS-C} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \sigma_{\gamma} &\sim \text{Student-t}_+(\nu = 3, \mu = 0, \sigma = 2.5) \\
 \alpha &\sim \text{Gamma}(0.01, 0.01)
 \end{aligned}$$

### 3 Stan-Code

Auf eine Darstellung wird verzichtet.

### 4 Ergebnisse

**Tabelle 20: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für die Parameter des ersten Zeitpunkts (*first timepoint*). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 0$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	3,023	3,092	2,300	1,805
Median	3,250	3,339	2,672	2,142
Arith. Mittel	3,250	3,337	2,671	2,145
97,5 % Quantil	3,485	3,578	3,057	2,495

**Tabelle 21: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für `exp_vapdm_vt_scaled` (Wasserdampfdruck). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 1$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	-14,534	-18,511	-18,342	-18,253
Median	-12,656	-14,507	-14,003	-13,757
Arith. Mittel	-12,736	-14,698	-14,170	-14,000
97,5 % Quantil	-11,335	-11,997	-11,123	-10,838

**Tabelle 22: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für `exp_globrad_vt_scaled` (Globalstrahlung). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 2$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	-4,506	-4,333	-4,920	-6,051
Median	-4,482	-4,310	-4,860	-5,891
Arith. Mittel	-4,482	-4,310	-4,861	-5,892
97,5 % Quantil	-4,458	-4,288	-4,808	-5,749

**Tabelle 23: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für `exp_wsdm_vt_scaled` (Windgeschwindigkeit). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 3$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	-12,634	-16,496	-16,138	-15,690
Median	-10,437	-12,192	-11,734	-10,050
Arith. Mittel	-10,549	-12,397	-11,939	-10,420
97,5 % Quantil	-9,067	-9,620	-8,805	-7,249

**Tabelle 24: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für exp\_temp\_dmean\_vt\_scaled (Tagesmitteltemperatur). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 4$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	-14,646	-18,744	-18,435	-18,528
Median	-12,681	-14,498	-13,872	-14,029
Arith. Mittel	-12,781	-14,742	-14,105	-14,257
97,5 % Quantil	-11,392	-12,036	-11,123	-11,130

**Tabelle 25: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für exp\_rain\_pred\_vt\_scaled (Tagesniederschlag). Die angegebenen Werte, in den Spalten von links nach rechts, beziehen sich auf die Parameter  $(\beta_{j,0}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-A}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-B}, \beta_{j,0} + \beta_{j,FS-C}), j = 5$ .**

	Ref	FS-A	FS-B	FS-C
2,5 % Quantil	-3,656	-3,492	-4,081	-5,333
Median	-3,629	-3,467	-4,016	-5,118
Arith. Mittel	-3,629	-3,467	-4,018	-5,100
97,5 % Quantil	-3,602	-3,443	-3,958	-4,787

### Anhang 3: Methodik der Modellierung der Gasflussmessungen des Jahres 2021

Von Holger Sennhenn-Reulen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

#### 1 Datenstruktur

Die gemessenen Werte für CO<sub>2</sub>-C, CH<sub>4</sub>-C und N<sub>2</sub>O-N werden im Folgenden allgemein als  $y_{i,t}$  bezeichnet, wobei die Analyse für jeden dieser drei Outcomes separat und vergleichbar wiederholt wird. Die Einheit dieser Zielvariablen ist  $\frac{mg}{m^2 \times h}$  (CO<sub>2</sub>-C) bzw.  $\frac{\mu g}{m^2 \times h}$  (CH<sub>4</sub>-C, N<sub>2</sub>O-N). Die Werte können positiv oder negativ sein und sind stetig skaliert.

Bezüglich der Indexnotation steht  $i$  für die Beobachtungseinheit – die Gruppen-Id (Variable group) – und  $t$  für den Zeitpunkt – zwischen 03.03.2021 und 20.12.2021. Durch diese wiederholten, longitudinalen Beobachtungen einzelner Beobachtungseinheiten spricht man auch von einer Zeitreihenstruktur der Daten.

#### 2 Statistische Modellierung

In der statistischen Datenanalyse bzw. Modellierung wird angestrebt, ein plausibles Modell für den unbekanntem Prozess zu finden, der die Daten erzeugt haben könnte. Dafür nutzen wir das Konzept der Zufallsvariable, hier mit  $Y_{i,t}$  bezeichnet, für die wir eine Verteilung  $F_Y$  suchen, die dann künstliche Realisationen,  $\tilde{y}_{i,t}$ , erzeugen kann, die in den „wesentlichen Merkmalen“ von den tatsächlichen Messungen  $y_{i,t}$  nicht zu unterscheiden sind (dies wird z.B. durch *Posterior Predictive Checks* überprüft). Eine Verteilung  $F_Y$  in bekannter Form, jedoch noch ohne Anpassung der Verteilungsparameter an die Daten, bezeichnet man als Verteilungsmodell.

##### 2.1 Verteilungsmodelle

Wir nutzen die Student-t (Verteilungsmodell  $M_1$ ), die schiefe Normal- (Verteilungsmodell  $M_2$ ), sowie die 'gewöhnliche' Normalverteilung (Verteilungsmodell  $M_3$ ):

$$M_1: Y_{i,t} \sim t(\mu_{i,t}, \sigma_{i,t}, \nu_{i,t}), \quad M_2: Y_{i,t} \sim \text{Skew-Normal}(\mu_{i,t}, \sigma_{i,t}, \alpha_{i,t}), \quad M_3: Y_{i,t} \sim \text{Normal}(\mu_{i,t}, \sigma_{i,t}).$$

Dabei wird in jedem dieser drei Modelle jeweils jeder Verteilungsparameter über Kovariableninformationen modelliert. Dies wird über parameterspezifische lineare Prädiktoren erzielt.

##### 2.2 Parameterspezifische Lineare Prädiktoren

Lineare Prädiktoren werden mit  $n_{\theta,i,t}$  bezeichnet, wobei  $\theta$  den jeweiligen Verteilungsparameter bezeichnet.

###### 2.2.1 Linkfunktionen

Für den Erwartungswert  $\mu_{i,t}$  können wir dabei mit dem *Identity-Link* arbeiten, da  $\mu_{i,t}$  sowohl positiv als auch negativ sein darf:

$$\mu_{i,t} = \eta_{\mu,i,t}.$$

Dasselbe gilt auch für den Schiefeparameter,  $\alpha_{i,t}$ , der Skew-Normal-Verteilung:

$$\alpha_{i,t} = \eta_{\alpha,i,t}.$$

Für die Variabilität der Verteilung, spezifiziert über den Parameter  $\sigma_{i,t}$  als auch den Freiheitsgradparameter  $\nu$  der t-Verteilung, muss die Positivität des Parameters eingehalten werden. Dies geschieht über:

$$g(\sigma_{i,t}) = \exp(\eta_{\sigma,i,t}), \quad \text{bzw.} \quad g(\nu_{i,t}) = \exp(\eta_{\nu,i,t}),$$

wobei  $g$  die inverse Funktion der *log link-function* ist.

### 2.2.2 Indikatorfunktion

Für die Notation wird die Indikatorfunktion genutzt:

$$I_{\{\text{Bedingung}\}} := \begin{cases} 0, & \text{Bedingung ist erfüllt} \\ 1, & \text{Bedingung ist nicht erfüllt} \end{cases}$$

### 2.2.3 Regressionsparameter und Gruppierungsterme

Mit dieser Modellierung soll die Frage beantwortet werden, inwiefern und auf welche Weise Kovariablen  $x_1, x_2, \dots$  das Potential haben, strukturell den Erwartungswert  $E(Y_{i,t})$  zu verändern. Dadurch, dass für zwei verschiedene Werte einer Kovariablen – und alle anderen konstant gehalten; *ceteris paribus* – sich dieser Erwartungswert unterscheiden kann, sprechen wir von Differenzen im bedingten Erwartungswert:

$$E(Y_{i,t} | x_{j,i,t} = c) - E(Y_{i,t} | x_{j,i,t} = c + 1).$$

Mit  $\beta_j$  bezeichnen wir die Regressionsparameter (in der frequentistischen Modellierung gemischter Modelle als „fixed effects“ bezeichnet), mit  $\gamma$  die Koeffizienten aus einem Gruppierungsterm (in der frequentistischen Modellierung gemischter Modelle als „random effects“ bezeichnet).

$$\eta_{\theta,i,t} = \beta_{\theta,0} + \beta_{\theta,1}x_{1,i} + \beta_{\theta,2}x_{2,i} + \dots + \sum_{j=1}^J (I_{\{k_i=j\}} \gamma_{\theta,j}).$$

In dieser Summendarstellung für die Koeffizienten  $\gamma_{\theta,j}$  aus dem Gruppierungsterm – die Gruppierungsvariable wird hier mit  $k$  bezeichnet – bezeichnet  $J$  die Anzahl der Gruppen. Sowohl  $\beta$  als auch  $\gamma$  werden genutzt, um die oben beschriebenen strukturellen Veränderungen in einem bedingten Verteilungsparameter festzuhalten. Hierbei hat der Interceptparameter  $\beta_{\theta,0}$  eine besondere Bedeutung: Wenn alle Kovariablen  $x_{j,i,t}$  gleich 0 sind, reduziert sich der lineare Prädiktor auf diesen Parameter – wenn man auch annimmt, dass man sich mit den Gruppierungskoeffizienten  $\gamma$  in einer hypothetischen Gruppe im Zentrum der Verteilung (auch der Wert 0) der Verteilung der Gruppierungskoeffizienten  $\gamma$  befindet.

### 2.2.4 Linearer Prädiktor für den bedingten Erwartungswert

Kovariable *strat* (entspricht den Behandlungen, siehe Tabelle 3) hat drei bzw. vier Ausprägungen: Ref, FS-A, (FS-B) und FS-C. Weiterhin haben wir eine skalierte Luft- bzw. Bodentemperaturvariable *tempZ*:

$$\text{tempZ}_{i,t} = \frac{\text{temp}_{i,t} - \text{mean}(\text{temp})}{\text{sd}(\text{temp})}$$

Wir erhalten damit den folgenden „gewöhnlichen fixed effects Aufbau“:

$$\eta_{\mu,i,t} = \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,1}\text{tempZ}_{i,t} + \beta_{\mu,2}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{\mu,3}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{\mu,4}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}} + \beta_{\mu,5}\text{tempZ}_{i,t}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{\mu,6}\text{tempZ}_{i,t}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{\mu,7}\text{tempZ}_{i,t}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}}$$

Auf diesen Teil wird additiv ein nicht-linearer Effekterm für Veränderung aufgrund des Beobachtungsdatums (als Tage seit Studienbeginn, Variable *days<sub>i,t</sub>*) addiert:

$$\eta_{\mu,i,t} = \beta_{\mu,0} + \dots + \beta_{\mu,7}\text{tempZ}_{i,t}I_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}} + f_{\mu,\text{days}}(\text{days}_{i,t})$$

Diese Effektfunktion wird über einen Basisfunktionsansatz aufgebaut. Für die Implementierung von  $f_{\mu,\text{days}}$  wird dabei eine Form genutzt, in welcher der lineare Anteil von  $f_{\mu,\text{days}}$  und darauf aufbauend der nichtlineare Anteil über einen geeigneten Basisfunktionsansatz modelliert wird. Es wird hier einen Parameterwert von  $k=7$  gewählt, um die Komplexität des Funktionsraums nicht zu groß werden zu lassen. Dafür müssen dann insgesamt drei Parameter geschätzt werden,  $b_{f,1}, b_{f,2}, b_{f,3}$ . Die beiden Parameter  $b_{f,2}$  und  $b_{f,3}$  sind dabei die Parameter des nichtlinearen Effekanteils und es wird angenommen, dass diese – analog zu der folgenden Annahme für die Koeffizienten der Gruppierungsstruktur – aus einer gemeinsamen Verteilung stammen:

$$b_{f,j} \sim N(0, \sigma_f^2), \quad j = 2, 3.$$

Weiterhin muss die Gruppierungsstruktur berücksichtigt werden. Die hierbei geschätzten Koeffizienten werden in der klassischen Schätzung gemischter Modelle als *Random Intercept* und *Random Slope* bezeichnet:

$$\eta_{\mu,i,t} = \beta_{\mu,0} + \dots + f_{\mu,\text{days}}(\text{days}_{i,t}) + \sum_{j=1}^J (\mathbb{I}_{\{k_i=j\}} (\gamma_{\mu,0,j} + \gamma_{\mu,1,j} \text{tempZ}_{i,t})) .$$

Die Variabilität dieser Koeffizienten scheint visuell zwischen den Behandlungen zu variieren. Darum wird der jeweilige Koeffizientenvektor als von der Behandlung abhängige Ziehung aus einer durch die jeweilige Varianz variierende Normalverteilung implementiert:

$$\gamma_{\mu,0,j} \sim N(0, \sigma_{\mu,0,\text{strat}_j}^2), \quad \gamma_{\mu,1,j} \sim N(0, \sigma_{\mu,1,\text{strat}_j}^2) .$$

**Autokorrelation:** Da die Daten in einer Zeitreihenstruktur erhoben wurden, ist es sinnvoll, in der Modellierung zu berücksichtigen, dass durch die Kovariablen/Gruppierung nicht modellierte Abweichungen zwischen  $\mu_{i,t}$  und  $y_{i,t}$  zum nächsten Zeitpunkt  $t + 1$  (abgeschwächt) immer noch in  $\mu_{i,t}$  bestehen und dadurch weniger „volle“ Information liefern als dies durch einen Prozess wäre, in dem über der Zeit hinweg Information bereits sehr kurzweilig „verloren“ geht. Das Vorliegen solch einer Information wird als Autokorrelationsprozess bezeichnet und kann über die Schätzung von Autokorrelationsparametern  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ , in brms (Bürkner 2017) wie folgt im Modell berücksichtigt werden:

$$\mu_{i,t} = \beta_0 + \dots + \rho_1 \cdot (y_{i,t-1} - \mu_{i,t-1}) + \rho_2 \cdot (y_{i,t-2} - \mu_{i,t-2}) + \rho_3 \cdot (y_{i,t-3} - \mu_{i,t-3}) .$$

Der bedingte Erwartungswert wird basierend auf dem folgenden Parametervektor geschätzt:

$$(\beta_{\mu,0}, \beta_{\mu,1}, \dots, \beta_{\mu,7}, b_{f,1}, \dots, b_{f,6}, \gamma_{\mu,0,1}, \dots, \gamma_{\mu,0,J}, \gamma_{\mu,1,1}, \dots, \gamma_{\mu,1,J}, \rho_1, \rho_2, \rho_3) .$$

In der Modellformel für brms : : brm ist der bedingte Erwartungswert folgendermaßen implementiert:

tempZ \* strat + (1 + tempZ | gr(k, by = strat)) + s(t, k = 7) + ar(time = t, gr = k, p = 3)

### 2.2.5 Linearer Prädiktor für die bedingte Variabilität

$$\eta_{\sigma,i,t} = \beta_{\sigma,0} + \beta_{\sigma,1} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{\sigma,2} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{\sigma,3} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}} + \sum_{j=1}^J (\mathbb{I}_{\{k_i=j\}} \gamma_{\sigma,0,j}) .$$

mit  $\gamma_{\sigma,0,j} \sim N(0, \sigma_{\sigma,0}^2)$ .

### 2.2.6 Linearer Prädiktor für die bedingte Schiefe (Skew Normal)

$$\eta_{\alpha,i,t} = \beta_{\alpha,0} + \beta_{\alpha,1} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{\alpha,2} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{\alpha,3} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}} + \sum_{j=1}^J (\mathbb{I}_{\{k_i=j\}} \gamma_{\alpha,0,j}) .$$

mit  $\gamma_{\alpha,0,j} \sim N(0, \sigma_{\alpha,0}^2)$ .

### 2.2.7 Linearer Prädiktor für die bedingte Anzahl der Freiheitsgrade (Student t)

$$\eta_{\nu,i,t} = \beta_{\nu,0} + \beta_{\nu,1} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-A}\}} + \beta_{\nu,2} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-B}\}} + \beta_{\nu,3} \mathbb{I}_{\{\text{strat}_i=\text{FS-C}\}} + \sum_{j=1}^J (\mathbb{I}_{\{k_i=j\}} \gamma_{\nu,0,j}) .$$

mit  $\gamma_{\nu,0,j} \sim N(0, \sigma_{\nu,0}^2)$ .

## 2.3 Prioriverteilungen

Es werden schwach informative Prioris genutzt (*weakly informative priors*, Lemoine (2019)).

$$\begin{aligned}\beta_{\mu,0} &\sim \text{Student-t}(\nu = 3, \mu = 0, \sigma = .5) \\ \beta_{\mu,1} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ &\dots \\ \beta_{\mu,7} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ b_{f,1} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_f^2 &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_{\mu,0,\text{strat}_j} &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_{\mu,1,\text{strat}_j} &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \rho_1 &\sim \text{Uniform}(-1, 1) \\ \rho_2 &\sim \text{Uniform}(-1, 1) \\ \rho_3 &\sim \text{Uniform}(-1, 1) \\ \beta_{\sigma,0} &\sim \text{Student-t}(\nu = 3, \mu = 0, \sigma = .5) \\ \beta_{\sigma,1} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\sigma,2} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\sigma,3} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_{\sigma,0,\text{strat}_j} &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\alpha,0} &\sim \text{Student-t}(\nu = 3, \mu = 0, \sigma = .5) \\ \beta_{\alpha,1} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\alpha,2} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\alpha,3} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_{\alpha,0,\text{strat}_j} &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\nu,0} &\sim \text{Student-t}(\nu = 3, \mu = 0, \sigma = .5) \\ \beta_{\nu,1} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\nu,2} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \beta_{\nu,3} &\sim N(\mu = 0, \sigma = 1) \\ \sigma_{\nu,0,\text{strat}_j} &\sim N_+(\mu = 0, \sigma = 1)\end{aligned}$$

## 2.4 Model stacking

Wie in Yao et al. (2018) beschrieben und durch `brms : : 100_model_weights` implementiert.

## V. Anhang nach Teilvorhaben

Das vorliegende Vorhaben wurde im Verbund zwischen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA; Teilvorhaben 1) und dem Thünen-Institut für Agrartechnologie (TI; Teilvorhaben 2) unter Beteiligung des Niedersächsischen Forstplanungsamt (NFP) durchgeführt. Die im Rahmen des Verbundvorhabens bearbeiteten Arbeitspakete waren mit Ausnahme der sich nach Teilvorhaben unterscheidenden Versuche und Messgrößen des Arbeitspakets 2 „Datenerhebung“ sowie des Unterpunkts 4.1.2 „Einsatz von Sensorik zur Online-Messung der Fahrspurtiefe“ von Arbeitspaket 4 „Erkenntnistransfer in die Praxis“ identisch. Letzteres war ausschließlich Teilvorhaben 2 zugeordnet. Dementsprechend wurden alle anderen Arbeitspakete von beiden Vorhabenträgern gemeinschaftlich bearbeitet, wodurch eine strikte Trennung nach Institutionen nicht möglich ist.

### 1. Teilvorhaben 1

Titel des Teilvorhabens: „Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte; Teilvorhaben 1: Bodenmikrobiologie und ökologische Wirkungen“

#### 1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Fokus des Teilvorhabens 1 stand die ausführliche Untersuchung von bodenchemischen und -biologischen Eigenschaften von Fahrspurböden verschiedener Tiefe. Diese wurden nach der Spurtiefe in die drei Klassen *FS-A* (0-10 cm), *FS-B* (10-20 cm) und *FS-C* (20-30 cm) gegliedert. Dabei sollte geprüft und beurteilt werden, wie sich die biologisch-chemischen Bodeneigenschaften zwischen den Fahrspurklassen untereinander und zu den gegenübergestellten, unbefahrenen Referenzparzellen unterscheiden und wie sich die Befahrung auf die Funktionalität des Bodens auswirkt. Das Ziel der Untersuchungen war die Ableitung ökologisch begründeter Schwellenwerte für tolerierbare Fahrspurtiefen unter lössgeprägten Standortsbedingungen. Für die Ableitung der Schwellenwerte fand eine Verknüpfung mit den bodenphysikalischen Untersuchungen des Teilvorhabens 2 statt. Die gewonnenen Erkenntnisse des Verbundvorhabens sollten genutzt werden, um den im Merkblatt „Bodenschutz bei der Holzernte“ der Niedersächsischen Landesforsten (AG Bodenschutz 2015) formulierten Schwellenwert für die maximale Ausprägung von Fahrspuren auf Ton- bzw. Lehmböden von derzeit maximal 20 cm auf 90 % der Rückegassenlänge zu beurteilen und diesen ggf. anzupassen.

Nebst der Evaluation der bestehenden Zielgrößen des genannten Bodenschutzkonzepts stand in Aussicht, ein Konzept zu erarbeiten, dass der Praxis über ein modellbasiertes Entscheidungssystem Erleichterung bei der Planung der hochmechanisierten Holzernte verschafft, indem es Standorts- und Bestandesinformationen mit meteorologischen Daten verknüpft und über ein Prognosewerkzeug eine an Standorts- und Witterungsbedingungen angepasste Waldpflege bzw. Holzernte ermöglicht. Dies konnte jedoch aufgrund des Rückzugs des dafür nötigen Kooperationspartners nicht erreicht werden.

#### 1.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Eine Übersicht über die bearbeiteten Arbeitspakete findet sich in Tabelle 26, die gleichzeitig auch den Arbeitsplan des Verbundvorhabens darstellte und somit für beide Teilvorhaben gültig ist. Erläuterungen zur Zielerreichung der dargestellten Inhalte werden im Kapitel I.3.1 gegeben.

Tabelle 26: Übersicht über bearbeitete Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten.

Arbeitspaket	Gliederungspunkt/Inhalt	Verantwortung		
		NFP	FVA	TI
Arbeitspaket 1: Parameter- und Standortauswahl	<b>1 Parameter- und Standortauswahl</b>			
	1.1 <i>Auswahl potenziell geeigneter bodenphysikalischer, -chemischer und -mikrobiologischer Parameter</i>			
	1.1.1 Vorauswahl unter der Prämisse eines hohen ökosystemaren Bewertungspotenzials	x	x	x
	1.1.2 Erarbeitung einer umfassenden Wissensbasis zu den bodenfunktionalen Grenzwerten der Parameter		x	x
	1.2 <i>Auswahl zu untersuchender Waldstandorte und Festlegung der Messpunkte</i>			
	1.2.1 Sammlung von Informationsgrundlagen für die Standortauswahl	x	x	
	1.2.2 Vorauswahl potenziell geeigneter Untersuchungsstandorte	x	x	x
1.2.3 Feldbegehung und Erhebung feldbodenkundlicher Standortmerkmale zur Festlegung der Messpunkte	x	x	x	
Arbeitspaket 2: Datenerhebung	<b>2 Datenerhebung</b>			
	2.1 <i>Kartierungsarbeiten, Probenahmen und Laboranalysen</i>			
	2.1.1 Erhebung bodenphysikalischer Parameter			x
	- Bodensetzung - Fahrspurtiefe - Porenvolumen - Porenraumverteilung - Wasserdurchlässigkeit - Bodentemperatur - Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit - Luftleitfähigkeit			
	2.1.2 Erhebung bodenmikrobiologischer/-chemischer Parameter		x	
	- Gehalte/Verhältniszahlen: Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Sulfat - mikrobielle Biomasse (Cmik) - Basalatmung - metabolischer Quotient - Abbauraten der organischen Substanz (Litterbags) - in situ Bodenrespiration - Redoxeigenschaften der Böden - Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre - Wurzelverteilung			
	2.1.3 Flächendeckende Kartierung der Fahrspurtiefenverteilung		x	x
2.2 <i>Aufbereitung und Zusammenführung der erhobenen Feld- und Labordaten in Form einer Datenbank</i>	x	x	x	
Arbeitspaket 3: Datenanalyse und Erkenntnisgewinn	<b>3 Datenanalyse und Erkenntnisgewinn</b>			
	3.1 <i>Empirisch-statistische Untersuchungen zum Einfluss der Befahrung auf das Ökosystem Waldboden</i>		x	x
	3.1.1 Auswirkungen der Befahrung auf die bodenphysikalischen, -chemischen und -mikrobiologischen Parameter		x	x
	3.1.2 Bodenfunktionale Bewertung der ermittelten Zustandsänderungen	x	x	x
3.2 <i>Ableitung "ökologischer Leitplanken" für den Schlüsselindikator Fahrspurtiefe</i>				
Arbeitspaket 4: Erkenntnistransfer	<b>4 Erkenntnistransfer in die Praxis</b>			
	4.1 <i>Forsttechnische Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzzernte</i>			
	4.1.1 Konkretisierung von Handlungsempfehlungen	x	x	x
	4.1.2 Einsatz von Sensorik zur Online-Messung der Fahrspurtiefe			x
4.2 <i>Entwicklung eines Managementsystems für eine ordnungsgemäße Waldbewirtschaftung</i>	x	x	x	
Arbeitspaket 5: Dynamisierungspotential	<b>5 Ausblick - Ermittlung des Dynamisierungspotenzials</b>			
	5.1 <i>Weiterentwicklung der Gefährdungskarte zur Befahrbarkeit von Waldböden</i>			
	5.1.1 Möglichkeiten zur Integration der "ökologischen Leitplanken" für die Fahrspurtiefe	x	x	x
	5.1.2 Möglichkeiten der Integration meteorologischer Standortfaktoren zur Dynamisierung der Gefährdungskarte	x		
5.2 <i>Erarbeitung eines Zukunftskonzeptes für die standorts- u. witterungssensitive Vorhersage des Befahrungsrisikos</i>	x	x	x	

### 1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die nachfolgende Darstellung der wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens stellt eine starke Verkürzung und Verallgemeinerung der umfangreichen Untersuchungen dar. Detailliertere Ausführungen zu den gewonnenen Erkenntnissen in ausführlicher Form finden sich in Kapitel II.

Die Untersuchung der **Bodenwasserspannung** legte Unterschiede bei der Bodenfeuchte zwischen den unbefahrenen Referenzparzellen und den Fahrspurbehandlungen im Oberboden (~ 0-6 cm Tiefe des Mineralbodens) offen. Während die Fahrspurböden von Behandlung *FS-A* (0-10 cm) verglichen mit der unbefahrenen Behandlung (*Ref*) eine ähnliche Feuchtedynamik mit teils höherer Austrocknung in den Sommermonaten zeigen, liegt die Bodenwasserspannung in mittelstarken Fahrspuren *FS-B* (10-20 cm) deutlich niedriger ( $\triangleq$  feuchter). Fahrspuren der Klasse *FS-C* (20-30 cm) weisen kontinuierlich niedrige Bodenwasserspannungen auf und sind somit dauerhaft wesentlich feuchter (hohe Wassersättigung) als die unbefahrenen Parzellen.

Mittels der **Reaktion von blanken Eisenstäben** in Kontakt mit dem Luft-Wasser-Gemisch des Bodenporenraumes konnten Unterschiede bei der Sauerstoffverfügbarkeit verglichen mit den unbefahrenen Parzellen abgeleitet werden. Referenzparzellen (*Ref*), die nicht durch Maschinentätigkeit verdichtet wurden, lassen aufgrund der Rost- und Blankanteile der Eisenstäbe auf tiefgreifende Durchlüftung und hohe Sauerstoffverfügbarkeit schließen. In den Fahrspurböden bewirkt die Verdichtung eine starke Störung des Gasaustausches, die bei den Eisenstäben zu einer überwiegenden Ausprägung des Merkmals „Patina“ (graustumpfes Anlaufen) führt, das wiederum einen Indikator für geringe Sauerstoffkonzentrationen in Bodenluft und -wasser darstellt. Fahrspuren der Klassen *FS-A* (0-10 cm) und *FS-B* (10-20 cm) zeigen einen gewissen Rückgang des Patina-Belages nach langanhaltender Trockenheit im Herbst. In den Fahrspuren der Klasse *FS-C* (20-30 cm) fehlt diese Verringerung, wodurch konstant niedrige Sauerstoffkonzentrationen und veränderte Redoxbedingungen (reduktive Verhältnisse) in diesen Fahrspuren zu erwarten sind.

Verdichtungsinduzierte Veränderungen des Luft- und Wasserhaushaltes nehmen Einfluss auf die Lebensbedingungen des Edaphons, dessen Aktivität u.a. durch die Freisetzung von Gasen ermittelt werden kann. Messungen der **Bodenatmung** legten Unterschiede bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Behandlungen offen. In Behandlung *FS-A* (0-10 cm) liegen diese überwiegend entweder auf dem Niveau der Referenzparzellen oder leicht darüber. Ab Spurtiefen > 10 cm – in den Behandlungen *FS-B* (10-20 cm) und *FS-C* (20-30 cm) – ist ein starker Rückgang der Bodenatmung feststellbar, am intensivsten während der Sommermonate. Durch die Befahrung kommt es auf den Fahrspuren von Rückegassen zudem zu einem erheblichen Rückgang der Methansenkenfunktion (CH<sub>4</sub>), der in Behandlung *FS-C* (20-30 cm) einem nahezu vollständigen Verlust gleichkommt. In den unbefahrenen Kontrollparzellen (*Ref*) ist die Methanoxidation indes ein ausgeprägter und kontinuierlich stattfindender Prozess, der bereits in schwachen Fahrspuren (*FS-A*) sowie mittelstarken Fahrspuren (*FS-B*) beachtlich verringert wird. Hinsichtlich der Freisetzung von Lachgas (N<sub>2</sub>O) sind dagegen nur geringe Unterschiede zwischen den Behandlungen nachweisbar.

Der teilweise (*FS-B*; Spurtiefe 10-20 cm) bzw. nahezu vollständige (*FS-C*; Spurtiefe 20-30 cm) Verlust der Humusaufgabe durch laterale Umlagerungen sowie die mechanische Einarbeitung von Bestandteilen der Humusaufgabe (organische Substanz) in den Mineralboden sind wichtige Einflussgrößen für die **bodenbiologischen Eigenschaften** von Fahrspurböden. In Fahrspuren der Klasse *FS-C* bewirken diese eine Konzentration der mikrobiellen Biomasse – gemessen u.a. als mikrobiell gebundener Kohlenstoffgehalt (C<sub>mik</sub>) – auf die oberen 0-5 cm des Mineralbodens und einen Rückgang von C<sub>mik</sub> in der Tiefenstufe 10-15 cm. Veränderungen und Störungen des Lebensraumes Bodens werden in den 20-30 cm tiefen Fahrspuren (*FS-C*) auch durch gesteigerte metabolische Quotienten angezeigt. Während die Ergebnisse der Fahrspuren der Klasse *FS-B* (10-20 cm) zwischen denen der Behandlung *FS-C* und *FS-A* stehen, ist die Beeinflussung der untersuchten bodenmikrobiologischen Parameter in Fahrspuren bis 10 cm Tiefe (*FS-A*) gering.

Die Verdichtung von Fahrspurböden durch die Befahrung mit schweren Forstmaschinen führt an der Oberfläche der Fahrspuren zudem zu einem geringeren **Abbau von Streu**, der jedoch überwiegend nicht signifikant unterhalb der Rate der unbefahrenen Referenzparzellen (*Ref*) liegt. Zwischen den Fahrspurbehandlungen bestehen ebenso nur geringe Abweichungen untereinander. Indirekt konnten durch den Netzbeutelversuch Hinweise für Unterschiede bei der Erosionsanfälligkeit gefunden werden, die einen gesteigerten Bodenabtrag in den Fahrspurböden mit gestörter (*FS-B*; Spurtiefe 10-20 cm) bzw. mehr oder weniger verloren gegangener Humusaufgabe (*FS-C*; Spurtiefe 20-30 cm) anzeigen.

Unter anderem infolge der Beeinflussung der organisch geprägten Bodenhorizonte ist auch eine Wirkung auf die **bodenchemischen Eigenschaften** der untersuchten Fahrspuren von Rückegassen gegeben. In den Fahrspuren der Klasse *FS-A* (0-10 cm) konnten größere Mächtigkeiten des Auflagehumus festgestellt werden, die den Nährstoffspeicher lokal erhöhen und vermutlich auf vormals konzentriert abgelegten Schlagabraum (Reisigmatte) zurückzuführen sind. Im Mineralboden gestaltet sich die Befahrungswirkung mit sowohl leichten Steigerungen als auch Abnahmen von Stoffgehalten im Wesentlichen indifferent zur Referenz (*Ref*). Der beinahe vollständige Verlust der Humusaufgabe in Fahrspuren zwischen 20-30 cm Tiefe (*FS-C*) verursacht – gegenläufig zur Deponierung des nährstoffreichen Reisigs – dort den Rückgang eines wichtigen Nährstoff- und Wasserspeichers, während die Inkorporation von Teilen der Humusaufgabe in den Mineralboden zu einer

Steigerung der Stoffgehalte von C, N, P, S, Ca, Mg in den ersten 10 cm führt. Zudem gibt es insbesondere im Mineralboden von *FS-C* Wechselwirkungen zwischen dem modifizierten Luft- und Wasserhaushalt und dem Bodenchemismus, bei dem es durch vermehrt reduktive Bedingungen zu Erhöhungen der pH-Werte und der Basensättigung kommt. Die Ergebnisse der Fahrspuren mit 10-20 cm Tiefe (*FS-B*) deuten überwiegend auf eine Übergangsform zwischen den beiden anderen Fahrspurvarianten (*FS-A* und *FS-C*) hin.

Mittels eines Laborversuchs mit ungestörten Bodensäulen (**Säuleninkubationsversuch**), wurden die Behandlungen auf mögliche Unterschiede bei Stoffausträgen untersucht. Die im Vergleich zur Referenz höheren Stoffkonzentrationen im Sickerwasser der Säulen von Fahrspurbehandlung *FS-A* (0-10 cm), weisen auf gesteigerte Nährstoffausträge – insbesondere Nitrat-Stickstoff,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , ( $\text{Na}^+$ ) und  $\text{Al}^3$  – in diesen Böden hin, die vermutlich auf den intensiveren mikrobiellen Abbau der mächtigeren Humusaufgabe auf diesen Rückegassen (hoher Humusvorrat infolge von Reisigmatten) zurückzuführen sind. In den Säulen der unbefahrenen Referenzparzellen (*Ref*) kam es im Versuchsverlauf zu einem konstanten Anstieg vieler Stoffkonzentrationen, der auf die fehlende Aufnahme der durch Mineralisierung freigesetzten Nährstoffe durch Pflanzen zurückgeführt wird und auf eine mögliche eingeschränkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Bedingungen im Wald (*in situ*) schließen lässt. Erwartungsgemäß konnten im Perkolat der Säulen aus tiefen Fahrspuren (*FS-C*; Spurtiefe 20-30 cm) die geringsten Stoffkonzentrationen gemessen werden. Ausnahme bilden die Konzentrationen von Kalium und Mangan, bei denen die höchsten ( $\text{K}^+$ ) bzw. mit *FS-A* vergleichbare Werte ( $\text{Mn}^{2+}$ ) analysiert wurden.

Die **Zählungen von Grob- und Feinwurzeln** an Profilwänden in den Fahrspuren und unbefahrenen Referenzen (*Ref*) ergaben eine intensive und gleichmäßige Durchwurzelung der Referenzparzellen, die im Gegensatz zu den Ergebnissen der Fahrspurböden steht. Mit Ausnahme der ersten Tiefenstufe (0-5 cm; Oberboden) von Fahrspurbehandlung *FS-A* (0-10 cm), in der es keine Unterschiede zur Referenz gab, liegt die Anzahl an Wurzeln bis in die untersuchte Bodentiefe von 50 cm in allen Fahrspurklassen erheblich und signifikant unter den Vergleichswerten der nicht verdichteten Referenzböden. Im Vergleich der Fahrspurbehandlungen untereinander ist ein gewisser Gradient gegeben, der eine zunehmende Verringerung der Wurzelanzahlen mit steigender Fahrspurtiefe anzeigt, sodass die kumulierte Summe Wurzeln in Fahrspurbehandlung *FS-C* (20-30 cm) bei etwa 50 % des Wertes der unbefahrenen Parzellen liegt.

## 2. Teilvorhaben 2

Titel des Teilvorhabens: „Untersuchung und Beurteilung bodenfunktionaler Kenngrößen und Lösungsstrategien für eine bodenschonende Holzernte; Teilvorhaben 2: Bodenphysikalische Daten und Messensorik“

### 2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 2 war die Quantifizierung bodenphysikalischer Eigenschaften ausgewählter Fahrspuren forstlich genutzter Rückegassen in Abhängigkeit zur Spurtiefe. Analog zu Teilvorhaben 1 wurden zunächst identische, im weiteren Projektverlauf direkt angrenzende Fahrspuren der Tiefenklassen *FS-A* (0-10 cm), *FS-B* (10-20 cm) und *FS-C* (20-30 cm) sowie deren benachbarten und unbefahrenen Referenzparzellen untersucht. Ergänzend wurden die Fahrspuren unter Versuchsbedingungen befahren und deren Reaktion auf den Einfluss der Fahrzeuge in Form der Bodensetzung ermittelt. In interdisziplinärer Betrachtung der Ergebnisse beider Teilvorhaben wurde als Ziel die gesamtheitliche Betrachtung zur Ermittlung ökologischer Grenzen der Befahrbarkeit – ausgedrückt durch eine maximal tolerierbare Fahrspurtiefe – abgeleitet.

### 2.2 Bearbeitete Arbeitspakete

Eine Übersicht der bearbeiteten Arbeitspakete liefert Tabelle 26 (aus TV1). Weiterführende Informationen sind ausführlich in Kapitel I.3.1 dargestellt.

### 2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Basis der Untersuchungen und Grundlage der Beurteilung der Ergebnisse beider Teilvorhaben war die Bestimmung der Bodenart in Form der **Korngrößenverteilung**. Dabei konnte die Zielsetzung bei der Versuchsflächenauswahl bestätigt werden und hohe Schluff-Anteile identifiziert werden, die in allen Behandlungen und Tiefenstufen nahezu identisch ausgeprägt sind. Lediglich die Versuchsflächen *FS-B* weichen etwas von diesen ab, da der Sandgehalt einen bis zu 15 % höheren Wert einnimmt. Geringe Unterschiede in der Bodenart innerhalb einer Behandlung und etwas größere Differenzen zwischen *FS-B* und der Gruppe *FS-A* und *FS-C* konnten beobachtet werden.

In den umfangreichen Untersuchungen wurde deutlich, dass die Befahrung von Waldböden auf Rückegassen zur Ausbildung von Fahrspuren und dort zu Verdichtung des Bodens unter den gebildeten Spuren führt, die weit in den Unterboden reicht (bis 50 cm Tiefe des Mineralbodens untersucht) und sich in signifikant erhöhten Trockenrohdichten der Fahrspurböden gegenüber den unbefahrenen Referenzparzellen niederschlägt. Alle Fahrspurklassen sind vom Prozess der Verdichtung betroffen, es bestehen jedoch Unterschiede im Grad der Ausprägung. In sämtlichen untersuchten Bodentiefen nimmt die **Trockenrohdichte** mit steigender Spurtiefe zu ( $FS-A < FS-B < FS-C$ ). Lediglich in 50 cm Tiefe ließ sich kein Unterschied zwischen den Fahrspurklassen, jedoch zwischen Fahrspur und Referenz nachweisen. Die höchsten Werte konnten dabei in der Mitte der Fahrspuren gemessen werden, während sie in den Randbereichen etwas niedriger lag. Weiterhin wurde mit zunehmender Bodentiefe (bis 50 cm) eine Abnahme der Trockenrohdichte ermittelt. Durch Erhöhung der Trockenrohdichte nehmen gleichzeitig das Gesamtporenvolumen sowie die Porenkontinuität und die Luftkapazität signifikant ab. Auch hier besteht eine negative Korrelation zwischen Spurtiefe und Porenziffer bzw. Luftkapazität: In allen Beprobungstiefen der Fahrspuren liegen Porenziffern und Luftkapazität deutlich unterhalb denen der Referenzparzellen und fallen umso geringer aus, je tiefer die Fahrspur ist. Als Resultat werden der Luft-, Wasser- und Wärmehaushalt der Böden von Rückegassen beeinflusst, wie an vielfältigen, nachfolgenden Messergebnissen deutlich wird.

Die **Luftkapazität (LK)** ist Indikator für die potentielle Sauerstoffverfügbarkeit im Boden. Diese ist in allen Fahrspuren deutlich reduziert und weicht in den *FS-C* sehr stark von der Referenz ab. *FS-A* und *FS-B* weichen ebenfalls stark von dieser ab. Die **nutzbare Feldkapazität (nFK)** ist ein Maß für die potentielle Bereitstellung von pflanzenverfügbarem Wasser und hängt von der Porosität des Bodens, der Trockenrohdichte und der Porenraumverteilung ab. Da die Lagerung der Bodenpartikel und der Porenraum befahrungsinduziert verändert werden, ist auch eine Wirkung auf den Porenraum gegeben. Während in den Fahrspuren eine Reduktion der Grobporen stattfand, nahmen die Mittel- und Feinporen zu, sodass eine Porenraumverschiebung zu beobachten war. Diese führte dazu, dass bei der nFK keine starke Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassers im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden konnte und keine signifikanten Unterschiede zwischen *FS* und den Referenzparzellen beobachtet wurden. Tendenziell ist die nFK in *FS* allerdings leicht reduziert. Die potentielle Verfügbarkeit von Bodenluft für Pflanzen ist zusammenfassend in Fahrspuren deutlich geringer als im unbefahrenen Waldboden, besonders, wenn die Spurtiefe 10 cm überschreitet. Die Verfügbarkeit von pflanzenverfügbarem Wasser ist nur leicht reduziert und nimmt keine kritischen Werte ein.

Trifft Niederschlag auf den Waldboden, kann sich Wasser in Fahrspurböden nur noch sehr langsam bewegen, wodurch Staunässe und Erosion begünstigt werden. Dies wird anhand von Infiltrationsmessungen nachweisbar, die Reduktionen der gesättigten **hydraulischen Leitfähigkeit** um Faktoren zwischen 10 und > 100 offenlegen. Die Verringerung des Infiltrationsvermögens ist besonders in Fahrspuren der Klasse *FS-C* beträchtlich und unterscheidet sich nicht nur signifikant von der Referenz, sondern auch von den Fahrspurklassen *FS-A* und *FS-B*, obwohl es auch dort zu Abnahmen der Wasserleitfähigkeit kommt. Vergleichbar mit den Ergebnissen der Trockenrohddichte ist feststellbar, dass die Leitfähigkeiten von Wasser im Zentrum der Fahrspuren am niedrigsten liegen und in Richtung der Randbereiche geringfügig zunehmen.

Da die Porenmatrix des Bodens neben Wasser auch den Transport von Gasen ermöglicht und dieser gleichermaßen von der Beschaffenheit des Porensystems abhängig ist, wurde zudem die **Luftleitfähigkeit** bestimmt. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der hydraulischen Leitfähigkeit ist ein ausgeprägter Unterschied zwischen dem Gesamtkollektiv der unbefahrenen Kontrollparzellen (*Ref*) und den Fahrspuren aller Klassen feststellbar. Zwar liegt die Luftleitfähigkeit über alle Tiefenstufen gemittelt auch auf den Referenzparzellen eher auf niedrigem Niveau, in den Fahrspurböden werden jedoch nur noch Bruchteile des Ausgangszustandes erreicht. Der stärkste Rückgang ist dabei in den Fahrspuren der Klasse *FS-C* gegeben, die sich jedoch kaum zu den Fahrspuren *FS-A* unterscheiden. Unter allen Fahrspurbehandlungen erreicht Klasse *FS-B* die höchsten Luftleitfähigkeitswerte. Dies ist vermutlich durch Unterschiede in der Bodenart in Form eines höheren Sandgehaltes bei der Messung zu begründen.

Die Reaktion von Fahrspurböden auf eine erneute Befahrung mit forstlichen Arbeitsmaschinen fällt je nach Ausgangslage der Spurtiefe sowie den verwendeten Maschinen (Harvester, Forwarder) unterschiedlich aus. Anhand der Messung der **Setzung des Mineralbodens** konnte festgestellt werden, dass insbesondere Fahrspuren mit Tiefen von 0-10 cm (*FS-A*) sehr sensibel auf eine wiederholte Befahrung unter feuchter bis nasser Witterung reagieren und es durch Setzung des Unterbodens leicht zu einer Zunahme der Fahrspurtiefe kommt. Der schwerere Forwarder (beladen, 36 Mg) hat dabei den größeren Effekt auf das Setzungsgeschehen als der Harvester (25 Mg). Auch in Fahrspuren der Klasse *FS-B* (10-20 cm) findet eine ausgeprägte Reaktion in Form von Setzung und Spurbildung statt. Obgleich bei Fahrspurtyp *FS-C* (20-30 cm) die geringste Bodensetzung gemessen wurde, zeigen die Ergebnisse eindrucklich, dass eine Befahrung von Rückegassen bei ungeeigneten Bedingungen zwangsläufig mit weiterer Spurbildung einhergeht. Der Versuch untermauert damit die bereits vielfach herausgestellte Bedeutung und Notwendigkeit der Beachtung vorangegangener, aktueller und kurzfristig zu erwartender Witterung für das Spurbildungsgeschehen und bodenpflegliche Bewirtschaftung.