

Einfluss des Ladungsgewichtes und der Anzahl Überfahrten von Forstmaschinen auf die Bodenverdichtung und die Spurbildung

Technischer Bericht zum Praxisversuch im Forstbetrieb Wagenrain, Bremgarten AG



Bundesamt für Umwelt, Abteilung Wald
Bestellnummer 110000651 / 8V80/00.0385.PZ/0004
Kreditnummer A2310.0134
Vertragsnummer 00.0385.PZ / L503-1409



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
Gruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz
Gruppe Forstliche Produktionssysteme

Autoren: Peter Lüscher, Christine Meyer, Bodenfunktionen und Bodenschutz
Fritz Frutig, Oliver Thees, Forstliche Produktionssysteme

Mitwirkung Hans Kremer, Technische Universität München
Marco Walser, Roger Köchli, Bodenfunktionen und Bodenschutz
Christian Ginzler, Patrick Thee, Fernerkundung
Andreas Freuler, Abteilung Wald Kanton Aargau, Aarau
Martin Burkard (Forwarder), Forstbetrieb Wagenrain, Bremgarten

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Fragestellung	5
2. Material und Methoden	6
2.1 Versuchsanlage	6
2.2 Durchführung	10
2.3 Bodenphysikalische Methoden	12
2.4 Dokumentation der Spurbildung	13
2.5 Statistische Analysen	13
3. Ergebnisse	14
3.1 Visuelle Fahrspurtypisierung	14
3.2 Fahrspurtypisierung mittels Laserscan	15
3.3 Bodenphysikalische und bodenmechanische Parameter	23
3.3.1 Lagerungsdichte	23
3.3.2 Porenvolumen	26
3.3.3 Luftleitfähigkeit	29
3.3.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit	30
3.3.5 Vorverdichtung	31
3.3.6 Eindringwiderstand	32
4. Diskussion und Folgerungen	34
4.1 Fahren mit halber Ladung	34
4.2 Vergleich von erstmaligem und wiederholtem Befahren	37
Referenzen	39

Anhang

1 Berechnung des Grenzwassergehaltes	40
2 Bodenkarte	41
3 Pflanzensoziologische Karte	42
4 Bodenverdichtungsrisiko-Karte	43
5 Gasse 1 und 2 vor der Befahrung sowie Leitprofile	44
6 3D-Laserscan	45
7 Fahren mit dem Forwarder	46
8 Messen und Beprobieren	47
9 Fahrspurtypen	48

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Lage der Versuchsfläche	6
Abb. 2	Anlage des Fahrversuchs mit den Versuchsgassen	8
Abb. 3	Skelettgehalte in den einzelnen Fahrspurabschnitten	10
Abb. 4	Forwarder Valmet 830.3, beladen mit halber Ladung	11
Abb. 5	Nach der Befahrung entstandene Spurtypen in den Versuchsgassen	14
Abb. 6	Laserscan der Fahrspuren G0, WG hoch	17
Abb. 7	Laserscan der Fahrspuren G1, WG hoch	18
Abb. 8	Laserscan der Fahrspuren G2, WG hoch	19
Abb. 9	Laserscan der Fahrspuren G1, WG niedrig	20
Abb. 10	Laserscan der Fahrspuren G2, WG niedrig	21
Abb. 11	Querprofil durch die Gasse 1 im Abschnitt mit hohem Wassergehalt	22
Abb. 12	Lagerungsdichte vor und nach Befahrung - Gassen	23
Abb. 13	Lagerungsdichte vor und nach Befahrung - Wassergehalte	24
Abb. 14	Lagerungsdichte in den nach Befahrung entstandenen Spurtypen	25
Abb. 15	Grobporenvolumen vor und nach Befahrung - Gassen	26
Abb. 16	Grobporenvolumen vor und nach Befahrung - Wassergehalte	27
Abb. 17	Anteile des Grob- und Fein-/Mittelporenvolumens am Gesamtporenvolumen	28
Abb. 18	Luftleitfähigkeit vor und nach Befahrung	29
Abb. 19	Wasserleitfähigkeit vor und nach Befahrung	30
Abb. 20	Vorverdichtung vor und nach Befahrung	31
Abb. 21	Tiefenverlauf des Eindringwiderstands	32

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Standortsinformationen aus der Bodenkarte 1:25'000	7
Tab. 2	Korngrößenanteile in den verschiedenen Horizonten der Leitprofile	9
Tab. 3	Lagerungsdichte der Leitprofile	9
Tab. 4	Gewichte und Reifenfülldrücke des Forwarders	11
Tab. 5	Mit ProFor berechnete Grenzwassergehalte	12
Tab. 6	Prozentuale Streckenanteile der verschiedenen Fahrspurtypen	15
Tab. 7	Zusammenfassende Beurteilung der Spurbildung	34

1. Ausgangslage und Fragestellung

Im Rahmen des Projektes "Physikalischer Bodenschutz im Wald" wurden in den letzten Jahren zahlreiche Aus- und Weiterbildungskurse zum Thema "Bodenschutz bei der Holzernte" durchgeführt. Von den Kursteilnehmern wurde verschiedentlich in Zweifel gezogen, dass die Massnahme "Fahren mit halber Ladung" bei hoher Bodenfeuchte zu geringerer Bodenbeeinträchtigung führe. Tiefere Radlasten haben zwar erwartungsgemäss eine geringere und weniger tief reichende Bodenverdichtung zur Folge. Falls aber davon ausgegangen wird, dass die gleiche Holzmenge gerückt werden soll, muss bei halber Ladung die doppelte Anzahl Fahrten ausgeführt werden. Beobachtungen und Erfahrungen von Maschinenführern sprechen dabei von einem eher nachteiligen Effekt auf die Spurbildung. Die Bedingungen, unter welchen eine Befahrung mit verminderter Ladung stattfand, waren jedoch meist nicht genau bekannt: Bodenaufbau, Bodeneigenschaften, Betriebsgewicht der Maschine und genaue Anzahl Überfahrten.

Vor diesem Hintergrund entstand die Idee für die vorliegende Fallstudie. Auf zwei nebeneinander liegenden Rückegassen mit möglichst vergleichbaren und vor allem bekannten Bedingungen (Bodenart, Bodenfeuchte, Topografie, ...) sollte ein Befahrungsversuch mit folgender Hauptfragestellung durchgeführt werden:

1. Wie wirkt sich das Befahren des Waldbodens mit halber Ladung und dafür doppelter Anzahl Überfahrten auf die Spurbildung (Eintiefung), die Verdichtung und die Tiefenwirkung der Verdichtung aus?

Da für das Experiment zwei bereits bestehende Rückegassen gefunden werden konnten, ergab sich eine zusätzliche Fragestellung:

2. Welche Unterschiede in den Bodeneigenschaften sind zwischen dem erstmaligen Befahren eines Waldbodens und dem erneuten Befahren einer schon bestehenden, vorverdichteten Rückegasse festzustellen?

Um die zweite Frage beantworten zu können, wurde nebst den zwei bestehenden Rückegassen im gleichen Sektor unter vergleichbaren Bedingungen eine Strecke auf bisher unbefahrenem Waldboden ausgewählt.

Das Experiment konnte im Juni 2013 im Forstbetrieb Wagenrain (Bremgarten AG) mit einem 8-Rad-Forwarder durchgeführt werden. In den Jahren 2007 (Ermatingen TG) und 2008 (Heiteren BE) wurden bereits zwei Befahrungsexperimente mit Rückefahrzeugen durchgeführt, mit dem Ziel, die Klassierung der Fahrspurtypen in der Praxis zu testen und die Spurtypen mit bodenphysikalischen und -biologischen Parametern zu hinterlegen. Die Ergebnisse aus diesen Experimenten lassen sicher interessante Vergleiche mit dem aktuellen Befahrungsexperiment zu.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsanlage

Zur Durchführung der Fallstudie musste eine Waldfläche mit möglichst homogenen Boden- und Bestandesverhältnissen gesucht werden, auf welcher zwei Rückegassen angelegt werden konnten. Die Fläche sollte eben oder nur leicht geneigt sein, um die Einflüsse auf den Boden beim Fahren am Hang auszuschalten. Ausserdem sollte der Boden wegen der nachfolgenden bodenphysikalischen Untersuchungen möglichst skelettarm sein. Anhand der Informationen aus der Bodenkarte sowie pflanzensoziologischen Karten (Anhang 2 und 3) wurde eine Vorauswahl möglicher Standorte vorgenommen.

Nach Begehungen im Forstbetrieb Wagenrain konnte im Waldgebiet der Ortsbürgergemeinde Bremgarten eine geeignete Versuchsfläche gefunden werden (Koordinaten: 666 595 / 243 930), auf welcher sogar bereits zwei parallele Rückegassen vorhanden waren, die letztmals vor etwa 10 Jahren befahren wurden. Das Gelände ist praktisch eben, der rund 80-jährige Fichtenbestand relativ locker, die Bodenrauheit gering und es gibt wenig Verjüngung. Bei der Waldgesellschaft handelt es sich um einen typischen Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse (7d, Waldstandorte Kanton AG, 2009), der aktuelle Bestand wird jedoch durch die Fichte geprägt.

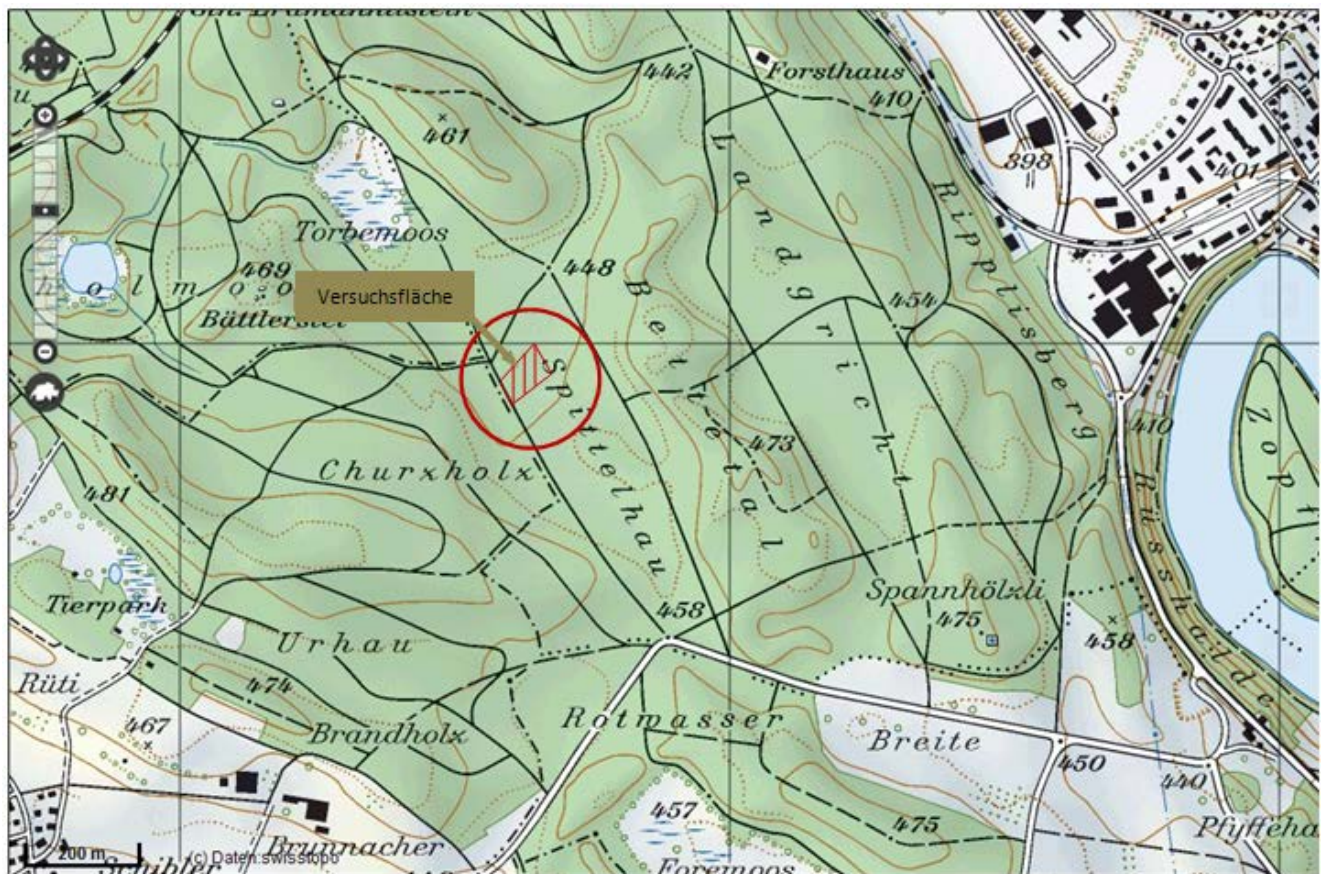


Abbildung 1 Lage der Versuchsfläche in Bremgarten AG. Ausschnitt aus der Landeskarte 1 :25 000, Blatt Nr. 1190 Wohlen.

Tabelle 1 Standortsinformationen aus der Bodenkarte 1: 25 000, Blatt 1090 Wohlen.

Bodeneinheit (Kartierungseinheit)	Gründigkeit	Wasserhaushalt Durchlässigkeit	Bodentyp	Skelettgehalt	Feinerdekörnung	Pflanzennutzbare Gründigkeit
5e	tiefgründig bis sehr tiefgründig	senkrecht durchwaschen, normal durchlässig	Parabraunerde: sauer, zum Teil modrig-humos	skelettarm bis skeletthaltig (<10-30 Vol. %)	sandiger Lehm/Lehm	tiefgründig (70-100 cm)
aE1a	sehr tief- gründig	grundfeucht	saure Braunerde	skelettarm (< 10 Vol. %)	Sandiger Lehm/Lehm	sehr tiefgründig (> 100 cm)
uW1d	ziemlich flachgründig	grund- /hangnass, selten bis zur Oberfläche porengesättigt	Buntgley, dicht, sauer	skelettarm bis skeletthaltig (<10-30 Vol. %)	sandiger bis toniger Lehm (10-40 Vol. %)	ziemlich flach- gründig bis mässig tiefgründig (30- 70 cm)

Der Boden auf der Versuchsfläche ist mehrheitlich eine tiefgründige, saure Braunerde bzw. Parabraunerde (Tab. 1) mit Stau- bzw. Grundwassereinfluss, vor allem im Bereich der Kartierungseinheit uW1d. Die Humusform in den Versuchsgassen entspricht einem Moder (L-F-Ah), im hinteren Teil der Gasse 2 ist die Humusform teilweise schwach anmoorig.

Um eine detailliertere Übersicht über den Standort zu gewinnen, wurden vor Versuchsbeginn zwei Leitprofile in unmittelbarer Nähe zu den geplanten Versuchsgassen angelegt, horizontweise beprobt und untersucht (Abb. 2). Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

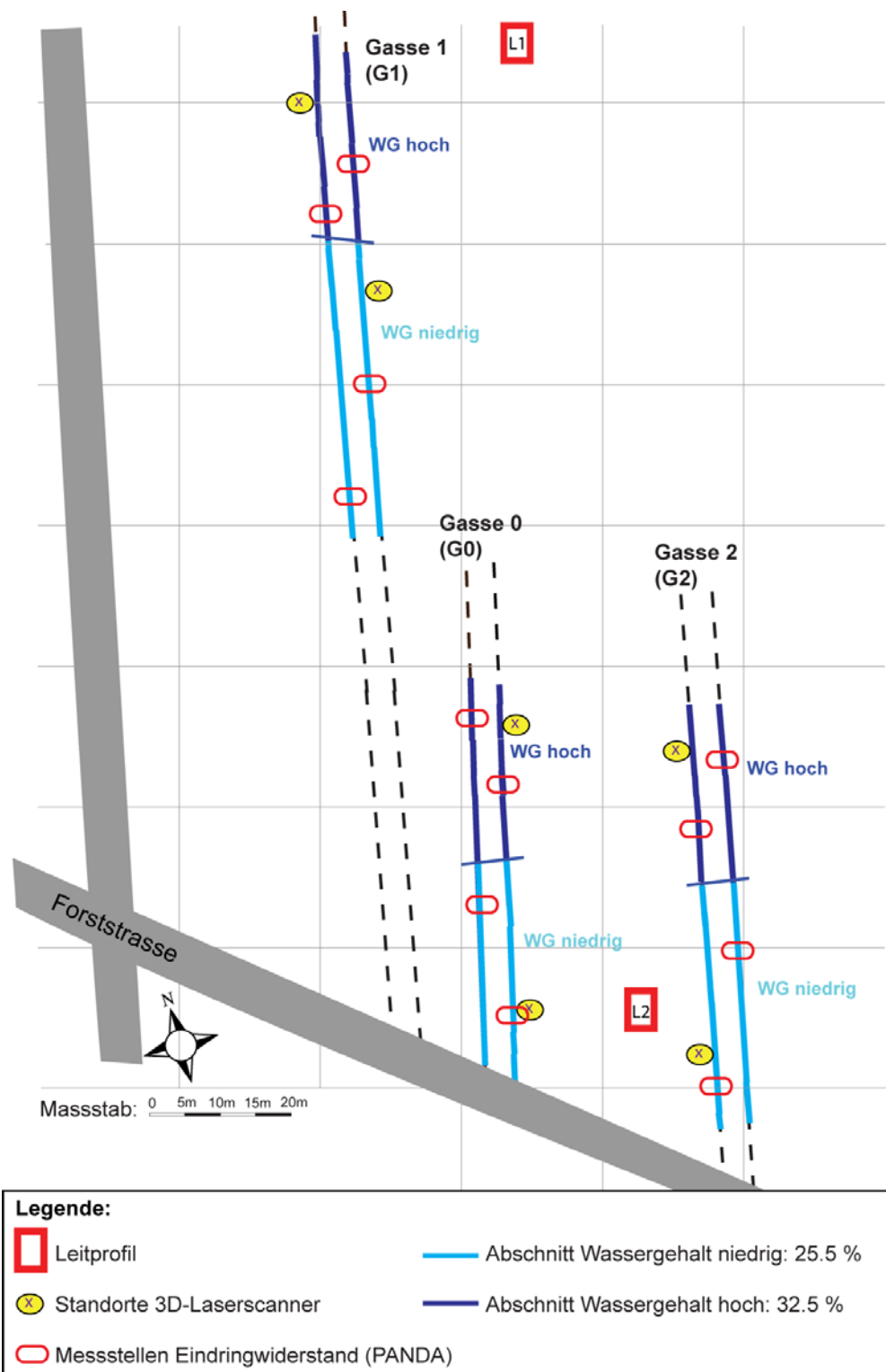


Abbildung 2 Anlage des Fahrversuchs mit den Versuchsgassen: G0 = neue Gasse volle Last mit 2 Überfahrten, G1 = alte Gasse volle Last mit 4 Überfahrten, G2 = alte Gasse halbe Last mit 8 Überfahrten; Überblick über die Messstellen für das Laserscanning und den Eindringwiderstand (PANDA-Sonde).

Tabelle 2 Korngrößenanteile in den verschiedenen Horizonten der Leitprofile (L1 und L2).

Profil	Horizont	Tiefe [cm]	Korngrößenanteile [%]			Prädikat (Walthert et al, 2004)
			Sand	Schluff	Ton	
Leitprofil L1	Ah	0-5	59	32	9	Lehmiger Sand
	AB(cn)	5-15	42	43	15	Sandiger Lehm
	(E)Bcn	20-40	44	38	18	Sandiger Lehm
	B(cn,t)	50-60	51	33	16	Sandiger Lehm
	B(cn)	65-80	55	31	14	Sandiger Lehm
	CB	80-100	76	13	11	Sandiger Lehm
	CB	100-120	77	12	11	Sandiger Lehm
	BC	120-135	15	67	18	Sandiger Lehm
	Cca	135-150	37	47	16	Sandiger Lehm
	II Cca	150-180	9	77	14	Sandiger Lehm
Leitprofil L2	Ah	0-5	57	33	10	Lehmiger Sand
	AB	5-10	44	39	17	Sandiger Lehm
	(E)Bcn	10-20	42	41	17	Sandiger Lehm
	B(t), cn	20-40	46	38	16	Sandiger Lehm
	Bt, cn	40-60	47	40	13	Sandiger Lehm
	BC1	60-80	60	22	18	Sandiger Lehm
	BC2	110-130	81	12	7	Lehmiger Sand
	Komplex	140-155	66	30	4	Sand
	BC3	160-180	65	29	6	Lehmiger Sand

Die Korngrößenanalysen identifizierten die Textur als sandigen Lehm (Tab. 2), wobei jedoch die Texturunterschiede im Oberboden (von Ah- zu AB-Horizont, Sandfraktion ~10 %) unerwartet hoch waren.

Die Lagerungsdichte in den beiden Leitprofilen (Tab. 3) war im Oberboden gering und typisch für ungestörten Waldboden. Der für das Wurzelwachstum entscheidende Dichtewert von 1.4 kg dm⁻³ wurde in einer Tiefe von 40 cm erreicht. Bei höheren Dichtewerten ist das Wurzelwachstum erschwert.

Tabelle 3 Lagerungsdichte der Leitprofile (L1 und L2) in den verschiedenen Tiefen (Dreifachbestimmung).

Profil	Tiefe [cm]	Lagerungsdichte [kg/dm ³]	Reelle Dichte [kg/dm ³]	Porosität E
Leitprofil L1	0-10	0.99 ± 0.01	2.59	0.62
	20-30	1.31 ± 0.08	2.66	0.51
	40-50	1.49 ± 0.01	2.68	0.44
	65-75	1.55 ± 0.02	2.69	0.42
Leitprofil L2	0-10	0.82 ± 0.02	2.57	0.68
	20-30	1.12 ± 0.07	2.62	0.57
	40-50	1.41 ± 0.07	2.65	0.46
	60-70	1.47 ± 0.05	2.66	0.44

Die standörtliche Heterogenität bezüglich des Skelettgehalts (Abb. 3) erwies sich mit Unterschieden zwischen den einzelnen Versuchsabschnitten von bis zu 20 %_v im Oberboden als relativ

hoch, was eine Korrektur für die Skelettgehalte bei den folgenden bodenphysikalischen Untersuchungen erforderte und auch bei der Interpretation der Daten zu beachten ist.

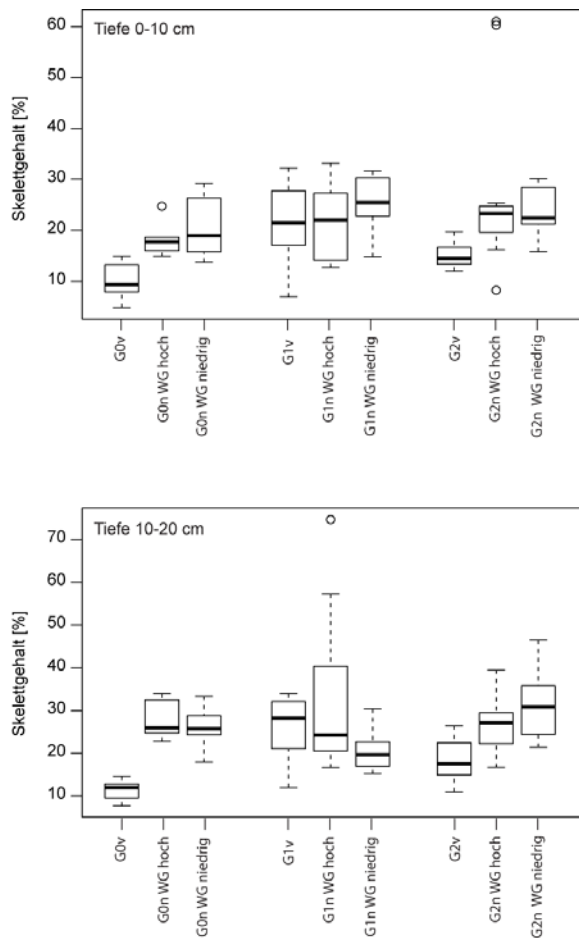


Abbildung 3 Skelettgehalte in den einzelnen Fahrspurabschnitten: Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last) vor (v) und nach Befahrung (n) und bei Wassergehalt hoch und niedrig, gemessen in einer Tiefe von 0-10 cm (Abb. oben) und 10-20 cm (Abb. unten).

2.2 Durchführung

Das Versuchskonzept umfasste drei Gassen, wobei zwei der Gassen letztmals vor etwa 10 Jahren befahren wurden (G1 und G2) und einer unbefahrenen Fläche, auf welcher für den Versuch eine Gasse angelegt wurde, auf der eine Erstbefahrung stattfand (G0). Jede der Gassen wurde in zwei Streckenabschnitte unterteilt, die sich durch unterschiedliche Wassergehalte zum Zeitpunkt der Befahrung unterschieden (Abb. 2). Der hohe Wassergehalt (**WG hoch** = $32.5 \pm 3.5\%$) sollte möglichst knapp unter der Fließgrenze des Bodens liegen, welche zuvor mit dem Informationssystem ProFor (Tab. 5 und Anhang 1) für die einzelnen Gassen berechnet wurde. Dieser Wassergehalt wurde zwei Tage vor der Befahrung durch Bewässerung eingestellt. In den Abschnitten mit niedrigem Wassergehalt (**WG niedrig** = $25.5 \pm 4.8\%$) entsprach der Wassergehalt der witterungsbedingten Bodenfeuchte, welche zum Zeitpunkt der Befahrung (Juni 2013) relativ hoch lag, so dass der Wassergehalt in den Abschnitten "hoch" und "niedrig" recht nahe beieinander lag. Zur Beurteilung der Bodenfeuchte wurden der Wassergehalt (TDR), die Sättigungsrate (BWK-Lanze) und die Saugspannung (Tensiometer) gemessen.

Die Befahrung wurde mit einem Forwarder Valmet 830.3 (Abb. 4, Tab. 4) durchgeführt, entsprechend der Fragestellung nach folgendem Schema:

- G0** Erstbefahrung mit voller Last, 2-malige Überfahrt (vor und zurück)
- G1** alte Gasse, Befahrung mit voller Last, 4-malige Überfahrt
- G2** alte Gasse, Befahrung mit halber Last, 8-malige Überfahrt (doppelte Anzahl an Fahrten).

Die Befahrung der Gasse G0 diente einerseits dem Vergleich mit den Ergebnissen der früheren Befahrungsversuche in Ermatingen TG und Heiteren BE und andererseits dem Vergleich von erstmalig befahrenen mit schon mehrmals befahrenen Böden.



Abbildung 4 Der im Befahrungsversuch eingesetzte Forwarder Valmet 830.3, beladen mit halber Ladung.

Tabelle 4 Gewichte und Reifenfülldrücke des im Befahrungsversuch eingesetzten Forwarders Valmet 830.3 für die Befahrung mit voller Last (G0, G1) und halber Last (G2).

Parameter	Volle Last (kg)	Halbe Last (kg)
Betriebsgewicht	20340	16440
Leergewicht	12240	12240
Gewicht Vorderwagen	6440	7000
Gewicht Hinterwagen	13960	9480
Gewicht hinterste Achse	7600	5480
Reifenfülldruck vordere Räder (bar)	2.0	1.6
hintere Räder (bar)	2.6	1.7

Tabelle 5 Mit ProFor berechnete Grenzwassergehalte für das Bewässern (TU München), die Angaben zur Textur beruhen auf der ProFor-Klassifizierung.

Bodendaten	Grenzwassergehalt (%)	
	volle Last	halbe Last
	25 500 kg	16 480 kg
lehmig schluffiger Sand	16	20
lehmig sandiger Schluff	24	28
schluffiger Lehm	25	32

2.3 Bodenphysikalische Methoden

Vor (v) und nach (n) der Befahrung wurde der Zustand der unterschiedlich stark beanspruchten Fahrspuren mittels morphologischen und bodenphysikalischen Untersuchungen charakterisiert, welche im Folgenden kurz beschrieben werden:

- Konventionelle Stechzylinderanalytik für bodenphysikalische und -mechanische Untersuchungen (Lagerungsdichte, Porenraum, Vorverdichtung, Luft- und Wasserleitfähigkeit). Verwendet wurden Stahlzylinder 100 cm³ für die Analysen der TU München und Burgerzylinder 1000 cm³ für die Analysen der WSL. Für alle Probenpunkte wurden kleine Profile bis etwa 30 cm Tiefe ausgehoben und in zwei Tiefenstufen mit jeweils drei Zylindern (WSL, Tiefen 0-10/10-20 cm) und fünf Zylindern (TU München, Tiefen 5-10/15-20 cm) beprobt.
Die Vorbeprobung erfolgte in Gasse 1 und Gasse 2 an jeweils zwei Profilen pro Wassergehaltsabschnitt, davon eines im Fahrspurtyp 1 und eines im Typ 2 (total 8 Profile, 48 Proben). In der Gasse 0 wurden insgesamt 4 Profile beprobt (12 Proben).
Bei der Nachbeprobung wurde das Beprobungsschema wiederholt, wobei drei weitere Profile für den neu entstandenen Fahrspurtyp 3 hinzukamen und die Probenzahl in Gasse 0 sich verdoppelte.
- Die Verarbeitung der Proben im Labor erfolgte an der TU München und an der WSL bzw. ETH Zürich.
- Die Berechnung der einzelnen Parameter erfolgte nach Standardverfahren (Arbeitskreis Boden, 2005).
- Mit einer PANDA-Sonde wurde der Eindringwiderstand gemessen, also die Kraft, welche aufgewendet werden muss, um den Boden mit einer Metallspitze zu erschliessen. Damit kann nachgewiesen werden, bis in welche Tiefe eine Verdichtung des Bodens erfolgte. Gemessen wurde an 6 Messpunkten vor der Befahrung und 12 Messpunkten nach der Befahrung. Die PANDA-Sonde (PANDA = Pénétrromètre automatique numérique dynamique assisté par ordinateur) wird beschrieben in (Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 1997).

Um den Einfluss des Skelettgehalts, also der Heterogenität in den physikalischen Parametern Lagerungsdichte und Porenraum auszuschliessen, wurden die Daten nach der klassischen Berechnung mit den Skelettgehalten korrigiert (Meyer et al., 2014; Schäffer et al., 2007).

2.4 Dokumentation der Spurbildung

Die Fahrspuren wurden nach der Befahrung visuell nach dem Schema der Fahrspurtypen (Anhang 9) dokumentiert. Zusätzlich hat die Forschungsgruppe Fernerkundung vor und nach der Befahrung 3D-Laserscans mit dem Scanner FARO FOCUS 3D S120 durchgeführt. Hier ging es in erster Linie darum, ein neues Anwendungsgebiet für das Laserscanning zu testen.

2.5 Statistische Analyse

Um die Daten zu analysieren wurden „linear mixed effects models“ (Bates et al., 2013; Crawley, 2009; Pinheiro and Bates, 2000) verwendet. In allen Modellen wurde der Fahrspurabschnitt (Gasse/Wassergehalt) als „nested random factor“ betrachtet um die Varianzen innerhalb eines Fahrspurabschnitts zu berücksichtigen. Die Befahrungsart wurde als „fixed effect“ betrachtet, dementsprechend gab es Modelle, welche Unterschiede auf Gassenniveau testeten und solche, bei denen die einzelnen Wassergehalte (Streckenabschnitte) gegeneinander getestet wurden. Da Letztere aufgrund mangelnder Wiederholungen und einiger Ausreisser jedoch schlecht ausbalanciert waren (Residuenplots) wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Unterschiede zwischen den einzelnen Befahrungsarten wurden mit dem „Tukey HSD Test“ auf Signifikanz analysiert. Die Werte der Luftleitfähigkeit und der Wasserleitfähigkeit wurden vor der Analyse logarithmisch transformiert um die Voraussetzung der Normalverteilung zu erfüllen. Alle statistischen Analysen wurden mit der freien Software „R“ (Team, 2013) durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1 Visuelle Fahrspurtypisierung

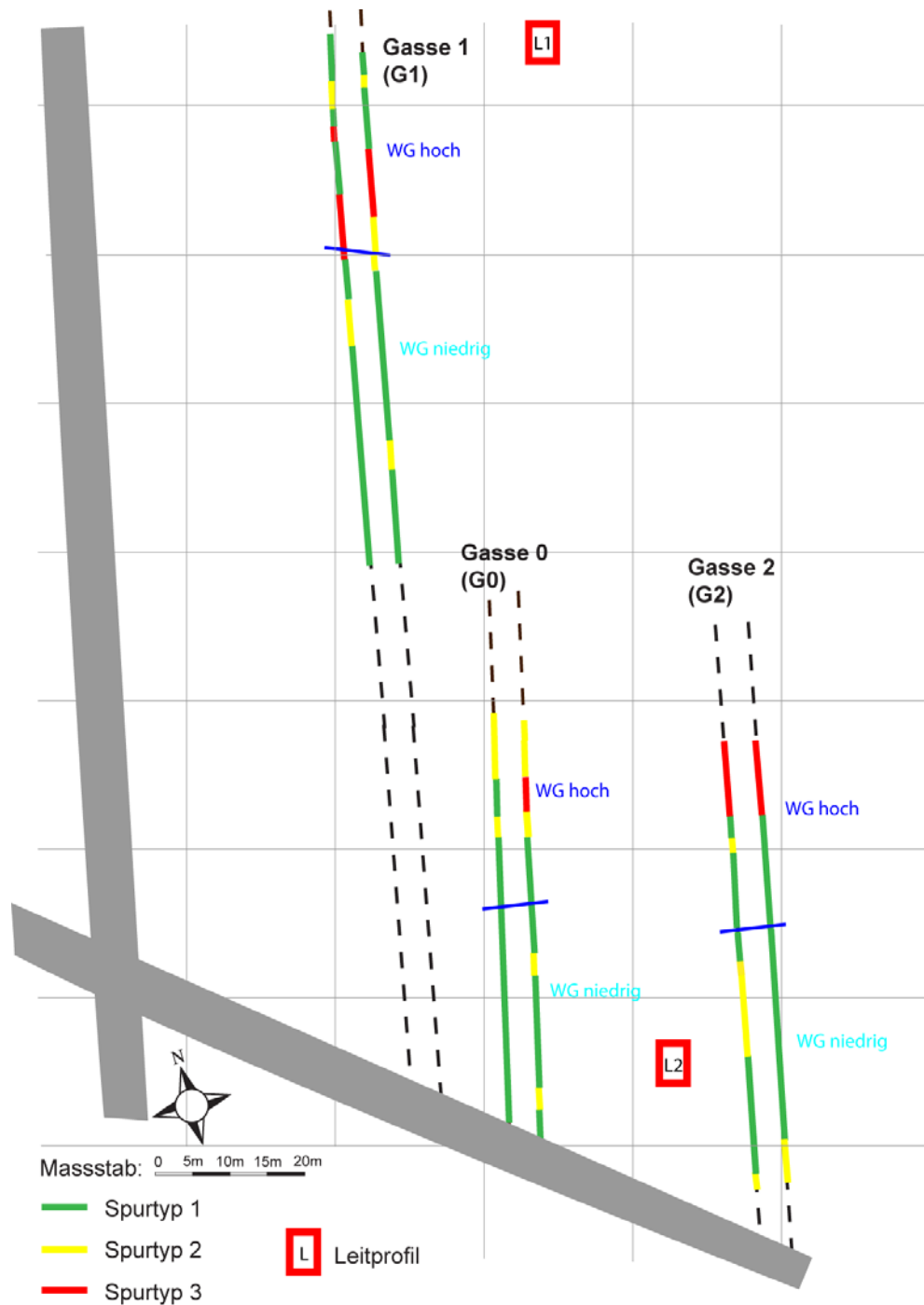


Abbildung 5 Nach der Befahrung entstandene Spurtypen (1-3) in den Versuchsgassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last) mit den verschieden eingestellten Wassergehalten (WG hoch = $32.5 \pm 3.5\%$, WG niedrig = $25.5 \pm 4.8\%$). Die Fahrspurtypen sind im Anhang 9 zusammengestellt.

Tabelle 6 Prozentuale Streckenanteile der Fahrspurtypen nach der Befahrung

		Gasse 1 (volle Ladung) 4 Fahrten	Gasse 2 (halbe Ladung) 8 Fahrten	Gasse 0 (volle Ladung) 2 Fahrten
Wassergehalt niedrig	Spurtyp 1	84	70	91
	Spurtyp 2	15	30	9
	Spurtyp 3	1	0	0
Wassergehalt hoch	Spurtyp 1	52	58	46
	Spurtyp 2	18	4	46
	Spurtyp 3	30	38 ^{*)}	8

^{*)} die Fahrstrecke liegt teilweise in der in der feuchteren Kartierungseinheit uW1d (s. Anhang 2) mit erhöhtem Wassergehalt zum Zeitpunkt der Befahrung

Vor der Befahrung wurden die Fahrspuren in Gasse 1 und 2 angesprochen, wobei vorwiegend der Spurtyp 1 auftrat und nur in geringem Ausmass der Spurtyp 2.

Nach der Befahrung wurden die entstandenen Fahrspuren nach Spurtypen klassiert (s. Anhang 9). Abbildung 5 zeigt die räumliche Verteilung der einzelnen Fahrspurtypen und Tabelle 6 die entsprechenden prozentualen Streckenanteile.

Der Vergleich der Spurbildung zwischen der Gasse 1 (volle Ladung) und der Gasse 2 (halbe Ladung) liefert folgende Ergebnisse:

- In den Abschnitten mit **niedrigem Wassergehalt** (20-30%) lag der Anteil an Spurtyp 2 bei halber Ladung mit 30% deutlich höher als bei voller Ladung (15%). Spurtyp 3 kam in beiden Gassen praktisch nicht vor. Die Fallstudie zeigt, dass beim niedrigen Wassergehalt das Fahren mit halber Ladung und doppelter Anzahl Überfahrten bezüglich Spurbildung eher nachteilig ist.
- In den Abschnitten mit **hohem Wassergehalt** (30-35%) fand, wie erwartet, eine ausgeprägtere Spurbildung als bei niedrigem Wassergehalt statt. In beiden Gassen betrug der Anteil Spurtyp 3 nach der Befahrung rund ein Drittel der Fahrstrecke. Tendenziell zeigte sich, dass sich das Fahren mit halber Last und doppelter Anzahl Überfahrten eher günstig auf die Spurbildung auswirkte. Der Anteil Spurtyp 2 war deutlich geringer. Der Anteil Spurtyp 3 ist mit 38% zwar höher ausgewiesen, hier muss allerdings beachtet werden, dass der hinterste Abschnitt der Gasse 2, wo am meisten Spurtyp 3 zu finden ist, in einer feuchteren Kartierungseinheit liegt. Die Fallstudie erlaubt für den Abschnitt mit hohem Wassergehalt keine gesicherte Aussage zur Spurbildung.

Bei der erstmaligen Befahrung in Gasse 0 (2 Fahrten mit voller Ladung) trat im Abschnitt mit niedrigem Wassergehalt fast nur der Spurtyp 1 auf, im Abschnitt mit hohem Wassergehalt je 46% Spurtyp 1 und 2, sowie lediglich 8% Spurtyp 3. Auf den ersten Blick sieht dieses Ergebnis besser aus als dasjenige für die schon früher befahrene Gasse 1. Die Ergebnisse lassen sich jedoch nur bedingt vergleichen, da auf Gasse 0 nur zwei Fahrten stattfanden und nicht vier wie auf Gasse 1.

3.2 Fahrspurklassierung mittels Laserscan

Die visuelle Typisierung wurde durch die Laserscanaufnahmen bestätigt (Abb. 6-10). In den Abschnitten mit hohem Wassergehalt lag die Fahrspursohle wesentlich tiefer (Eintiefungen 7-25

cm) als bei denjenigen mit niedrigem Wassergehalt (Eintiefungen 7-10 cm), ausserdem traten mit den Eintiefungen auch deutliche Aufwölbungen am Rand der Fahrspuren auf, wie dies bei den Spurtypen 2 und insbesondere 3 der Fall ist.

Hinweis zur Interpretation der nachfolgenden Abbildungen 6-10:

Die schwarz-weissen Laserscans zeigen die Bodenoberfläche vor der Befahrung (A) und nach der Befahrung (B). Die Höhenunterschiede zwischen beiden Bildern werden in Bild C als Überhöhung bzw. Eintiefung farbig dargestellt. Die Farbe weiss kennzeichnet das Ausgangsniveau, die verschiedenen Rot- bis Brauntöne die Eintiefungen und die Farbe blau markiert eine Überhöhung gegenüber dem Ausgangszustand. Die Überhöhungen sind nicht in Höhenstufen eingeteilt.

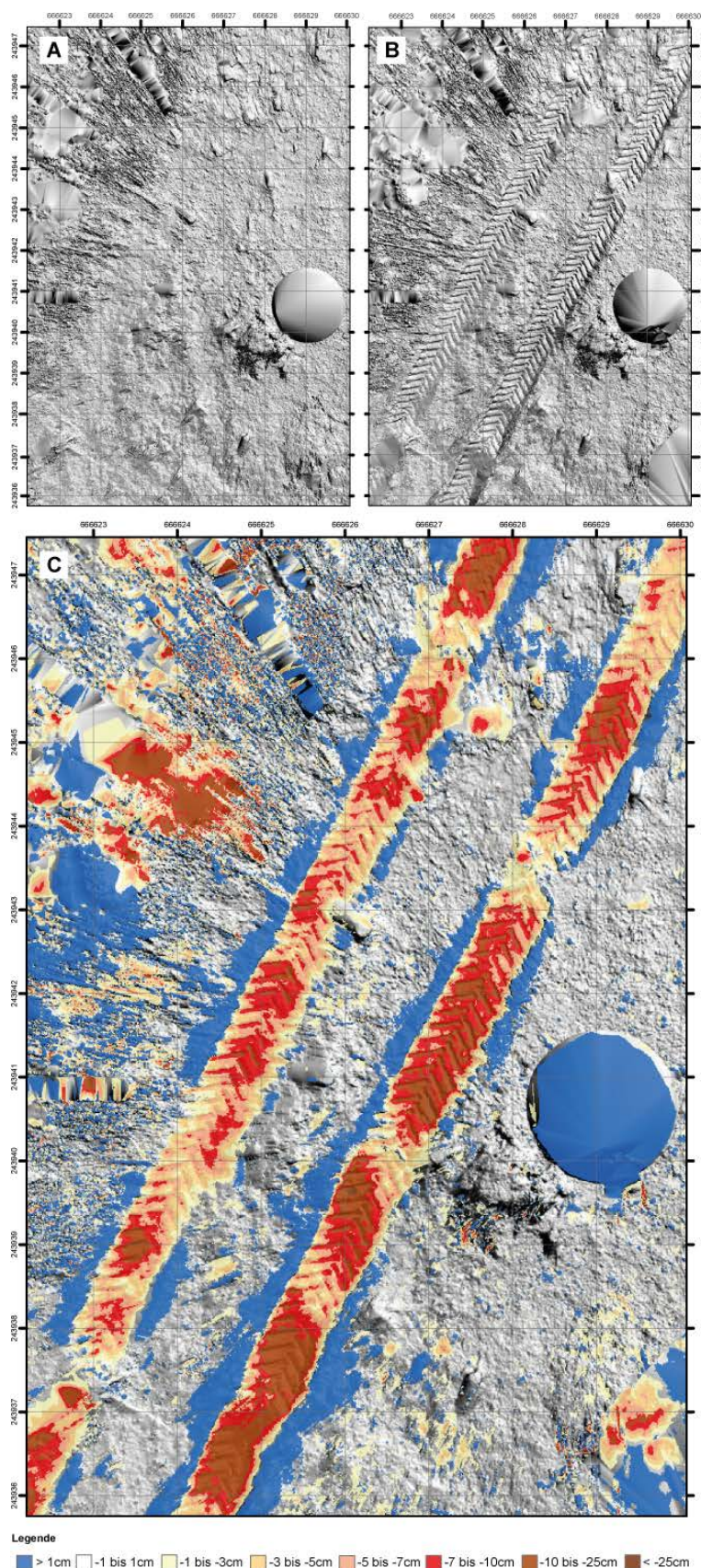


Abbildung 6 Laserscan der Fahrspur G0 WG hoch, vor (A) und nach Befahrung (B) sowie die daraus berechneten Höhendifferenzen (Aufwölbungen und Eintiefungen) als Farbdarstellung (C), die runde Fläche in der Bildmitte ist der Scanner.

Hinweis: Aus technischen Gründen konnte in der Gasse G0 im Abschnitt mit niedrigem Wassergehalt (WG niedrig) nach der Befahrung kein Laserscan durchgeführt werden, so dass für diesen Streckenabschnitt kein Vergleich der Spuren vor und nach der Befahrung möglich ist.

In der Gasse G0 sind nach dem erstmaligen Befahren des Bodens deutliche Eintiefungen bis über 25 cm zu sehen (braun). Charakteristisch ist auch, dass neben den grösseren Eintiefungen (dunkelrot bis braun) in der Regel breitere blaue Flächen zu sehen sind als neben den geringen Eintiefungen (gelb). Aufgrund des hohen Wassergehaltes sind beim Befahren des Bodens seitliche Aufwölbungen durch Bodenfließen entstanden. Die Höhe dieser seitlichen Aufwölbungen wird hier nicht dargestellt, es kann aber davon ausgegangen werden, dass eine breitere blaue Fläche auch eine grössere Erhöhung bedeutet.

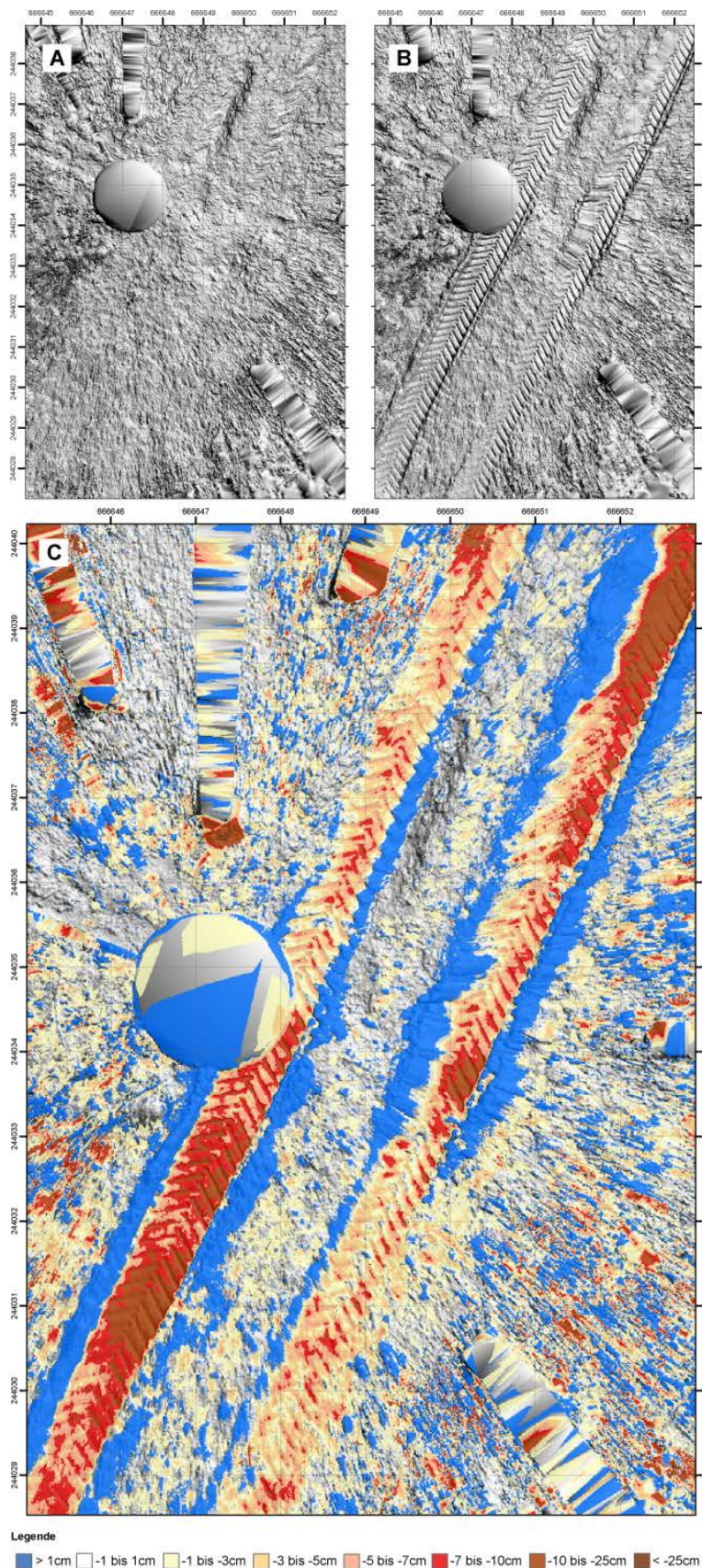


Abbildung 7 Laserscan der Fahrspur G1 WG hoch, vor (A) und nach Befahrung (B) sowie die daraus berechneten Höhendifferenzen (Aufwölbungen und Eintiefungen) als Farbdarstellung (C), die runde Fläche in der Bildmitte ist der Scanner.

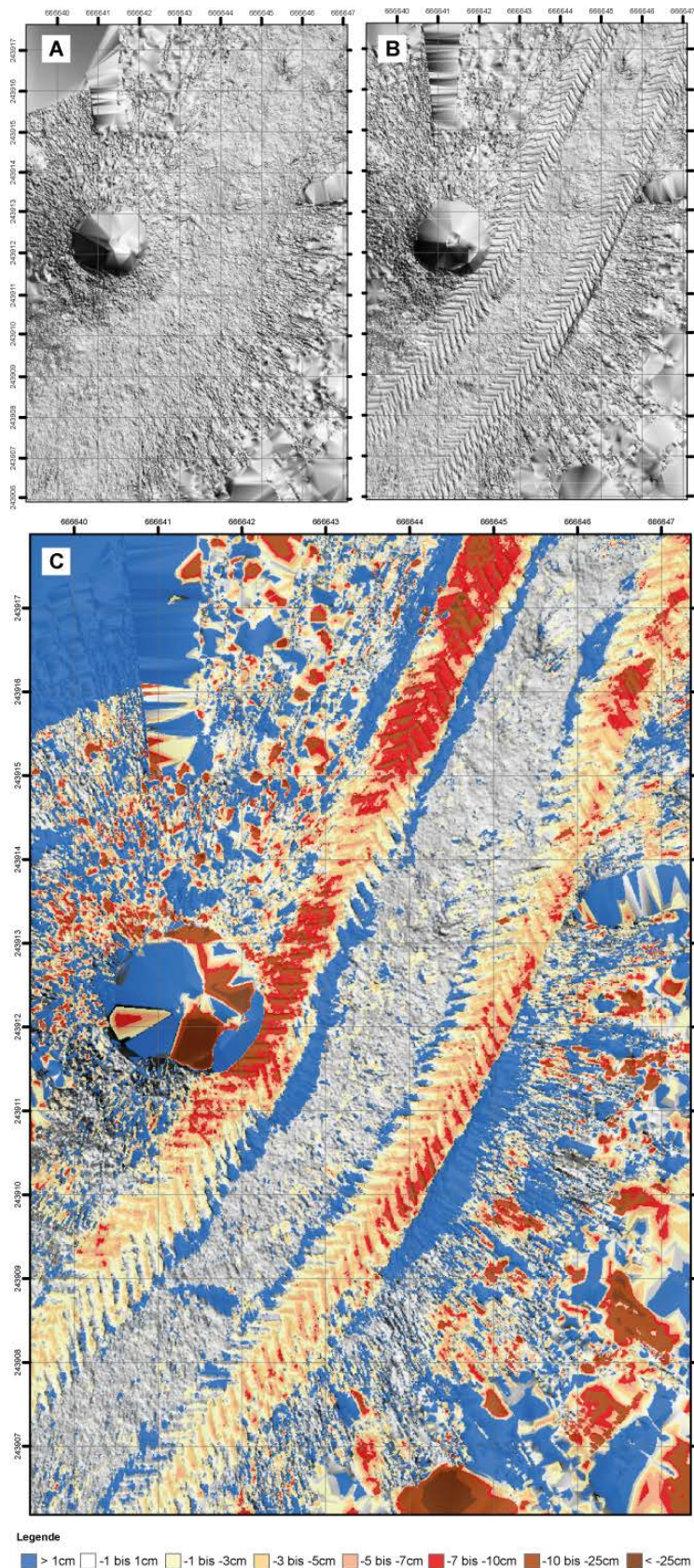


Abbildung 8 Laserscan der Fahrspur G2 WG hoch, vor (A) und nach Befahrung (B) sowie die daraus berechneten Höhendifferenzen (Aufwölbungen und Eintiefungen) als Farbdarstellung (C), die runde Fläche in der Bildmitte ist der Scanner.

Vergleich von Abb. 7 (volle Ladung) mit Abb. 8 (halbe Ladung) für den Sektor mit hohem Wassergehalt:

Die Spurbildung (Bilder B) ist nach dem Befahren mit 4x voller Ladung (Gasse G1) etwas ausgeprägter als mit 8x halber Ladung (Gasse G2). Der Vergleich der Bilder C zeigt ein ähnliches Bild, bei 4x volle Ladung ist der Anteil der Eintiefungen über 7cm (dunkelrot und braun) höher und es sind mehr seitliche Aufwölbungen beidseits der Radspuren (blaue Flächen) zu erkennen.

Folgerung: Die Laserscans zeigen, dass das Fahren mit halber Ladung auf dem Boden mit hohem Wassergehalt gegenüber dem Fahren mit voller Ladung in Bezug auf die Spurbildung tendenziell etwas vorteilhafter ist. Für eine gesicherte Aussage müsste der Versuch jedoch mehrmals wiederholt werden.

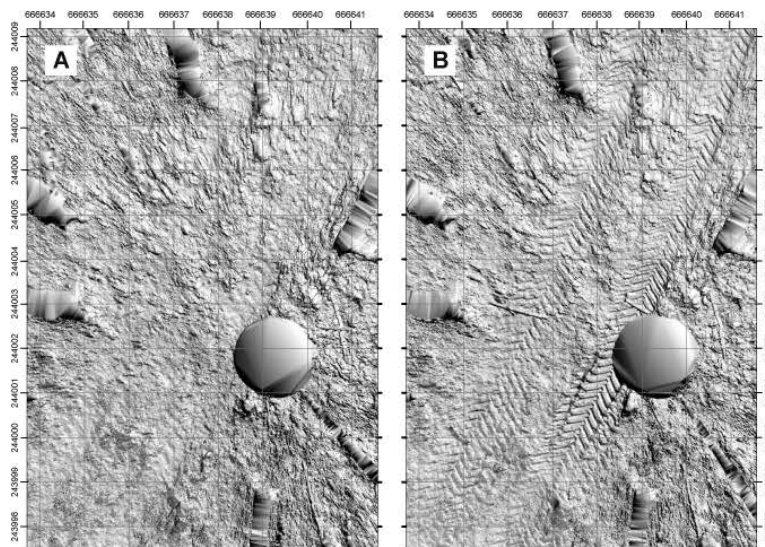
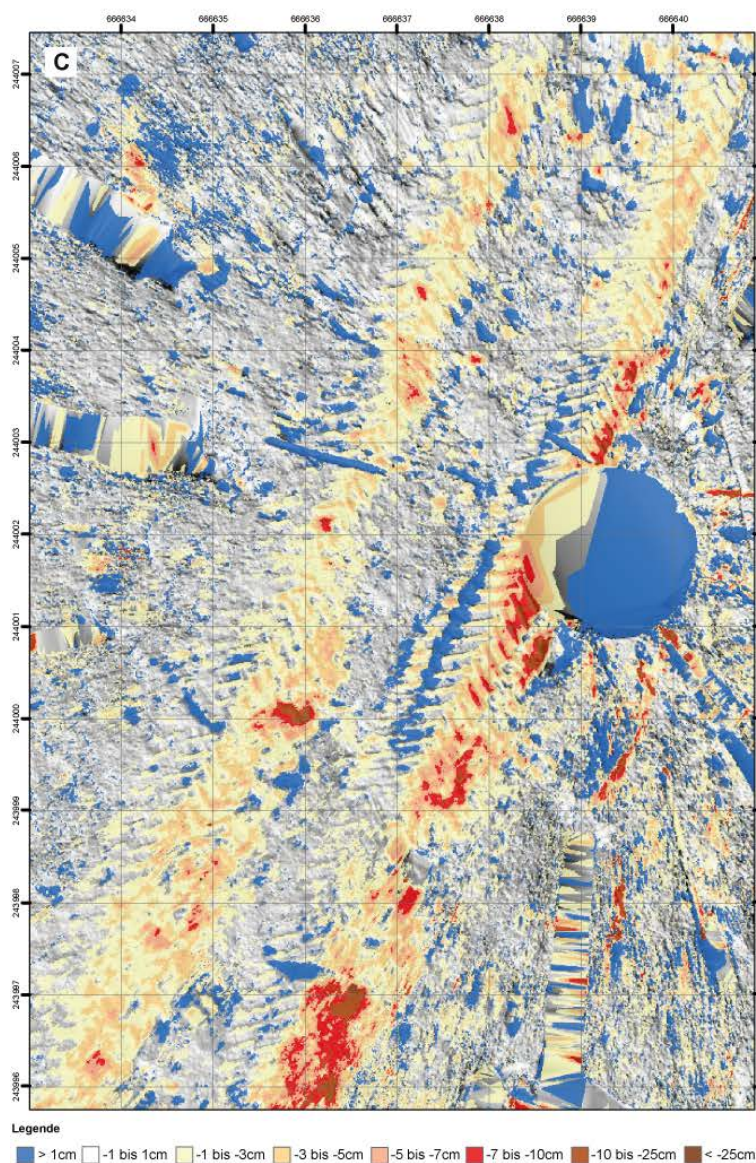


Abbildung 9 Laserscan der Fahrspur G1 WG niedrig, vor (A) und nach Befahrung (B) sowie die daraus berechneten Höhendifferenzen (Aufwölbungen und Eintiefungen) als Farbdarstellung (C), die runde Fläche in der Bildmitte ist der Scanner.



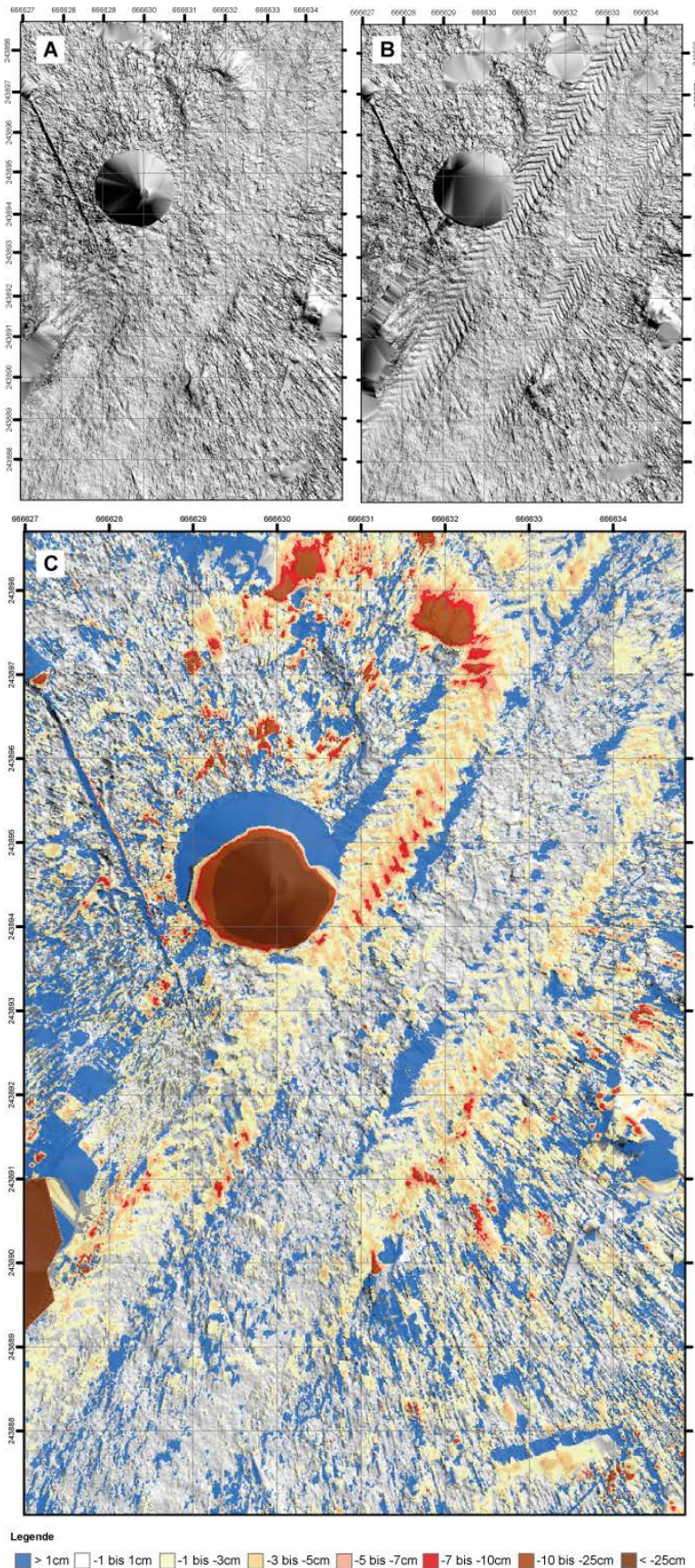


Abbildung 10 Laserscan der Fahrspur G2 WG niedrig, vor (A) und nach Befahrung (B) sowie die daraus berechneten Höhendifferenzen (Aufwölbungen und Eintiefungen) als Farbdarstellung (C), die runde Fläche in der Bildmitte ist der Scanner.

Vergleich von Abb. 9 (volle Ladung) mit Abb. 10 (halbe Ladung) für den Sektor mit niedrigem Wassergehalt:

Zwischen den Befahrungen 4x volle Ladung und 8x halbe Ladung sind nur geringe Unterschiede in der Spurbildung zu erkennen (Bilder B und C). Tendenziell ist bei voller Ladung ein leicht höherer Anteil an Eintiefungen über 7cm (dunkelrot und braun) festzustellen (Bilder C).

Folgerung: Bei niedrigem Wassergehalt besteht zwischen dem Befahren mit voller und mit halber Ladung kein wesentlicher Unterschied in der Spurbildung. Tendenziell ist die Spurbildung bei halber Ladung etwas geringer als bei voller.

Erwartungsgemäss ist die Spurbildung bei niedrigem Wassergehalt sowohl bei voller als auch bei halber Ladung geringer als bei hohem Wassergehalt (Vergleich Abb. 7/9 mit Abb. 8/10).

Die mit dem Laserscan erzeugten Spurbilder, welche lediglich die Eintiefungen und Überhöhungen abbilden, stimmen recht gut mit der visuellen Ansprache nach Spurtypen überein, wie sie in Abb. 5 dargestellt ist.

Nebst der Dokumentation der Spurbildung gibt es weitere Anwendungen für die Laserscans. Abbildung 11 zeigt ein Querprofil durch eine Fahrspur. Solche Profile können für jede beliebige Stelle erstellt werden und zeigen die Eintiefungen und Aufwölbungen im Querschnitt. Damit wäre es auch möglich, über eine bestimmte Strecke entlang einer Fahrspur die Massenverschiebungen zu berechnen.

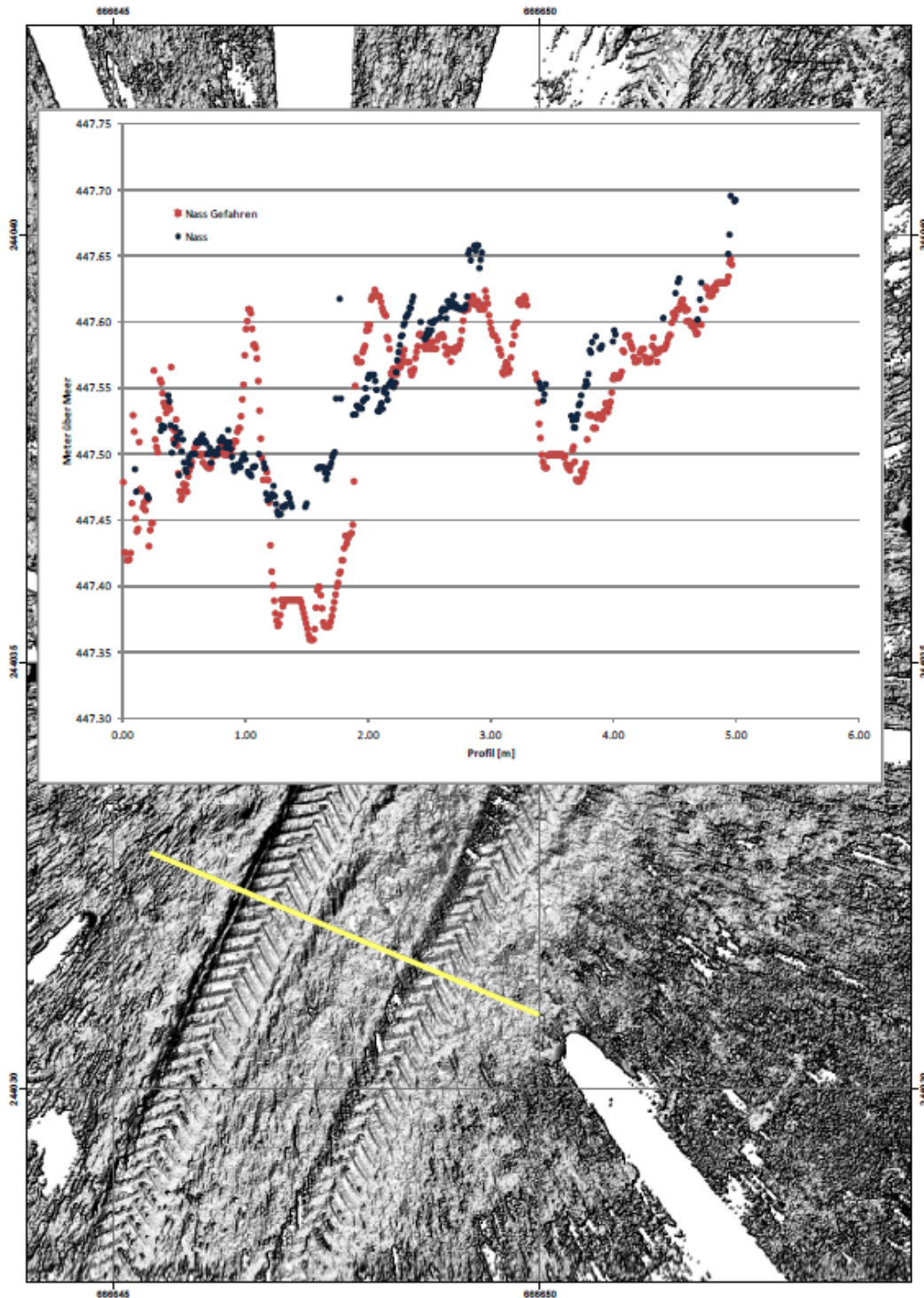
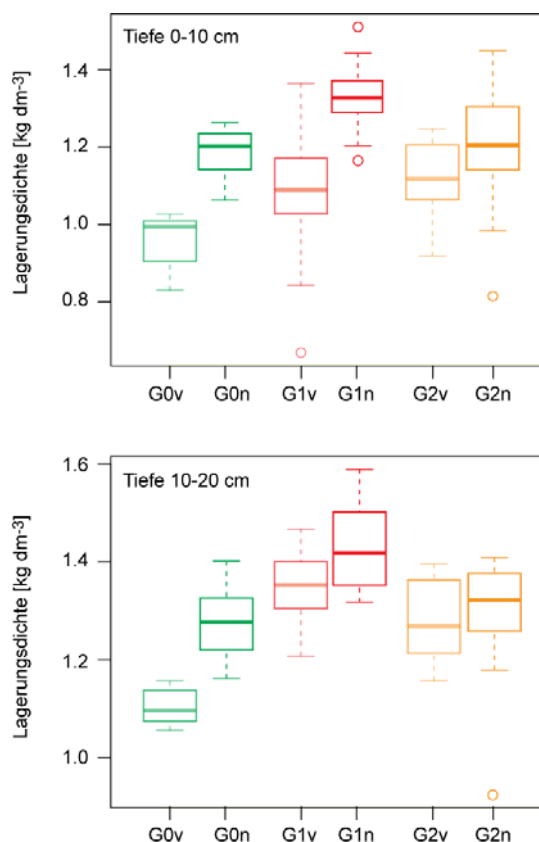


Abbildung 11 Querprofil durch die Gasse 1 im Abschnitt mit hohem Wassergehalt.

3.3 Bodenphysikalische und bodenmechanische Parameter

3.3.1 Lagerungsdichte



Tiefe	Vergleich	p-Wert
0-10 cm	G0v - G0n	< 0.0005
	G1v - G1n	< 0.0005
	G2v - G2n	> 0.05
10-20 cm	G0v - G0n	< 0.05
	G1v - G1n	> 0.05
	G2v - G2n	> 0.05

Abbildung 12 Lagerungsdichte vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last), gemessen in 0-10 cm Tiefe (Abb. oben) und 10-20 cm Tiefe (Abb. unten), n=6. Die Tabelle (rechts) zeigt die p-Werte zu den statistischen Analysen, Ergebnisse werden als signifikant angesehen wenn $p < 0.05$.

- Vor der Befahrung war die Lagerungsdichte in Gasse 1 ähnlich wie in Gasse 2, d.h. in beiden Gassen wurde der Boden bei der vor etwa 10 Jahren erfolgten Befahrung ähnlich stark verdichtet. Nach der Befahrung mit dem Forwarder kann festgestellt werden, dass die Lagerungsdichte in Gasse 1 (4 Fahrten mit voller Ladung) deutlich höher ist als in Gasse 2 (8 Fahrten mit halber Ladung). In beiden Tiefen (0-10 cm und 10-20 cm) zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die Zunahme der Lagerungsdichte in der Tiefe 0-10 cm stärker ist.
- In den schon früher befahrenen Gassen G1v und G2v ist im Vergleich zum unbefahrenen Boden in Gasse 0 (G0v) die Lagerungsdichte auch nach 10 Jahren ohne Befahrung noch deutlich grösser. Das weist darauf hin, dass sich das Bodengefüge in diesem Zeitraum nur wenig regeneriert hat.
- Bei der Gasse 0 ist in beiden Tiefen ein signifikanter Anstieg der Lagerungsdichte zwischen G0v und G0n festzustellen. Das bedeutet, dass der grösste Teil der Verdichtung bereits bei erstmaligem Befahren des natürlich gelagerten Bodens stattfindet.

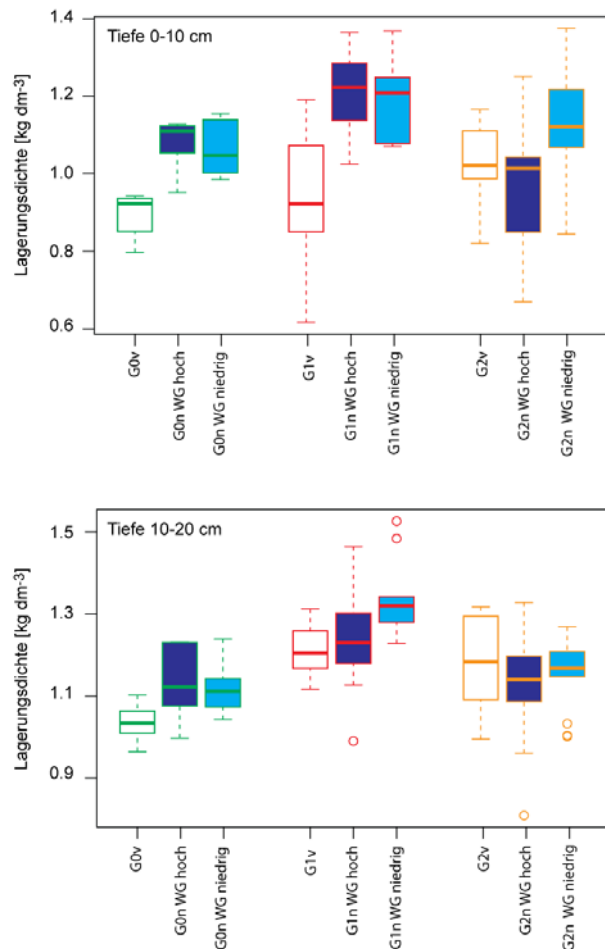


Abbildung 13 Lagerungsdichte vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last) und den eingestellten Wassergehalten in den Streckenabschnitten zum Zeitpunkt der Befahrung (WG hoch = $32.5 \pm 3.5\%$, WG niedrig = $25.5 \pm 4.8\%$), gemessen in 0-10 cm Tiefe (Abb. oben) und 10-20 cm Tiefe (Abb. unten), $n=3$.

- Die Interpretation der Wirkung der verschiedenen Wassergehalte auf die Lagerungsdichte in Abb. 13 ist schwierig. Der erwartete Effekt, dass nach Befahrung bei den höheren Wassergehalten grössere Lagerungsdichten auftreten als bei niedrigen, ist nur für die Gasse G0 (in beiden Tiefen) und für die Gasse G1 (in Tiefe 0-10 cm) tendenziell erkennbar. Mögliche Erklärungen sind der witterungsbedingt relativ geringe Unterschied in den Wassergehalten zwischen den Abschnitten "niedrig" und "hoch" sowie kleinflächig wechselnde Skelettanteile. Da es sich um eine Fallstudie und nicht um eine Versuchsreihe handelt, ist auch der Datenumfang für eine deutliche Aussage zu klein.

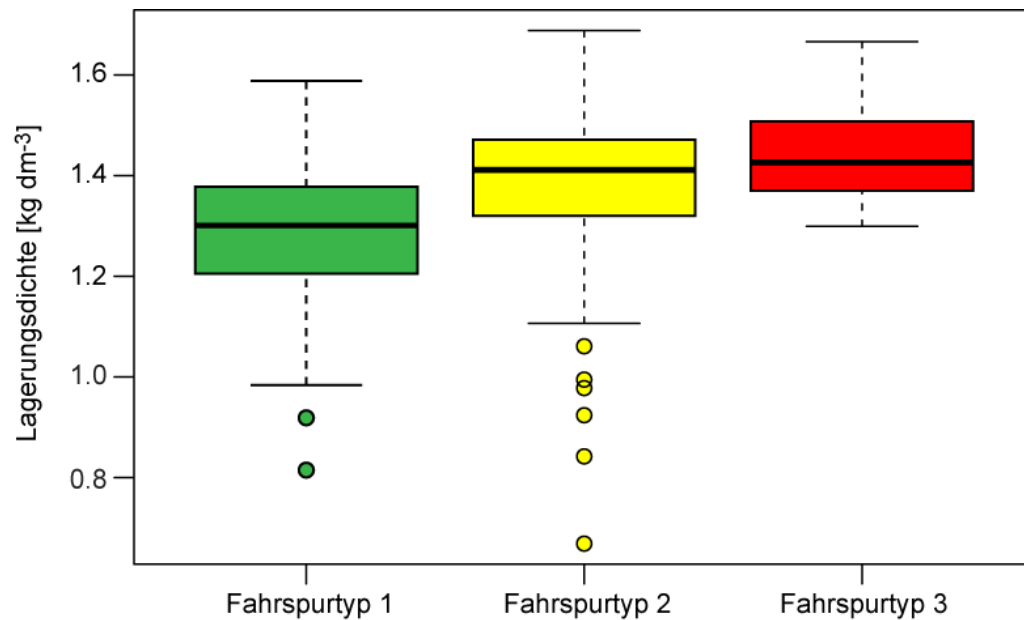


Abbildung 14 Lagerungsdichte in den nach der Befahrung entstandenen Spurtypen (kompletter Datensatz mit allen Tiefen und verschiedenen Untersuchungsmethoden).

Die Fahrspuren wurden wie bei früheren Untersuchungen nach den Kriterien zur Unterscheidung der Fahrspurtypen (Anhang 9) klassiert. Wie schon bei den früheren Untersuchungen wird auch hier die nach morphologischen Kriterien erfolgte Einteilung in Spurtypen durch den bodenphysikalischen Parameter "Lagerungsdichte" bestätigt. Die Lagerungsdichte nimmt von Spurtyp 1 zu 3 deutlich zu. Im Spurtyp 3 liegen die Werte über dem Bereich von 1.4 kg dm^{-3} , was das Wurzelwachstum bereits im Oberboden erschwert.

3.3.2 Porenvolumen

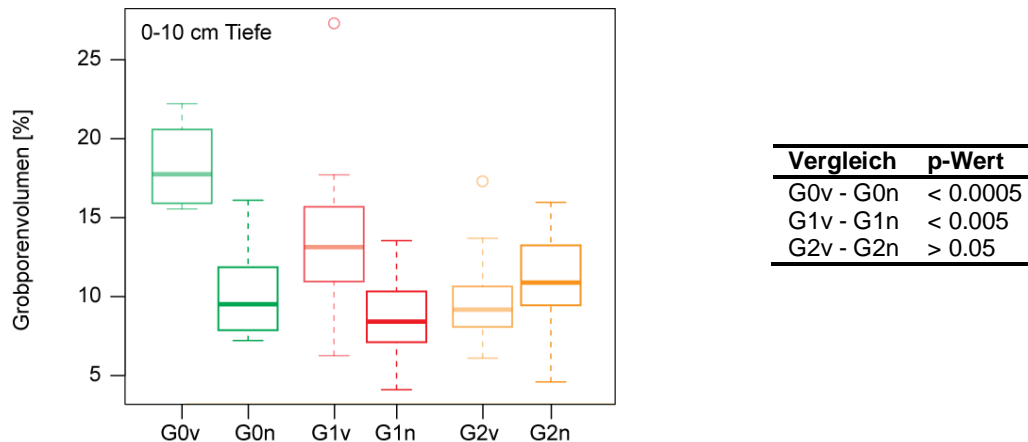


Abbildung 15 Grobporenvolumen vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last), gemessen in 0-10 cm Tiefe. Die Tabelle rechts zeigt die p-Werte zu den statistischen Analysen, Ergebnisse werden als signifikant verschieden angesehen wenn $p < 0.05$.

- Das Porenvolumen verhält sich umgekehrt proportional zur Lagerungsdichte, d.h. mit zunehmendem Porenvolumen nimmt die Lagerungsdichte ab. Abbildung 15 zeigt, dass das Porenvolumen nach der Befahrung kleiner ist als vorher, ausser bei Gasse 2. Dieser unlogische Effekt könnte auf die geringe Anzahl Proben zurückzuführen sein, so dass Zufälligkeiten im Bodengefüge nicht ausgeschaltet werden.
- Das Porenvolumen vor der Befahrung ist in Gasse 0 (G0v) deutlich höher als in den schon früher befahrenen Gassen G1v und G2v. Dies zeigt, dass sich der verdichtete Boden seit der letzten Befahrung vor rund 10 Jahren nicht wesentlich regeneriert hat.

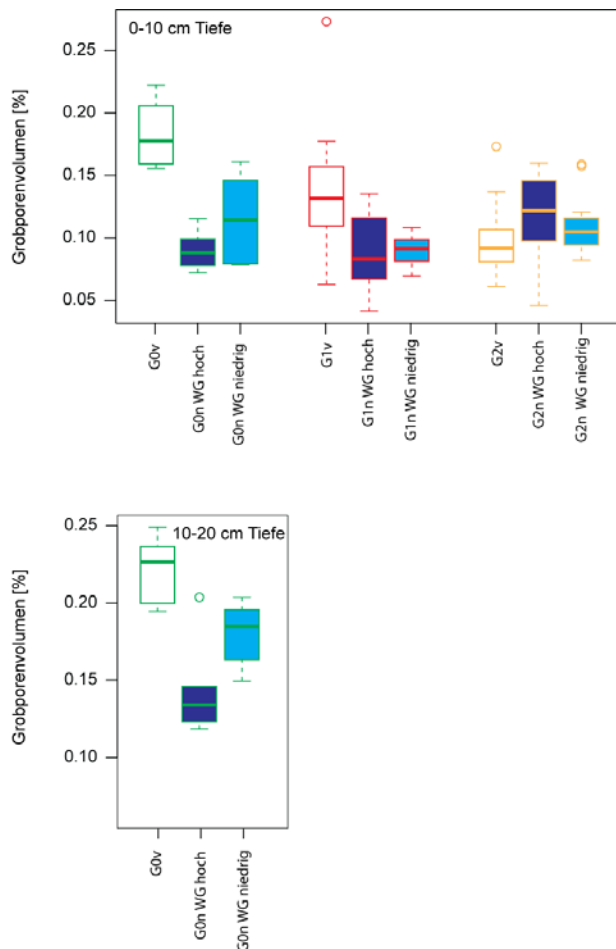


Abbildung 16 Grobporenvolumen vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last) und den eingestellten Wassergehalten zum Zeitpunkt der Befahrung (WG hoch = $32.5 \pm 3.5\%$, WG niedrig = $25.5 \pm 4.8\%$, gemessen in der Tiefe 0-10 cm (Abb. oben) und 10-20 cm (Abb. unten).

- Wie bei der Lagerungsdichte ist bei den Gassen 0 und 1 (in der Tiefe 0-10 cm) das Grobporenvolumen bei niedrigem Wassergehalt höher als bei hohem, ausser wiederum bei Gasse 2. Auch hier ist dieses unlogische Ergebnis auf die geringe Anzahl Proben zurückzuführen.
- In der erstmalig befahrenen Gasse 0 (in Tiefe 10-20 cm) zeigt sich bei hohem Wassergehalt ein signifikant geringeres Porenvolumen als bei niedrigem Wassergehalt.
- Aus den beiden vorgenannten Feststellungen kann gefolgert werden, dass sich der Wassergehalt bei der erstmaligen Befahrung des Bodens stärker auf das Porenvolumen auswirkt als beim Befahren eines bereits vorverdichteten Bodens.

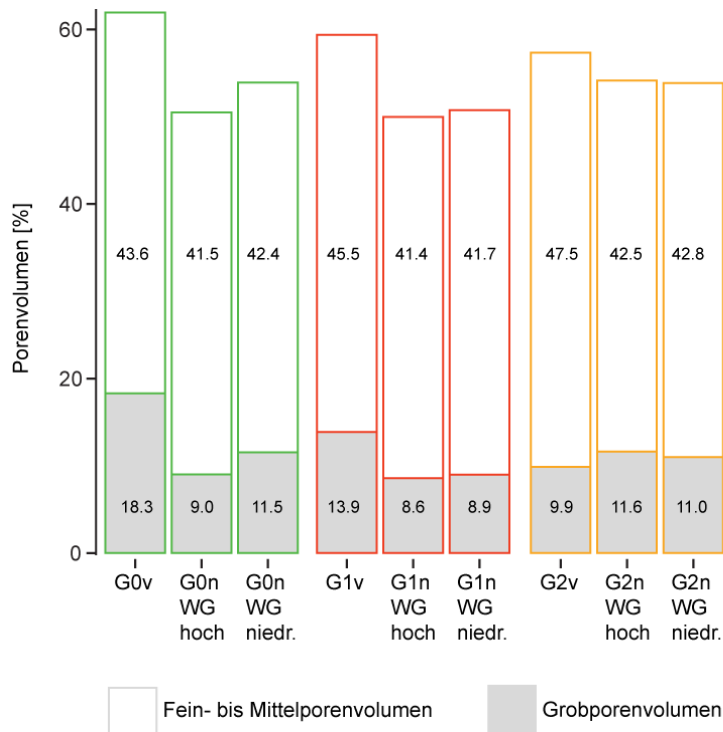


Abbildung 17 Anteile des Grob- und Fein-/Mittelporenvolumens am Gesamtporenvolumen vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last) und bei den eingestellten Wassergehalten zum Zeitpunkt der Befahrung (WG hoch = 32.5 ± 3.5 , WG niedrig = 25.5 ± 4.8 , gemessen in 0-10 cm Tiefe).

- Das Gesamtporenvolumen nimmt in allen Gassen nach der Befahrung deutlich ab.
- In der Gasse G0 ist nach der Befahrung bei hohem Wassergehalt (G0n WG hoch) eine deutlichere Abnahme des Grobporenvolumens festzustellen als bei niedrigem (G0n WG niedr.).
- Das Grobporenvolumen in den Gassen G0 und G1 nimmt nach der Befahrung deutlich ab, nicht jedoch in Gasse G2. Dieses unplausible Ergebnis ist vermutlich zufällig und durch die Inhomogenität des Bodens bedingt.

3.3.3 Luftleitfähigkeit

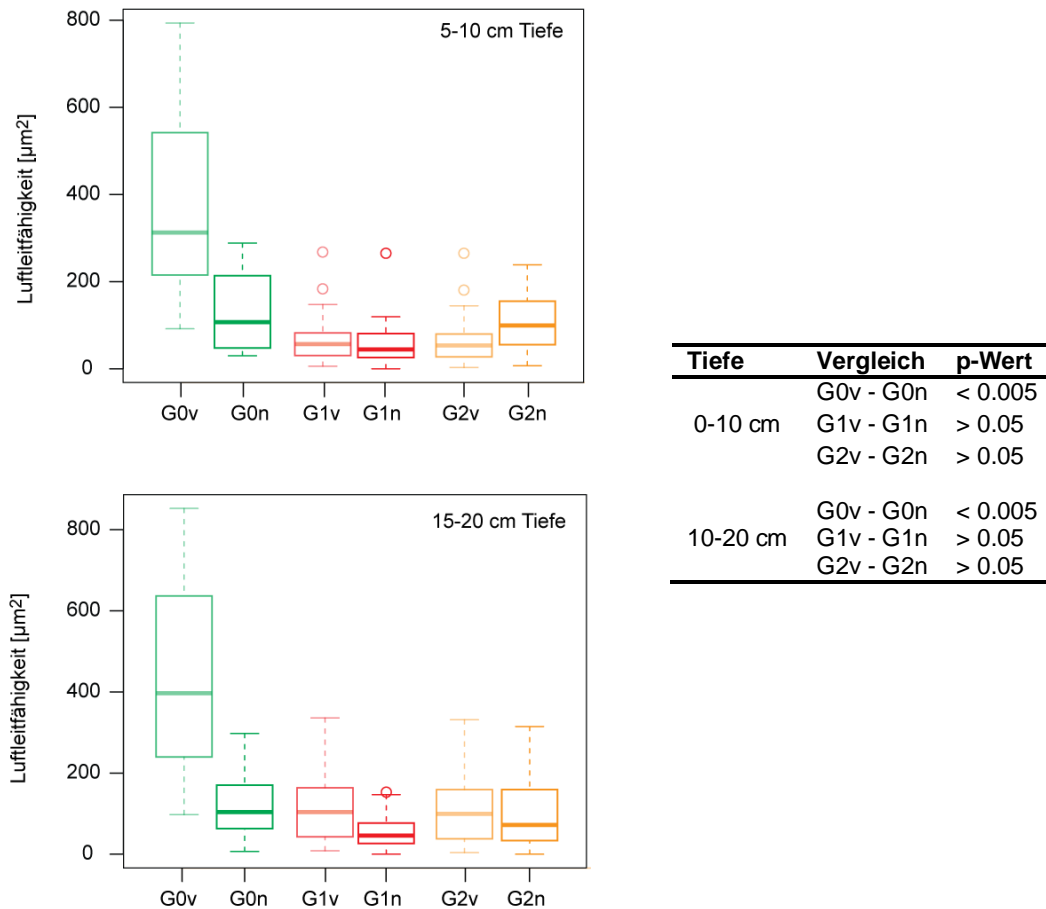


Abbildung 18 Luftleitfähigkeit vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last), gemessen in 0-10 cm Tiefe (Abb. oben) und 10-20 cm Tiefe (Abb. unten). Die Tabelle rechts zeigt die p-Werte zu den statistischen Analysen, Ergebnisse werden als signifikant angesehen wenn $p < 0.05$.

- Zwischen den Gassen 1 und 2 sind bei der Luftleitfähigkeit in beiden Tiefen sowohl vor als auch nach der Befahrung kaum Unterschiede festzustellen. Generell ist die Luftleitfähigkeit nach der Befahrung leicht geringer als vorher, ausser in Gasse 2 in der Tiefe 0-10 cm. Dieses eher unlogische Ergebnis ist vermutlich auf die zu geringe Anzahl Proben zurückzuführen und damit zufällig.
- Die Unterschiede in der Luftleitfähigkeit vor und nach Befahrung sind in den Gassen 1 und 2 gering, was bedeutet, dass in den rund 10 Jahren seit der letzten Befahrung der Gassen keine bedeutende Verbesserung in der Vernetzung der Poren stattgefunden hat.
- Eine deutliche Abnahme der Luftleitfähigkeit nach der Befahrung zeigt sich in Gasse 0, wo der Boden erstmalig befahren wurde. Wie schon die Ergebnisse bei der Lagerungsdichte und beim Porenvolumen zeigen, bewirkt die erstmalige Befahrung eines Bodens eine bedeutend grössere Veränderung als die Befahrung eines bereits vorbelasteten Bodens.

3.3.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

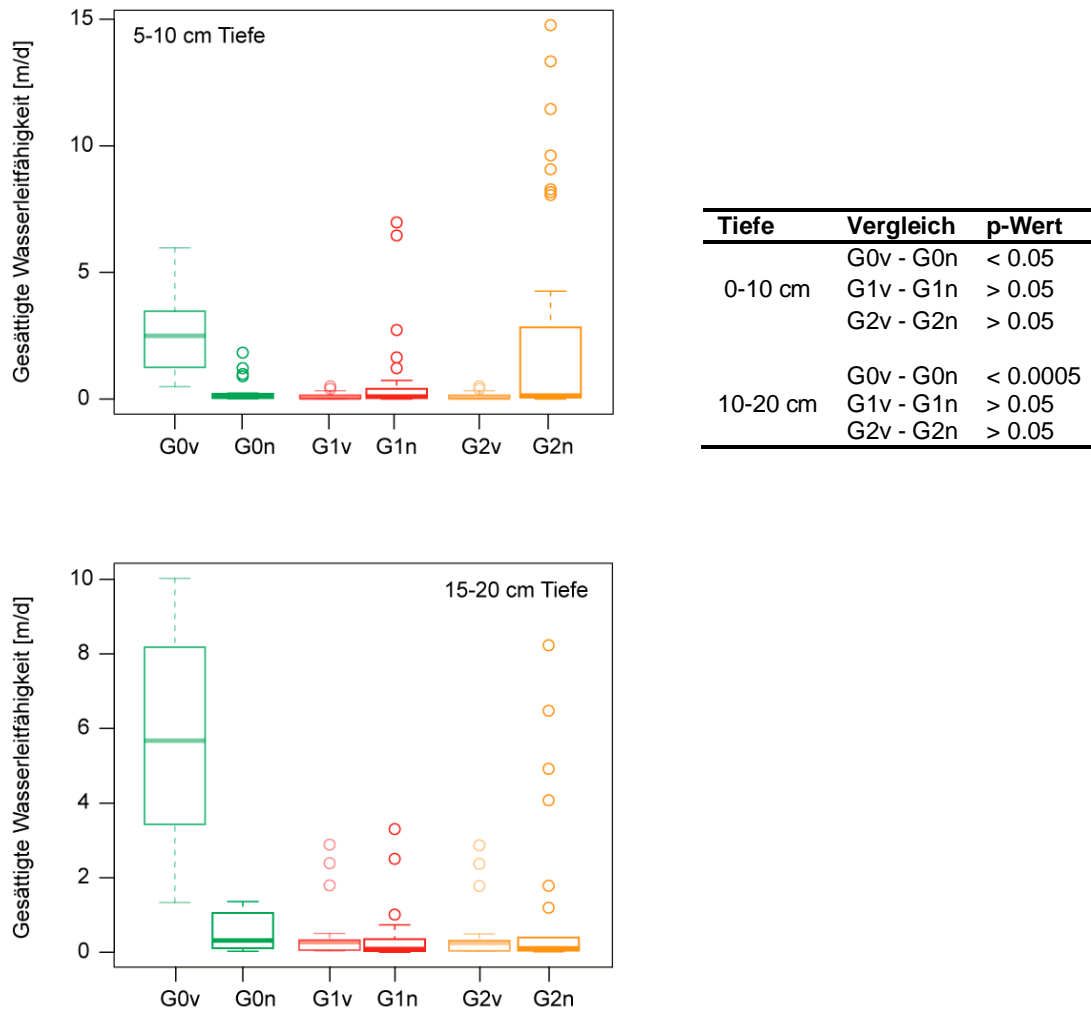


Abbildung 19 Wasserleitfähigkeit vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last), gemessen in 0-10 cm Tiefe (Abb. oben) und 10-20 Tiefe (Abb. unten). Die Tabelle rechts zeigt die p-Werte zu den statistischen Analysen, Ergebnisse werden als signifikant angesehen wenn $p < 0.05$.

- Die Wasserleitfähigkeit verhält sich gleich wie die Luftleitfähigkeit. Wiederum markant ist die starke Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach der Befahrung in der Gasse 0 und hier insbesondere in der Tiefe von 15-20 cm.

3.3.5 Vorverdichtung

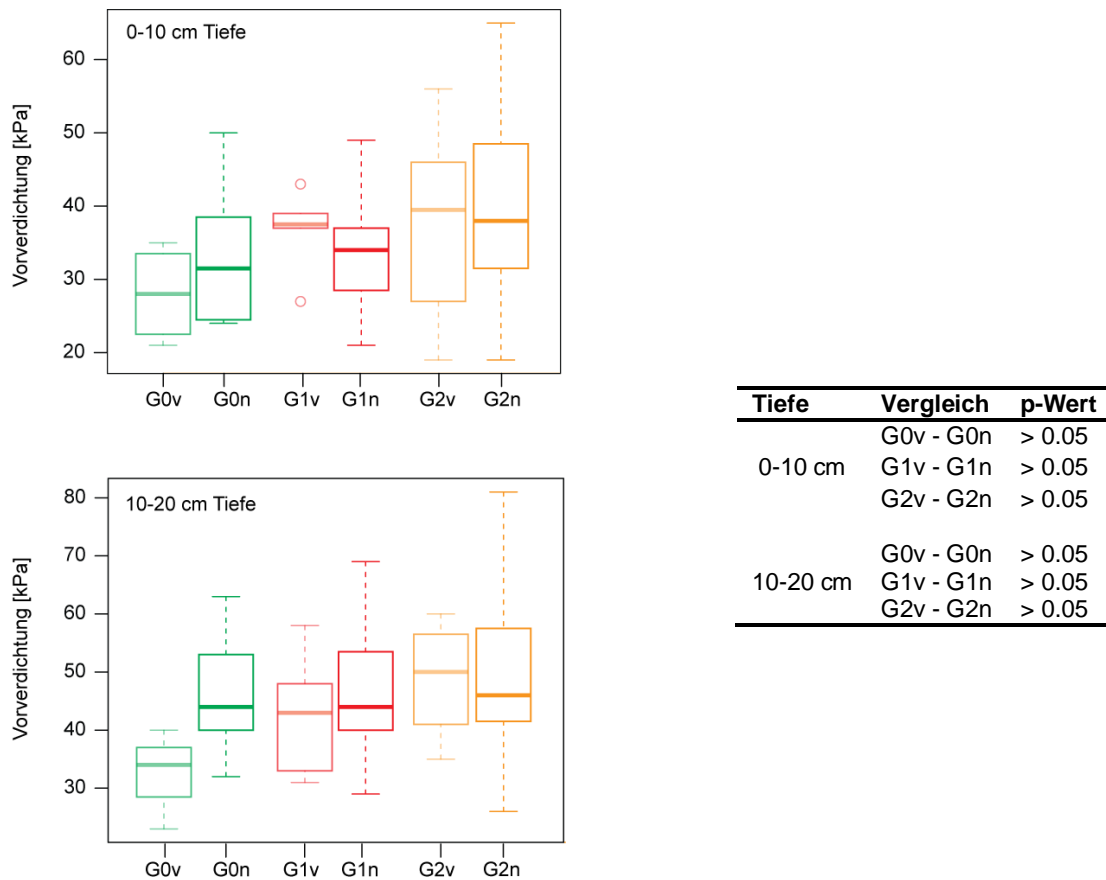


Abbildung 20 Vorverdichtung vor (v) und nach Befahrung (n) in den einzelnen Gassen (G0 = neue Gasse Befahrung 2x volle Last, G1 = alte Gasse Befahrung 4x volle Last, G2 = alte Gasse Befahrung 8x halbe Last), gemessen in 0-10 cm Tiefe (Abb. oben) und 10-20 cm Tiefe (Abb. unten). Die Tabelle rechts zeigt die p-Werte zu den statistischen Analysen, Ergebnisse werden als signifikant angesehen wenn $p < 0.05$.

- Die Vorverdichtung ist ein Mass für die Elastizität des Bodens. Entsprechend einer früheren Belastung durch Befahrung ergibt sich eine unterschiedliche aktuelle Tragfähigkeit.
- Grössere Unterschiede in der Vorverdichtung vor und nach der Befahrung sind nur in Gasse 0 festzustellen, wo der Boden erstmalig befahren wurde. In der Tiefe 0-10 cm wurde die Vorverdichtung durch den hohen Humusgehalt gedämpft, in der Tiefe 10-20 cm ist der Humusgehalt bedeutend geringer, so dass die Unterschiede in den Vorverdichtungswerten grösser sind.
- Die Tragfähigkeit in den Gassen 1 und 2 bleibt auch 10 Jahre nach der letzten Befahrung erhalten, die im Fahrversuch angelegten Lasten konnten die Vorverdichtung offensichtlich nicht überschreiten, wie das ähnliche Niveau der Vorverdichtungswerte vor und nach der Befahrung zeigt.

3.3.6 Eindringwiderstand

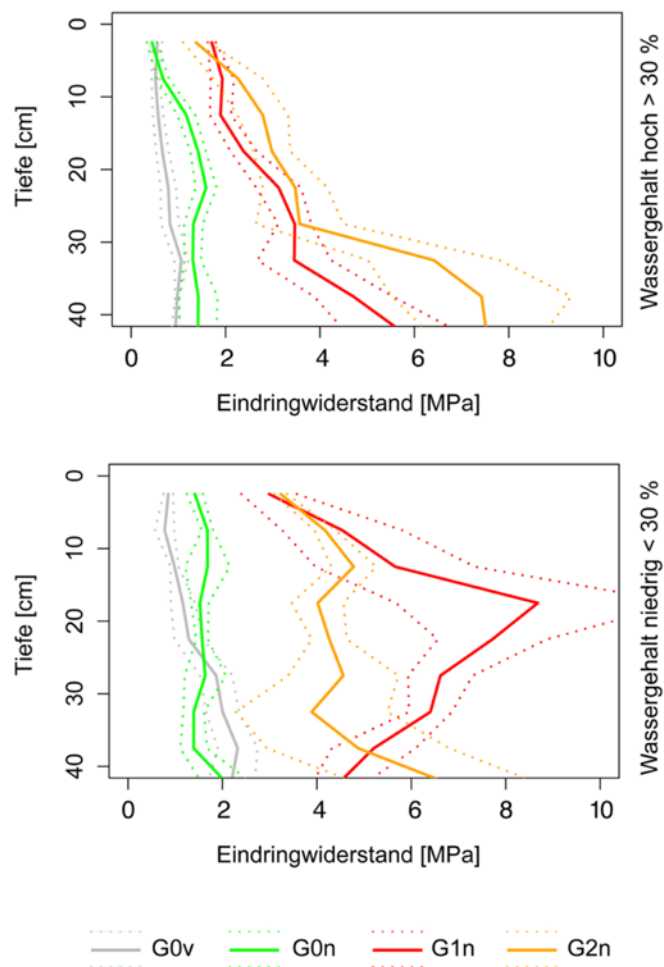


Abbildung 21 Tiefenverlauf des Eindringwiderstands bei hohem und niedrigem Wassergehalt, gemessen mit der PANDA-Sonde. Die durchgezogene Linie zeigt den Median, die gestrichelten Linien in derselben Farbe die dazugehörigen 95%-Vertrauensintervalle.

- In den Gassen G1 und G2, welche schon früher befahren wurden, ist der Eindringwiderstand bedeutend höher als in der erstmalig befahrenen Gasse G0. Bei beiden Wassergehalten zeigt sich ein ähnliches Bild.
- Bei niedrigem Wassergehalt liegt die Druckspitze in der Gasse G1 (4 Überfahrten mit voller Ladung) in einer Tiefe von rund 20 cm. Bei hohem Wassergehalt in Gasse G1 sowie bei beiden Wassergehalten in Gasse G2 ist bis in 40 cm Tiefe (bis hier wurde gemessen) noch keine Druckspitze festzustellen.
- Wie erwartet ist bei hohem Wassergehalt die Druckbelastung in einer Tiefe von 40 cm sowohl bei Gasse 1 als auch Gasse 2 grösser als bei niedrigem Wassergehalt. Erwartet würde auch, dass der Eindringwiderstand in Gasse 1 höher liegt als in Gasse 2, was hier nicht der Fall ist. Die Eindringwiderstände auf beiden Gassen liegen allerdings nahe beieinander. Aufgrund der geringen Anzahl Messungen kann es sich hier um ein zufälliges Ergebnis handeln.
- Beim niedrigen Wassergehalt ist der Eindringwiderstand in Gasse G1 grösser als in G2. Die breiten Vertrauensintervalle in G1 und G2 weisen auf verschiedene Einflüsse wie Skelettgehalt oder wechselnden Wassergehalt zwischen den Messstellen hin.

- Mit Werten die 2 MPa überschreiten liegen die Gassen 1 und 2 deutlich im verdichteten Bereich und mit Werten > 2.5 MPa sogar in stark verdichteten Bereichen, in denen das Wurzelwachstum bereits stark gehemmt wird (Greacen and Sands, 1980). In Gasse G0 (erstmalige Befahrung) wurden diese Grenzwerte nicht überschritten.
- Die nach Fahrspurtypen zusammengestellten Kurven des Eindringwiderstands (hier nicht abgebildet) von Gasse 1 und 2 zeigen, dass beim Spurtyp 1 die Druckspitzen in einer Tiefe von 10-20 cm lagen, beim Spurtyp 2 dagegen eher in einer Tiefe von 30-40 cm. Damit konnte einmal mehr gezeigt werden, dass die visuelle Klassierung der Spuren einen entsprechenden bodenphysikalischen Hintergrund hat.

4. Diskussion und Folgerungen

4.1 Fahren mit halber Ladung

a) Spurbildung

Das Experiment wurde auf zwei bestehenden Rückegassen durchgeführt, die vor rund 10 Jahren letztmals befahren wurden. Der Boden war also bereits vorverdichtet. Vor der Befahrung waren in den Rückegassen vorwiegend der Spurtyp 1 und geringe Anteile an Spurtyp 2 festzustellen.

In den Abschnitten mit **niedrigem** Wassergehalt (20-30%) trat nach der Befahrung sowohl mit voller wie auch mit halber Ladung praktisch kein Spurtyp 3 auf (Abb. 5 und Tab. 6). Der Anteil Spurtyp 2 war bei halber Ladung mit 30% deutlich höher als bei voller Ladung (15%). Die Bilder des Laserscans (Abb. 9 und 10) zeigen für die volle Ladung eine leicht ausgeprägtere Spurbildung. Bei niedrigem Wassergehalt kann also unter dem Aspekt der Spurbildung problemlos mit voller Ladung gefahren werden.

In den Abschnitten mit **hohem** Wassergehalt (30-35%, nahe der Fliessgrenze) betrug der Anteil Spurtyp 3 nach der Befahrung rund ein Drittel der Fahrstrecke. Bei halber Ladung lag er etwas höher, was nebst der grösseren Anzahl Überfahrten auch dadurch bedingt ist, dass ein Teil der Rückegasse in einer feuchteren Kartierungseinheit liegt. Die Bilder des Laserscans (Abb. 7 und 8) zeigen dagegen tendenziell eine eher geringere Spurbildung beim Fahren mit halber Ladung, die Unterschiede sind allerdings gering.

Zusammengefasst ergibt sich folgendes Ergebnis bezüglich Spurbildung:

Tabelle 7 Zusammenfassende Beurteilung der Spurbildung

	Wassergehalt	volle Ladung	halbe Ladung
Visuelle Ansprache	niedrig	leicht besser	
	hoch		leicht besser
Laserscan	niedrig		leicht besser
	hoch		leicht besser

Wöstefeld (2011) hat auf zwei Versuchsflächen im Nordschwarzwald (Bodenfeuchte 22-30%) und im Südschwarzwald (Bodenfeuchte 30-45%) einen vergleichbaren Befahrungsversuch durchgeführt, bei dem jeweils die Spureintiefungen gemessen wurden. Gefahren wurde ebenfalls mit 8-Rad-Forwardern. In der Variante "Teilladung mit höherer Anzahl Überfahrten" wurden tiefere Spuren gemessen als bei voller Ladung. Allerdings stellt auch Wöstefeld fest, dass eine gesicherte Aussage aufgrund der Ergebnisse von zwei Versuchsflächen nicht möglich ist. Nebst der aktuellen Bodenfeuchte spielen die Bodeneigenschaften für die Spurbildung eine grosse Rolle.

Ein Befahrungsexperiment aus dem Staatsforstbetrieb Sachsen (Schreiber, 2010), ebenfalls mit Forwardern durchgeführt, ergab bei voller Ladung eher tiefere Spuren als bei Teilladungen und entsprechend höherer Anzahl Überfahrten. Allerdings wird auch hier angemerkt, dass das Mikrorelief und die Bodeneigenschaften trotz optisch einheitlicher Bodenoberfläche kleinflächig wechseln können und damit das Ergebnis beeinflussen.

Schlussfolgerung Spurbildung:

Aufgrund unserer Fallstudie sowie den beiden erwähnten Befahrungsexperimenten aus Deutschland lässt sich keine gesicherte Aussage über den Einfluss von Teilladungen auf die Spurbildung machen, da die Bodeneigenschaften (u.a. die Körnung) auf zwei Vergleichsstrecken kaum je gleich sind. Eine grössere Anzahl Überfahrten mit Teilladung könnte bei einem Wassergehalt nahe

der Fliessgrenze zu vermehrtem Auftreten des Spurtyps 3 führen. Halbe Ladung bedeutet eben nicht halbes Betriebsgewicht, da bei jeder Fahrt das ganze Maschinengewicht mitgeführt wird. Bei kritischen Verhältnissen (Bodenfeuchte nahe der Fliessgrenze) könnte sich die höhere Anzahl Überfahrten damit eher nachteilig auf die Spurbildung auswirken. Wöstefeld (2011) bestätigt diese Vermutung mit seinen Untersuchungen. Die Beobachtungen von Maschinenführern (s. Kap. 1) gehen in die gleiche Richtung, auch wenn hier die Rahmenbedingungen beim Fahren (Bodeneigenschaften, Bodenfeuchte, Betriebsgewicht) jeweils nicht genau bekannt waren.

b) Verdichtung des Bodens

Der Vergleich zwischen Gasse 1 (volle Ladung) und Gasse 2 (halbe Ladung) wird vorerst für die einzelnen bodenphysikalischen Parameter vorgenommen:

- **Lagerungsdichte:**
Nach dem Befahren mit voller Ladung ist die Lagerungsdichte erwartungsgemäss deutlich höher als bei halber Ladung und zwar für beide Tiefenstufen (Abb. 12). Der Vergleich für die Abschnitte mit verschiedenem Wassergehalt fällt weniger deutlich aus. Mögliche Erklärungen sind, dass die Wassergehalte "niedrig" und "hoch" recht nahe beieinander lagen und dass die Skelettanteile kleinflächig wechselten. Weiter wurde bestätigt, dass die Lagerungsdichte von Spurtyp 1 zu 3 zunimmt.
- **Porenvolumen:**
Das Gesamtporenvolumen ist nach dem Befahren mit halber Ladung leicht grösser als mit voller und zwar sowohl bei niedrigem wie auch bei hohem Wassergehalt. Der Anteil der Grobporen nimmt nach der Belastung des Bodens ab; bei halber Ladung allerdings nicht deutlich, was aber den Änderungen in der Lagerungsdichte entspricht.
- **Luftleitfähigkeit und gesättigte Wasserleitfähigkeit:**
Vor dem Befahren liegen die Werte für die Luftleitfähigkeit und die gesättigte Wasserleitfähigkeit in Gasse 1 und 2 sehr ähnlich. Nach dem Befahren nehmen die Werte in beiden Gassen nur leicht ab, d.h. es hat sowohl bei voller wie auch bei halber Ladung keine bedeutende Veränderung durch das Befahren stattgefunden. Die Werte liegen in beiden Tiefenstufen (5-10 und 15-20 cm) in der Gasse 2 (halbe Ladung) leicht höher als in der Gasse 1, d.h. es ist ein geringfügiger positiver Effekt des Fahrens mit halber Ladung festzustellen.
- **Vorverdichtung:**
Die Vorverdichtung, welche ein Mass für die Elastizität und die Tragfähigkeit des Bodens ist, zeigt für die Gassen 1 und 2 vor dem Befahren ähnliche Werte. Nach dem Befahren liegen die Werte in der gleichen Grössenordnung wie vorher. Das heisst, dass die Tragfähigkeit des Bodens in den 10 Jahren, in denen er nicht befahren wurde, weitgehend erhalten blieb. Auch zwischen dem Befahren mit voller und halber Ladung konnten keine bedeutenden Unterschiede in der Vorverdichtung festgestellt werden. Tendenziell lag die Vorverdichtung sowohl vor als auch nach dem Fahren mit halber Last etwas höher, d.h. der Boden kann bei Belastung weniger elastisch reagieren als beim Befahren mit voller Ladung. Dieses theoretisch nicht erwartete Ergebnis kann durch zufällige Inhomogenitäten im Boden erklärt werden und liegt im Streubereich der durchgeführten Messungen.
- **Eindringwiderstand:**
Mit dem Eindringwiderstand soll die Tiefenwirkung der Verdichtung dargestellt werden.

Gemessen wurde mit der PANDA-Sonde bis in eine Tiefe von 40 cm. Die nach bodenphysikalischen Überlegungen plausible Erwartung, dass bei halber Ladung die Verdichtung weniger tief in den Boden reicht als bei voller Ladung, konnte durch die Messungen mit der PANDA-Sonde nur zum Teil bestätigt werden. In den Abschnitten mit niedrigem Wassergehalt war der Eindringwiderstand in der Tiefe zwischen 10 und 35 cm erwartungsgemäss bei voller Ladung deutlich höher als bei halber. In den Abschnitten mit hohem Wassergehalt zeigte sich ein umgekehrtes Bild. Vermutlich war die Anzahl Messstellen zu gering, um Störeinflüsse durch unterschiedliche Skelettanteile, Wurzeln und wechselnden Wassergehalt auszuschalten. Dies zeigen auch die breiten Bänder der 95%-Vertrauensintervalle beidseits des Medians der Kurve des Eindringwiderstands (Abb. 21).

Schlussfolgerung Verdichtung:

Die wichtigen Parameter Lagerungsdichte und Porenvolumen zeigen, dass in Bezug auf die Verdichtung des Bodens das Fahren mit halber Ladung und doppelter Anzahl Überfahrten für den in der Fallstudie betrachteten Boden günstiger ist als mit voller Ladung. Die Parameter Luftleitfähigkeit, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Vorverdichtung zeigen tendenziell ebenfalls in die erwartete Richtung, statistisch gesicherte Aussagen sind jedoch aufgrund der geringen Anzahl Proben und der erwähnten Störeinflüsse nur bedingt möglich. Aus den gleichen Gründen konnte bei der Tiefenwirkung der Verdichtung, dargestellt mit dem Eindringwiderstand, die Erwartung, dass die Verdichtung bei geringerer Radlast weniger tief in den Boden reicht, nicht bestätigt werden.

Fazit:

Bezüglich der Verdichtung des Bodens haben die bodenphysikalischen Parameter wie Lagerungsdichte, Porenvolumen, Wasser- und Luftleitfähigkeit gezeigt, dass sich weniger Ladung und damit geringere Radlasten auch bei grösserer (doppelter) Anzahl Überfahrten positiv auswirken. Die plausible Erwartung, dass die Verdichtungswirkungen bei reduzierter Ladung weniger tief in den Boden reichen, konnte mit der vorliegenden Fallstudie nur zum Teil, also für niedrige Wassergehalte, angedeutet werden. Hier müssten wesentlich umfangreichere Messungen durchgeführt werden, da beim Messen mit der PANDA-Sonde sehr viele Störeinflüsse auftreten können.

Bezüglich Spurbildung hat der Befahrungsversuch kein gesichertes Ergebnis geliefert. Tendenziell zeigte sich, dass das Fahren mit Teilladungen in den Abschnitten mit hohem Wassergehalt eher zu geringerer Spurbildung führte. Die Untersuchungen von Wöstefeld (2011) aus dem Schwarzwald zeigen eine gegenteilige Tendenz, allerdings wird auch hier das Problem der Inhomogenitäten in den Bodenstrukturen erwähnt. Geht man davon aus, dass eine bestimmte Holzmenge zu rücken ist, muss bei halber Ladung die doppelte Anzahl Leer- und Lastfahrten ausgeführt werden. Auch bei halber Ladung ist immer das ganze Maschinengewicht vorhanden, so dass das Betriebsgewicht nur um etwa ein Viertel sinkt, die Anzahl Fahrten sich jedoch verdoppelt. Dies kann sich bei hohen Wassergehalten ähnlich ungünstig auf die Spurbildung auswirken wie ein hohes Ladungsgewicht.

Das Rücken mit Teilladungen kann bezüglich Bodenschonung situativ eine gute Massnahme sein, wenn bei zunehmender Bodenfeuchte (z.B. beginnende Niederschläge) noch weiter gearbeitet werden muss. Es darf dann aber nicht die gleiche Menge Holz gerückt werden, welche bei voller Ladung gerückt worden wäre und bei Auftreten von Spurtyp 3 sind die Arbeiten zu unterbrechen.

Nicht unerwähnt bleiben darf die Tatsache, dass das Rücken mit Teilladungen die Rückearbeit erheblich verteuern kann. Wöstefeld (2011) hat für die zwei Versuchsflächen im Schwarzwald die Mehrkosten beim Rücken mit Forwarder berechnet. Diese liegen bei rund 30% oder umgerechnet in Schweizer Franken bei CHF 3.50/m³. Dieses Ergebnis dürfte auch für schweizerische Verhältnisse etwa zutreffen.

4.2 Vergleich von erstmaligem und wiederholtem Befahren

Zusätzlich zu den bereits bestehenden Rückegassen 1 und 2 (letztmals vor rund 10 Jahren befahren) wurde die Gasse 0 auf bisher unbefahrenem Boden ausgewählt, um die Unterschiede zwischen erstmalig und bereits früher befahrenem Boden aufzeigen zu können. Dabei ist festzuhalten, dass die Gasse 0 zwei Mal, die Gasse 1 dagegen vier Mal mit voller Ladung befahren wurde.

a) Spurbildung:

Auf der Gasse 0 im Abschnitt mit niedrigem Wassergehalt trat nach dem erstmaligen Befahren auf über 90% der gesamten Gassenlänge der Spurtyp 1 auf, im Abschnitt mit hohem Wassergehalt in gleichem Ausmass die Spurtypen 1 und 2 und nur geringfügig der Spurtyp 3 (Abb. 5 und Tab. 6). Ein Laserscan wurde in Gasse 0 nur für den Abschnitt mit hohem Wassergehalt erstellt, dieser bestätigt bei der Spurbildung das Ergebnis der visuellen Ansprache.

Der Vergleich der Abbildungen 6 und 7 zeigt für die Streckenabschnitte mit hohem Wassergehalt, dass die Spurbildung beim Befahren mit voller Ladung auf dem unbefahrenen Boden (Gasse 0) etwas ausgeprägter ist als auf dem bereits vorverdichteten Boden in der Rückegasse (Gasse 1).

b) Verdichtung

Wiederum werden vorerst die Ergebnisse für die einzelnen Parameter dargestellt:

- **Lagerungsdichte**

Vor dem Befahren war die Lagerungsdichte in Gasse 1 (G1v) in der Tiefe 0-10 cm nur noch leicht höher als in der noch unbefahrenen Gasse 0 (G0v). Das bedeutet, dass in der obersten Bodenschicht der bereits bestehenden Rückegasse seit der letzten Befahrung bereits eine Regeneration eingesetzt haben könnte.

Anders sieht es in der Tiefe von 10-20 cm aus. Hier liegt die Lagerungsdichte in Gasse 1 (G1v) deutlich höher als in Gasse 0 (G0v). Das Porensystem wurde durch natürliche Regeneration bisher kaum oder nur in sehr geringem Ausmass wieder hergestellt.

Nach dem Befahren hat die Lagerungsdichte sowohl in der Gasse 0 als auch in der Gasse 1 in der Tiefe 0-10 cm bei hohem Wassergehalt stärker zugenommen als bei niedrigem. In der Tiefe von 10-20 cm ist ebenfalls bei beiden Wassergehalten eine Zunahme der Lagerungsdichte nach dem Befahren festzustellen. In der bereits früher befahrenen Gasse 1 ist die Zunahme der Lagerungsdichte deutlich geringer als in der erstmalig befahrenen Gasse 0, was darauf zurück zu führen ist, dass eine Verdichtung des Bodens von der letztmaligen Befahrung erhalten blieb und damit die erhöhte Tragfähigkeit wirken kann.

- **Porenvolumen**

Das Porenvolumen in der Gasse 0 (G0v) ist erwartungsgemäss deutlich grösser als in der schon früher befahrenen Gasse 1 (G1v). Nach der Befahrung liegt das Porenvolumen in Gasse 0 (G0n) nur noch leicht höher als in Gasse 1 (G1n). Das zeigt, dass bei einem natürlich

gelagerten Boden bereits die ersten zwei Überfahrten den grössten Teil der Reduktion des Porenvolumens bewirken.

- **Luftleitfähigkeit und gesättigte Wasserleitfähigkeit**
Aus unseren früheren Befahrungsversuchen in Ermatingen und Heiteren ist bekannt, dass auf einem natürlich gelagerten Boden bereits nach einer geringen Anzahl Überfahrten die Luft- und Wasserleitfähigkeit deutlich abnimmt. Dies hat sich im Befahrungsversuch Bremgarten bestätigt (Vergleich G0v mit G0n). Hier wird bereits nach zwei Überfahrten das Niveau der bereits früher befahrenen Gasse 1 erreicht. Auf der Gasse 1 ist die Abnahme der Luft- und Wasserleitfähigkeit nach der Befahrung nur sehr gering. Das bedeutet, dass sich bei erneuter Befahrung eines schon früher befahrenen Bodens nicht mehr viel ändert, aber auch, dass im vorliegenden Fall in der Phase ohne Befahrung offensichtlich keine bedeutende Regeneration des Porensystems stattgefunden hat.
- **Vorverdichtung**
Erwartungsgemäss ist die Vorverdichtung vor der Befahrung in Gasse 1 (G1v) deutlich höher als in Gasse 0 (G0v). Nach den zwei Überfahrten auf dem bisher unbefahrenen Boden in Gasse 0 (G0n) wird bereits das Niveau der Vorverdichtung in Gasse 1 erreicht. In der bereits vorverdichteten Gasse 1 ist nur eine sehr geringe Zunahme der Vorverdichtung durch das Befahren festzustellen.
- **Eindringwiderstand**
Der Eindringwiderstand auf der erstmalig befahrenen Gasse 0 ist nach zwei Überfahrten bei beiden Wassergehalten leicht höher als im natürlich gelagerten Boden. Auf der bereits früher befahrenen Gasse 1 liegt der Eindringwiderstand nach der erneuten Befahrung deutlich höher als in Gasse 0. Das zeigt, dass der Boden in der bestehenden Rückegasse auch zehn Jahre nach der letzten Befahrung noch deutlich verdichtet ist. Allerdings könnte die Ursache für einen Teil dieser höheren Verdichtung auch in einem höheren Skelettanteil oder in der Streuung der Messungen liegen und nicht allein durch das frühere Befahren verursacht sein.

Fazit:

Die erstmalige Befahrung hat einen grösseren Effekt auf die Strukturveränderungen im Boden als das wiederholte Befahren eines bereits vorverdichteten Bodens. Erwartungsgemäss wird der Boden bei höherem Wassergehalt stärker verdichtet als bei niedrigem.

In der vorliegenden Fallstudie zeigte sich in den Abschnitten mit hohem Wassergehalt auf dem noch unbefahrenen Boden (Gasse 0) eine etwas ausgeprägtere Spurbildung als auf dem bereits vorverdichteten Boden der bestehenden Rückegasse (Gasse 1).

Diese Erkenntnisse bestätigen erneut, dass die erstmalige Befahrung eines Bodens, z.B. in einer neu angelegten Rückegasse, bei günstigen Bedingungen, d.h. bei niedrigem Wassergehalt, erfolgen sollte. Damit wird für die spätere Befahrung eine wesentlich bessere Ausgangslage geschaffen, als wenn der Boden erstmalig bei relativ hohem Wassergehalt befahren wird.

Referenzen

- Bates, D.M., Maechler, M., Bolker, B., 2013: lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and Eigen. R package version 0.999999-2. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Berisso, F.E., Schjonning, P., Keller, T., Lamande, M., Etana, A., de Jonge, L.W., Iversen, B.V., Arvidsson, J., Forkman, J., 2012: Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil Tillage Res.* 122, 42-51.
- Berli, M., Kulli, B., Attinger, W., Keller, M., Leuenberger, J., Fluhler, H., Springman, S.M., Schulín, R., 2004: Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil Tillage Res.* 75, 37-52.
- Crawley, M.J., 2009: *R book*, repr. with corrections ed. Wiley, Chichester.
- Goutal, N., Boivin, P., Ranger, J., 2012: Assessment of the Natural Recovery Rate of Soil Specific Volume following Forest Soil Compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1426-1435.
- Greacen, E.L., Sands, R., 1980: Compaction of forest soils. A review. *Aust. J. Soil Res.* 18, 163-189.
- Horn, R., Fleige, H., 2003: A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Tillage Res.* 73, 89-99.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 1997: Messbarkeit von Bodenverdichtungen im Feld. Fachbericht April 1997, 59 S.
- Lüscher, P., Frutig, F., Sciacca, S., Spjevak, S., Thees, O., 2009: Physikalischer Bodenschutz im Wald: Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. Merkblatt für die Praxis Nr. 45, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. 12 S.
- Meyer, C., Lüscher, P., Schulín, R., 2014: Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. *Eur. J. For. Res.* 133, 453-465.
- Pinheiro, J.C., Bates, D.M., 2000: *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer, New York.
- Schäffer, B., Attinger, W., Schulín, R., 2007: Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery - Soil physical and mechanical aspects. *Soil Tillage Res.* 93, 28-43.
- Schäffer, J., von Wilpert, K., Kublin, E., 2009: Analysis of fine rooting below skid trails using linear and generalized additive models. *Can. J. For. Res.* 39, 2047-2058.
- Schreiber, J., 2010: Schriftliche Mitteilung über einen Fahrversuch mit voller und halber Ladung.
- Team, R.D.C., 2013: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Waldstandorte des Kantons Aargau, 2009: Kartierung, Kartierungsschlüssel, Dept. Bau, Verkehr und Umwelt, Abt. Wald 5001 Aarau.
- Walther, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1, Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep-Verlag. 768 S.
- Wöstefeld, J.H., 2011: Auswirkungen von Bändern und Teillasten auf die Erhaltung der technischen Befahrbarkeit von Rückegassen auf befahrungsempfindlichen Standorten. Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br., 107 S.

Anhang 1

Berechnung des Grenzwassergehaltes

Beispiele für die Berechnung des Grenzwassergehaltes mit dem Informationssystem ProFor
(links volle Ladung, rechts halbe Ladung)

```
ProFor v 2.2.1
Stand der Datenbank: 13. Juni 2005 16:28
5. Juni 2014 15:59
```

```
Maschinendaten *:
Hersteller: Valmet
Maschinenbezeichnung: Valmet 830.3
Maschinentyp: Forwarder
Anzahl der Achsen: 2
Achslast auf Achse 1: 6040 kg
Achslast auf Achse 2: 19460 kg
Bereifung Achse 1 *:
Hersteller: Nokian
Reifenbezeichnung: Nokian 710/40-22,5 16 FK TRS
Dimension: 710/40-22,5 16
Luftdruck: 2.0 bar
Bogieketten: nicht aufgezogen/nicht möglich
Bereifung Achse 2 *:
Hersteller: Nokian
Reifenbezeichnung: Nokian 710/40-22,5 16 FK TRS
Dimension: 710/40-22,5 16
Luftdruck: 2.6 bar
Bogieketten: nicht aufgezogen/nicht möglich
Bodendaten:
schluffiger Lehm , schwach humos, nicht oder mäßig wechselfeucht
< 30 % Skelettanteil
< 15 % Hangneigung
Bodendruck je Reifen
Achse 1: 187 kPa
Achse 2: 336 kPa [relevantes Maximum]
```

Diese Maschine darf bis zu einem Wassergehalt von
25 Prozent
auf dem angegebenen Standort fahren.

```
ProFor v 2.2.1
Stand der Datenbank: 13. Juni 2005 16:28
5. Juni 2014 15:53

Maschinendaten *:
Hersteller: Valmet
Maschinenbezeichnung: Valmet 830.3.1/2
Maschinentyp: Forwarder
Anzahl der Achsen: 2
Achslast auf Achse 1: 7000 kg
Achslast auf Achse 2: 9480 kg
Bereifung Achse 1 *:
Hersteller: Nokian
Reifenbezeichnung: Nokian 710/40-22,5 16 FK TRS
Dimension: 710/40-22,5 16
Luftdruck: 1.6 bar
Bogieketten: nicht aufgezogen/nicht möglich
Bereifung Achse 2 *:
Hersteller: Nokian
Reifenbezeichnung: Nokian 710/40-22,5 16 FK TRS
Dimension: 710/40-22,5 16
Luftdruck: 1.7 bar
Bogieketten: nicht aufgezogen/nicht möglich
Bodendaten:
schluffiger Lehm , schwach humos, nicht oder mäßig wechselfeucht
< 30 % Skelettanteil
< 15 % Hangneigung
Bodendruck je Reifen
Achse 1: 185 kPa
Achse 2: 213 kPa [relevantes Maximum]
```

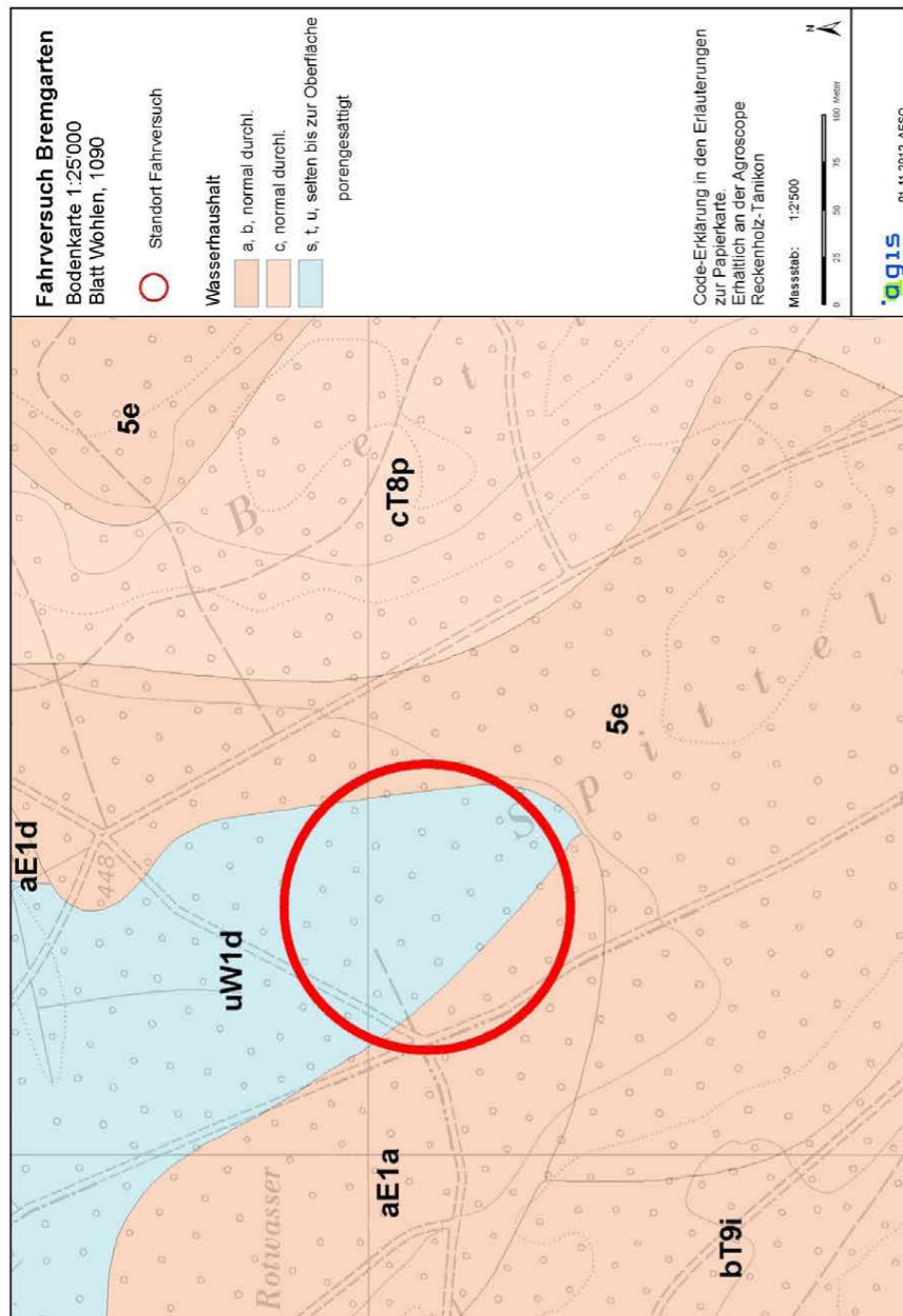
Diese Maschine darf bis zu einem Wassergehalt von
32 Prozent
auf dem angegebenen Standort fahren.

Anhang 2

Bodenkarte

LK 1:25 000, Blatt 1090 Wohlen, Ausschnitt Versuchsfläche Bremgarten

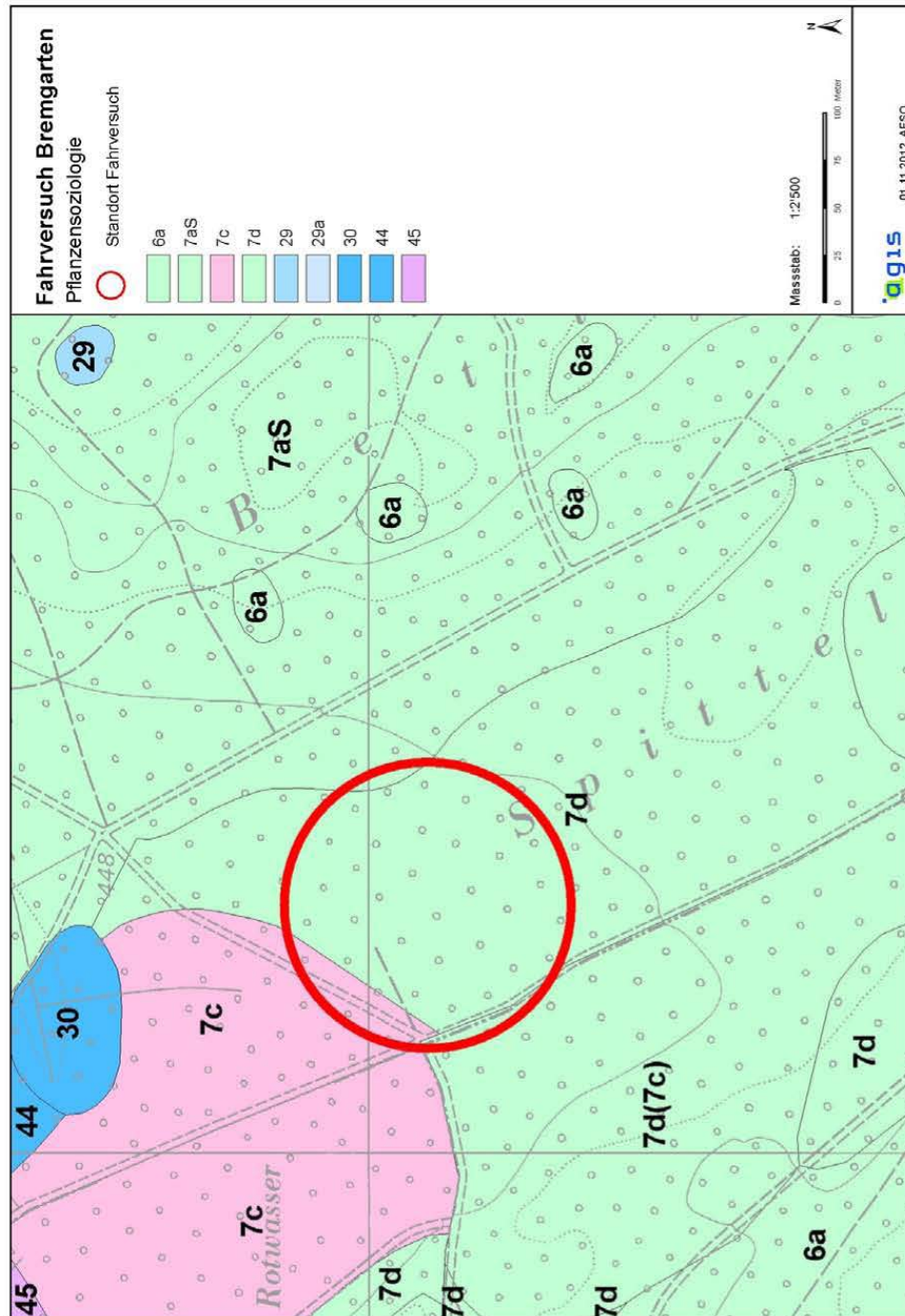
Informationen zu den Bodeneinheiten siehe Tab. 1



Anhang 3

Pflanzensoziologische Karte

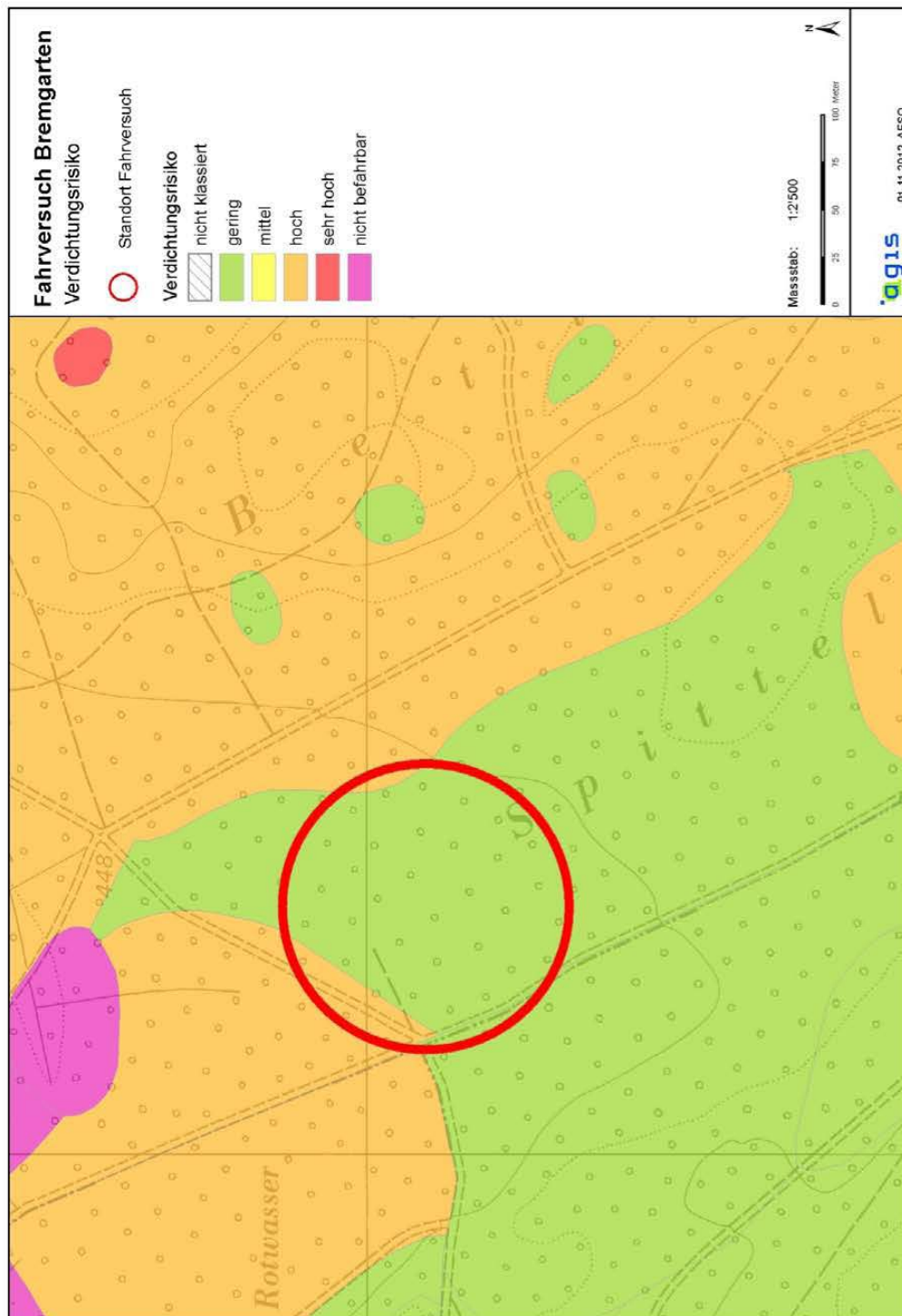
Ausschnitt Versuchsfläche Bremgarten



Anhang 4

Bodenverdichtungsrisiko-Karte

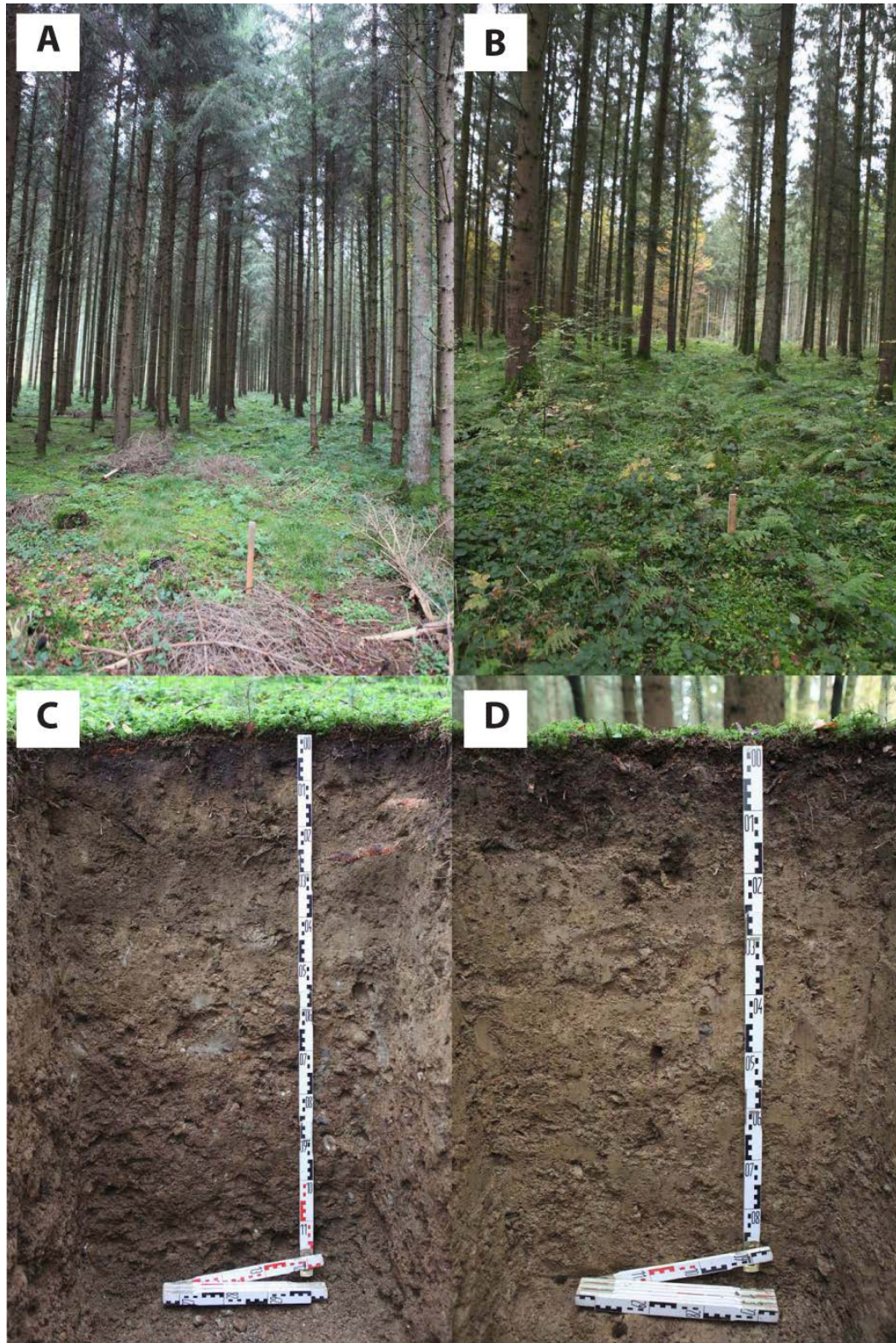
Ausschnitt Versuchsfläche Bremgarten



Anhang 5

Gassen 1 und 2 vor der Befahrung sowie Leitprofile

Gasse 1 (A) und 2 (B) vor der Befahrung mit den dazugehörigen Leitprofilen (C/A, D/B)



Anhang 6

3D-Laserscan



Fotodokumentation des 3D Laser-Scannings:

(A) Aufbau der nötigen Apparaturen auf Gasse 1, in der Mitte unter dem Schirm befindet sich der Scanner, die weissen Kugeln dienen als Referenzpunkte für die Distanzen;

(B) Scanner Nahaufnahme; (C) justieren des Scanners durch anpeilen einer der Referenzkugeln (D); finale Aufnahme der Bilder.

Anhang 7

Fahren mit dem Forwarder



Beladen des Forwarders (A),
Befahren der Gasse 2 mit voller
Ladung (B) und anschliessendes
Rekognoszieren der durch die
Befahrung entstandenen Spurtypen
durch alle Beteiligten (C).

Anhang 8

Messen und Beprobten



(A) Messung des Eindringwiderstandes mit der PANDA-Sonde nach der Befahrung in Gasse 2, WG niedrig, Spurtyp 1.

(B) Entnahme der Stechzylinder mit den Bodenproben in beiden Fahrspurrinnen der Gasse 1 vor der Befahrung.

Anhang 9

Fahrspurtypen

Kriterien zur Unterscheidung der drei Spurtypen (WSL, Merkblatt Nr. 45, 2009).

Kriterium	Spurtyp 1	Spurtyp 2	Spurtyp 3
Aufbau Oberboden	nicht gestört	+/- gestört	gestört
Spureintiefung*	<i>bleibt in Oberboden-horizonten</i> (5 bis max. 10 cm)	<i>bleibt in Ober-bodenhorizonten</i> (meist < 10 cm)	reicht bis in Unter-bodenhorizonte (> 10 cm)
Verformung	keine**	Ansätze von seitlichen Auspressungen des Oberbodens	ausgeprägte seitliche Aufwölbungen
Farbe (Vernässungsmerkmale)	Vernässungsmerkmale je nach den standörtlichen Voraussetzungen vorhanden		

- Hauptkriterium ist, bis in welchen Bodenhorizont die Spureintiefung reicht und nicht die eigentliche Spurtiefe in cm.

** teilweise sind Stollenabdrücke sichtbar