

Vergleichende Untersuchung von Messverfahren zur Bestimmung der Spurtiefe von Traktoren

Jernej Poteko, Ludwig Volk, Patrick Ole Noack

Die Schonung des Bodens, der als Grundlage der Pflanzenproduktion dient, ist angesichts des zunehmenden Gewichts von Landmaschinen eine große Herausforderung. In Zusammenhang mit der Bodenverdichtung ist die Spurtiefe ein wichtiges Maß. Im Rahmen des Forschungsprojekts ARDopt wurde die Eignung unterschiedlicher Ultraschallsensoren und photogrammetrischer Verfahren für die Messung der Spurtiefe untersucht. Zudem wurde der Einfluss der Kenngrößen Reifendruck, Fahrgeschwindigkeit und Bodenfeuchte auf die Spurtiefe untersucht.

Die fortlaufende Messung der Spurtiefe mit kommerziellen Ultraschallsensoren und die Berechnung der Spurtiefe aus digitalen Oberflächenmodellen weisen einen engen Zusammenhang mit den Referenzmessungen auf. Der Reifendruck beeinflusste die gemessene Spurtiefe am stärksten. Ebenso konnte, wie erwartet, der Einfluss der Bodenfeuchte auf die Spurtiefe beobachtet werden.

Schlüsselwörter

Reifendruck, Spurtiefe, Bodenverdichtung, Reifen-Boden-Interaktion

Die Lagerungsdichte des Bodens beeinflusst seine Ertragsfähigkeit. Sie wirkt sich auf die Wasserhaltefähigkeit, das Infiltrationsvermögen, die Durchwurzelbarkeit, die Durchlüftung und die Verfügbarkeit von Nährstoffen aus (HÅKANSSON 2005, DIEPENBROCK et al. 2016, AMELUNG et al. 2018, KELLER et al. 2019). Durch zu dichte Lagerung wird das Porenvolumen und dadurch die Wasserhaltefähigkeit reduziert. Hierdurch vermindert sich die Fähigkeit des Bodens, Wasser für das Pflanzenwachstum über längere Perioden ohne Niederschläge bereitzustellen, sodass die Gefahr von Trockenschäden unabhängig vom und zusätzlich zum Klimawandel ansteigt. Die Infiltrationsfähigkeit des Bodens nimmt mit zunehmender Lagerungsdichte ebenfalls ab (BRUNOTTE et al. 2015), sodass die Gefahr von Oberflächenabfluss und dadurch bedingte Erosion ansteigt. Die durch steigende Lagerungsdichte verursachte Reduktion der Versorgung mit Sauerstoff und die erhöhte Staunässegefahr reduzieren die Freisetzung von Nährstoffen und die Fähigkeit der Pflanzen, sich diese aktiv anzueignen (AMELUNG et al. 2018, BLUM 2019).

Auf die Bedeutung des Bodens für die Pflanzenproduktion und dem Schutz vor Verdichtungen wird auch im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG § 17) hingewiesen: „Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, sind, so weit wie möglich, zu vermeiden“.

Die Lagerungsdichte bewirtschafteter und nicht bewirtschafteter Böden weist eine räumliche und zeitliche Variabilität auf. Den größten Einfluss auf die Lagerungsdichte bewirtschafteter Böden hat das Befahren mit Landmaschinen bei der Verdichtung streifenweise in den Fahrspuren durch die Reifen erfolgt (GEISCHEDER 2011). Das Ausmaß der Verdichtung, also der Zunahme der Lagerungsdichte unter den Fahrspuren, wird im Wesentlichen durch den Reifeninnendruck, die Bodenfeuchte, die Bodenart, das Reifenfüllvolumen, die Überrollhäufigkeit sowie mittelbar durch die den Reifendruck limitierende Radlasten bestimmt (HÅKANSSON 2005, KELLER et al. 2019). Generell gilt, dass die Verdichtung mit abnehmendem Reifeninnendruck, zunehmender Korngröße und abnehmender Bodenfeuchte abnimmt. Die Korngröße ist zeitlich stabil, jedoch räumlich variabel. Die Bodenfeuchte weist zusätzlich eine zeitliche Variabilität auf. Der Reifeninnendruck ist variabel (SCHNAUFER et al. 1998), muss jedoch auf die Einsatzszenarien angepasst werden (Straßenfahrt, Feldarbeit) und wird zudem durch die Tragfähigkeit des Reifens bei unterschiedlichen Radlasten bestimmt.

Die fortlaufende Messung der Bodenverdichtung ermöglicht einerseits die Dokumentation und die daraus resultierende Planung für nachfolgende Bodenbearbeitungsmaßnahmen sowie andererseits die Optimierung von nachfolgenden Maßnahmen (Fruchtfolge, technische und organisatorische Maßnahmen) hinsichtlich des Zeitpunkts bzw. der Bodenfeuchte. Andererseits können die Messwerte dem Fahrer der Landmaschine als Hinweis auf das Ausmaß des Schadens dienen, der bei der Durchführung der aktuellen Maßnahme entsteht. Dies erleichtert die Risikoabwägung und die Entscheidung über eine eventuell erforderliche Anpassung oder gar Unterbrechung der Tätigkeiten. Nicht zuletzt können die Messwerte für die Automatisierung von Prozessen auf oder in Landmaschinen dienen, die zu einer Reduktion der Bodenverdichtung unter den aktuellen Gegebenheiten führen (Absenkung des Reifendrucks, Anpassung von Geschwindigkeit und/oder Arbeitstiefe).

Die Bodenverdichtung selbst kann nicht oder nur mit sehr hohem technischen Aufwand fortlaufend gemessen werden. Sie wird meist punktuell und statisch mit Penetrometern ermittelt. Dahingegen ist die Tiefe der bei der Überfahrt erzeugten Spur (Spurtiefe) ein relativ leicht zu erfassendes Maß für die Bodenverdichtung unter der Fahrspur, da sie aufgrund der Verringerung des Volumens bei gleichbleibender Masse mit der Steigerung der Lagerungsdichte in direktem Zusammenhang steht.

Im Forschungsprojekt „Automatisierte Regelung des Reifenfülldrucks von landwirtschaftlichen Traktoren“ (ARDopt) wurden vor diesem Hintergrund die Eignung von Ultraschallsensoren und photogrammetrischen Verfahren für die Messung der Spurtiefe durch Traktoren untersucht. Ziel der Studie war, unterschiedliche Messverfahren zur Bestimmung der Spurtiefe von Traktoren zu untersuchen und zu vergleichen. Zudem sollte der Einfluss der Kenngrößen Reifendruck, Fahrgeschwindigkeit und Bodenfeuchte ermittelt werden.

Material und Methoden

An der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Weidenbach, Deutschland) wurden im Rahmen des Forschungsprojekts ARDopt Untersuchungen zur Spurtiefe durchgeführt. Zum einen wurden verschiedene Messverfahren unter verschiedenen Bedingungen verglichen, zum anderen wurde der Einfluss des Reifendrucks, der Fahrgeschwindigkeit und der Bodenfeuchte in unterschiedlichen Versuchsvarianten betrachtet.

Messverfahren

Der Referenzwert für die Spurtiefe wurde entlang der Fahrspuren auf sechs vordefinierten Messstellen zwischen einer Messlatte, die über die Spur gelegt wurde, und der Spuroberfläche gemessen. Die Tiefe der Fahrspur wurde als Distanz zwischen dem tiefsten Punkt in der Mitte der Fahrspur und dem unteren Rand der senkrecht auf die Fahrspur gelegten Messlatte mit einem Gliedermaß erfasst. Die Position des Referenzwertes wurde mit einem GNSS-Empfänger (Trimble Catalyst, USA) mit einer Genauigkeit von 10 mm + 1 ppm RMSE (Root mean square error, Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme) und einem Android-Tablet mit der Software QField (OPENGIS.ch GmbH, Schweiz) bestimmt. Pro Versuchsvariante wurden sechs Referenzwerte auf vordefinierten Positionen erfasst (Abbildung 1).



Abbildung 1: Luftbild der Versuchsanlage nach der Messung der Spurtiefen. Es wurden die Reifendrücke von 0,5, 0,7, 1,8 und 2,0 bar bei konstanter Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h verglichen. Die waagerechten Linien markieren die Referenzpunkte (© J. Poteko)

Die Messungen der Spurtiefe erfolgte in der ersten Messkampagne mit zwei **kostengünstigen Ultraschallsensoren** HC-SR 04 mit einem Messbereich von 20 bis 4.000 mm, einer Auflösung von 3 mm, einer Genauigkeit von 99,8% und einem Messkegel von 15° (ElecFreaks, China). Die Ultraschallsensoren wurden hinter dem Traktor mittig über und neben der Fahrspur auf der gleichen Höhe von 97 cm (gemessen ab festem Boden bei einem Reifendruck von 1,8 bar) montiert. In der Verbindung mit dem Microcontroller Arduino Mega 2560 (Arduino AG, Italien) wurden die Spurtiefen aus der Differenz der Entfernungen berechnet, welche die Sensoren in der Mitte der Spur und neben der Spur mit einer Datenrate von 9 Hz erfassten. Für die Validierung der gemessenen Spurtiefen anhand der Referenzwerte wurde die gemessene Spurtiefe durch Mittelwertbildung im Umkreis von 0,5 und 3 m von der Position der Referenz aufbereitet.

Bei der ersten Messkampagne kam eine **Action-Kamera** (GoPro Hero7 Black, USA) zum Einsatz. Sie wurde auf einer Höhe von 1,5 m direkt über der Fahrspur montiert, um so den Bereich in und neben der Spur zu erfassen (Oberflächenausschnitt von ca. 2,8 x 2,1 m). Die Längsseite des Bildes stand parallel zur Fahrtrichtung, um eine ausreichende Überlappung des Fotos während der Fahrt zu gewährleisten. Die Kamera nahm 2 Bilder pro Sekunde auf. Aus den Fotos wurden mit der Software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Russland) zunächst digitale Oberflächenmodelle (0,6 mm / Pixel (4K 4:3, 4.096 x 3.072 Pixel) berechnet. Diese wurden anschließend für die Berechnung der Spurtiefe in

der Software QGIS (qgis.org GmbH, Schweiz) dargestellt. Über der Spur wurde an den Referenzpositionen eine imaginäre Linie senkrecht zur Spur gezogen. Die Spurtiefe wurde als Differenz zwischen dem tiefsten Punkt (Pixelgröße 6,8 mm) in der Spur und dem höchsten Punkt neben der Fahrspur mit fünf Verfahren berechnet:

- Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und der Höhe außerhalb der Spur (20 cm von der Spur)
- Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und der maximalen Höhe (im Bereich bis 20 cm an einer Seite der Spur) außerhalb der Spur
- Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und der durchschnittlichen Höhe (im Bereich bis 20 cm an der äußeren Seite (in der Fahrtrichtung rechts) der Spur) außerhalb der Spur
- Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und der maximalen Höhe (im Bereich bis 20 cm an beiden Seiten der Spur) außerhalb der Spur
- Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und der durchschnittlichen Höhe (im Bereich bis 20 cm an beiden Seiten der Spur) außerhalb der Spur

In der zweiten Messkampagne erfolgte die Messung der Spurtiefe mit zwei **kommerziellen Ultraschallsensoren** mit einem Messbereich von 100 bis 800 mm, einer Auflösung von 0,25 mm, einer Wiederholgenauigkeit von 0,2 % und einem Messkegel von 8° (UFP-800, WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Deutschland) und einem Messbereich von 80 bis 1.600 mm, einer Auflösung von 1 mm, einer Wiederholgenauigkeit von 0,2 % und einem Messkegel von 8° (UFP-1600, WayCon Positionsmesstechnik GmbH, Deutschland). Die Ultraschallsensoren wurden hinter dem Traktor mittig über und neben der Fahrspur (Fahrtrichtung rechts) auf der gleichen Höhe von 35 cm montiert. Die Spurtiefen wurden aus der Differenz der Entfernungen berechnet, die der Sensor in der Mitte der Spur und der Sensor neben der Spur mit einer Datenrate von 9 Hz ermittelten. Für den Vergleich der gemessenen Spurtiefen mit den Referenzwerten wurden die mit den Ultraschallsensoren gemessenen Spurtiefen aufbereitet. Es wurden die Spurtiefen im Umkreis von 0,5 m, 1 m und 3 m um die Referenzposition gemittelt.

Ein UAV (unmanned aerial vehicle/unbemanntes Luftfahrzeug) **mit integrierter Kamera** (DJI Phantom 4 Advanced, China) nahm bei der zweiten Messkampagne nach den Versuchsfahrten Bilder des gesamten Versuchsfelds aus einer Höhe von 10 m auf. Die Planung der Flugroute mit der Anwendung pix4dcapture (Pix4D S. A., Prilly, Schweiz) und eine automatische Auslösung der Aufnahme sorgten für eine Überlappung der Bilder von 90 % längs und quer zur Flugrichtung. Aus den Fotos (72 dpi) wurden digitalen Oberflächenmodelle mit der Software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Russland) berechnet. Diese wurden anschließend für die Berechnung der Spurtiefe in der Software QGIS dargestellt. Die Spurtiefe wurde als Differenz in Meereshöhe zwischen zwei Punkten innerhalb des Puffers von 0,5 m um die Referenzpunkte berechnet:

- Differenz zwischen dem tiefsten und dem höchsten Punkt im gepufferten Bereich
- Differenz zwischen dem 95-%-Quantil und dem 5-%-Quantil im gepufferten Bereich
- Differenz zwischen dem 90-%-Quantil und dem 10-%-Quantil im gepufferten Bereich

Auf den gleichen Stellen wurde nach der Befahrung die **Bodenfeuchte** in und außerhalb der Fahrspur mit einer Bodensonde (Delta-T Devices, HH2 Moisture Meter, UK) bestimmt. Die Bodenleitfähigkeit wurde nach Abschluss der Messungen auf dem gesamten Versuchsfeld mit einem Veris Q 2800 (Veris Technologies, Inc., USA) erfasst. Die in den Ergebnissen dargestellte **Leitfähigkeit** wurde als Mittelwert im Radius von 5 m von der Referenzposition berechnet.

Versuchsvarianten

Die Untersuchungen der Spurtiefe wurden in zwei Messkampagnen im Oktober (Messkampagne 1) und im Dezember 2019 (Messkampagne 2) auf dem Schlag (49°15'15.7"N 10°51'44.5"E) eines Praxisbetriebes durchgeführt. Bei jeder Messkampagne wurden unterschiedliche Messverfahren unter verschiedenen Bedingungen verglichen. Die Versuchsvarianten bestanden aus variierenden Reifendrücken, Fahrgeschwindigkeiten und Bodenfeuchten.

Das Versuchsfeld wurde im Vorfeld auf dem Schlag mit Mehl markiert (Abbildung 1). Für jede Versuchsvariante wurde eine 25 m lange Strecke abgemessen. Auf der Strecke wurden mit sechs zur Fahrtrichtung senkrechten Linien mit einem Abstand von 5 m Teilbereiche für die Wiederholungen der Referenzmessung festgelegt. Bei jeder Versuchsvariante wurde das Versuchsfeld mit einer konstanten Geschwindigkeit geradeaus überfahren. Auf dem Traktor wurde ein Gerüst montiert, um Ultraschallsensoren, GNSS-Empfänger und Action-Kamera zu befestigen (Abbildung 2). Während der Fahrt wurde die Spurtiefe hinter dem rechten hinteren Rad mit Ultraschallsensoren gemessen und mit einem GNSS-Empfänger (Duro, Swift Navigation, USA) mit einer Genauigkeit von 10 mm + 1 ppm RMSE georeferenziert. Aus messtechnischen Gründen erfolgte die Befliegung mit dem UAV und die Leitfähigkeitsmessung nach der Befahrung mit dem Fahrzeug.



Abbildung 2: Messaufbau für die Erfassung der Referenzwerte der Spurtiefe und der Bodenfeuchte an einer Messstelle (links); Ultraschallsensoren und die Action-Kamera auf einem Gerüst hinter dem Traktor erfassen die Spurtiefe, die mit einem GNSS-Empfänger georeferenziert wurde (rechts) (© J. Poteko)

In der **Messkampagne 1** wurde die Spurtiefe in drei Bereichen des Schlags mit unterschiedlichen Bodenfeuchten gemessen. In Bereich 1 (geringe Bodenfeuchte, Tabelle 1) und im Bereich 2 (hohe Bodenfeuchte, s. Tabelle 1) wurden die Reifendrücke von 0,7 und 1,8 bar mit den Fahrgeschwindigkeiten von 4, 8, 12, 16 und 20 km/h kombiniert. Im Bereich 3 (mittlere Bodenfeuchte) wurden die Reifendrücke von 0,4 und 2,0 bar bei den Geschwindigkeiten von 4, 8, 12, und 16 km/h verglichen. Die Reifendrücke wurden an einem Fendt 724 (Bereifung: TM1060, Trelleborg, Schweden, VF 600/60R30 vorne, VF 710/60R42 hinten) vor den Messungen mit einer Reifendruckanlage (Reifenregler automatic, Steuerungstechnik StG, Deutschland) eingestellt. Als Sensoren für die Erfassung der Spurtiefe kamen kostengünstige Ultraschallsensoren und eine Action-Kamera zum Einsatz. Die Messwerte der Sensoren wurden auf Normalverteilung geprüft und eine Varianzanalyse mit dem Programm RStudio v1.2 (Paket ‚aov‘, CHAMBERS et al. 1992) durchgeführt. Anschließend wurde der Einfluss des Reifendrucks innerhalb jeder Versuchsvariante mit dem Students t-Test (PARK und WANG 2018) bewertet.

In der **Messkampagne 2** wurden die Reifendrücke von 0,5, 0,7, 1,8 und 2,0 bar bei einer Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h untersucht. Auf dem Traktor (John Deere 6155 R) waren Reifen der Firma

Michelin (MachXBib, 600/65R28 vorne, 710/70R38 hinten) montiert. Eine Reifendruckregelanlage ermöglichte die Einstellung des gewünschten Reifendrucks vor den Messungen (Reifendruckanlage mit ISOBUS-Steuerung und 2-Leiter-Technik für Ackerschlepper, PTG Reifendruckregelsysteme GmbH, Deutschland). Zusätzlich zu den Referenzmessungen wurden kommerzielle Ultraschallsensoren und ein UAV mit integrierter Kamera als Sensoren für die Erfassung der Spurtiefe eingesetzt. Der Einfluss des Reifendrucks wurde mit dem Students t-Test (PARK und WANG 2018) für jede Versuchsvariante ausgewertet und mit Box-Plots dargestellt.

Ergebnisse

Messkampagne 1

Die bei der ersten Messkampagne erhobenen Referenzwerte weisen ausnahmslos einen Zusammenhang zwischen dem Reifendruck und der Spurtiefe sowie der Bodenfeuchte und der Spurtiefe auf. Dieser Zusammenhang konnte mithilfe der Varianzanalyse nachgewiesen werden. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs hatten keinen Einfluss auf die mit der Referenzmethode ermittelte Spurtiefe (Tabelle 1).

Die in 0,5 m Umkreis gemittelten Messwerte der kostengünstigen Ultraschallsensoren sind hinsichtlich der Signifikanz des Zusammenhangs zwischen Reifendruck und Spurtiefe deckungsgleich mit den Messwerten des Referenzsystems. Unabhängig von Fahrtgeschwindigkeit und Bodenfeuchte besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Spurtiefe und Reifendruck. In Bereichen mit hoher Bodenfeuchte besteht ein Zusammenhang zwischen der Bodenfeuchte neben der Fahrspur und der Spurtiefe, in den Varianten mit geringer und mittlerer Bodenfeuchte besteht der Zusammenhang zwischen den in der Spur gemessenen Bodenfeuchten und der Spurtiefe. Es bleibt festzustellen, dass die Messwerte des Referenzverfahrens und der Ultraschallsensoren teilweise erhebliche Unterschiede aufweisen. Der Zusammenhang mit den beeinflussenden Faktoren (Reifendruck, Bodenfeuchte) besitzt jedoch die gleiche Ausprägung.

Die in 3 m Umkreis um die Referenzmesspunkte gemittelten Messwerte der kostengünstigen Ultraschallsensoren unterscheiden sich hinsichtlich der Signifikanz von den Referenzwerten und den in 0,5 m Umkreis gemessenen Werten: Im Bereich mit geringer Bodenfeuchte bestand ein Zusammenhang zwischen der Spurtiefe und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Im Bereich hoher Bodenfeuchte bestand ein Zusammenhang mit dem Reifendruck und im Bereich mittlerer Bodenfeuchte ein Zusammenhang mit der Bodenfeuchte in der Spur.

In Abbildung 3 sind die Referenzmesswerte bei unterschiedlichen Reifendrücken und Bodenfeuchten gegen die Fahrgeschwindigkeiten aufgetragen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Spurtiefen im Bereich geringer Bodenfeuchte ab einer Geschwindigkeit von 8 km/h bei geringem Reifendruck (0,7 bar) signifikant tiefer sind als bei hohem Reifendruck (1,8 bar). In den Bereichen mit mittlerer und hoher Bodenfeuchte kehrt sich dieser Effekt um und zeigt das erwartete Ergebnis: Die Spur ist bei hohem Reifendruck (1,8 bar) signifikant tiefer als bei niedrigem Reifendruck. Eine Ausnahme stellt die Messung im Bereich hoher Bodenfeuchte bei 8 km/h dar ($p = 5,3\%$).

Tabelle 1: Spurtiefen (Referenzmessungen und kostengünstiger Ultraschall), Bodenfeuchten und Leitfähigkeiten der Messkampagne 1

Be- reich ¹	Reifen- druck bar ^a	Geschwin- digkeit km/h ^b	Bodenfeuchte Vol %		Leitfähigkeit mS/m		Referenz n = 6	Spurtiefe cm	
			in der Spur ^c	neben der Spur ^d	30 cm n = 6	90 cm n = 6		US ² – Puffer ³ von 0,5 m n = 6	US – Puffer von 3 m n = 6
			n = 6	n = 6	n = 6	n = 6		n = 6	n = 6
1	0,7	4	15,6	13,3	n.v.	n.v.	6,3 ^{a,c}	5,1 ^{a,c}	6,9 ^b
		8	15,1	13,1	n.v.	n.v.	6,5 ^{a,c}	5,1 ^{a,c}	6,8 ^b
		12	14,8	11,8	10,4	7,1	6,7 ^{a,c}	4,3 ^{a,c}	7,4 ^b
		16	15,1	13,0	9,7	7,8	6,8 ^{a,c}	7,9 ^{a,c}	5,4 ^b
		20	15,1	13,4	14,0	7,8	6,9 ^{a,c}	6,9 ^{a,c}	3,9 ^b
	1,8	4	16,6	12,6	9,3	7,9	5,5 ^{a,c}	7,7 ^{a,c}	7,0 ^b
		8	19,2	14,9	7,8	8,1	5,3 ^{a,c}	4,6 ^{a,c}	5,8 ^b
		12	17,4	14,6	8,3	8,1	5,3 ^{a,c}	6,8 ^{a,c}	7,8 ^b
		16	17,3	14,4	8,3	7,9	5,3 ^{a,c}	5,8 ^{a,c}	4,8 ^b
		20	16,4	13,2	8,8	8,0	5,7 ^{a,c}	9,9 ^{a,c}	4,7 ^b
2	0,7	4	26,9	22,3	97,6	44,0	4,8 ^{a,d}	2,8 ^{a,d}	6,4 ^a
		8	26,6	22,9	56,0	23,7	5,5 ^{a,d}	5,4 ^{a,d}	6,0 ^a
		12	30,2	27,7	75,2	33,6	5,2 ^{a,d}	8,3 ^{a,d}	5,1 ^a
		16	31,4	26,0	85,6	36,9	5,4 ^{a,d}	5,4 ^{a,d}	5,3 ^a
		20	32,7	23,6	97,2	50,4	4,9 ^{a,d}	5,0 ^{a,d}	8,8 ^a
	1,8	4	27,2	20,7	26,5	14,9	6,9 ^{a,d}	5,8 ^{a,d}	4,9 ^a
		8	27,3	23,4	54,1	27,9	6,5 ^{a,d}	6,7 ^{a,d}	4,5 ^a
		12	28,2	25,3	93,7	30,5	8,0 ^{a,d}	6,7 ^{a,d}	5,3 ^a
		16	31,6	27,8	91,9	40,6	7,6 ^{a,d}	4,2 ^{a,d}	4,2 ^a
		20	31,9	28,4	93,7	49,0	7,5 ^{a,d}	6,6 ^{a,d}	5,7 ^a
3	0,4	4	22,4	19,0	62,6	15,8	4,2 ^{a,c}	5,7 ^{a,c}	5,1 ^c
		8	22,3	19,1	33,7	19,2	3,8 ^{a,c}	4,6 ^{a,c}	4,6 ^c
		12	22,8	20,5	24,2	17,9	3,4 ^{a,c}	7,5 ^{a,c}	7,3 ^c
		16	20,5	18,6	12,7	16,9	3,6 ^{a,c}	4,1 ^{a,c}	5,8 ^c
		20	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	2,0	4	22,8	17,8	25,0	7,7	7,4 ^{a,c}	6,3 ^{a,c}	5,5 ^c
		8	24,8	20,4	29,0	9,4	7,3 ^{a,c}	5,7 ^{a,c}	4,9 ^c
		12	23,7	18,1	35,5	9,4	6,6 ^{a,c}	7,0 ^{a,c}	6,4 ^c
		16	25,4	19,3	44,9	13,4	7,2 ^{a,c}	10,4 ^{a,c}	3,5 ^c
		20	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

¹ 1 = Bereich mit geringer Bodenfeuchte; 2 = Bereich mit hoher Bodenfeuchte; 3 = Bereich mit mittlerer Bodenfeuchte.

² US = kostengünstiger Ultraschallsensor;

^a Statistisch signifikanter Einfluss des Reifendrucks;

^b statistisch signifikanter Einfluss der Geschwindigkeit;

^c statistisch signifikanter Einfluss der Bodenfeuchte in der Spur;

^d statistisch signifikanter Einfluss der Bodenfeuchte neben der Spur.

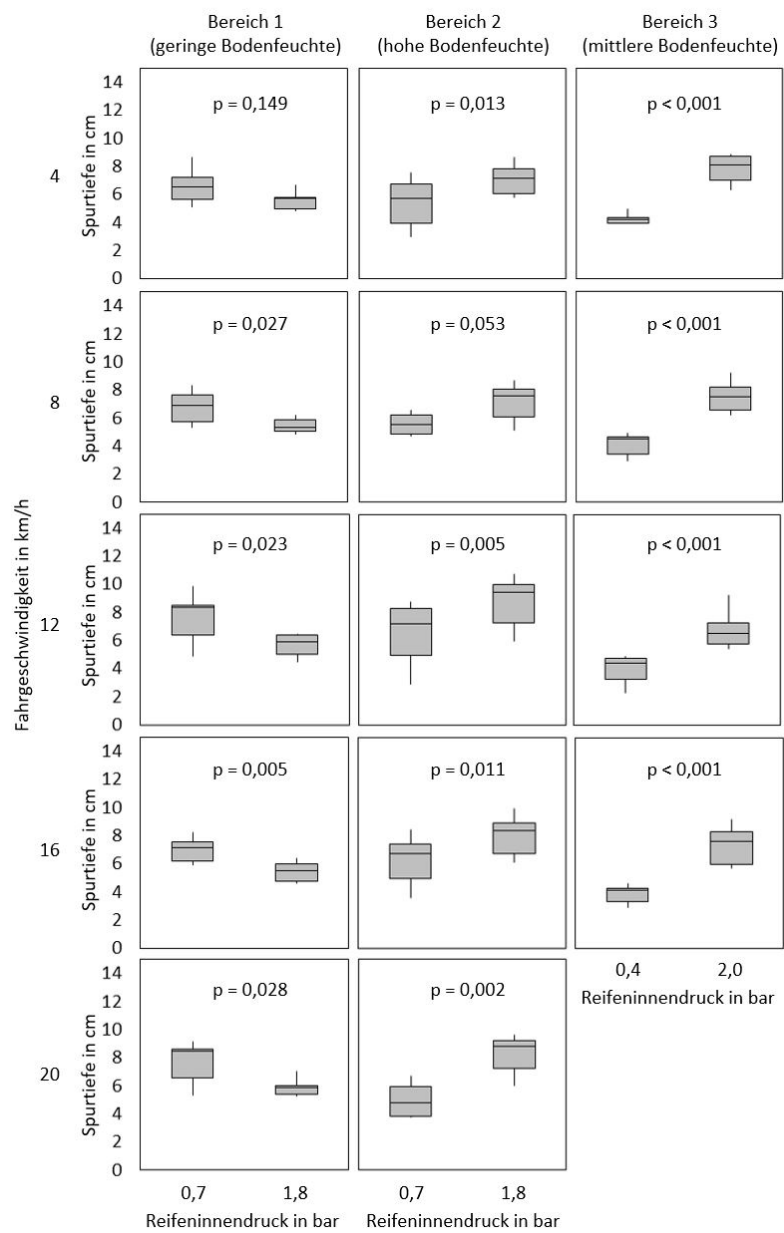


Abbildung 3: Referenzmessungen der Spurtiefe in Messkampagne 1

Bei der Berechnung der Spurtiefe aus den digitalen Oberflächenmodellen, die aus den Bildern der Action-Kamera erzeugt wurden, konnte die Spurtiefen nur bei drei Varianten mit ausreichenden Überlappung von Bildern betrachtet werden (Tabelle 2). Aufgrund der zu geringen Anzahl von Bildern war die Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen nicht möglich. Die Spurtiefen der verschiedenen Berechnungsverfahren weisen große Unterschiede auf und sind nicht konsistent. Ein Zusammenhang zum Reifendruck und den anderen Parametern konnte nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 2: Spurtiefe aus der Berechnung des digitalen Oberflächenmodells (n = 6) der Messkampagne 1

Bereich ¹	Reifendruck bar	Geschwindigkeit km/h	Berechnungsvariante ²				
			1	2	3	4	5
1	1,8	8	4,8	7,3	4,7	6,3	4,6
2	0,7	8	3,8	6,1	3,8	5,8	3,7
2	1,8	4	3,7	5,5	4,2	5,1	4,1

¹ 1 = geringe Bodenfeuchte; 2 = hohe Bodenfeuchte.

² Differenz zwischen tiefstem Punkt in der Spur und (1) der Höhe außerhalb der Spur (20 cm neben der Spur), (2) der maximalen Höhe (im Bereich bis 20 cm an einer Seite der Spur) außerhalb der Spur, (3) der durchschnittlichen Höhe (im Bereich bis 20 cm an einer Seite der Spur) außerhalb der Spur, (4) der maximalen Höhe (im Bereich bis 20 cm an beiden Seiten der Spur) außerhalb der Spur oder (5) der durchschnittlichen Höhe (im Bereich bis 20 cm an beiden Seiten der Spur) außerhalb der Spur.

Messkampagne 2

Die Messungen der Spurtiefe bei gleichbleibender Geschwindigkeit und Reifendrücken von 0,5, 0,7, 1,8 und 2,0 bar zeigten einen deutlichen Anstieg der Spurtiefe mit zunehmenden Reifendruck (Tabelle 3). Die Bodenfeuchten zwischen den Varianten unterschieden sich kaum. Die Unterschiede der mit dem Referenzverfahren ermittelten Spurtiefen bei geringen Reifendrücken (0,5 bar und 0,7 bar) und hohen Reifendrücken (1,8 bar und 2,0 bar) sind hochsignifikant. Die Spurtiefen zwischen den beiden Varianten mit geringen und hohen Reifendrücken unterscheiden sich jedoch nicht statistisch nachweisbar.

Tabelle 3: Die Spurtiefen und die Bodenfeuchten der Messkampagne 2

Ge- schwin- digkeit km/h	Reifen- druck bar	Bodenfeuchte Vol%			Spurtiefe cm					
		in der Spur	neben der Spur	Refer- renz	US ¹ –	US –	US –	UAV ³ –	UAV –	UAV –
					Puffer ² von 0,5 m	Puffer von 1 m	Puffer von 3 m	Maximum und Minimum ⁴	95%- und 5%- Quantile ⁵	90%- und 10%- Quantile ⁶
		n = 6	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6	n = 6
4	0,5	19,7 ^a	15,1 ^{ab}	4,3 ^a	0,9 ^a	1,3 ^a	1,5 ^a	12,2 ^{ab}	6,7 ^a	5,5 ^{ab}
	0,7	20,0 ^{ab}	16,1 ^b	4,9 ^a	1,7 ^b	1,9 ^{ab}	1,9 ^{ab}	10,4 ^a	6,6 ^a	5,4 ^a
	1,8	21,3 ^{ab}	14,4 ^a	7,4 ^b	1,8 ^b	2,1 ^b	2,3 ^{bc}	12,8 ^{ab}	7,4 ^b	5,9 ^b
	2	21,7 ^b	15,6 ^{ab}	7,2 ^b	2,8 ^c	2,6 ^c	2,4 ^c	11,7 ^b	7,4 ^b	5,9 ^b

¹ US = marktverfügbarer Ultraschallsensor.

² Messwerte des Ultraschallsensors wurden im bestimmten Puffer von vordefinierter Referenzposition gemittelt.

³ Oberflächenmodelle aus UAV-Aufnahmen.

Spurtiefe ist die Differenz zwischen

⁴ dem tiefsten und dem höchsten Punkt,

⁵ dem 95%-Quantil und dem 5%-Quantil oder

⁶ dem 90%-Quantil und dem 10%-Quantil in dem gepufferten Bereich.

^{a,b,c} Die Werte innerhalb jedes Messverfahrens, die nicht den gleichen Buchstaben haben, sind signifikant unterschiedlich (p < 0,05).

Die mit den kommerziellen Ultraschallsensoren ermittelten Spurtiefen unterschieden sich erheblich von den Referenzwerten. Allerdings weisen die Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen der Referenz und mit den Sensoren ermittelten Spurtiefen auf einen engen Zusammenhang zwischen den Größen hin ($r = 0,77$, $0,83$ und $0,97$ für die Mittelwerte im Umkreis von $0,5$ m, 1 m und 3 m).

Die in $0,5$ m Umkreis um die Referenzpositionen gemittelten Spurtiefen weisen drei statistisch signifikant unterschiedliche Gruppen auf: Die Spurtiefe bei $0,5$ bar ist niedriger als bei allen höheren Reifendrücken. Die Spurtiefen bei $0,7$ bar und $1,8$ bar unterscheiden sich nicht und die Spurtiefe bei $2,0$ bar ist signifikant größer als bei allen anderen Reifendrücken. Bei den Mittelwerten im Umkreis von 1 m ergibt sich ein ähnliches Bild: Die Spurtiefe bei $0,7$ bar unterscheidet sich hier allerdings weder von der Spurtiefe bei $0,5$ bar noch von der bei $1,8$ bar.

Die aus den digitalen Oberflächenmodellen des UAV-Überflugs ermittelten Spurtiefen weichen ebenso wie die Messungen mit den Ultraschallsensoren stark von den Referenzwerten ab. Die ermittelten Spurtiefen sind dabei stark vom Berechnungsverfahren abhängig. Die Verfahren, denen die Differenz zwischen zwei Quantilen zugrunde liegen, weisen jedoch einen engen Zusammenhang mit den Referenzwerten auf ($r = 0,98$ und $r = 0,94$). Beide Verfahren zeigten bei der Varianzanalyse eine ähnlich Ergebnisstruktur wie die Referenzwerte. Trotz absolut geringerer Unterschiede sind mit den beiden Verfahren signifikante Unterschiede zwischen den beiden jeweils niedrigen und hohen Reifendrücken nachweisbar.

In Abbildung 4 sind die Referenzwerte und die mit den beiden Sensorsystemen ermittelten Spurtiefen gegen den Reifendruck aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Messwerte in Abhängigkeit vom Mess- und Berechnungsverfahren ein unterschiedliches Niveau aufweisen. Es fällt darüber hinaus auf, dass die absoluten Unterschiede zwischen den Spurtiefen bei unterschiedlichen Reifendrücken beim Referenzverfahren mit Abstand am größten sind. Die Differenzen zwischen den medianen Spurtiefen bei unterschiedlichen Reifendrücken, die mit den Sensoren ermittelt wurden, sind wesentlich geringer. Einzelne, fehlerhafte Messwerte wirken sich durch die Berechnung des Medians mutmaßlich nicht so stark auf das Ergebnis aus.

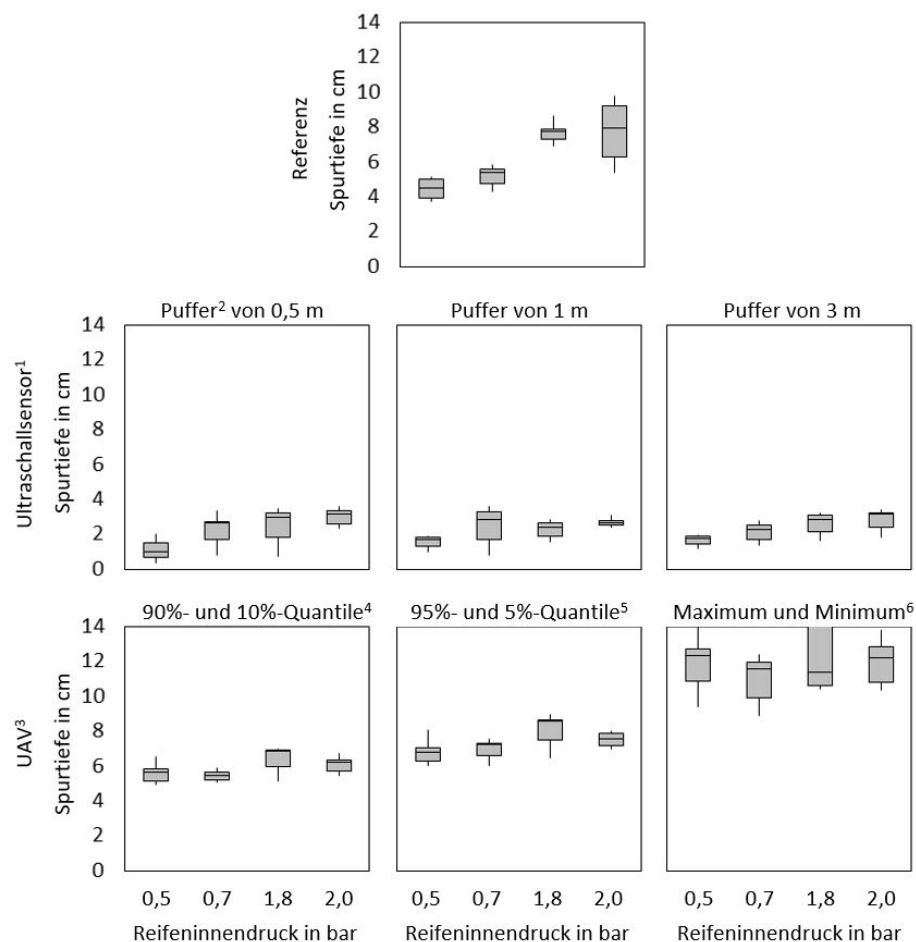


Abbildung 4: Messungen der Spurtiefe bei gleicher Geschwindigkeit (4 km/h) und ähnlicher Bodenfeuchte (19 Vol% bis 21 Vol%) mit drei unterschiedlichen Messverfahren (1 US = kommerzieller Ultraschallsensor; 2 Mittelwert um Referenzposition; 3 Messwerte aus UAV-Oberflächenmodell, Spurtiefe ist die Differenz zwischen 4 dem 90%-Quantil und dem 10%-Quantil, 5 dem 95%-Quantil und dem 5%-Quantil oder 6 dem tiefsten und dem höchsten Punkt in dem gepufferten Bereich)

Diskussion

Vergleich der Messverfahren zur Bestimmung der Spurtiefe

Die manuell gemessene Spurtiefe wird als ein durch die Bodensetzung nach dem Befahren des Bodens verursachten Höhenunterschied definiert und zwischen der Oberfläche des Bodens und dem Stollenabdruck gemessen. Im Fall eines Schlupfes wurde der Stollenabdruck als Grundlage für die Spurtiefe berücksichtigt, daher wurde der Messort so gewählt. Die Methode dient der Bestimmung von Referenzwerten einzelner Versuchsvarianten. Da dieses Verfahren arbeitsintensiv und zeitaufwendig ist, ist es ausschließlich für das Versuchswesen geeignet. Zudem können die Messwerte erst nach dem Befahren des Schrages und nicht während der Fahrt erhoben werden, sodass es für die Steuerung von Reifendruckanlagen oder die Erzeugung von Hinweisen im Rahmen eines Entscheidungsunterstützungssystems nicht geeignet ist.

Ultraschallsensoren ermöglichen hingegen eine Spurtiefen-Messung während der Fahrt. NOLTING et al. (2006) befestigten Ultraschallsensoren unter einem Traktor und in den Reifen, um aus den Messwerten die Spurtiefe abzuleiten. Hinsichtlich der Montage entsteht bei der Installation der in diesem Versuch getesteten Ultraschallsensoren jedoch ein geringerer Aufwand. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit kommerziellen Ultraschallsensoren aufgrund eines engen Zusammenhangs ($r = 0,78$ bis $0,97$) zumindest die relative Zu- und Abnahme der Spurtiefe erfasst werden kann. Die Messwerte wichen allerdings absolut stark von den Referenzwerten ab. Dass der Zusammenhang in eine allgemeingültige Gleichung („Kalibrierkurve“) übersetzt werden kann, lässt sich aufgrund der geringen Anzahl von Messwerten nicht ableiten. Im Gegensatz dazu lieferten die kostengünstigen Ultraschallsensoren keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die Qualitätsunterschiede der Ergebnisse sind mutmaßlich auf Unterschiede in der Bauart und der Signalverarbeitung der Sensoren zurückzuführen. Diese sind aus den öffentlich verfügbaren Informationen zu den Sensoren jedoch nicht ersichtlich.

Auch beim Vergleich der photogrammetrischen Verfahren zeigten sich Unterschiede. Die mithilfe einer kostengünstigen Action-Kamera ermittelten Spurtiefen zeigten im Gegensatz zu den Referenzmessungen keinen Zusammenhang zum Reifendruck. Mit der UAV-Kamera hingegen erzielten die Messungen aus dem digitalen Oberflächenmodell eine ausreichende Genauigkeit. Besonders die Berechnung der Spurtiefe als Differenz zwischen dem 95-%-Quantil und dem 5-%-Quantil und dem 90-%-Quantil und dem 10-%-Quantil erreichten enge Korrelationen mit der Referenz ($r = 0,98$ und $r = 0,94$). Auch hier traten wie bei den Ultraschallsensoren hohe absolute Differenzen zwischen den Referenzwerten und den Sensorwerten auf. Das Messverfahren ist ebenso wie das Referenzverfahren nicht echtzeitfähig, weil die Messdaten erst nach dem Überflug und der anschließenden Datenverarbeitung zur Verfügung stehen. Es ist somit ausschließlich für das Versuchswesen geeignet, liefert jedoch eine wesentlich höhere Dichte von Messwerten als das Referenzverfahren.

Vergleich der Einflussgrößen auf die Spurtiefe

Durch die Messung der Spurtiefe mit unterschiedlichen Verfahren konnte bestätigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen Reifendruck und Bodenverformung und somit der Spurtiefe besteht. Weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit wurde ein Unterschied zwischen den Spurtiefen bei niedrigen und hohen Reifendrücken in Bereichen mit niedriger, mittlerer und hoher Bodenfeuchte festgestellt. Dies bestätigt die aus der Literatur bekannten Ergebnisse (BOLLING 1987, LEBERT 2010, GEISCHEDER 2011). Beim Vergleich von vier Reifendrücken stieg die Spurtiefe von 4 cm bei niedrigem Reifendruck (0,4 bar) auf bis zu 7 cm beim hohem Reifendruck (2 bar) an.

Die Bodenfeuchte in und neben der Fahrspur wirkte sich ebenfalls auf die Spurtiefe aus. Diese Beobachtung deckt mit sich mit den Untersuchungen von BRUNOTTE et al. (2015). Bemerkenswert ist die Erkenntnis, dass im trockenen Bereich bei hohem Reifendruck (1,8 bar) eine um durchschnittlich 1,2 cm geringere Spurtiefe gemessen wurde als bei niedrigem Reifendruck (0,7 bar).

Schlussfolgerungen

Zurzeit stehen keine kommerziell verfügbaren Systeme für die Messung der Spurtiefe zur Verfügung, mit der die Bodenverdichtung abgeschätzt und kartiert werden kann. Die Spurtiefe könnten jedoch als Grundlage für die Entscheidungsunterstützung oder als Quelle für die Automatisierung dienen.

Im Projekt ARDopt wurde die Spurtiefe durch fortlaufende Messungen mit Ultraschallsensoren und bildgebenden Verfahren erfasst. Die Untersuchungen mit einer begrenzten Zahl der variierten Parameter unter möglichst gleichbleibenden Einstellungen und Bedingungen ermöglichte einen methodischen Vergleich. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Messverfahren das Potenzial für die Weiterentwicklung hin zu einer marktreifen Lösung aufweisen. Wie erwartet zeigte sich, dass Reifendruck und Bodenfeuchte einen starken Einfluss auf die Spurtiefe und die Bodenverdichtung haben. Dieses Wissen und die Erfahrungen der Applikation von unterschiedlichen Messmethoden ermöglichen zukünftig weitere Einflüsse wie die Bodenheterogenität zu untersuchen.

Literatur

- Amelung, W.; Blume, H. P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B. M. (2018): Physikalische Eigenschaften und Prozesse. Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 213–340. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2251-4_6
- BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 24.3.1998 BGBl I, Nr. 16, S. 502–510
- Blum, W. E. (2019): Boden und globaler Wandel. Springer Spektrum, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59742-2>
- Bolling, I. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen-Neue Meß- und Rechenmethoden. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Landmaschinen, S. 289
- Brunotte, J.; Schmidt, W.; Brandhuber, R.; Busch, M.; Honecker, H.; Bug, J.; Breitschuh, T.; Schrader, S.; Weyer, T.; Vorderbrügge, T.; Chappuis, A.; Fröba, N.; Löber, M.; Mosimann, T.; Ortmeier, B.; List, M.; (2015): Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn, S. 119
- Chambers, J. M.; Freeny, A.; Heiberger, R. M. (1992): Analysis of variance; designed experiments. Chapter 5 of Statistical Models in S eds J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole
- Diepenbrock, W.; Ellmer, F.; Léon, J. (2016): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: Grundwissen Bachelor. Ulmer Verlag, S. 376
- Geischer, R. (2011): Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, S. 196
- Håkansson, I. (2005): Machinery-induced compaction of arable soils. Incidence – consequences – counter-measures. Report No. 109 from the Division of Soil Management, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, S. 153
- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R.; Or, D. (2019): Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. Soil and Tillage Research, S. 194, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Lebert, M. (2010): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 96
- Nolting, K.; Brunotte, J.; Lorenz, M.; Sommer, C. (2006): Bodenverdichtung: Bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. Landtechnik 61(4), <https://doi.org/10.1515/lt.2006.1093>
- Park, C.; M. Wang (2018): Empirical distributions of the robustified t-test statistics. ArXiv e-prints, 1807.02215. <https://arxiv.org/abs/1807.02215>
- Schnauffer, A.; Kutzbach, H. D. (1998): Variierter Reifendruck. Landtechnik 53(2), S. 78–79, <https://doi.org/10.1515/lt.1998.2434>

Autoren

Dr. sc. ETH Jernej Poteko und **Prof. Dr. Ludwig Volk** waren wissenschaftliche Mitarbeiter am Biomasseinstitut der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Markgrafenstraße 16, 91746 Weidenbach, Deutschland.

Prof. Dr. Patrick Ole Noack ist Professor für Information Technology and IoT in Agriculture and Environment an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Markgrafenstraße 16, 91746 Weidenbach, Deutschland, E-Mail: patrick.noack@hswt.de.

Hinweise und Danksagungen

Wir bedanken uns bei David Eder, Christian Schweiger und Jan Löber für die fachliche und technische Unterstützung bei den Messungen sowie bei Herbert Hechtel für die Bereitstellung seiner Flächen für die Versuchsdurchführung.

Die Studie wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des Förderungsprogramms „Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand“ finanziell unterstützt.