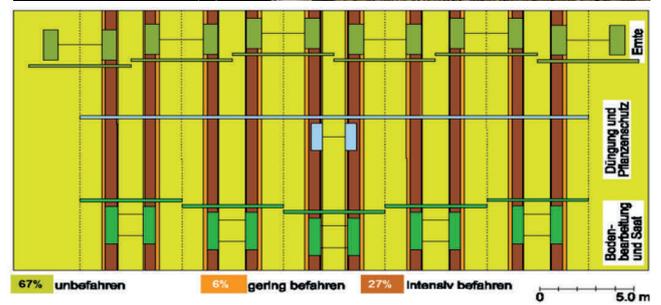




LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Regelspurverfahren im Ackerbau



2

2016

Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agrarökologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 71-3640

2. Auflage: Januar 2018

Druck: ES-Druck, 85356 Freising-Tüntenhausen

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL



Regelspurverfahren im Ackerbau

Ergebnisse aus dem Agro-Klima-Forschungsprojekt
Regelspurverfahren – Controlled-Traffic-Farming

Projektförderung:

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

**Benjamin Blumenthal¹, Hans Kirchmeier², Dr. Marc Marx¹,
Robert Brandhuber¹, Dr. Markus Demmel²**

¹LfL-Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz

²LfL-Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Zusammenfassung.....9
2	Einleitung10
3	Stand des Wissens.....12
4	Material und Methoden:.....13
4.1	Betriebe und Standorte13
4.2	Bodenwasserhaushalt15
4.2.1	Kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen15
4.2.2	Mobile Bodenfeuchtemessung15
4.2.3	Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung16
4.2.4	Bodenprofilansprache, physikalische Bodenkennwerte, Eindringwiderstand16
4.2.5	Infiltrationsmessung:18
4.3	Erträge18
5	Ergebnisse:.....19
5.1	Feldversuche, Technik19
5.2	Bodenwasserhaushalt23
5.2.1	Kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen23
5.2.2	Mobile Bodenfeuchtemessung mit einer TDR-Sonde.....31
5.2.3	Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung34
5.2.4	Bodenprofile, physikalische Kennwerte und Eindringwiderstand35
5.2.5	Infiltrationsmessungen im Feld45
5.3	Erträge46
5.3.1	Winterweizen47
5.3.2	Winterroggen.....48
5.3.3	Körnermais48
6	Diskussion und Schlussfolgerungen.....49
7	Literaturverzeichnis.....51

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: CTF klassisch mit verbindlichen Fahrwegen mit Umfahren von Hindernissen für alle Arbeitsgänge. Quelle: www.smartagriplatform.com/Agrovation	10
Abb. 2: CTF angepasst mit verbindlichen Fahrwegen und unterschiedlichen Spurweiten bei Traktoren und Selbstfahrrn. Quelle: AID, 2015	11
Abb. 3: Überrollte Flächenanteile und Überrollhäufigkeit in der linken Hälfte einer Fahrgassenbreite ohne CTF bei Zuckerrüben, pfluglos. Quelle: AID, 2015	11
Abb. 4: Lage der Versuchsbetriebe in Bayern	14
Abb. 5: Links: Einbau der 3 Sensoren in 38 cm Tiefe. Rechts oben: Schacht für den Sensoreinbau mit Einbaupunkten im befahrenen (linke Seite) und unbefahrenen Bereich (rechte Seite). Rechts unten: Datenlogger.....	16
Abb. 6: Methodik der Ertragsmessung von Getreide mit Ringen	18
Abb. 7: Minimierung des überrollten Spuranteils mit dem TwinTrack-System (Graphik: Chamen, o.J.)	20
Abb. 8: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 5,4 m	20
(Mähdruschfruchtfolge Betrieb 1).....	
Abb. 9: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 6,0 m	21
(Mähdruschfruchtfolge Betrieb 2).....	
Abb. 10: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 4,5 m	21
(Mähdruschfruchtfolge Betrieb 3).....	
Abb. 11: Rübenernte 2010 auf Betrieb 1 mit Überladeverfahren: hoher überrollter Flächenanteil	22
Abb. 12: Reales Überrollungsmuster in einem Rübengahr, Betrieb 1	22
Abb. 13: Bodenfeuchteverlauf von 3 einzelnen Sensoren in 15 cm Tiefe im befahrenen Bereich.....	25
Abb. 14: Bodenfeuchteverlauf als Mittelwert von 3 Sensoren, Winterweizen, 2013, Betrieb 1	25
Abb. 15: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Zuckerrüben, 2013	26
Abb. 16: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 2, Winterweizen, 2013	26
Abb. 17: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Körnermais, 2013.....	27
Abb. 18: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Winterweizen, 2013	27
Abb. 19: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Zuckerrüben, 2014	29
Abb. 20: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Winterweizen, 2014	29
Abb. 21: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 2, Winterraps, 2014.....	30
Abb. 22: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Winterweizen, 2014	30
Abb. 23: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Körnermais, 2014.....	31
Abb. 24: Bodenprofile und Probenentnahme auf Betrieb 2 im Herbst 2013. Im Rapsbestand zeichnet sich der befahrene Bereich vom unbefahrenen ab.	35
Abb. 25: Betrieb 1, Schlag 1; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren (n=10), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen (n=36).....	36
Abb. 26: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 1, Schlag 1	37
Abb. 27: Betrieb 1, Schlag 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und	

unbefahren (n=10), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen (n=36).....	38
Abb. 28: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 1, Schlag 2.....	39
Abb. 29: Betrieb 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren (n=10), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen (n=36).....	40
Abb. 30: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 2, Schlag 1.....	41
Abb. 31: Betrieb 3, Schlag 1; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren (n=10), Kleines Bild: Mit Wurzeln und Humus ausgekleidete Regenwurmröhren, rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen (n=36).....	42
Abb. 32: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 3, Schlag 1.....	43
Abb. 33: Betrieb 3, Schlag 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren (n=10), Kleines Bild: Aushub für Stechzylinderentnahme mit vertikalen Regenwurmröhren, rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen (n=36).....	44
Abb. 34: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 3, Schlag 2.....	45
Abb. 35: Mittlere Infiltrationsraten mit Standardabweichung unter Winterweizen, April 2014.....	46
Abb. 36: Winterweizenerträge, befahren - unbefahren.....	47
Abb. 37: Körnermaiserträge, befahren – unbefahren, Betrieb 3.....	48

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Wesentliche Standortfaktoren auf den Versuchsbetrieben.....	14
Tab. 2: Einstufung der Lagerungsdichteklassen (Renger et al., 2008).....	17
Tab. 3: Daten zur Umsetzung von CTF auf den drei Betrieben	19
Tab. 4: Mittlere Feuchtwerte der Sensoren über den Messzeitraum im Jahr 2013. In den beiden rechten Spalten ist die Differenz unbefahren-befahren dargestellt. Ist der Wert negativ, so ist die unbefahrene Variante trockener als die befahrene.....	24
Tab. 5: Mittlere Feuchtwerte der Sensoren über den Messzeitraum im Jahr 2014. In den beiden rechten Spalten ist die Differenz unbefahren-befahren dargestellt. Ist der Wert negativ, so ist die unbefahrene Variante trockener als die befahrene.....	28
Tab. 6: Mittlere (n=20) Bodenfeuchten zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus 2013, gemessen mit einem mobilen TDR-Messgerät (Nadellänge 7,5 cm).....	32
Tab. 7: Mittlere (n=20) oberflächliche Bodenfeuchten zu verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit einem mobilen TDR-Messgerät	32
Tab. 8: Gravimetrisch im Labor bestimmte Wassergehalte zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus 2013. Mittelwerte aus je sechs 100 cm ³ Stechzylindern.	33
Tab. 9: Gravimetrisch im Labor bestimmte Wassergehalte zum Zeitpunkt des Sensorein- und -ausbaus 2014. Mittelwerte aus je drei 250 cm ³ Stechzylindern.....	33
Tab. 10: Bodenphysikalische Kennwerte am Betrieb 1, Schlag 1.....	37
Tab. 11: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 1, Schlag 2.....	39
Tab. 12: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 2, Schlag 1.....	41
Tab. 13: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 3, Schlag 1.....	43
Tab. 14: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 3, Schlag 2.....	45

1 Zusammenfassung

Mit Technologien zur sicheren Ortung und Führung von Fahrzeugen und Maschinen sind Regelspurverfahren im Ackerbau realisierbar. Fahrspuren und Wuchsfläche werden für alle Arbeitsgänge getrennt. Im klassischen Controlled-Traffic-Farming (CTF) wird die Wuchsfläche nicht mehr befahren. Auf den unverdichteten Böden kann sich eine verbesserte Wasseraufnahmefähigkeit entwickeln. In Trockengebieten Australiens und der USA ist CTF eine seit Jahren erfolgreich eingeführte Alternative zu „random traffic“. Speziell angepasste Fahrzeuge mit großer Spurweite und schmalen Reifen benutzen ausschließlich definierte Fahrgassen, die einen Flächenanteil von etwa 15 % einnehmen.

Die Spurverbreiterung eines Traktors, der öffentliche Straßen benutzt, auf die Maße der Erntemaschinen ist in Deutschland nicht zulässig. Bei optimaler Wahl der Arbeitsbreiten aller auf einem Betrieb eingesetzten handelsüblichen Geräte und Maschinen kann in einer Mähdruschfruchtfolge dennoch ein unbefahrener Flächenanteil von 60 bis 70 % erreicht werden. Die verbleibenden 30 bis 40 % werden befahren und sind in einem an die Verhältnisse in Deutschland angepassten Regelspurverfahren weiterhin Teil der Produktionsfläche. Die mechanische Belastung entspricht dort dem bei „Random Traffic“ Üblichen.

Auf drei landwirtschaftlichen Betrieben in Bayern wurden Maschinen und Geräte in ihren Arbeitsbreiten so abgestimmt, dass ein an die Vorgaben der deutschen Straßenverkehrsordnung angepasstes Regelspurverfahren auf einzelnen Feldern praktiziert werden konnte. In einem On-Farm-Research-Ansatz wurden auf ausgewählten Schlägen über fünf Jahre umfassende Untersuchungen zur Bodenstruktur und zum Bodenwasserhaushalt durchgeführt und Erträge erhoben. Alle drei Betriebe bearbeiteten ihre Böden schon vor Beginn der Untersuchungen langjährig pfluglos. Fruchtfolgen sind Getreide-Raps, Getreide-Zuckerrüben und Getreide-Körnermais.

Technisch konnte das angepasste Regelspurverfahren in den Betrieben umgesetzt werden: Abstimmen der Arbeitsbreiten aller eingesetzten Feldfahrzeuge, Ausrüstung aller Traktor und Selbstfahrer mit RTK-GPS. Die Spurführung funktionierte im Praxisbetrieb ausreichend genau.

Auf den Feldern war die Bodenstruktur im unbefahrenen Bereich nach sechs Jahren überwiegend besser, die Wasserinfiltration höher. Das Wasserangebot im Boden unterschied sich dennoch im Mittel der Hauptvegetationszeit nicht. Offensichtlich konnte der Niederschlag bei geringer Hangneigung auch in die dichter lagernden Böden einsickern. Extreme Starkregen oder Trockenperioden fanden im Projektzeitraum nicht statt.

Die Weizenenerträge reagierten bei üblichem Witterungsverlauf nicht systematisch auf die festgestellten Bodenstrukturunterschiede. Körnermais zeigte dagegen deutliche Ertrags- einbußen auf den befahren Teilflächen (Fahrspuren).

Das angepasste Regelspurverfahren ist auf Praxisbetrieben unter einer Reihe von Bedingungen umsetzbar: pfluglos, keine Zuckerrüben bzw. Hackfrüchte, Integration aller Arbeitsgänge in das CTF-System, hoch motivierter Betriebsleiter inkl. dessen Team. Die Vorteile einer intakten Bodenstruktur zeigen sich auf den unbefahrenen Flächenanteilen mit höheren Maiserträgen und einem Potenzial an besserem Wasseraufnahmevermögen und Erosionsschutz. Eine vollständige Ausnutzung dieser Vorteile ermöglichte nur das klassische CTF-System, es wäre aber nur auf vollkommen arrondierten Betrieben realisierbar.

Die automatische Spurführung mit minimalen Fahrspurlängen und Vermeiden von Überlappung erweist sich als innovative Technologie mit ökonomischen wie ökologischen Vorteilen. Dazu müssen aber nicht zwingend alle Arbeitsgänge auf denselben Fahrspuren verlaufen. Die Kombination von bodenschonendem Befahren + Spurführung + Bewirtschaften des Feldes in Beeten (keine Wendevorgänge im Vorgewende) ist für bayerische Verhältnisse zukunftsweisend und sollte durch weitere Forschung und Beratung unterstützt werden.

2 Einleitung

Technologien zur sicheren Ortung, Führung und Steuerung von Fahrzeugen und Maschinen bieten vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten im Ackerbau, die unter dem Begriff „precision farming“ zusammengefasst werden. Mit hoch präzisen satellitengestützten Ortungssystemen können Fahrwege von Landmaschinen und Lockerungsstränge von Bodenbearbeitungswerkzeugen exakt dokumentiert und jederzeit wieder lokalisiert und angesteuert werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Regelspurverfahren, international als CTF bezeichnet (Controlled-Traffic-Farming gegenüber Random-Traffic-Farming), das mit diesen Technologien anwendbar wird.

Das klassische Regelspurverfahren ist nichts anderes als ein Beet-System. CTF, wie es z.B. in Australien in großem Umfang betrieben wird, trennt Fahrspuren und Wuchsfläche für alle Arbeitsgänge auf dem Feld. Fahrspuren sind keine Wuchsfläche für Kulturpflanzen, der Fahrspuranteil bleibt unter 15 %. Es werden speziell angepasste Fahrzeuge und Geräte mit großer Spurweite und schmalen Reifen eingesetzt. Bestellung, Ernte und Bodenbearbeitung erfolgen mit gleichen Arbeitsbreiten von den gleichen Fahrgassen aus und immer mit automatischer Spurführung (Abb. 1).

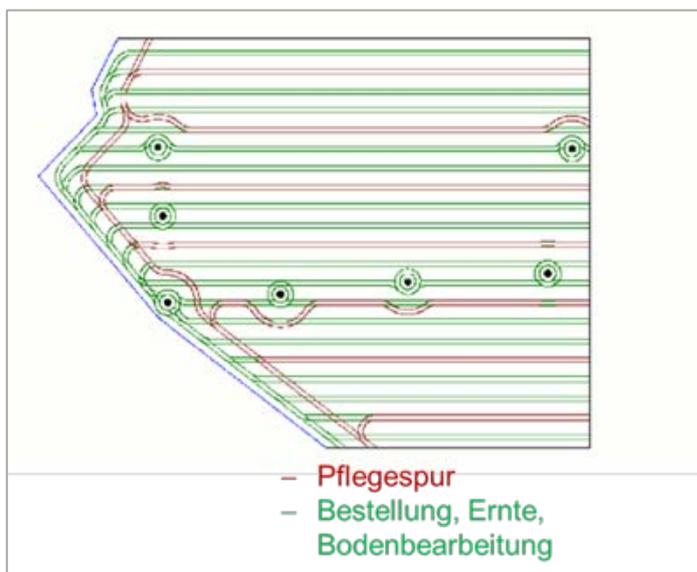


Abb. 1: CTF klassisch mit verbindlichen Fahrwegen mit Umfahrungen von Hindernissen für alle Arbeitsgänge. Quelle: www.smartagriplatform.com/Agrovation

In Deutschland dürfen Traktoren mit der Spurweite von Mähdreschern nicht auf öffentlichen Straßen fahren (siehe § 32 StVZO). Ist der landwirtschaftliche Betrieb nicht komplett arrondiert und gleichzeitig autonom in der Arbeitserledigung auf dem Feld, kann ein angepasstes Regelspurverfahren mit üblichen Spurweiten und Reifendimensionen angewendet werden. Die Fahrtrassen werden bewirtschaftet, sind also Anbaufläche. Der

Spurflächenanteil steigt dann auf über 30 % (Abb. 2). Die Überrollhäufigkeit auf den Trassen liegt in einem Bereich, wie er auch bei „Random Traffic“ auf erheblichen Feldanteilen erreicht wird (Abb. 3) (Duttmann et al. 2013). Auch im angepassten Regelspurverfahren müssen die Arbeitsbreiten aller Geräte aufeinander abgestimmt sein.

In jedem Fall wird auf die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug verzichtet, dessen Arbeitsbreite ist zu gering.

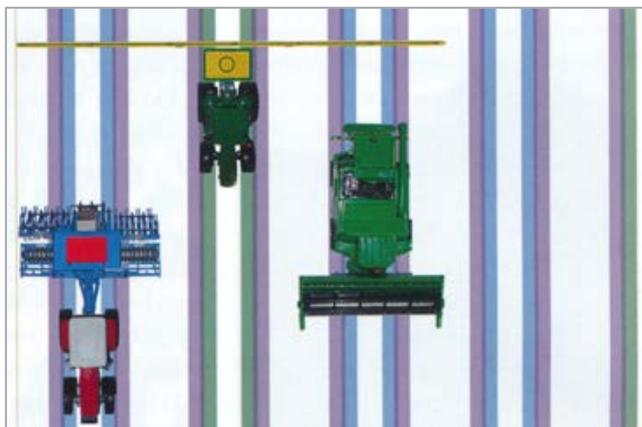


Abb. 2: CTF angepasst mit verbindlichen Fahrwegen und unterschiedlichen Spurweiten bei Traktoren und Selbstfahrern. Quelle: AID, 2015

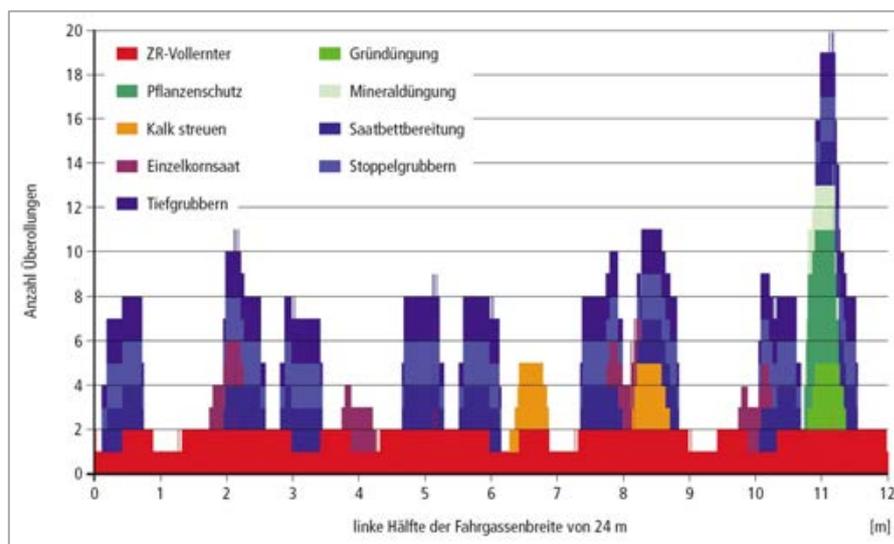


Abb. 3: Überrollte Flächenanteile und Überrollhäufigkeit in der linken Hälfte einer Fahrgassenbreite ohne CTF bei Zuckerrüben, pfluglos. Quelle: AID, 2015

Für beide CTF-Verfahren, das klassische wie das an die StVO angepasste, ist die sichere Wiederfindung der Fahrspur essenziell. Die Attraktivität von CTF beruht nicht allein auf der technischen Machbarkeit. CTF verspricht Vorteile bei Ertragssicherheit, Boden- und Klimaschutz. Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch sind zu erwarten (keine Bodenverdichtungen bei CTF im unbefahrenen Bereich). Mit verbesserter Bodenstruktur können die Lachgasemissionen sinken.

CTF hat sich in den letzten Jahren in Australien und teilweise auch in den USA zu einem praxisüblichen Verfahren entwickelt. Unter semiariden Bedingungen besticht dort das Vermögen der nicht mehr mit schweren Maschinen überfahrenen Böden, Niederschlagswasser aufzunehmen, zu speichern und den Kulturpflanzen in Trockenperioden zur Verfügung zu stellen.

In Bayern herrschen andere klimatische Verhältnisse als in Australien, auch die Agrarstruktur unterscheidet sich wesentlich. Die Verwundbarkeit des Systems Boden-Pflanze ist aber auch in Bayern auf vielen Standorten mit Blick auf Bodenerosion, Bodenverdichtung und zukünftig wohl auch auf Hitzeperioden in der Vegetationszeit hoch. Die Anbaufläche von Kulturarten mit hohem Erosionsrisiko nimmt zu. Der Klimawandel lässt vermehrt Witterungsextreme erwarten. Es besteht deshalb Bedarf, innovative Bewirtschaftungsmethoden zu testen bzw. zu adaptieren. In einem vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Forschungsprojekt prüfte die LfL, ob ein Regelspurverfahren unter bayerischen Bedingungen funktionieren kann, welche technischen und pflanzenbaulichen Probleme auftreten können, wie diese mit Verfahrensanpassungen zu lösen sind und ob die erwarteten Effekte bei Wassereffizienz und im Ressourcenschutz eintreten.

In einer ersten Phase des Forschungsprojekts (2009 bis 2011) wurden die Verfahren auf drei Praxisbetrieben mit einem On-Farm-Research-Forschungsansatz implementiert und mit ersten Messungen begleitet. In der zweiten Phase (2011-2014) lag der Schwerpunkt auf Messungen zum Bodenwasserhaushalt und zur Bodenstruktur, die Ertragshebungen wurden in dem nun eingespielten System fortgeführt.

3 Stand des Wissens

Erste Versuche mit konsequenten Regelfahrspurverfahren wurden in den 1970er und 1980er Jahren im Feldgemüsebau in den Niederlanden mit Breitspurträgerfahrzeugen, sog. „Gantries“ durchgeführt. Die erwarteten Verbesserungen bei Bodenstruktur und Kraftstoffverbrauch traten ein (Lamers et al., 1986), wegen zahlreicher technischer Probleme konnte das Verfahren aber nicht in der Praxis etabliert werden.

In jüngster Zeit widmet sich die Forschung wieder zunehmend diesem Thema (Tullberg et al. 2007, Tullberg, 2008; Gasso et al., 2013). Leistungsfähige Traktoren, Bestellsysteme mit sechs, neun und zwölf Metern Arbeitsbreite und Erntemaschinen mit identischen Schnittbreiten eröffnen zusammen mit hochgenauen, GPS basierten Lenksystemen die Möglichkeit, Regelspurverfahren erfolgreich zu realisieren.

Im extensiven Getreideanbau in den Trockengebieten Australiens mit verdichtungsempfindlichen Böden hat sich CTF mit einer Anbaufläche von mehreren Mio. Hektar von ersten Anfängen 1990 bis heute zu einem Standardverfahren etabliert (Tullberg et al., 2007; Department of Agriculture, 2004). Wissenschaftliche Untersuchungen belegen eine erhöhte Wasserinfiltration, ein voll funktionsfähiges Bodengefüge, eine verminderte Erosionsanfälligkeit, verringerte Emissionen von Stickoxiden und Methan, verbesserte Feldaufgänge, eine intensivere Durchwurzelung und dadurch stabilere und höhere Erträge (Gass et al., 2013; Kingwell & Fuchsbichler, 2011; Tullberg et al., 2007; Li et al., 2004). Bowman (2008) verweist auf die hohe Wirtschaftlichkeit von CTF unter australischen Bedingungen.

Positive Effekte hinsichtlich Wassereffizienz, Erosionsschutz und Ertragsbildung wurden auch in den trockenen Lössgebieten Nord-Chinas dokumentiert (Qingjie et al., 2009).

Forschungsgruppen in Großbritannien, der Schweiz, der Slowakei, der Tschechischen Republik, den Niederlanden, Deutschland und Dänemark (dort mit Schwerpunkt Ackergras) untersuchen bzw. untersuchten, wie sich Regelfahrspurverfahren unter west- und mitteleuropäischen Verhältnissen (Boden, Klima, Fruchtfolgen, Erträge, Mechanisierung) umsetzen lassen und ob ähnliche Effekte wie in Trockengebieten erzielt werden können. Die europäischen Aktivitäten sind in der ISTRO Working Group „Controlled-Traffic-Farming“ vernetzt und auf deren Homepage dokumentiert (www.controlledtrafficfarming.com). Verschiedene Veröffentlichungen beschreiben Forschungsansätze und zeigen erste Ergebnisse (Arvidson et al., 2014; Holpp et al., 2013; Demmel et al., 2012, 2013; Roberts, 2011; Holpp et al., 2011; Bochtis et al., 2010; Kroulik et al., 2010; Bommers, 2009; Holpp & Anken, 2008).

Den in der Schweiz durchgeführten und abgeschlossenen randomisierten Feldversuch zu CTF hat Holpp (2012) in seiner Dissertation umfassend dargestellt (siehe auch Holpp et al., 2013 und Holpp & Hensel, 2013). Darüber hinaus sind umfassende wissenschaftliche Arbeiten auf Basis abgeschlossener Feldversuche im europäischen Raum noch nicht veröffentlicht.

4 Material und Methoden:

4.1 Betriebe und Standorte

Mit drei landwirtschaftlichen Betrieben wurde eine Kooperation vereinbart, um auf einzelnen Feldern ein Regelspurverfahren zu etablieren und dort differenzierte Ertragserhebungen und verschiedene Messungen durchzuführen. Auf den Betrieben 1 und 3 wurden jeweils zwei Schläge in die Untersuchungen aufgenommen, auf Betrieb 2 war es ein Schlag.

Die Betriebe liegen (1) im Landkreis Eichstätt (Fränkische Alb zwischen Donau und Altmühl), (2) im Landkreis Neuburg-Schrobenhausen (Albanstieg in Donaunähe) und (3) im Landkreis Pfarrkirchen (Tertiäres Hügelland), siehe Abb. 4. Die Betriebe 1 und 2 sind viehlose Marktfruchtbetriebe mit Winterweizen, Raps, Zuckerrüben und z. T. Winterroggen. Betrieb 3 betreibt Bullen- und Hähnchenmast und baut Winterweizen, Raps und Körnermais an.

Die drei Betriebe brachten wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung der Versuche mit: pfluglose Bodenbearbeitung, Erfahrungen mit GPS-Ortung und automatischen Lenksystemen sowie Interesse an einer Weiterentwicklung ihres Ackerbaumanagements in Richtung Regelspurverfahren. Aufbauend auf die bereits vorhandene Technik wurden alle relevanten Traktoren und die Erntemaschinen - soweit noch nicht geschehen - mit hochgenauen Lenksystemen (RTK-DGPS) aus- bzw. aufgerüstet. Dabei kamen sowohl Lenksysteme zum Einsatz, die direkt in die Lenkhydraulik eingreifen als auch universelle Nachrüstlösungen (für ältere Fahrzeuge). Lediglich der selbstfahrende Rübenroder (Betriebe 1) wurde weiterhin manuell gelenkt, da der Erntevorgang ohnehin an die vorhandenen, mit Lenksystem gesäten Rübenreihen gebunden ist.

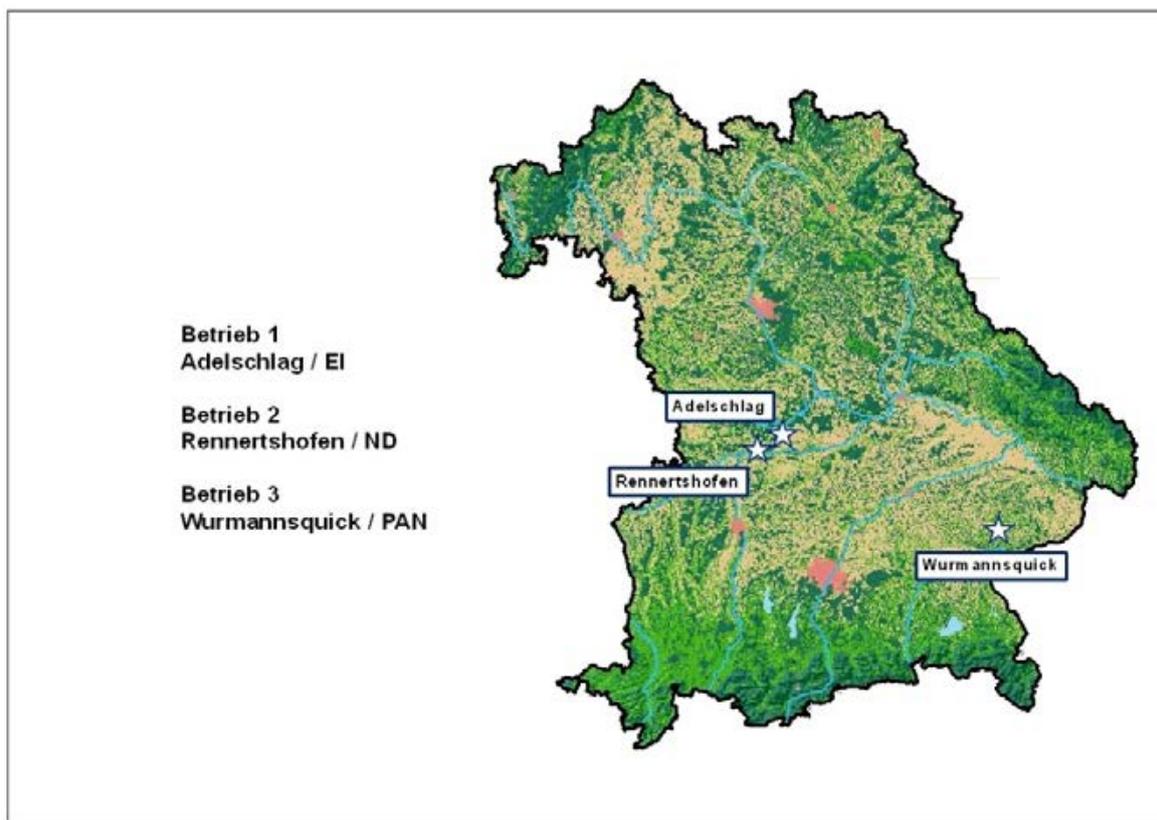


Abb. 4: Lage der Versuchsbetriebe in Bayern

Tab. 1: Wesentliche Standortfaktoren auf den Versuchsbetrieben

Ort	Höhe ü. NN, m	Bodenart	LfL- Klimastation	Mittlere Jahrestem- peratur, °C, (2008- 2014)	Mittlerer Jahres- niederschlag, mm (2008-2014)
Adelschlag Betrieb 1	430	schluffiger Lehm	Häringhof	8,7	708
Rennertshofen Betrieb 2	450	schluffiger Lehm	Burgheim	8,7	695
Wurmannsquick Betrieb 3	560	stark leh- miger Sand	Frieding	8,9	891

Die Standortbedingungen für die Betriebe gibt Tab. 1 wieder.

Die Böden der Versuchsflächen sind durchwegs tiefgründig und insbesondere bei Betrieb 1 und 2 durch Lössüberdeckung geprägt. Vorherrschende Bodenart ist schluffiger Lehm (Lu) bei Betrieb 1, schluffiger Lehm bis mittel schluffiger Ton (Lu, Tu3) bei Betrieb 2 und stark lehmiger Sand bis schwach toniger Sand (S14, St2) bei Betrieb 3. Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (jeweils für 1 m Tiefe berechnet) liegt bei Betrieb 1

bei ca. 150 bzw. 200 mm, bei Betrieb 2 bei ca. 160 mm und bei Betrieb 3 bei ca. 190 bzw. 160 mm und ist jeweils als hoch einzustufen.

4.2 Bodenwasserhaushalt

4.2.1 Kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen

Die Mitte der Reifenspur wurde ausgemessen und markiert. In einem Abstand von ca. 15 cm wurde ein ca. 45 cm tiefer und 40 cm langer Schacht ausgehoben. Von diesem aus konnten nun die Sensoren (Typ FDR SMT-100) in den ungestörten Boden unterhalb der Fahrspur eingestochen werden (Abb. 5). Bei höherer Lagerungsdichte war es meist notwendig, einen Vorstecher zu verwenden. Die Sensormesswerte wurden während des Einbaus kontrolliert und bei größeren Abweichungen wurde eine andere Einstichstelle gewählt. So wurden in 15 und 40 cm Tiefe je 3 Sensoren nebeneinander eingebracht. Gleiches wurde für den unbefahrenen Messpunkt in ca. 120 cm Entfernung durchgeführt. Anschließend wurde der Boden wieder verfüllt und rückverdichtet. Die Kabel wurden in der Mitte zusammengeführt und vergraben. Die Sensoren in 40 cm Tiefe verblieben im Boden, die Sensoren in 15 cm Tiefe mussten dagegen vor der Grundbodenbearbeitung ausgegraben und später wieder eingesetzt werden. Zur kontinuierlichen Messdatenerfassung wurden die Sensoren an Theodor Friedrichs-Datenlogger (Combilog) angeschlossen. Daten wurden stündlich erfasst und konnten per Fernabfrage abgerufen werden.

4.2.2 Mobile Bodenfeuchtemessung

Parallel zur kontinuierlichen Bodenfeuchtemessung wurde die Bodenfeuchte im Jahr 2013 von Zeit zu Zeit mit einem mobilen Gerät gemessen. Verwendet wurde ein TDR Messgerät von Fieldscout (TDR 300). Dieses ist mit zwei Messnadeln ausgestattet, welche in den Boden eingestochen werden. Gemessen wird die Bodenfeuchte in Volumenprozent, kalibriert für einen Standardboden. Das Datum „Bodenfeuchte“ wird über die gesamte Nadel­länge integriert, d.h. es wird ein Mittelwert über die gemessene Tiefe (Nadellänge) gebildet. Je Variante wurden mindestens 15 Einzelmessungen für einen Mittelwert durchgeführt. Stark abweichende Einzelmessergebnisse wurden nicht mit einbezogen. Gemessen wurde mit Nadellängen von 7,5, 12 und 20 cm. Bei Sensoreinbau wurde die Messung der Bodenfeuchte im Bereich der Sensormessstelle nahe der Stechzylinderprobe mit einer Nadellänge von 7,5 cm durchgeführt. Bei der oberflächlichen Messung wurde nach Möglichkeit die 20 cm lange Nadel verwendet. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens wurde dieser oft so hart, dass eine kürzere Nadel verwendet werden musste, im Einzelfall war eine Messung nicht mehr möglich.



Abb. 5: Links: Einbau der 3 Sensoren in 38 cm Tiefe. Rechts oben: Schacht für den Sensoreinbau mit Einbaupunkten im befahrenen (linke Seite) und unbefahrenen Bereich (rechte Seite). Rechts unten: Datenlogger

4.2.3 Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung

Beim Ein- und Ausbau der Sensoren wurden 100 bzw. 250 cm Stechzylinderproben zur gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung gezogen. Als Probenahmestelle wurde zunächst die zum Sensoreinbau benötigte Ausschachtung verwendet, d.h. die Stechzylinder wurden auf gleicher Tiefe nahe den Sensoren entnommen. Beim Einbau der neuen Sensoren im Frühjahr 2013 wurden je Variante und Tiefenstufe 100 cm³ Stechzylinder 6-fach wiederholt gezogen. Die Feldfeuchte und das Trockengewicht nach Ofentrocknung bei 105 °C wurden anschließend im Labor bestimmt.

4.2.4 Bodenprofilansprache, physikalische Bodenkennwerte, Eindringwiderstand

Profilansprache:

Gegen Ende des Projekts wurden je Schlag 6 Profilgruben nach einem bestimmten Schema mit einem Minibagger angelegt: In etwa 4 m Entfernung zu den Sensoren wurden am äußeren Rand der Radspur je eine Grube (linkes und rechtes Rad) ausgehoben. Dies wurde in einem Abstand von weiteren 4 bzw. 8 m zur ersten Grube zweimal wiederholt. So ergaben sich zweimal drei Gruben hintereinander mit Probenahmestellen für den befahrenen und unbefahrenen Bereich. Die Gruben waren ca. 70 cm tief und 100 cm breit. Sie wurden so gelegt, dass jeweils eine Profilwand an den befahrenen Bereich angrenzte. Die gegenüberliegende Seite in 1 m Abstand war dann die unbefahrene Probenahmestelle. Nach der Profilaufnahme wurde dort die Erde auf einer Breite von ca. 60 * 25 cm vorsichtig mit dem Spaten bis auf 1 cm über Stechzylinderentnahmetiefe abgetragen. Auf dieser Fläche wur-

den sechs Stechzylinder in den Boden von oben eingeschlagen. Beim Ausgraben der Stechzylinder wurde eine gestörte Probe für die Korngrößenanalyse entnommen. Dann wurde die Erde bis zur zweiten Entnahmestelle abgetragen. Es wurden vier Tiefen (10-15, 25-30, 35-40 und 55-60 cm) beprobt. Die Varianten befahren/unbefahren wurden also sechsmal je Tiefenstufe und Schlag beprobt, es ergaben sich somit 36 Einzelproben je Variante.

Laborarbeiten:

Im Labor wurden wichtige bodenphysikalische Kennwerte wie Textur, Trockenrohdichte, Feldkapazität, Totwasser, Luftkapazität und Humusgehalt an den Bodenproben bestimmt.

Die Untersuchungen wurden im bodenphysikalischen Labor der LfL mit den einschlägigen DIN-Methoden durchgeführt.

Der Humusgehalt (Gesamt C) wurde durch Verbrennungsanalyse mit dem Elementaranalysator und das Carbonat nach der Scheibler-Methode bestimmt.

Die effektive Lagerungsdichte wurde in Abhängigkeit vom Ton, Schluff und Humusgehalt wie folgt berechnet und in Lagerungsdichteklassen eingeteilt (Quelle: DBG).

$$Ld [g/cm^3] = TRD [g/cm^3] + 0,005 \left[\frac{g/cm^3}{\% Ton} \right] \times \% Ton + 0,001 \left[\frac{g/cm^3}{\% Schluff} \right] \times \% Schluff$$

Die Formel gilt für Humusgehalte <1 %. Bei Humusgehalten zwischen 1 und 6 % verringert sich die effektive Lagerungsdichte (LD) um 0,04 g/cm³ pro 1 % Humus.

Tab. 2: *Einstufung der Lagerungsdichteklassen (Renger et al., 2008)*

Kennzeichnung der effektiven Lagerungsdichte			Gefügemerkmale für die Schätzung der effektiven Lagerungsdichte
Kurzzeichen	Bezeichnung	Kennwert Ld*)	
Ld 1	sehr gering	< 1,3	Feines Krümelgefüge, sehr lockeres Einzelkorn- oder sehr lockeres Kohärentgefüge, sehr feines bis feines Aggregatgefüge mit offener bis sperriger Lagerungsart und sehr losem Zusammenhalt, sehr hoher Anteil an biogenen Poren, gleichmäßige Wurzelverteilung
Ld 2	gering	1,3 - < 1,55	Krümelgefüge, lockeres Einzelkorn - oder lockeres Kohärentgefüge, feines Aggregatgefüge mit offener und sperriger Lagerungsart und losem Zusammenhalt, hoher Anteil an biogenen Poren, gleichmäßige Wurzelverteilung
Ld 3	mittel	1,55 - < 1,75	Subpolyederggefüge, Einzelkorn - oder Kohärentgefüge mit mittlerem Zusammenhalt, Aggregatgefüge mit halboffener bis offener Lagerungsart und mittlerem Zusammenhalt bzw. mittlerer Verfestigungsgrad, mittlerer Anteil an biogenen Poren, fast gleichmäßige Wurzelverteilung
Ld 4	hoch	1,75 - < 1,95	dichtes Einzelkorn - oder dichtes Kohärentgefüge, dichtes Aggregatgefüge mit geschlossener Lagerungsart und festem Zusammenhalt bzw. mit hohem Verfestigungsgrad, Plattengefüge, sehr geringer bis geringer Anteil an biogenen Poren, ungleichmäßige Wurzelverteilung
Ld 5	sehr hoch	> 1,95	sehr dichtes Einzelkorn - oder Kohärentgefüge, sehr dichtes Aggregatgefüge mit geschlossener Lagerungsart und sehr festem Zusammenhalt bzw. sehr hohem Verfestigungsgrad, sehr dichtes Plattengefüge, sehr geringer Anteil an biogenen Poren, sehr ungleichmäßige Wurzelverteilung

Eindringwiderstandsmessungen mit dem Penetrometer:

Außerdem wurden im Feld Messungen des Eindringwiderstands im befahrenen und unbefahrenen Bereich durchgeführt, um Effekte auf den Eindringwiderstand zu dokumentieren (Penetrologger der Firma Eijkelkamp).

4.2.5 Infiltrationsmessung:

Um eventuelle Unterschiede bei der Wasserinfiltration festzustellen wurden auf Betrieb 1 und 3 Infiltrationsmessungen mit dem Doppelzylinder-Infiltrometer durchgeführt (DIN 19682-7).

Es wurde im befahrenen Bereich (nicht in der Pflegefahrspur!) und im angrenzenden unbefahrenen Bereich gemessen. Anschließend wurden die Zylinder um 1-2 m in Bearbeitung-/Fahrtrichtung versetzt und die Messungen so sechs- bis zehnmal wiederholt.

Äußerer (55 cm Ø) und innerer Ring (30 cm Ø) wurden ca. 6 cm tief in den Boden eingeschlagen. Auf den Boden des inneren Ringes wurde ein Geschirrtuch gelegt, dann wurden ca. 18 l Wasser vorsichtig eingegossen. Kurz bevor dieses versickert war, wurden erneut ca. 18 l eingefüllt, das Tuch wurde entfernt und die Messung begann. Vor und während der Messung wurde der Zwischenraum der beiden Ringe mit Wasser als Puffer befüllt. In wenigen Fällen versickerte das Wasser aufgrund von Hohlräumen (Grabgänge von Mäusen) sofort. In diesem Falle wurde die Messung verworfen, es wurde eine neue Messstelle aufgesucht.

4.3 Erträge

Zur Überprüfung der zu erwartenden Unterschiede hinsichtlich der Erträge im befahrenen und unbefahrenen Bereich wurden beim Getreide jeweils zehn Ernteproben aus dem Fahrspurbereich (nicht aus Spurschächten bzw. Fahrgassen) und aus dem spurfreien Bereich genommen und stationär gedroschen (Abb. 6). Beim Raps ist eine derartige Probenahme wegen der starken Verzweigung der Pflanzen nicht durchführbar. Als Indiz für die Ertragserwartung wurden deshalb zu Beginn der Rapsblüte Wurzelmasse und Hauptwurzellänge durch Ausgraben, Vermessen und Verwiegen ermittelt.

Beim Körnermais wurde ebenfalls eine Handbeerntung (Kolben) mit je 1,5 m² durchgeführt. Getrennt nach befahren und unbefahren wurden jeweils 10 Wiederholungen beerntet. Anders als bei Rüben wird vor Mais im Frühjahr Gülle ausgebracht; dabei können Bodenverdichtungen entstehen, die in den betroffenen Maisreihen Unterschiede im Feldaufgang und im Ertrag zur Folge haben können.



Getreide: Handernte aus 10 Ringen (1 m²), ausgelegt im Frühjahr

Abb. 6: Methodik der Ertragsmessung von Getreide mit Ringen

5 Ergebnisse:

5.1 Feldversuche, Technik

Um ein konsequentes Regelspursystem realisieren zu können, wurde für jeden Versuchsbetrieb ein Fahrspursystem mit den jeweilig verfügbaren Maschinen und Geräten entwickelt. Zu berücksichtigen waren dabei die Arbeitsbreiten der Schlüsselmaschinen (Bodenbearbeitung, Saat, Ernte), die Spurweiten aller Landmaschinen und die Breite der Reifen. Ergebnis sind unterschiedliche Befahrungssysteme mit folgenden Arbeitsbreiten: 5,4 m (Betrieb 1), 6,0 m (Betrieb 2) und 4,5 m (Betrieb 3). Alle Arbeitsgänge (Bodenbearbeitung, Aussaat, Ernte) wurden mit diesen Arbeitsbreiten durchgeführt. Düngung und Pflanzenschutz erfolgten ebenfalls passend zur vorgegebenen Arbeitsbreite.

Tab. 3: Daten zur Umsetzung von CTF auf den drei Betrieben

	Betrieb 1	Betrieb 2	Betrieb 3
Systembreite	5,4 m	6,0 m	4,5 m
Traktoren	Challenger 755 JD 6930 Spurweite 1,8 m	Challenger 765 MBtrac 1000 Spurweite 2,0 m	JD 7810 MBtrac 900 Spurweite 1,8 m
Bodenbearbeitung	Kurzscheibenegge, Grubber 6,0 m	Grubber 6,0 m	Grubber 4,5 m
Aussaat	Mulchsägerät 5,4 m	Mulchsägerät 6,0 m	Kreiselegge+ Drill
Pflanzenschutz	gezogen, 28 m	aufgebaut, 30 m	aufgebaut, 22,5 m
Ernte	5,6 m 800/65 R32	7,5 → 6,0 m Zwillingsräder	6,6 → 4,5 m 800/65 R32
CTF "Muster"	"twin-track"	"twin-track"	"twin-track"
Autom. Lenkung	RTK, lokale Festst.	RTK, lokaler Rep.	RTK, GSM Netz
Fruchtfolge	Zuckerrüben — Winterweizen — Winterweizen	Winterraps — Winterweizen — Winterweizen	Winterraps — Körnermais — Winterweizen

Daraus resultierte dann der (theoretisch) realisierbare Anteil an nicht mehr überrolltem Boden bei den Mähdruschfrüchten: 67 % bei Betrieb 1, 58 % bei Betrieb 2 und 66 % bei Betrieb 3 (Tab. 3).

Abb. 8 zeigt den Befahrungsplan für Betrieb 1 mit 67 % nicht mehr überrollter Fläche in der Mähdruschfruchtfolge. Der Traktor nutzt die Mähdrescherspuren, er fährt aber um eine halbe Spur versetzt („Twin-track“, Chamen, 2007, siehe Abb. 7). Durch den halben Versatz laufen die Reifen des Traktors jeweils in den Spuren zweier benachbarter Mähdrescherfahrten. Diese Lösung stößt bei Arbeitsbreiten ab ca. 6 m an ihre Grenzen, weil die benachbarten Spuren vom Mähdrescher dann für die üblichen Spurweiten der Traktoren zu weit auseinander liegen.

Abb. 9 und Abb. 10 zeigen das Fahrspurmuster für Mähdrusch (Weizen bzw. Körnermais) auf den Betrieben 2 und 3. Auf den beiden Feldern von Betrieb 3 wurde auch Gülle aus-

gebracht und zwar im Rahmen eines Strip-Till-Verfahrens. Der Traktor nutzt dabei die Spur für Bodenbearbeitung und Saat.

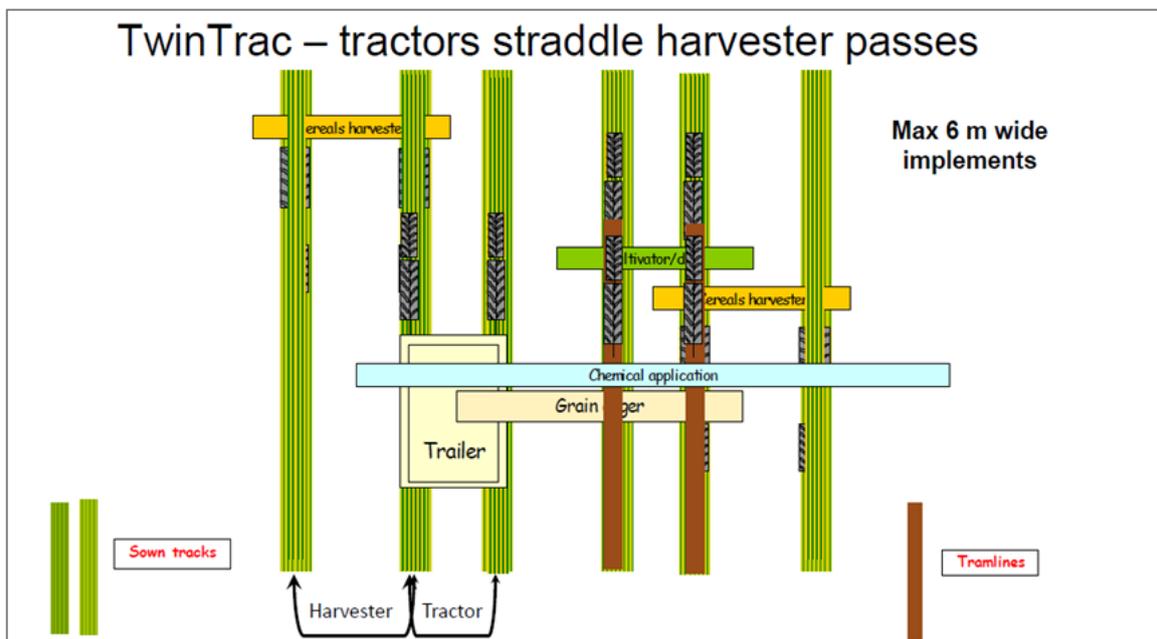


Abb. 7: Minimierung des überrollten Spuranteils mit dem TwinTrack-System (Graphik: Chamen, o.J.)

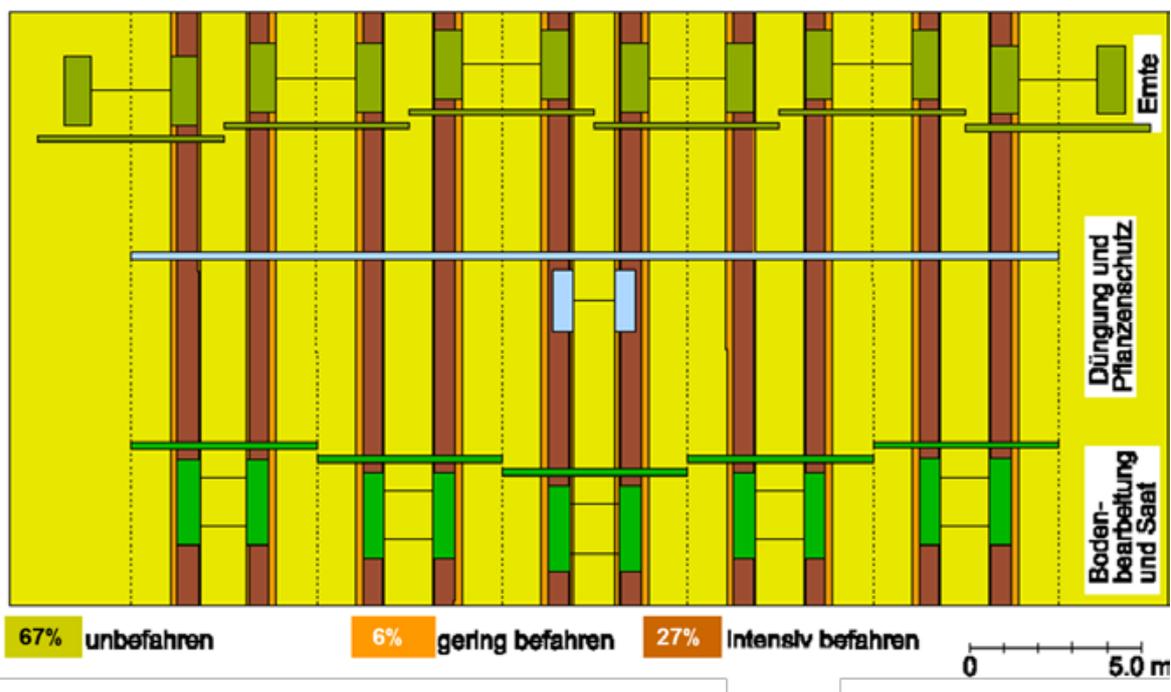


Abb. 8: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 5,4 m (Mähdruschfruchtfolge Betrieb 1)

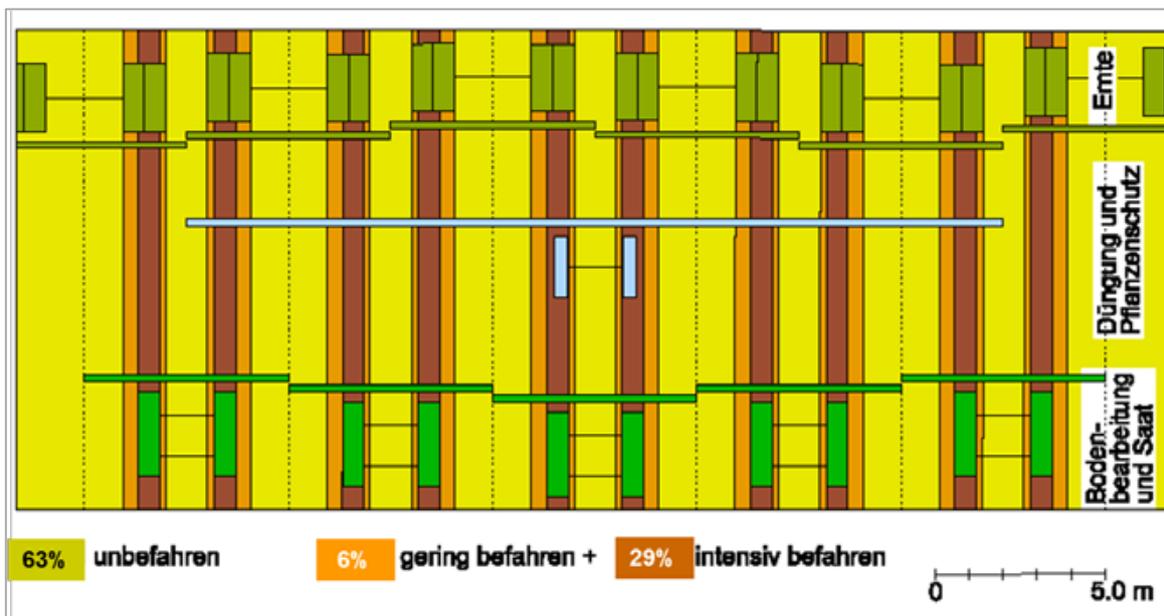


Abb. 9: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 6,0 m (Mähdruschfruchtfolge Betrieb 2)

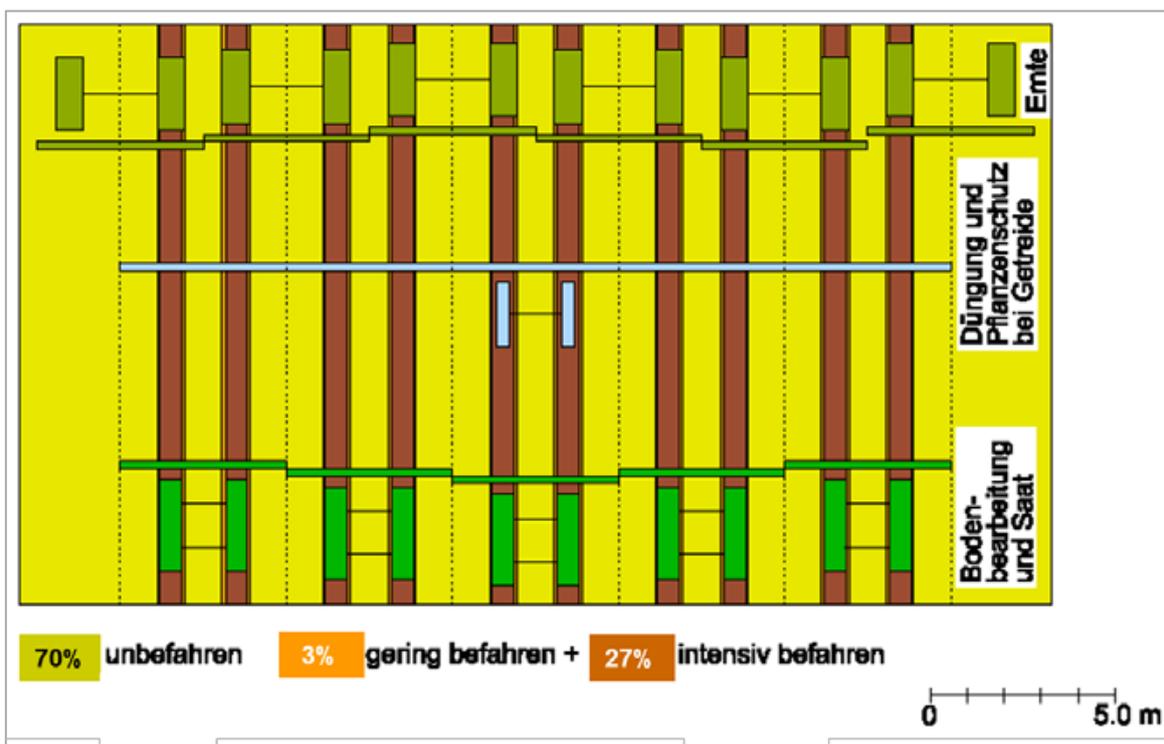


Abb. 10: Schematischer Fahrtrassenplan bei Systembreite von 4,5 m (Mähdruschfruchtfolge Betrieb 3)

Bei Zuckerrübenanbau sinkt der unbefahrene Anteil deutlich, weil die Arbeitsbreite des Rübenroders nur 2,7 m (6 Reihen) beträgt und so zu den vorhandenen Fahrspuren zusätzliche Spuren erzeugt werden (Abb. 11). Abb. 12 gibt die reale Spurverteilung in einem Rübenjahr wieder, die Spuren des Rübenroders und der Transportfahrzeuge wurden nach der Rübenenernte 2010 im Feld ausgemessen.



Abb. 11: Rübenernte 2010 auf Betrieb 1 mit Überladeverfahren: hoher überrollter Flächenanteil

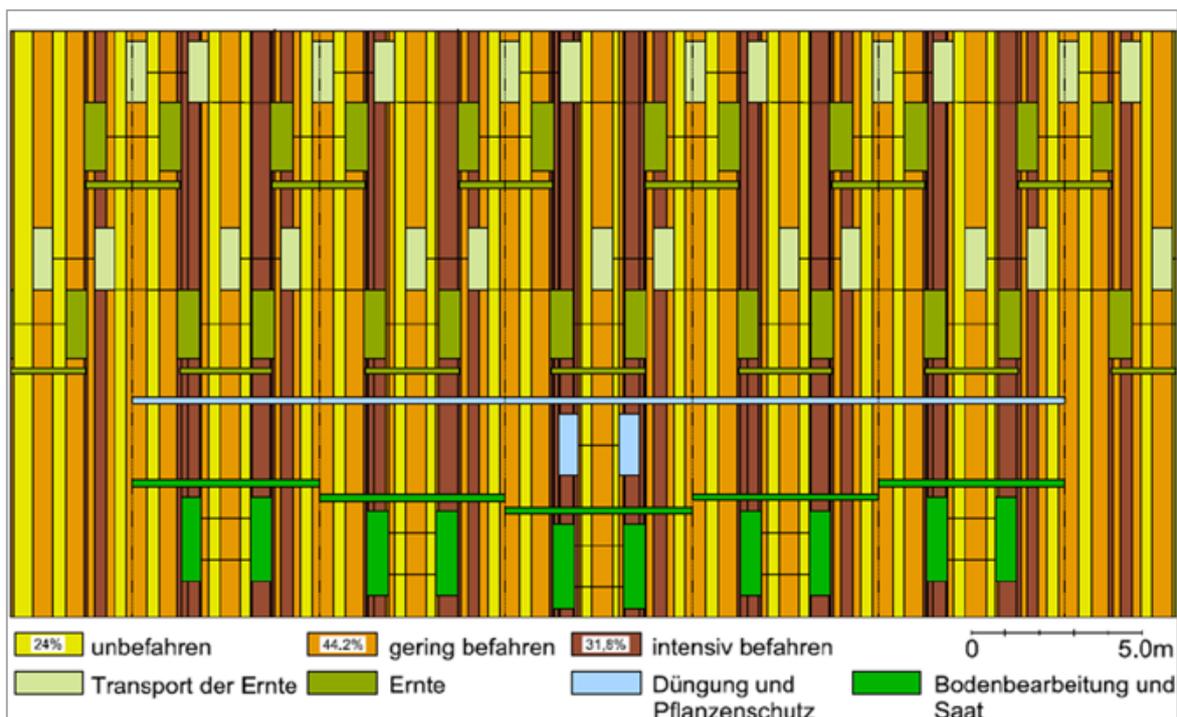


Abb. 12: Reales Überrollungsmuster in einem Rübengjahr, Betrieb 1

Das klassische, in Australien realisierte CTF-System mit dort speziell angepassten Fahrzeugen (größere Spurweite, schmale Reifen) wurde also modifiziert, weil nur von der Zulassungsbehörde genehmigte, am Markt verfügbare Landtechnik eingesetzt wird. Spurannteile im Bereich von 15 % wie in Australien sind so nicht erreichbar. Im Projekt war wesentlich zu klären, wie sich Erträge und Bodenfunktionen in den überrollten Teilflächen im Vergleich zu den unbefahrenen Böden entwickelten.

5.2 Bodenwasserhaushalt

5.2.1 Kontinuierliche Bodenfeuchtemessungen

Folgend werden die Ergebnisse der kontinuierlichen Bodenfeuchtemessungen für die Jahre 2013 und 2014 dargestellt und diskutiert. Es ist davon auszugehen, dass sich das Bodengefüge nach fünf bis sechs Jahren an die Bedingungen (befahren - unbefahren) angepasst hatte. Ab 2013 wurde zudem mit verbesserten Sensoren gemessen.

Die über den Messzeitraum gemittelten Bodenfeuchtwerte zeigen Tab. 4 und Tab. 5. Abb. 13, Abb. 14, Abb. 15, Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18 geben die zeitlichen Verläufe im Jahr 2013 wieder, Abb. 19, Abb. 20, Abb. 21, Abb. 22 und Abb. 23 für das Jahr 2014.

2013

Das Frühjahr 2013 war kalt und feucht und es fielen leicht überdurchschnittliche Winterniederschläge. Die Böden waren gesättigt und kaum befahrbar. Erst Mitte April wurde es etwas wärmer und trockener, bevor es im Mai wieder hohe Niederschläge mit einem Temperatureinbruch gab. Darauf folgte das Junihochwasser 2013. Die Böden waren in der Regel übersättigt und die Vegetationsentwicklung hinkte hinterher. Im Juli sorgte ein Hochdruckgebiet für heiße, sonnige und trockene Witterung. Dies führte zu einer langsamen Austrocknung auch tieferer Bodenschichten. So fielen z.B. bei Betrieb 1 im gesamten Juni nur 20 mm und bei Betrieb 3 16 mm Niederschlag. Anfang August setzten teilweise unwetterartige Niederschläge ein, gefolgt von einem verregneten September mit wieder ansteigender Bodenfeuchte.

Das kalte und nasse Frühjahr und die Trockenheit im Juli wirkten sich vor allem bei Mais und Kartoffel negativ auf die Erträge aus (Quelle: BLW, DWD).

Die Messwerte der Bodenfeuchtesensoren geben den oben beschriebenen Feuchteverlauf gut wieder.

Der Vergleich befahren/unbefahren zeigt, dass es in 15 cm Tiefe bei „unbefahren“ teils etwas feuchter teils etwas trockener als bei „befahren“ war. Insgesamt ist der unbefahrene Bereich tendenziell etwas trockener. Die Unterschiede sind aber in den meisten Fällen gering.

In der Tiefe von 38 cm treten keine nennenswerten Unterschiede auf. Wie Abb. 13 zeigt, sind Abweichungen von wenigen Prozent Feuchte zwischen den einzelnen Sensoren an einem Einbaupunkt Standard. Hauptursache hierfür ist die Heterogenität des Bodens (Porenverteilung, Steine, Wurzeln etc.). Hinzu kommt die Messgenauigkeit (2 % vom Messwert) des Sensors und der restlichen Hardware (Logger, Leitungsverluste Kabel).

Tab. 4: *Mittlere Feuchtwerte der Sensoren über den Messzeitraum im Jahr 2013. In den beiden rechten Spalten ist die Differenz unbefahren-befahren dargestellt. Ist der Wert negativ, so ist die unbefahrene Variante trockener als die befahrene.*

2013	Betrieb 1, Schlag 1	Kultur: WW	Messzeitraum 23.05.-06.08.13		Ø-Tagesniederschläge: 2,6 mm	
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	20,6	22,0	24,8	25,0	1,4	0,2
Bemerkungen:	Kurven gleich, unbefahren etwas feuchter					

	Betrieb 1, Schlag 2	Kultur: ZR	Messzeitraum 17.05.-07.10.13		Ø-Tagesniederschläge: 2,5 mm	
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	25,3	23,4	24,9	25,0	-1,9	0,1
Bemerkungen:	15 cm unbefahren im MW etwas trockener, bei Nds. aber höhere Spitzen, 38 cm gleich					

	Betrieb 2, Schlag 1	Kultur: WW	Messzeitraum 22.05.-06.08.13		Ø-Tagesniederschläge: 3,0 mm	
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	23,2	19,6	29,5	30,9	-3,5	1,4
Bemerkungen:	15 cm unbefahren geringfügig trockener, 40 cm gleich					

	Betrieb 3, Schlag 1	Kultur: KM	Messzeitraum 28.05.-09.10.13		Ø-Tagesniederschläge: 2,9 mm	
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	24,7	23,9	25,3	25,0	-0,9	-0,4
Bemerkungen:	15 cm unbefahren tendenziell trockener, sonst gleich					

	Betrieb 3, Schlag 2	Kultur: WW	Messzeitraum 28.05.-05.08.13		Ø-Tagesniederschläge: 3,4 mm	
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	19,7	21,3	25,8	26,7	1,6	0,9
Bemerkungen:	15 cm unbefahren geringfügig feuchter					

	Mittelwert alle					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	22,7	22,0	26,1	26,5	-0,7	0,4
Bemerkungen:	15 cm unbefahren geringfügig feuchter					

Legende	Unbefahren ist:	feuchter	trockener

Gravimetrische Überprüfungen ergaben in einigen Fällen starke Abweichungen des Sensorwertes. Diese treten vor allem kurz nach dem Einbau in 15 cm bzw. bei einer sehr lockeren Krume auf. Der Messwert ist dann vermutlich aufgrund eines schwachen Boden/Sensor Kontakts bzw. wegen des hohen Porenvolumens gestört. Derartige Effekte können auch bei zunehmender Austrocknung auftreten, wenn es zu Schrumpfungsrissen kommt.

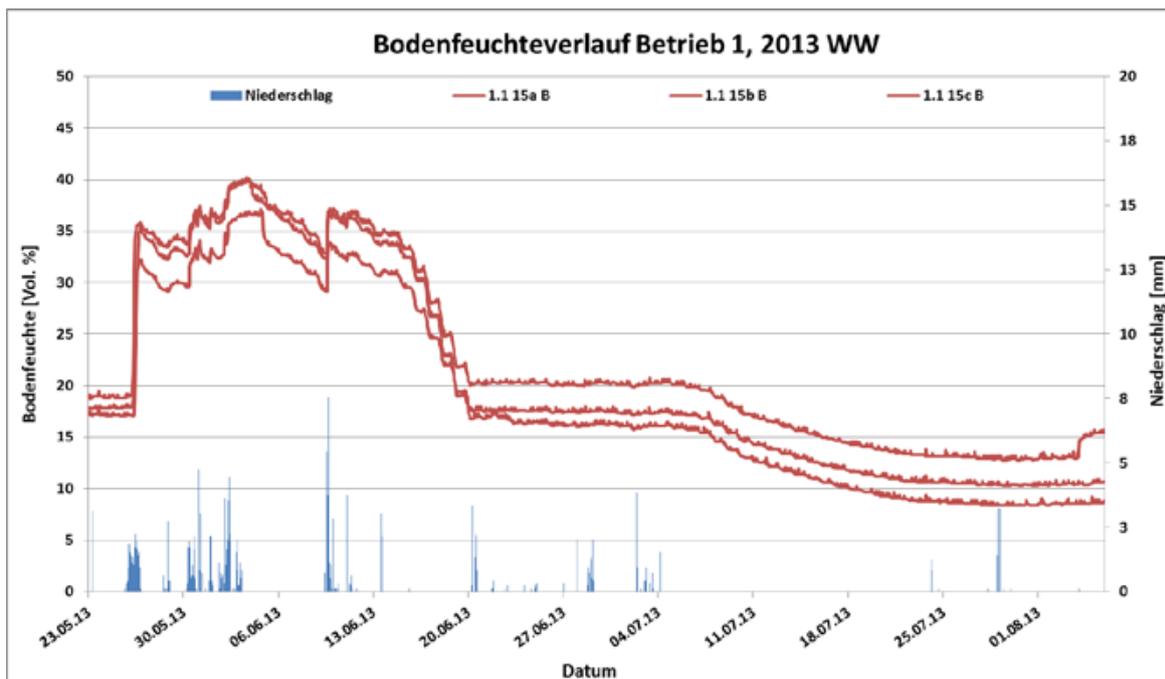


Abb. 13: Bodenfeuchteverlauf von 3 einzelnen Sensoren in 15 cm Tiefe im befahrenen Bereich

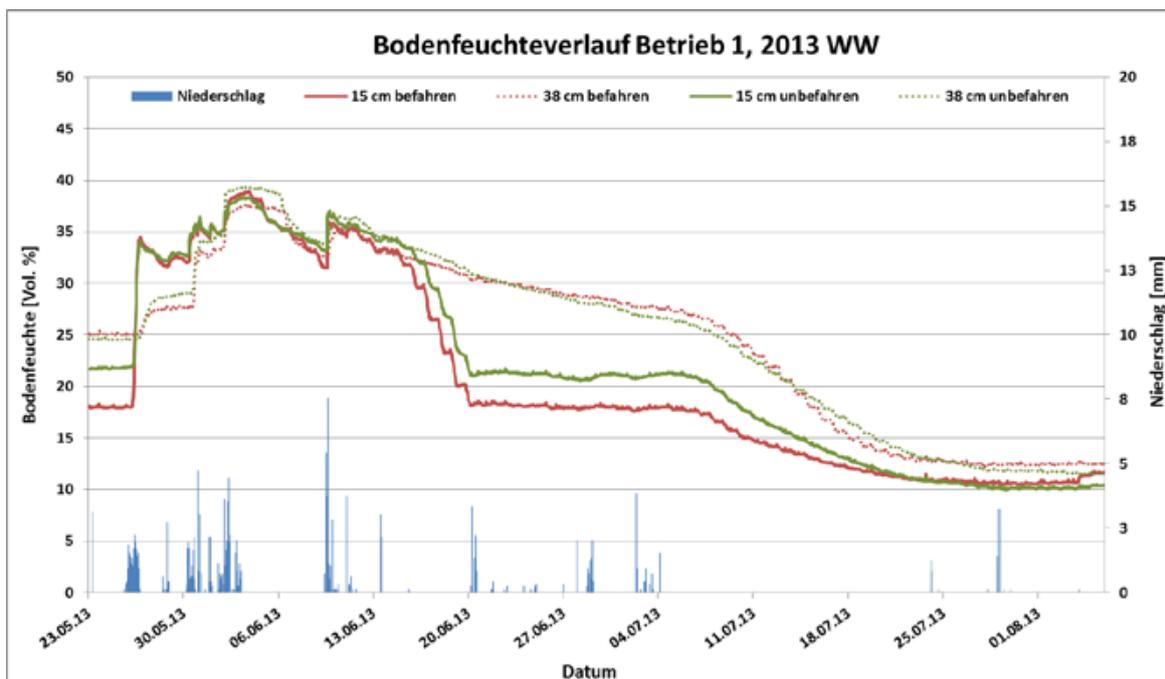


Abb. 14: Bodenfeuchteverlauf als Mittelwert von 3 Sensoren, Winterweizen, 2013, Betrieb 1

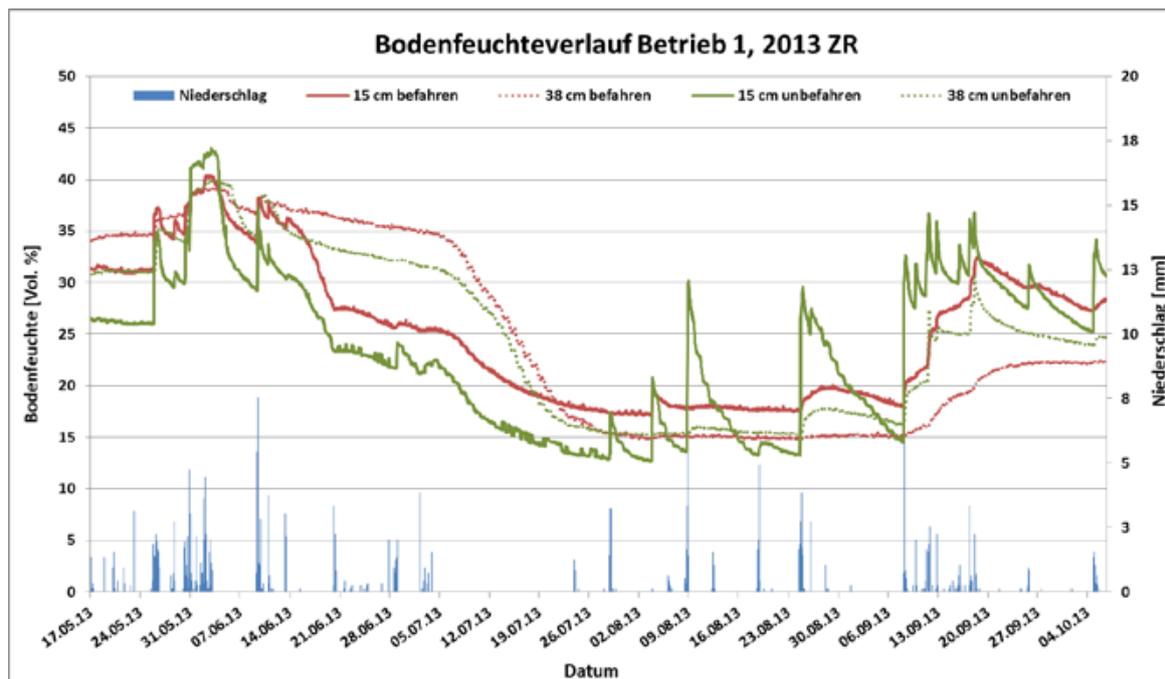


Abb. 15: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Zuckerrüben, 2013

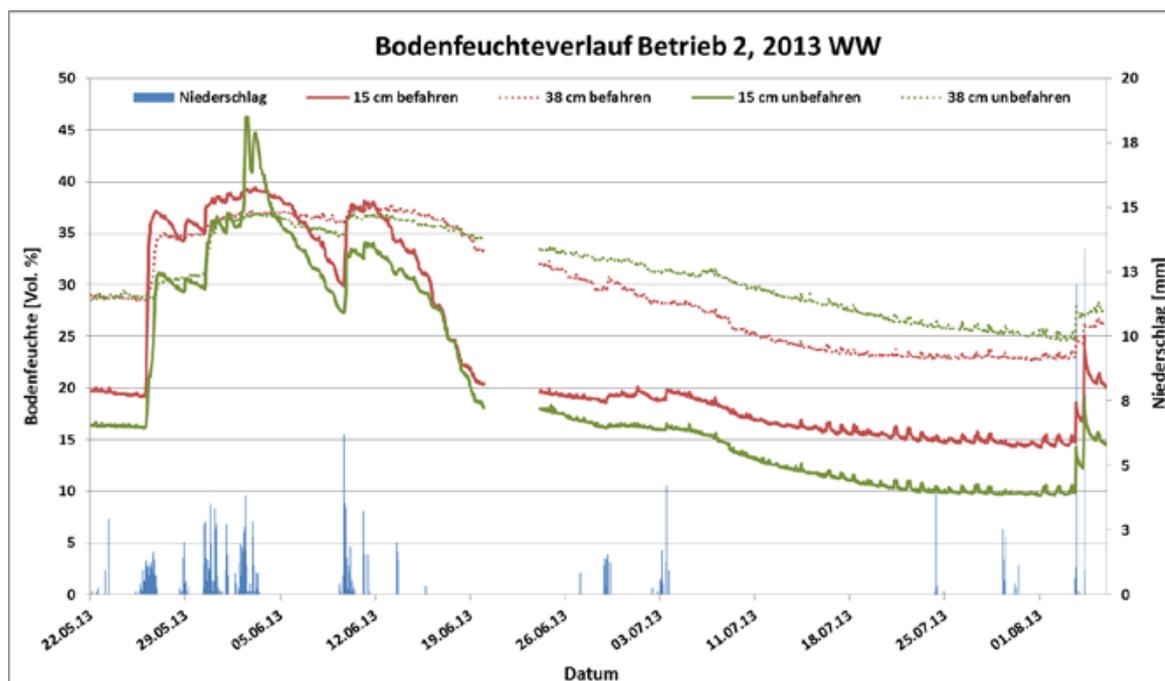


Abb. 16: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 2, Winterweizen, 2013

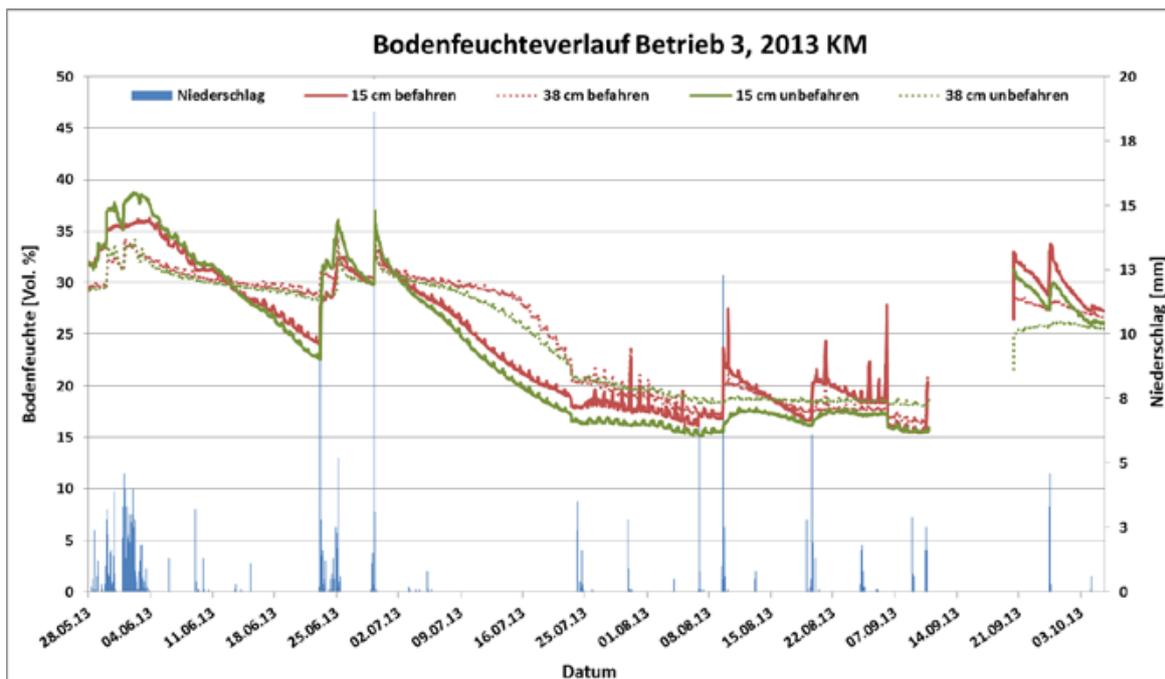


Abb. 17: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Körnermais, 2013

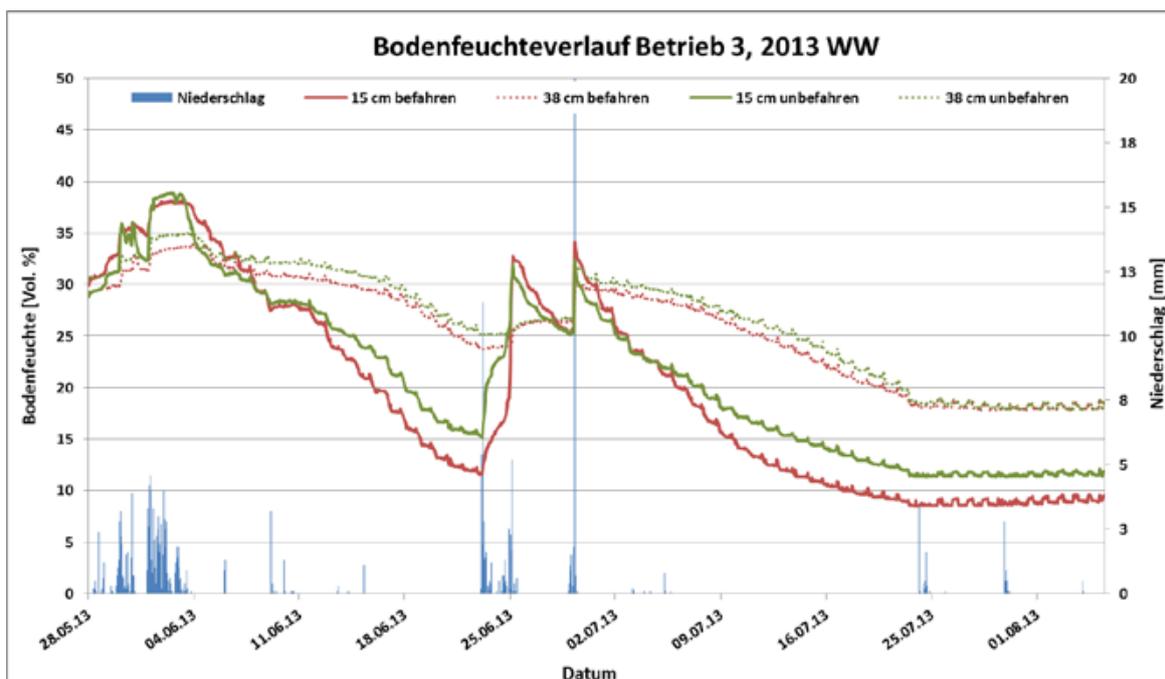


Abb. 18: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Winterweizen, 2013

2014

Das Jahr 2014 war überdurchschnittlich warm, lediglich der Mai und der August lagen etwas unter dem langjährigen Durchschnitt. Schon die ersten Monate des Jahres waren ausgeprägt warm und trocken (Quelle DWD). Nach einem sehr trockenen Februar begann schon im März bei sehr milden Temperaturen der Oberboden langsam auszutrocknen. Dieser Trend setzte sich bis Ende April fort und führte auch im Unterboden zu einer abnehmenden Bodenfeuchte. Das ließ auch die Bodensaugspannung stark ansteigen und manche Weizenbestände zeigten Trockenstress. Im Mai fielen wieder vermehrt Niederschläge, diese reichten jedoch nicht aus, um den Bodenwasserspeicher wieder aufzufüllen. Anschließende Trockenheit im Juni begleitet von sehr hohen Temperaturen und damit hohen Verdunstungsraten führte auch im Unterboden zur allmählichen Austrocknung und in einigen Beständen zur Ausschöpfung der nFK. Trotz vermehrter Niederschläge im Juli und August stagnierte die Bodenfeuchte auf einem sehr niedrigen Niveau. Erst Ende August führten hohe Niederschlagsmengen wieder zu einem Anstieg der Bodenfeuchte.

Gegenüber 2013 fielen die Niederschläge während des Messzeitraumes geringer aus. Zusammen mit der Winter-/Frühjahrstrockenheit liegen auch die Bodenfeuchtwerte teils weit unter den von 2013. Der unbefahrene Bereich in 15 cm Tiefe ist mit einer Ausnahme etwas feuchter als im befahrenen. Über alle Schläge hinweg ergibt sich so eine leicht positive Bilanz für den unbefahrenen Bereich. In 38 cm Tiefe lassen sich kaum mehr Unterschiede ausmachen, siehe Tab. 5.

Tab. 5: Mittlere Feuchtwerte der Sensoren über den Messzeitraum im Jahr 2014. In den beiden rechten Spalten ist die Differenz unbefahren-befahren dargestellt. Ist der Wert negativ, so ist die unbefahrene Variante trockener als die befahrene.

2014	Betrieb 1, Schlag 1	Kultur: ZR	Messzeitraum 07.04.-26.09.14		Ø-Tagesniederschläge: 2,05 mm	
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	20,2	16,7	23,3	21,7	-3,6	-1,6
Bemerkungen:	Beide Tiefen unbefahren etwas trockener, höhere Peaks bei bef. 15 cm					
	Betrieb 1, Schlag 2	Kultur: WW	Messzeitraum 21.03.-17.07.14		Ø-Tagesniederschläge: 1,8 mm	
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	10,9	16,8	23,4	23,1	6,0	-0,3
Bemerkungen:	15 cm unbefahren deutlich feuchter, 40 cm gleich					
	Betrieb 2, Schlag 1	Kultur: Raps	Messzeitraum 06.03.-01.07.14		Ø-Tagesniederschläge: 1,6 mm	
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	23,7	27,9	32,9	31,4	4,2	-1,5
Bemerkungen:	15 cm unbefahren etwas feuchter (2 Sensoren), 40 cm gleich					
	Betrieb 3, Schlag1	Kultur: WW	Messzeitraum 20.03.-29.07.14		Ø-Tagesniederschläge: 2,7 mm	
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	20,6	21,2	23,9	23,8	0,6	-0,1
Bemerkungen:	15 cm unbefahren tendenziell etwas feuchter, 40 cm gleich					
	Betrieb 3, Schlag 2	Kultur: KM	Messzeitraum 17.04.-22.09.14		Ø-Tagesniederschläge: 3,3 mm	
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	23,8	28,1	29,2	29,2	4,2	0,0
Bemerkungen:	15 cm unbefahren etwas feuchter					
	Mittelwert alle					
Variante:	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef38 cm
Feuchte Vol. %:	19,08	22,1	26,5	25,9	2,3	-0,7
Bemerkungen:	15 cm unbefahren geringfügig feuchter					
	Legende	Unbefahren ist:	feuchter	trockener		

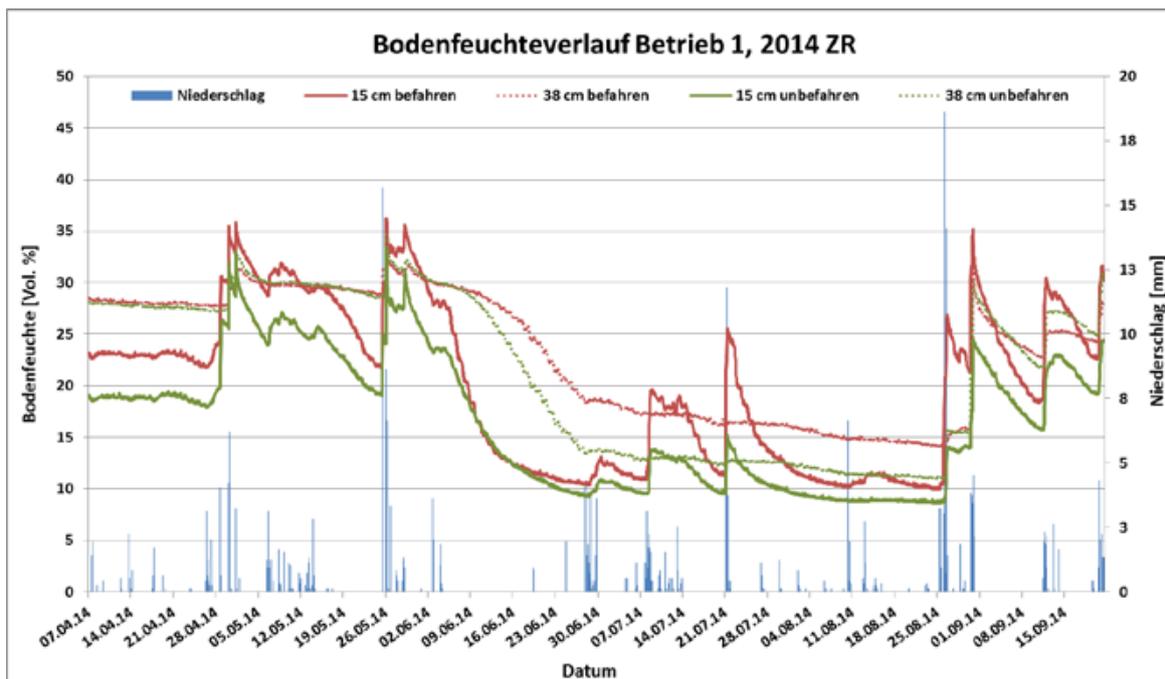


Abb. 19: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Zuckerrüben, 2014

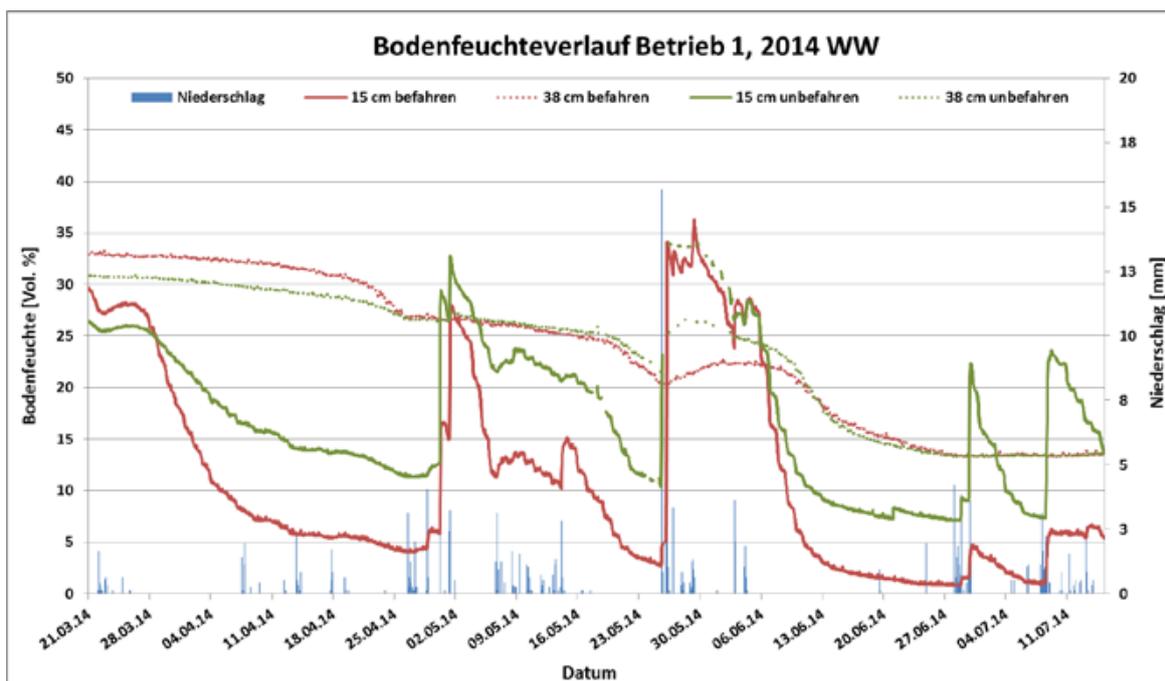


Abb. 20: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 1, Winterweizen, 2014

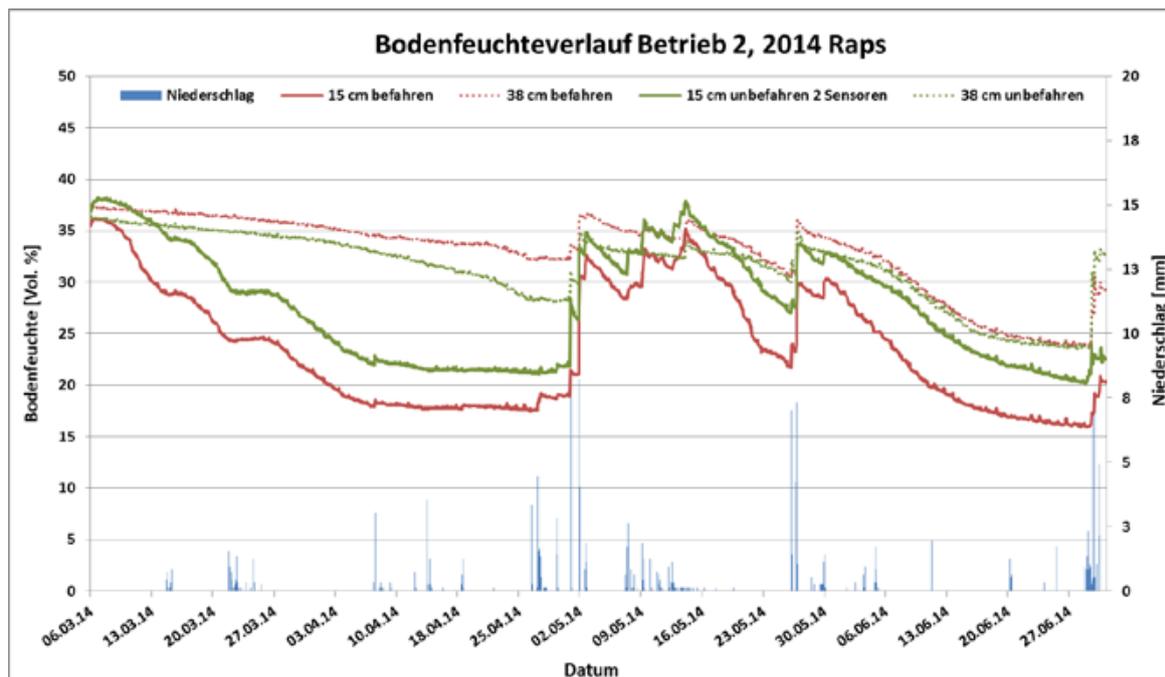


Abb. 21: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 2, Winterraps, 2014

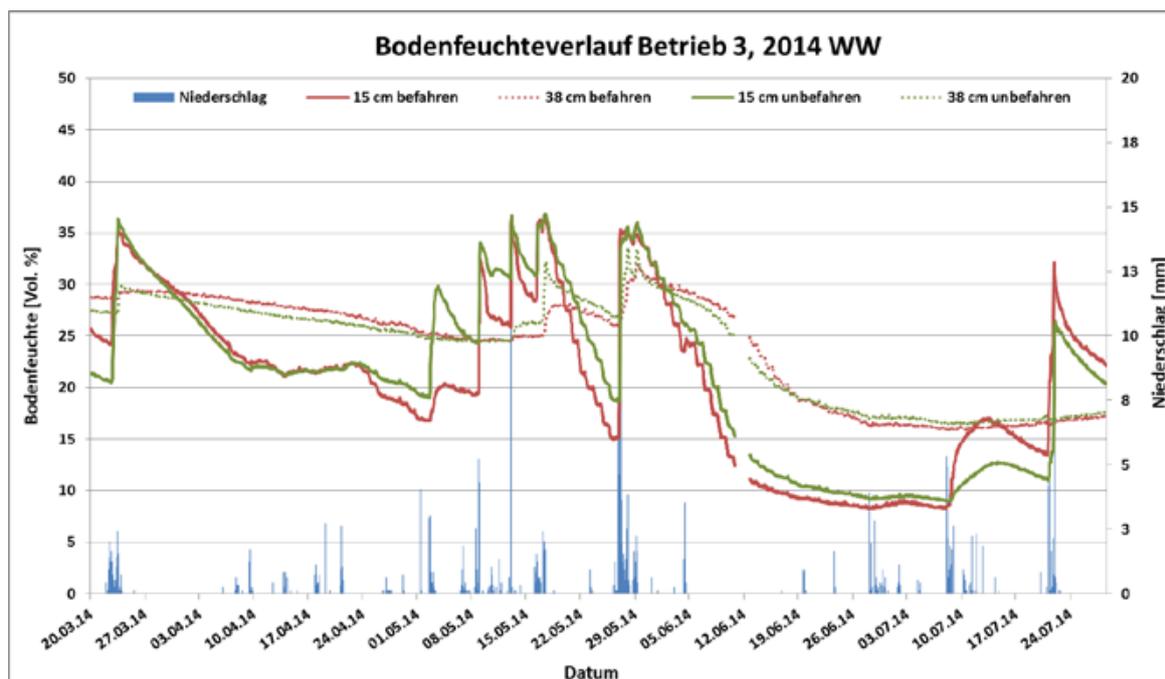


Abb. 22: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Winterweizen, 2014

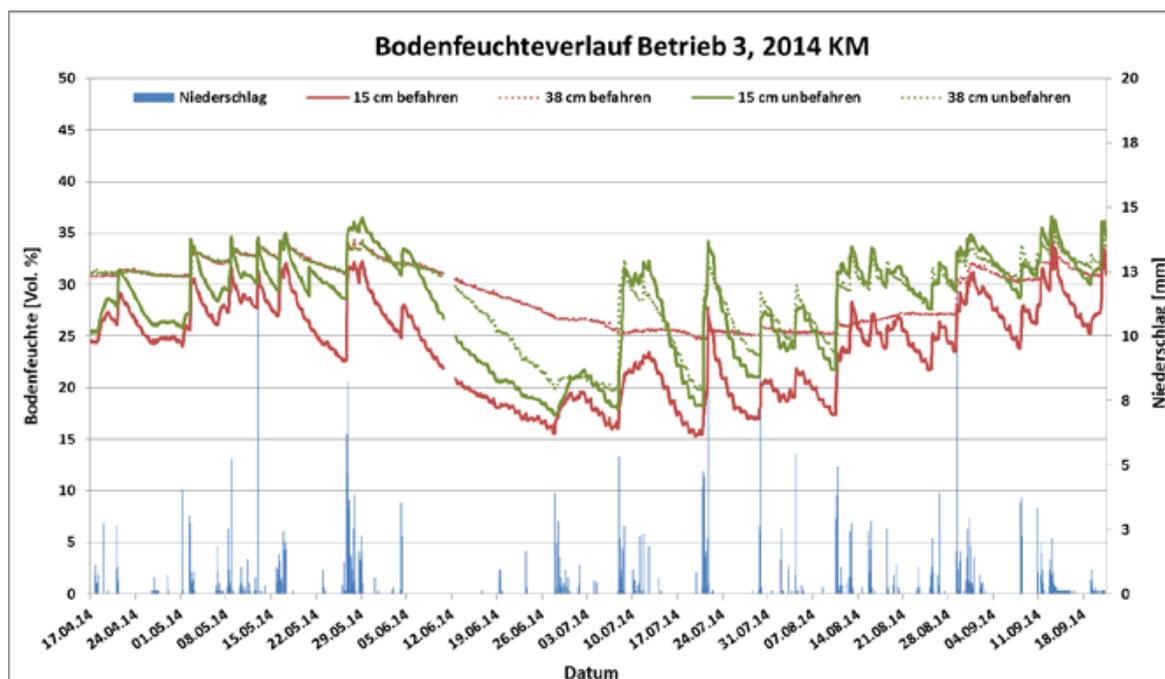


Abb. 23: Bodenfeuchteverlauf, Betrieb 3, Körnermais, 2014

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es im Jahr 2013 bei den kontinuierlich erhobenen Bodenfeuchtedaten keinen ausgeprägten Unterschied zwischen „befahren“ und „unbefahren“ gab. Im Jahr 2014 ist der unbefahrene Bereich in 15 cm Tiefe tendenziell etwas feuchter, in 38 cm Tiefe lassen sich dagegen keine Unterschiede feststellen.

5.2.2 Mobile Bodenfeuchtemessung mit einer TDR-Sonde

Zur Absicherung der Ergebnisse mit den kontinuierlich messenden FDR-Sensoren wurden zu bestimmten Zeiten weitere Bodenfeuchtedaten in der Krume erhoben, einmal mit einer mobilen TDR-Sonde (Tab. 6, Tab. 7), dann auch gravimetrisch (Stechzylinder) zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus.

Aufgrund des anderen Messverfahrens lassen sich die Messwerte der mobilen Feuchtemessung mit der TDR-Sonde nicht direkt mit der kontinuierlichen Messung mit FDR-Sonden vergleichen. Messmethode und auch der erfasste Bodenbereich unterscheiden sich. Bei der mobilen Messung mit der TDR-Sonde wird die Bodenfeuchte von der Bodenoberfläche bis zur Einstichtiefe (Nadellänge) integriert, wohingegen die im Boden eingebauten Sensoren die Feuchte entsprechend der Einbautiefe erfassen.

Ausnahme stellt der Sensoreinbau im Frühjahr 2013 dar. Hier wurden Kontrollmessungen auch im Bereich der FDR-Sensoren durchgeführt. Vergleicht man diese Messwerte (Tab. 6) mit denen aus der gravimetrischen Bestimmung (Tab. 8) fällt zunächst auf, dass das verwendete Messgerät bei Betrieb 1, Schlag 2 und bei Betrieb 2 zu hohe Werte anzeigte. Auf diesen Standorten führen höhere Tongehalte (ca. 25-35 %) zu einem zu hohen Messergebnis.

Ansonsten sind wie bei der gravimetrischen Bestimmung die Feuchtegehalte im unbefahrenen Bereich geringfügig niedriger als im befahrenen Bereich. Der größte Unterschied betrifft wieder Betrieb 3 in 15 cm. Hier ist der unbefahrene Bereich aufgrund der geringen Trockenrohddichte trockener.

Tab. 6: Mittlere (n=20) Bodenfeuchten zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus 2013, gemessen mit einem mobilen TDR-Messgerät (Nadellänge 7,5 cm)

2013		Betrieb 1, Schlag 1	Kultur: WW	Probennahme 23.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		27,2	25,3	33,3	32,0	-1,9	-1,3
TRD [g/cm ³]		1,50	1,49	1,60	1,51	-0,01	-0,09
		Betrieb 1, Schlag 2	Kultur: ZR	Probennahme 16.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		44,4	45,3	42,6	39,8	0,9	-2,8
TRD [g/cm ³]		1,37	1,42	1,51	1,59	0,05	0,08
		Betrieb 2, Schlag 1	Kultur: WW	Probennahme 21.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		43,5	35,0	56,1	52,7	-8,5	-3,4
TRD [g/cm ³]		1,60	1,33	1,72	1,70	-0,27	-0,02
		Betrieb 3, Schlag 1	Kultur: KM	Probennahme 28.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		36,8	35,5	38,1	37,1	-1,3	-1,0
TRD [g/cm ³]		1,71	1,55	1,56	1,59	-0,16	0,03
		Betrieb 3, Schlag 2	Kultur: WW	Probennahme 28.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		31,4	31,8	29,0	28,8	0,4	-0,2
TRD [g/cm ³]		1,63	1,53	1,71	1,66	-0,10	-0,05
		Mittelwert alle		16.-28.05.2013			
Variante:		15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:		36,7	34,6	39,8	38,1	-2,1	-1,7
TRD [g/cm ³]		1,56	1,46	1,62	1,61	-0,10	-0,01
Legende		Unbefahren ist:		feuchter	trockener		

Die größten Differenzen konnten bei der mobilen oberflächennahen Messung auf dem Zuckerrübenschlag festgestellt werden. Mit zunehmender Austrocknung war es am 09.07.13 nur noch schwer möglich, die Nadeln in den Boden einzustechen. Besonders ausgeprägt war dies jeweils im befahrenen Bereich.

Tab. 7: Mittlere (n=20) oberflächliche Bodenfeuchten zu verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit einem mobilen TDR-Messgerät

Betrieb 1, Schlag 1, Kultur WW							
Messung vom:	07.06.2013		09.07.2013		06.08.2013		Alle Messungen
Tiefe/Variante:	0-20cm befahren-	0-20cm unbefahren	0-20cm befahren	0-20cm unbefahren	0-12cm befahren	0-12cm unbefahren	Diff. unbef-bef
Feuchte Vol. %:	35,3	34,6	23,1	24,7	24,2	20,1	-1,1
Betrieb 1, Schlag 2, Kultur ZR							
Messung vom:	07.06.2013		09.07.2013		06.08.2013		Alle Messungen
Tiefe/Variante:	0-20cm befahren	0-20cm unbefahren	0-20cm befahren	0-20cm unbefahren	0-12cm befahren	0-12cm unbefahren	Diff. unbef-bef
Feuchte Vol. %:	47,1	39,5	36,7	27,6	26,4	22,1	-7,0
Betrieb 2, Schlag 1, Kultur WW							
Messung vom:	07.06.2013		09.07.2013				Alle Messungen
Tiefe/Variante:	0-20cm befahren	0-20cm unbefahren	0-7,5cm befahren	0-7,5cm unbefahren			Diff. unbef-bef
Feuchte Vol. %:	55,4	49,6	48,6	43,6			-5,4
Legende		Unbefahren ist:		feuchter	trockener		

Tab. 8: Gravimetrisch im Labor bestimmte Wassergehalte zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus 2013. Mittelwerte aus je sechs 100 cm³ Stechzylindern.

2013		Betrieb 1, Schlag 1	Kultur: WW	Probennahme 23.05.2013		
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	25,5	24,9	28,5	28,0	-0,7	-0,5
TRD [g/cm ³]	1,50	1,49	1,60	1,51	-0,01	-0,09
Bemerkungen:	Keine Unterschiede zwischen befahren/unbefahren (StAbw. max 1,5 Vol.%)					

		Betrieb 1, Schlag 2	Kultur: ZR	Probennahme 16.05.2013		
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	33,9	32,0	33,1	32,2	-1,9	-0,9
TRD [g/cm ³]	1,37	1,42	1,51	1,59	0,05	0,08
Bemerkungen:	Unbefahren 15 cm tendenziell geringfügig trockener (StAbw. max 1,6 Vol.%)					

		Betrieb 2, Schlag 1	Kultur: WW	Probennahme 21.05.2013		
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	31,3	27,2	30,9	29,0	-0,4	-1,8
TRD [g/cm ³]	1,60	1,33	1,72	1,70	-0,27	-0,02
Bemerkungen:	Unbefahren 15 cm etwas trockener (StAbw. max 1,9 Vol.%)					

		Betrieb 3, Schlag 1	Kultur: KM	Probennahme 28.05.2013		
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	31,3	34,1	31,7	31,8	2,8	0,1
TRD [g/cm ³]	1,71	1,55	1,56	1,59	-0,16	0,03
Bemerkungen:	Unbefahren 15 cm etwas feuchter (StAbw. max 1,4 Vol.%)					

		Betrieb 3, Schlag 2	Kultur: WW	Probennahme 28.05.2013		
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	32,0	29,8	28,8	29,0	-2,2	0,2
TRD [g/cm ³]	1,63	1,53	1,71	1,66	-0,10	-0,05
Bemerkungen:	Unbefahren geringfügig trockener (StAbw. max 1,3 Vol.%)					

		Mittelwert alle	16.-28.05.2013			
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	38 cm befahren	38 cm unbefahren	Diff.unbef-bef 15cm	Diff.unbef-bef 38 cm
Feuchte Vol. %:	30,8	29,6	30,6	30,0	-1,2	-0,6
TRD [g/cm ³]	1,56	1,46	1,62	1,61	-0,10	-0,01
Legende	Unbefahren ist:		feuchter	trockener		

Tab. 9: Gravimetrisch im Labor bestimmte Wassergehalte zum Zeitpunkt des Sensorein- und -ausbaus 2014. Mittelwerte aus je drei 250 cm³ Stechzylindern.

Sensoreinbau				Sensorausbau					
2014	Betrieb 1, Schlag 1	Kultur: WW	06.04.2014	07.10.2014					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	Diff. Unbef-bef 15cm	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	28,5	26,2	-2,2	28,2	26,2	28,0	28,0	-1,8	1,8
TRD [g/cm ³]	1,45	1,25	-0,20	1,41	1,32	1,65	1,51	-0,09	-0,14
StAbwa Vol. %	0,5	0,5		0,3	0,5	0,1	0,4		

Betrieb 1, Schlag 2				17.07.2014					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	11.03.2014	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	33,9	31,7	-2,2	25,2	21,4			-3,8	
TRD [g/cm ³]	1,40	1,48	0,07	1,55	1,46			-0,09	
StAbwa Vol. %	1,2	0,8		3,2	2,1				

Betrieb 2, Schlag 1				15.07.2014					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	06.03.2014	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	34,1	37,8	3,6	29,9	32,5			2,6	
TRD [g/cm ³]	1,34	1,46	0,12	1,36	1,45			0,09	
StAbwa Vol. %	1,5	0,4		1,1	1,8				

Betrieb 3, Schlag 1				29.07.2014					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	20.03.2014	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	27,9	26,0	-1,9	28,1	24,8			-3,3	
TRD [g/cm ³]	1,66	1,53	-0,13	1,69	1,54			-0,15	
StAbwa Vol. %	0,7	1,1		0,9	0,9				

Betrieb 3, Schlag 2				30.09.2014					
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren	17.04.2014	15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	25,9	26,2	0,2	29,1	28,7	26,8	28,3	-0,4	1,4
TRD [g/cm ³]	1,67	1,43	-0,24	1,62	1,52	1,74	1,65	-0,10	-0,08
StAbwa Vol. %	0,1	0,7		1,0	0,4	0,5	0,8		

Mittelwert Alle									
Variante:	15 cm befahren	15 cm unbefahren		15 cm befahren	15cm unbefahren	38 cm befahren	38cm unbefahren	Diff. unbef-bef 15cm	Diff.Unbef-bef 38cm
Feuchte Vol. %:	30,0	27,5	-1,5	28,1	25,3	26,5	28,2	-1,3	1,6
TRD [g/cm ³]	1,50	1,42	-0,12	1,53	1,46	1,69	1,58	-0,07	-0,11
StAbwa Vol. %	0,8	0,8		1,3	1,0	0,3	0,6		
Legende	Unbefahren ist:		Feuchter	trockener					

5.2.3 Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung

2013

Es zeigte sich, dass die Sensormesswerte vom Feld gut mit den Messwerten aus der gravimetrischen Bestimmung zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus übereinstimmen (Tab. 8). Lediglich bei Betrieb 2 kam es im unbefahrenen Bereich zu größeren Abweichungen. Hier war der Boden von der letzten Bearbeitung noch recht locker gelagert. Hohlräume, Steine und ein ungenügender Boden/Sensorkontakt führten hier vermutlich zu niedrigen Messwerten. Zum Zeitpunkt der Probennahme von Mitte bis Ende Mai war der Boden noch gut mit Wasser versorgt. Nur bei Betrieb 1 Schlag 1 (WW) war eine beginnende oberflächliche Austrocknung zu beobachten.

Wie auch bei den kontinuierlichen Sensormesswerten zeigen sich auch hier nur geringe Unterschiede zwischen befahren und unbefahren. Diese können z.T. auch durch die Heterogenität des Bodens und durch Messtoleranz erklärt werden. Teils ist der befahrene, teils der unbefahrene Bereich etwas feuchter. Die größte Abweichung betrifft Betrieb 2 und ist auf die geringe Trockenrohichte und damit einhergehende schnellere Austrocknung bzw. eine geringere Wasseraufnahmekapazität auf Grund eines erhöhten Grobporenvolumens zurückzuführen. Über alle Schläge hinweg ergibt sich so eine etwas geringere Feuchte im unbefahrenen Bereich. Wird der niedrige Wert von Betrieb 2 nicht berücksichtigt, kann kaum noch von einem Unterschied (unbefahren -0,4 Vol. %) gesprochen werden.

2014:

Die gravimetrischen Bestimmungen zum Zeitpunkt des Sensoreinbaus bzw. -ausbaus ergeben eine zum Jahr 2013 ähnliche, etwas geringere Feuchte im unbefahrenen Bereich (Tab. 14). Die auf 2 Schlägen gemessene Feuchte in 38 cm ist hingegen im unbefahrenen Bereich etwas höher.

Damit betätigen die zu einzelnen Terminen mit verschiedenen Methoden erhobenen Daten die Ergebnisse aus den kontinuierlichen Bodenfeuchtemessungen. Eindeutige und systematische Unterschiede in der Bodenfeuchte zwischen „befahren“ und „unbefahren“ sind nicht nachweisbar.

5.2.4 Bodenprofile, physikalische Kennwerte und Eindringwiderstand



Abb. 24: Bodenprofile und Probenentnahme auf Betrieb 2 im Herbst 2013. Im Rapsbestand zeichnet sich der befahrene Bereich vom unbefahrenen ab.

Betrieb 1, Schlag 1, Zwischenfrucht nach Winterweizen, 23.10.2013

Profilansprache:

Bei der Bodenprofilansprache zeigte sich eine sehr lockere Krume bis ca. 15 cm. Der Boden hatte hier eine krümelige Struktur und war von der Zwischenfrucht gut durchwurzelt. Darunter steigt die effektive Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe langsam an, ist aber bis ca. 25/28 cm noch recht niedrig. Erst im Bereich der alten Pflugsohle (35-38 cm) ist eine deutlich dichtere Lagerung erkennbar. Dies deckt sich auch mit den Penetrometermessungen aus 2011. Die Durchwurzlung und die Anzahl der Regenwurmröhren waren generell gut ausgeprägt, die Bodenstruktur zeigte keine Merkmale einer schädlichen Verdichtung. Im unbefahrenen Bereich präsentierte sich der Boden etwas weniger kompakt. Ab einer Tiefe von 60 cm konnten immer wieder Eisenkonkretionen beobachtet werden, was auf wechsellasse Bedingungen hindeutet.

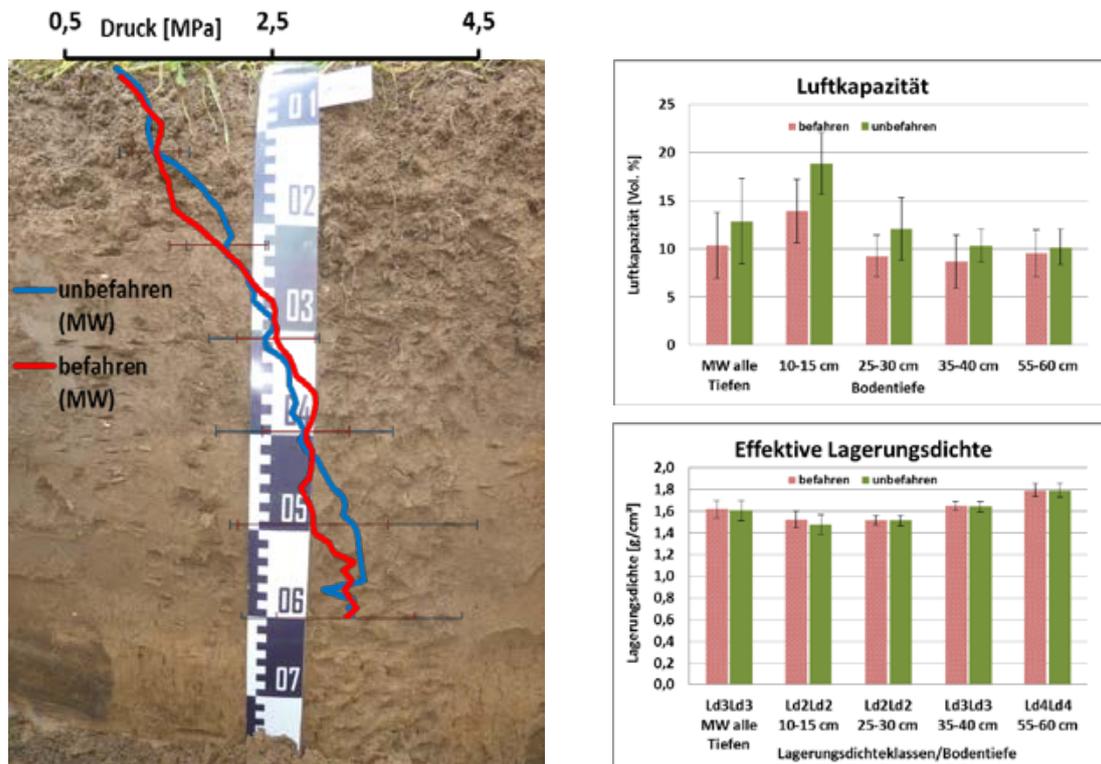


Abb. 25: Betrieb 1, Schlag 1; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren ($n=10$), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen ($n=36$)

Laborauswertung:

Die Analyse der Korngrößenverteilung ergab ein recht einheitliches Bild. Über alle Tiefen und Beprobungspunkte wurde ein schluffiger Lehm diagnostiziert. Am Standort konnten für die Bodenart typische Bodenkennwerte festgestellt werden. Gesamtporenvolumen und Feldkapazität sind hoch. Die im Labor bestimmte Trockenrohdichte und die daraus berechnete effektive Lagerungsdichte entsprechen den Beobachtungen am Profil. Die Luftkapazität (Anteil der schnell dränenden Grobporen am Gesamtbodenvolumen) ist im unbefahrenen Bereich in allen Tiefen höher als im befahrenen, am deutlichsten zeigt sich dies in der oberen Krume (10-15 cm). Die Luftkapazität ist der sensitivste Parameter für Bodenverdichtungen, eine mechanische Bodenbeanspruchung geht zuerst auf Kosten der leicht komprimierbaren schnell dränenden Grobporen.

Am Schlag 1 von Betrieb 1 konnte also im nicht mehr befahrenen Boden ein gegenüber dem befahrenen Boden höheres Grobporenvolumen (Luftkapazität) festgestellt werden, siehe Abb. 25, Tab. 10 und Abb. 26.

Tab. 10: Bodenphysikalische Kennwerte am Betrieb 1, Schlag 1.

Betrieb 1, S1	TRD	Ld _{eff.}	GPV	LK	FK	nFK	TW	PL
Tiefenstufe	g/cm ³	g/cm ³	Vol. %	cm/s				
befahren	1,48	1,53	43,6	10,4	33,2	20,4	12,8	12,2
10-15 cm	1,37	1,38	47,6	13,9	33,6	22,2	11,5	8,5
25-30 cm	1,53	1,54	41,8	9,3	32,5	20,0	12,5	13,2
35-40 cm	1,54	1,59	41,5	8,7	32,8	19,9	12,9	13,6
55-60 cm	1,49	1,61	43,6	9,5	34,1	19,3	14,8	13,6
unbefahren	1,46	1,50	44,5	12,9	31,7	19,8	11,8	12,2
10-15 cm	1,30	1,31	50,4	18,8	31,5	20,9	10,6	14,0
25-30 cm	1,47	1,49	43,8	12,0	31,8	19,7	12,1	11,9
35-40 cm	1,52	1,57	42,2	10,3	31,9	20,1	11,8	10,6
55-60 cm	1,55	1,64	41,7	10,2	31,5	18,6	12,9	12,1

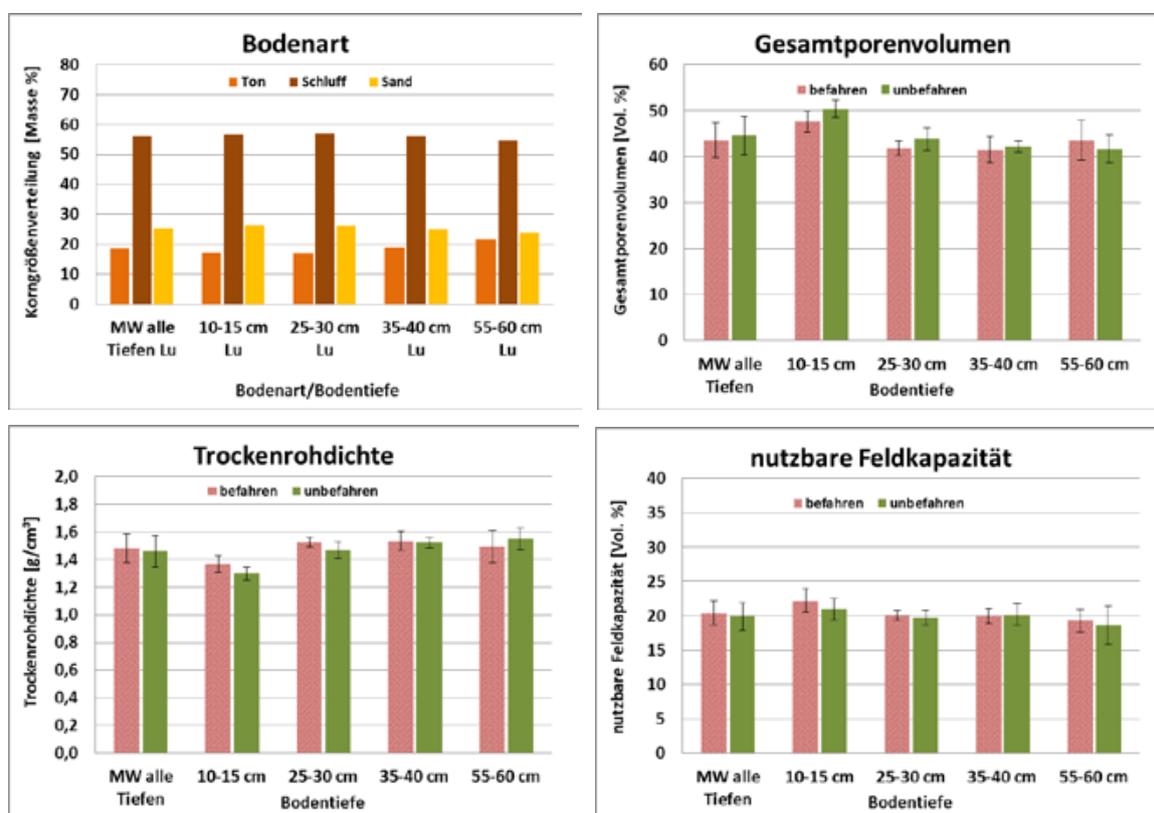


Abb. 26: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 1, Schlag 1

Betrieb 1, Schlag 2, Winterweizen nach Zuckerrüben, 02.04.2014

Profilsprache:

Bei der Bodenprofilansprache zeigte sich wiederum eine lockere Krume bis ca. 12 cm Tiefe. Wie bei Schlag 1 steigt die effektive Lagerungsdichte (LD) mit zunehmender Tiefe langsam an, ist aber bis ca. 20/25 cm noch recht niedrig. Die Bodenstruktur weist im Bereich von 12 bis ca. 20/25 cm Verdichtungsmerkmale auf. Auch hier ist im Bereich der alten Pflugsohle (35-38 cm) eine deutlich dichtere Lagerung erkennbar, welche in der Tiefe noch etwas zunimmt. Die weitere Profilbeschreibung ist aufgrund der räumlichen Nähe

ähnlich wie bei Schlag 1. Der Boden war gut durchwurzelt und es fanden sich viele große Regenwurmrohren des Tiefgräbers *Lumbricus terrestris*.

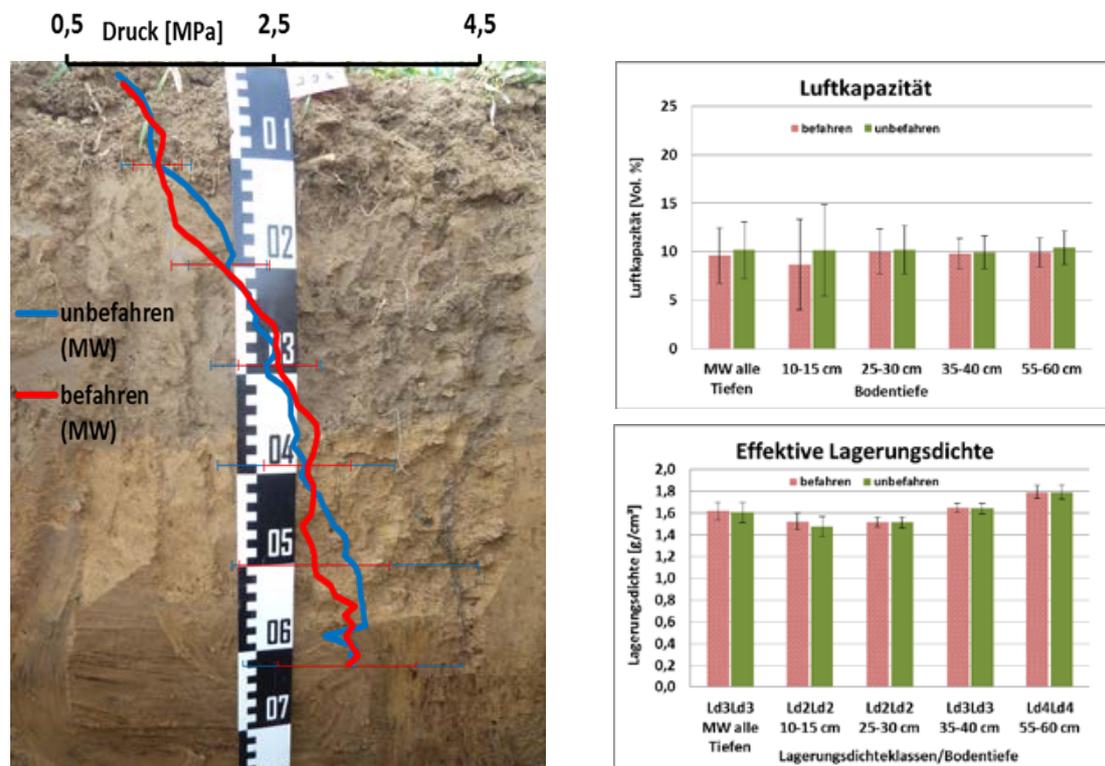


Abb. 27: Betrieb 1, Schlag 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren ($n=10$), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen ($n=36$)

Laborauswertung:

Auch hier ergab die Korngrößenanalyse die gleiche Bodenart über alle Tiefen hinweg. Es handelt sich wie bei Schlag 1 um einen schluffigen Lehm. Die bodenphysikalischen Kennwerte sind ähnlich wie bei Schlag 1 und können durch die räumliche Nähe und die gleiche Bewirtschaftung erklärt werden. Geringfügige Abweichung gibt es nur beim Verhältnis Sand/Ton. Der Tonanteil liegt hier auf Kosten des Sandanteils geringfügig höher. Dies hat zur Folge, dass sich das Totwasservolumen erhöht und damit die nFK reduziert. Auch das Gesamtporenvolumen fällt bei Schlag 2 etwas geringer aus als bei Schlag 1. Die im Labor bestimmte TRD und die daraus berechnete effektive Lagerungsdichte entsprechen in etwa den Beobachtungen am Profil. Die Luftkapazität unterscheidet sich zwischen befahren und unbefahren kaum, siehe Abb. 27, Tab. 11, Abb. 28.

Am Schlag 2 von Betrieb 1 waren die Bodenverhältnisse in den beiden Profilgruben sehr ähnlich. Als Ursache für die festgestellten Unterschiede muss die Zuckerrübenenernte im vorausgegangenen Herbst angesehen werden. Nahezu die komplette Fläche wurde bei der Rübenenernte überrollt. Die unbefahrenen Streifen sind sehr schmal, es ist davon auszugehen, dass auch der theoretisch unbefahrene Bereich mechanisch beansprucht wurde.

Tab. 11: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 1, Schlag 2.

Betrieb 1,S2	TRD	Ld _{eff.}	GPV	LK	FK	nFK	TW	PL
Tiefenstufe	g/cm ³	g/cm ³	Vol. %	cm/s				
befahren	1,54	1,62	41,3	9,6	31,7	15,2	16,6	17,5
10-15 cm	1,50	1,52	42,5	8,7	33,9	17,0	16,9	11,2
25-30 cm	1,48	1,52	43,0	10,0	33,0	16,7	16,3	23,3
35-40 cm	1,56	1,65	40,8	9,8	31,0	14,1	16,9	16,4
55-60 cm	1,62	1,79	39,0	9,9	29,1	12,8	16,3	19,0
unbefahren	1,52	1,61	41,9	10,1	31,7	15,4	16,3	11,7
10-15 cm	1,45	1,48	44,2	10,1	34,1	18,1	16,0	6,5
25-30 cm	1,48	1,51	43,2	10,2	33,0	16,3	16,7	10,0
35-40 cm	1,55	1,64	41,1	9,9	31,2	14,8	16,5	12,9
55-60 cm	1,62	1,79	39,0	10,4	28,6	12,4	16,1	17,4

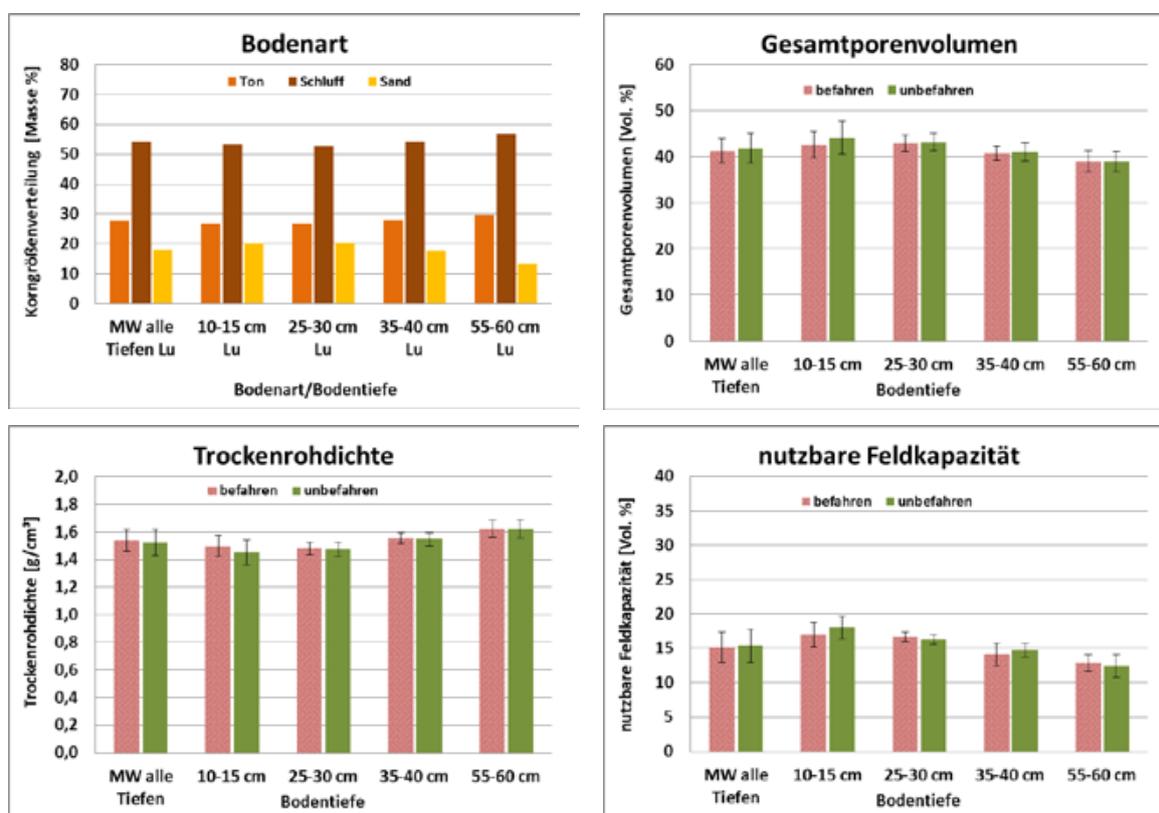


Abb. 28: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 1, Schlag 2

Betrieb 2, Raps nach Winterweizen, 01.10.2013

Profilansprache:

Es zeigte sich eine recht lockere Krume bis ca. 15-18 cm Tiefe mit einem Gefügemix aus Krümel- und Bröckelgefüge, wobei sich die Gefügestruktur im unbefahrenen Bereich etwas besser präsentierte (mehr Krümelgefüge). Bis ca. 20/25 cm ist der Boden noch recht locker gelagert und die Bodenstruktur gut. Darunter nimmt die Lagerungsdichte deutlich zu und auch das nun auftretende Polyedergefüge weist auf ungünstigere Bodenbedingungen hin. Insbesondere im Bereich von 25/28 cm bis ca. 38 cm Tiefe scheinen die Lagerungsdichte hoch und das Gefüge ungünstig zu sein. Es finden sich glatte Oberflächen mit

scharfen Kanten und Wurzeln, die sich zwischen den Polyedern ihren Weg suchen. In der untersten Tiefenstufe scheint die Bodenstruktur wieder etwas besser zu werden. Die Unterschiede zwischen befahren und unbefahren betreffen die Krume bis ca. 30 cm Tiefe.

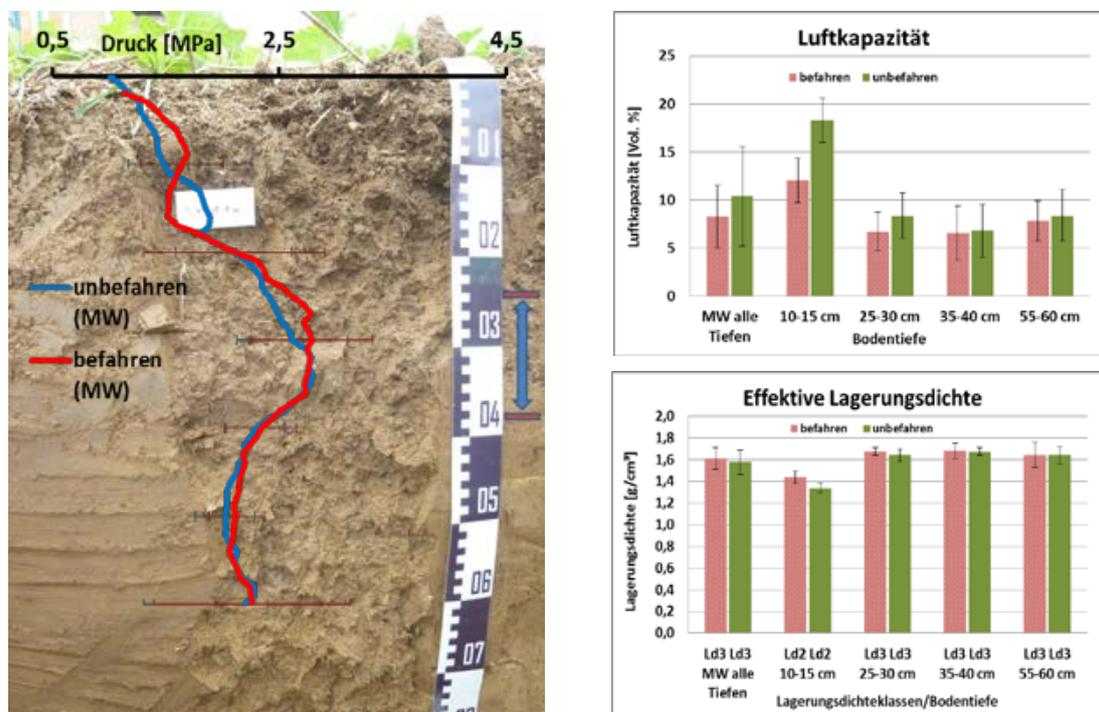


Abb. 29: Betrieb 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren ($n=10$), rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen ($n=36$)

Laborauswertung:

Die Korngrößenanalyse ergab für die Bodenart einen schluffigen Lehm, welcher in der Tiefe zum mittel schluffigen Ton übergeht. Betrachtet man die Kennwerte in Hinblick auf Unterschiede zwischen befahren und unbefahren, so können in der Tiefenstufe 10-15 recht ausgeprägte Unterschiede festgestellt werden. Im unbefahrenen Boden die Lagerungsdichte niedriger und das Gesamtporenvolumen sowie die Luftkapazität sind höher als im befahrenen Bereich. Abgeschwächt lässt sich diese Tendenz auch in 25-30 cm feststellen. Besonders groß ist der Unterschied bei der Luftleitfähigkeit. Sie ist in der 1. Tiefenstufe im unbefahrenen Bereich etwa dreimal höher als im befahrenen. Auffällig ist auch die starke Abnahme von Luftleitfähigkeit (1/5) und Luftkapazität in der Tiefe von 25-30 cm. Die Trockenrohdichte erreicht hier ihren höchsten Wert und nimmt mit der Tiefe wieder langsam ab. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei der Profilansprache und bei der Penetrometermessung gemacht, siehe jeweils Abb. 29, Tab. 12, Abb. 30.

Am Betrieb 2 unterschieden sich die befahrenen und unbefahrenen Böden deutlich. Der unbefahrene Boden ist bis in 30 cm Tiefe mit mehr schnell dränenden Grobporen ausgestattet.

Tab. 12: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 2, Schlag 1.

Betrieb 2,S1	TRD	Ld _{eff}	GPV	LK	FK	nFK	TW	PL
Tiefenstufe	g/cm ³	g/cm ³	Vol. %	cm/s				
befahren	1,49	1,61	43,4	8,3	35,1	15,9	19,2	8,6
10-15 cm	1,38	1,44	46,7	12,0	34,7	19,7	15,0	9,4
25-30 cm	1,60	1,68	39,1	6,7	32,4	15,6	16,8	5,4
35-40 cm	1,53	1,68	42,1	6,6	35,6	12,4	23,2	8,6
55-60 cm	1,45	1,64	45,5	7,8	37,7	15,7	22,0	11,2
unbefahren	1,46	1,58	44,8	10,4	34,4	16,4	18,0	12,1
10-15 cm	1,28	1,34	50,7	18,3	32,4	18,4	14,0	31,3
25-30 cm	1,56	1,64	40,6	8,4	32,2	16,1	16,2	4,5
35-40 cm	1,53	1,67	42,3	6,8	35,5	14,7	20,8	4,5
55-60 cm	1,45	1,64	45,7	8,4	37,3	16,3	20,9	8,8

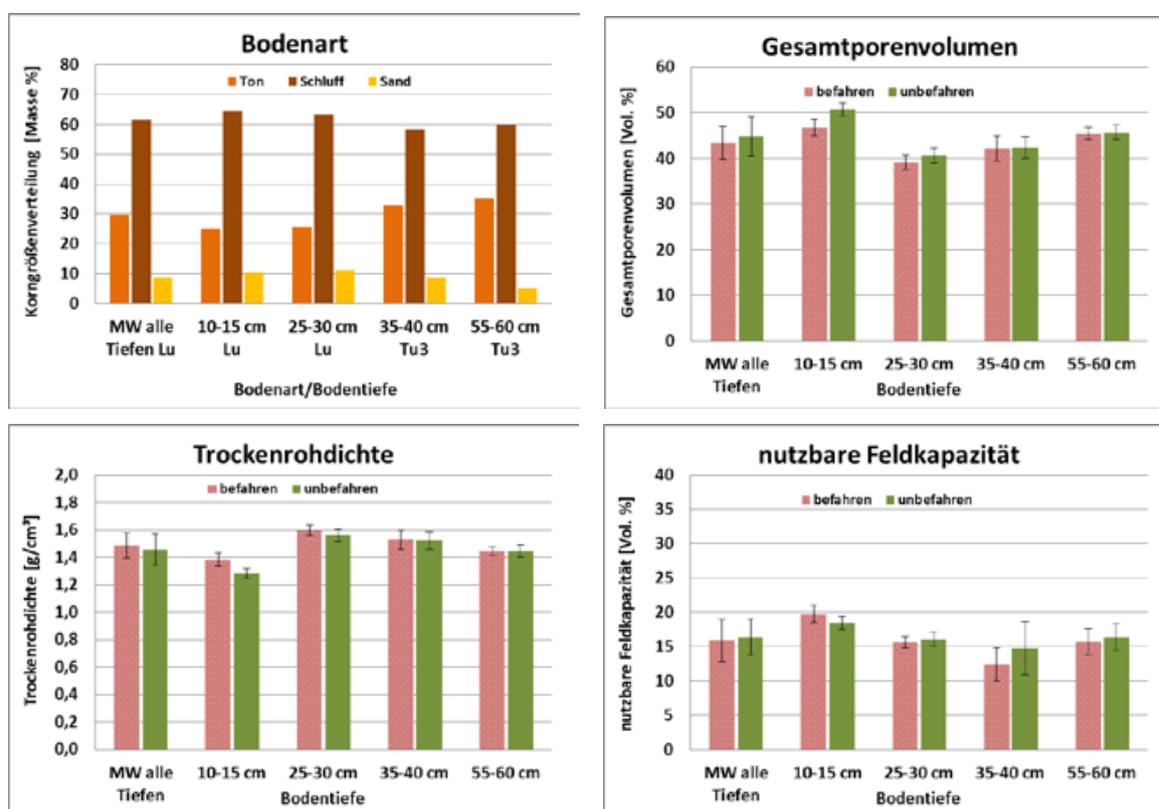


Abb. 30: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 2, Schlag 1

Betrieb 3, Schlag 1, Körnermais, 11.09.2013

Profilsprache:

Der Boden ist sandig. Die obersten 30 cm sind vom Humus braun gefärbt, die Krume setzt sich farblich deutlich vom gelborange gefärbten Unterboden ab. Lediglich vertikale Regenwurmrohren sind dort braun eingefärbt und oft von Wurzeln ausgekleidet. In der Tiefe wurden wechselnde Lagen aus Eisenoxid beobachtet. Bei der Probennahme der Stechzylinder konnte festgestellt werden, dass im befahrenen Bereich der obersten beiden Tiefenstufen mehr Schläge nötig waren, um die Stahlringe einzuschlagen, ein deutlicher Hinweis

auf die sehr kompakte Lagerung. Die alte Pflugsohle dürfte nach den Penetrometermessungen bei ca. 36 cm ihre stärkste Ausprägung haben.

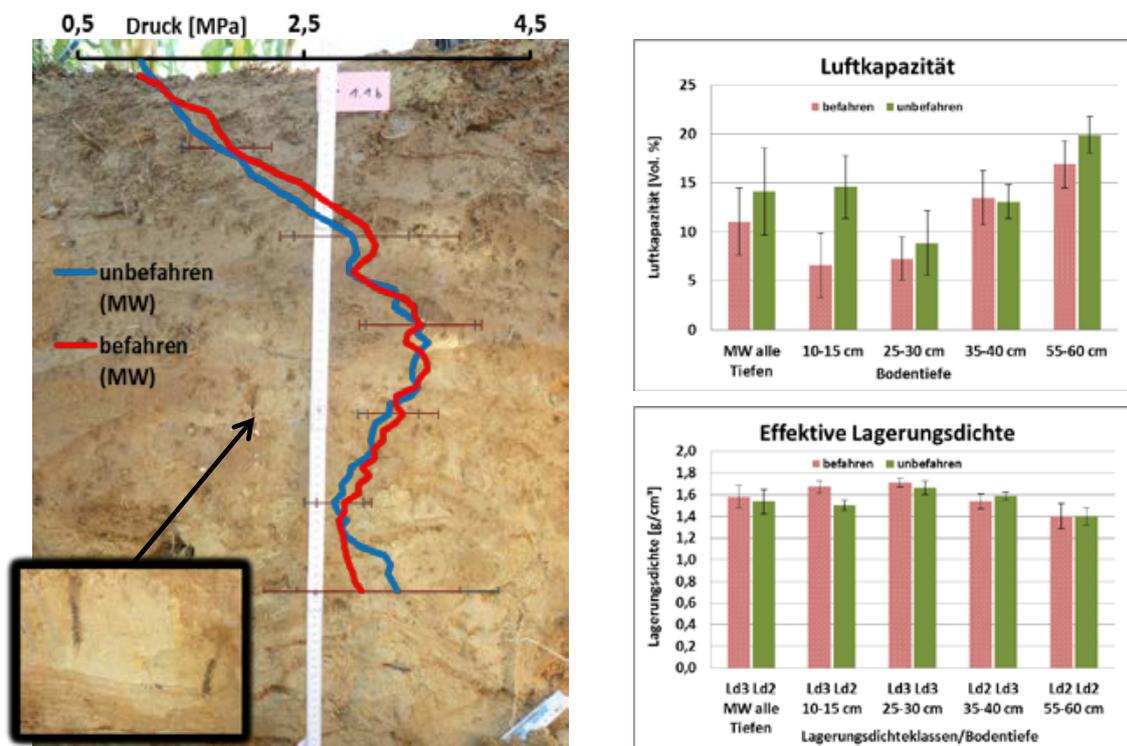


Abb. 31: Betrieb 3, Schlag 1; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren ($n=10$), Kleines Bild: Mit Wurzeln und Humus ausgekleidete Regenwurmrohren, rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen ($n=36$)

Laborauswertung:

Die Bodenartbestimmung im Labor ergab einen stark lehmigen Sand mit einem Sandanteil von ca. 60 %, welcher mit zunehmender Tiefe auf über 80 % ansteigt (schwach toniger Sand in der letzten Tiefenstufe). In 70-80 cm Tiefe findet sich reiner Sand.

Auffällig sind die hohen Trockenrohdichten im Oberboden. In 25-30 cm werden die höchsten Werte erreicht. In 10-15 cm finden sich im befahrenen Bereich höhere Trockenrohdichten als im unbefahrenen.

Auch bei der Luftkapazität und dem Gesamtporenvolumen sind die Unterschiede deutlich. Bis ca. 30 cm Tiefe verweisen die Werte auf eine bessere Bodenstruktur im unbefahrenen Boden, siehe jeweils Abb. 31, Tab. 13, Abb. 32.

Der Sandboden am Schlag 1 von Betrieb 3 differenziert besonders deutlich zwischen befahren und unbefahren.

Tab. 13: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 3, Schlag 1.

Betrieb 3, S1	TRD	Ld _{eff.}	GPV	LK	FK	nFK	TW	PL
Tiefenstufe	g/cm ³	g/cm ³	Vol. %	cm/s				
befahren	1,55	1,58	41,0	11,1	29,9	17,9	12,0	3,1
10-15 cm	1,67	1,67	36,1	6,6	29,5	15,1	14,4	1,0
25-30 cm	1,69	1,71	35,6	7,3	28,3	14,5	13,9	3,3
35-40 cm	1,49	1,54	43,8	13,5	30,3	18,9	11,4	3,8
55-60 cm	1,37	1,40	48,5	16,9	31,6	23,3	8,3	4,5
unbefahren	1,51	1,54	42,7	14,1	28,6	17,8	10,9	5,1
10-15 cm	1,50	1,50	42,7	14,6	28,1	15,5	12,7	11,4
25-30 cm	1,64	1,66	37,6	8,9	28,8	16,2	12,5	2,9
35-40 cm	1,54	1,59	42,0	13,1	28,9	18,5	10,5	3,5
55-60 cm	1,37	1,40	48,5	19,9	28,6	20,8	7,7	2,5

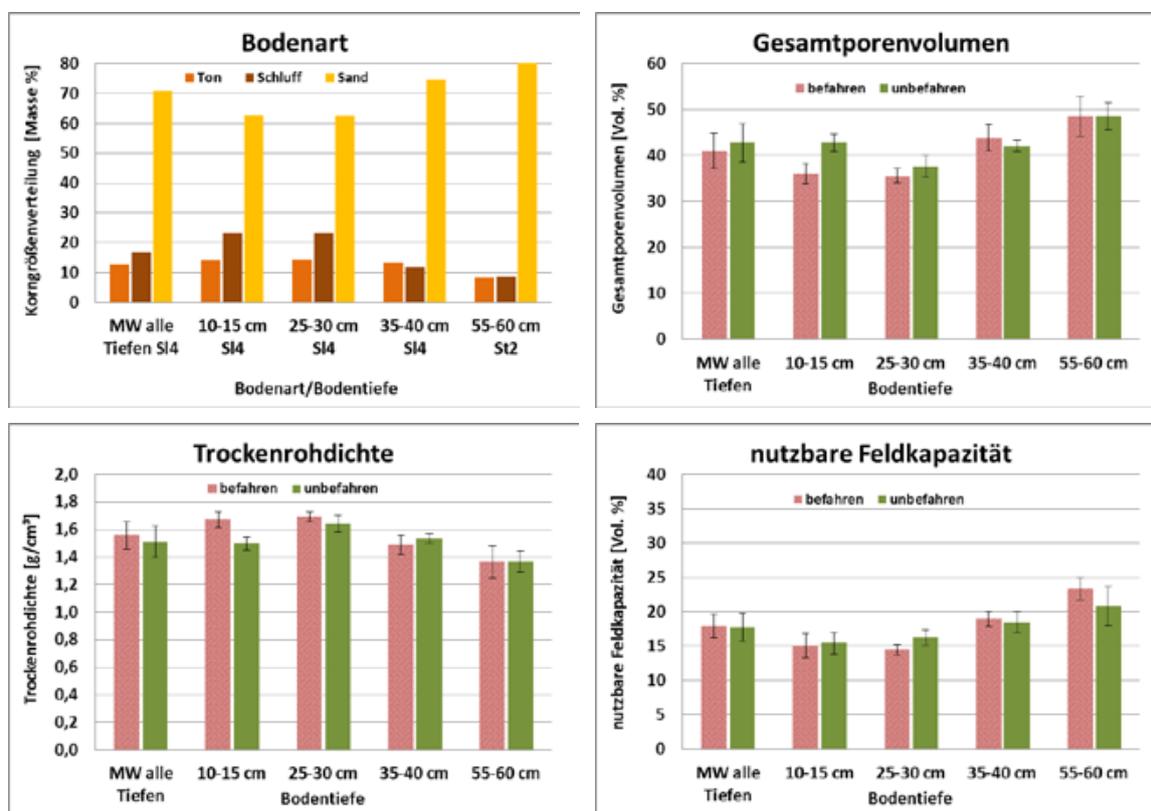


Abb. 32: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 3, Schlag 1

Betrieb 3, Schlag 2, Winterweizenstoppel, 10.09.2013

Profilansprache:

Im Profil zeigte sich eine lockere Krume bis ca. 15 cm. Der Wechsel von humoser Krume zum Unterboden ist in ca. 30/33 cm farblich gut zu erkennen. Wie bei Schlag 1 ließen sich auch hier die Stechzylinder der ersten beiden Tiefenstufen im befahrenen Bereich schwerer einschlagen. Im Vergleich zu Schlag 1 ist dieser Schlag 2 etwas weniger sandig mit deshalb etwas günstigerer Bodenstruktur. Der Boden ist von vielen vertikalen Regenwurm röhren durchzogen.

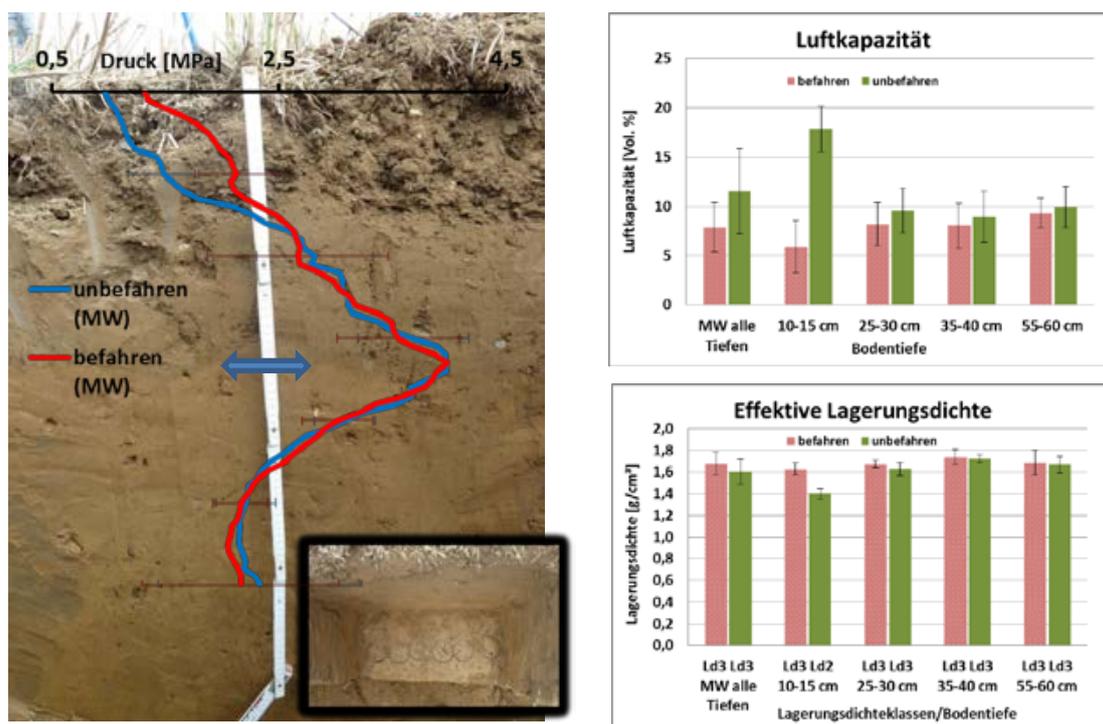


Abb. 33: Betrieb 3, Schlag 2; links: Bodenprofil im unbefahrenem Bereich mit Abbildung der gemessenen Eindringwiderstände für befahren und unbefahren ($n=10$), Kleines Bild: Aushub für Stechzylinderentnahme mit vertikalen Regenwurmröhren, rechts: Luftkapazität und effektive Lagerungsdichte der beprobten Tiefenstufen ($n=36$)

Laborauswertung:

Die Korngrößenzusammensetzung ist am Standort über alle Tiefen hinweg recht einheitlich, Bodenart ist ein stark lehmiger Sand. Die Differenz des Anteils schnell dränender Grobporen (Luftkapazität) zwischen unbefahren und befahren ist hier in der oberen Krume am größten von allen untersuchten Standorten (17,8 % gegenüber 5,9 %) beim Gesamtporenvolumen und bei der Lagerungsdichte sind die Unterschiede markant. Die Laborergebnisse werden auch durch die Penetrometermessungen bestätigt. Für Sandböden typisch ist der Peak im Übergang vom alten Pflughorizont zum Unterboden („Pflugsohle“) stark ausgeprägt, siehe jeweils Abb. 33, Tab. 14 und Abb. 34.

Der Sandboden am Schlag 2 von Betrieb 3 differenziert noch deutlicher zwischen befahren und unbefahren als Schlag 1.

Tab. 14: Bodenphysikalische Kennwerte des Betriebs 3, Schlag 2.

Betrieb 3, S2	TRD	Ld _{eff}	GPV	LK	FK	nFK	TW	PL
Tiefenstufe	g/cm ³	g/cm ³	Vol. %	cm/s				
befahren	1,65	1,68	37,4	7,8	29,6	16,3	13,3	4,4
10-15 cm	1,64	1,63	37,5	5,9	31,6	19,0	12,6	1,6
25-30 cm	1,67	1,67	36,9	8,2	28,7	17,0	11,7	2,6
35-40 cm	1,70	1,74	36,0	8,0	27,9	14,9	13,0	2,8
55-60 cm	1,61	1,69	39,4	9,3	30,1	14,2	15,9	10,9
unbefahren	1,58	1,60	40,3	11,5	28,7	16,0	12,7	7,6
10-15 cm	1,42	1,40	46,0	17,8	28,2	17,4	10,8	9,7
25-30 cm	1,62	1,63	38,4	9,5	28,9	16,7	12,2	5,0
35-40 cm	1,68	1,72	36,5	9,0	27,6	15,1	12,5	4,4
55-60 cm	1,59	1,67	40,2	9,9	30,3	14,9	15,4	11,4

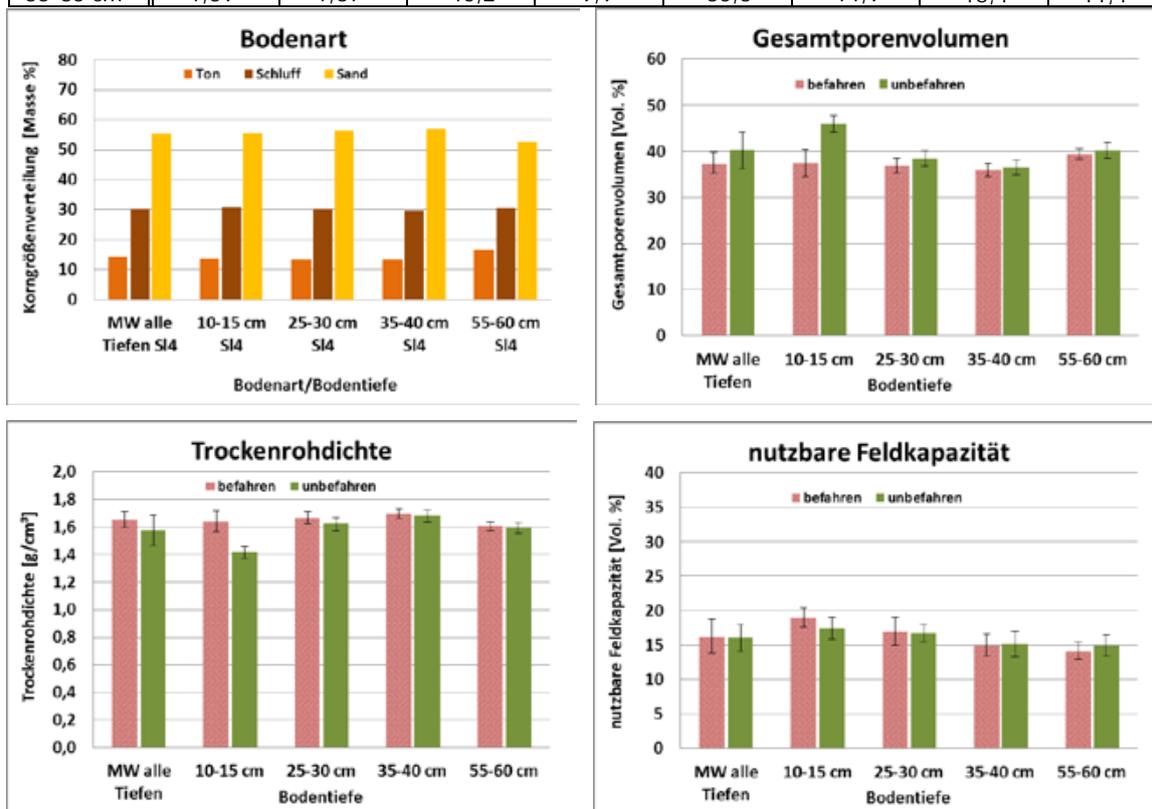


Abb. 34: Bodenphysikalische Parameter am Betrieb 3, Schlag 2

5.2.5 Infiltrationsmessungen im Feld

Die Infiltrationsraten wurden im April 2014 (Winterweizen) mit der Doppelringmethode im instationären Fluss gemessen. Wie zu erwarten, streuten die Einzelmessungen stark. Aus sieben Wiederholungen lassen sich aber Tendenzen erkennen (Abb. 35).

Betrieb 3, Schlag 1, Winterweizen nach Körnermais

Im Schnitt ist der Wasserspiegel in den ersten 2,5 Minuten im befahrenen Bereich um 5,6 cm und im unbefahrenen Bereich um 8,8 cm gefallen. Auf einen m² gerechnet ergibt das eine Infiltration von 55,6 und 88,3 Litern/m².

Zum Ende der Messung sinkt die Infiltrationsrate ab. Je m² infiltrieren innerhalb von 2,5 min noch 28,9 Liter im befahrenen und 61,9 Liter im unbefahrenen Bereich. Im unbefahrenen Bereich kann pro Zeiteinheit also doppelt so viel Wasser infiltrieren. Die Ergebnisse der Infiltrationsmessungen spiegeln also die Daten zur Lagerungsdichte und Porenverteilung aus den Bodenprofilen wider.

Betrieb 1, Schlag 2, Winterweizen nach Zuckerrüben

Das Niveau der Infiltrationsrate liegt in dem stark aggregierten Lehmboden wesentlich höher als im wenig aggregierten lehmigen Sandboden. Die Infiltrationsrate zeigt keine Differenzierung zwischen unbefahren und befahren. Wie bei der Darstellung der Ergebnisse der Bodenprofilanalysen bereits erläutert, wurde im Vorjahr bei der Rübenernte nahezu die komplette Fläche überrollt. Die unbefahrenen Streifen sind sehr schmal, es ist davon auszugehen, dass auch der theoretisch unbefahrene Bereich mechanisch beansprucht wurde.

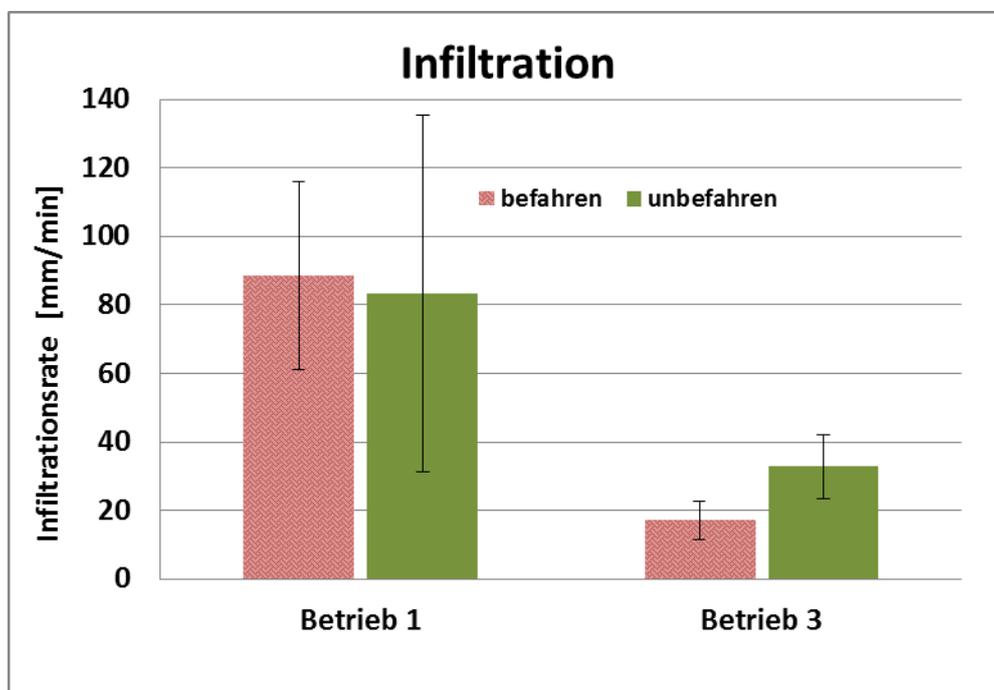


Abb. 35: Mittlere Infiltrationsraten mit Standardabweichung unter Winterweizen, April 2014

5.3 Erträge

Erfasst und ausgewertet wurden die Erträge von Winterweizen (5 Jahre, 3 Betriebe), Winterroggen (1 Jahr, 1 Betrieb) und Körnermais (5 Jahre, 1 Betrieb). Aus methodischen Gründen konnten die Erträge von Wintermais und von Zuckerrüben nicht exakt gemessen werden. Eine exakte statistische Auswertung der Erträge von Weizen und Körnermais ist im On-Farm-Research-Ansatz nicht möglich.

5.3.1 Winterweizen

Die Betriebe erzeugen Qualitätsweizen (E-Weizen), das Ertragsniveau von +/- 80 dt/ha liegt damit im üblichen Bereich.

Der Vergleich zwischen befahren und unbefahren ergibt für Winterweizen, gemittelt über alle Jahre und Betriebe, exakt identische Erträge (Abb. 36).

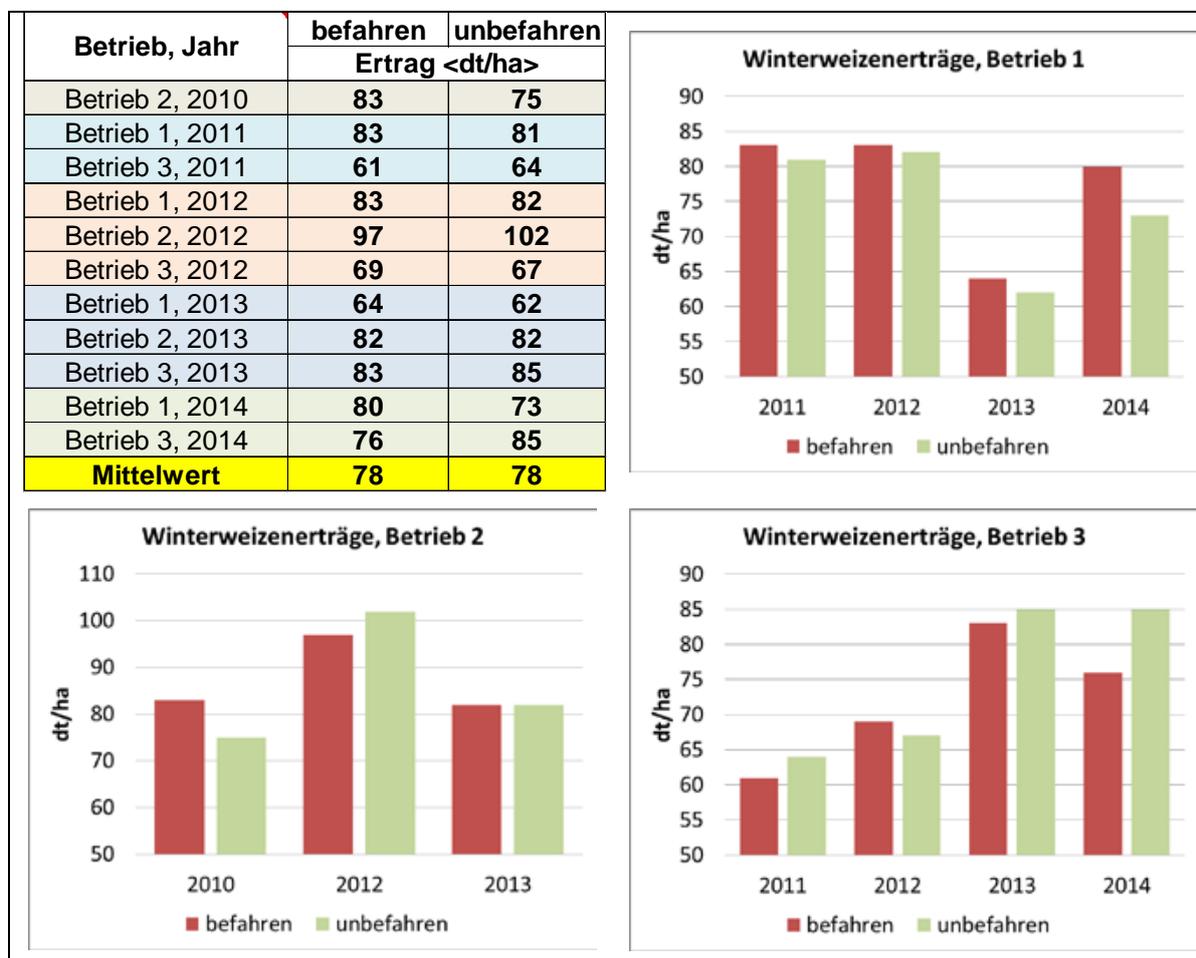


Abb. 36: Winterweizenerträge, befahren - unbefahren

Bei Betrachtung der Erträge der einzelnen Betriebe ergeben sich aber gewisse Differenzierungen. Bei Betrieb 1 zeigt sich ein Trend zu etwas niedrigeren Erträgen im unbefahrenen Boden, bei Betrieb 3 sind die Erträge dort eher höher (mit Ausnahme von 2012), bei Betrieb 2 ist kein Trend erkennbar. Möglicherweise profitiert der sandige Boden von Betrieb 3 stärker von der verbesserten Bodenstruktur im unbefahrenen Bereich als die aggregierten Lössböden von Betrieb 1 und 2. Lehmige Sande neigen stärker zur Verdichtung, wie die bodenphysikalischen Messergebnisse zeigten (Abb. 31, Abb. 33).

Winterweizen gilt grundsätzlich als relativ unempfindlich gegenüber ungünstiger Bodenstruktur in der Krume. Die Wurzelentwicklung beginnt bereits im Herbst, das Wurzelsystem erschließt schnell auch tiefere Bodenbereiche. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen dies.

5.3.2 Winterroggen

Betrieb 1 baute im Jahr 2010 Winterroggen an. Im befahrenen Bereich wurden 49 dt/ha gemessen, im unbefahrenen 72 dt/ha. Das Ergebnis eines einzelnen Jahres darf nicht überbewertet werden. Roggen gilt jedoch - anders als Weizen - als eine Kultur, die auf ungünstige Bodenstruktur in der Krume empfindlich reagiert. Roggen entfaltet seine Wurzelmasse gegenüber Weizen stärker im oberen Bodenbereich, weist auch eine stärkere Feinverzweigung auf und entwickelt sich weniger intensiv in die Tiefe (Kutschera, 1960). Insofern passt das einjährige Ergebnis zum vorhandenen Wissen.

5.3.3 Körnermais

Eindeutig sind die Ertragsunterschiede beim Körnermais auf dem Standort von Betrieb 3 (Abb. 37). In jedem Jahr werden auf unbefahrenem Boden deutlich höhere Erträge erzielt, im Mittel liegt die Differenz zwischen unbefahren und befahren bei 17 dt/ha (19 % Mehrertrag bei unbefahren).

Weil bei Betrieb 3 etwa 30 % der Fläche befahren werden, liegt der theoretische Mehrertrag des realisierten angepassten Regelspurverfahrens um ca. 14 % über der üblichen Befahrungsweise, wenn man die Erträge von „befahren“ auf die ganze Feldfläche projiziert.

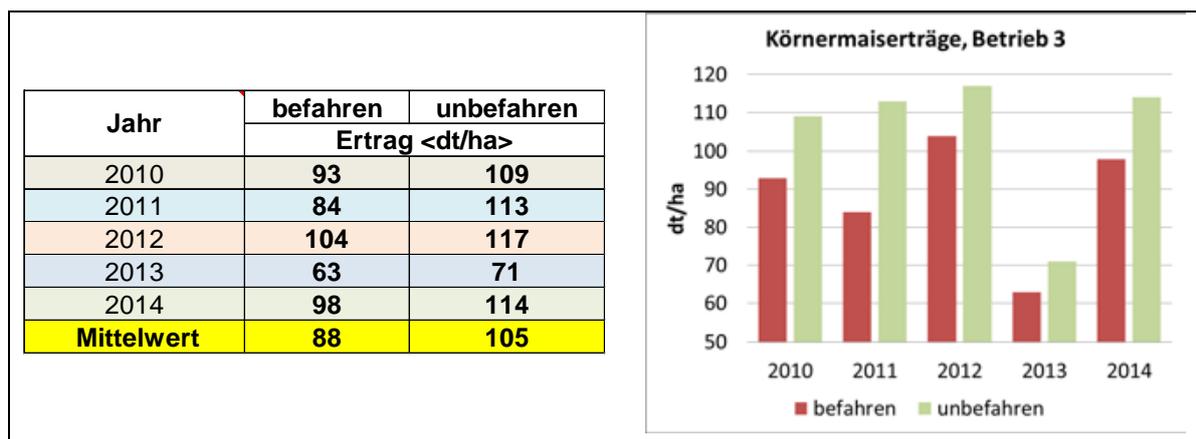


Abb. 37: Körnermaiserträge, befahren – unbefahren, Betrieb 3

Die Empfindlichkeit von Mais gegenüber Bodenverdichtung und stauender Nässe ist bekannt. In Jahren mit nasser Frühjahrswitterung und Beeinträchtigungen des Bodengefüges aus dem Vorjahr zeichnen sich Areale mit geschädigter Bodenstruktur deutlich im Bestand ab.

Entsprechend profitiert der Körnermais gerade am Standort von Betrieb 3 vom Wegfall der mechanischen Belastung durch Befahren der Böden, insbesondere bei der Gülleausbringung im Frühjahr und dann bei der Maissaat mit Überrollen von 2 Maisreihen durch den Traktor. Der lehmige Sand am Standort von Betrieb 3 zeigte im Vergleich zu den Lössstandorten von Betrieb 1 und 2 besonders stark ausgeprägte Merkmale von Bodenverdichtung (Abb. 31, Abb. 33).

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Ein an die Straßenverkehrsordnung angepasstes Regelspurverfahren kann auf Betrieben umgesetzt werden, die pfluglos arbeiten, keine Zuckerrüben bzw. Kartoffeln in der Fruchtfolge haben und bereit sind, alle Arbeitsgänge in das CTF-System zu integrieren, d.h. die Arbeitsbreiten aufeinander abzustimmen und konsequent mit hochpräziser Spurführung zu arbeiten. Vom Betriebsleiter erfordert dies eine hohe Motivation, diesen Weg zu gehen und ihn bei eigenen und für Lohnunternehmen tätigen Fahrern durchzusetzen.

Die Vorteile einer intakten Bodenstruktur zeigten sich im Projekt auf den unbefahrenen Flächenanteilen mit höheren Körnermaiserträgen und einem Potenzial an besserem Wasseraufnahmevermögen und höherem Erosionsschutz. Vergleichbare Ergebnisse erzielten die Forschungsgruppen in Schweden (Arvidsson et al., 2014) und in der Schweiz (Holpp, 2012). Das Regelspurverfahren sichert also besonders in hängigen Lagen im unbefahrenen Bereich die Bodenfruchtbarkeit und sorgt in summa für ein höheres Ausschöpfen des Ertragspotenzials bei Mais oder anderen verdichtungsempfindlichen Kulturen. Aus den Projektergebnissen kann nicht exakt abgeleitet werden, in welchem Ausmaß die Maiserträge auf weniger verdichtungsempfindlichen Standorten auf eine bessere Bodenstruktur reagieren und ob auf stark verdichtungsempfindlichen Böden nicht auch bei Weizen Ertragsmehrunge möglich wären.

Das Wasserangebot im Boden unterschied sich auf den Projektbetrieben trotz höherem Anteil an schnell dränenden Grobporen und höherer Infiltrationsrate nicht oder nur geringfügig. Offensichtlich konnte der Niederschlag bei geringer Hangneigung auch in die dichter lagernden Böden einsickern. Die Ertragsvorteile bei Mais waren also nicht einer besseren Wasserversorgung geschuldet, sondern einer besseren Bodenstruktur in der Krume (Durchwurzelung, Sauerstoffversorgung, Nährstoffmineralisierung).

Außergewöhnliche Starkregen und auch extreme Trockenperioden wie im Jahr 2015 traten während des Untersuchungszeitraums nicht auf. Für dieses Szenario können keine gesicherten Aussagen gemacht werden.

Eine noch bessere Ausnutzung des Ertragspotenzials und auch des Erosionsschutzniveaus würde erreicht, wenn der unbefahrene Flächenanteil auf die gesamte Produktionsfläche ausgedehnt werden könnte und der Fahrverkehr auf Fahrgassen konzentriert würde. Auf voll arrondierten Betrieben mit weitgehender Eigenmechanisierung und hohem Anteil an verdichtungsempfindlicher Kulturen in der Fruchtfolge (Mais, Körnerleguminosen, Wintergerste, Roggen) wäre CTF klassisch mit Spurerweiterung der Traktor ein attraktives Ziel. Für alle anderen Betriebe ist dieser Weg nicht möglich.

Dem angepassten Regelspurverfahren haftet das Manko an, dass etwa ein Drittel der Produktionsfläche weiterhin überrollt wird, mit dort regelmäßiger und flächendeckender mechanischer Belastung. Dieser Flächenanteil muss zwingend bodenschonend befahren werden (DLG, 2008; aid, 2015), um nachteilige Verdichtungen zu vermeiden, die dann die Vorteile des Systems mindern würden.

Als Alternative zur anspruchsvollen Umsetzung eines angepassten konsequenten Regelspurverfahrens bietet sich an, die Technologie der automatischen Spurführung so zu nutzen, dass zumindest minimale Fahrspurlängen realisiert und Überlappungen vermieden werden. Dazu müssen nicht zwingend alle Arbeitsgänge auf denselben Fahrspuren verlaufen. Die Kombination von bodenschonendem Befahren + Spurführung + Bewirtschaften des Feldes in Beeten (keine Wendevorgänge im Vorgewende) ist für bayerische Verhält-

nisse kurzfristig zukunftsweisend und sollte durch weitere Forschung und Beratung unterstützt werden.

Die Projektergebnisse tragen auch zur Erklärung bei, warum das konsequente Vermeiden von Bodenverdichtungen in der landwirtschaftlichen Praxis nicht schneller flächendeckend Fuß fasst: (1) Das Befahren der Böden führt zwar zu Verdichtungen, die Leitkultur Weizen reagiert jedoch kaum mit Mindererträgen. Dass im Mittel der Jahre das Ertragspotenzial von Mais nicht ausgeschöpft ist, wird bei üblicher Bewirtschaftung nicht deutlich sichtbar. (2) Ausgeprägte, lang anhaltende Trockenphasen kamen bisher zumindest im südlichen Teil Bayerns selten vor. Im Mittel der Jahre reichte das Wasserangebot auch bei verminderter Infiltrationsrate für zufriedenstellende Erträge aus. (3) Die Verknüpfung von Bodenverdichtung und Bodenerosion ist verdeckt und wird deshalb meist nicht beachtet. (4) Flächendeckend konsequentes bodenschonendes Befahren (Anpassung aller Fahrzeuge und Arbeitsverfahren, auf Bodenschonung ausgerichtete Bodenbearbeitung und Fruchtfolge) ist mit Kosten und Veränderungen im Betrieb verbunden.

Für alle in Bayern realisierbaren Verfahren, ob „CTF angepasst“, „Optimierung mit Spurführung“ oder „konventionelles Befahren“, bleiben die Grundsätze des bodenschonenden Befahrens maßgeblich.

7 Literaturverzeichnis

- aid infodienst (2015): Gute fachliche Praxis, Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Heft 3614/2015
- Arvidsson, J. Holm, L., Lejon, L., Hermansson, M. (2014): Fasta körspår – skördepotential och effekt på markstruktur. Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 2013, nr 128. s. 57-64. SLU, Uppsala.
- Bischoff, J. (2012): Bodenbearbeitungs- und Bestellstrategien der Zukunft. KTBL-Schrift 492, Management der Ressource Wasser, Darmstadt, 72-79.
- Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., Busato, P., Hameed, I. A., Rodias, E., Green O. and Papadakis, G. (2010): Tramline establishment in controlled traffic farming based on operational machinery cost. , Vol. 107, 221-231.
- Bommes, Ch. (2009): Immer in der Spur bleiben. dlz, Heft 08/2009, 35-39.
- Bowman, K. (2008): Economic and Environmental Analysis of Converting to Controlled Traffic Farming. In: 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, 61-68,
www.ctfsolutions.com.au/ebm3-doc/132275/Bowman%20Economics.pdf
- Chamen, T. (2007): Controlled-traffic Farming as a Complementary Practice to No-tillage. In: No-tillage Seeding in Conservation Agriculture, ed. C. Baker, K. Saxton, Cromwell Press, Trowbridge, UK, 236-256
- Chamen, T. (o.J.): Controlled Traffic Farming. Aufruf am 22.07.2015: cereals-2.ahdb.org.uk/publications/documents/events/Controlled_Traffic_Farming.pdf
- Demmel, M. (2012): Lösung für Fahrspuren fehlt. Lohnunternehmen 67, H. 12, 50 - 51
- Demmel, M., Brandhuber, R., Kirchmeier, H., Müller, M., Marx, M. (2012): Das Regelfahrspurverfahren - technische und organisatorische Realisierung. Landtechnik 67, H. 6, 435 - 440
- Demmel, M., Brandhuber, R., Kirchmeier, H., Müller, M., Marx, M. (2012): Controlled traffic farming in Germany - technical and organizational realization and first results. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng2012, Valencia (Spain), July 8-12, 2012, ISBN: 978-84-615-9928-8
- Demmel, M., Brandhuber, R., Kirchmeier, H. (2013): Fahrspuren sicher wiederfinden. Lohnunternehmen, 8, Hrsg.: Peter Frank Beckmann, 66 - 69
- Demmel, M., Kirchmeier, H., Brandhuber, R. (2013): Automatische Lenksysteme beleben alte Idee neu. Landwirtschaftliches Wochenblatt Hessen-Rheinland-Pfalz, 3, 28 - 31
- Demmel, M., Brandhuber, R., Kirchmeier, H., Blumenthal, B. (2015): Controlled Traffic Farming in Germany – Technical and Organizational Realization and Results. Paper 152189009, ASABE, St. Joseph, MI, USA
- Department of Agriculture, Gov. of Western Australia (2004): Tramline Farming Systems – Technical manual, Bulletin 4607, ISSN 1448-0352
www.agric.wa.gov.au/objtwr/imported_assets/content/lwe/land/cult/bulletin4607_complete.pdf

- DLG (2008): Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen – Empfehlungen für die Praxis. DLG-Merkblatt 344
- Duttman, R., Brunotte, J., Bach, M. (2013): Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen für den Praktiker. *Landbauforschung* 863), 171-189
- Gasso, V., Sørensen, C., Oudshoorn, F, Green, O. (2013): Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, Vol. 48, 66–73
- Holpp, M. (2012): Untersuchungen zu Controlled Traffic Farming und satellitenbasierten Lenksystemen. FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK des Fachausschusses Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 513, Dissertation, Witzenhausen
- Holpp, M., Chamen, T., Demmel, M, Pedersen H.H. (2013): Viermal CTF in Europa. *Landwirtschaft ohne Pflug*, H. 12/2013, 21-25
- Holpp, M., Hensel, O. (2013): CTF mit Standardmaschinen? *Landwirtschaft ohne Pflug*, H. 11/2013, 17-21
- Holpp, M. und Anken, T. (2008): Ackerbau wie auf Schienen. *Mulchsaatpraxis*, DLG-Mitteilungen, Heft 7/2008, 48-51.
- Holpp, M., Anken, T., Saueter, M., Rek, J., Reiser, R., Zihlmann, U., Oberholzer, H. R., Weisskopf, P., Hensel, O. (2011): Swiss Controlled Traffic Farming Trial – Preliminary Results 2008-2010. In: *Precision Agriculture 2011*, Czech Centre for Science and Society (ed.), Prag, Czech Republic.
- Kingwell, R. and Fuchsbichler, A. (2011): The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agricultural Systems*, Vol. 10, 513-521.
- Kroulik, M., Kviz, Z., Kumhala, F., Hula, J., Loch, T. (2010): *Precision Agriculture*, 1-17.
- Kutschera, L. (1960): *Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen*. Reprint von 2010, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main
- Lamers, J. G., Perdok, U. D., Lumkes, L. M. and Klooster, J. J. (1986): Controlled traffic farming systems in the Netherlands. *Soil & Tillage Research*, Vol. 8, 65-76.
- Li, Y. X., Tullberg, J. N., Freebairn, D. M. and C. A. Ciesiolka (2004): Effects of controlled traffic and conservation tillage on runoff and crop yield. ASABE Paper No. 041071, 2004 ASAE Annual Meeting, ASABE St. Joseph, MI, USA.
- McHugh, A.D., Tullberg, J.N and Freebairn, D.M. (2009): Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil & Tillage Research*, Vol. 104, 164-172.
- Qingjia, W., Haoa, C., Hongwena, L., Wenyinga, L., Xiaoyana, W., McHughb, A., Jina, H., Huanwena, G. (2009): Controlled traffic farming with no tillage for improved fallow water storage and crop yield on the Chinese Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, Vol. 104, Issue 1, 192-197
- Renger, M, Bohne, K., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., Wessolek, G., Zacharias, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte
- Tullberg, J., Yuleb, T., McGarryc, D. (2007): Controlled traffic farming - From research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*, Vol. 97, Issue 2, 272-281

Tullberg, J. (2008): CTF and Climate Change. 6th Australian Controlled Traffic Farming Conference, Report, 86-90

Danksagung

Die Autoren danken

- dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Projekts,
- den Landwirten Thomas Muhr, Eckhard Döring und Franz und Florian Schemmer für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und für die tatkräftige Unterstützung der Projektarbeiten auf ihren Betrieben,
- allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der LfL-Arbeitsgruppen „Bodenphysik, Bodenmonitoring“ und „Ackerbau und Prozesstechnik“ für die mit hoher Motivation und Präzision geleistete Arbeit im Feld, am Schreibtisch und im Labor.