

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500308039/23

# Bodenwasserhaushalt und konservierende Bodenbearbeitung

von E. Düll und H. Flaig

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Dezember 2014

**KLIMOPASS**

**– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
<b>KONTAKT KLIMOPASS</b>	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, <a href="mailto:Kai.Hoepker@lubw.bwl.de">Kai.Hoepker@lubw.bwl.de</a>
<b>FINANZIERUNG</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
<b>BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT</b>	Evelyn Düll und Dr. Holger Flaig Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg, Karlsruhe
<b>BEZUG</b>	<a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/</a> ID Umweltbeobachtung U61-W03-N12
<b>STAND</b>	Dezember 2014, Internetausgabe Februar 2015

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

# Inhaltsverzeichnis

1.	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	FRAGESTELLUNG UND ZIEL	3
3	MATERIAL UND METHODEN	6
3.1	Charakterisierung des Standortes	6
3.2	Erfassung der Bodenfeuchte mit der TDR-Sonde	6
3.3	Erfassung der Bodenfeuchte mit der stationären FDR-Profilsonde	7
3.4	Versuchsskizze	9
3.5	Niederschlagssensoren	11
3.6	Beurteilung des Pflanzenbestandes	12
3.7	Entnahme von Stechringproben und Ermittlung bodenphysikalischer Parameter	13
3.8	Auswahl der Messwerte und Statistik	13
4	AUSWERTUNGEN	16
4.1	Das Messprogramm	16
4.2	Bodenfeuchte im Tiefenprofil der TDR-Sondenmessungen	19
4.3	Bodenfeuchte im Tiefenprofil der FDR-Sondenmessungen	21
4.4	Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten (TDR-Sonde)	23
4.5	Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten (FDR-Sonde)	26
4.6	TDR- und FDR-Sonden im Vergleich	28
4.7	Nutzbare Feldkapazität der Bodenhorizonte in Dossenheim	35
5	DISKUSSION	36
6	LITERATUR	40
7	ANHANG	42
7.1	Trockenrohdichten der Bodenhorizonte in Dossenheim	42
7.2	Gesamtporenanteil der Bodenhorizonte in Dossenheim	43
7.3	Anteil an Feinporen der Bodenhorizonte in Dossenheim	44
7.4	Vergleich der Messungen mit der TDR-Sonde in den einzelnen Rohren	45
7.5	Vergleich der Messungen der einzelnen FDR-Sonden	51



# 1. Zusammenfassung

Regionalen Klimaprojektionen zufolge wird in den nächsten Jahrzehnten die Jahresmitteltemperatur ansteigen – in Baden-Württemberg bis Mitte des Jahrhunderts um etwa 1 K, bis Ende des Jahrhunderts um 3-4 K. Anzahl und Intensität der Hitzeereignisse werden zunehmen. Die Niederschläge in der Vegetationsperiode sollen zwar nur moderat abnehmen, über die temperaturbedingt deutlich höhere Evapotranspiration aber werden vermutlich Anzahl und Intensität von Trockenperioden dennoch ansteigen. Eine ausreichende Wasserversorgung während der Vegetationsperiode ist essentiell für sichere und qualitativ hochwertige Erträge in der Landwirtschaft. Der konservierenden Bodenbearbeitung, wie zum Beispiel Mulch- oder Direktsaat, wird oft zugeschrieben, gerade in Trockenperioden den Kulturpflanzen mehr Bodenwasser zur Verfügung zu stellen, als das beim Pflügen der Fall ist. Ziel des vorliegenden Projekts war es, Untersuchungen zur Bodenfeuchte unter verschiedener Bodenbearbeitung durchzuführen, um diese empirisch begründete Hypothese zu überprüfen.

Auf verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg werden langjährige Versuche zu den Bodenbearbeitungsverfahren durchgeführt und Pflug, Mulchsaat und Direktsaat auf eng benachbarten Versuchspartellen miteinander verglichen. In einem früheren Projekt 2011 wurde die Messmethodik geprüft, ein Standort-Screening durchgeführt und geeignete standörtliche Rahmenbedingungen für einen längerfristigen Versuch ausgelotet. Im hier dokumentierten Versuch von 2014 sollte an einem ausgewählten Standort, Dossenheim bei Heidelberg, intensiver untersucht werden, ob sich bei diesen Bodenbearbeitungsverfahren im Laufe der Vegetationsperiode messbare Unterschiede im Bodenwassergehalt feststellen lassen. Die Bodenwassergehalte wurden mit Hilfe von TDR- und FDR-Sonden gemessen. Die mobile TDR-Sonde erfasste die Bodenfeuchte wöchentlich in vier Tiefenstufen: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm und 60-80 cm, und dies in 10 Röhren pro Bearbeitungsvariante. Von den stationären FDR-Profilsonden wurden vier pro Bearbeitungsvariante eingesetzt und erfassten per Datenlogger stündliche Werte in 10, 30, 50, 70 und 90 cm Tiefe.

Die beiden Messverfahren bildeten Befeuchtungs- und Austrocknungsphasen des Bodens adäquat ab, unterschieden sich jedoch neben der zeitlichen Auflösung in der absoluten Höhe der Messwerte und in ihrer Zuverlässigkeit. Die FDR-Sonden stammten von einem etablierten Hersteller, waren in dieser für die Versuchsdurchführung besonders geeigneten Version allerdings neu auf dem Markt. Die Sonden sind für sich autark, haben kein Zubehör wie Solarpanel-Masten oder externe Antennen, die einen Bewirtschafter stören könnten, und senden die Messwerte per Internet zum Versuchsansteller. Sie bieten somit prinzipiell eine gute Möglichkeit, mit relativ wenig personellem Aufwand diesen Versuch längerfristig durchzuführen. Eines der Ziele im Versuchsjahr 2014 war es, das Messverhalten der neuartigen FDR-Profilsonden anhand der TDR-Sonde zu überprüfen, die in ihrer Messcharakteristik bekannt ist, deren Robustheit sich bewährt hat, die aber als mobile Sonde personalintensiv ist. Es zeigten sich bei den FDR-Sonden jedoch häufige Messausfälle und in manchen Sonden (nicht in allen) auch eine unzureichende Kalibrierung, insofern konnte dieses Ziel nicht zufriedenstellend erfüllt werden.

Ein Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Bodenfeuchte war in der Tat nachzuweisen. Die Pflugvariante wies in den oberen 20 cm weniger Bodenfeuchte auf als die Mulchsaat- und Direktsaatvariante. Dieses Ergebnis wurde mit beiden Sondenarten erzielt, bei der TDR-Sonde war das Resultat statistisch signifikant. Besonders deutlich war der Unterschied zwischen Direktsaat (mehr Wasser) und Pflug (weniger Wasser), die

Unterschiede im Bodenwassergehalt zwischen Mulchsaat und Direktsaat waren bis in den Sommer hinein nicht signifikant und traten erst im Spätsommer und Herbst, also schon ohne Pflanzenbestand, deutlicher zutage. Auch in 20-40 cm Tiefe war in der Pflugvariante weniger Bodenwasser zu messen, allerdings war nur der Unterschied zwischen Mulchsaat und Pflug signifikant. Ab 40 cm Bodentiefe unterschieden sich die Bearbeitungsverfahren hinsichtlich der Bodenfeuchte nicht mehr.

Die Pflugvariante besitzt in 10-20 cm Tiefe sowohl einen höheren Gesamtporenanteil, als auch eine höhere nutzbare Feldkapazität als Mulch- und Direktsaat. Der Feinporenanteil hingegen unterscheidet sich in dieser Tiefenstufe nicht. Gleichzeitig wurde ein geringerer Bodenwassergehalt gemessen. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass unter Pflug die Grob- und Mittelporen weniger Wasser führten als die Varianten mit konservierender Bodenbearbeitung, so dass die potentiell höhere nutzbare Feldkapazität im Oberboden nicht ausgenutzt werden konnte. Oft sank der Wassergehalt sogar unter den permanenten Welkepunkt. Entscheidend für die Unterschiede war vermutlich die Mulchdecke aus abgestorbenen Pflanzenresten, die bei Mulch- und vor allem Direktsaat vorhanden war. Sie konnte dort die Evaporation von Wasser aus den oberen Bodenschichten teilweise verhindern, auf der gepflügten Fläche fehlte jedoch diese „Evaporationsbremse“.

Das Frühjahr 2014 war relativ trocken, allerdings nicht so extrem wie 2011. Der Sommer war ziemlich feucht und mit ausreichend Niederschlägen gesegnet, so dass es sich 2014 um kein extremes Jahr handelte. Die Winterweizenerträge auf der Versuchsfläche waren sehr gut. Auf der Pflugparzelle wurden die höchsten Erträge erzielt, so dass das zeitweilige Wasserdefizit im Oberboden keine spürbaren Auswirkungen auf den Ertrag hatte. Im Versuchsjahr 2011, in dem ebenfalls Bodenwassergehalte gemessen werden konnten, war das Frühjahr extrem trocken und der Winterweizen machte eine Notreife mit geringen Erträgen durch – hier wies allerdings die Direktsaat die höchsten Erträge auf. Die Messung von Bodenwassergehalten soll noch über 2014 hinaus weitergeführt werden, um vielleicht weitere Hinweise darauf zu erhalten, unter welchen klimatischen Voraussetzungen welche Kultur unter welcher Bodenbearbeitung Vorteile zieht und in welchem Bodenhorizont sich Unterschiede im Bodenwassergehalt besonders ausprägen.

## 2 Fragestellung und Ziel

Baden-Württemberg ist im deutschlandweiten Vergleich den regionalen Klimaprojektionen zufolge besonders vom Klimawandel betroffen: Erwartet wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 3 - 4 K bis Ende des Jahrhunderts und ein Rückgang der sommerlichen Niederschläge um ca. 10% (LUBW 2013). Das Risiko für Trockenheit kann jedoch stärker steigen, als der moderate Niederschlagsrückgang vermuten lässt. Zum einen wird die Evapotranspiration in der Vegetationsperiode durch höhere Temperaturen steigen. Zum anderen verschärft auch ein moderater Niederschlagsrückgang in Regionen, die bereits heute öfter unter Trockenheit leiden, die Wasserversorgung der Kulturpflanzen. Korrespondierend dazu wird daher mit einem Anstieg der Anzahl und Intensität von Trockenperioden gerechnet. Diese Änderungen stellen die Landwirtschaft vor große Herausforderungen. Eine ausreichende Wasserversorgung während der Vegetationsperiode ist essentiell für sichere und qualitativ hochwertige Erträge.

Das Land Baden-Württemberg führt an mehreren Standorten seit 1995 einen „Systemvergleich Bodenbearbeitung“ durch, in dem die drei Varianten Pflugbearbeitung, Mulchsaat und Direktsaat miteinander verglichen werden. Bei der Pflugbearbeitung wird der Boden in der Regel 20-30 cm tief bearbeitet und dabei gewendet. Das Verfahren dient der Durchmischung der Nährstoffe, der Bildung eines homogenen Durchwurzelungshorizontes und der Unkrautbekämpfung. Beim Verfahren der Mulchsaat werden mittels Grubber oder Egge die oberen 10-15 cm des Bodens (manchmal auch tiefer) durchmischt, ohne den Boden zu wenden. Damit will man die Nachteile des Pfluges, z.B. die Bildung eines verdichteten Horizontes unterhalb der Pflugtiefe, die so genannte Pflugsohle, vermeiden. Vor allem soll aber eine höhere Bodenbedeckung mit Ernterückständen als Erosionsschutz erreicht werden. Bei der Direktsaat wird der Boden fast nicht mehr bearbeitet. Zur Ablage des Saatguts wird lediglich in die Ernterückstände der Vorfrucht ein Schlitz in den Boden eingebracht.

Sowohl aus dieser Versuchsreihe, als auch aus der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass konservierende Bodenbearbeitungsverfahren „Wasser sparen“, d.h. dass auch bei längeren Trockenperioden den Kulturpflanzen mehr bzw. länger Bodenwasser zur Verfügung steht als bei Pflugbearbeitung. Ein Monitoring der Bodenfeuchte über längere Zeit hinweg sollte etwaige bewirtschaftungsbedingte Unterschiede in der Bodenfeuchteentwicklung bzw. Wasserausnutzung aufdecken und Hinweise darauf geben, ob und ggf. welche Bodenbearbeitungsvarianten den Kulturpflanzen mehr bzw. länger Wasser zur Verfügung stellen – und damit, ob Mulch- und Direktsaat ein Baustein für eine wassereffiziente Landbewirtschaftung sein können. Dies kann Auswirkungen bis hin zu einem verringerten Beregnungsbedarf von Kulturen, aber auch auf die Erosionsanfälligkeit und den Erosionsschutz haben. Die Ergebnisse haben unmittelbar praxisrelevante Bedeutung für die Art und Weise der Bodenbearbeitung und können über das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg in die Beratung der Praxis einfließen. Sie könnten nicht zuletzt eine geeignete Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel sein. Auch für die Modellierung von Bodenwasserhaushaltsparametern, die unterschiedliche Bodenbearbeitungsmethoden bisher nicht berücksichtigt, wären die Ergebnisse interessant.

Fünf der Standorte des Systemvergleichs sind seit 1995 in Betrieb. Durch die langjährige Versuchsdauer hat sich ein bearbeitungstypischer Bodenzustand einstellen können; der Boden muss sich nicht erst „umstellen“. In einem Pilotprojekt 2011 im Rahmen von Klimopass wurde auf den fünf langjährig differenziert bewirtschafteten Flächen die volumetrische Bodenfeuchte gemessen. Dabei konnten prinzipiell geeignete

Standorte des Systemvergleichs sondiert und die Methoden der Bodenfeuchtemessung über TDR- und FDR-Sonden erprobt, miteinander verglichen und validiert werden. Während der Messkampagne, die erst im Mai bzw. Juni beginnen konnte und im Spätherbst endete, fielen regelmäßig Niederschläge, so dass eine längere Trockenperiode nicht auftrat. An den zwei trocken-warmen Standorten (Dossenheim, Efringen-Kirchen) ergaben sich dennoch Hinweise auf Vorteile hinsichtlich der Bodenwasserversorgung bei Direktsaat, die allerdings aufgrund der niedrigen Sondenzahl pro Standort statistisch nicht auswertbar waren.

Im aktuellen Projekt ging es darum, einen der trocken-warmen Standorte mit Sonden zur Messung der Bodenfeuchte intensiv zu bestücken, relevante Bodenparameter wie nutzbare Feldkapazität und Lagerungsdichte zu bestimmen und die Voraussetzungen für eine mehrjährige Messkampagne zu schaffen. Ausgewählt wurde der Standort Dossenheim bei Heidelberg, auf Grund der logistischen Nähe zum LTZ Augustenberg, aber auch, weil hier Ertragsvorteile bei Direktsaat in trocken-warmen Jahren nachgewiesen werden konnten (Tab. 1).

Tab. 1: Erträge [dt/ha] am Standort Dossenheim. HF: Hauptfrucht; WR: Winterraps, KM: Körnermais, WW: Winterweizen, SG: Sommergerste. Jahr 2000: bis 2014 wärmstes Jahr im Jahresdurchschnitt in Deutschland seit Beginn der Wetteraufzeichnungen, warm-trockener Mai und Juni; 2003: Rekordtemperaturen in Juni und August mit extrem niedrigen Bodenfeuchten; 2006 heiß-trockener Juni und insbesondere Juli; 2011: warmes und trockenes Frühjahr mit wenig Niederschlägen bis in den Juni. Ertragsdaten nach W. Ibach, pers. Mitt.

Warm-trockene Jahre					Normale Jahre				
Jahr	Pflug	Mulch	Direkt	HF	Jahr	Pflug	Mulch	Direkt	HF
2000	25	30	32	WR	1999	66	54	47	SG
2003	46	36	49	KM	2001	62	62	61	WW
2006	81	80	86	KM	2004	77	68	71	WW
2011	46	41	52	WW	2010	97	93	96	WW

Gemessen wurde die Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen. Sie dient als Maß für das Wasserangebot im Wurzelraum. Die Niederschläge wurden als unverzichtbarer Begleitparameter mit einem Regenmesser mit erhoben und mit den Messungen der Wetterstation des Julius-Kühn-Instituts in unmittelbarer Nähe des Versuchsfeldes verglichen. Pro Bearbeitungsvariante wurden vier neuartige Profilsonden in den Boden eingebracht, von denen jede in 5 verschiedenen Bodentiefen bis hinab zu einem Meter die volumetrische Bodenfeuchte erfassen und per Logger aufzeichnen kann (Messtiefen 10, 30, 50, 70, 90 cm mit je etwa 5 cm vertikalem Messbereich). Hinzu kamen 10 Messplätze für Bodenfeuchtemessungen mit einer mobilen TDR-Sonde, die vier verschiedene Tiefen abdeckt und wöchentlich manuell ausgelesen wurde (Messtiefen 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm). Am Standort sind somit derzeit 42 Sondenmessplätze eingerichtet.

Bereits bei der Antragstellung war eine Fortführung des Projektes in Eigenregie über das Jahr 2014 hinaus geplant; hierfür sollten mittels geeigneter wartungs- und betreuungsarmer Sonden die Voraussetzungen geschaffen werden. Die neuartigen Profilsonden auf Basis der FDR-Technologie sind kompakt, schaffen wenig Bewirtschaftungerschwernisse und sind über SIM-Karte und Internet per Fernabfrage auswertbar. Im Hinblick auf die Fortführung des Versuchs war es das Ziel, die Performance der neuen FDR-Sonden mit den bewährten Messleistungen der personalintensiveren mobilen Sonde auf TDR-Basis zu überprüfen und zu validieren, um den Versuch noch ein bis mehrere Jahre mit den Profilsonden und vergleichsweise wenig

Aufwand weiterzuführen. Belastbare Unterschiede in der Bodenfeuchte zwischen den Bearbeitungsvarianten sind nur in relativ trockenen Jahren zu erwarten, und es war nicht vorauszusehen, ob das durch KLIMOPASS geförderte Versuchsjahr 2014 ein solches werden würde. Wie bereits 2011 erwies sich auch 2014 als eher trocken im Frühjahr und Frühsommer (wenn auch nicht so extrem wie 2011), aber relativ feucht im Sommer, so dass längere trockene Phasen ausblieben.

Die Lagerungsdichte des Bodens beeinflusst die Messwerte der Sonden und kann zu Über- bzw. Unterschätzungen der tatsächlichen volumetrischen Bodenfeuchte führen. Dieser Parameter wurde über die Trockenrohdichte des Bodens zwar 2004 bereits erhoben, musste aber nochmals aktuell bestimmt werden, und zwar in den Bodentiefen, in denen auch die Bodenfeuchte bestimmt wurde.

Um die Messdaten hinsichtlich der Wasserversorgung der Kulturpflanzen richtig interpretieren zu können, war weiterhin die Erfassung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in den relevanten Bodentiefen notwendig. Die nFK charakterisiert den pflanzenverfügbaren Anteil des Bodenwassers.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Charakterisierung des Standortes

Tab. 2: Standort- und Bodeneigenschaften des Standorts Dossenheim.

Standort	Standorteseigenschaften			Boden		
	Höhenlage [m ü. NN]	Ø Jahrestemp. [°C]	Ø Jahresnieder- schlag [mm]	Bodenart	Ø Ackerzahl	Gründigkeit
Dossenheim	100	10,2	670	uL - IT	80-85	> 1 m

Die Klimadaten beziehen sich noch auf die meteorologische Referenzperiode 1961-1990. Mittlerweile ist der Klimawandel vorangeschritten. Nach den Daten der nicht weit entfernten LTZ-eigenen Wetterstation in Ladenburg betrug die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur 1995-2014 ein ganzes Grad mehr, nämlich 11,2 °C und die durchschnittliche Niederschlagssumme 815 mm pro Jahr. Das Jahr 2014 markierte dabei in zweierlei Hinsicht Rekorde: Es war in diesem Zeitraum das wärmste und das trockenste Jahr mit 12,6 °C Jahresmittel und 629 mm Jahresniederschlag. Extreme Hitze oder außergewöhnliche Trockenphasen waren jedoch nicht zu verzeichnen. Hinsichtlich der Vegetationszeit gab es wärmere Jahre wie 2003 mit einer Durchschnittstemperatur zwischen April und August von 18,8 °C oder trockenere Jahre wie 2012 mit einer Niederschlagssumme von April bis August von 298 mm (2014: 17,4 °C bzw. 341 mm).

Die Bodenart kann auf dem Versuchsfeld kleinräumig wechseln, wie bei der Vorbeprüfung (Kap. 3.4) festgestellt wurde. Im Allgemeinen herrscht Lehm, toniger Lehm oder lehmiger Ton vor. Dennoch sind gerade im Unterboden unterhalb 50 cm Tiefe hin und wieder sandige Anteile zu finden, besonders auf der Bearbeitungsvariante „Mulchsaat Dutzi“ (Abb. 1), die aus diesem Grund nicht für die Installation von Messsonden ausgewählt wurde.

### 3.2 Erfassung der Bodenfeuchte mit der TDR-Sonde

Die Bodenfeuchte wird über die Methode der Time Domain Reflectometry (TDR) ermittelt. Dazu wird ein hochfrequenter elektromagnetischer Impuls entlang eines Leiters an der Sonde geschickt und bildet um die Leitung eine elektromagnetische Welle. Am Ende dieses Impulsleiters wird die Welle reflektiert. Die Laufzeit, bis das Signal wieder am Ausgangspunkt ankommt, ist proportional der Dielektrizitätskonstanten im Boden. Diese wiederum wird hauptsächlich von der Bodenfeuchte bestimmt. Über eine Kalibrationskurve wird so die volumetrische Bodenfeuchte ermittelt. Im Versuch wird das mobile Messsystem der Firma IMKO Mikrosystemtechnik GmbH in Ettlingen verwendet, bestehend aus:

- TDR-Rohrsonde mit „intelligentem Sondenkopf“ TRIME-IPH; die neuere Generation kann neben der Bodenfeuchte auch die Temperatur ermitteln (allerdings die Temperatur im Sondenrohr, nicht im Boden selbst),
- Bluetooth-Einheit pico-BT mit PDA (Palm) zur Datenerfassung und Auswertung,
- Tecanatrohre zum Einbringen in den Boden und Einführen der mobilen Rohrsonde,
- Zubehör wie z.B. Vorbohrset zur bodenschonenden Installation der Tecanatrohre.

Die IMKO-TDR-Sonde kann in verschiedene Tiefen entlang des Rohres eingeführt werden. Dabei wird ein Signal entlang 18 cm langer, metallischer Halbschalen rundum in den Boden geschickt, das etwa 15 cm tief eindringt. Damit kann die Bodenfeuchte also ungefähr in 20 cm-Schritten tiefenabhängig erfasst werden. Verwendet wurden Standardrohre von einem Meter Länge.

Pro Bearbeitungsvariante (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat) wurden zehn Messorte eingerichtet, am Standort also 30 Messorte. Die Erfassung der Bodenfeuchte erfolgt in 0-20, 20-40, 40-60 und 60-80 cm Tiefe. Die Rohre müssen nach dem Setzen erst dichten Bodenschluss finden; außerdem wird der Boden durch das „Einhämmern“ der Rohre unvermeidlich gestört. Daher wird eine gewisse Adaptationszeit benötigt. Erste Messwerte nach der Ruhephase wurden am 28. 3. 2014 gewonnen. Danach wurde im wöchentlichen Abstand gemessen. Pro Tiefenstufe wurden an jedem Messtermin drei Einzelmessungen vorgenommen. Dabei wurde die Sonde jeweils um etwa 60° gedreht, um unterschiedliche Bodenbereiche zu erfassen.

Zum Einbringen in den Boden setzt man innerhalb des Tecanatrohrs ein Stahlrohr ein, auf dem ein Schlagkopf sitzt. An der Tecanat-Rohrbasis ist eine Stahlschneide eingeklebt. Der Boden wird mittels eines Edelman-Handbohrers, der besonders für lehmige und tonige Böden geeignet ist, innerhalb des Stahlrohrs portionsweise heraufgeholt und die Rohre anschließend mittels eines rückschlaggedämpften Hammers ein Stück vorgetrieben, anfangs noch mit Unterstützung einer Haltevorrichtung. Dies wird so lange wiederholt, bis die erforderliche Tiefe erreicht ist – in der Regel stehen die letzten 5-7 cm über. Die Rohre sollten genau senkrecht eingearbeitet werden, damit sie sich nicht verbiegen oder sonstiger Spannung ausgesetzt werden. Dann wird das Innen-Stahlrohr entfernt. Nach erfolgter Installation wird das Rohr innen am Grund der Rohrbasis mit einem Gummistopfen gegen Bodenwasser sowie oben mit einer Plastikkappe und einem Neoprenring gegen Niederschlag abgedichtet.

### 3.3 Erfassung der Bodenfeuchte mit der stationären FDR-Profilsonde

Zusätzlich zum System der Messung mit der mobilen TDR-Sonde über eingebrachte Rohre wurden Profilsonden, die auf der FDR-Technologie beruhen, installiert. Bei der Frequency-Domain-Reflectometry (FDR)-Technik wird der Wassergehalt ebenfalls indirekt über die Dielektrizitätskonstante bestimmt. Der Boden dient hierbei zusammen mit den Sensorringen der Sonde als Kondensator und Bestandteil eines Stromkreises, der die ausgesandten Frequenzen eines Oszillators je nach Feuchte verändert. Je größer die Wassermenge, desto kleiner ist die gemessene Frequenz zwischen den beiden Messingringen des Sensors auf einer Messtiefe.

Das stationäre Messsystem besteht aus der Sonde „Enviroscan all-in-one“ der Firma Sentek Sensor Technologies aus Stepney/Adelaide, Australien; Beratung, Lieferung und Installation durch UMS GmbH, Umweltmonitoring Systeme aus München. Die FDR-Sensoren können variabel an einem Sondengerüst angebracht werden, so dass verschiedene Bodentiefen mit einer Sonde erfasst werden können. Die komplette Elektronik – Sensorkarten, Bussystem, Logger, Batterie, Modem und Senderantenne – ist im Sondenkopf integriert. Im Vergleich zu ähnlichen Profilsonden benötigt man daher keine Extra-Kabel, Solarpaneele oder externe Logger an Masten. Die kompakte Anordnung ist ideal für Versuchsfelder wie in Dossenheim, die durch Landwirte bewirtschaftet werden und wo jede Installation, die die Befahrung erschwert, die Gefahr der Beschädigung in sich birgt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Messwerte aus dem Logger mit Kabelanschluss vor Ort (dafür muss die Sonde herausgezogen werden), per Bluetooth auf dem Feld oder per

SIM-Karte und GPRS über das Internet auszulesen. Vor allem letztere Option erleichtert es potentiell, nach Ende der geförderten Projektlaufzeit weiterhin mit geringem Aufwand Messungen betreiben zu können. Sie wurde gegen Ende der Projektlaufzeit implementiert. Sentek-Profilsonden wurden in ausführlichen Beratungsgesprächen mit mehreren Firmen und Anwendern ausdrücklich empfohlen; die „all-in-one“-Version war zu Projektbeginn jedoch neu auf dem Markt.

Die Sonde wird in einer Röhre („Zugriffsrohr“) installiert, diese Röhren werden ähnlich wie bei der TDR-TRIME-Technologie mit einem Installationsset vorsichtig abgeteuft. Diese diffizile Arbeit wurde vom Lieferanten UMS für uns in Dienstleistung erledigt. Zum Einbringen in den Boden sitzt auf dem Zugriffsrohr ein Schlagkopf. An der Rohrbasis ist eine Stahlschneide eingeklebt. Der Boden wurde mittels eines Hand-Bohrers innerhalb der Röhren portionsweise heraufgeholt und die Rohre anschließend durch einen rückschlagfreien Hammer stückweise vorgetrieben, anfangs noch mit Unterstützung einer Haltevorrichtung. Dies wird so lange wiederholt, bis die erforderliche Tiefe erreicht ist – in der Regel stehen die letzten 10 cm über. Nach erfolgter Installation wird die Innenseite mit Reinigungstüchern gesäubert, das Rohr innen an der Basis mit einem Gummistopfen gegen Bodenwasser abgedichtet, die Sonde mit „Elektronikkopf“ eingesetzt und mit einer Plastikkappe verschlossen. Die komplette Sonde ragt etwa 30 cm über die Bodenoberfläche hinaus.

Pro Bearbeitungsvariante wurden vier Sonden, also insgesamt 12 Sonden, eingebaut. Die Sensoren wurden so eingestellt, dass sie Werte in den Tiefen 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm und 90 cm erfassen. Sie entsprachen damit etwa der Mitte des jeweiligen Messbereichs der TDR-Sonden und gingen mit 90 cm noch eine Stufe tiefer. Die Bodenfeuchtwerte stammen aus einem Radius von 10 cm um das Zugriffsrohr und umfassen auch axial etwa 10 cm mit der eingestellten Tiefe in der Mitte. Die Ersteinstellung und Konfiguration der Messtiefen und Messintervalle erfolgt über ein Notebook und spezielle Software. Die Sensoren wurden mit der Standardkalibration Luft/Wasser und der voreingestellten Kalibrationsgleichung, gültig für die meisten Böden, geliefert und eingesetzt. Die Rohre müssen nach dem Setzen erst dichten Bodenschluss finden; außerdem wird der Boden durch das „Einhämmern“ der Rohre unvermeidlich gestört. Daher wird eine gewisse Adaptationszeit benötigt. Erste Messwerte nach der Ruhephase wurden am 9. 5. 2014 gewonnen. Danach wurden die Werte im stündlichen Abstand gespeichert.

Die Datenauslesung erfolgte zur Kontrolle wöchentlich im Zuge der Messung mit den TDR-Rohrsonden; die Logger konnten jedoch bisher die Messwerte des gesamten Versuchszeitraums speichern. Durch diese Versuchsanordnung konnte auf der Messfläche Dossenheim die Bodenfeuchte über zwei verschiedene Messsysteme (TDR und FDR) erfasst und verglichen werden. Darüber hinaus ermöglichte die Datenspeicherung in Loggern eine zeitlich höher aufgelöste Erfassung der Bodenfeuchte.

Im Zuge der Messkampagne traten Probleme mit der Interpretierbarkeit der Werte auf. Die Messungen der vier Sonden pro Variante wiesen z.T. deutlich unterschiedliche Werte auf. Auch die Reaktion auf Niederschläge oder Austrocknung war nicht immer gleich schnell. Manche Sonden wiesen auch unrealistisch hohe Bodenfeuchtwerte aus – auf denselben Varianten standen zwischen den FDR-Sonden TDR-Messwerte zur Verfügung, um die Plausibilität wenigstens semiquantitativ abzuschätzen. (Von einer direkten Vergleichbarkeit der gemessenen Werte kann man bei den beiden Technologien nicht von vornherein ausgehen; Flaig und Schickler 2012). Daher wurden im August Vergleichsmessungen vorgenommen: Im selben Sondenrohr wurde zunächst die Enviroscan-all-in-one-Sonde ausgelesen, dann die Sonde herausgenommen und die Bodenfeuchte durch eine mobile Rohrsonde („Diviner“) der Fa. Sentek, die in das Zugriffsrohr passt, manuell gemessen. Als Resultat mussten vier Enviroscan-all-in-one-Sonden (mit der

versuchsinernen Bezeichnung P3, P4, M4 und D2) von der Fa. UMS neu kalibriert werden. Danach maßen die Sonden zuverlässiger (Kap. 7.5).

Laut Hersteller-Beschreibung kann die Enviroscan-all-in-one-Sonde per Kabel, per Bluetooth und per SIM-Karte/GPRS ausgelesen werden. Zum Auslesen per Kabel muss die Sonde aufgesucht, der Deckel abgeschraubt und die Sonde etwas herausgezogen werden. Per Bluetooth könnte die Sonde weitgehend berührungsfrei, zumindest ohne Öffnung des Kopfes abgelesen werden. Diese Option funktionierte allerdings nicht zufriedenstellend, so dass per Kabel ausgelesen wurde, da für die TDR-Messungen ohnehin das Versuchsfeld aufgesucht werden musste. Dies bot gleichzeitig die Möglichkeit, die Trocknungskissen, die zur Trockenhaltung der Elektronik im Sondenkopf untergebracht sind, zu kontrollieren. Bis Projektende wurde eine „Pilot-Sonde“ erfolgreich dazu gebracht, mit SIM-Karte und GPRS verwertbare Daten an einen Server des Landesamtes für Geoinformation und Landentwicklung zu senden, auf den wir Zugriff haben. Diese Option wird im Frühjahr 2015 auf allen Sonden installiert.

### 3.4 Versuchsskizze

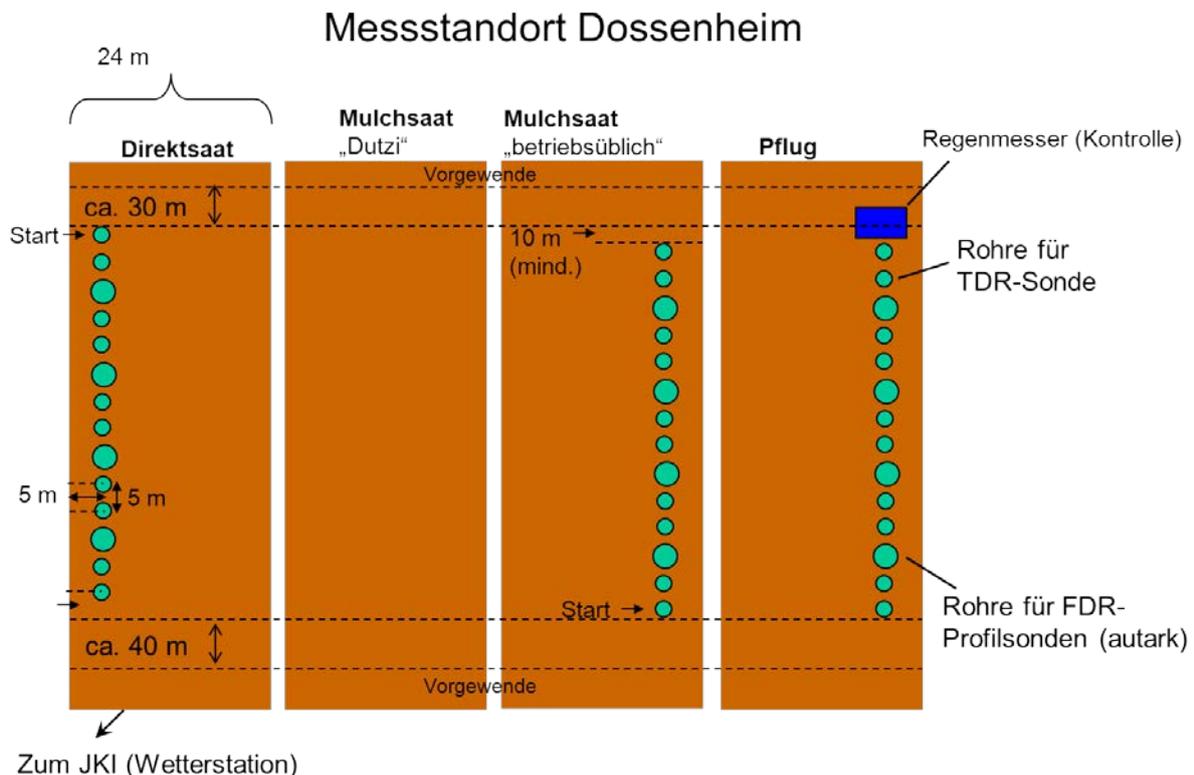


Abb. 1: Skizze der Messanordnung auf dem Intensivmessfeld in Dossenheim (Parzellenbreite 24 m)

Der Standort mit seinen Messfeldern wurde einmal pro Woche angefahren und die Daten erfasst bzw. ausgelesen. Beim Einbringen der Rohre für die Profilsonden und mobilen Sonden wurde darauf geachtet:

- möglichst ebenes Gelände auf den Parzellen dafür auszuwählen, um Reliefeinflüsse gering zu halten;
- vom Vorgewende aus mindestens 30 m Abstand zu halten,
- keine Fahrspur zu beproben,
- Inhomogenitäten wie z.B. Flecken hoher Unkrautdominanz, ungleichmäßiger Feldaufgang oder Nagetierbaue zu meiden,

- zwischen den Pflanzenreihen bzw. auf unbewachsenen Boden zwischen den Pflanzen nach Entfernung etwaiger Erntereste zu setzen und
- die gewachsene Lagerungsdichte des Bodens möglichst wenig zu stören.

Letzteres ist insofern eingeschränkt zu gewährleisten, da die Zugriffsrohre für die Sonden eingeschlagen werden müssen und rund um das Rohr damit Verfestigungen eintreten. Ebenso werden bereits gewachsene Pflanzen teilweise niedertreten, was u.U. Auswirkungen auf die Transpirationsintensität in unmittelbarer Nähe der Rohre hat.

Die Rohre und Sonden wurden in den wachsenden Bestand eingebracht. Hierbei handelte es sich im Versuchsjahr 2014 um Winterweizen. Da in Dossenheim bereits 2011 ein ähnlicher Versuch lief, wurde darauf geachtet, die damalige dokumentierte Versuchsfläche in den neuen Versuch nicht aufzunehmen, da das Bodengefüge durch Grabarbeiten gestört worden war. Daher wurde der Abstand zum Vorgewende gegenüber 2011 (damals mindestens 10 m) vergrößert. Außerdem wurde 2011 festgestellt, dass an diesem Standort vor allem in der damals gewählten Stelle der Mulchvariante im Unterboden (> 50 cm) deutlich mehr Sand zu finden war als in den anderen Varianten, was den Vergleich dieser Bodenbearbeitungsvariante sehr erschwert hat. Daher wurden diesmal vor der Festlegung der Messorte Mitte März Bodenbeprobungen per Bohrstock über die gesamten Parzellen durchgeführt, um möglichst homogene Bodenbedingungen zu gewährleisten. Als Ergebnis wurde die in Abbildung 1 skizzierte Versuchsanordnung gewählt (nicht maßstabsgetreu). Die Profilsonden wurden in regelmäßigen Abständen zwischen die TDR-Rohre platziert.

Die Parzellen des „Systemvergleichs Bodenbearbeitung“ werden von einem Landwirt bewirtschaftet. Hierbei wird er durch den Pflanzenbauberater der zuständigen Unteren Landwirtschaftsbehörde begleitet. Der Landwirt hat Interesse daran, dass der Versuchsaufbau seine praktische Arbeit möglichst wenig stört. Der Versuch wurde vor Ort mit dem Berater, dem Landwirt und dem Lohnunternehmer vor dem Setzen der Rohre besprochen. Als Kompromiss wurden die Rohre nicht mittig in einer Parzelle, sondern eher am Rand gesetzt, jedoch so, dass Randeffekte noch keine Rolle spielen sollten. Aus Gründen der Arbeitserleichterung sowohl für den Landwirt, als auch für die betreuende Person wurden die Rohre in überschaubarem Abstand zueinander in Reihe platziert.

Hauptsächliche Vorgehensweise: Erstes Tecanatrohr mindestens 30 m vom Vorgewende weg und 5 m Abstand zum Parzellenrand. Dann folgen in Längsrichtung alle fünf Meter ein Tecanat- oder Sentekrohr, sodass sich das Muster Tecanat-, Tecanat-, Sentek-, Tecanat-, Tecanat-, Sentek-, Tecanat-, Tecanat-, Sentek-, Tecanat-, Tecanat-, Sentek-, Tecanatrohr bildet. Vereinzelt wurde von diesem Plan abgewichen, wenn Steine im Solum die Installation behinderten.

Eine Fortführung des Projektes in Eigenregie mittels der stationären Sonden (Sentek, Enviroscan all-in-one) über das Jahr 2014 hinaus ist geplant. Auch die Rohre für die TDR-Sonde könnten prinzipiell im Boden verbleiben und in besonders trocken-warmen Jahren für weitere TDR-Messungen der Bodenfeuchte zur Verfügung stehen.

### 3.5 Niederschlagssensoren

Inmitten des Versuchsfeldes wurde ein Niederschlagssensor (MD 532, Kipplöffel-Prinzip mit integriertem HOBO®-Pendant Logger (Onset Computer Corp., MA, USA)) installiert, um die Niederschläge vor Ort zu erfassen. Dieser Logger zeichnet die Niederschlagsereignisse „ereignisbezogen“ auf, dabei umfasst ein „Ereignis“ 0,2 mm Niederschlag auf dem Kipplöffel. Die so erfassten Niederschläge wurden aufsummiert, gespeichert und Tagessummen daraus gebildet. Zudem befindet sich am Standort Dossenheim eine Station des Julius-Kühn-Instituts in unmittelbarer Nähe zum Versuch, so dass die dort erhobenen Wetterdaten, die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, herangezogen werden konnten, um die Messwerte unseres Regenmessers auf Plausibilität zu überprüfen sowie etwaige Messlücken zu füllen.

Ein Vergleich der beiden Niederschlagsmessreihen zeigt eine hohe Übereinstimmung mit einer markanten Ausnahme am 8. 6. 2014 (Abb. 2). Beide Sondentypen zeigten an dem fraglichen Tag in den oberen Horizonten keinen Anstieg des Bodenwassergehalts durch Niederschlag an, so dass davon auszugehen ist, dass es sich bei dem Wert unseres Niederschlagsmessers um ein Artefakt handelt (Spaziergänger am Pflingstsonntag, die den Regenmesser „ausprobiert“ und somit Niederschlagsereignisse am Kipplöffel ausgelöst haben?). Mit Ausnahme dieses Werts wurden die Messwerte unseres Niederschlagsmessers für die Darstellung der Niederschläge zu Grunde gelegt.

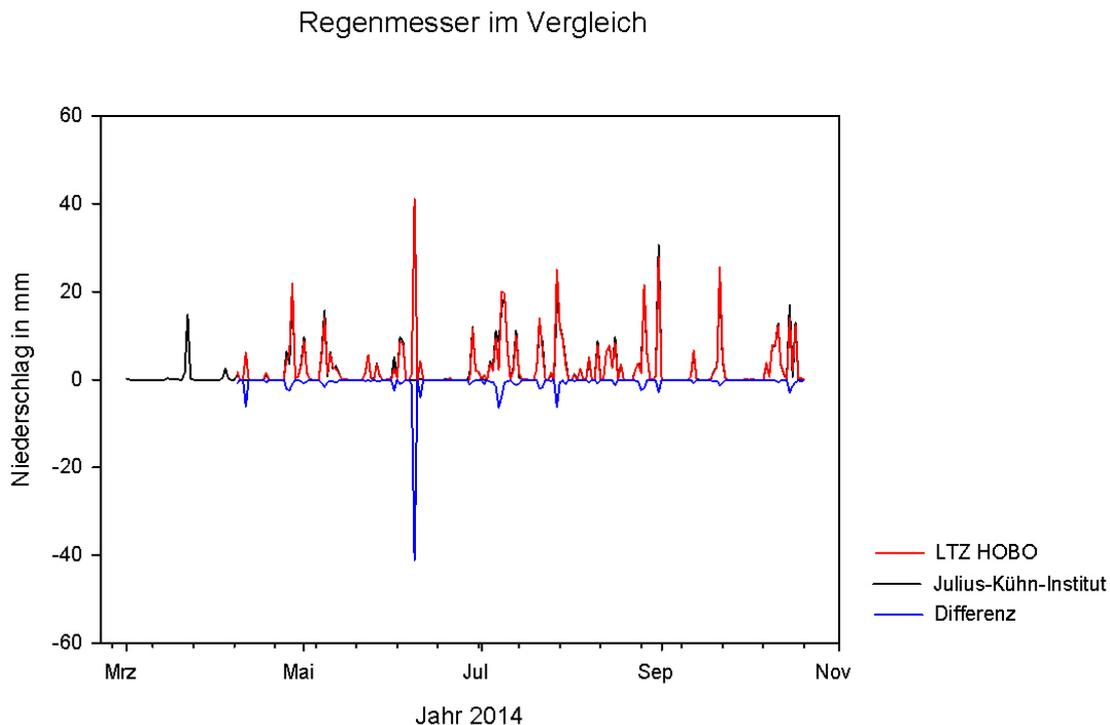


Abb. 2: Vergleich der Niederschlagswerte des Regenmessers MD 532 mit HOBO-Logger („LTZ HOBO“) auf dem Versuchsfeld selbst und der Wetterstation am JKI Dossenheim. Abweichungen wurden als Differenz nach unten aufgetragen, unabhängig davon, welcher Regenmesser mehr oder weniger anzeigte.

### 3.6 Beurteilung des Pflanzenbestandes

Wöchentlich wurden mehrere Proben aus den verschiedenen Bearbeitungsvarianten entnommen und sowohl die Bestandeshöhe als auch die Entwicklungsstadien (BBCH-Stadien) erfasst (Tab. 3). Die BBCH-Stadien wurden mit den Berechnungen des Prognosemodells SIMONTO verglichen. Die Bestandesdichte war auf der Direktsaatvariante insgesamt tendenziell etwas niedriger (stellenweise Probleme mit der Saatmaschine, Verunkrautung), nicht jedoch auf der Teilfläche der Sondenmessungen, und war insofern zwischen den Bearbeitungsvarianten vergleichbar. Die Ernte des Winterweizens erfolgte am 18. 7. 2014.

Tab. 3: Entwicklungsstadien des Winterweizens nach der BBCH-Skala und Bestandeshöhen auf den Bodenbearbeitungsvarianten von März (Versuchsanfang) bis zur Erntezeit Mitte Juli 2014.

Datum	BBCH			Bestandeshöhe in cm		
	Direktsaat	Mulchsaat	Pflug	Direktsaat	Mulchsaat	Pflug
Freitag, 28. März 2014	33	33	34	19	18	26
Freitag, 4. April 2014	34	34	34	25	28	34
Freitag, 11. April 2014	35	35	35	31	32	39
Donnerstag, 17. April 2014	35	35	35	39	39	46
Mittwoch, 23. April 2014	37	37	37	50	51	59
Dienstag, 29. April 2014	37	37	37	58	59	65
Mittwoch, 7. Mai 2014	41	43	43	58	59	65
Donnerstag, 15. Mai 2014	56	56	56	71	76	78
Donnerstag, 22. Mai 2014	65	65	65	80	86	90
Mittwoch, 28. Mai 2014	69	69	69	92	95	98
Freitag, 6. Juni 2014	71	71	71	95	98	100
Freitag, 13. Juni 2014	73	73	73	98	99	100
Mittwoch, 18. Juni 2014	75	75	75	98	99	100
Mittwoch, 25. Juni 2014	83	83	83	nickende Ähren		
Dienstag, 1. Juli 2014	89	89	89			
Freitag, 11. Juli 2014	87	87	87	87	88	88
Mittwoch, 16. Juli 2014	89	89	89	87	88	88

Wie aus Tab. 3 ersichtlich unterschieden sich die Bestände zwar noch bis in den Mai hinein in der Bestandeshöhe, nicht jedoch in der über die BBCH-Stadien bestimmten Entwicklungsgeschwindigkeit. Da die BBCH-Entwicklungsstadien u.a. über die Blattentfaltung und die Bestockung definiert werden, ist davon auszugehen, dass sich die Transpirationsintensität zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten nicht wesentlich unterschieden hat. Ein wegen möglicher Entwicklungsunterschiede unterschiedlicher Wasserverbrauch durch unterschiedliche Transpirationsintensität wurde in einem früheren Projekt als ein möglicher Faktor genannt, der verschiedene Bodenwassergehalte mit erklären könnte (Flaig und Schickler 2012).

### 3.7 Entnahme von Stechringproben und Ermittlung bodenphysikalischer Parameter

Ende September 2014 wurden auf den mit Sonden bestückten Bodenbearbeitungsparzellen Stechringproben in 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, um 30, um 50 und um 70 cm Bodentiefe für die bodenphysikalischen Messungen gezogen. Die Probenahme erfolgte nach VDLUFA-Methodenbuch (1991a). Pro Parzelle wurden in der Nähe, aber dennoch in ausreichendem Abstand von den Sonden, 4 Löcher gegraben und sukzessive von oben nach unten beprobt. Pro Grabloch und pro Horizont wurden 2 Proben gezogen, bei der Pflugvariante wegen der Lockerheit des Materials auch mehr. Pro Bodentiefe und Variante standen somit mindestens 8 Stechringproben für die Analyse zur Verfügung. Die Proben wurden noch am selben Tag gekühlt eingelagert und bis Dezember 2014 auf die Lagerungsdichte (Trockenrohddichte) und die nutzbare Feldkapazität untersucht. Die Analyse auf Trockenrohddichte erfolgte gemäß DIN ISO 11272 (DIN 1998) und die Bestimmung der nFK mit der Überdruckmethode gemäß VDLUFA-Methodenbuch (1991b).

### 3.8 Auswahl der Messwerte und Statistik

Aufgrund von Bodeninhomogenitäten, Steinen in der Nähe des Sondenrohrs, Luftspalten z.B. durch Trockenrisse (vgl. Abb. 3) oder Messausfälle können immer wieder Messwerte auftreten, die nicht plausibel sind. Daher wurden die Messwerte überprüft und folgende Auswahl getroffen:

TDR-Sonde: Bei 10 Rohren pro Bearbeitungsvariante und 3 Messungen pro Sonde und Tiefe wurden 30 Messwerte pro Tiefe, Messtag und Bearbeitungsvariante gewonnen. Bei den Messwerten der TDR-Sonde wurden alle jene Werte nicht in die Mittelwertbildung einbezogen, die kleiner als 5 Volumen% Wasser im Boden anzeigten. Hier wurde davon ausgegangen, dass es sich um Artefakte handelt, bei deren Messung kein Bodenschluss zum Sondenrohr gewährleistet war (Trockenrisse, Mäusegänge u.ä.). Diese Vermutungen wurden z.T. durch Beobachtungen vor Ort gestützt. Weiterhin wurden solche Werte als Ausreißer definiert,

- die um mehr als 5 Vol.% vom Mittelwert aus drei Messungen pro Sonde, Tiefe und Messtag abwichen,
- die um mehr als 10 Vol.% vom Mittelwert der 30 Messungen pro Tiefe und Messtag abwichen.

Dabei handelte es sich in der Regel um Abweichungen nach unten (zu geringe Feuchte). Aufgrund konsistent deutlich niedrigerer Messungen im Vergleich zu den anderen Sondenrohren wurden alle Werte der Sonde „P7“ in 0-20 und 20-40 cm Tiefe verworfen. Ein Vergleich aller 10 Messreihen in einer Tiefe und Bearbeitungsvariante findet sich im Anhang, Kap. 7.4.

Bei den FDR-Sonden (Enviroscan all-in-one) war die Entscheidung schwieriger. Bei einzelnen Sonden traten immer wieder Ausfälle auf, manche kurzfristig, manche über längere Zeiträume. Die Sonden P3, P4, M4 und D2 wurden wegen auffällig zu hoher oder zu niedriger Messwerte mit einer anderen Sonde („Diviner“) desselben Herstellers, die in das Sondenrohr passt, überprüft und vom Lieferanten im August neu kalibriert. Danach waren die Messwerte wenigstens partiell verwertbar. Die Messaussetzer tauchen in den Graphiken als Lücke auf. Längere Aussetzer hatten die Sonden P2 (24.7.-7.8. und wieder ab 4.9., alle Tiefen), M2 (Juni-August immer wieder kurzfristig, bei 10 cm), M3 (4.-11.9., alle Tiefen), M4 (7.8.-18.9., alle Tiefen), D1 (ab 12.8., bei 90 cm), D4 (9.5.-12.8., bei 10 cm).

Ein Vergleich aller vier Messreihen in einer Tiefe und Bearbeitungsvariante noch ohne die Elimination von Werten findet sich in Anhang Kap. 7.5. Damit kann der Leser selbst die Performance der einzelnen Sonden beurteilen. Dort ist ablesbar, dass die Sonden P3 und P4 nicht nur vor, sondern auch nach der Neukalibrierung (wieder eingesetzt am 20. 8. 2014) in den mittleren Bodentiefen deutlich unterschiedliche Bodenfeuchten im Vergleich zu P1 und P2 anzeigten. Die Messwerte von P1 und P2 sind näher an den mittleren Bodenfeuchten der TDR-Sonde, denen immerhin ca. 30 Messwerte zu Grunde liegen. Damit steht zu vermuten, dass die Bodenfeuchte-Werte der Sonden P1 und P2 näher an der Realität liegen als die Werte von P3 und P4. Aus Gründen der Konsistenz wurden daher die Messwerte von P3 und P4 generell nicht berücksichtigt. Bei der Sonde D1 weisen die deutlich niedrigeren Bodenfeuchte-Werte unterhalb 50 cm darauf hin (Abb. A-26, A-27), dass im Untergrund eine andere (sandigere) Bodenart vorliegt, die bei der Vorbeprobung nicht erfasst wurde – vermutlich wegen kleinräumigen Wechsels der Bodenart. Dieses Phänomen trat 2011 bereits in der benachbarten Mulchvariante auf.

Für die Mittelwertbildung und die Darstellung des Tiefenprofils, den Vergleich mit den Messungen der TDR-Sonde und den Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten untereinander wurden neben den Aussetzern somit nicht berücksichtigt:

- P3 und P4: alle Messwerte (nur hier traten auch Messwerte < 5 Vol.% Bodenfeuchte auf; vgl. Abb. A-13)
- M4: Werte alle Tiefen vor dem 18.9.
- D1: Werte für 70 und 90 cm von Anfang an
- D2: Werte vor dem 20.8.

Auf Fehlerbalken in den Graphiken wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Eine weitergehende statistische Analyse wurde durchgeführt für die

- Trockenrohichte (Varianzanalyse bzw. Kruskal-Wallis-Test - eine Varianzanalyse anhand der Rangsummen, die aus den Beobachtungswerten gebildet werden, wenn Tests auf Normalverteilung und gleiche Varianzen negativ verlaufen - jeweils kombiniert mit paarweisem Vergleich (Tukey's bzw. Dunn's Test)),
- nutzbare Feldkapazität (Varianzanalyse bzw. Kruskal-Wallis-Test kombiniert mit paarweisem Vergleich, s.o.)
- Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten pro untersuchter Bodentiefe mit den Messwerten der TDR-Sonde. Für den Vergleich der unterschiedlichen Behandlungen (Bodenbearbeitung) im Zeitverlauf wurden die Flächen unter den Verlaufskurven berechnet (AUC-Verfahren) und die Flächen einem Kruskal-Wallis-Test mit paarweisem Vergleich nach Dunn unterzogen.

Die statistischen Analysen wurden mit Excel und Sigmaplot 13.0 durchgeführt.

Wegen der Messausfälle und damit einer inhomogenen Datenlage wurde auf eine weitergehende statistische Auswertung der FDR-Daten verzichtet, zumal ohnehin nur maximal 4 Messwerte pro Erfassung zur Verfügung gestanden hätten.

Weiterhin relevant ist die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Lagerungsdichte der Böden (IMKO o. J.). Bei den TDR-Sonden wurde die universelle Kalibrierfunktion für mineralische Böden bei einer durchschnittlichen Lagerungsdichte von etwa  $1,4 \text{ g/cm}^3$  erstellt. Wenn die Dichte des Materials deutlich höher als die Kalibrierdichte ist ( $> 1,7 \text{ g/cm}^3$ ), so wird die Feuchte übergewichtet, während bei niedrigeren Dichten ( $< 1,2 \text{ g/cm}^3$ ) ein zu geringer Wassergehalt gemessen würde. Der bei höheren Lagerungsdichten

größere Anteil der Bodenmatrix am Gesamtvolumen bewirkt dabei eine Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten, ohne dass der Wassergehalt zunimmt. Mit der Sonde wird daher ein höherer Wassergehalt bestimmt. Niedrige Lagerungsdichten haben den umgekehrten Effekt. Bei Messungen in Materialien mit deutlich höheren oder niedrigeren Dichten als  $1,4 \text{ g/cm}^3$  muss dieser Effekt daher korrigiert werden. Die Korrekturfunktion lautet:

Feuchte (korrigiert) = Feuchte (gemessen) – (12,12 \* Lagerungsdichte – 17,05).

Die Trockenrohdichten der Varianten in Dossenheim lagen bei Probenahme im September 2014 zwischen  $1,31$  und  $1,7 \text{ g/cm}^3$ , zumeist zwischen  $1,4$  und  $1,6 \text{ g/cm}^3$  (Tab. A-1), also noch im akzeptablen Bereich. Auf eine Korrektur der Bodenfeuchtwerte wurde daher verzichtet.

## 4 Auswertungen

### 4.1 Das Messprogramm

Im Gegensatz zum ersten Projekt 2011 konnte das Projekt bereits im Februar beginnen. Dadurch konnte die Frühjahrstrockenheit dieses Jahres messtechnisch gut erfasst werden. Bereits im April waren Auswirkungen der Trockenheit zu sehen und zu messen. So konnte man zum Teil bereits makroskopisch deutliche Unterschiede an der Bodenoberfläche und -struktur erkennen (Abb. 3 a-d).



Abb. 3: Photos von der Bodenoberfläche am Standort Dossenheim am 24. 4. 2014: a) und b) Pflugvariante mit Trockenrissen; c) Mulchvariante; d) Direktsaatvariante (Photos: Evelyn Düll)

Während in der Pflugvariante breite und bis zu 30 cm tiefe Trockenrisse auftraten, waren solche Auswirkungen der Frühjahrstrockenheit in diesem Ausmaß weder auf Mulch- noch Direktsaatflächen zu erkennen. Bei der Mulchsaat fielen die Schrumpfrisse deutlich geringer aus.

Folgende Daten wurden erhoben:

TDR-Sonde:

- Je Bearbeitungsvariante (Pflug, Mulch-, Direktsaat) zehn Messstellen (Tecanatrohre).
- Volumetrische Bodenfeuchte in vier Tiefen: 0-20, 20-40, 40-60 und 60-80 cm Tiefe als Momentaufnahme einmal wöchentlich.

Stationäre FDR-Sonden:

- Je Bearbeitungsvariante (Pflug, Mulch-, Direktsaat) vier Messstellen.
- Volumetrische Bodenfeuchte in fünf Tiefen: 10, 30, 50, 70 und 90 cm, mit stündlichen Werten und Speicherung im Logger, Auslesung wöchentlich.

Niederschläge:

- Regenmesser mit stündlichen Werten der Niederschläge vor Ort.
- Lufttemperatur in ca. 1 m Höhe.
- Weitere Werte über Wetterstation des Julius-Kühn-Institutes in unmittelbarer Nähe zur Versuchsfläche.

Bestandesentwicklung:

- Wöchentliche Erfassung der Bestandeshöhe in Zentimetern.
- Wöchentliche Erfassung der BBCH-Stadien.

Bodenphysikalische Parameter:

- Einmalige Bodenprobenahme durch Stechringe.
- Ermittlung von Trockenrohddichte (Lagerungsdichte) und nutzbarer Feldkapazität im Labor.
- Mittelwertbildung aus 8 Proben pro Tiefenstufe und Variante.
- Korrektur der TDR-Messwerte, wenn die Lagerungsdichte von der für die Kalibration gültigen Bandbreite abwich (war nicht der Fall).

Folgende Auswertungen und Darstellungen wurden vorgenommen:

- 1) Vergleich der Niederschlagswerte zwischen dem Regenmesser vor Ort und der Vergleichsstation (s. Kap. 3.5)
- 2) Bodenfeuchte im Tiefenprofil (TDR-Sondenmessungen): Mittelwertbildung aus je 30 Messwerten pro Messtag, Variante und Tiefenstufe (ohne Ausreißer, vgl. Kap. 3.8); Darstellung der 4 Tiefenstufen pro Variante.
- 3) Bodenfeuchte im Tiefenprofil (stationäre FDR-Profilsonden): Mittelwertbildung aus je 4 Messwerten pro Stunde, Variante und Tiefenstufe, dabei war die Mittelwertbildung wegen relativ vieler Messausfälle und Ausreißer erschwert (vgl. Kap. 3.8). Darstellung der 5 Tiefenstufen pro Variante.

- 4) Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten: Je Tiefenstufe Vergleich Pflug/Mulch-/Direktsaat jeweils für TDR- und FDR-Messungen.
- 5) Vergleich TDR-Sonde und FDR-Profilsonde für die entsprechenden Tiefenstufen (0-20 cm versus 10 cm, 20-40 cm versus 30 cm, 40-60 cm versus 50 cm, 60-80 cm versus 70 cm). Hierfür wurde bei den FDR-Sonden der Tagesmittelwert zwischen 9 und 18 Uhr am korrespondierenden Messtag der TDR-Sonde gebildet.
- 6) Im Anhang: Graphiken zum Messverlauf aller 10 Sondenmessungen (TDR) bzw. 4 Sonden (FDR) pro Tiefenstufe und Variante im Vergleich zur Dokumentation (mit Ausreißern, lediglich Elimination von Messausfällen, um die Graphik überhaupt darstellbar zu machen).

## 4.2 Bodenfeuchte im Tiefenprofil der TDR-Sondenmessungen

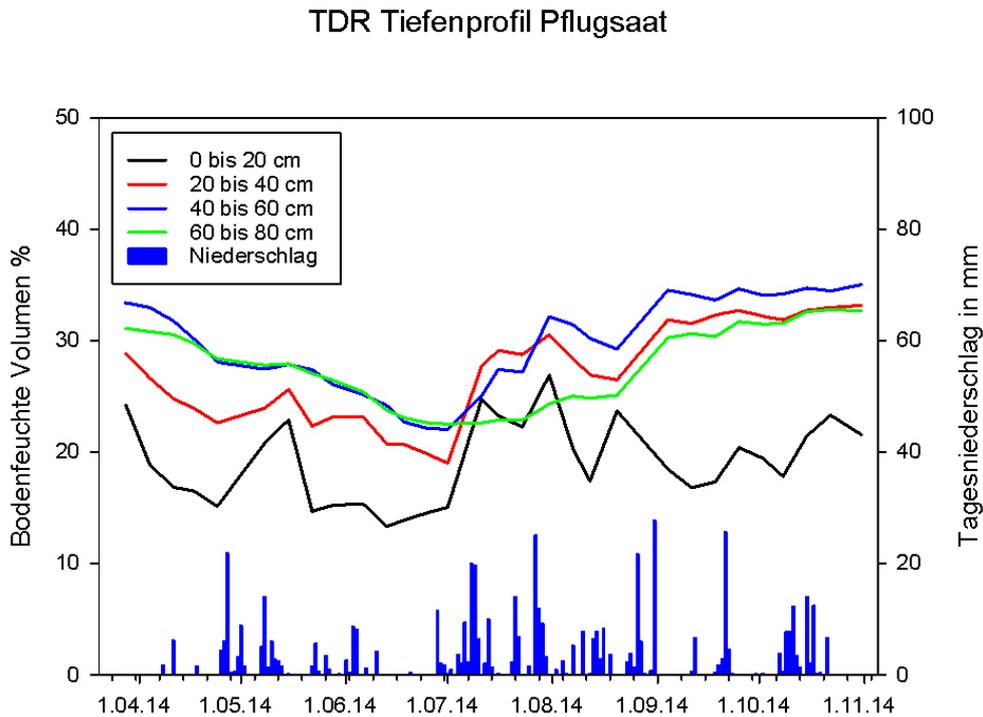


Abb. 4: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Pflugvariante der Versuchsfläche Dossenheim vom 28. 3. bis 31. 10. 2014; wöchentliche Messungen mit der TDR-Sonde.

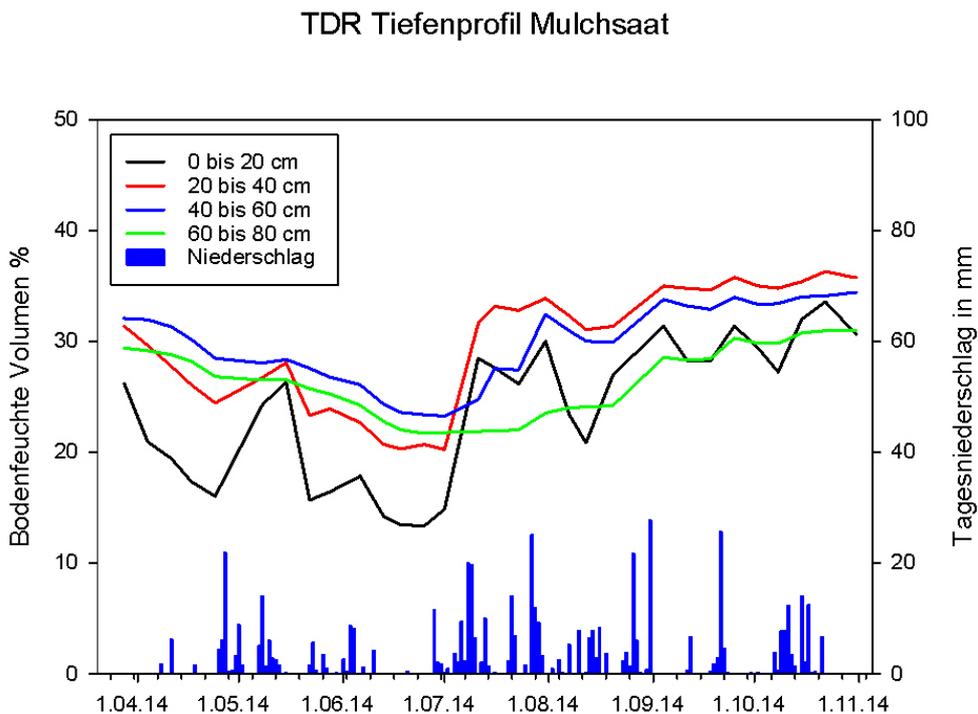


Abb. 5: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Mulchsaat-Variante der Versuchsfläche Dossenheim vom 28. 3. bis 31. 10. 2014; wöchentliche Messungen mit der TDR-Sonde.

## TDR Tiefenprofil Direktsaat

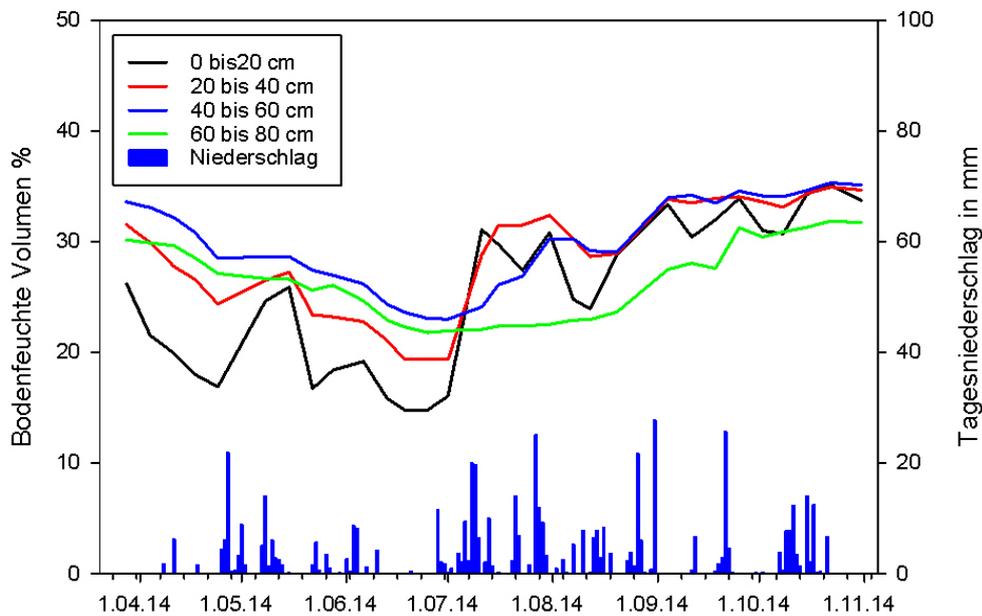


Abb. 6: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Direktsaat-Variante der Versuchsfläche Dossenheim vom 28. 3. bis 31. 10. 2014; wöchentliche Messungen mit der TDR-Sonde.

Der Bodenwassergehalt der oberen 20 cm der Böden reagiert hinsichtlich seiner Amplitude am empfindlichsten auf Niederschlagsereignisse bzw. Austrocknung. So spiegeln sich die Trockenphase des Frühjahrs und die Niederschlagsereignisse Ende April/Anfang Mai sowie im Laufe des Sommers im Oberboden besonders gut wider. Je tiefer gemessen wurde, desto gemäßigter verlaufen die Amplituden; in 60-80 cm Tiefe werden eher langfristige Trends wiedergegeben. Die „Bodenfeuchtefront“ der Niederschlagsereignisse erreicht tiefere Bodenschichten z.T. verzögert (vgl. Abb. 4-6, ab 40 cm). Die absolute Höhe des gemessenen Bodenwassergehalts ist zwischen den Bodentiefen unterschiedlich. Die höchste Bodenfeuchte ist in der Regel in einer Tiefe von 40-60 cm zu finden. Ein Grund dafür könnte sein, dass oberhalb noch viele entwässernde Grobporen zu finden sind, in größerer Tiefe jedoch die Lagerungsdichte ansteigt und eventuelle auch sandigere Anteile im Boden zu finden sind, die gegenüber dem sonst vorherrschenden tonigen Lehm eine geringere Wasserhaltekapazität besitzen. Ansonsten verlaufen die Tiefenprofile in den Bodenbearbeitungsvarianten hinsichtlich Reaktion auf Niederschläge und Abstufung je nach Tiefe weitgehend ähnlich (vgl. Abb. 10-13).

Alle dargestellten TDR-Messwerte sind bereits die Mittelwerte aus dreißig Einzelmessungen dieses Messtages in der gleichen Tiefe und der gleichen Bodenbearbeitungsvariante (Drehen der Sonde im Rohr, s. Kap 3.2; 10 Sondenrohre pro Variante, 3 Messungen pro Rohr pro Messtag). Zur Behandlung von Ausreißern s. Kap. 3.8.

### 4.3 Bodenfeuchte im Tiefenprofil der FDR-Sondenmessungen

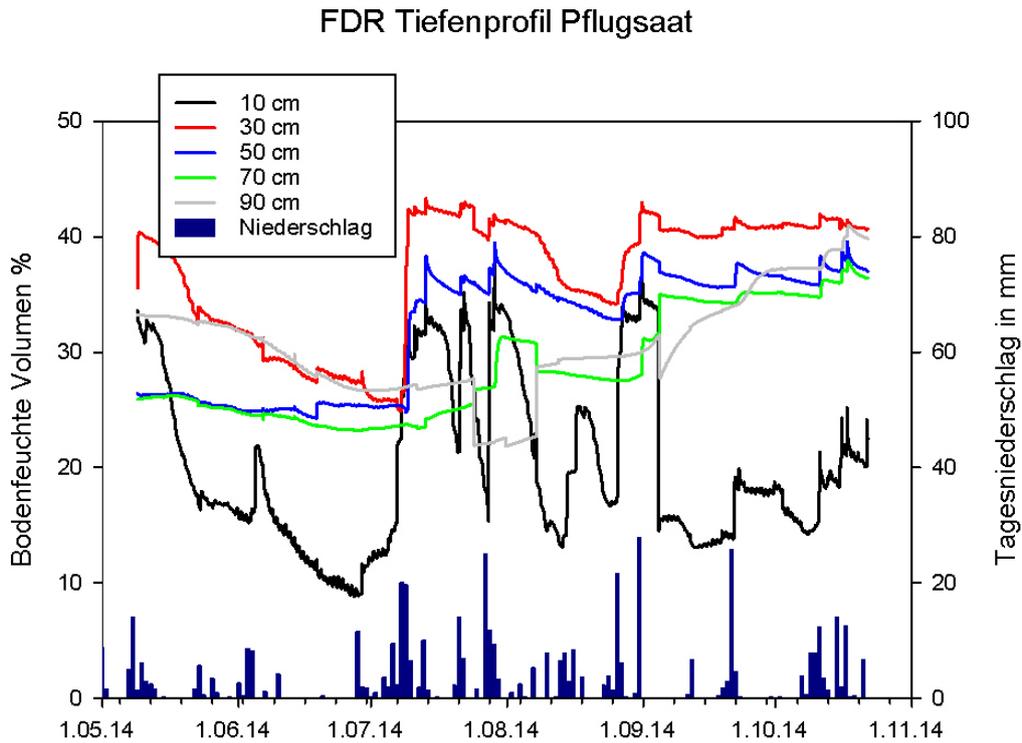


Abb. 7: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Pflugvariante der Versuchsfläche Dossenheim vom 9. 5. bis 21. 10. 2014; stündliche Messungen mit der FDR-Sonde.

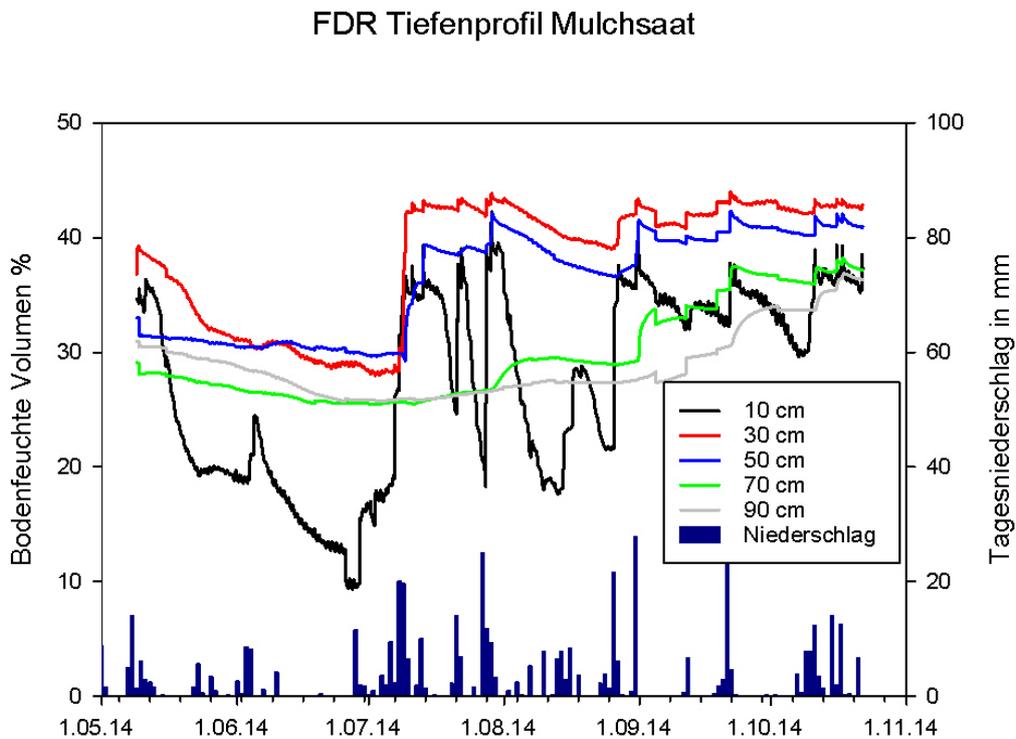


Abb. 8: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Mulchsaatvariante der Versuchsfläche Dossenheim vom 9. 5. bis 21. 10. 2014; stündliche Messungen mit der FDR-Sonde.

## FDR Tiefenprofil Direktsaat

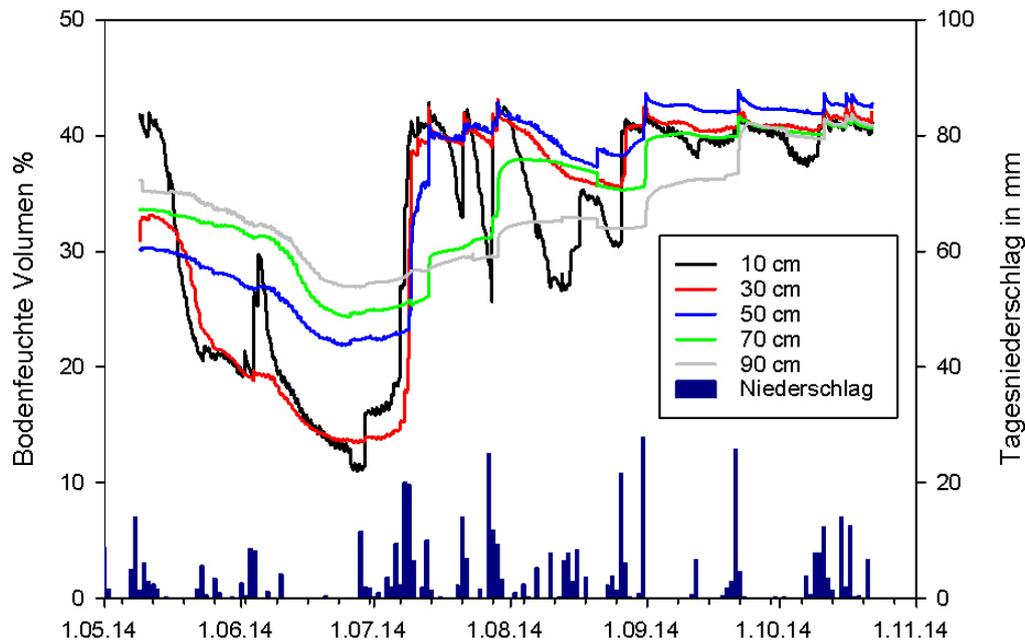


Abb. 9: Tiefenprofil der Bodenfeuchtwerte (Volumen-% Wasser) in der Direktsaatvariante der Versuchsfläche Dossenheim vom 9. 5. bis 21. 10. 2014; stündliche Messungen mit der FDR-Sonde.

Die Betrachtung des Tiefenprofils der FDR-Sonden kommt grundsätzlich zu denselben Ergebnissen wie bei den TDR-Sonden: In den oberen 10-15 cm werden die Feuchteschwankungen im Boden gut aufgelöst. Im Vergleich zur wöchentlichen Ablesung der TDR-Sonden kommt hier die zeitlich feiner aufgelöste Datenerhebung gut zur Darstellung. Mit zunehmender Tiefe wird die Amplitude der Bodenfeuchte geringer. Die höchsten Bodenfeuchten werden im Bereich zwischen 30 und 50 cm erreicht. Brüche im Verlauf der Bodenfeuchte, die nicht mit Niederschlägen oder deren Fehlen erklärbar sind, können der Tatsache geschuldet sein, dass zu manchen Zeiten nur 1-2 Sonden pro Variante und/oder Tiefenstufe zuverlässige Messwerte lieferten (Beispiel: Pflugvariante, Ende Juli bis Anfang August, 70 und 90 cm). Bei der Direktsaatvariante fällt auf, dass die Messwerte in 10 und in 30 cm Tiefe näher beieinander sind als bei den anderen beiden Varianten – bis Juli war in 30 cm Tiefe deutlich weniger Bodenfeuchte zu messen, ab September in 10 cm mehr als bei Mulchsaat und vor allem Pflug (s. Kap. 4.5).

#### 4.4 Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten (TDR-Sonde)

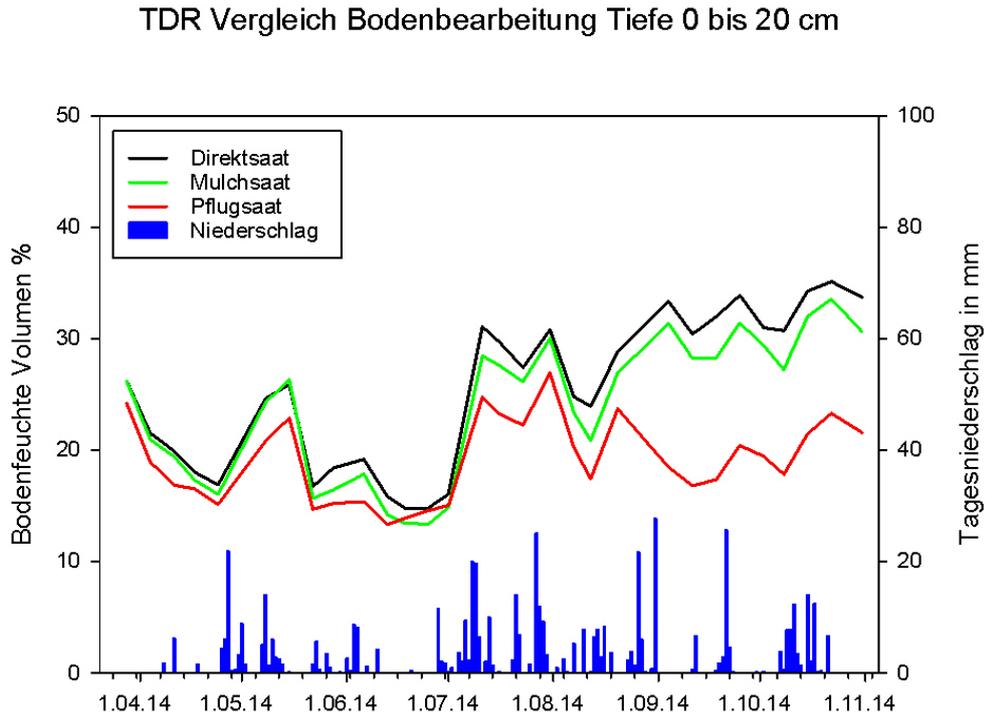


Abb. 10: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Mobile TDR-Sonde, 0-20 cm.

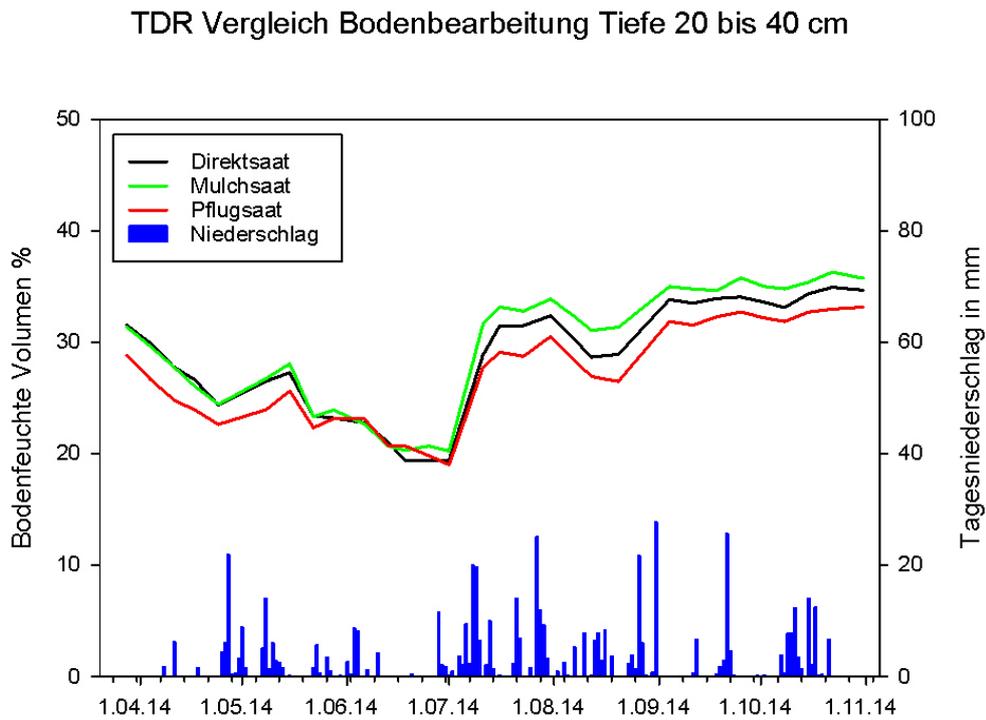


Abb. 11: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Mobile TDR-Sonde, 20-40 cm.

## TDR Vergleich Bodenbearbeitung Tiefe 40 bis 60 cm

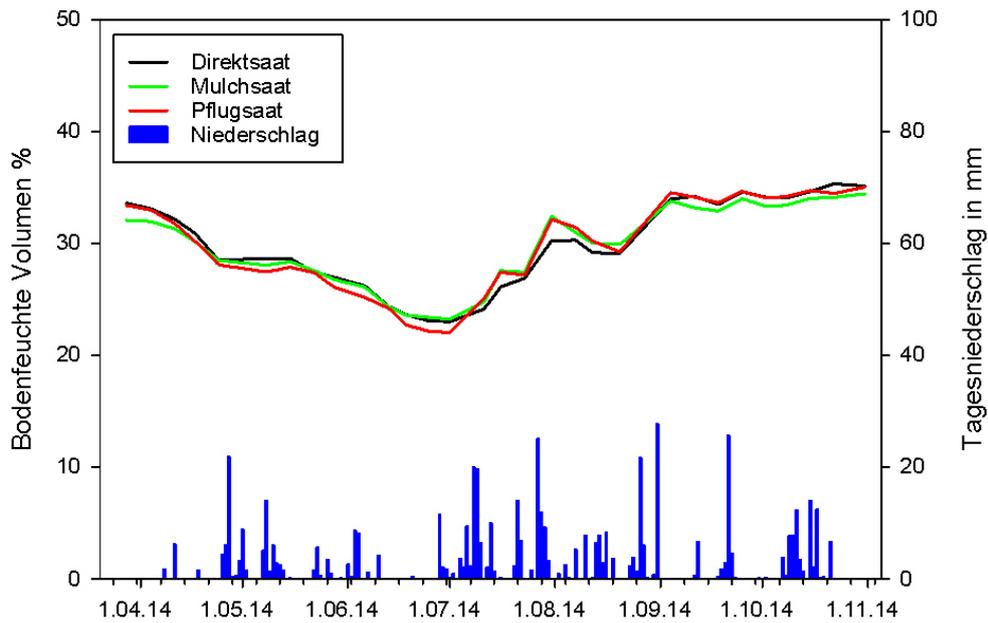


Abb. 12: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Mobile TDR-Sonde, 40-60 cm.

## TDR Vergleich Bodenbearbeitung Tiefe 60 bis 80 cm

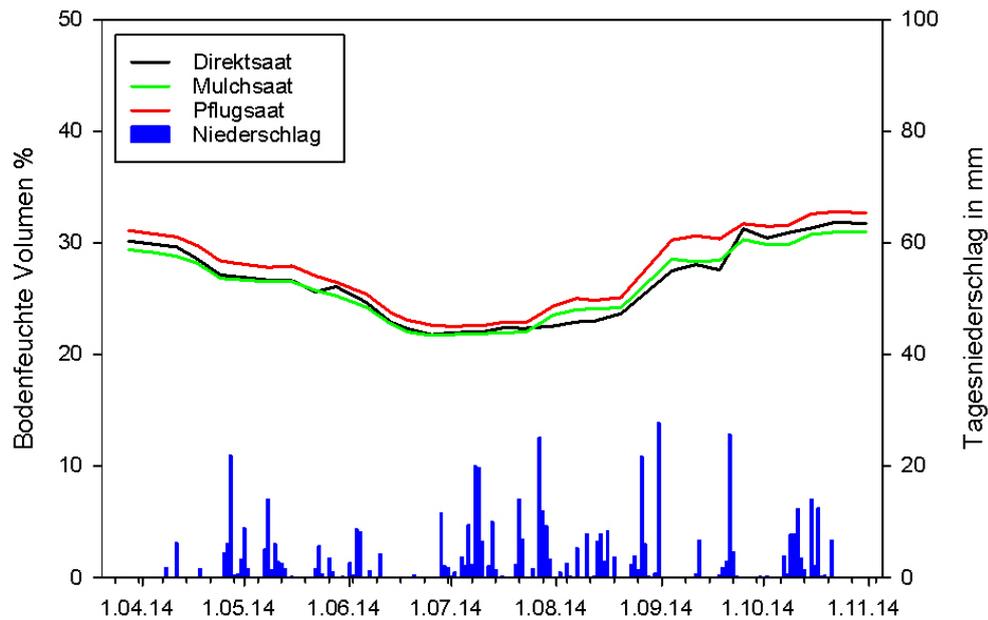


Abb. 13: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Mobile TDR-Sonde, 60-80 cm.

Die Ausgangsfragestellung lautete: Kann man in den verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten Unterschiede im Bodenwassergehalt nachweisen? Die beste Darstellung zur Klärung dieser Frage ist eine Gegenüberstellung der Messwertreihen von Pflug, Mulch- und Direktsaat in einer bestimmten Tiefe. Es zeigte sich, dass die Pflugvariante in den oberen 40 cm tendenziell weniger Bodenfeuchte aufwies als Mulchsaat- und Direktsaatvariante (Abb. 10 und 11). In 40-60 cm Tiefe war kein Unterschied zwischen den Bearbeitungsvarianten zu messen (Abb. 12). In 60-80 cm Tiefe wiederum schien die Pflugvariante tendenziell ein wenig mehr Bodenwasser zu besitzen als die weniger intensiv bearbeiteten Varianten (Abb. 13).

Die statistische Auswertung über das AUC-Verfahren („area under the curve“, Ermittlung der Fläche unter der Kurve und weitergehende statistische Berechnungen mit den Flächenwerten, s. Kap. 3.8) ergab (Tab. 4), dass sich in 0-20 cm Tiefe bis Ende August nur Direktsaat und Pflug signifikant voneinander unterschieden. Danach wiesen alle Bearbeitungsvarianten voneinander signifikant verschiedene Bodenfeuchtwerte auf (Abb. 10). In 20-40 cm Tiefe ist nur der Unterschied zwischen Mulch und Pflug signifikant (Abb. 11). Ab 40 cm Bodentiefe (Abb. 12 und 13) unterschieden sich die Bearbeitungsverfahren hinsichtlich der Bodenfeuchte nicht mehr (auch wenn die Pflugvariante in 60-80 cm mit  $p=0,058$  knapp an die Signifikanzschwelle kam).

Tab. 4: Statistische Auswertung der Unterschiede in den Bodenfeuchtwerten zwischen den Bearbeitungsvarianten im Laufe der Zeit (AUC-Verfahren mit Kruskal-Wallis-Test und Dunn's Methode für paarweise Vergleiche). P: Pflug, M: Mulchsaat, D: Direktsaat; n.s.: nicht signifikant bei Signifikanzschwelle  $p = 0,05$ ; \*  $p \leq 0,05$ , \*\*  $p \leq 0,01$ , \*\*\*  $p \leq 0,001$ . Bei 40-60 cm Tiefe wäre auch eine Varianzanalyse möglich gewesen; das Ergebnis wäre ähnlich ( $p = 0,977$ ).

Bodentiefe	0-20 cm gesamt	0-20 cm bis 20.8.	0-20 cm ab 20.8.	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm
P-M-D zusammen	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***	$p = 0,691$ n.s.	$p = 0,058$ n.s.
P ↔ M	$p < 0,001$ ***	$p = 0,051$ n.s.	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***		
M ↔ D	$p = 0,012$ *	$p = 0,162$ n.s.	$p < 0,001$ ***	$p = 0,080$ n.s.		
P ↔ D	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***	$p < 0,001$ ***	$p = 0,245$ n.s.		

## 4.5 Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten (FDR-Sonde)

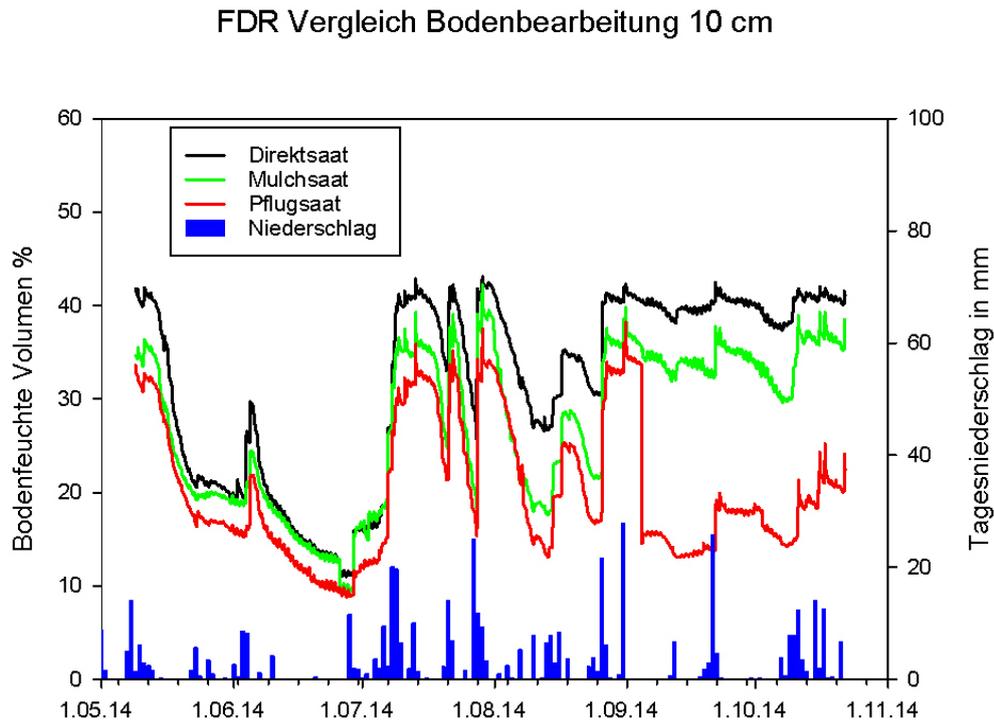


Abb. 14: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Stationäre FDR-Sonde,  $10 \pm 5$  cm.

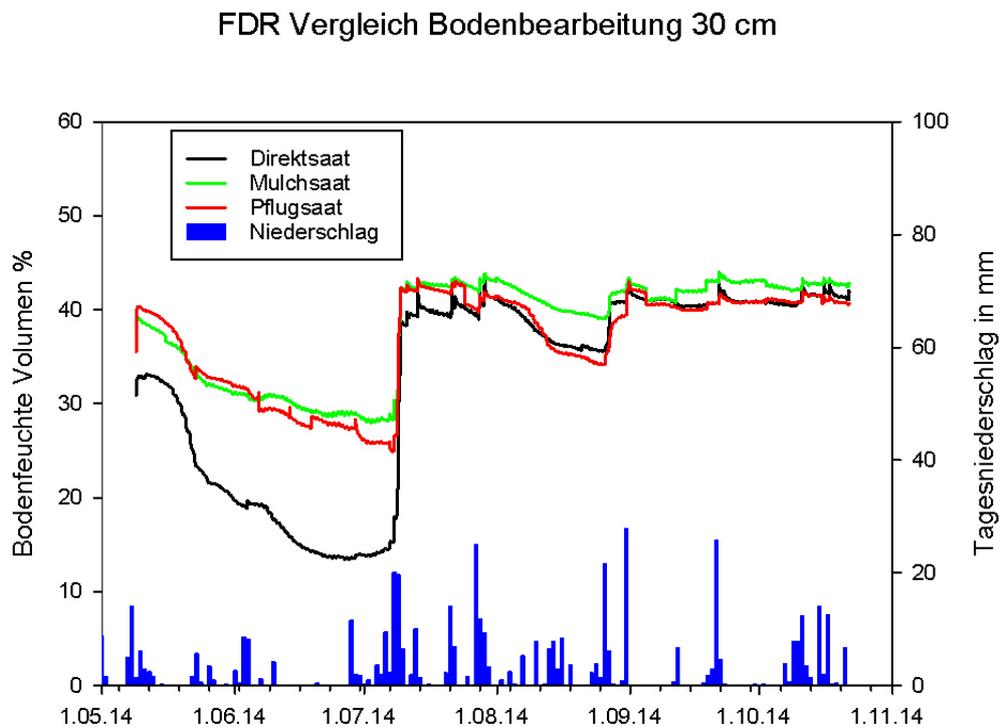


Abb. 15: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Stationäre FDR-Sonde,  $30 \pm 5$  cm.

## FDR Vergleich Bodenbearbeitung 50 cm

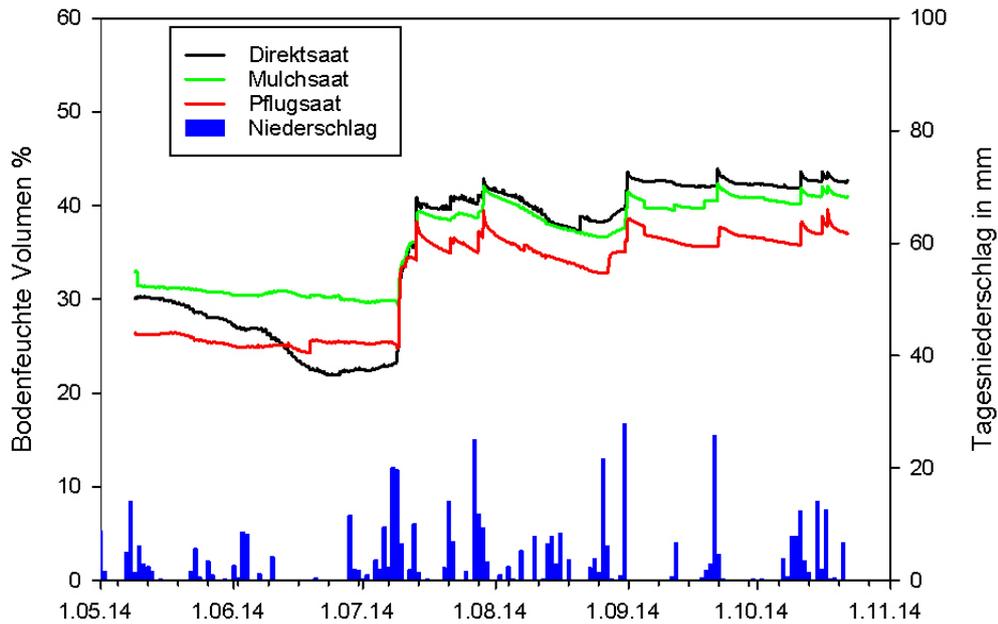


Abb. 16: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Stationäre FDR-Sonde,  $50 \pm 5$  cm.

## FDR Vergleich Bodenbearbeitung 70 cm

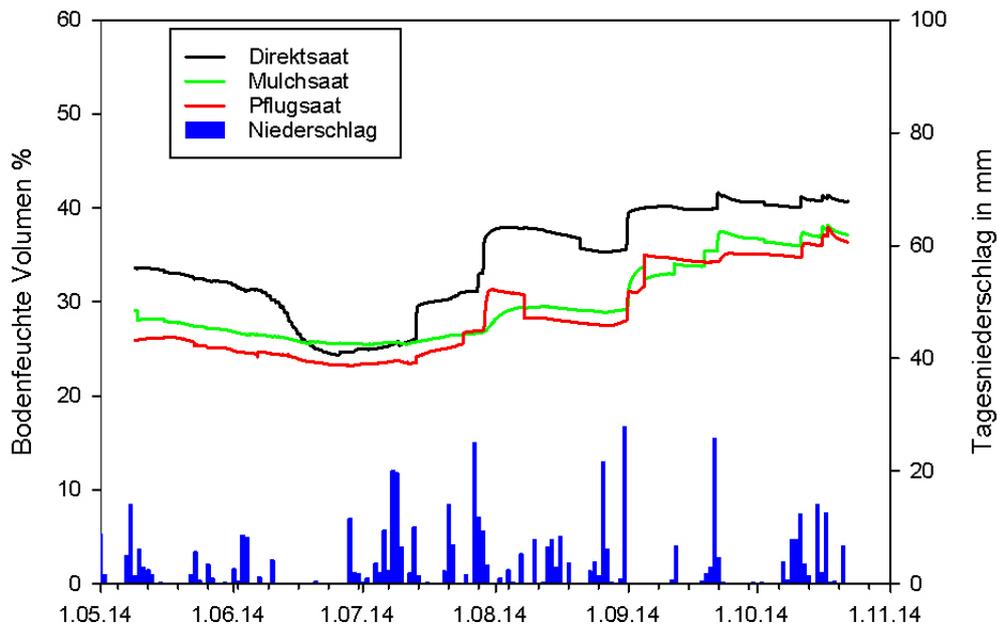


Abb. 17: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Stationäre FDR-Sonde,  $70 \pm 5$  cm.

### FDR Vergleich Bodenbearbeitung 90 cm

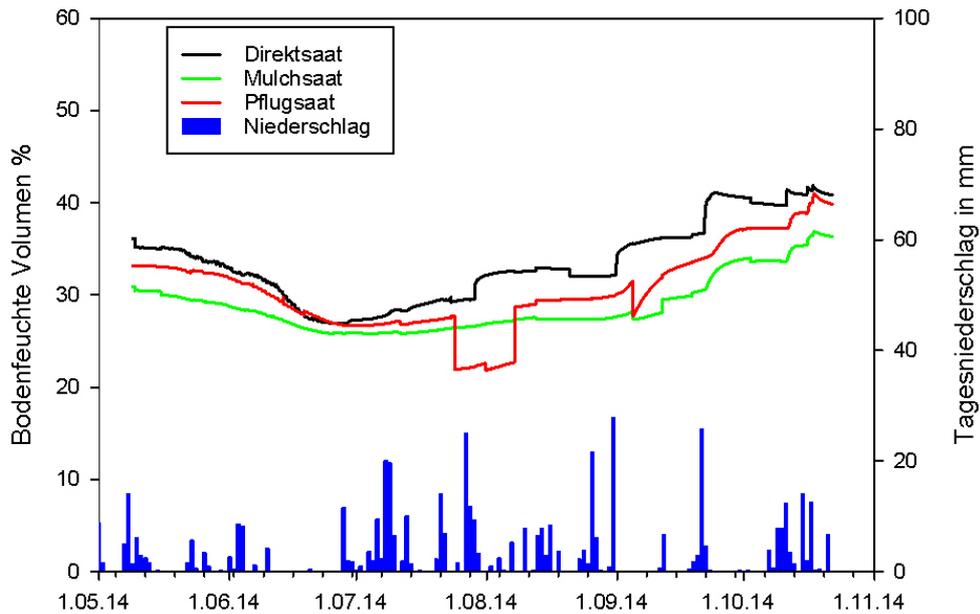


Abb. 18: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte auf dem Versuchsfeld Dossenheim. Stationäre FDR-Sonde,  $90 \pm 5$  cm.

In der Tiefenstufe 10 cm liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei den TDR-Sondenmessungen: Die Pflugvariante weist in der Tendenz weniger Bodenfeuchte auf als die anderen beiden Parzellen; die Direktsaat hat tendenziell eine höhere Bodenfeuchte, auch höher als Mulchsaat (Abb. 14). Die Unterschiede treten vor allem ab Ende August/Anfang September deutlich zutage. Bei 30 cm sind mit Ausnahme der trockenen Anfangsphase, in der die Direktsaat die geringste Feuchte aufwies, keine belastbaren bearbeitungsbedingten Unterschiede auszumachen (Abb. 15). Ab 50 cm schließlich scheint Direktsaat etwas mehr Bodenfeuchte aufzuweisen, vor allem nach den Niederschlägen im Juli (Abb. 16-18). Dies entspricht nicht den Ergebnissen der TDR-Sonde. Insgesamt sind die Ergebnisse wegen der Sonden- und Messausfälle schwierig zu interpretieren. Zum Teil beruhen die Verläufe in manchen Perioden nur auf einer Sonde. Insofern sollten hier Schlussfolgerungen nur mit großer Vorsicht gezogen werden. Eine statistische Überprüfung ist wegen der Inkonsistenzen der Datenlage ohnehin nicht sinnvoll.

## 4.6 TDR- und FDR-Sonden im Vergleich

Die Messwerte von TDR- und FDR-Sonden verlaufen über den gesamten Messzeitraum hinweg weitgehend parallel. Die Werte der FDR-Sonden sind fast durchgehend höher (Abb. 19-30, vgl. Scherzer et al. 1996). Lediglich in den oberen 20 cm, bei 60-80 cm in der Pflugvariante und in den trockeneren Phasen liegen die Werte enger beieinander. In den feuchteren Perioden im Hoch- und Spätsommer liegen die Enviroscan-Werte fast immer höher als die Trime-IPH-Werte (Ausnahme Pflug 0-20 cm). Vergleichbar sind die Messwerte der beiden Sondentypen, wenn es darum geht, Tendenzen im Bodenwassergehalt zu erfassen. Die absolute Höhe der Bodenfeuchte-Werte hingegen ist nicht direkt vergleichbar. Bei der Diskussion des Sondenvergleichs ist auch zu bedenken, dass bei den TDR-Messungen eine einzige Sonde zum Einsatz kam, die in den verschiedenen Rohren auf den Parzellen maß. Hier konnte es keine Variabilität zwischen

verschiedenen Sonden geben. Die FDR-Messungen beruhen hingegen auf 12 verschiedenen Sonden (4 pro Bearbeitungsvariante) mit z.T. erheblicher Variabilität und leider auch häufigen Messausfällen.

Vergleich der Messverfahren TDR und FDR  
Pflugsaat 0 bis 20 cm

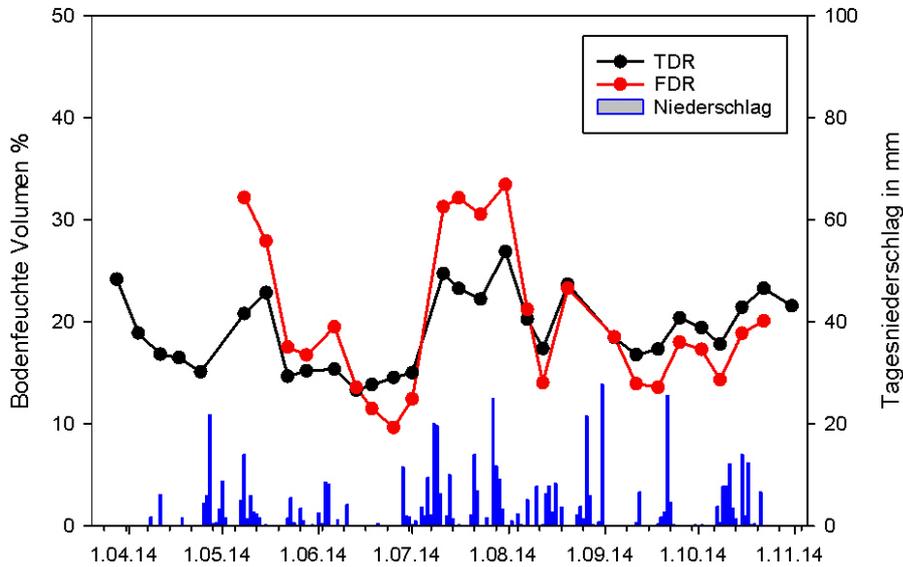


Abb. 19: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Pflugvariante 0-20 cm bzw.  $10 \pm 5$  cm. TDR-Werte wie im Tiefenprofil oder Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren (Kap. 4.2 und 4.4). FDR-Messungen auf stündlicher Basis am Messtag zwischen 9 und 18 Uhr gemittelt.

Vergleich der Messverfahren TDR und FDR  
Pflugsaat 20 bis 40 cm

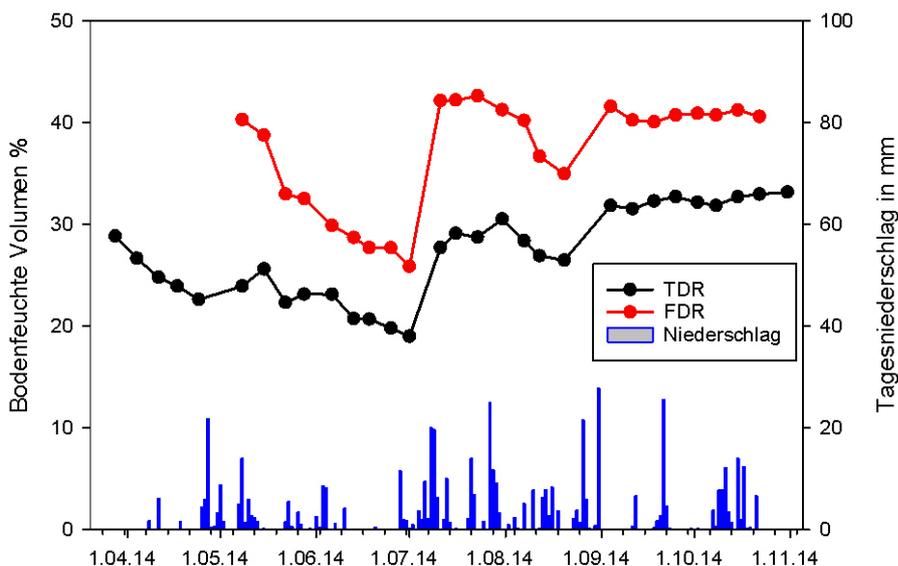


Abb. 20: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Pflugvariante 20-40 cm bzw.  $30 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 19.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Pflugsaat 40 bis 60 cm

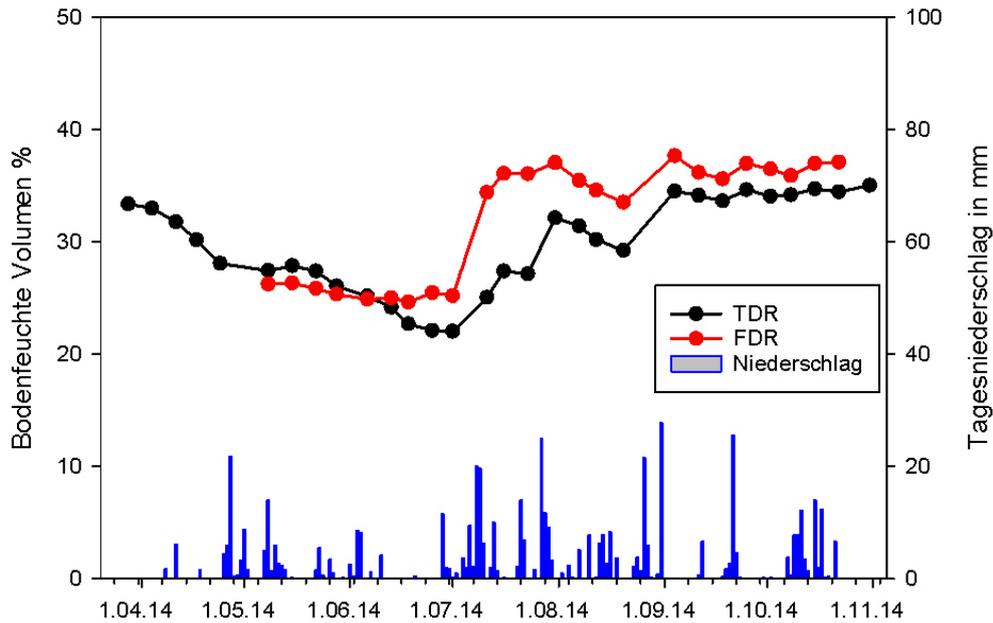


Abb. 21: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Pflugvariante 40-60 cm bzw.  $50 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 19.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Pflugsaat 60 bis 80 cm

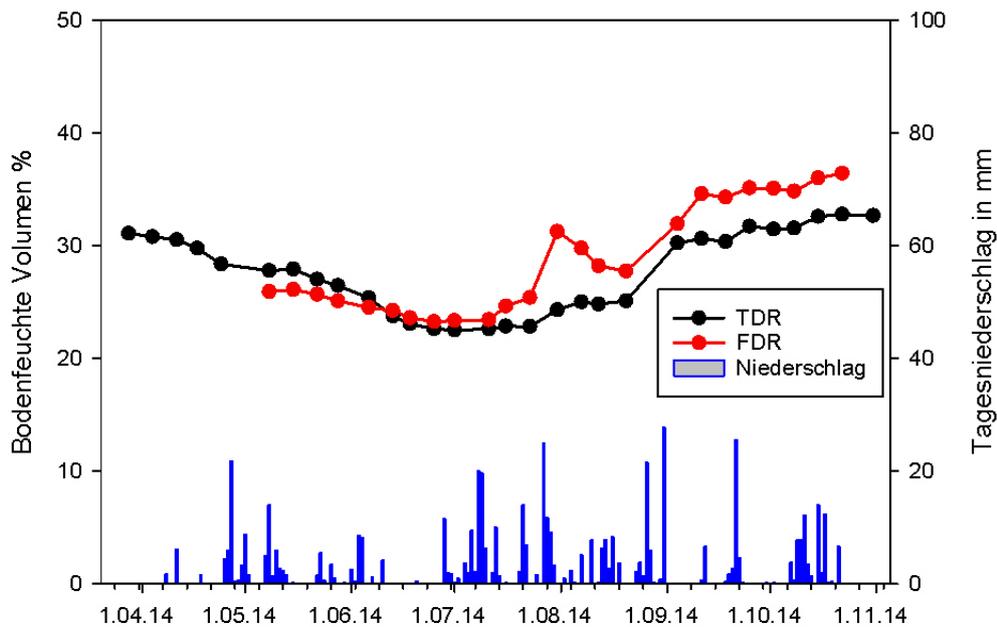


Abb. 22: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Pflugvariante 60-80 cm bzw.  $70 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 19.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Mulchsaat 0 bis 20 cm

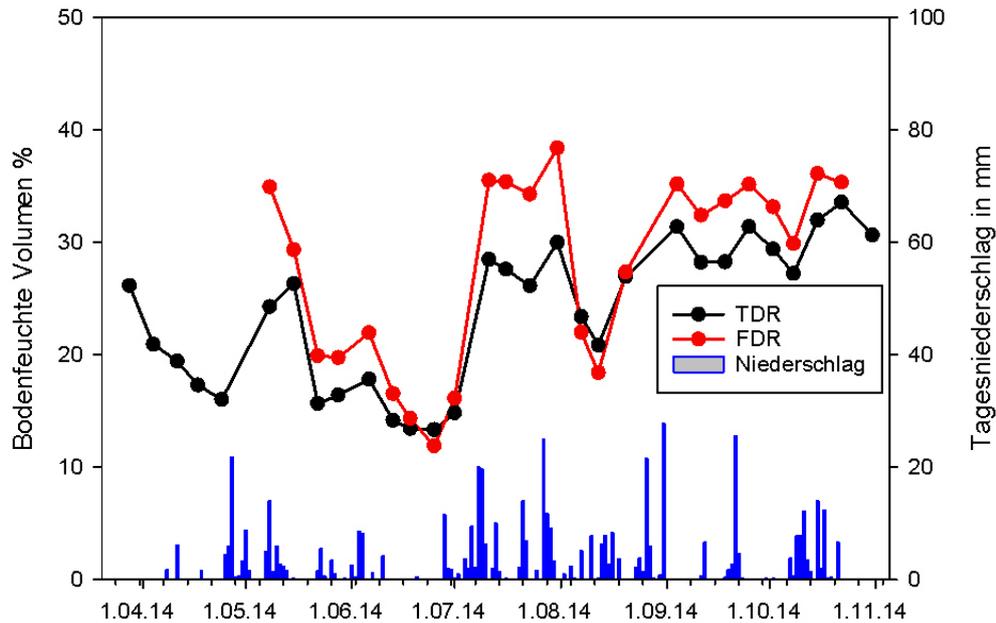


Abb. 23: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Mulchsaatvariante 0-20 cm bzw.  $10 \pm 5$  cm. TDR-Werte wie im Tiefenprofil oder Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren (Kap. 4.2 und 4.4). FDR-Messungen auf stündlicher Basis am Messtag zwischen 9 und 18 Uhr gemittelt.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Mulchsaat 20 bis 40 cm

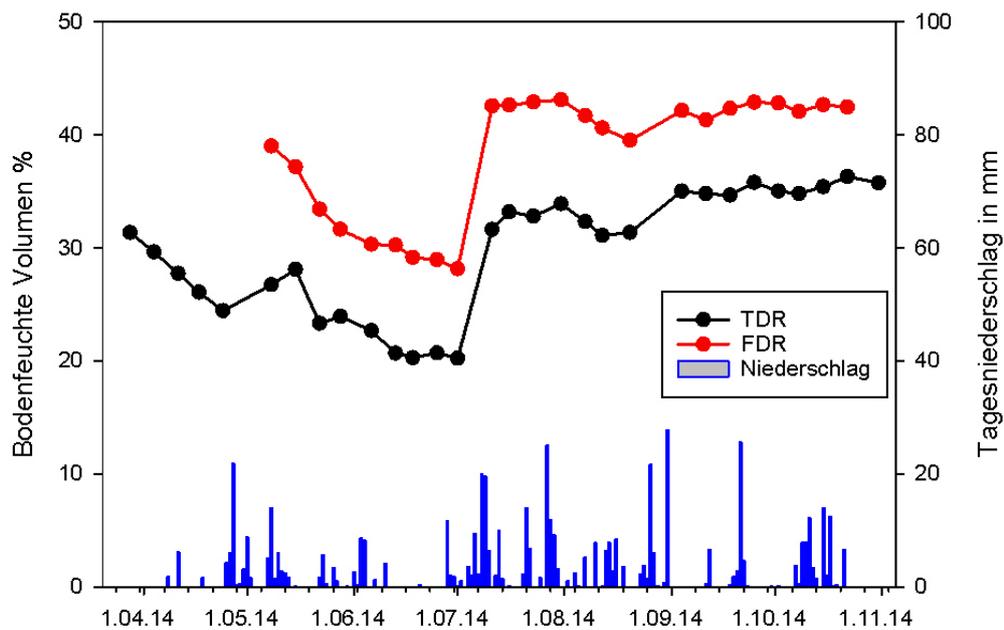


Abb. 24: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Mulchsaatvariante 20-40 cm bzw.  $30 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 23.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Mulchsaat 40 bis 60 cm

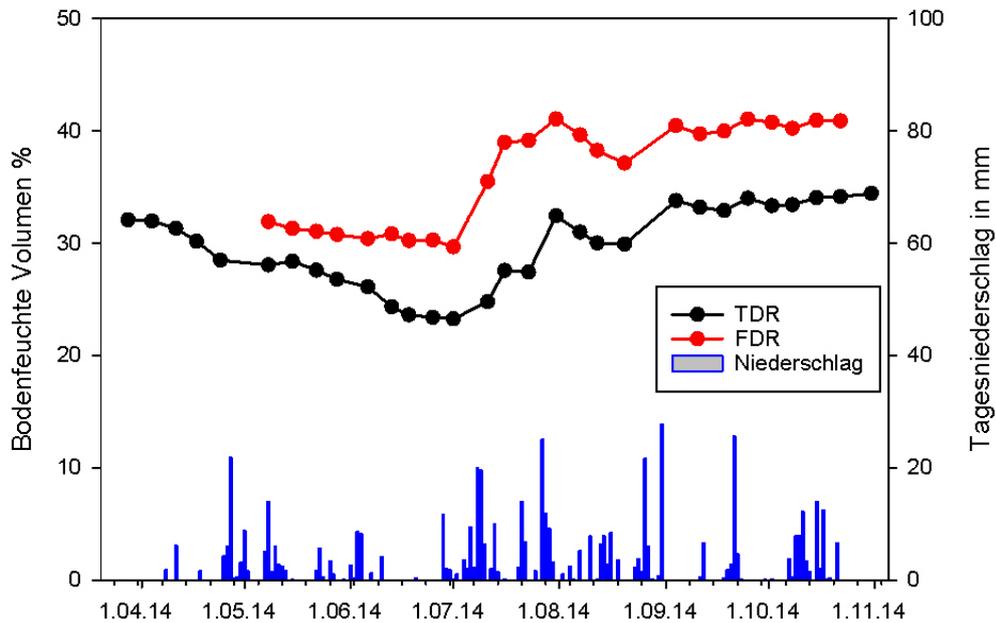


Abb. 25: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Mulchsaatvariante 40-60 cm bzw.  $50 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 23.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Mulchsaat 60 bis 80 cm

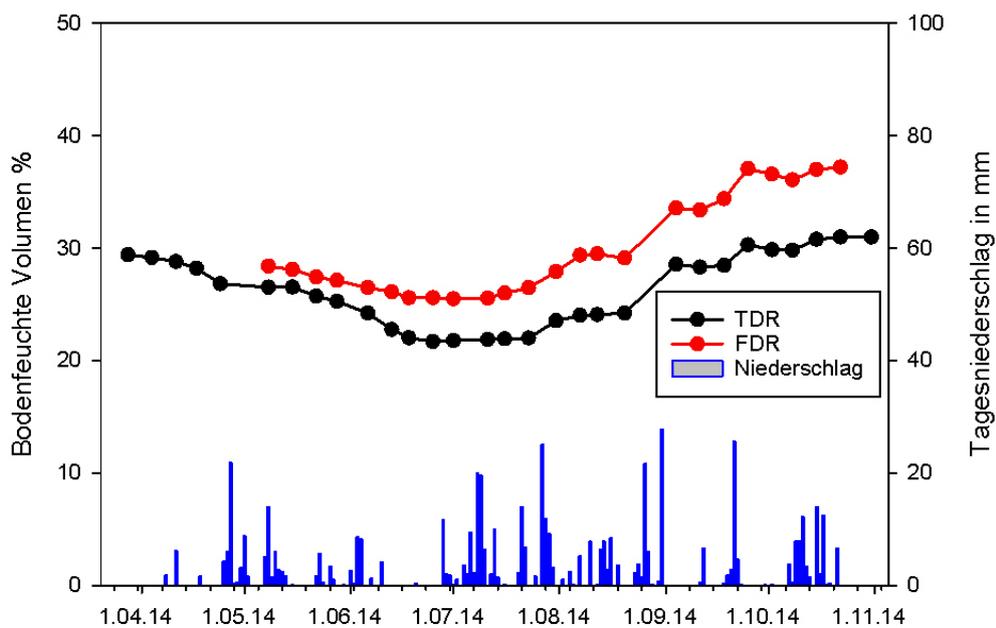


Abb. 26: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Pflugvariante 60-80 cm bzw.  $70 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 23.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Direktsaat 0 bis 20 cm

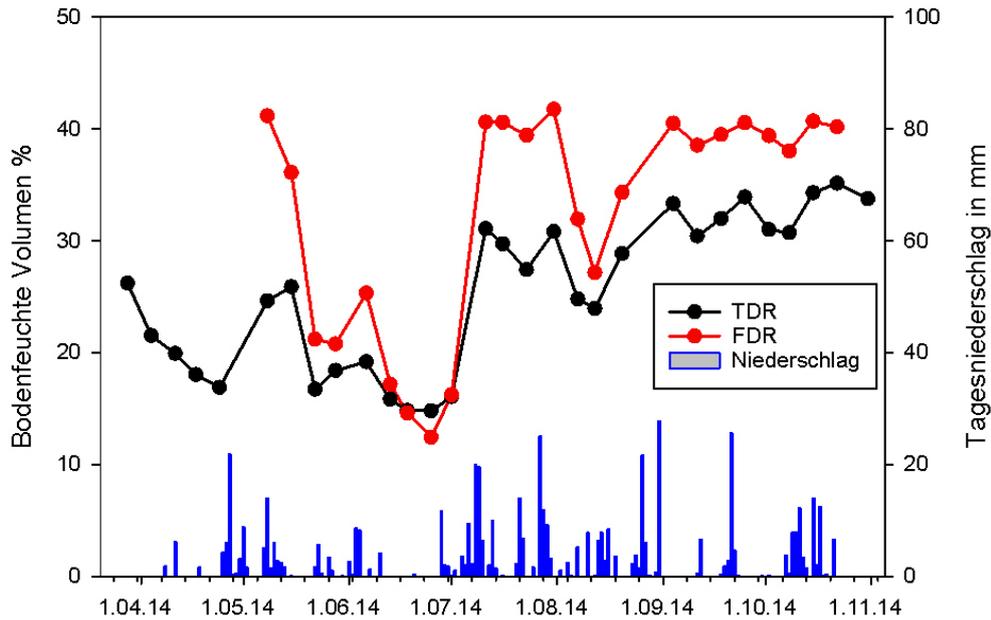


Abb. 27: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Direktsaatvariante 0-20 cm bzw.  $10 \pm 5$  cm. TDR-Werte wie im Tiefenprofil oder Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren (Kap. 4.2 und 4.4). FDR-Messungen auf stündlicher Basis am Messtag zwischen 9 und 18 Uhr gemittelt.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Direktsaat 20 bis 40 cm

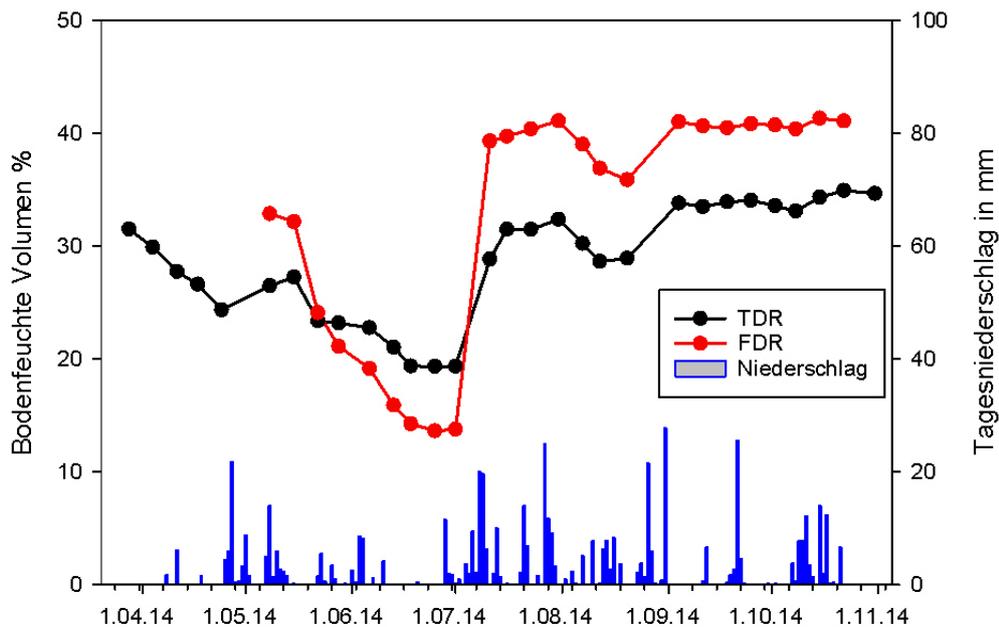


Abb. 28: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Direktsaatvariante 20-40 cm bzw.  $30 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 27.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Direktsaat 40 bis 60 cm

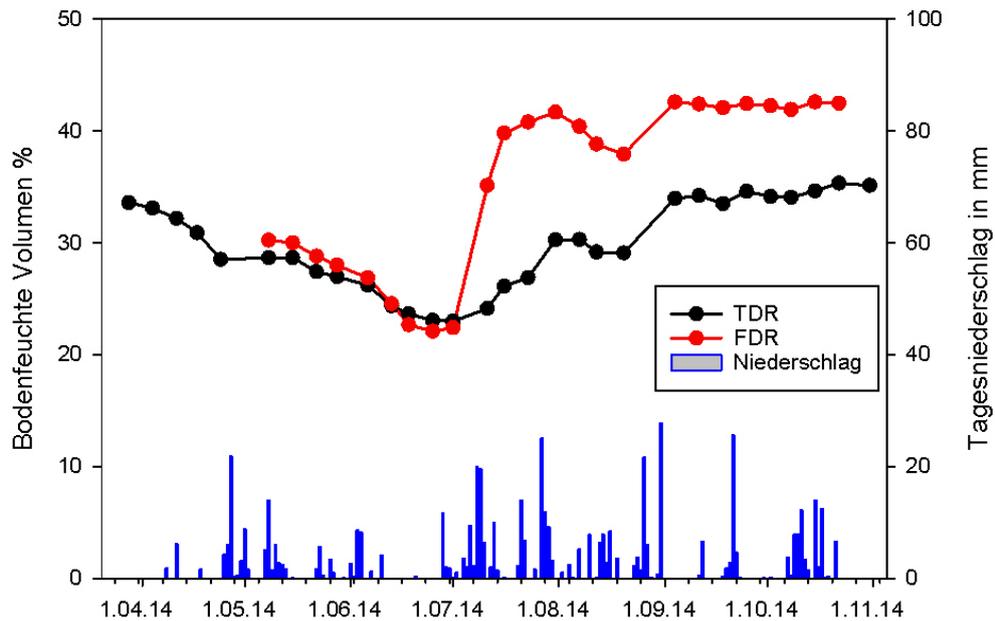


Abb. 29: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Direktsaatvariante 40-60 cm bzw.  $50 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 27.

### Vergleich der Messverfahren TDR und FDR Direktsaat 60 bis 80 cm

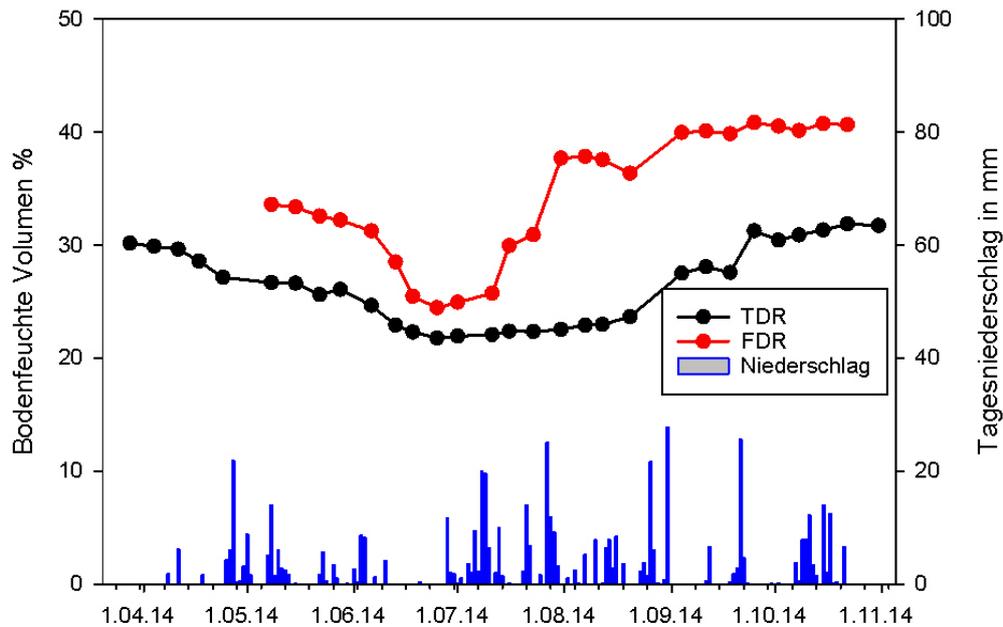


Abb. 30: Vergleich der Messwerte TDR und FDR am Tag der TDR-Messungen; Direktsaatvariante 60-80 cm bzw.  $70 \pm 5$  cm. Weiteres s. Abb. 27.

## 4.7 Nutzbare Feldkapazität der Bodenhorizonte in Dossenheim

In den oberen 5 cm ist bei der Mulchsaatparzelle eine höhere nFK zu messen (Tab. 5), obwohl die Trockenrohddichte sich nicht von den Pflug- und Direktsaatparzellen unterscheidet (Tab. A-1). Die Porengrößenverteilung ist offenbar günstiger. In 5-10 cm Tiefe sind keine signifikanten Unterschiede vorhanden. Von 10-20 cm ist im mit dem Pflug bearbeiteten Boden eine höhere nFK nachzuweisen. Hier ist die Pflugparzelle auch lockerer (Tab. A-1). Ab 30 cm Tiefe bestehen keine messbaren Unterschiede in der nFK mehr zwischen den Bearbeitungsvarianten.

Tab. 5: Nutzbare Feldkapazität verschiedener Horizonte der Bearbeitungsvarianten im Vergleich. Stechzylinderproben, Probenahme September 2014. MW: Mittelwert aus mindestens 8 Messungen; Stabw: Standardabweichung; ANOVA: Einfaktorielle Varianzanalyse oder Kruskal-Wallis-Test; \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ , n.s.: nicht signifikant ( $p > 0,05$ ). P: Pflug, M: Mulchsaat, D: Direktsaat. Tukey- und Dunn-Test ermöglichen paarweise Vergleiche.

Bearbeitungs- variante	Pflug		Mulchsaat		Direktsaat		Signifikanz ANOVA	Tukey-/ Dunn-Test
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw		
Bodentiefe [cm]								
0-5	13,99	1,72	17,79	0,83	14,07	3,09	**	M ↔ P M ↔ D
5-10	13,00	1,52	13,60	2,24	11,23	2,46	n.s.	
10-15	14,62	1,39	10,97	2,87	9,61	1,73	***	P ↔ M P ↔ D
15-20	14,49	2,22	9,42	1,12	9,89	2,49	***	P ↔ M P ↔ D
30	11,41	1,76	11,30	1,57	12,03	2,31	n.s.	
50	12,16	2,71	10,62	1,42	9,90	1,59	n.s.	
70	12,21	2,76	11,39	2,73	11,35	1,52	n.s.	

Die Pflugvariante hat in 10-20 cm Tiefe nicht nur mehr nutzbare Feldkapazität aufzuweisen als Mulch- und Direktsaat, sondern auch einen höheren Gesamtporenanteil (Tab. A-2). In dieser Tiefenstufe unterscheidet sich der Totwasseranteil bei pF 4,2 - und damit der Feinporenanteil - zwischen den Varianten nicht (Tab. A-3), so dass der Boden unter Pflugbearbeitung hier mehr Grob- und Mittelporen aufweist. Die Pflugparzelle wies sowohl bei der TDR-Sonde (Abb. 10), als auch bei den FDR-Sonden (Abb. 14) in den oberen (0-)10-20 cm weniger Bodenfeuchte auf als die anderen beiden Varianten. Die Bodenfeuchtesonde misst den volumetrischen Wassergehalt in allen Poren. Insgesamt kann man also die Schlussfolgerung ziehen, dass die Grob- und Mittelporen – und damit auch das prinzipiell mit pflanzenverfügbarem Wasser füllbare Volumen (nFK) – in 10-20 cm Tiefe bei der Pflugvariante im Durchschnitt weniger gefüllt waren als bei den konservierend bearbeiteten Böden. Entweder entwässern die Grob- und Mittelporen bei der Pflugparzelle schneller oder sie werden weniger leicht aufgefüllt.

## 5 Diskussion

Unter Bodenbearbeitung mit dem Pflug war in den oberen 20 cm im Versuchsjahr 2014 weniger Bodenwasser zu messen als unter Mulch- und Direktsaat. Dieses Ergebnis konnte mit der TDR-Sonde erzielt und statistisch abgesichert werden, die FDR-Sonden bestätigten das Resultat. Die Analyse der Porenverteilung gab Hinweise darauf, dass unter Pflug die Grob- und Mittelporen weniger Wasser führten als die Varianten mit konservierender Bodenbearbeitung, so dass die potentiell höhere nFK im Oberboden nicht ausgenutzt werden konnte.

Die Bodenwassergehalte in 0-20 cm Tiefe sanken bei allen Bodenbearbeitungsvarianten zeitweise unter den permanenten Welkepunkt (PWP) von 20-25 Vol% Wasser (Wasser bei pF 4,2 oder mehr, Tab. A-3), gegen Ende der fröhsommerlichen Trockenperiode kamen sie dem PWP sogar in 20-40 cm Tiefe nahe (Abb. 10, 11, 14). Nur bei der Pflugvariante war dies während des Großteils der Messperiode der Fall. In Mulch- und Direktsaat blieben die Bodenfeuchtwerte nach den Niederschlägen im Juli und August über dieser Schwelle. Zwar muss man angesichts der Ungenauigkeiten beider Sondentypen hinsichtlich der absoluten Bodenfeuchte vorsichtig sein, wenn man ein Erreichen oder Unterschreiten des aufgrund der bodenphysikalischen Messungen bestimmten PWP konstatiert. Da aber die durch die Sonden gewonnenen Bodenfeuchtwerte in der Regel höher liegen als die tatsächlichen (z.B. gravimetrisch bestimmten) Bodenwassergehalte (Cepuder und Hauer 2003, Evett et al. 2002, Jabro et al. 2005), ist die Aussage als Näherung vertretbar.

Was kann das Ergebnis „weniger Wasser im Oberboden bei Pflug als bei konservierender Bodenbearbeitung (Mulch- und Direktsaat)“ bedeuten? Die Argumentationslinie wurde in ähnlicher Weise bereits im Pilotversuch vorgestellt – seinerzeit im Hinblick auf den Standort Efringen-Kirchen (Flaig und Schickler 2012):

1. Die Mulchdecke bei Mulch- und Direktsaat verhindert unproduktive Evaporation. Dies könnte gerade zu Beginn der Wachstumsphase oder auf unbewachsenem Boden eine größere Rolle spielen. Die Projektergebnisse zeigen die deutlichsten Unterschiede zwischen Pflug und Mulch-/Direktsaat in 0-20 cm Tiefe tatsächlich ab etwa August, also nach der Ernte (Mitte Juli) auf dem Stoppelfeld.
2. Boden unter Pflug hat mehr Grobporen sowie grobe Mittelporen und diese entwässern ohne schützende Mulchdecke schneller. Die Projektergebnisse weisen in der Tat darauf hin, dass dies eine mögliche Erklärung für die geringeren Bodenfeuchten unter Pflug in den oberen 20 cm sein könnte.
3. Eine Möglichkeit könnte sein, dass die Lagerungsdichte in den oberen Bodenhorizonten bei Direktsaat höher ist. Damit könnte der Anteil an Grobporen geringer und der an Mittelporen höher sein und damit die nutzbare Feldkapazität. Wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, ist die nFK bei Direktsaat allerdings nicht höher (Kap. 4.7). Im Gegenteil: Zwischen 10 und 20 cm hat der Boden der Pflugvariante eine höhere nFK aufzuweisen als die konservierend bearbeiteten Parzellen.
4. Der höhere Humusgehalt in den oberen Bodenschichten bei Mulch- und Direktsaat könnte eine höhere (nutzbare) Feldkapazität bewirken. Die Ergebnisse zur nFK stützen diese Hypothese nicht.
5. Die Pflanzen auf gepflügten Flächen kommen wegen Verdichtungen an der Krumbasis nicht an das Wasser in tieferen Bodenschichten heran und sind daher – mehr als die Pflanzen auf Direktsaat mit ihren tief reichenden Makroporen – auf das Wasser der oberen Bodenschichten angewiesen.

Dann müsste im Unterboden unter Pflug gleich oder mehr Wasser vorhanden sein. Dafür liefern die Projektergebnisse keine belastbaren Hinweise.

6. Stärkerer Oberflächenabfluss mit Verschlämmung bei Niederschlagsereignissen führt zu geringerer Versickerung bei Pflug bereits in die oberen Bodenschichten. Hierzu haben wir im vorliegenden Versuch zwar keine Untersuchungen durchgeführt, es liegen aber in der Literatur ausreichend Belege dafür vor (z.B. Schmidt et al., o.J.).

In der Pilotstudie (Flaig und Schickler 2012) wurden die Versuche zu Bodenwassergehalt und Bodenbearbeitung aus der wissenschaftlichen Literatur bereits diskutiert. In der Summe ergab sich kein einheitliches Bild. Die Mehrzahl der referierten Arbeiten führte jedoch zu einem ähnlichen Resultat: Konservierende Verfahren, besonders die Direktsaat, stellen im Durchschnitt mehr bzw. länger Bodenwasser zur Verfügung. Ob das Mehr an Bodenwasser eher im Unter- oder im Oberboden zu finden war, war in den besprochenen Versuchen ebenfalls nicht einheitlich. Die umfangreiche mehrjährige Bodenbearbeitungsstudie auf der Dauerbeobachtungsfläche „Oberacker“ in Zollikofen (CH) kam beim Vergleich der Bodenwasser-verhältnisse zwischen Direktsaat und Pflug im Prinzip zu denselben Schlussfolgerungen (Chervet et al. 2006), die wir für unseren Versuch 2014 ziehen: „Im System PF (Pflug) führt die höhere Evaporation des unbedeckten Bodens zusammen mit geringeren Infiltrationsraten, dadurch vermehrtem Oberflächenabfluss ... zu einem verstärkten Abtrocknen der bearbeiteten Schicht, welche bis zu 10 Vol.% weniger Wasser als die entsprechende Schicht im System DS (Direktsaat) enthalten kann“. Es zeigte sich außerdem, dass „das leicht pflanzenverfügbare Wasser im Oberboden des Systems PF im Vergleich zu demjenigen des Systems DS öfters vollständig aufgebraucht ist und Wasserstress nicht ausgeschlossen werden kann“ (Chervet et al. 2006).

Selbst am Standort Dossenheim gab es Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2011 und 2014, den Jahren, in denen Bodenwassergehalte gemessen werden konnten. Während 2011 sich Unterschiede eher im Unterboden fanden – Direktsaat hatte in der Tiefenstufe 60-80 cm mehr Wasser, was aber aufgrund der geringen Sondenzahl statistisch nicht absicherbar war -, fand sich 2014 mehr Wasser in den oberen 20 cm der Direktsaat. Auch war 2014 der Unterschied zwischen Direkt- und Mulchsaat nicht so ausgeprägt (2011 wurde eine Mulchparzelle mit Sonden bestückt, die im Unterboden sandige Anteile hatte und sich dadurch deutlich von den anderen Parzellen unterschied). Die treffendere Aussage ist, dass unter Pflug in den oberen 20 cm weniger Wasser zu finden war. Damit ist der Befund 2014 eher mit dem Ergebnis 2011 für den neben Dossenheim zweiten trocken-warmen Standort des Pilotversuchs, Efringen-Kirchen, vergleichbar (Flaig und Schickler 2012). In Efringen-Kirchen deuteten sich höhere Bodenfeuchten der Direktsaatflächen in den oberen 40 cm an, waren aber aufgrund der Variabilität innerhalb der gleichen Parzelle nicht eindeutig zu belegen.

Tab. 6: Erträge von Winterweizen [dt/ha] auf dem Versuch „Systemvergleich Bodenbearbeitung“ in Dossenheim in den beiden Jahren 2011 und 2014, in denen Messungen zur Bodenfeuchte vorgenommen wurden. Angaben nach W. Ibach, pers. Mitt.

Bodenbearbeitung / Jahr	Pflug	Mulchsaat „Dutzi“	Mulchsaat „betriebsüblich“	Direktsaat
2011	45,6	41,2		51,6
2014	88,2	87,1	85,6	85,0

Die beiden Versuchsjahre sind allerdings keineswegs einheitlich beurteilbar. Deutlich zeigt das der Bioindikator der angebauten Kultur in Dossenheim. In beiden Versuchsjahren 2011 und 2014 wurde Winterweizen angebaut. Während 2011 mit einem sehr trockenen Frühjahr die Direktsaat Ertragsvorteile erzielte, waren 2014 offensichtlich die Voraussetzungen nicht gegeben, damit die Direktsaat ihre Vorteile zur Geltung bringen konnte (Tab. 6). Schon die absolute Höhe der Erträge zeigt, dass die beiden Jahre nicht vergleichbar sind. Während 2014 eine sehr gute Weizenernte eingebracht werden konnte, ließ die extreme Witterung 2011 nur eine Notreife zu. Obwohl bei der Pflugvariante 2014 weniger Wasser im Oberboden gemessen werden konnte, hat sich dies offenkundig nicht nachteilig auf die Entwicklung des Weizens und seine Ertragsbildung ausgewirkt. Die eigentlichen Unterschiede im Bodenwasser zwischen den Bearbeitungsvarianten traten nach der Ernte des Bestandes auf. Die Entwicklungsdaten (BBCH-Stadien und Bestandeshöhe, vgl. Tab. 3) weisen auf eine zügige Bestandesentwicklung auf der Pflugfläche hin, die in einen guten Ertrag mündete. Wie in anderen klimatisch nicht extremen Jahren zeigte die Pflugvariante den größten Ertrag (vgl. Tab. 1). Die in Dossenheim zwischen klimatisch unterschiedlichen Jahren differenziert auftretenden Ertragsvorteile verschiedener Bodenbearbeitungsweisen lassen sich sogar global für verschiedene Regionen nachzeichnen: Direktsaat führt in einer weltweiten Analyse dann bei einer ganzen Anzahl von Kulturen zu Ertragsvorteilen, wenn es sich um trockene Klimate handelt, die Wasserversorgung der Kulturen auf Niederschläge angewiesen ist, Erntereste auf dem Feld belassen werden und eine Fruchtfolgerotation durchgeführt wird (Pittelkow et al. 2014).

Es ist durchaus möglich, dass sich die Bodenwasserverhältnisse in verschiedenen Jahren in den Parzellen mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung je nach Jahreswitterung verschieden ausprägen. In 2011 wurden tief reichende Makroporen als eine Erklärungsmöglichkeit herangezogen, warum in tieferen Bodenschichten bei Direktsaat mehr Wasser zu messen war – ein Befund, wie er z.B. in Rheinhessen in tonigem Lösslehm auch erhoben wurde (Berg 2014, LWK RLP 2012). Tiefgrabende Regenwürmer sind Haupt“verursacher“ für tief reichende Makroporen. Eine aktuelle Untersuchung des Regenwurm-vorkommens auf den Versuchsflächen in Dossenheim zeigte, dass der Standort generell viele Regenwürmer beherbergt (Ehrmann 2014). Die Direktsaatparzelle wies dabei selbst im Vergleich zu Erfahrungswerten in ganz Baden-Württemberg hohe Abundanzen und außergewöhnlich hohe Biomassen auf. Sogar in der Pflugvariante fanden sich tief grabende Arten wie *Lumbricus terrestris*. Trotz relativ geringer Niederschläge ist der Standort Dossenheim aufgrund des tiefgründigen lehmigen Bodens offenbar sehr günstig für Regenwürmer (Ehrmann 2014). Insofern ist nicht von der Hand zu weisen, dass ein Ergebnis wie 2011 in einem entsprechenden Jahr wieder auftreten könnte. Die Messungen in den nächsten Jahren werden vielleicht weitere Hinweise darauf erbringen, unter welchen klimatischen Voraussetzungen welche Kultur unter welcher Bodenbearbeitung Vorteile zieht und in welchem Bodenhorizont sich Unterschiede im Bodenwassergehalt besonders ausprägen.

Dazu wäre es allerdings wünschenswert, dass die verwendeten kapazitiven FDR-Sonden zuverlässigere Messwerte liefern. Das ist nicht nur ein Problem der Kalibration (ElNesr et al. 2013). Bei den außer der Bearbeitung recht ähnlichen Bodeneigenschaften auf den Parzellen in Dossenheim käme es in diesem Versuch nicht unbedingt auf die absolute Genauigkeit der gemessenen Bodenwasserwerte an, sondern auf die Wiedergabe der relativen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Bodenbearbeitungsflächen (Jabro et al. 2005). Auch bei den Werten der TDR-Sonde ist nicht *a priori* davon auszugehen, dass die Bodenfeuchtwerte den durch Gravimetrie oder durch die Neutronensonde gewonnenen Referenzwerten entsprechen (Evelt et al. 2002, Cepuder und Hauer 2003). Eine *in-situ*-Kalibration mit dem Boden in Dossenheim wäre nicht unbedingt notwendig, zumal die Standard-Kalibration bereits einen weiten Bodenbereich umfasst, die bodenspezifische Kalibration aufwändig ist (Williams et al. 2003, Cepuder und Hauer 2003) und angesichts der kurzen Projektlaufzeit schnell Ergebnisse erzielt werden mussten.

Das Problem lag auch nicht in einer eventuell unzureichenden bodenspezifischen Kalibration: Ein Drittel der neuen Sonden musste nach Werksvorgaben nachkalibriert werden, und es traten öfter kurzfristige und bei manchen Sonden auch längere Messausfälle auf, die nicht immer einer klaren Ursache zuzuordnen waren. Die FDR-Technologie kann prinzipiell genau so zuverlässige Werte liefern wie die verwendete TDR-Technologie (Cepuder und Hauer 2003). In zwei verschiedene Tiefen eingegrabene FDR-Sonden lieferten 2011 zuverlässige Werte, waren allerdings keine Profilsonden (SM300, Flaig und Schickler 2012). Auch 2014 konnten sinnvolle Ergebnisse erzielt werden, wenn die Sonden zuverlässig gemessen haben, wie der Vergleich TDR-FDR mit ähnlichen Verläufen gezeigt hat (Kap. 4.6). Für die künftigen Messkampagnen wird versucht, die Messzuverlässigkeit der neuartigen Profilsonden zu verbessern. Die Vorläufermodelle sind schon länger weltweit erfolgreich im Einsatz.

## 6 Literatur

- Berg, V. (2014): Großtechnische Versuche: LWK Bodenbearbeitungsversuche. <http://www.lwk-rlp.de/aktuelles/einzelansicht/archive/2014/july/article/lwk-bodenbearbeitungsversuche/?print=1&cHash=27991080120dce11093a21dfcf9ca63b>. Zugriff: Dezember 2014
- Cepuder, P. und Hauer, G. (2003): Rohrsonden zur Wasseranteilsbestimmung. 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29. und 30. April 2003: 157-159
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W.G., Weisskopf, P., Zihlmann, U., Müller, M. und Schafflützel, R. (2006): Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug. *AGRARForschung* 13(4): 162-169
- DIN (1998): DIN ISO 11272: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte. Aktualisiert: DIN EN ISO 11272:2014-06. Beuth Verlag, Berlin
- Ehrmann, O. (2014): Untersuchung von Regenwürmern und Regenwurmröhren am Standort Dossenheim des Systemvergleichs Bodenbearbeitung. Vorabinformation zum Untersuchungsbericht für das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe, unveröffentlicht
- ElNesr, M.N., Alazba, A.A. und El-Farrak, M.A. (2013): Correcting inaccurately recorded data due to faulty calibration of a capacitance water content probe. *Applied and Environmental Soil Science*, Volume 2013, Article ID 530732, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/530732> (10 pages)
- Evet, S., Laurent, J.-P., Cepuder, P. und Hignett, C. (2002): Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents. 17<sup>th</sup> WCSS (World Congress of Soil Science), 14.-21.8.2002, Thailand, paper no. 1021 (10 pages)
- Flaig, H. und Schickler, J. (2012): Bodenwasserhaushalt und Bodenbearbeitung - Bodenwasserhaushalt bei konservierender Bodenbearbeitung. Forschungsbericht KLIMOPASS, 82 S. <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063>, ID Umweltbeobachtung U61-W03-N10.
- IMKO (ohne Jahr): Theorie der Material- und Bodenfeuchtemessung mit der TRIME Methode. IMKO Micromodultechnik GmbH, Im Stöck 2, 76275 Ettlingen.
- Jabro, J.D., Leib, B.G. und Jabro, A.D. (2005): Estimating soil water content using site-specific calibration of capacitance measurements from Sentek Enviroscan systems. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3): 393–399
- LUBW (2013): Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), Karlsruhe. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229984/>
- LWK RLP (2012): Bodenbearbeitungssysteme im Fokus von Ökonomie und Ökologie – Handreichung für eine differenzierte Beurteilung. Landwirtschaftskammer und Landesregierung Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz
- Pittelkow, C.M., Liang, X., Linqvist, B.A., van Groenigen, K.J., Lee, J., Lundy, M.E., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T. und van Kessel, C. (2014): Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. doi:10.1038/nature13809 (online); *Nature* 517: 365–368 (2015)
- Scherzer, J., Schaaf, W. und Hüttl, R.F. (1996): Eignung von FDR- und TDR- Sonden zur Erfassung der Bodenfeuchte in Kippsubstraten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit. *Mitt. Dt. Bodenk. Ges.* 80: 279-282.

- Schmidt, W., Nitzsche, O., Krück, S. und Zimmermann, W. (ohne Jahr): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe“. Teilthema I: Begleitende Untersuchungen zur praktischen Anwendung und Verbreitung von konservierender Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau sowie Mulchsaat in den Ackerbaugebieten Sachsens zur Minderung von Wassererosion und Nährstoffaustrag im Elbeeinzugsgebiet (Laufzeit 1998-2002). Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Leipzig.
- VDLUFA 1991a: Entnahme ungestörter Proben mit dem Stechzylinder. In: VDLUFA-Methodenbuch, Band I - Die Untersuchung von Böden, Methode A1.1.1 bzw. A 1.2.5. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 4. Aufl. mit Ergänzungslieferungen.
- VDLUFA 1991b: Bestimmung des Volumenanteils an Feststoffen und Poren sowie der Porengrößenverteilung - Ermittlung durch Entwässerung mit Überdruck. In: VDLUFA-Methodenbuch, Band I - Die Untersuchung von Böden, Methode C 4.3.2. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, 4. Aufl. mit Ergänzungslieferungen.
- Williams, B., Neivandt, R., O’Kane, M. , Browne, D. und White, C. (2003): Laboratory calibration and initial results of a soil moisture monitoring system at the Mt Leyshon tailings dam and waste rock cover system. Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Cairns, QLD, 12 - 18 July 2003, Conference Proceedings: 411-417

## Danksagung

Die Autoren danken Silvana Bollhöfer, Heiner Hartwig, Christoph Hessenauer und Harald Scharinger (LTZ Augustenberg) für ihre Beiträge zum Gelingen des Projekts, dem Betreuer der Versuchsfläche Wolfgang Ibach und dem bewirtschaftenden Landwirt Heinrich Hack sowie Jürgen Just am Julius-Kühn-Institut Dossenheim für die Überlassung der Wetterdaten.

# 7 Anhang

## 7.1 Trockenrohdichten der Bodenhorizonte in Dossenheim

Tab. A-1: Trockenrohdichten [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] verschiedener Horizonte der Bearbeitungsvarianten im Vergleich. Stechzylinderproben, Probenahme September 2014. MW: Mittelwert aus mindestens 8 Messungen; Stabw: Standardabweichung; ANOVA: Einfaktorielle Varianzanalyse; \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ , n.s.: nicht signifikant ( $p > 0,05$ ). P: Pflug, M: Mulchsaat, D: Direktsaat. Für 10-15 cm beruhen die Werte auf dem Kruskal-Wallis-Test. Der Tukey-Test ermöglicht paarweise Vergleiche.

Bearbeitungs- variante	Pflug		Mulchsaat		Direktsaat		Signifikanz ANOVA	Tukey- Test
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw		
Bodentiefe [cm]								
0-5	1,31	0,14	1,34	0,07	1,41	0,08	n.s.	
5-10	1,53	0,14	1,51	0,05	1,56	0,10	n.s.	
10-15	1,53	0,07	1,59	0,11	1,70	0,07	**	P ↔ D
15-20	1,51	0,10	1,67	0,06	1,66	0,07	***	P ↔ M P ↔ D
30	1,56	0,06	1,55	0,07	1,66	0,10	*	M ↔ D
50	1,54	0,07	1,54	0,05	1,53	0,04	n.s.	
70	1,59	0,06	1,57	0,03	1,61	0,04	n.s.	

Die Trockenrohdichten unterscheiden sich in den ersten 10 cm nicht signifikant voneinander – angesichts der gerade in den oberen Zentimetern unterschiedlichen Bodenbearbeitung ein erstaunliches Ergebnis. In den obersten 5 cm ist die Direktsaat nur in der Tendenz etwas dichter. In 10-15 cm Tiefe ist die Direktsaatfläche zwar dichter gepackt, unterscheidet sich aber nur von der Pflugfläche signifikant. In 15-20 cm ist die Pflugparzelle signifikant lockerer als die reduziert bearbeiteten Flächen. In 50 und 70 cm schließlich sind keine Unterschiede mehr festzustellen.

## 7.2 Gesamtporenanteil der Bodenhorizonte in Dossenheim

Tab. A-2: Gesamtporenanteil [%] verschiedener Horizonte der Bearbeitungsvarianten im Vergleich. Stechzylinderproben, Probenahme September 2014. MW: Mittelwert aus mindestens 8 Messungen; Stabw: Standardabweichung; ANOVA: Einfaktorielle Varianzanalyse; \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ , n.s.: nicht signifikant ( $p > 0,05$ ). P: Pflug, M: Mulchsaat, D: Direktsaat. Für 10-15 cm beruhen die Werte auf dem Kruskal-Wallis-Test. Der Tukey-Test ermöglicht paarweise Vergleiche.

Bearbeitungs- variante	Pflug		Mulchsaat		Direktsaat		Signifikanz ANOVA	Tukey- Test
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw		
Bodentiefe [cm]								
0-5	50,63	5,16	49,52	2,80	46,88	3,18	n.s.	
5-10	42,28	5,28	42,85	1,80	40,96	3,71	n.s.	
10-15	41,71	2,74	39,40	4,19	35,30	2,57	**	P ↔ D
15-20	43,55	3,59	37,28	2,31	37,61	2,49	***	P ↔ M P ↔ D
30	41,30	2,22	41,63	2,80	37,70	3,60	*	M ↔ D
50	42,02	2,58	42,14	2,07	42,16	1,47	n.s.	
70	40,06	2,36	40,97	1,32	39,38	1,56	n.s.	

Der Gesamtporenanteil im Boden unterscheidet sich signifikant lediglich um die typische Pflugtiefe von 15-20 cm herum. Von 10 bis 20 cm Bodentiefe weist der Boden unter Pflug deutlich mehr Porenvolumen auf als die konservierend bearbeiteten Flächen. Die Ergebnisse des Porenanteils korrespondieren gut mit den Resultaten der Trockenrohichte (Tab. A-1). Warum sich insbesondere Mulchsaat (Bearbeitungstiefe in der Regel nicht tiefer als 10 cm) noch in 30 cm Tiefe von der Direktsaat unterscheidet, ist nicht ohne weiteres zu erklären. Eine Möglichkeit wäre ein kleinräumiger Wechsel der Bodenart (vgl. auch Abb. 15).

### 7.3 Anteil an Feinporen der Bodenhorizonte in Dossenheim

Tab. A-3: Feinporenanteil in verschiedenen Horizonten der Bearbeitungsvarianten im Vergleich, hier als Anteil des Bodenwassers bei pF 4,2 [Vol.%]. Stechzylinderproben, Probenahme September 2014. MW: Mittelwert aus mindestens 8 Messungen; Stabw: Standardabweichung; ANOVA: Einfaktorielle Varianzanalyse; \* p<0,05, \*\* p< 0,01, \*\*\* p< 0,001, n.s.: nicht signifikant (p>0,05). P: Pflug, M: Mulchsaat, D: Direktsaat. Für 30 und 70 cm beruhen die Werte auf dem Kruskal-Wallis-Test. Der Tukey-Test ermöglicht paarweise Vergleiche.

Bearbeitungs- variante	Pflug		Mulchsaat		Direktsaat		Signifikanz ANOVA	Tukey- Test
	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw		
Bodentiefe [cm]								
0-5	20,20	3,21	20,75	2,39	26,27	4,30	**	P ↔ D M ↔ D
5-10	23,99	3,36	23,25	1,63	25,56	3,21	n.s.	
10-15	23,89	1,64	23,63	2,08	24,71	1,88	n.s.	
15-20	23,21	2,09	24,71	1,71	23,35	1,96	n.s.	
30	24,65	2,00	28,65	4,98	23,15	1,00	**	M ↔ D
50	23,98	3,34	26,69	5,36	28,31	2,72	n.s.	
70	21,46	2,21	21,36	3,45	25,45	1,41	**	P ↔ D M ↔ D

Das bei einem pF-Wert von 4,2 oder mehr gebundene Wasser ist nicht mehr pflanzenverfügbar (Totwasser) und befindet sich in den so genannten Feinporen. Dass sich in der Direktsaat durch die Nichtbearbeitung mehr Feinporen in den oberen 5 cm befinden als bei den konservierend bearbeiteten Flächen, ist nachvollziehbar. Erstaunlich ist, dass sich die Anteile an Totwasser in den anschließenden Bearbeitungshorizonten der Pflug- und Mulchsaat nicht von der Direktsaatfläche unterscheiden. (Der Unterschied zwischen Mulch- und Direktsaat bei 30 cm ist möglicherweise ein Problem kleinräumig wechselnder Bodenart, vgl. die hohe Standardabweichung und Tab. A-1 und A-2). In 70 cm Tiefe wiederum weist Direktsaat mehr Wasser in den Feinporen auf als die anderen Varianten – die Ursache liegt vermutlich in einem höheren Tonanteil, zumindest in den beprobten Grabungslöchern.

## 7.4 Vergleich der Messungen mit der TDR-Sonde in den einzelnen Rohren

Im Folgenden werden die Messwerte der TDR-Sonde in den 10 Rohren pro Bearbeitungsvariante für die einzelnen Tiefenstufen im Zeitverlauf dokumentiert. Zur Elimination von Ausreißern s. Kap. 3.8. Die Reaktion auf Niederschläge oder Trockenphasen war im Allgemeinen sehr ähnlich, die absoluten Werte der Bodenwassergehalte konnten sich dabei vor allem in den oberen Bodenschichten erheblich unterscheiden. Ein Gradient innerhalb der Parzellen war dabei nicht festzustellen (die TDR-Sondenrohre waren in Längsrichtung der Parzelle orientiert; als Nr. 1 wurde dabei das dem oberen Weg nächstgelegene Rohr bezeichnet, als Nr. 10 das dem Weg zum Julius-Kühn-Institut nächstgelegene, vgl. Abb. 1).

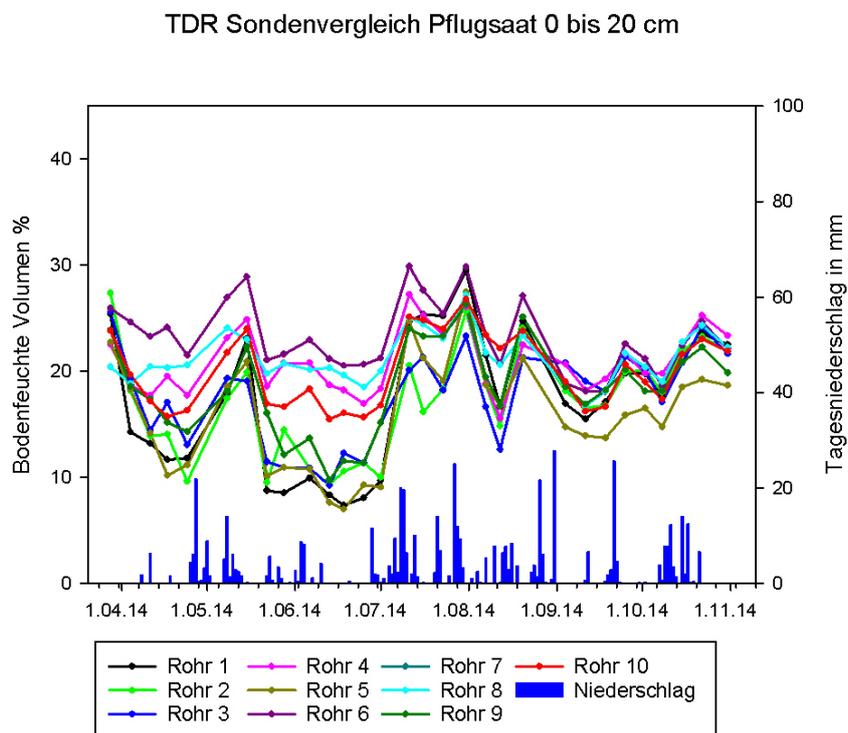


Abb. A-1: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Pflugsvariante in 0-20 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Pflugsaat 20 bis 40 cm

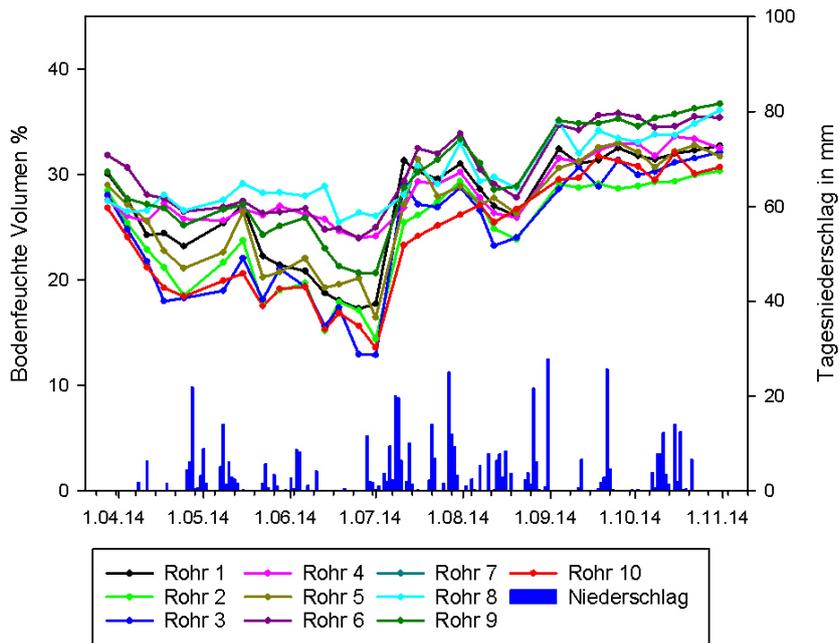


Abb. A-2: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Pflugvariante in 20-40 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Pflugsaat 40 bis 60 cm

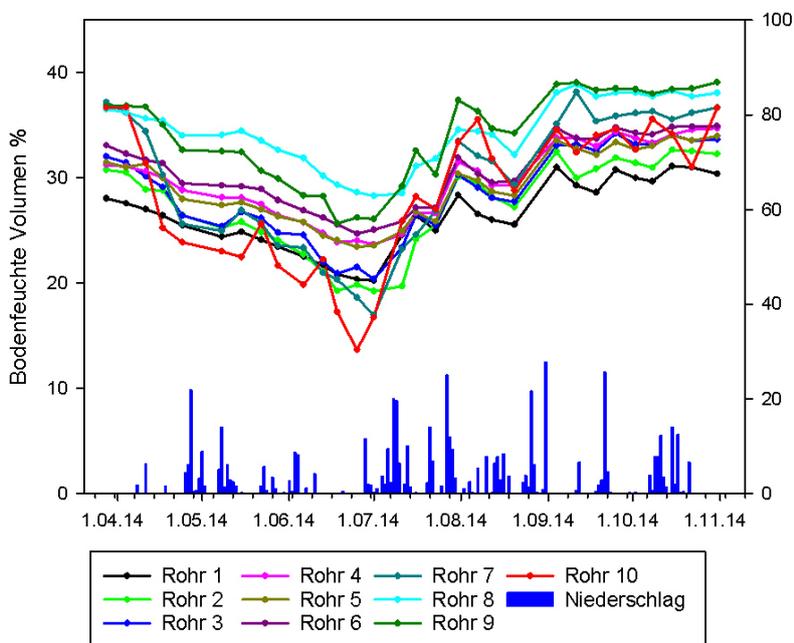


Abb. A-3: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Pflugvariante in 40-60 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Pflugsaat 60 bis 80 cm

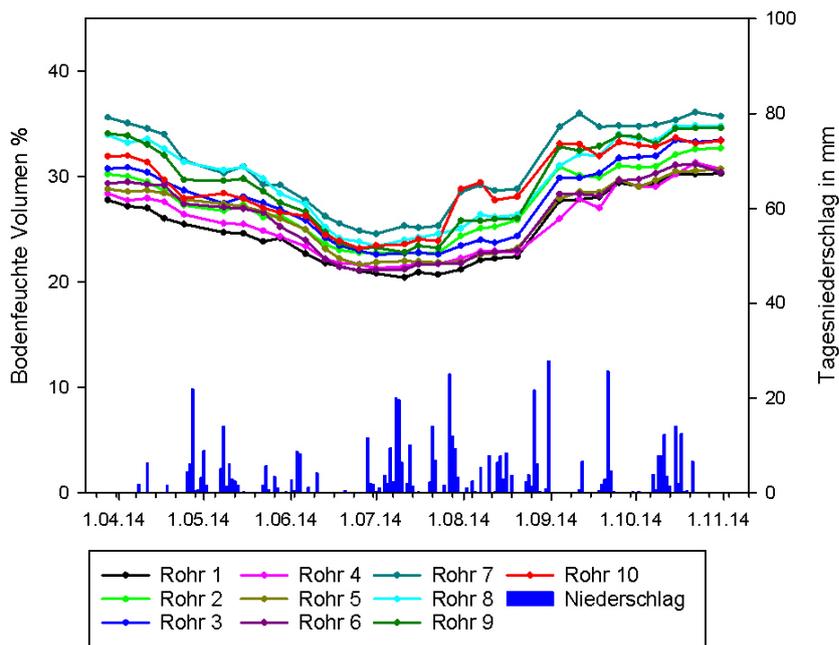


Abb. A-4: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Pflugvariante in 60-80 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Mulchsaat 0 bis 20 cm

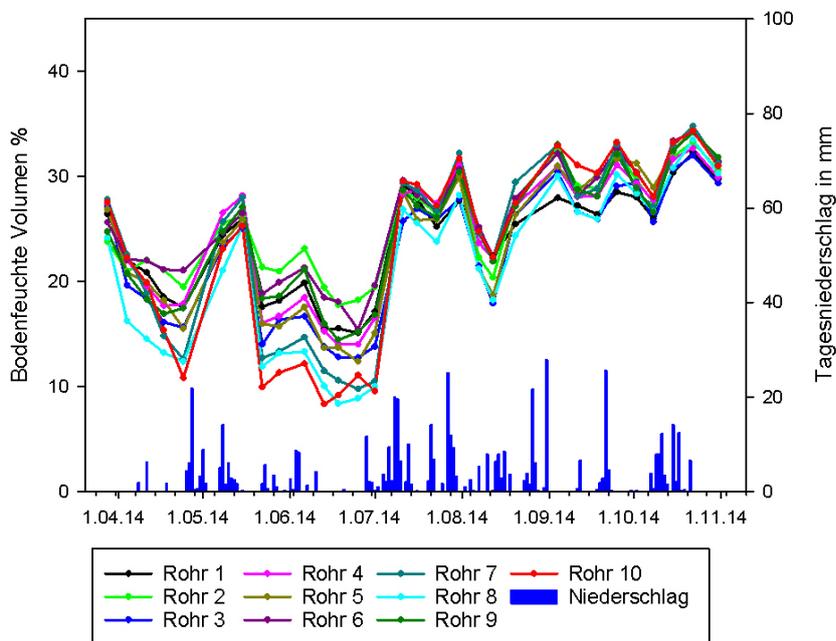


Abb. A-5: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Mulchsaatvariante in 0-20 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Mulchsaat 20 bis 40 cm

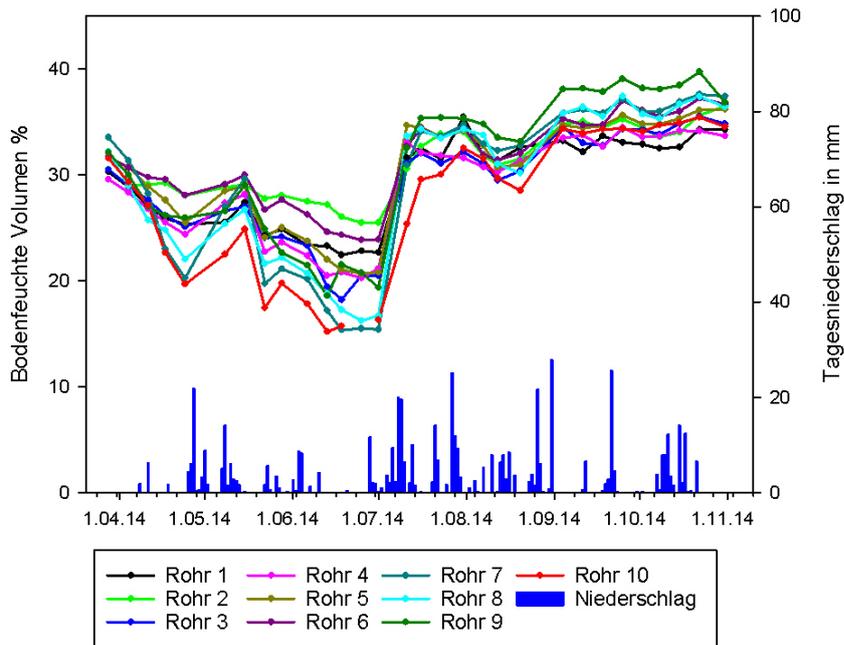


Abb. A-6: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Mulchsaatvariante in 20-40 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Mulchsaat 40 bis 60 cm

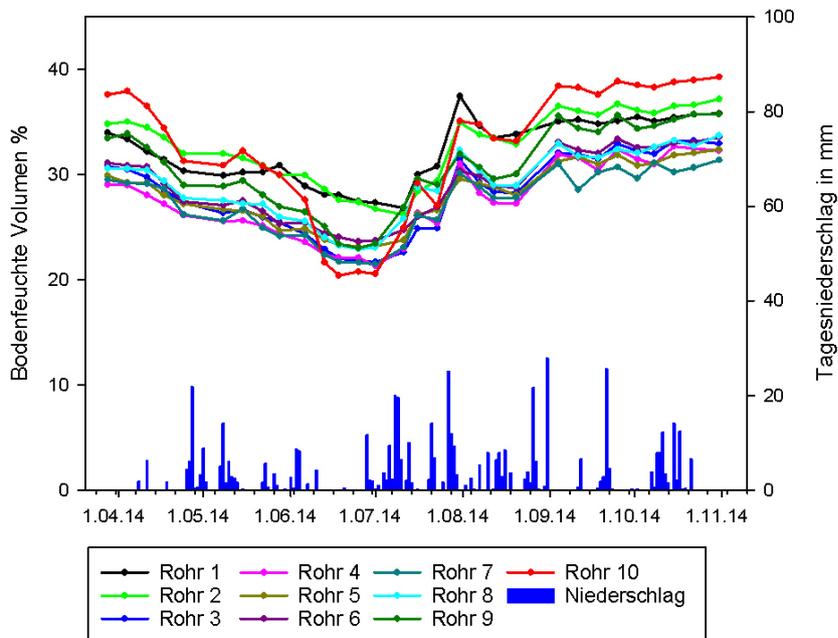


Abb. A-7: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Mulchsaatvariante in 40-60 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Mulchsaat 60 bis 80 cm

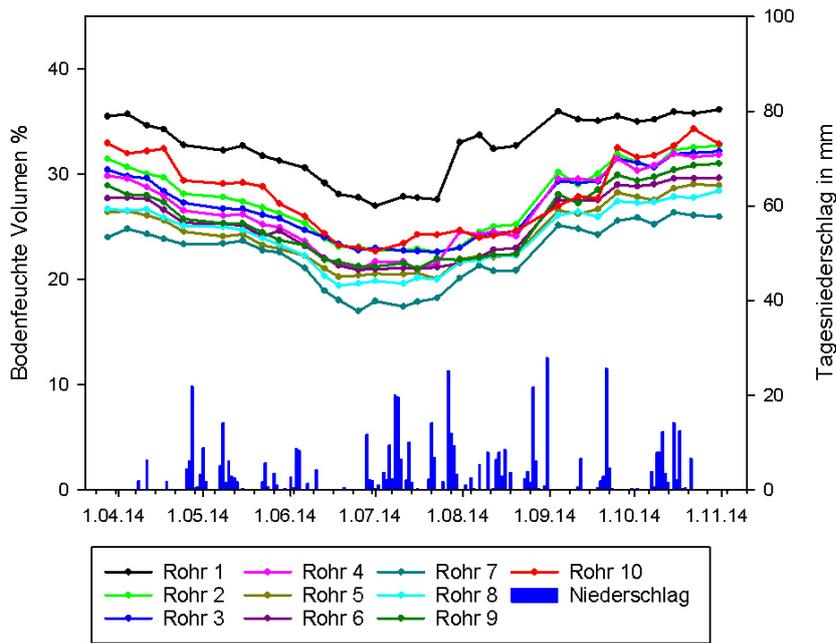


Abb. A-8: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Mulchsaatvariante in 60-80 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Direktsaat 0 bis 20 cm

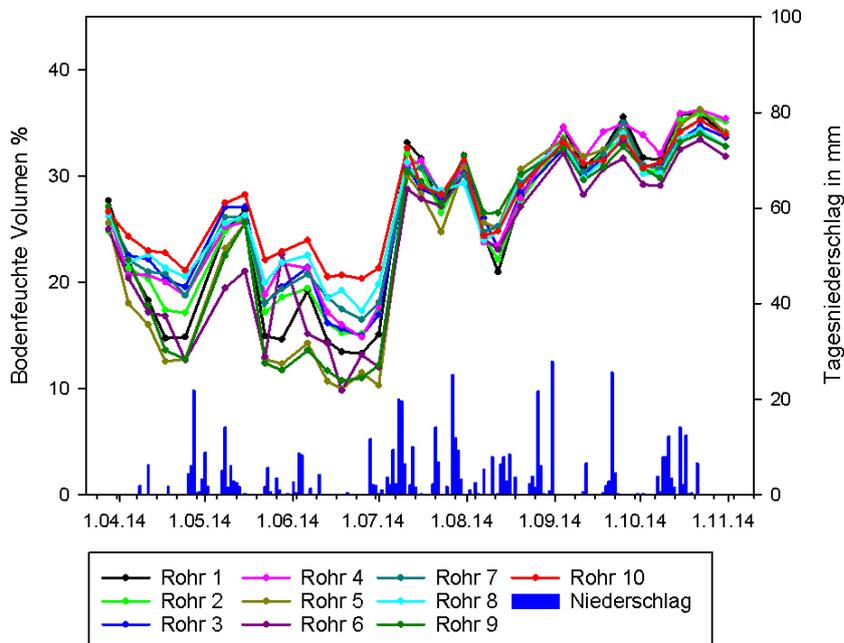


Abb. A-9: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Direktsaatvariante in 0-20 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Direktsaat 20 bis 40 cm

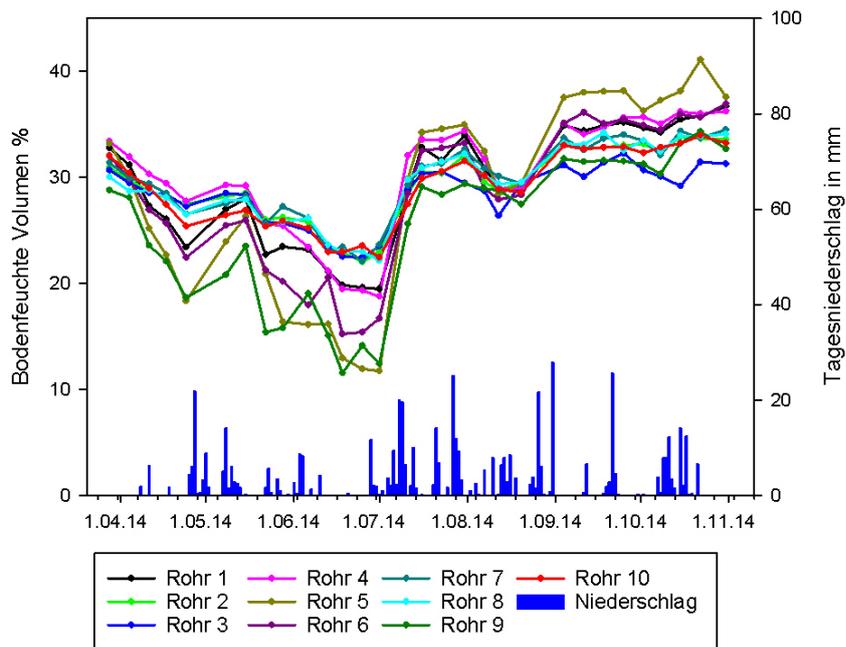


Abb. A-10: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Direktsaatvariante in 20-40 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Direktsaat 40 bis 60 cm

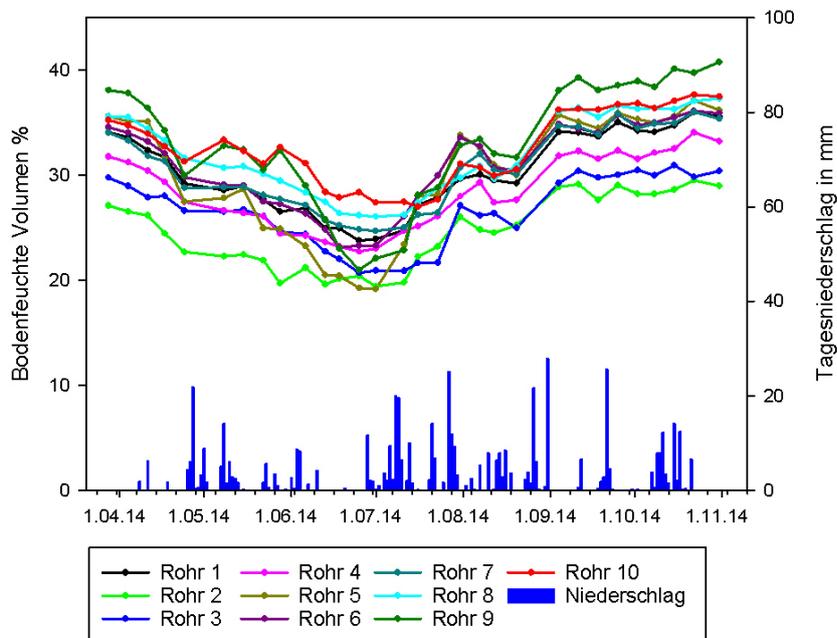


Abb. A-11: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Direktsaatvariante in 40-60 cm Bodentiefe.

TDR Sondenvergleich Direktsaat 60 bis 80 cm

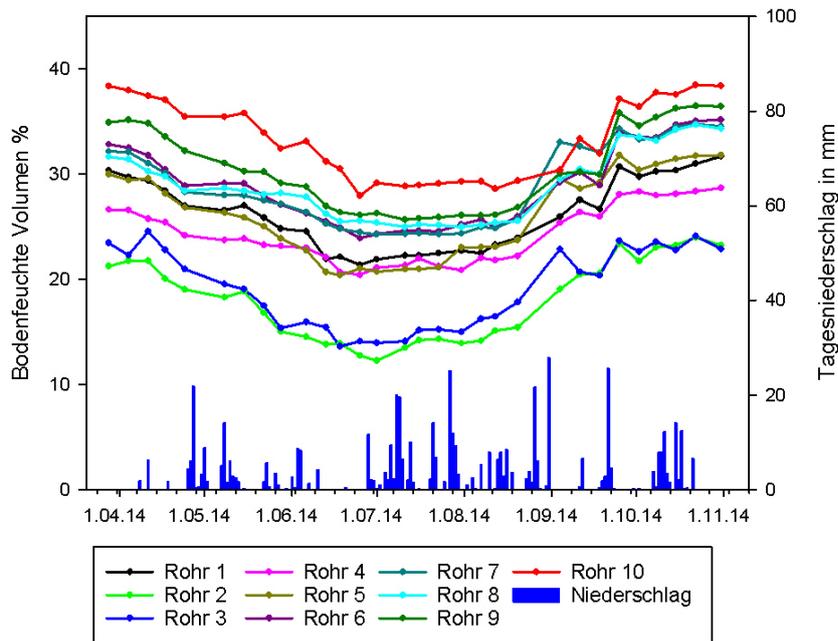


Abb. A-12: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt in den 10 Sondenrohren auf der Direktsaatvariante in 60-80 cm Bodentiefe.

## 7.5 Vergleich der Messungen der einzelnen FDR-Sonden

Im Folgenden werden die Messergebnisse der vier FDR-Sonden pro Bearbeitungsvariante in den verschiedenen Tiefenstufen im Zeitverlauf dokumentiert. Im Unterschied zu den Tiefenprofilen (Kap. 4.3) und der Darstellung der Bearbeitungsvarianten im Vergleich (Kap. 4.5) wurden alle Sondenwerte einschließlich der Messlücken und Unzulänglichkeiten der Kalibration dargestellt. Die Sonden P3, P4, M4 und D2 wurden im August neu kalibriert. Die FDR-Sonden waren in Längsrichtung der Parzelle orientiert; als Nr. 1 wurde dabei die dem oberen Weg nächstgelegene Sonde bezeichnet, als Nr. 10 die dem Weg zum Julius-Kühn-Institut nächstgelegene, vgl. Abb. 1. Eliminiert wurden lediglich Messaussetzer, die den Messwert „0“ angezeigt hätten und die Graphiken schwer lesbar gemacht hätten. Stattdessen wurden Messlücken eingegeben. Diese Dokumentation soll auch dazu dienen, die Auswahl der Messwerte (vgl. Kap. 3.8) transparent zu machen.

FDR Sondenvergleich Pflugsaat 10 cm

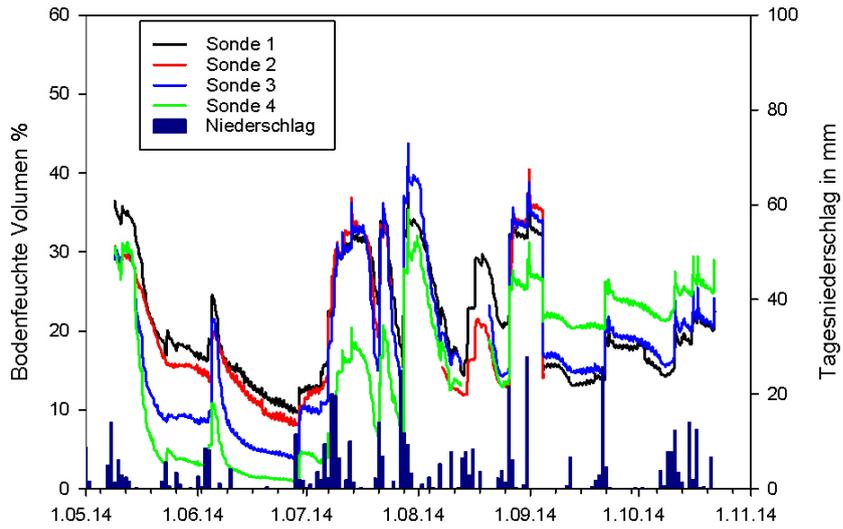


Abb. A-13: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Pflugvariante in 10 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Pflugsaat 30 cm

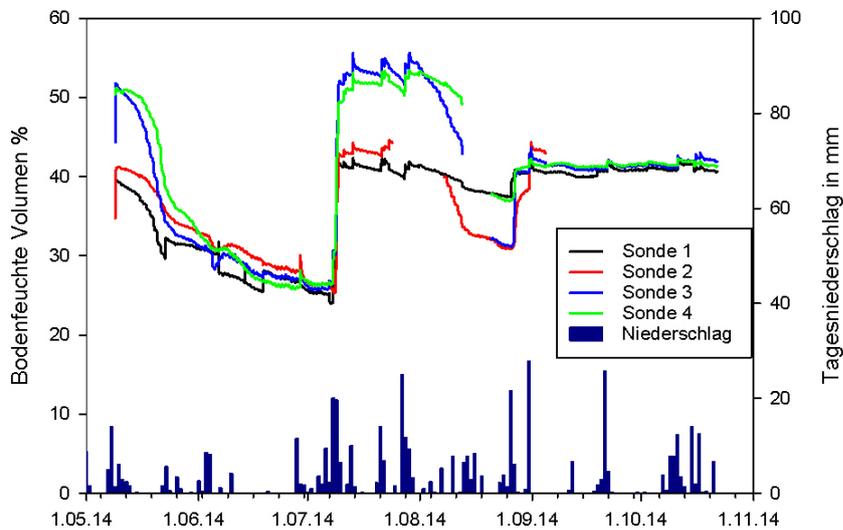


Abb. A-14: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Pflugvariante in 30 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Pflugsaat 50 cm

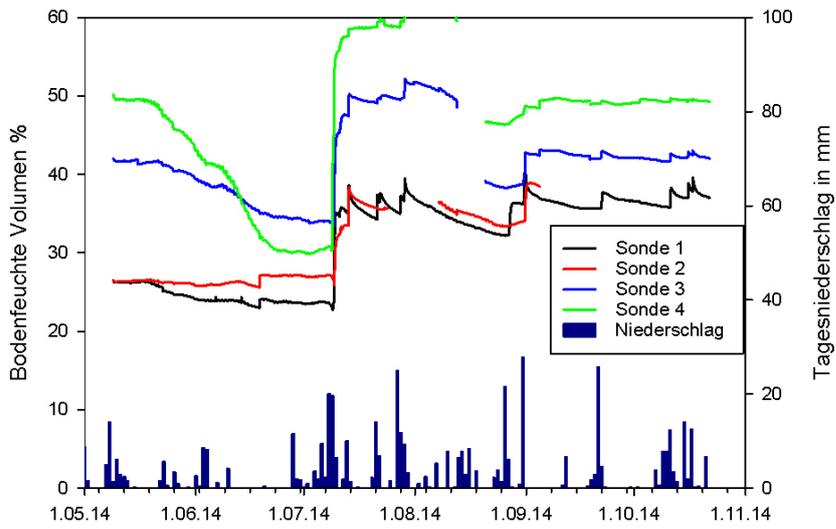


Abb. A-15: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Pflugvariante in 50 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Pflugsaat 70 cm

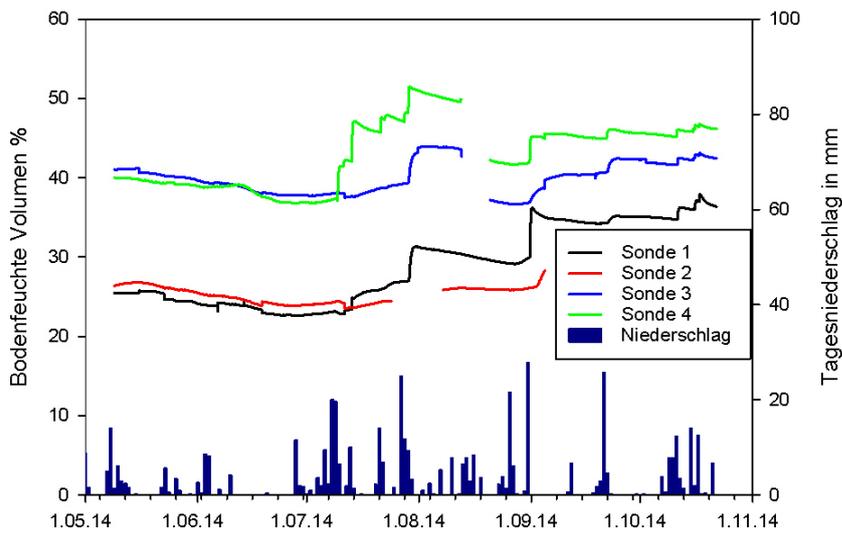


Abb. A-16: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Pflugvariante in 70 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Pflugsaat 90 cm

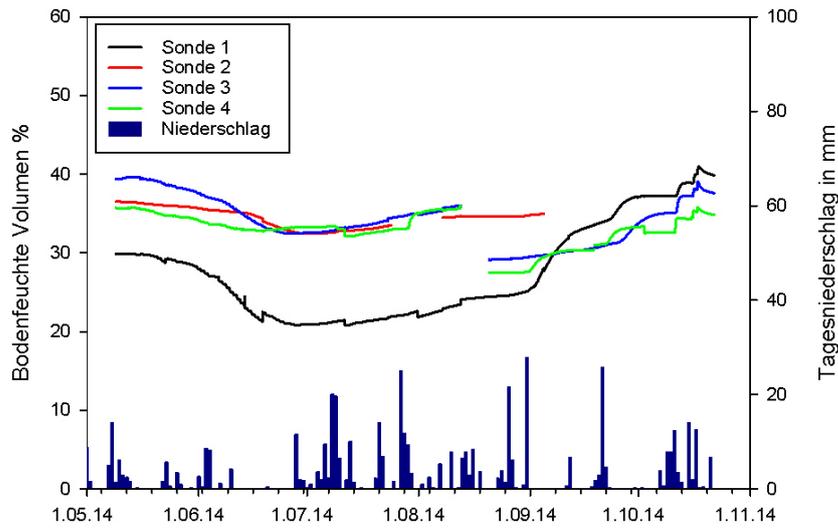


Abb. A-17: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Pflugvariante in 90 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Mulchsaat 10 cm

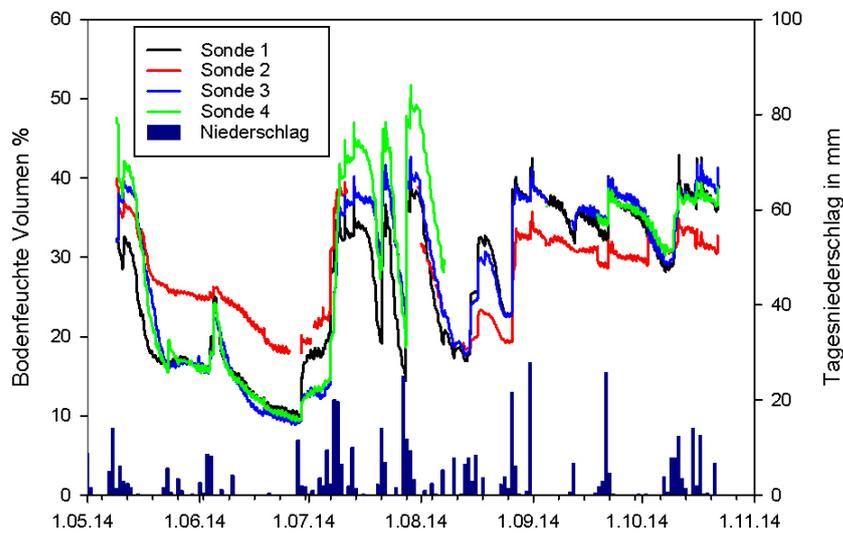


Abb. A-18: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Mulchsaatvariante in 10 cm Bodentiefe.

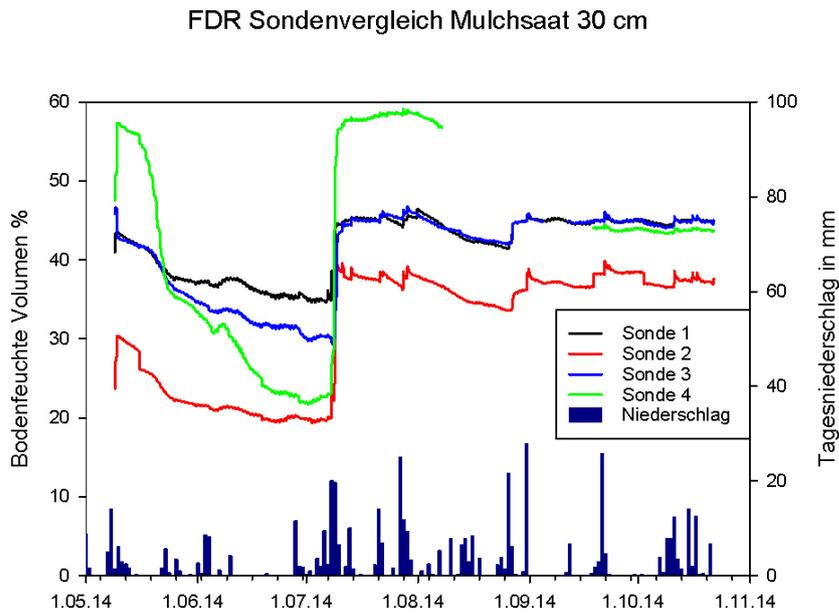


Abb. A-19: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Mulchsaatvariante in 30 cm Bodentiefe.

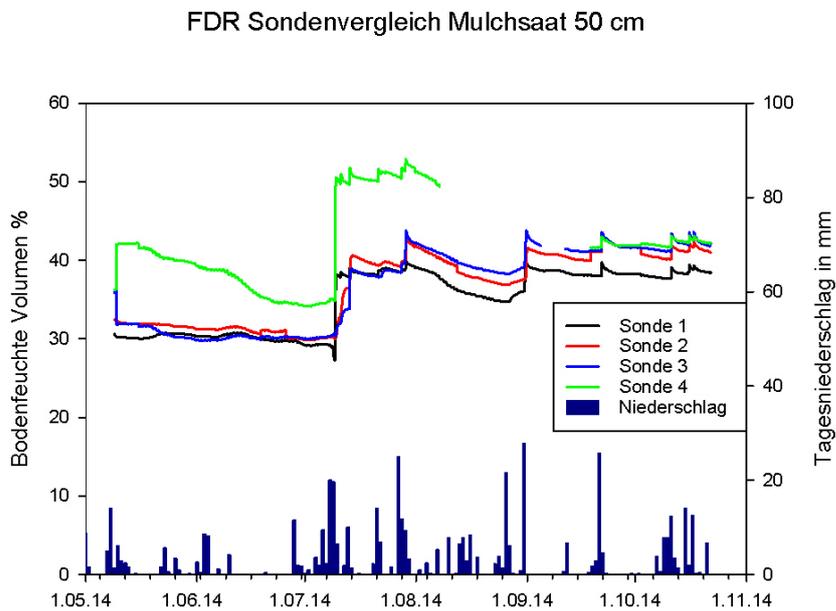


Abb. A-20: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Mulchsaatvariante in 50 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Mulchsaat 70 cm

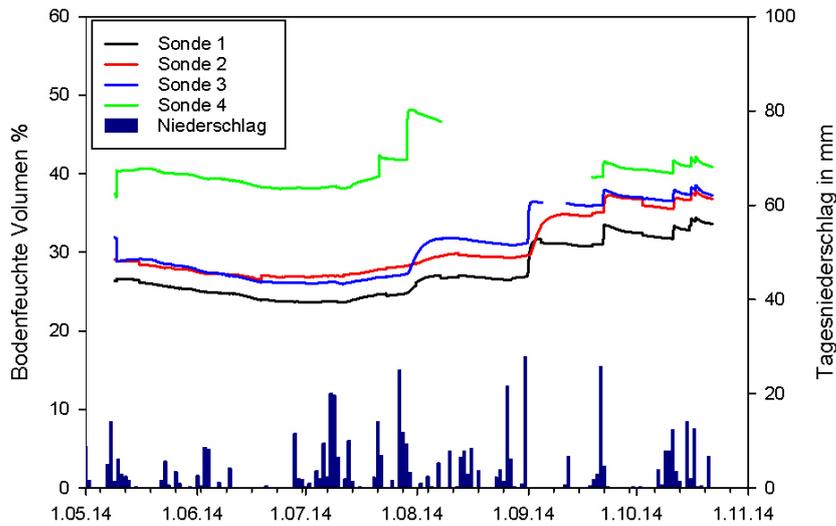


Abb. A-21: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Mulchsaatvariante in 70 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Mulchsaat 90 cm

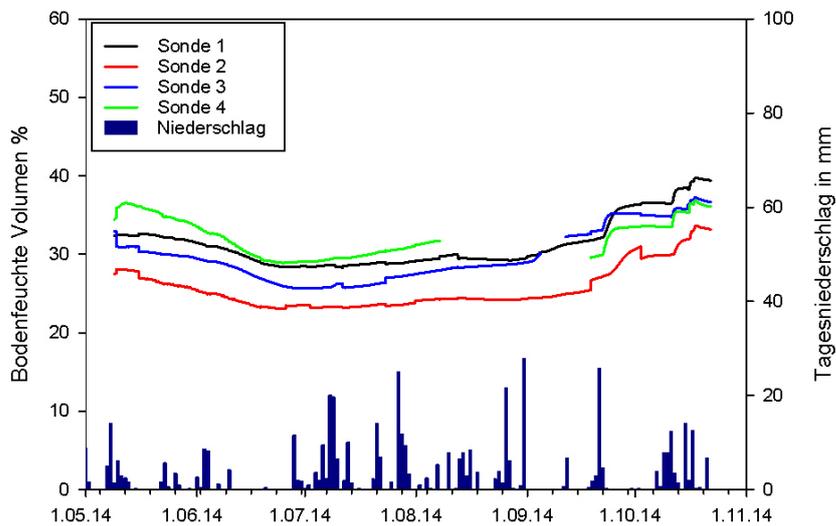


Abb. A-22: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Mulchsaatvariante in 90 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Direktsaat 10 cm

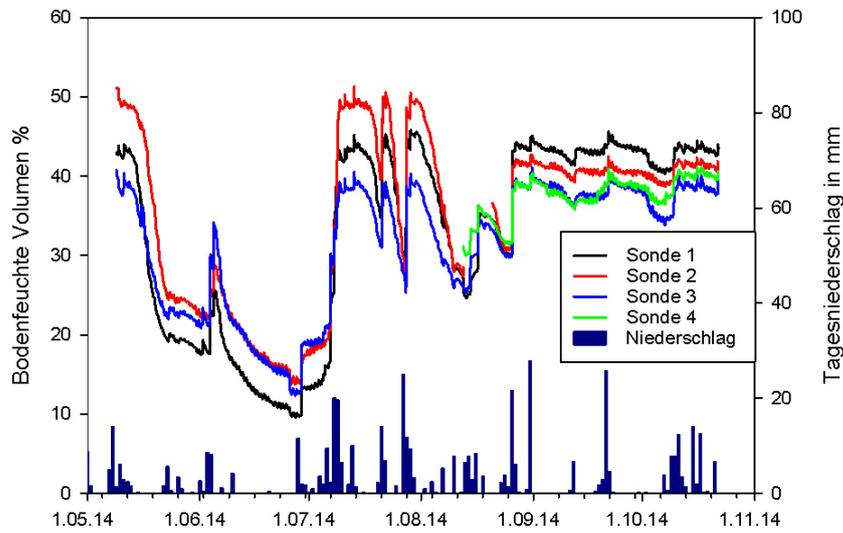


Abb. A-23: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Direktsaatvariante in 10 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Direktsaat 30 cm

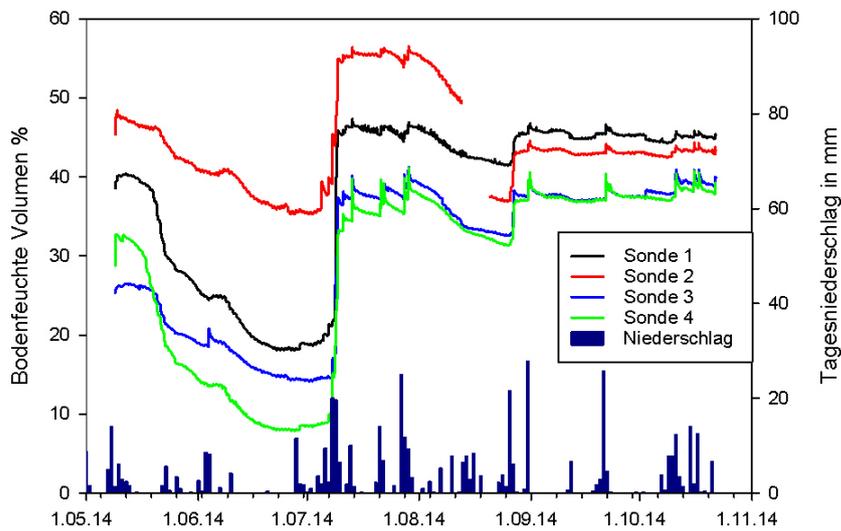


Abb. A-24: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Direktsaatvariante in 30 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Direktsaat 50 cm

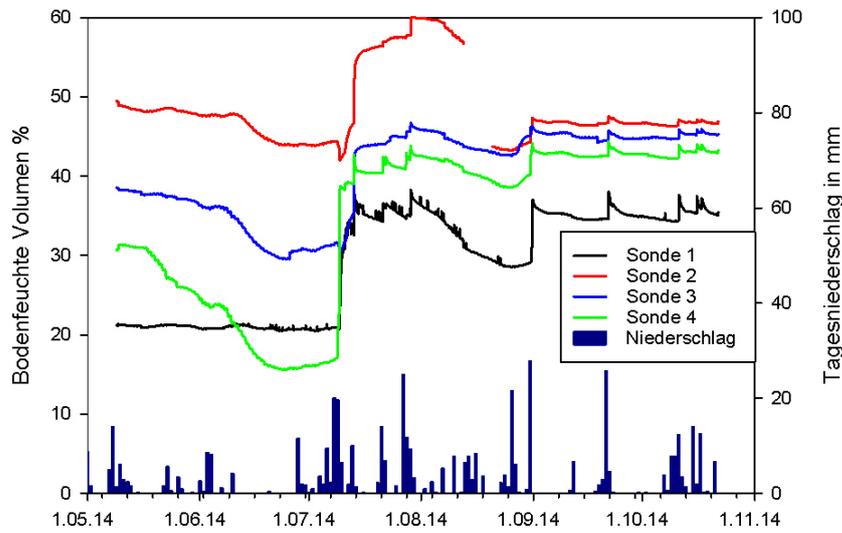


Abb. A-25: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Direktsaatvariante in 50 cm Bodentiefe.

FDR Sondenvergleich Direktsaat 70 cm

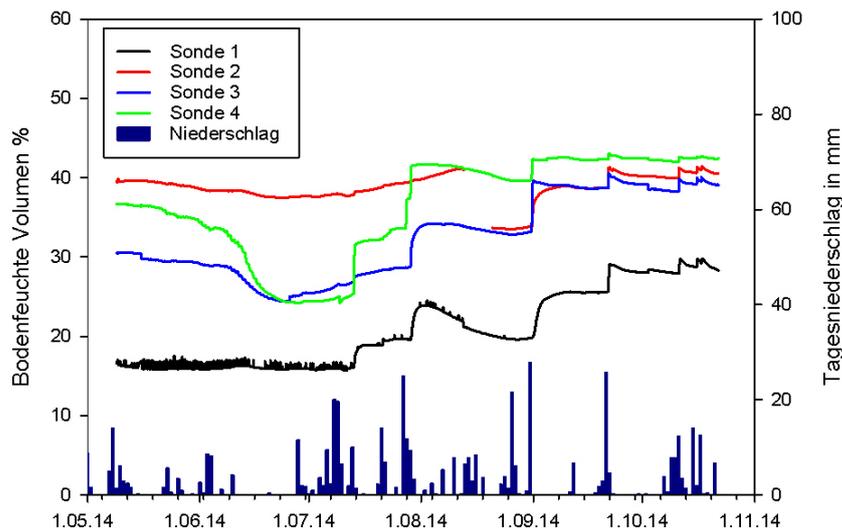


Abb. A-26: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Direktsaatvariante in 70 cm Bodentiefe.

## FDR Sondenvergleich Direktsaat 90 cm

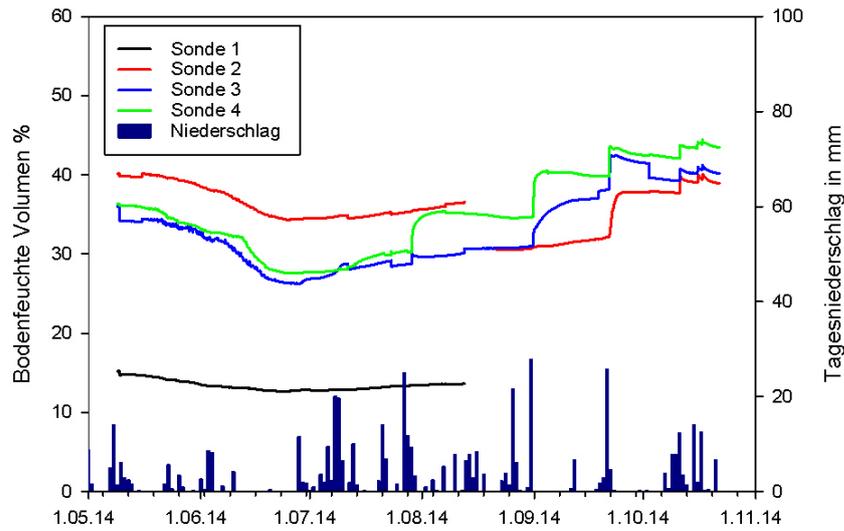


Abb. A-27: Messergebnisse zum Bodenwassergehalt der 4 Profilsonden auf der Direktsaatvariante in 90 cm Bodentiefe.