

Forschungsbericht KLIMOPASS

Bodenwasserhaushalt und Bodenbearbeitung

Bodenwasserhaushalt bei konservierender Bodenbearbeitung

von H. Flaig, J. Schickler

Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

März 2012

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de ;
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Forschungsprogramm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden- Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG	Holger Flaig und Jutta Schickler LTZ Augustenberg, Karlsruhe
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U61-W03-N10
STAND	März 2012, Internetausgabe Mai 2013

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

ZUSAMMENFASSUNG	5
1 EINLEITUNG	7
2 MATERIAL UND METHODEN	10
2.1 Charakterisierung der Standorte	10
2.2 Erfassung der Bodenfeuchte mit Profilsonden	10
2.3 Niederschlagssensoren	12
2.4 Stationäre Sonden für Bodenfeuchte und -temperatur	13
2.5 Versuchsanstellung	14
2.6 Statistik	16
3 AUSWERTUNGEN UND ERGEBNISSE	17
3.1 Das Messprogramm	17
3.2 Vergleich der Niederschlagswerte zwischen den Regenmessern vor Ort und den Vergleichsstationen	19
3.3 Bodenfeuchte im Tiefenprofil (TDR-Profilsonde)	22
3.3.1 Standort Efringen-Kirchen	22
3.3.2 Standort Dossenheim	24
3.3.3 Standort Grünsfeld-Hausen	26
3.3.4 Standort Neresheim-Dossingen	28
3.3.5 Standort Biberach	30
3.4 Bodenfeuchte in zwei Tiefen (stationäre FDR-Sonden)	32
3.4.1 Standort Dossenheim	33
3.4.2 Standort Biberach	35
3.5 Bodentemperatur	37
3.6 Vergleich TDR-Profilsonde und FDR-Sonde	39
3.6.1 Standort Dossenheim	40
3.6.2 Standort Biberach	43
3.7 Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren	46
3.7.1 Vergleich der TDR-Messwerte zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren	46
3.7.2 Vergleich der FDR-Messwerte zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren	58
3.8 Wasservorrat des Solums	61

4	DISKUSSION UND AUSBLICK	65
4.1	Die Ergebnisse im Lichte von Messmethodik, Standortfaktoren und Pflanzenentwicklung	65
4.2	Die Ergebnisse im Spiegel der Literatur	66
4.3	Erklärungsansätze für Unterschiede in Bodenwassergehalt und Ertrag	68
4.4	Ausblick – ein Messprogramm für mehrere Jahre	71
5	LITERATUR	73
6	ANHANG	75
6.1	Bodeneigenschaften der Standorte	75
6.2	Rohdichte	77
6.3	Statistik-Tabellen	78

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft in Baden-Württemberg muss den regionalen Klimaprojektionen zufolge damit rechnen, dass mit dem Fortschreiten des Klimawandels nicht nur die Jahresmitteltemperatur weiter ansteigt, sondern auch die Niederschläge in der Vegetationszeit zurückgehen. Weniger Niederschläge und höhere Verdunstung werden vermutlich dazu führen, dass Anzahl und Intensität von Trockenperioden ansteigen. Eine ausreichende Wasserversorgung während der Vegetationsperiode ist jedoch essentiell für sichere und qualitativ hochwertige Erträge. Der konservierenden Bodenbearbeitung, wie zum Beispiel Mulch- oder Direktsaat, wird zugeschrieben, gerade in Trockenperioden den Kulturpflanzen mehr Bodenwasser zur Verfügung zu stellen als das Pflügen.

Auf verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg werden langjährige Versuche zu den Bodenbearbeitungsverfahren durchgeführt und Pflug, Mulchsaat und Direktsaat auf eng benachbarten Versuchspartzen miteinander verglichen. Im hier berichteten Versuch sollte untersucht werden, ob sich bei diesen Verfahren im Laufe der Vegetationsperiode messbare Unterschiede im Bodenwassergehalt feststellen lassen. In einem ersten Ansatz wurden fünf Standorte dieser Versuchsreihe in unterschiedlichen Landesteilen mit unterschiedlichen Klima- und Bodenverhältnissen als „Standort-Screening“ für knapp eine Vegetationsperiode beprobt. Die Böden wurden bereits 16 Jahre mit den Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulchsaat oder Direktsaat bewirtschaftet. Die Bodenwassergehalte wurden mit Hilfe von TDR-Sonden und FDR-Sonden gemessen. Zusätzlich wurden die Niederschlagswerte vor Ort sowie Luft- und Bodentemperatur erhoben. Die mobilen TDR-Sonden erfassten die Bodenfeuchte wöchentlich in vier Tiefenstufen: 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm und 60-80 cm. Die FDR-Sonden wurden an zwei Standorten stationär in 15 cm und 50 cm Tiefe eingegraben und erfassten stündliche Werte auf Datenloggern.

Die beiden Messverfahren lieferten gut vergleichbare Ergebnisse. Sie bildeten Befeuchtungs- und Austrocknungsphasen des Bodens mit vergleichbarer Qualität ab, unterschieden sich jedoch neben der zeitlichen Auflösung auch etwas in der absoluten Höhe der Messwerte. Dennoch konnten mit den FDR-Sonden zumindest an zwei Standorten die mit den TDR-Sonden erstellten Tiefenprofile in zwei Tiefen plausibel überprüft werden. Von Mitte Juni bis in den Oktober hinein liegen nun Ergebnisse zur Entwicklung der Bodenfeuchte an fünf verschiedenen Standorten in vier Tiefenzonen in unterschiedlichen Böden unter verschiedenartiger Bodenbearbeitung vor.

Ein Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Bodenfeuchte – mit der verwendeten Methodik in den untersuchten Böden in der gegebenen Projektlaufzeit – war zumindest auf den meisten Standorten nicht sicher nachzuweisen. Eine Messkampagne von vier Monaten war freilich sehr kurz, zumal während der Messperiode ausreichend Niederschläge fielen, die möglicherweise eine Ausdifferenzierung von Bodenfeuchte-Unterschieden verhindert haben. Messungen über mehrere Jahre versprechen mehr Aussagekraft, waren aber im Rahmen der Projektkonzeption von Klimopass nicht möglich.

Hinsichtlich des Faktors Klima zeigte sich, dass sich an den niederschlagsreicheren und kühleren Standorten keine signifikanten Unterschiede messen ließen (Biberach, Neresheim-Dossingen). Der Standort in Grünfeld-Hausen erhielt zwar nur wenig Niederschlag, ist aber möglicherweise nicht tiefgründig genug, um Unterschiede messbar werden zu lassen. Lediglich die wärmeren und trockeneren Standorte in Dossenheim und

Efringen-Kirchen zeigten Ansätze einer Differenzierung der Bodenfeuchte zwischen den Bearbeitungsverfahren, allerdings ergab sich auch hier kein einheitliches Bild.

Zwar schnitt die Direktsaat keinesfalls schlechter ab als die Pflug- oder Mulchsaatvariante, jedoch auch nicht signifikant besser. Wenn in Dossenheim Auswirkungen auf den Wassergehalt gemessen werden konnten, dann lediglich unterhalb von 50 cm und in diesem Fall zumeist ohne Pflanzenbestand. Bei der Ermittlung des Wasservorrats im Solum machte sich dies bereits nicht mehr bemerkbar. Die für die Entwicklung des Weizens entscheidende Phase konnte messtechnisch noch nicht erfasst werden, weil die Sonden erst spät in den Boden eingebracht werden konnten.

In Efringen-Kirchen deuten sich höhere Bodenfeuchten der Direktsaatflächen in den oberen 40 cm und im Wasservorrat an, sind aber aufgrund der Variabilität innerhalb der gleichen Parzelle nicht eindeutig zu belegen. Möglicher Einflussfaktor ist neben der Mulchdecke auch die verzögerte Entwicklung der Kulturen auf den Direktsaatparzellen mit Einfluss auf die Transpiration.

Dennoch schnitt Winterweizen in Dossenheim im Versuchsjahr 2011 mit seiner außergewöhnlichen Trockenheit in Frühjahr und Frühsommer auf der Direktsaatparzelle hinsichtlich Ertrag und Qualität am besten ab. Literaturanalysen zufolge könnten die unter Direktsaat ungestörten kontinuierlichen Makroporen bis in den Unterboden, geschaffen durch Regenwurmaktivität und Wurzelkanäle, ein Erklärungsansatz für diesen Ertragsvorteil und für die höheren Bodenfeuchten in 60-80 cm Tiefe bis zum Ende der Messperiode sein.

Ob konservierende Bodenbearbeitung auch "Wasser spart", konnte im vorliegenden Versuch nicht abschließend geklärt werden. Nachteile für den Wasserhaushalt waren nicht festzustellen, insofern handelt es sich zusammen mit anderen positiven Wirkungen der konservierenden Bodenbearbeitung, insbesondere dem Erosionsschutz, um eine „no-regret-Maßnahme“. In einer knappen Vegetationsperiode konnte jedoch die Messmethodik geprüft und optimiert sowie die geeigneten standörtlichen Rahmenbedingungen für einen längerfristigen Versuch ausgelotet werden. Vorschläge wie ein künftiges, mehrjähriges und detaillierteres Messprogramm zum Bodenwasserhaushalt aussehen sollte, schließen den Bericht ab.

1 Einleitung

Baden-Württemberg ist im deutschlandweiten Vergleich, den regionalen Klimaprojektionen zufolge, besonders vom Klimawandel betroffen: Erwartet wird ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 3-4 Grad bis Ende des Jahrhunderts und ein Rückgang der sommerlichen Niederschläge um ca. 15%; nach einigen Regionalmodellen können im Sommer auch 30-40% weniger Niederschläge fallen. Hinzu kommt eine Steigerung der Evapotranspiration durch die höheren Temperaturen und höhere Einstrahlung. Korrespondierend dazu wird 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.

Aus Beobachtungen an landwirtschaftlichen Versuchsstandorten und aus der praxisnahen Literatur gibt es Hinweise darauf, dass unter Mulch- und Direktsaat bei längeren Trockenperioden den Kulturpflanzen mehr oder länger Wasser zur Verfügung stehen könnte als bei Pflugeinsatz (BODNER et al. 2009, CHERVET et al. 2006, SCHMIDT et al. o.J.). Daraus wurde die Vermutung abgeleitet, dass konservierende Bodenbearbeitung „Wasser spart“. Bei der Pflugbearbeitung wird der Boden in der Regel 20-30 cm, z.T. bis 40 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. Bei der Direktsaat wird der Boden fast nicht mehr bearbeitet. Zur Ablage des Saatguts wird lediglich ein Schlitz in den Boden eingebracht.

Es gibt unseres Wissens nur wenige empirische Untersuchungen, ob konservierende Bodenbearbeitung den Wasserhaushalt des Bodens gegenüber dem „Standardverfahren“ Pflug tatsächlich beeinflusst (Beispiele siehe Kap. 4). Ein Grund dafür mag sein, dass langfristige Versuchsanstellungen dafür unabdingbar sind, da sich die Böden gemäß der Art und Weise der Bodenbearbeitung erst ausdifferenzieren müssen. Solche langfristigen Versuche sind rar. Sollte sich durch eine bestimmte Art und Weise der Bodenbearbeitung der Bodenwasserhaushalt im Sinne einer besseren Wasserversorgung der Kulturpflanzen beeinflussen lassen, so wäre dies von eminenter praktischer Bedeutung und eine wichtige Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel. Die vermutete positive Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung auf das Bodenwasser wäre sogar zu konstatieren, wenn die tatsächlichen Klimaänderungen quantitativ anders ausfallen als die Klimaprojektionen erwarten lassen und käme zu anderen positiven Wirkungen wie dem Erosionsschutz hinzu („no-regret-Maßnahme“).

Im so genannten „Systemvergleich Bodenbearbeitung“ werden unter Federführung des LTZ Augustenberg an mehreren Standorten in Baden-Württemberg die Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulchsaat und Direktsaat miteinander verglichen. Fünf der Standorte des „Systemvergleichs“ sind seit 1995 in versuchsmäßiger Bewirtschaftung: Dossenheim, Grünsfeld-Hausen, Neresheim-Dossingen, Biberach und Efringen-Kirchen. Bisher wurden Ertrag, typische Qualitätsparameter und Nmin-Werte erhoben, Bestandes- und Krankheits- bzw. Schädlingsbonituren durchgeführt sowie bodenphysikalische, bodenchemische und bodenbiologische Untersuchungen vorgenommen (z.B. Bestimmung der Trockenrohdichte, Aggregatstabilität, Gehalt an organischem Kohlenstoff, pH-Wert, mikrobielle Biomasse und Enzyme; DELLER et al. 2006, FLAIG 2007).

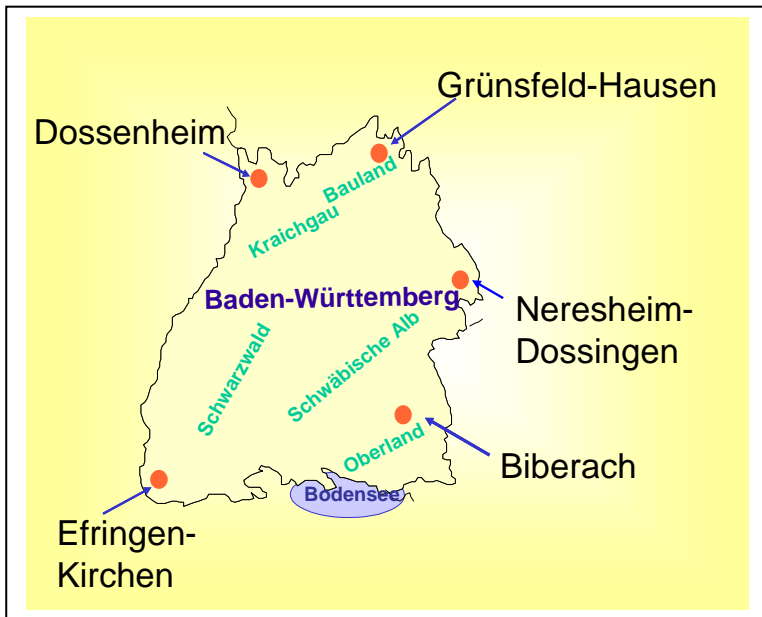


Abb. 1: Lage der Standorte des Systemvergleichs Bodenbearbeitung, die auf ihren Bodenwassergehalt untersucht wurden (Kartenskizze: LTZ).

Mit den Standorten des „Systemvergleichs Bodenbearbeitung“ verfügt das Land über die einmalige Möglichkeit, auf eng benachbarten Parzellen drei unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren auf ihre Wassereffizienz hin zu prüfen. Die Standorte zeichnen sich durch unterschiedliche Klima- und Bodenbedingungen aus und bilden somit die Vielfalt der naturräumlichen Standortfaktoren des Landes gut ab. Umgekehrt sind die Bodenverhältnisse pro Versuchsstandort vergleichsweise einheitlich, so dass die differenzierte Bodenbearbeitung als bestimmender Faktor zum Tragen kommen kann. Die ausgewählten Standorte sind seit 1995 im Versuch, so dass sich die Böden nicht mehr im Umstellungsprozess, sondern mittlerweile in einem bewirtschaftungstypischen Zustand befinden. Insofern bieten die Flächen des „Systemvergleichs Bodenbearbeitung“ durch ihre langjährige spezifische Bodenbearbeitung und gute Charakterisierung beste Voraussetzungen für den Versuch.

Die meisten sonstigen Versuche finden an einem Standort statt. Unser Versuchsansatz war bewusst so gewählt, eine Auswahl an Standorten tentativ zu beproben, anstatt von vornherein einen bestimmten auszuwählen. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass verschiedene Böden und Klimabedingungen erfasst werden, der Nachteil darin, dass mit den verfügbaren Mitteln der einzelne Standort nicht in wünschenswertem Ausmaß mit Messinstrumenten bestückt werden konnte. In einer knappen Vegetationsperiode kann man jedoch die Messmethodik prüfen und optimieren sowie die geeigneten standörtlichen Rahmenbedingungen für einen längerfristigen Versuch ausloten, so dass der Versuch Erkenntnisse darüber liefert, an welchen Standorten in der Folge ein mehrjähriges, intensiveres Messprogramm sinnvoll aufgelegt und welche Parameter mit welchen Instrumenten erfasst werden könnten.

Ermittelt werden sollten etwaige bewirtschaftungsbedingte Unterschiede in der Wasserausnutzung bzw. Bodenfeuchteentwicklung, um Hinweise darauf zu finden, ob und ggf. welche Bodenbearbeitungsvarianten den Kulturpflanzen mehr bzw. länger Wasser zur Verfügung stellen. 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 LTZ Augustenberg in die Beratung der Praxis einfließen. Auch für die Model-

lierung von Bodenwasserhaushaltsparametern, die unterschiedliche Bodenbearbeitungsmethoden bisher nicht berücksichtigt, könnten die Ergebnisse interessant sein. Die Lehrmeinungen sind unterschiedlich: Durch die tiefere Bodenbearbeitung werde die Kapillarität im Boden unterbrochen und damit die unproduktive Verdunstung auf Pflugflächen gesenkt, sagt die eine Seite. Durch das kontinuierliche Makroporensystem möglichst konservierend bearbeiteter Böden werde die Nachlieferung von Wasser an die Wurzeln erleichtert und eine Mulchdecke aus Pflanzenresten schütze vor Verdunstung, sagt die andere Seite.

Gemessen wurde an jedem Standort die Bodenfeuchte in vier verschiedenen Bodentiefen. Die Niederschläge wurden als unverzichtbarer Begleitparameter über Regenmesser mit erhoben. Die Bodenfeuchte dient als Maß für das Wasserangebot im Wurzelraum. An allen Standorten kamen mobile Sonden, die nach dem TDR-Prinzip messen, zum Einsatz. An zwei Standorten, einem trocken-warmen (Dossenheim im Rhein-Neckar-Kreis) und einem feuchteren und kühleren (Biberach), wurden zusätzlich stationäre Sonden, die nach dem FDR-Prinzip messen, in zwei Bodentiefen eingegraben. Damit konnte man zwei hinsichtlich Boden und Klima im Landesmaßstab sehr unterschiedliche Standorte intensiver beproben und gleichzeitig die Ergebnisse der beiden Sondentypen miteinander vergleichen. Die Bodentemperatur wurde an diesen beiden Standorten mit erhoben. Sie kann sich durch bewirtschaftungsbedingte Unterschiede in Bodenaufgabe, Lagerungsdichte und Gefüge unterscheiden. Auch hier fehlen empirische Daten, die aber für eine Interpretation sowohl der Wasserhaushaltsdaten, als auch der Daten zur Bestandesentwicklung eine wichtige Ergänzung darstellen.

Die Projektfinanzierung ließ von vornherein nur die Messung über eine Vegetationsperiode zu. Da alle Projekte erst später als geplant starten konnten, konnte die Messperiode leider auch nicht die gesamte Vegetationsperiode umfassen. Insofern wurden interessante Witterungsperioden wie die außergewöhnliche Frühjahrstrockenheit 2011 und wichtige Phasen der Pflanzenentwicklung leider nicht mehr erfasst. Die Beschränkung auf das Jahr 2011 bedeutet auch, dass Witterungsvariabilitäten mehrerer Jahre, die eine höhere Aussagekraft zuließen, nicht in die Analyse einfließen konnten. Unter der Prämisse: „ein Jahr, mehrere Standorte, begrenzte Instrumentierung“ sind die im Folgenden geschilderten Versuche zu sehen.

2 Material und Methoden

2.1 Charakterisierung der Standorte

Tab. 1: Standort- und Bodeneigenschaften der Versuchsfelder des „Systemvergleichs Bodenbearbeitung“, die für die Messung der Bodenwassergehalte herangezogen wurden (vgl. Abb. 1).

Standort	Standorteigenschaften			Boden		
	Höhenlage [m ü. NN]	Ø Jahrestemp. [°C]	Ø Jahresnieder- schlag [mm]	Bodenart	Ø Acker- zahl	Gründigkeit
Dossenheim	100	10,2	670	uL - IT	80-85	> 1 m
Efringen- Kirchen	250	9,4	650	sL - L	80	ca. 1 m
Grünsfeld- Hausen	315	9,3	615	T	35	ca. 35 cm
Neresheim- Dossingen	540	6,8	700	uL - IT	32-60	ca. 60-80 cm
Biberach	570	7,5	835	sL - uL	50-55	ca. 1 m

Im Zuge bodenphysikalischer, bodenchemischer und bodenbiologischer Untersuchungen wurden in den Jahren 2004 und 2005 Proben aus den oberen 50 cm dieser Standorte gezogen (DELLER et al. 2006, FLAIG 2006, 2007). Sie ermöglichten eine nähere Charakterisierung der Bodeneigenschaften – wie Bodenart, Humusgehalt und pH-Wert – zu diesem Zeitpunkt. Damals waren die Standorte bereits 10 Jahre in der differenzierten Bodenbearbeitung. Ob die damals festgestellten Bodenwerte im Untersuchungsjahr 2011 so immer noch zutreffen, ist fraglich. In der Tendenz wird das aber der Fall sein (Differenzen könnten sich sogar noch weiter ausgeprägt haben). Die Ergebnisse sind in Kap. 6.1 und 6.2 aufgeführt und werden im Bericht zur Interpretation der Ergebnisse mit herangezogen.

Aufgrund von Problemen mit Unkrautbesatz und Strohverteilung wurde an drei Standorten die Direktsaat mit einer oberflächlichen Bodenbearbeitung modifiziert: Die obersten 2-5 cm wurden mit einer Egge durchmischelt. Dies betrifft die Standorte Grünsfeld-Hausen, Biberach (beide seit 2006) und Neresheim-Dossingen (seit 2001). Efringen-Kirchen und Dossenheim blieben bei „echter“ Direktsaat.

2.2 Erfassung der Bodenfeuchte mit Profilsonden

Die Bodenfeuchte an allen fünf Standorten wurde 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 Die-

lektrizitätskonstanten im Boden. Diese wiederum wird überwiegend von der Bodenfeuchte bestimmt. Über eine Kalibrationskurve wird so die volumetrische Bodenfeuchte ermittelt. Im Versuch wird das mobile Messsystem der Fa. 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,
- 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 über elliptisch verlaufende Feldlinien etwa 15 cm tief eindringt. Damit kann die Bodenfeuchte also ungefähr in 20 cm-Schritten tiefenabhängig erfasst werden. Die Messempfindlichkeit ist direkt am Rohr am größten und nimmt nach außen exponentiell ab. Ein guter Kontakt zwischen Messmedium und Rohr ist wesentlich für die Messgenauigkeit. Diese beträgt im Bereich 0 bis 40% Bodenfeuchte ± 2 Vol.%. Verwendet wurden Standardrohre von einem Meter Länge (in Grünsfeld-Hausen wegen des sehr flachgründigen Bodens lediglich Rohre von 0,5 m Länge).

Pro Bearbeitungsvariante (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat) wurden zwei Messorte eingerichtet, pro Standort also 6 Messorte. Die Erfassung der Bodenfeuchte erfolgt in 0 - 20 cm, 20 - 40 cm, 40 - 60 cm 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 9. 6. 11 gewonnen. Danach wurde im wöchentlichen Abstand gemessen. Pro Tiefenstufe wurden an jedem Messtermin drei Einzelmessungen vorgenommen. Dabei wurde die Sonde jeweils ein wenig gedreht, um leicht unterschiedliche Bodenbereiche zu erfassen.

Zum Einbringen in den Boden verläuft innerhalb des Tecanatrohrs ein Stahlrohr, auf dem ein Schlagkopf sitzt. An der Tecanat-Rohrbasis ist eine Stahlschneide eingeklebt. Der Boden wird mittels eines Spiralbohrers innerhalb des Stahlrohrs portionsweise heraufgeholt und die Rohre anschließend mittels eines rückschlagfreien Hammers ein Stück vorgetrieben, anfangs noch mit Unterstützung einer Haltevorrichtung. Dies wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Maximaltiefe erreicht ist – in der Regel stehen die letzten 5-7 cm über. Dann wird das Innen-Stahlrohr entfernt. Nach erfolgter Installation wird das Rohr an der Rohrbasis mit einem Gummistopfen gegen Bodenwasser sowie oben mit einer Plastikkappe und einem Neoprenring gegen Niederschlag abgedichtet.

In unseren Versuchen hat sich in steinigen Böden der vorsichtige Einsatz eines langen Bohrers, der mittels Bohrhammer vorgetrieben wird, bewährt. Der Bohrer dreht sich dabei innerhalb des für das Setzen vorgesehenen Innen-Stahlrohrs. Der konventionelle Vortrieb mit Handbohrer stößt bei steinigen Böden schnell an Grenzen und führt zu Beschädigungen der Tecanatrohre oder zeitintensiven Ausgrabungsaktionen. In tonigen Böden wiederum hat sich die Bohrhammer-Lösung nicht bewährt. Hier kommt es zu Verbackungen der Tonanteile innerhalb des Stahlrohrs.

Das Entfernen der Tecanatrohre nach erfolgter Messkampagne ist lediglich in sandigen Böden mit vertretbarem Aufwand zu bewerkstelligen. In lehmigen und erst recht in tonigen Böden ist es fast unmöglich, die

Rohre allein durch Ausgraben zu bergen. Hier musste mit einigem Erfolg eine Hebellösung entwickelt werden (J. BERTSCH, pers. Mitt.).

Bei der Anwendung der TDR-Messtechnik sind einige Besonderheiten zu beachten (IMKO o. J.): Aufgrund der höchsten Empfindlichkeit der Sonde unmittelbar an der Oberfläche des Wellenleiters und der niedrigen Dielektrizitätskonstante von Luft wirken sich Luftspalten stark auf die Messung aus und die Feuchte wird z. T. stark unterbewertet. Ein dichter Bodenschluss ist wesentlich. In stark tonhaltigen Böden kann es auch zu Problemen mit Schrumpfungsrissen bei Trockenheit kommen. Werksseitig ist die Sonde auf Mineralböden kalibriert und erfasst damit die Mehrzahl der vorkommenden Böden. Die Abhängigkeit der Messung vom Bodentyp ist nicht ausgeprägt, allerdings können spezifische Materialkalibrierungen notwendig werden, wenn in sehr tonreichen Substraten oder Böden mit mehr als 10% organischer Substanz gemessen werden soll.

Für unsere Messungen relevant ist die Abhängigkeit der Messergebnisse von der Lagerungsdichte der Böden (IMKO o. J.). Die universelle Kalibrierfunktion für mineralische Böden wurde 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).

Aus Kap. 6.2 ist zu entnehmen, dass auf den Standorten Efringen-Kirchen, Dossenheim und Grünsfeld-Hausen in den Varianten Pflug und Mulchsaat gerade in den oberen Horizonten deutlich niedrigere Lagerungsdichten als $1,4 \text{ g/cm}^3$ auftreten können. Die Unterschiede zu den höheren Lagerungsdichten in der Direktsaatvariante ließen es angebracht erscheinen, die Auswirkungen der Korrektur zumindest für die Standorte Efringen-Kirchen und Dossenheim graphisch darzustellen (Abb. 52-55). Allerdings sind die Daten der Trockenrohdichte bereits vor einigen Jahren erhoben worden und entsprechen nicht genau den durch die TDR-Sonde erfassten Horizonten. Sie liefern aber einen Anhaltspunkt für die Korrekturen der Bodenfeuchte-Ergebnisse, die durch die unterschiedliche Lagerungsdichte in den Bodenbearbeitungsvarianten notwendig werden. In künftigen Untersuchungen wäre der adäquaten Bestimmung der Lagerungsdichte entsprechend Rechnung zu tragen.

2.3 Niederschlagssensoren

An vier Standorten wurden Niederschlagssensoren (MD 532, Trichteröffnung 200 cm^2 , Kipplöffel-Prinzip mit integriertem HOB0®-Pendant Logger (Onset Computer Corp., MA, USA)) an speziellen Masten 1 m über Grund installiert, um die Niederschläge vor Ort zu erfassen. Am Standort Dossenheim befindet sich eine Station des Julius-Kühn-Instituts in unmittelbarer Nähe zum Versuch, so dass die dortigen Werte, die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, herangezogen werden konnten. An den anderen Standorten wurden die nächsten Wetterstationen identifiziert, um für die Zeit bis zur Installation eigener Sensoren die meteorologischen Daten der Nachbarschaft zumindest als Näherungslösung verwenden zu können (Tab. 4). Außerdem dienen die Werte dieser Messstationen als Referenz, um die Messwerte unserer

Regenmesser auf Plausibilität zu überprüfen sowie etwaige Messlücken zu füllen, sofern sonst eine Vergleichbarkeit beider Messreihen gegeben war. Messlücken traten in der Tat auf, sei es durch Verstopfen der Trichteröffnungen, temporäre Entfernung des Geräts vom Standort oder Erfassungsfehler.

2.4 Stationäre Sonden für Bodenfeuchte und -temperatur

An zwei Standorten, Dossenheim und Biberach, wurden „Intensivmessfelder“ eingerichtet. Die Standorte repräsentieren in etwa die standörtlichen Extreme des „Systemvergleichs“: Dossenheim tief gelegen und eher trocken-warm, Biberach höher gelegen, entsprechend kühler und niederschlagsreicher. In der Bodenart sind die Unterschiede geringer; Dossenheim ist etwas toniger, Biberach etwas sandiger.

Zusätzlich zum System der TDR-Sondenmessung über eingebrachte Rohre wurden an diesen beiden Standorten weitere Sonden mit FDR-Messprinzip permanent in den Boden eingegraben. Bei der Frequency-Domain-Reflectometry (FDR)-Technik wird der Wassergehalt ebenfalls indirekt über die Dielektrizitätskonstante bestimmt. Der Boden dient hierbei allerdings zusammen mit den Metallstäben der Sonde als Kondensator und Bestandteil eines Stromkreises, der die ausgesandten Frequenzen eines Oszillators je nach Feuchte verändert. Das stationäre Messsystem an den beiden Standorten besteht aus Komponenten der Fa. Delta-T Devices Ltd (Burwell, Cambridge, UK); Beratung und Lieferung durch UP Umweltanalytische Produkte GmbH, Ibbenbüren:

- SM300-Kombinationssonden, die Bodenfeuchte und Temperatur erfassen;
- GP1-Logger,
- entsprechende Verbindungskabel.

Die Messgenauigkeit der Sonde beträgt nach Herstellerangaben bis 50 Vol.% Bodenfeuchte $\pm 2,5$ Vol.% und $\pm 0,5$ °C für Temperaturen bis 40 °C. Das Messvolumen erreicht bei 55mm Länge x 70mm Durchmesser bis zu 1 Liter, allerdings wird der Messwert vom Boden unmittelbar um die Sondenstäbe dominiert. Wie für die TDR-Sonde gilt, dass dichter Bodenschluss um die Sondenstäbe unabdingbar ist. Da hier die Bodenfeuchte ebenfalls über die Dielektrizitätskonstante bestimmt wird, hat vermutlich die Lagerungsdichte des Bodens ähnlichen Einfluss auf die Messwerte wie bei der TDR-Sonde beschrieben (Kap. 2.2).

Pro Bearbeitungsvariante wurden an zwei verschiedenen Messorten zwei Sonden in Tiefen von 15 cm und 50 cm eingegraben, pro Variante also vier Sonden, pro Standort 12 Sonden. Dabei wurde mit einem Spaten eine kleine Grube gegraben und die vertikale Bodenoberfläche der Grube mit einem Spatel vorsichtig bis etwa 55 cm Tiefe abgetragen, so dass das natürliche Lagerungsprofil möglichst erhalten blieb. Anschließend wurden die Sonden horizontal in die entsprechenden Tiefen eingebracht und über Kabelverbindungen mit den Loggern verbunden, wobei ein Logger die Signale von zwei Sonden (Temperatur und Bodenfeuchte) stündlich aufnahm. Die Gruben wurden vorsichtig zugeschüttet, um die Sonden nicht wieder zu lockern.

Die Datenauslesung erfolgte zur Kontrolle wöchentlich im Zuge der Messung mit den IMKO-Rohrsonden; die Logger konnten jedoch die Messwerte des gesamten Versuchszeitraums speichern. Die Logger wurden abhängig von den standörtlichen Gegebenheiten über eingegrabene Verlängerungskabel entweder am Feldrand platziert (kleine Parzellengrößen in Biberach) oder direkt in der Nähe der Sonden in einer Linie mit diesen und den Tecanatronen (größere Parzellen in Dossenheim).

Durch diese Versuchsanordnung konnte auf den Intensivmessflächen Dossenheim und Biberach 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. Die stationären Sonden wurden ab der 24. Kalenderwoche regelmäßig abgelesen.

2.5 Versuchsanstellung

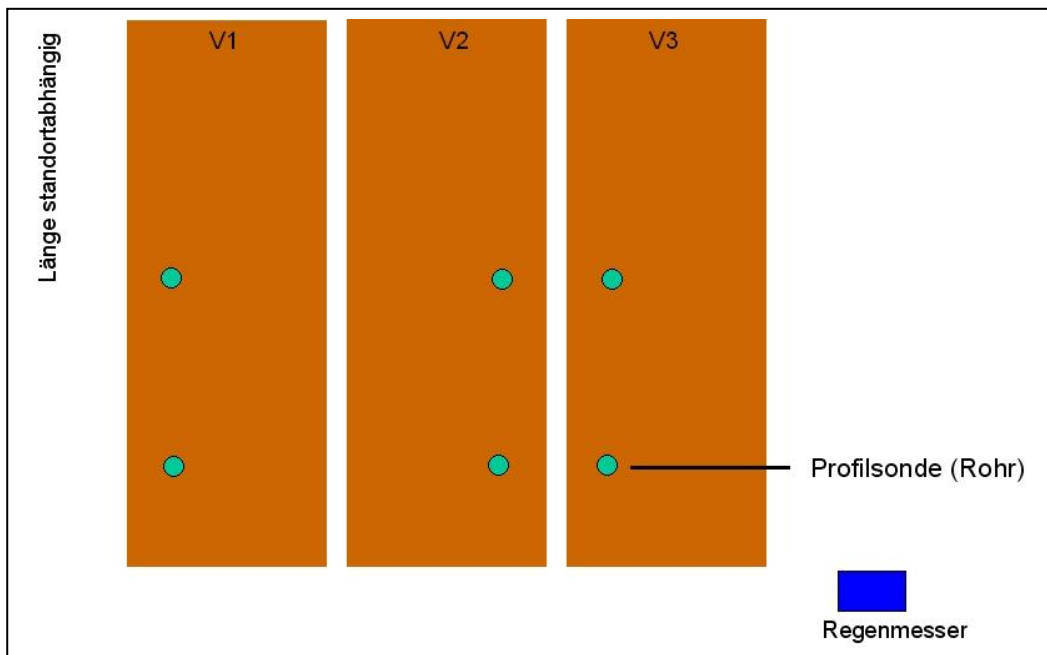


Abb. 2: Skizze der Basis-Messanordnung an allen Standorten

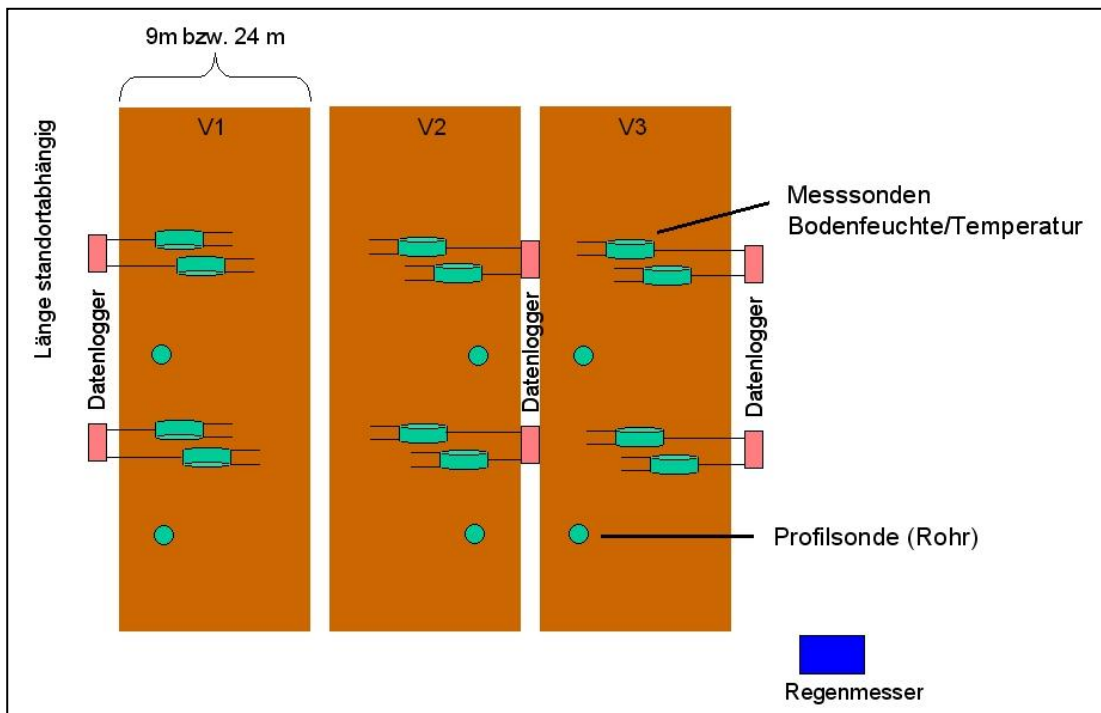


Abb.3: Skizze der Messanordnung auf den Intensivmessfeldern in Dossenheim (Parzellenbreite 24 m) und Biberach (Parzellenbreite 9 m).

Die verschiedenen Standorte mit ihren Messfeldern wurden einmal pro Woche angefahren und die Daten erfasst bzw. ausgelesen. Beim Einbringen der Rohre für die Profilsonden und der bodenstationären Sonden wurde darauf geachtet:

- möglichst ebenes oder nur schwach geneigtes Gelände auf den Parzellen dafür auszuwählen, um Reliefeinflüsse gering zu halten;
- vom Vorgewende aus mindestens 10 m Abstand zu halten,
- keine Fahrspur zu beproben,
- Inhomogenitäten wie z.B. Flecken hoher Unkrautdominanz 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 nicht uneingeschränkt zu gewährleisten, da die Tecanatrohre für die Profilsonden eingeschlagen werden müssen und rund um das Rohr damit Verfestigungen eintreten. Ebenso werden bereits gewachsene Pflanzen teilweise niedergetreten, was u.U. Auswirkungen auf die Transpirationsintensität in unmittelbarer Nähe der Rohre hat. Das Vorgehen bei den stationären Sonden wurde bereits erläutert und führt im Bereich der wieder aufgefüllten Grube zu unvermeidlichen Störungen.

Die Rohre und Sonden wurden in den wachsenden Bestand eingebracht. Hierbei handelte es sich im Versuchsjahr 2011 um folgende Kulturen (Tab. 2):

Tab. 2: Im Versuchszeitraum auf den Versuchsfeldern angebaute Kulturen

Standort	Kulturbestand
Dossenheim	Winterweizen
Efringen-Kirchen	Körnermais
Grünsfeld-Hausen	Winterraps
Neresheim-Dossingen	Dinkel, nach Hagelschaden Begrünung mit Blümmischung
Biberach	Silomais im Rahmen einer fünfgliedrigen Fruchtfolge

Die Parzellen des „Systemvergleichs Bodenbearbeitung“ werden von Landwirten bewirtschaftet. Hierbei werden sie durch die Pflanzenbauberater der zuständigen Unteren Landwirtschaftsbehörde begleitet. Die Landwirte haben Interesse daran, dass der Versuchsaufbau ihre praktische Arbeit möglichst wenig stört. Der Versuch wurde mit den Beratern, z.T. auch mit den Landwirten vor Ort beim Setzen der Rohre besprochen. Als Kompromiss wurden die Rohre nicht mittig in einer Parzelle, sondern eher am Rand gesetzt, jedoch so, dass Randeinflüsse noch keine Rolle spielen sollten. Auf langen Schlägen wurde aus Gründen der Arbeitserleichterung sowohl für den Landwirt, als auch für den Versuchsansteller beide Rohre in überschaubarem Abstand zueinander platziert.

In der Regel wurde so vorgegangen: Tecanatrohre/Profilsonden: vom Vorgewende aus 10 m am Parzellenrand in Längsrichtung entlang, dann 3m in die Parzelle hinein Platzierung des ersten Rohres. Von dort aus weitere 20 m in Längsrichtung am Parzellenrand entlang und wieder 3 m in die Parzelle hinein Platzierung des zweiten Rohres (Abb. 2). Die stationären Sonden wurden in Dossenheim und Biberach zum einen unge-

fähr zwischen den vorher eingesenkten Tecanatrohren, zum andern weiter in Längsrichtung der Parzelle eingebracht (Abb. 3).

2.6 Statistik

Aufgrund der begrenzten Anzahl der Sonden konnte keine statistische Auswertung der Daten im klassischen Sinne erfolgen. Dazu hätte es pro Variante und Standort einer deutlich höheren Anzahl an Sondenrohren und Sonden bedurft. Dennoch wurde eine statistische Behandlung der Daten versucht, die Aussagekraft ist allerdings begrenzt. Hierzu wurde die Zeitreihe einer Messung von Beginn bis Ende der Messkampagne in einem TDR-Messrohr oder einer FDR-Sonde als Verteilung angesehen und mit anderen „Verteilungen“ verglichen, beispielsweise die Zeitreihe von TDR-Rohr 1 (Pflug, 0-20 cm) mit der Zeitreihe aus TDR-Rohr 2 (Pflug, 0-20 cm) einer Variante eines Standorts. Für paarweise Vergleiche wie diesem wäre ein t-Test an sich Mittel der Wahl. Da ein Test auf Normalverteilung in der Regel negativ war, wurde stattdessen das nicht-parametrische Pendant des Mann-Whitney-U-Tests durchgeführt. Wurden mehrfache Vergleiche durchgeführt, wie z.B. die Zeitreihe TDR-Pflug (60-80 cm) mit den Zeitreihen TDR-Mulch- und -Direktsaat (60-80 cm) an einem Standort, so wurde der non-parametrische Kruskal-Wallis-Test (statt einer Varianzanalyse bei Normalverteilung der Daten) durchgeführt. Für diese Tests wurde das Statistik-Paket des Programms SigmaPlot 12 verwendet. Die entsprechenden Datentabellen finden sich im Anhang, Kap. 6.3.

Um zu prüfen, inwiefern die Daten unserer Regenmesser mit denen der Vergleichsstationen übereinstimmen, wurden die Regenmesserwerte der Niederschlagshöhe nach sortiert und die korrespondierenden Tageswerte der Vergleichsstationen mittels linearer Regression auf Übereinstimmung geprüft (Excel-Statistik-Paket).

3 Auswertungen und Ergebnisse

3.1 Das Messprogramm

Durch Verzögerungen der Finanzierungszusage konnte das Projekt erst verspätet beginnen. Leider konnte dadurch die außergewöhnliche Frühjahrstrockenheit dieses Jahres – von Februar bis Mai fielen in Baden-Württemberg nur knapp 40 % der Niederschläge des langjährigen Mittels – messtechnisch nicht mehr erfasst werden. In der Installationsphase der Messgeräte (Tab. 3) und während der ersten Messungen waren jedoch an manchen Standorten durchaus noch Auswirkungen der langen Trockenheit zu sehen und zu messen. So konnte man z.T. bereits makroskopisch deutliche Unterschiede an der Bodenoberfläche und -struktur erkennen (Abb. 4 a-d).



Abb. 4: Photos von der Bodenoberfläche am Standort Dossenheim am 17. 5. 2011: a) und b) Pflugvariante mit Trockenrissen; c) Mulchvariante; d) Direktsaatvariante (Photos: Jutta Schickler)

Während in der Pflugvariante am Standort Dossenheim deutliche, bis 30 cm tiefe Trockenrisse auftraten, waren solche Auswirkungen der außergewöhnlichen Frühjahrstrockenheit weder auf Mulch- noch Direktsaat zu erkennen.

Im Hinblick auf die Beschränkung der Projektlaufzeit auf das Jahr 2011 wurden Rohre und Sonden im Oktober 2011 abgebaut (Tab. 3). Dadurch konnten auch die Auswirkungen des „trockensten November seit 1881“ (Deutscher Wetterdienst) auf den Boden nicht mehr gemessen werden. Es steht jedoch zu vermuten, dass die Bodenfeuchte aufgrund der geringeren Evapotranspiration nicht so stark sank wie bei entsprechenden Trockenperioden im Sommer.

Tab. 3: Beginn und Ende der regelmäßigen Messperiode für TDR- und FDR-Sonden sowie die Erntezeiten der Hauptfrüchte (s. Tab. 2)

Standort	Profilsonde		Stationäre Sonden		Ernte Hauptfrucht
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	
Dossenheim	10. 6. 11	20. 10. 11	16. 6. 11	20. 10. 11	4. 7. 11
Efringen-Kirchen	14.6. 11	27. 10. 11			12. 10. / 11. 11. 11*
Grünsfeld-Hausen	15. 6. 11	21. 9. 11			26. 7. 11
Neresheim-Dossingen	17. 6. 11	12. 10. 11			22. 6. 11 (Hagel)
Biberach	9. 6. 11	11. 10. 11	17. 6. 11	11. 10. 11	2. 10. 11

* Pflugvariante: 12.10; Mulch- und Direktsaat 11.11.

Wie Tabelle 3 zeigt, wurde das Versuchsfeld in Dossenheim relativ bald nach Beginn der Messungen abgeerntet (Notreife des Winterweizens wegen Trockenheit). Für den Rest der Versuchslaufzeit bis zur Einsaat der Folgefrucht Ende September war es ein Stoppelfeld. In Efringen-Kirchen und Biberach hingegen stand Körner- bzw. Silomais fast bis zum Ende der Messperiode. In Neresheim-Dossingen wurde der gut entwickelte Dinkel durch einen Hagelsturm schwer geschädigt, stand aber bis zur Einsaat einer von Phacelia und Klee dominierten Blümmischung Mitte Juli noch auf dem Feld. In Grünsfeld-Hausen entwickelte sich der Winterraps wegen des sehr trockenen Frühjahrs und Frühsommers auf dem ohnehin flachgründigen Boden sehr schlecht und wurde – vermutlich ohne Ertragserwartung – Ende Juli gedroschen. Hinsichtlich des Pflanzenbestandes und der damit verbundenen Transpirationsintensität lagen also unterschiedliche Bedingungen vor. Dies ist bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen.

Folgende Daten wurden erhoben:

Profilsondenmessungen:

- an 5 Standorten mit je 3 Varianten (Pflug, Mulch-, Direktsaat), pro Variante jeweils 2 Messstellen (Tecanatrohre).
- Volumetrische Bodenfeuchte in vier Tiefen: 0-20, 20-40, 40-60 und 60-80 cm Tiefe als Momentaufnahme einmal wöchentlich.
- Temperatur der Luft in den Tecanatrohren.

Stationäre Sonden:

- an 2 Standorten mit je 3 Varianten (Pflug, Mulch-, Direktsaat), pro Variante jeweils 2 Messstellen.
- Volumetrische Bodenfeuchte in zwei Tiefen: 15 und 50 cm, mit stündlichen Werten und Speicherung im Logger, Auslesung wöchentlich.
- Bodentemperatur in 15 cm und 50 cm Tiefe.

Niederschläge:

- Regenschirm mit stündlichen Werten der Niederschläge vor Ort.
- Lufttemperatur in ca. 1 m Höhe.
- Weitere Werte über Wetterstationen in der Nähe.

Folgende Auswertungen wurden durchgeführt:

- 1) Vergleich der Niederschlagswerte zwischen den Regenschirmen vor Ort und den Vergleichsstationen.
- 2) Bodenfeuchte im Tiefenprofil (Profilsondenmessungen): 0-80 cm in 4 Stufen. Insgesamt 6 Messreihen pro Standort; die beiden Messreihen pro Variante separat dargestellt.
- 3) Bodenfeuchte in zwei Tiefen (stationäre Sonden): 15 und 50 cm. Insgesamt 12 Messreihen pro Standort; die beiden Messreihen pro Variante und Tiefe separat dargestellt.
- 4) Bodentemperatur in zwei Tiefen (stationäre Sonden): 15 und 50 cm. Insgesamt 12 Messreihen pro Standort; die beiden Messreihen pro Variante und Tiefe als Mittelwert dargestellt (nur Bearbeitungsvergleich).
- 5) Vergleich TDR-Profilsonde und FDR-Sonde an den Standorten Dossenheim und Biberach:
 - Profilsonde 0-20 cm versus stationäre Sonde 15 cm,
 - Profilsonde 40-60 cm versus stationäre Sonde 50 cmam Messtag der Profilsonden.
- 6) Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten: Je Tiefenstufe der TDR-Sonden Vergleich Pflug/Mulch-/Direktsaat und in den zwei Tiefenstufen der FDR-Sonden Vergleich Pflug/Mulch-/Direktsaat.
- 7) Berechnung des Wasservorrats im Solum bis 80 cm Tiefe auf Grundlage der TDR-Messungen.

3.2 Vergleich der Niederschlagswerte zwischen den Regenschirmen vor Ort und den Vergleichsstationen

Die von uns installierten Logger zeichnen die Niederschlagsereignisse „eventbezogen“ auf, dabei umfasst ein „Ereignis“ 0,2 mm Niederschlag auf dem Kipplöffel. Die so berechneten Niederschläge wurden bis zur nächsten Loggerauslesung aufsummiert und gespeichert. Zur Bildung von Tagessummen mussten die akkumulierten Daten dem entsprechenden Tag zugeordnet werden. Beim Vergleich mit den Referenz-Wetterstationen spielen die Entfernung dieser Stationen zum Versuchsstandort, besondere räumliche Gegebenheiten, aber auch unterschiedliche Bezugszeiträume für den Tageswert eine Rolle.

Um zu entscheiden, ob die Wetterstationen zur Ergänzung unserer eigenen Daten herangezogen werden konnten, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt (Tab. 4, Abb. 5):

Tab. 4: Standorte der Regenmesser, korrespondierende Vergleichs-Wetterstationen und Ergebnisse der Korrelationsanalyse.

Standort	Wetterstation	Bestimmtheitsmaß
Dossenheim*	Julius-Kühn-Institut, Dossenheim	---
Efringen-Kirchen	LTZ-Station Fisingen	0,938
Grünsfeld-Hausen	DWD-Station Bad Mergentheim	0,749
	DWD-Station Würzburg	0,917
Neresheim-Dossingen	Wetterwarte Ostalb, Neresheim**	0,899
Biberach	LTZ-Station Biberach	nicht sinnvoll bestimmbar

* kein eigener Regenmesser aufgestellt.

**Die Daten wurden vom Betreiber, Herrn Guido Wekemann, freundlicherweise überlassen.

Für die Standorte Efringen-Kirchen, Grünsfeld-Hausen und Neresheim-Dossingen wurde die Eignung der Vergleichs-Wetterstationen als gut bis sehr gut eingeschätzt; für Grünsfeld-Hausen wurde die Station Würzburg ausgewählt. Unsere Niederschlagsmessungen in Efringen-Kirchen korrespondieren gut mit den Stationsdaten von Fisingen (Niederschlag und Temperatur), obwohl unser Regenmesser im Laufe des Bestandeswachstums vom Mais überwachsen wurde und somit nicht mehr ganz frei stand.

In den Auswertungen und Diagrammen wurden die Niederschlagswerte der Regenmesser vor Ort verwendet, soweit sie vorhanden waren und aufgrund der Vergleichswerte als zuverlässig eingeschätzt wurden. Die Niederschlagswerte der Vergleichsstationen wurden für die Messlücken herangezogen. Im Falle Biberachs ließen sich die Werte von Regenmesser und Wetterstation offenbar aufgrund erheblicher kleinräumiger Unterschiede in der Niederschlagsverteilung nicht vergleichen (die Wetterstation steht zwar auf Stadtgebiet, aber einige Kilometer weit entfernt). Dabei traten nicht nur quantitative Unterschiede in der Höhe eines bestimmten Niederschlagsereignisses auf, sondern auch Ereignisse mit hohem Niederschlag nur an einer der beiden Stationen, und zwar mal an der einen, mal an der anderen Messstelle. Insofern kann im Falle von Biberach die Vergleichsstation weder als Plausibilitätskontrolle, noch als Ergänzung der Messlücken im Versuchsfeld dienen.

Werden in Regenmessern nach dem Kipplöffel-Prinzip sehr hohe Niederschlagswerte in kurzer Zeit gemessen, so kann es daran liegen, dass bei Unwettern (Hagel, starke Böen) durch mechanische Einwirkung mehr „Ereignisse“ registriert werden als durch den Niederschlag selbst ausgelöst worden wären (E. WALTER, pers. Mitt.). Hohe Niederschlagsmessungen in den aufgestellten Regenmessern wurden jedoch durch die jeweiligen Vergleichsstationen bestätigt – mit Ausnahme von Biberach (s.o.).

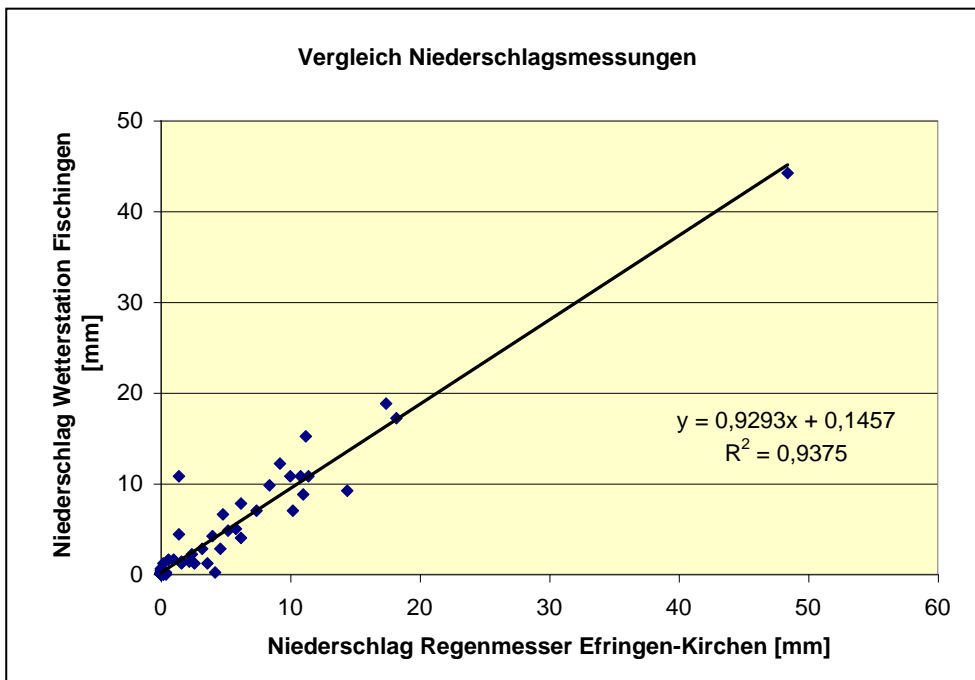


Abb. 5: Korrelation zwischen den Niederschlagsmengen, gemessen im Regenmesser am Versuchsfeld Efringen-Kirchen und der etwa 5 km weit entfernten Wetterstation Fischingen des LTZ. Die Regenmengen korrelieren sehr gut.

Die unterschiedliche Niederschlagssituation der Standorte beschreibt Tab. 5. Vom 18. 6. bis zum 10. 10. 11 liegen von den meisten Standorten Messungen unserer Regenmesser vor (Grünsfeld-Hausen bis 20. 9. 11); Messlücken wurden durch die Daten der Vergleichsstationen gefüllt. Es zeigt sich, dass die Reihenfolge der Standorte auch im Jahr 2011 etwa der Reihenfolge entspricht, wie sie sich aus dem langjährigen Durchschnitt des Jahresniederschlags ergibt (Tab. 1). Die geringen Niederschläge zwischen März und Mitte Juni spiegeln die außergewöhnliche Frühjahrs- und Frühsommertrockenheit dieses Jahres wider. Dies betrifft insbesondere den Standort Dossenheim. Efringen-Kirchen hatte dieses Jahr die bessere „Startposition“.

Tab. 5: Niederschläge an den Versuchsstandorten von März bis Oktober 2011.

Standort	Niederschläge 1.3. - 17.6.11 (Vergleichsstation)	Niederschläge 18.6. - 10.10.11 (Regenmesser)	Niederschläge 18.6. - 10.10.11 (Messlücken)	Summe Niederschläge 18.6. - 10.10.11
Efringen-Kirchen	162	236	72	308
Dossenheim	85	---	284	284
Grünsfeld-Hausen	112	172	47	219
Neresheim-Dossingen	112	220	142	362
Biberach	105*	427	99*	526*

* Am Standort Biberach ist die Vergleichsstation kein zuverlässiger Indikator für die Niederschlagssituation am Versuchsfeld.

3.3 Bodenfeuchte im Tiefenprofil (TDR-Profilsonde)

Vorbemerkungen: Alle dargestellten TDR-Messwerte sind bereits die Mittelwerte aus drei Einzelmessungen dieses Messtags (Drehen der Sonde im Rohr, s. Kap. 2.2). Bei allen TDR-Messungen fehlen in der Tiefenstufe 0-20 cm aufgrund eines messtechnischen Fehlers die Messwerte zwischen dem 1. 8. und 14. 8. 11. In den SigmaPlot-Graphiken wird in diesem Bereich linear interpoliert. „MP“ bedeutet „Messpunkt“.

Die statistischen Vergleiche zwischen den beiden auf einer Variante durchgeführten Sondenmessungen in den installierten Röhren erbrachten je nach Standort unterschiedliche Ergebnisse. Die beiden Parallelmessungen waren im Rahmen des gewählten Tests (Kap. 2.6) teilweise signifikant verschieden, teils als nicht signifikant voneinander unterscheidbar einzustufen. Die Ergebnisse variierten auch je nach Tiefenstufe. (Lediglich in Grünsfeld-Hausen waren die Parallelmessungen einer Variante durchgängig als „nicht verschieden“ einzustufen). Daher wurde auf eine Mittelwertbildung verzichtet und beide Parallelmessungen graphisch dargestellt. Die statistischen Testergebnisse sind im Anhang (Kap. 6.3) aufgeführt.

3.3.1 STANDORT EFRINGEN-KIRCHEN

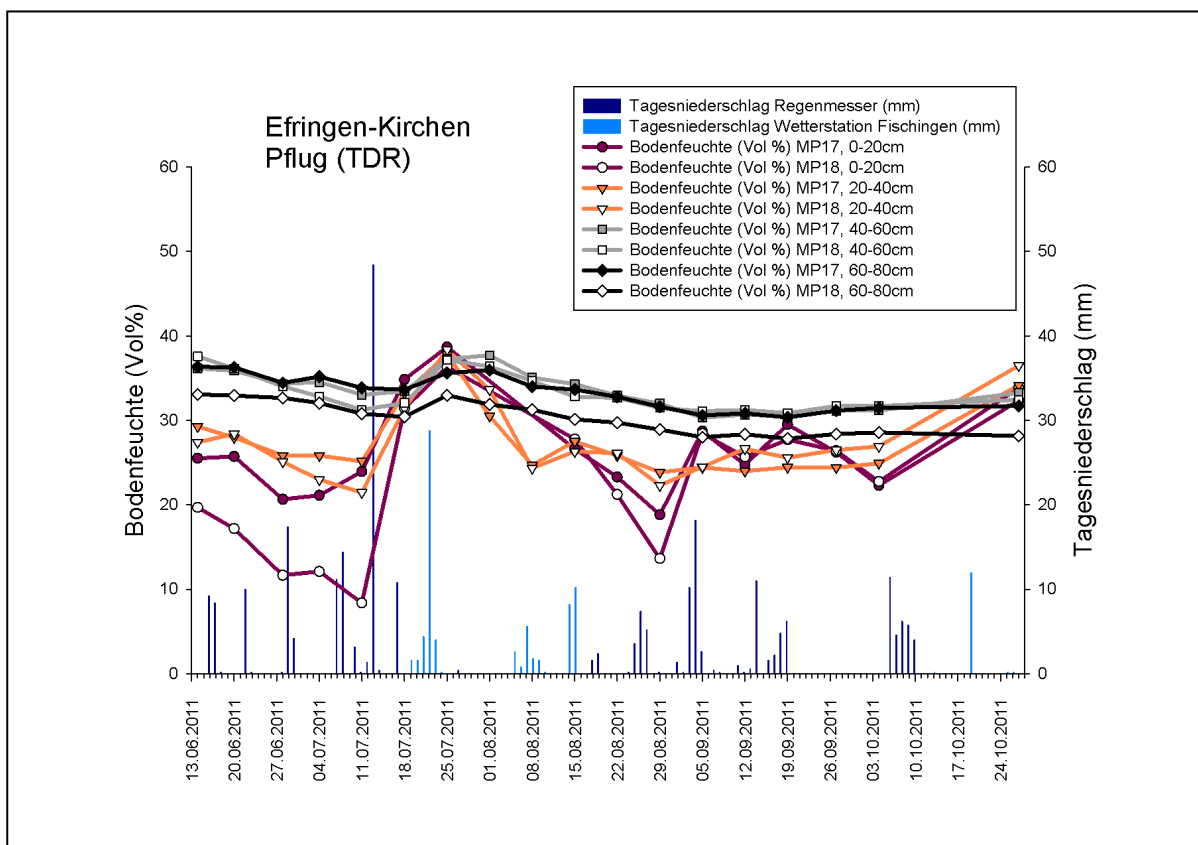


Abb. 6: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Pflug, Efringen-Kirchen.

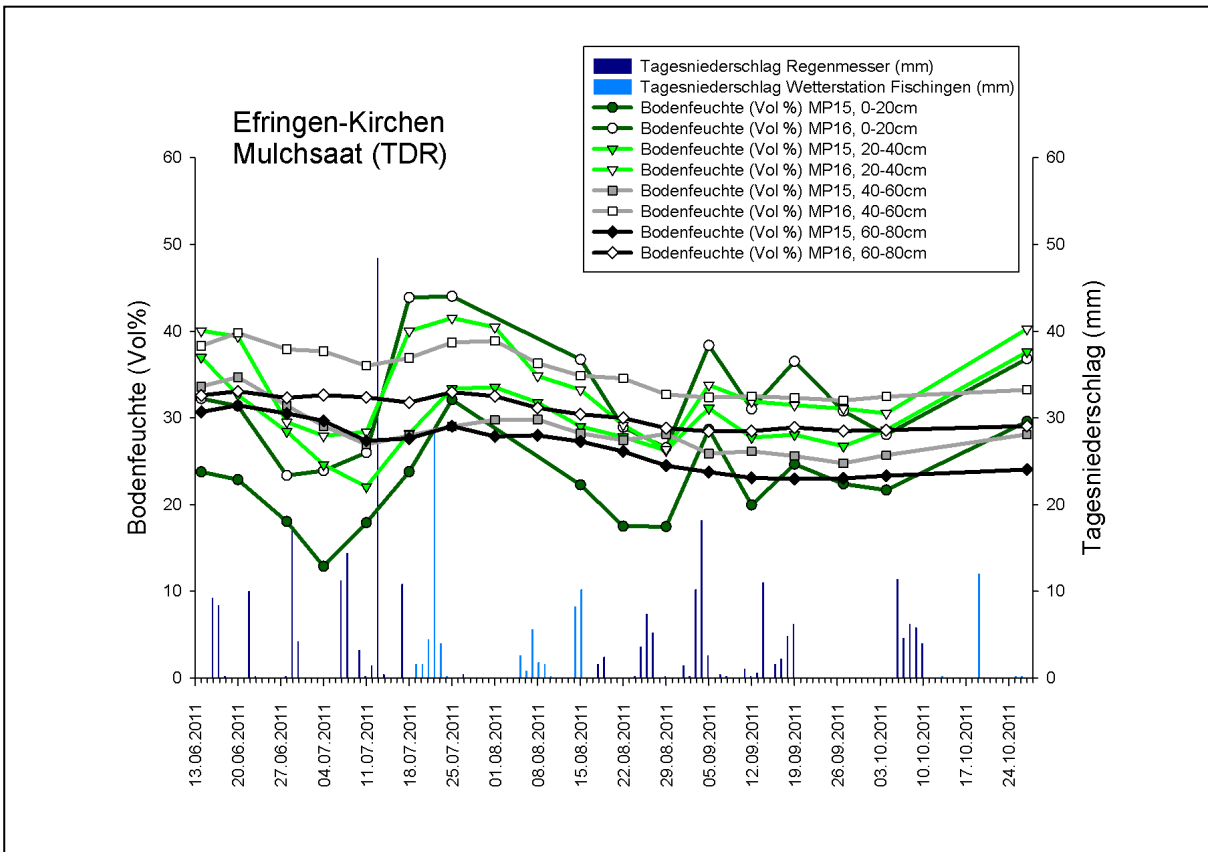


Abb. 7: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Mulchsaat, Efringen-Kirchen.

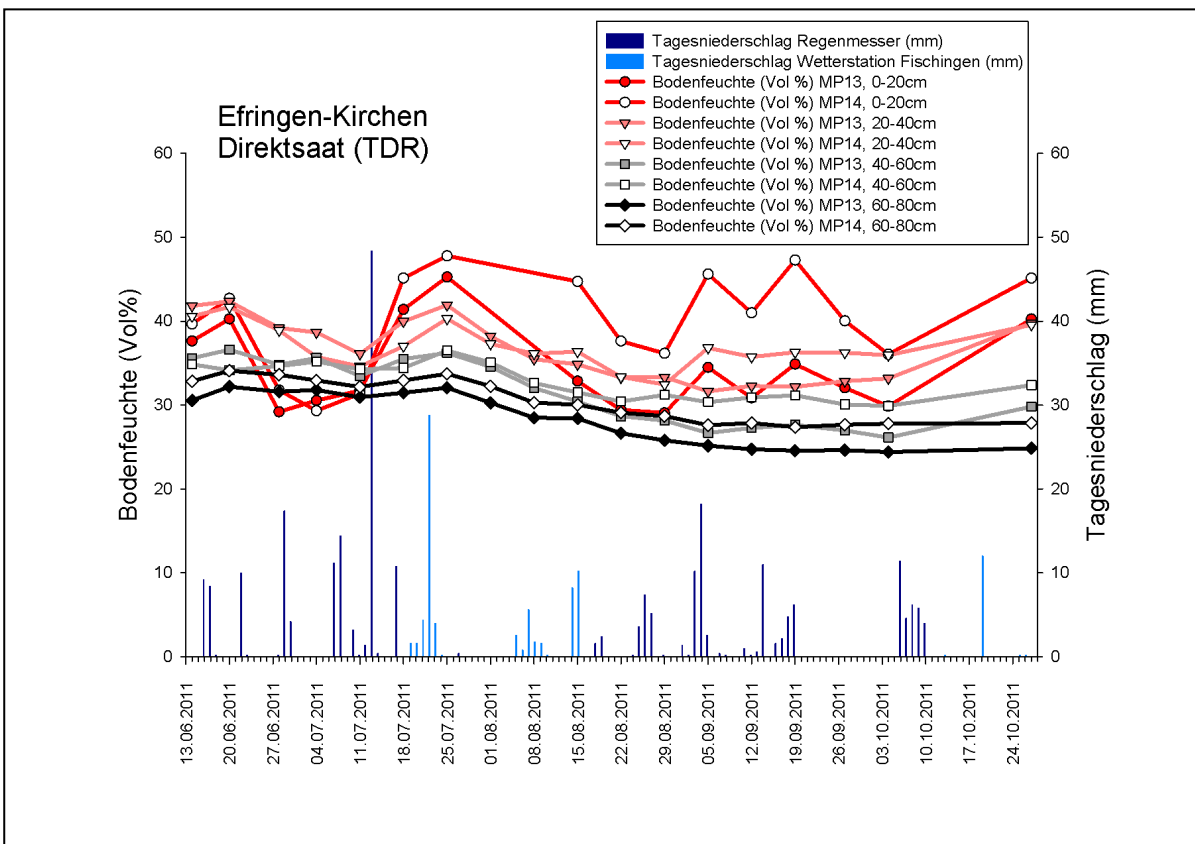


Abb. 8: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Direktsaat, Efringen-Kirchen.

Die Messwerte der beiden Messstellen pro Variante (z. B. MP13 und 14 derselben Tiefenstufe, Abb. 8) laufen weitgehend parallel, d. h. sie reagieren im Rahmen der bei Freilandmessungen üblichen Abweichungen gleichsinnig auf Schwankungen des Bodenwassergehalts. Die absolute Höhe des gemessenen Bodenwassergehalts ist jedoch auch zwischen diesen Messstellen unterschiedlich. Dies trifft vor allem auf die oberen 20 cm der Böden zu. Ihr Bodenwassergehalt reagiert hinsichtlich seiner Amplitude am empfindlichsten auf Niederschlagsereignisse bzw. Austrocknung. So spiegeln sich die Trockenphase Mitte Juni bis Anfang Juli (verbunden mit hohen Temperaturen), die Niederschlagsereignisse Anfang Juli (vor allem am 13. 7., nächster Messtag 18. 7.) und das Auf-und-Ab im September im Oberboden besonders gut wider. Eine heiße Phase mit Tageshöchsttemperaturen über 30° C vom 17.-26. 8. tat ein Übriges, die Bodenfeuchte zu verringern. Je tiefer gemessen wurde, desto gemäßiger verlaufen die Amplituden und spiegeln eher langfristige Trends wider. Diese Aussagen gelten im Grundsatz auch für die anderen Tiefenprofile.

Betrachtet man nur diesen Standort, so könnte man vorsichtig schlussfolgern, dass der Bodenwassergehalt bei Direktsaatflächen höher liegt als bei Mulchsaatflächen und insbesondere bei Pflugbearbeitung, und zwar gerade in den oberen 20 cm, eventuell sogar 40 cm. Auf den anderen Standorten (Beispiel Neresheim-Dossingen, Abb. 15-17) ist eine solche Beziehung allerdings keineswegs ablesbar, auch nicht am ebenfalls trocken-warmen Standort Dossenheim (Abb. 9-11). Wenn überhaupt, dann läge der „Wasservorteil“ der Direktsaat in Dossenheim eher im Unterboden (60-80 cm).

3.3.2 STANDORT DOSSENHEIM

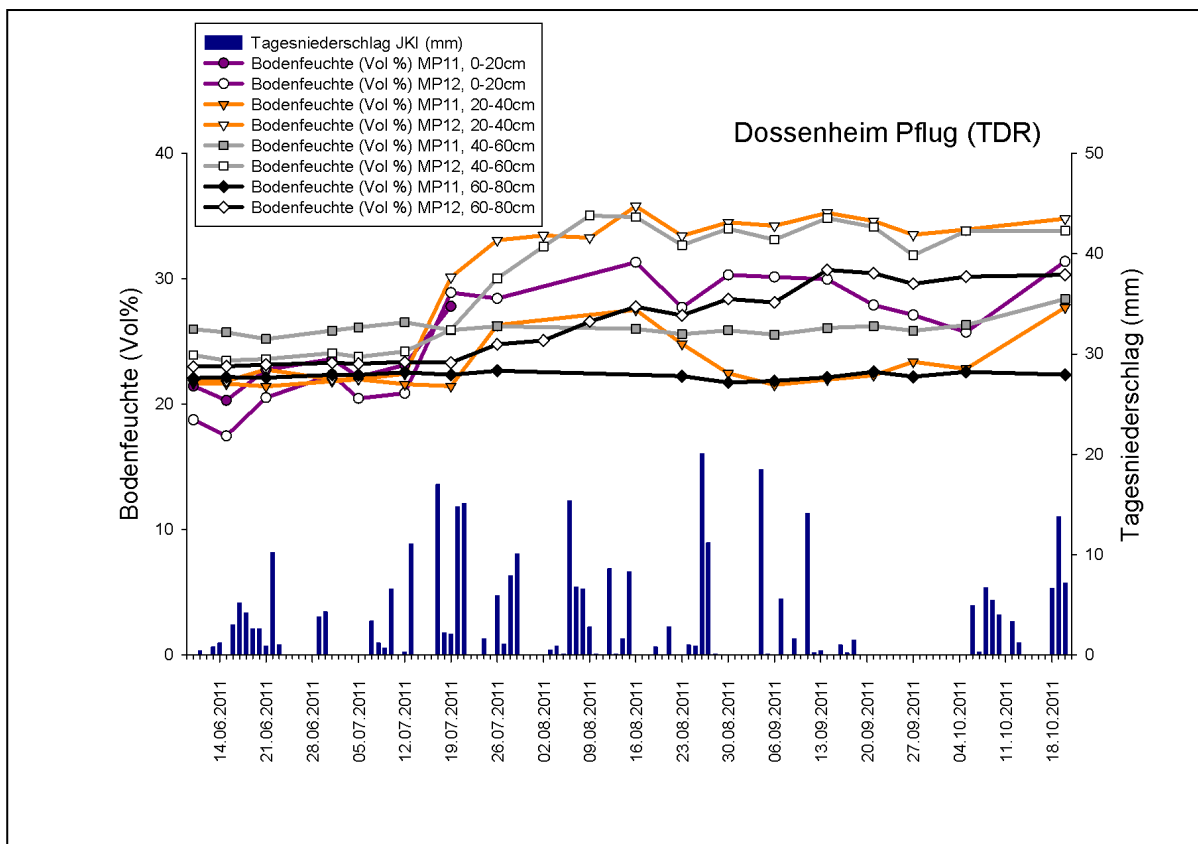


Abb. 9: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Pflug, Dossenheim. Am Messpunkt 12 war bei der Bergung des Rohrs in ca. 35 cm Tiefe ein kleiner Spalt festzustellen.

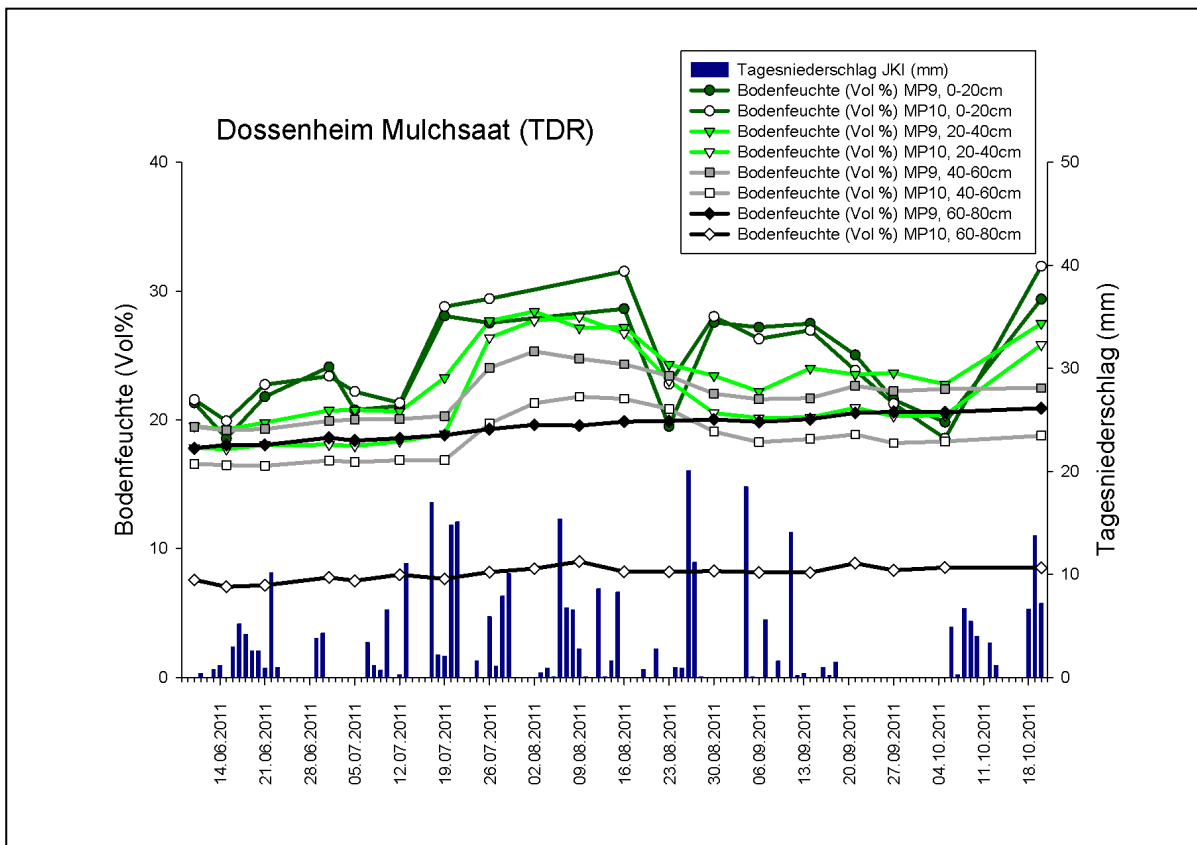


Abb. 10: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Mulchsaat, Dossenheim. Am 23. 8. wurden am frühen Nachmittag Temperaturen von 33-34° C erreicht.

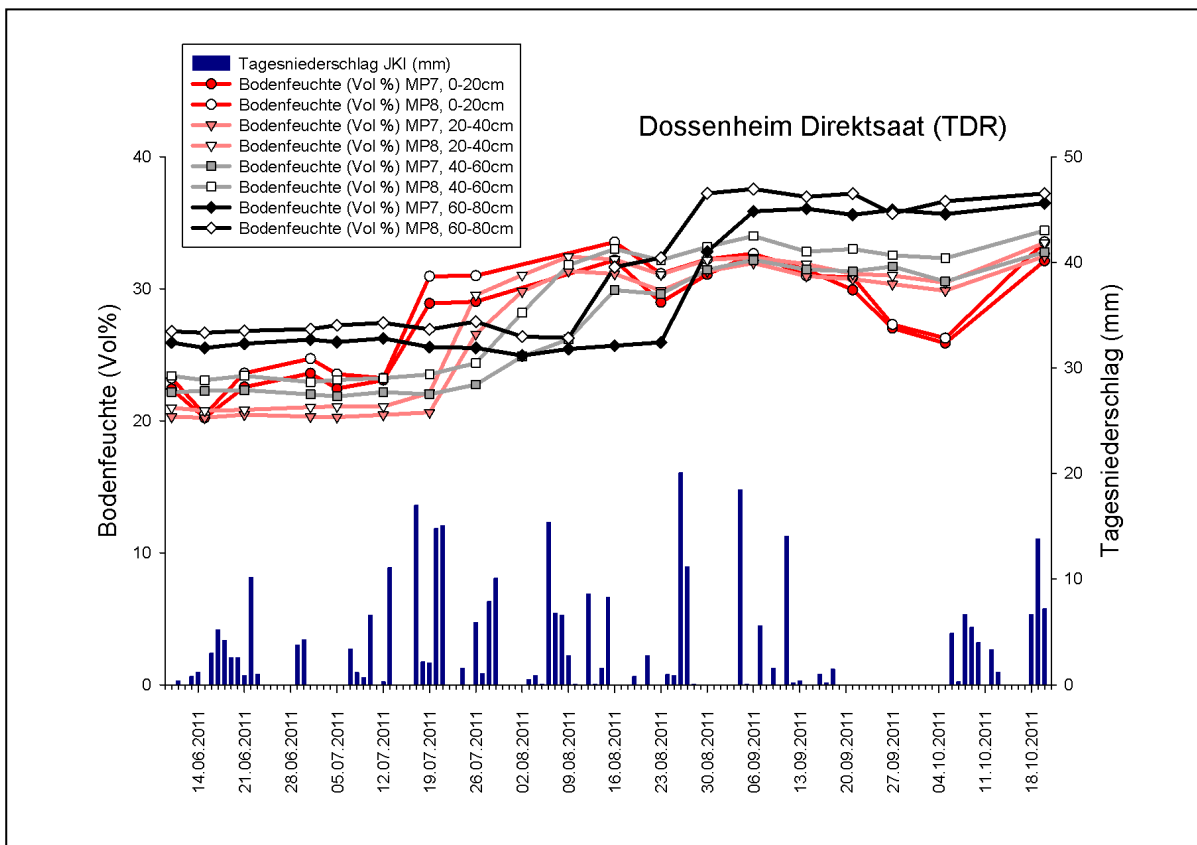


Abb. 11: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Direktsaat, Dossenheim.

Auffallend sind die geringen gemessenen Bodenfeuchten am Messpunkt 10 in der Variante Mulchsaat in 60-80 cm Tiefe (Abb. 10). Neben Bodeneigenschaften in unmittelbarer Umgebung der Messröhre (Steine, größere Kavitäten, nicht ausreichender Bodenschluss) kommen auch Inhomogenitäten der Bodenart in Frage. Beim Ausgraben der Röhre wurde in der Tat beobachtet, dass in der entsprechenden Tiefe der Boden deutlich sandiger ist als an den anderen Messpunkten. Dass die Versuchsfelder auf dem Standort Dossenheim kleinräumig solche Unterschiede aufweisen können, wurde bereits in den vorherigen Probenahmen zu bodenchemischen und bodenbiologischen Untersuchungen 2004 und 2005 festgestellt. Sandigere Partien gibt es nicht nur in der Mulch-, sondern auch in der Pflugfläche. Wenn man auf eine solche mit der Sonde trifft, sind Varianzen zwischen Parallelmessungen unausweichlich.

Umgekehrt sind die hohen Feuchten im Unterboden der Direktsaatvariante (Abb. 11) bemerkenswert. Sie beginnen bei der Messkampagne bereits auf hohem Niveau und liegen auch bei Abschluss der Messungen noch hoch. Die Kurven verlaufen relativ eng nebeneinander, was in diesem Fall für einigermaßen homogene Bodenbedingungen spricht. Auch die Ergebnisse der FDR-Sonde in 50 cm Tiefe zeigen teilweise ein ähnliches Bild (Abb. 24), so dass der Befund hoher Bodenfeuchten im Unterboden gesichert erscheint.

Bei Messpunkt 11 fielen Messungen der obersten 20 cm ab 26. 7. 11 weg, da der obere Röhrenabschnitt durch Überfahren beschädigt wurde. Insofern existiert hier in der Pflugvariante nur eine komplette Messreihe.

3.3.3 STANDORT GRÜNSFELD-HAUSEN

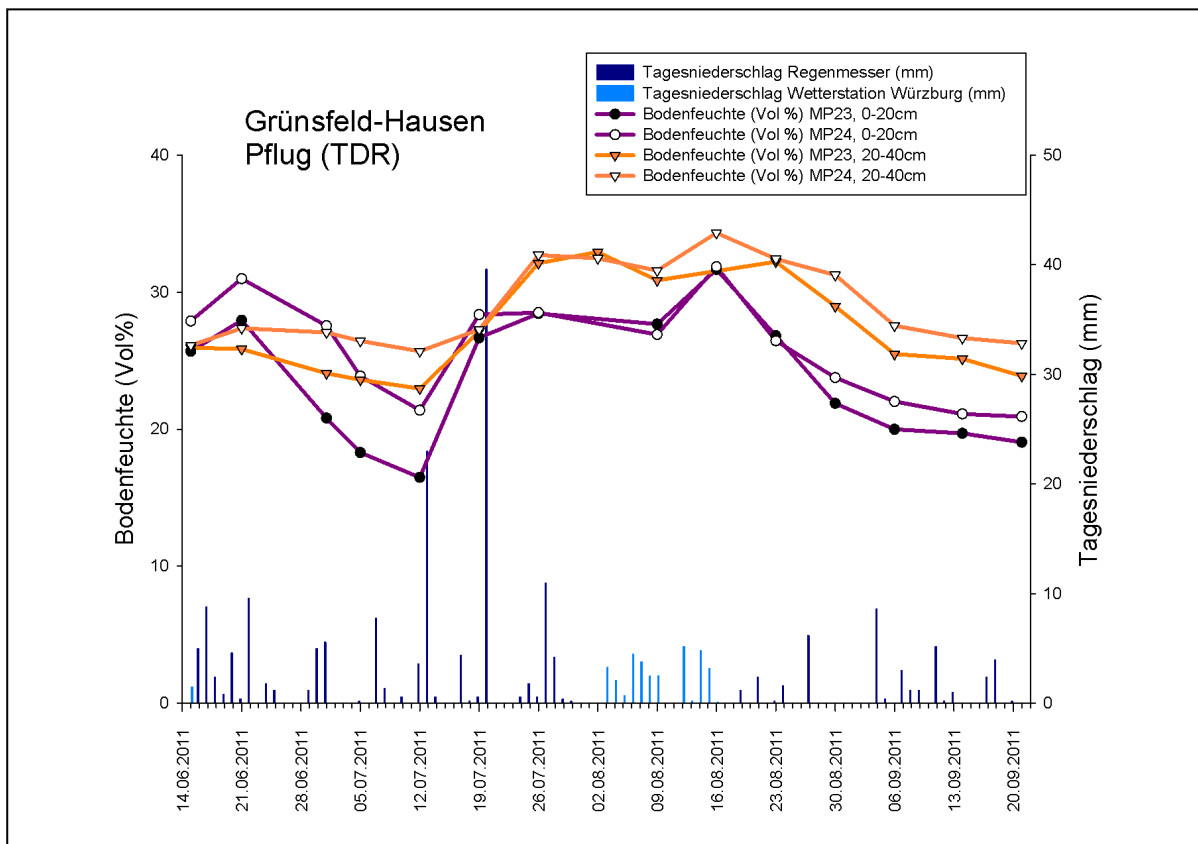


Abb. 12: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Pflug, Grünsfeld-Hausen. Wegen Wassereintruchs kein Wert für MP23, 20-40 cm am 16. 8. 11

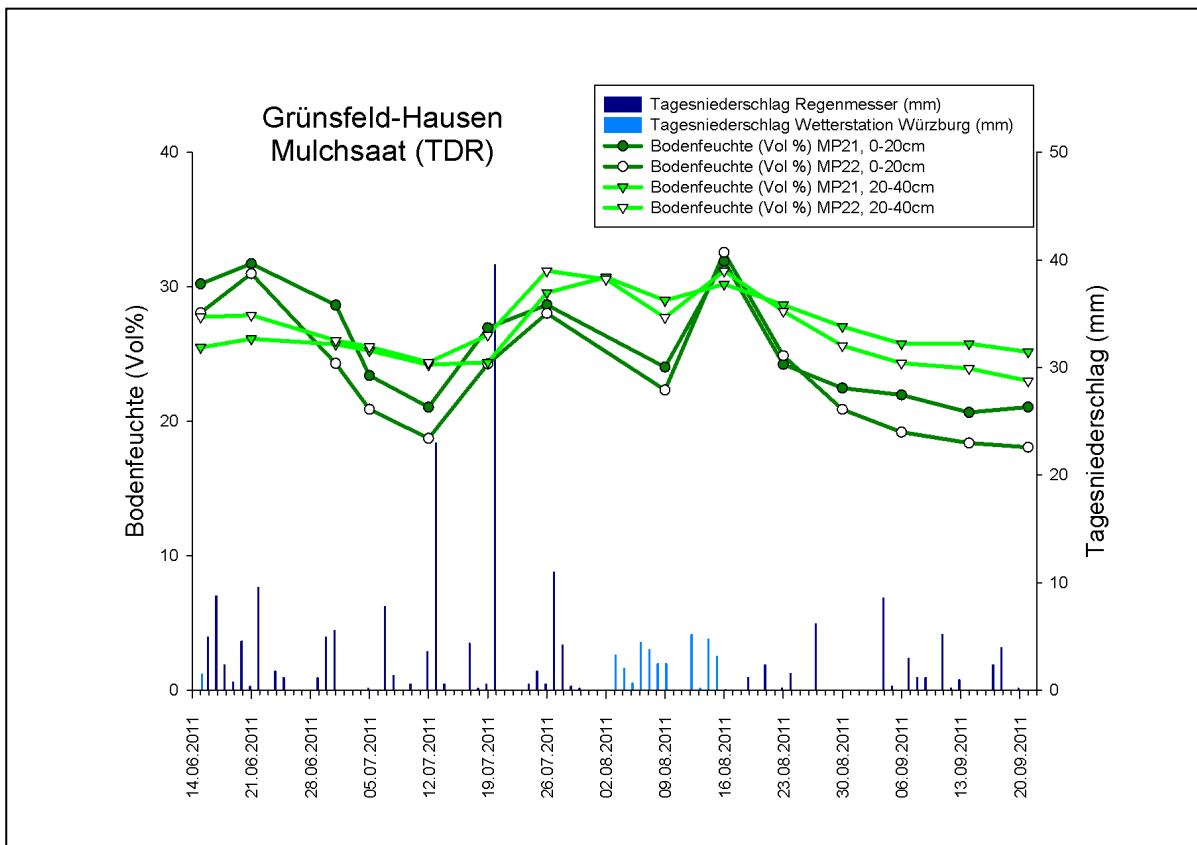


Abb. 13: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Mulchsaat, Grünsfeld-Hausen.

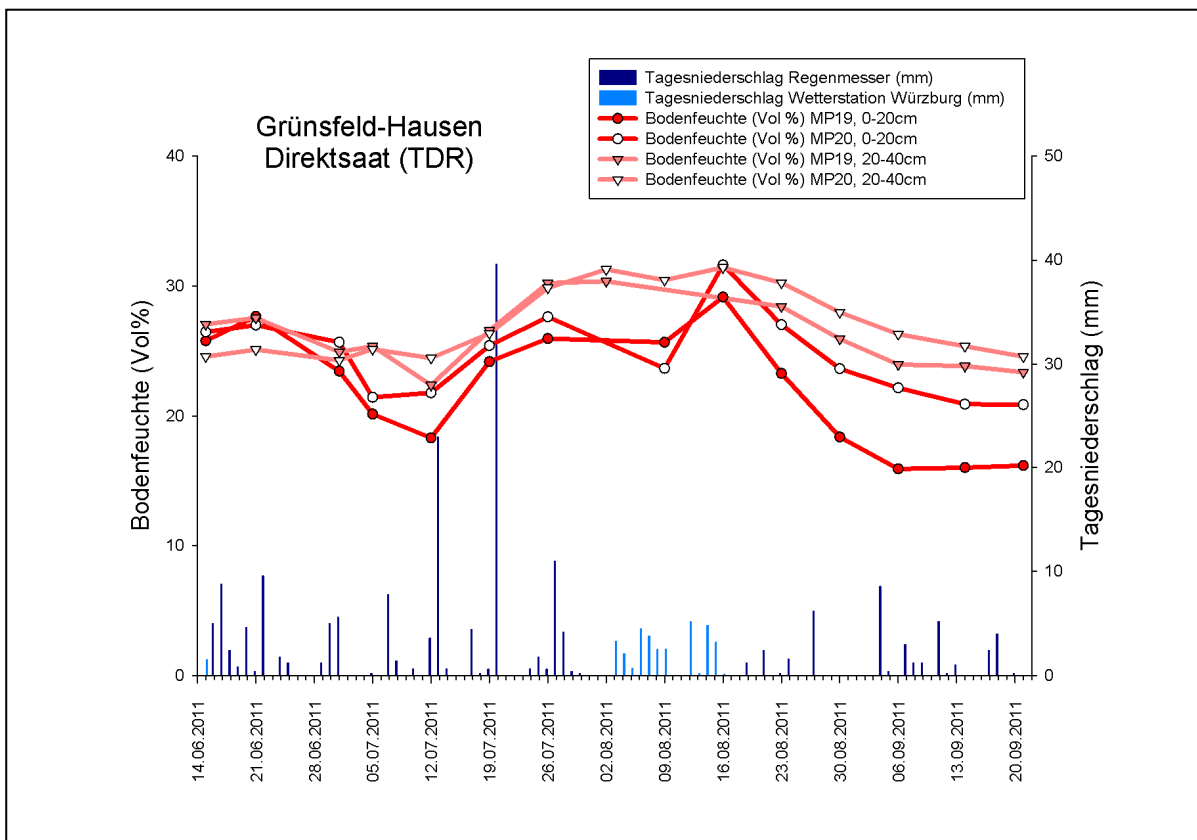


Abb. 14: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Direktsaat, Grünsfeld-Hausen. Wegen Wassereintritts kein Messwert für MP19, 20-40 cm am 9. 8. und 16. 8. 11

Am flachgründigen Standort in Grünsfeld-Hausen konnte lediglich bis 40 cm Tiefe gemessen werden. Aufgrund des felsigen Untergrunds wurden real nur 36-38 cm erreicht. Die Kurven zeigen die üblichen tiefenbedingten Amplitudenunterschiede und sind ansonsten vergleichsweise homogen. Die Reaktion der Bodenfeuchte lässt vermuten, dass zwischen dem 9. 8. und dem 17. 8. lokal ein Niederschlagsereignis stattfand, das in der gewählten Vergleichsstation Würzburg nicht registriert wurde. Die Würzburger Station weist für diesen Zeitraum 33 mm Niederschlag nach, die Alternative Bad Mergentheim 49 mm mit einem Ereignis von 11 mm am 15. 8. 11.

3.3.4 STANDORT NERESHEIM-DOSSINGEN

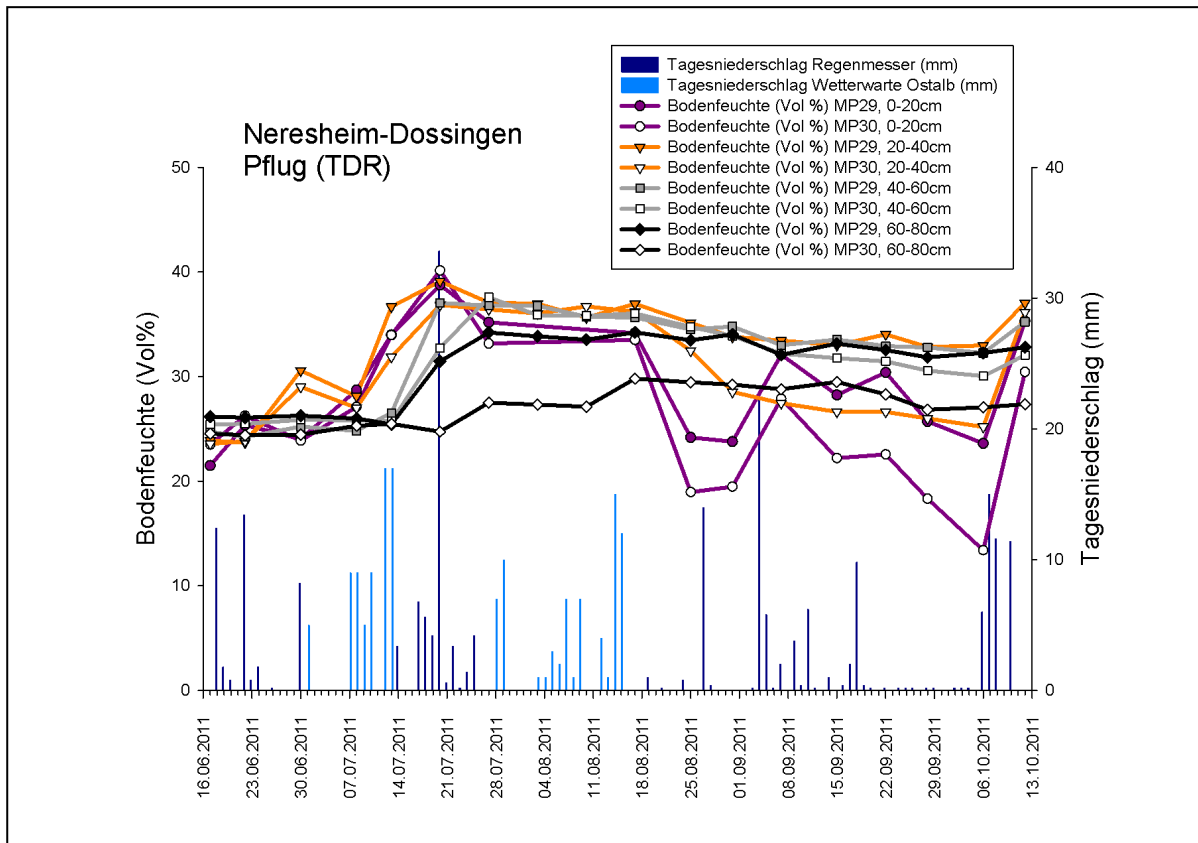


Abb. 15: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Pflug, Neresheim-Dossingen

In Neresheim-Dossingen kann man gut die unterschiedliche starke Reaktion der Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen als Reaktion auf die Niederschlagsituation sehen. Vom 18. 8. bis 26. 8. wurden Tagesmitteltemperaturen von über 20 °C und Tageshöchstwerte von 26,7 bis 33,5 °C gemessen. Das mag die in den oberen Bodenhorizonten schnell fallenden Bodenfeuchten in diesem Zeitraum trotz Niederschlägen erklären.

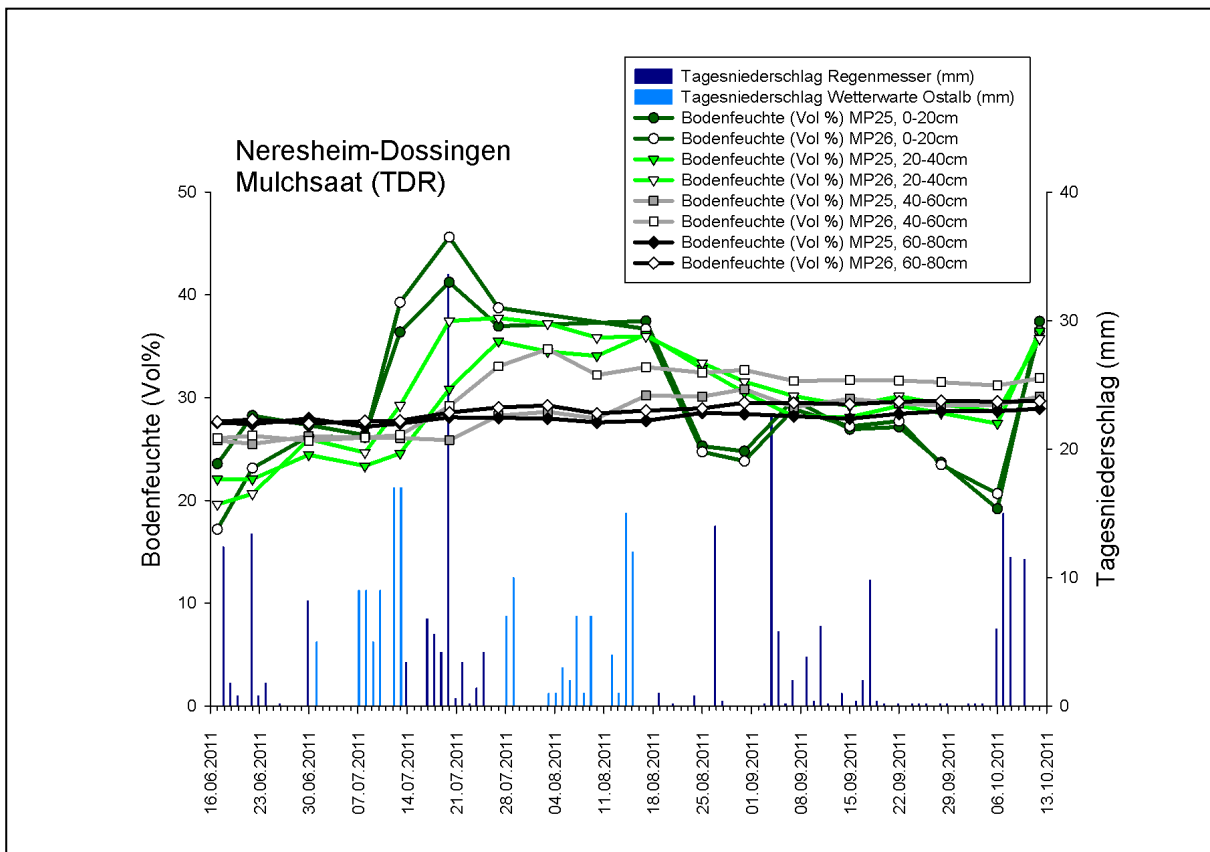


Abb. 16: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Mulchsaat, Neresheim-Dossingen

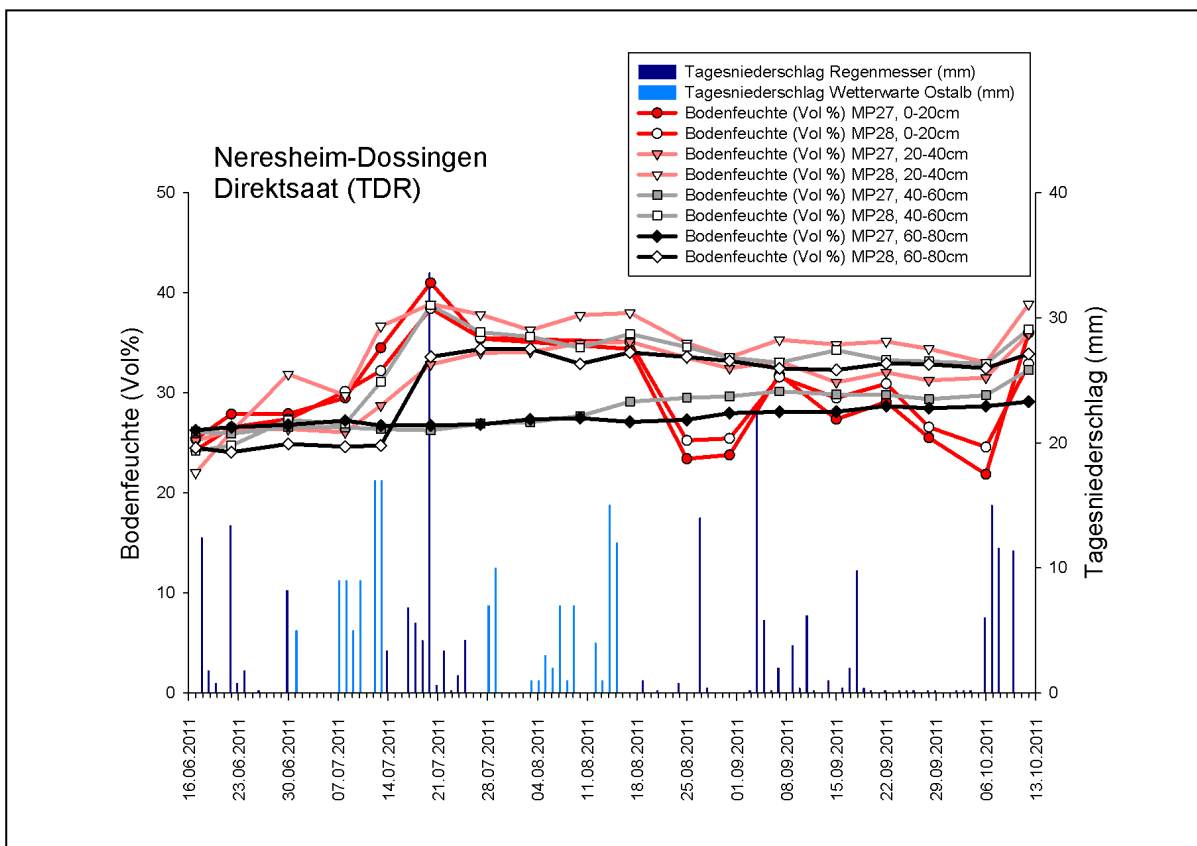


Abb. 17: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Direktsaat, Neresheim-Dossingen

3.3.5 STANDORT BIBERACH

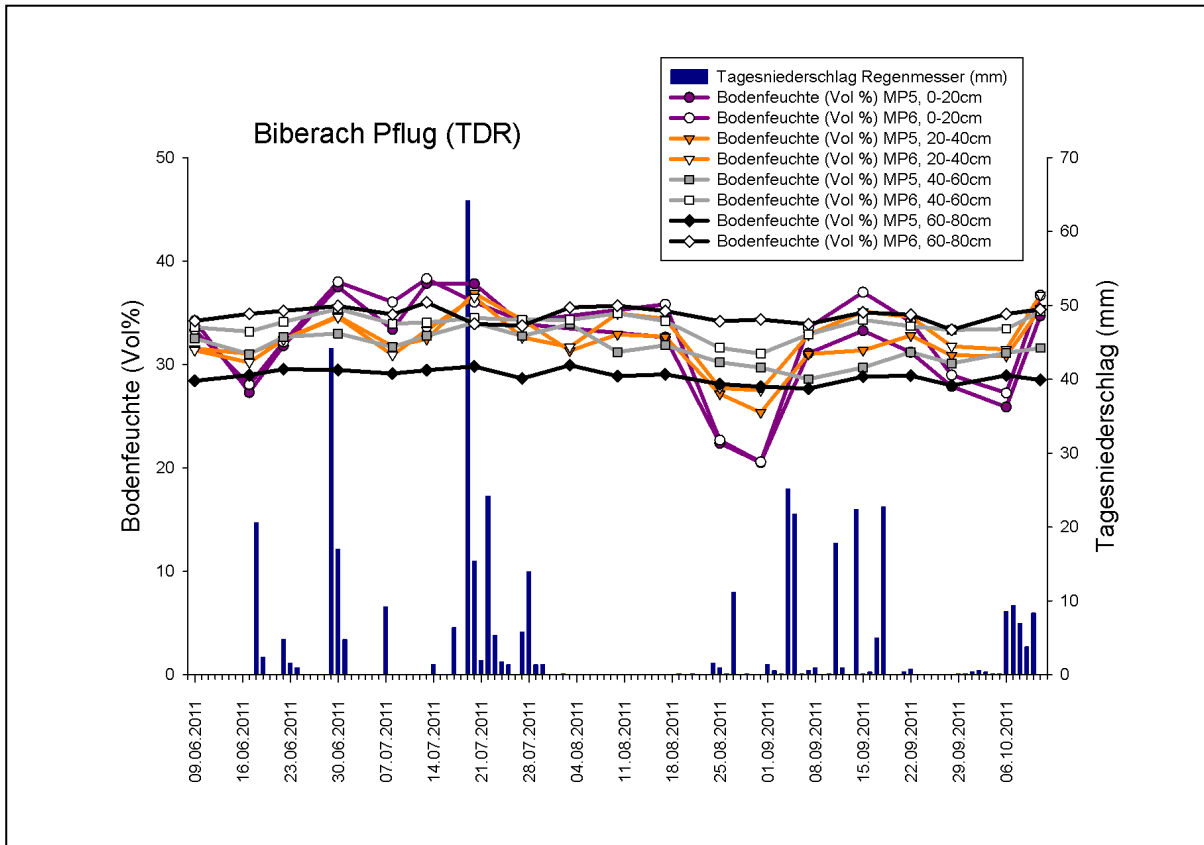


Abb. 18: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Pflug, Biberach

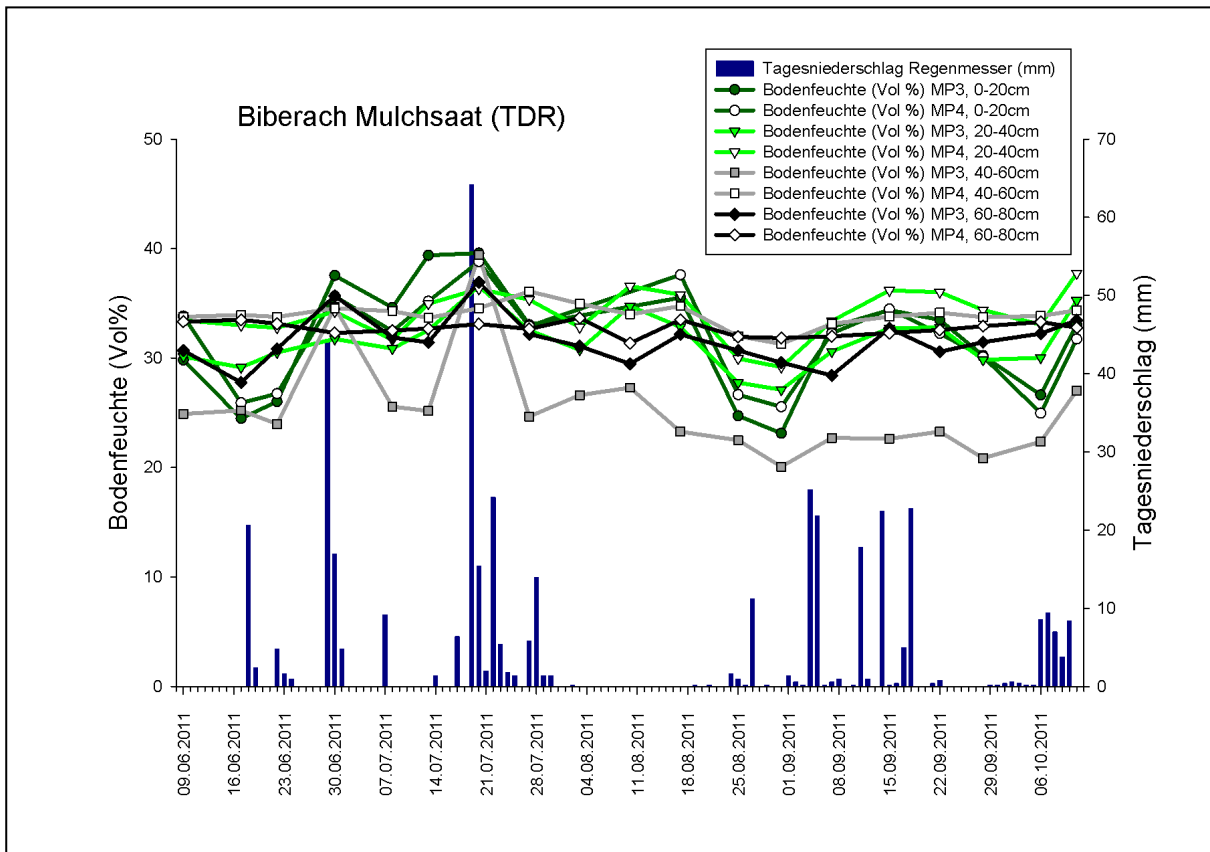


Abb. 19: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Mulchsaat, Biberach

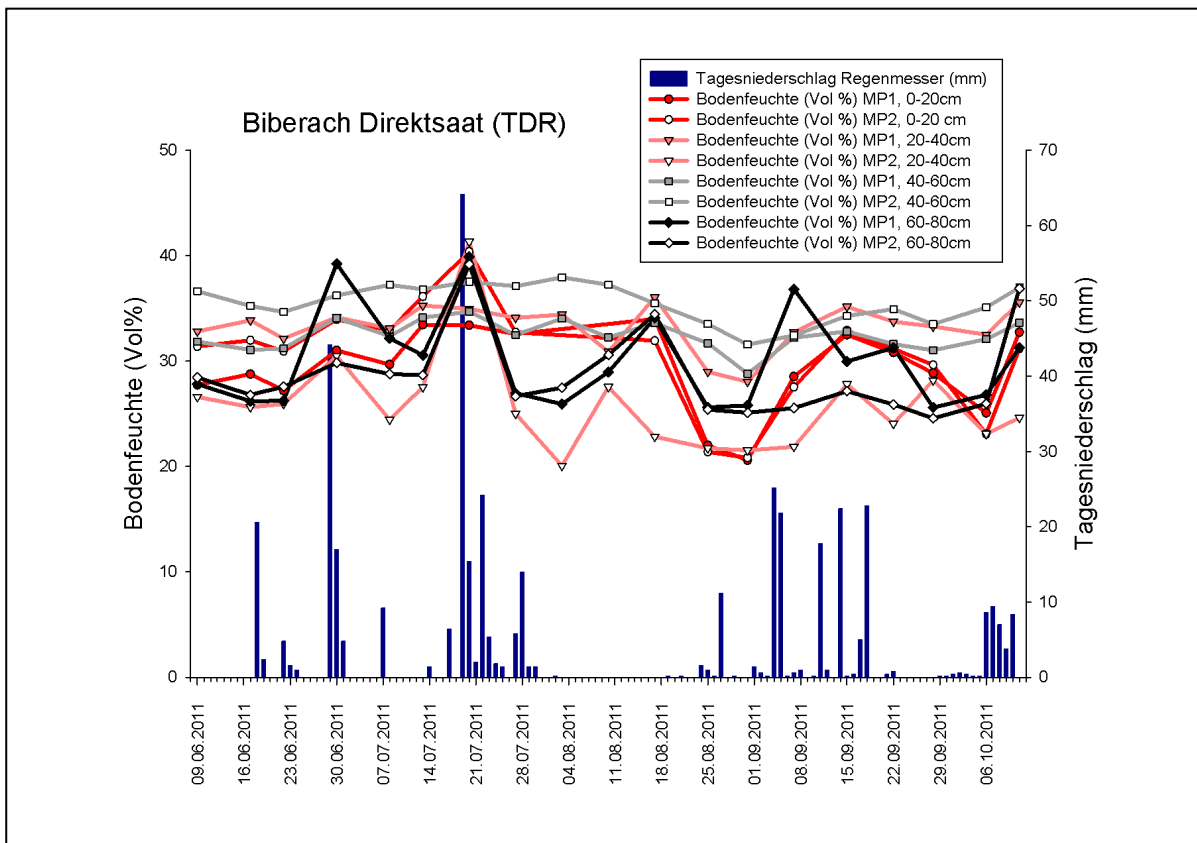


Abb. 20: Tiefenprofil der Bodenfeuchte in der Variante Direktsaat, Biberach

In Biberach liefern Messpunkt Nr. 3 in der Mulchsaatvariante in 40-60 cm Tiefe, Messpunkt Nr. 2 in der Direktsaatvariante in 20-40 cm Tiefe und Messpunkt Nr. 1 in 60-80 cm Tiefe etwas abweichende Werte. Die ersten zwei liegen mit ihren Bodenfeuchten in der Regel unterhalb ihres Pendantes in derselben Bodentiefe, reagieren jedoch deutlich auf hohe Niederschläge. Die Vermutung liegt nahe, dass an den Messrohren in diesen Tiefen Hohlräume lagen (Steine, große Grobporen), in denen Niederschläge ankamen, bei zeitnaher Messung registriert wurden und schnell versickerten. Mitte August fielen offenbar Niederschläge, die wegen einer Messlücke allerdings nicht detektiert wurden. Die zu Vergleichszwecken an sich nicht geeignete Wetterstation Biberach weist für den 7. August 16 mm und für den 15. August 31 mm Niederschlag aus. Die heiße Phase Ende August mit ihren hohen Transpirationswerten macht sich auch hier in den Bodenfeuchtekurven der oberen Bodenschicht deutlich bemerkbar.

3.4 Bodenfeuchte in zwei Tiefen (stationäre FDR-Sonden)

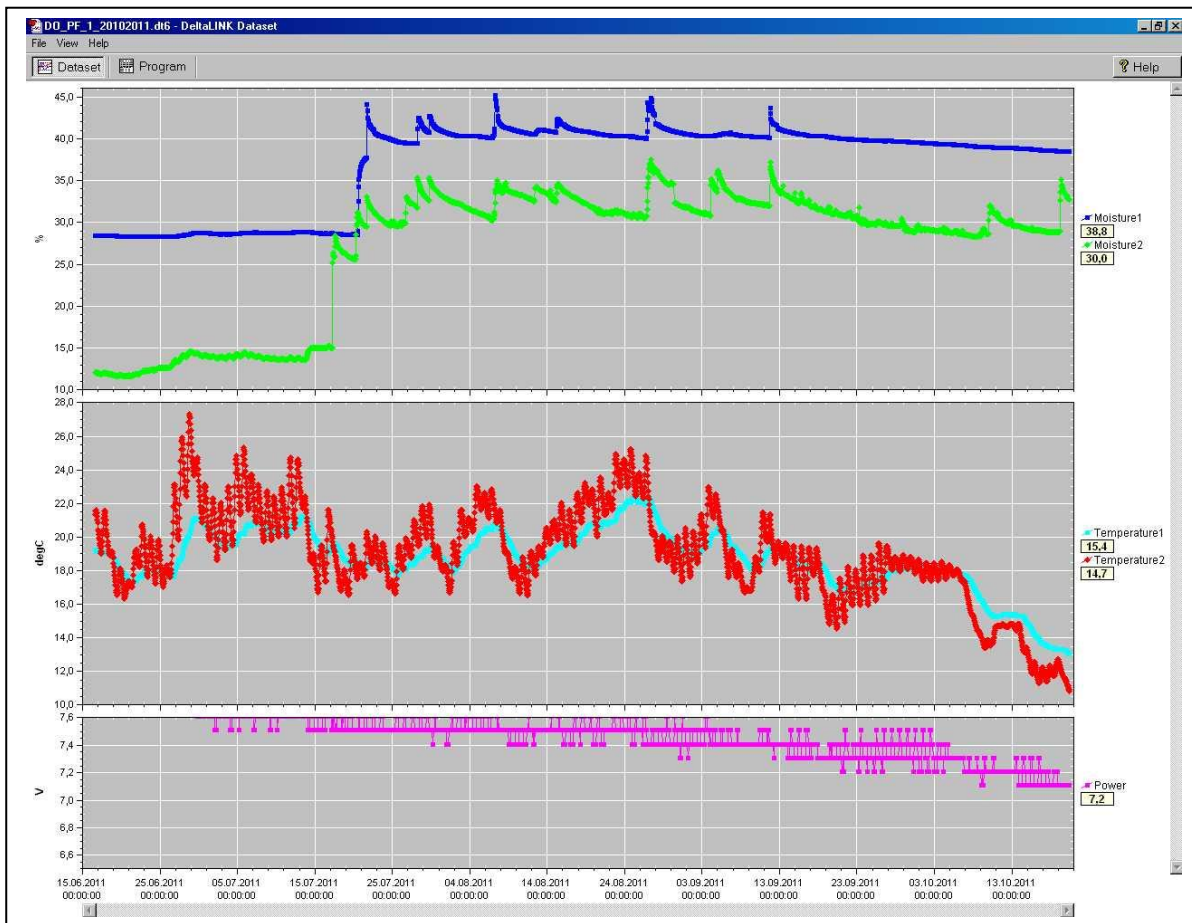


Abb. 21: Abbild der Bildschirmanzeige aus dem Auswertungsprogramm DeltaLink (Delta-T Devices). Pflugvariante, Messstelle 1, Dossenheim. „Moisture1“: 50 cm Tiefe, „Moisture2“: 15 cm Tiefe; Temperatur entsprechend. Weiteres im Text.

Abbildung 21 zeigt die graphische Auswertung der Loggerdaten im Programm DeltaLink: Im oberen Drittel sieht man den Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchte in zwei Tiefen über den Versuchszeitraum. In der mittleren Teilabbildung kann der Temperaturverlauf im Boden in den jeweiligen Tiefen verfolgt werden. Das untere Drittel gibt den Ladezustand der Batterie des Loggers wieder. Leider ist die Graphik als solche nicht in andere Graphikprogramme überführbar. Die Loggerdaten jedoch können in andere Programme exportiert und dort weiter verarbeitet werden. Die folgenden Abbildungen kombinieren die Ergebnisse der vier Sonden pro Bodenbearbeitungsvariante in einer Abbildung. Während die Originalgraphik (Abb. 21) die Stundenwerte darstellt, beruhen die Abbildungen 22-27 der Übersichtlichkeit halber auf Tagesmittelwerten (für den Vergleich Profilsonde versus stationäre Sonde berechnet). Die in Kapitel 3.3 dargelegten Ausführungen zur Statistik gelten sinngemäß auch für die FDR-Sonden. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt.

Bei allen Abbildungen ist zu sehen, dass durch die häufigere Messung die Reaktion auf fallende oder ausbleibende Niederschläge ausgeprägter zu messen ist als bei den wöchentlichen Ablesungen der TDR-Sonden.

3.4.1 STANDORT DOSENHEIM

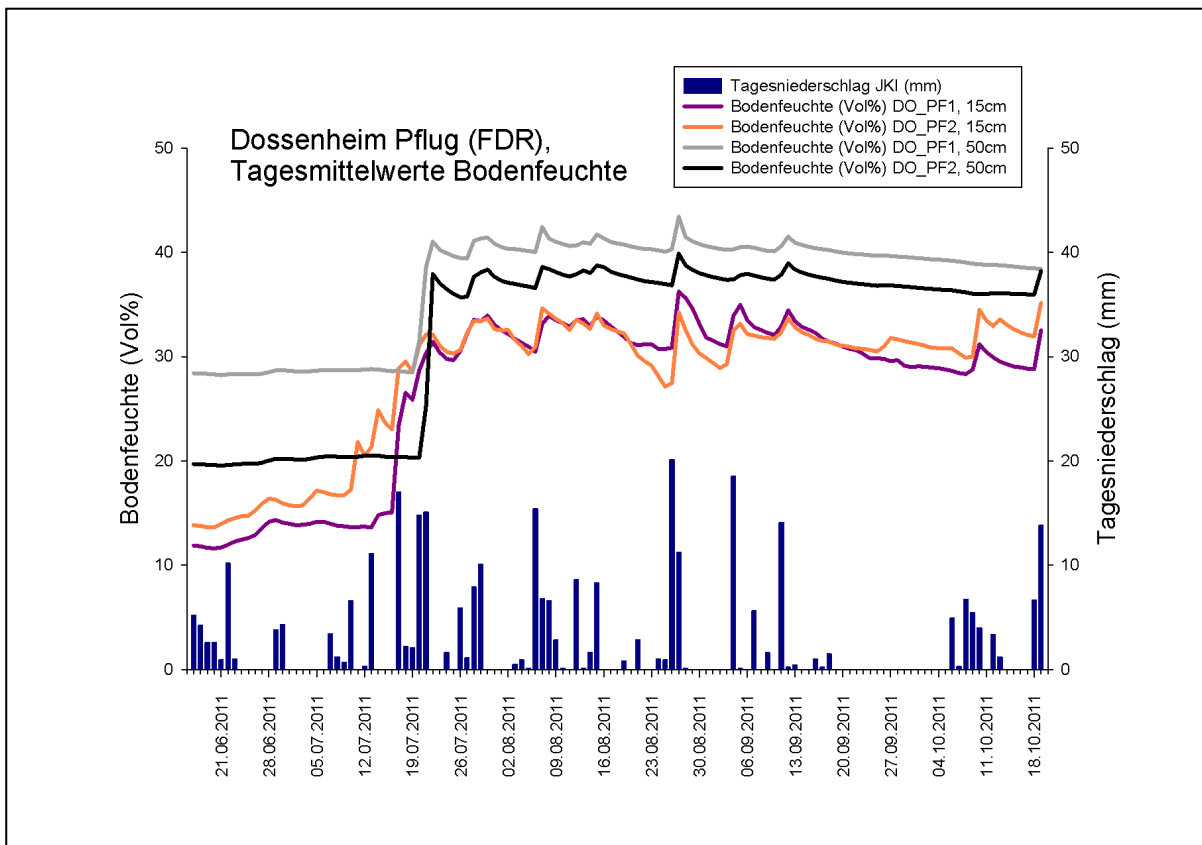


Abb. 22: Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Pflug, Dossenheim.

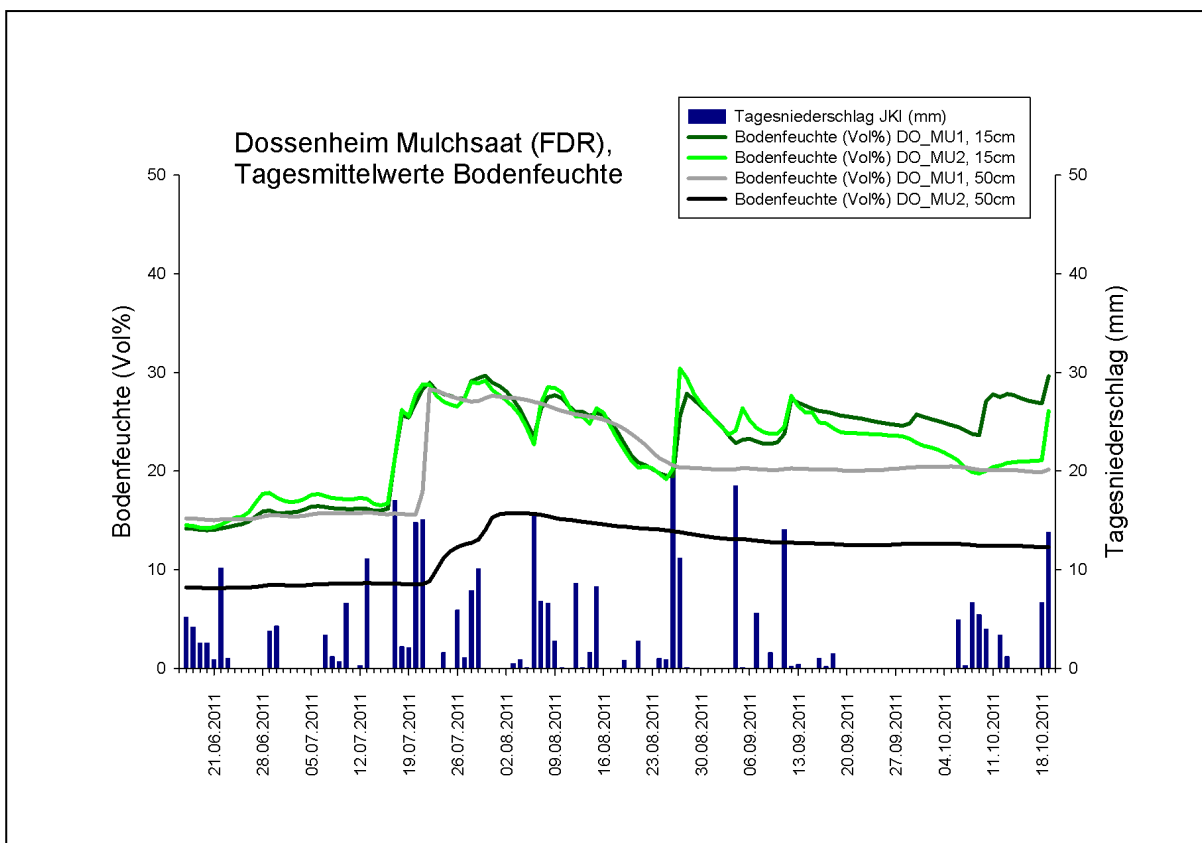


Abb. 23: : Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Mulchsaat, Dossenheim

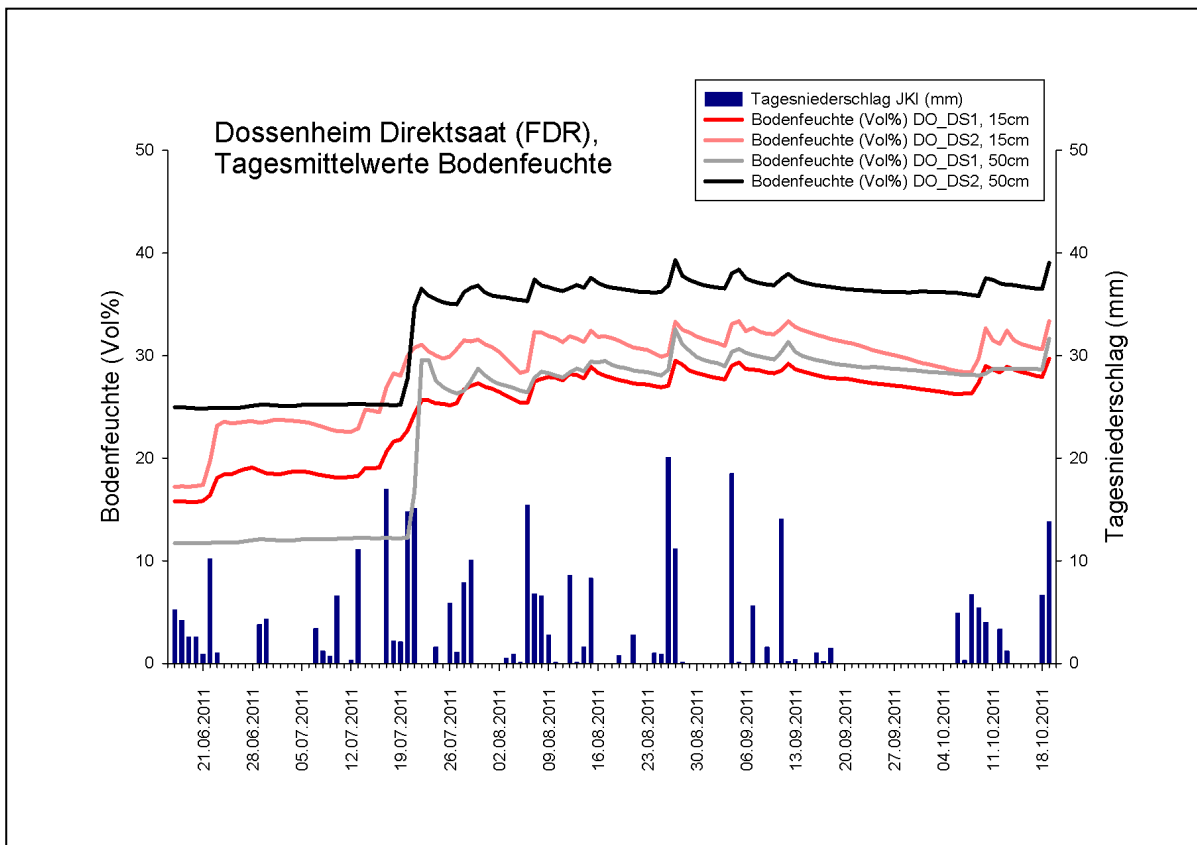


Abb. 24: Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Direktsaat, Dossenheim

Die Abbildungen 22-24 zeigen, dass die beiden Sonden in derselben Variante und derselben Bodentiefe Schwankungen der Bodenfeuchte gleichsinnig erfassen. Die absolute Höhe des gemessenen Bodenwassergehalts korrespondiert teilweise recht gut (15 cm in der Pflug- und Mulchvariante), zum Teil ist sie – wie bei den Ergebnissen mit TDR-Sonden – zwischen diesen Messstellen unterschiedlich. Eine der Messstellen in 50 cm Tiefe der Mulchvariante (Abb. 23) zeigt deutlich abweichende Messwerte. Diese Abweichung ist auch bei den Messergebnissen mit der TDR-Sonde, tendenziell in dieser Tiefenstufe und ganz deutlich in 60-80 cm Tiefe, zu finden. Die Ursache liegt in einer Bodeninhomogenität: Während der Boden in Dossenheim sonst lehmig-tonig ist, findet sich auf dieser Variante und speziell an dieser Messstelle viel Sandanteil, insbesondere in den tieferen Bodenschichten. Das macht die vergleichende Beurteilung der Variante Mulchsaat schwierig.

Für den Standort Biberach (Abb. 25-27) gelten die oben gemachten Aussagen hinsichtlich Erfassung der Schwankungen und absolute Höhe des Bodenwassergehalts bei Parallelmessungen ebenfalls. Dafür sind die Flächen homogener. Der Boden ist auch bis 50 cm Messtiefe ziemlich homogen durchfeuchtet. Auffallend sind die in dieser Tiefe vergleichsweise hohen Schwankungen in der Direktsaatvariante, ein Befund, der sich auch in der Tiefenstufe 60-80 cm bei den TDR-Messungen findet (Abb. 20).

Die in Kap. 3.3 dargelegten Ausführungen zu Niederschlägen und Temperaturen gelten für dieses Kapitel in gleicher Weise.

3.4.2 STANDORT BIBERACH

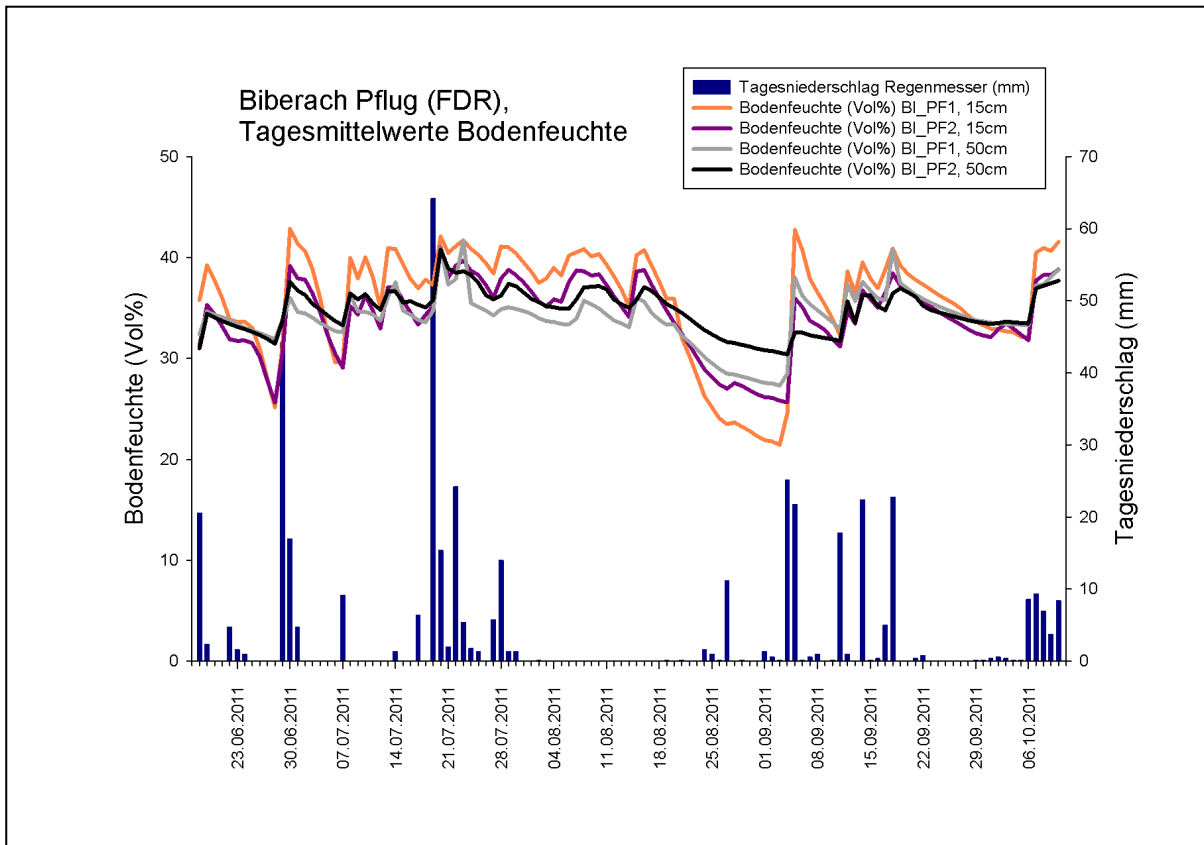


Abb. 25: Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Pflug, Biberach

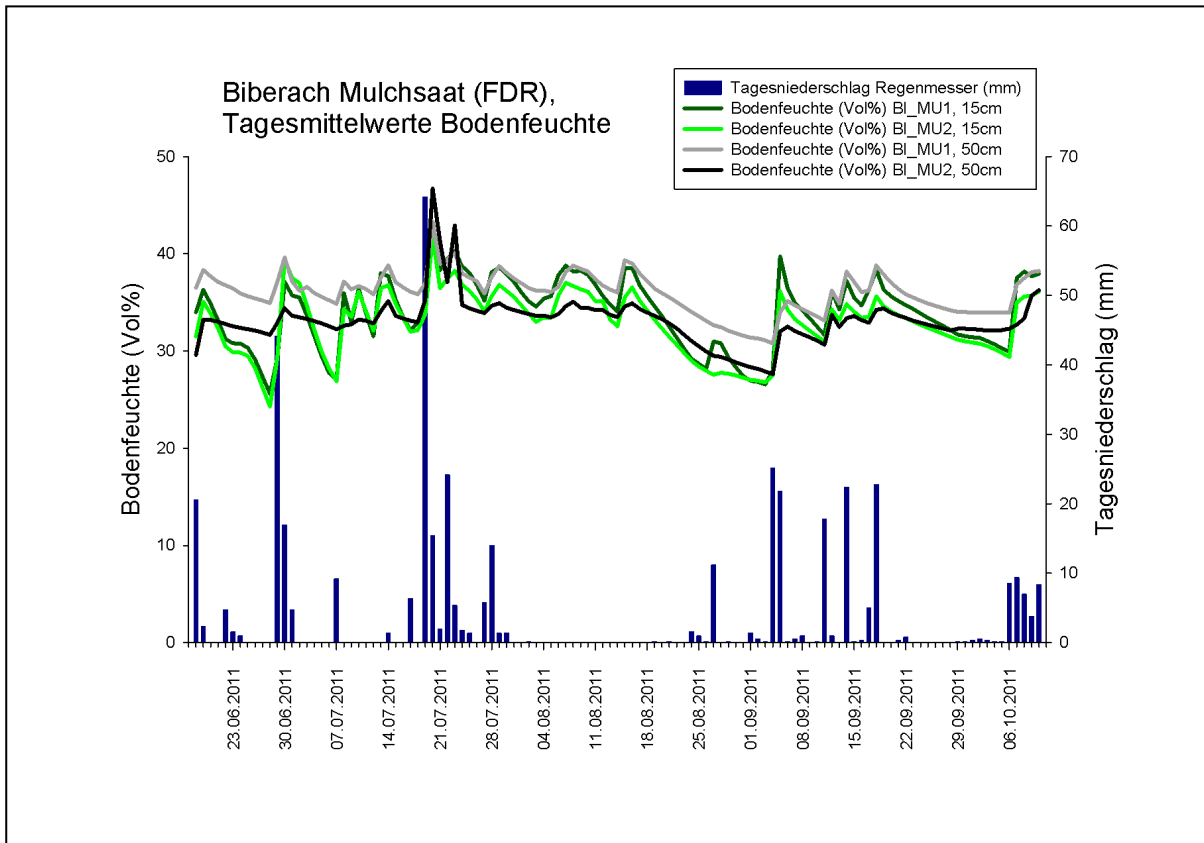


Abb. 26: Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Mulchsaat, Biberach

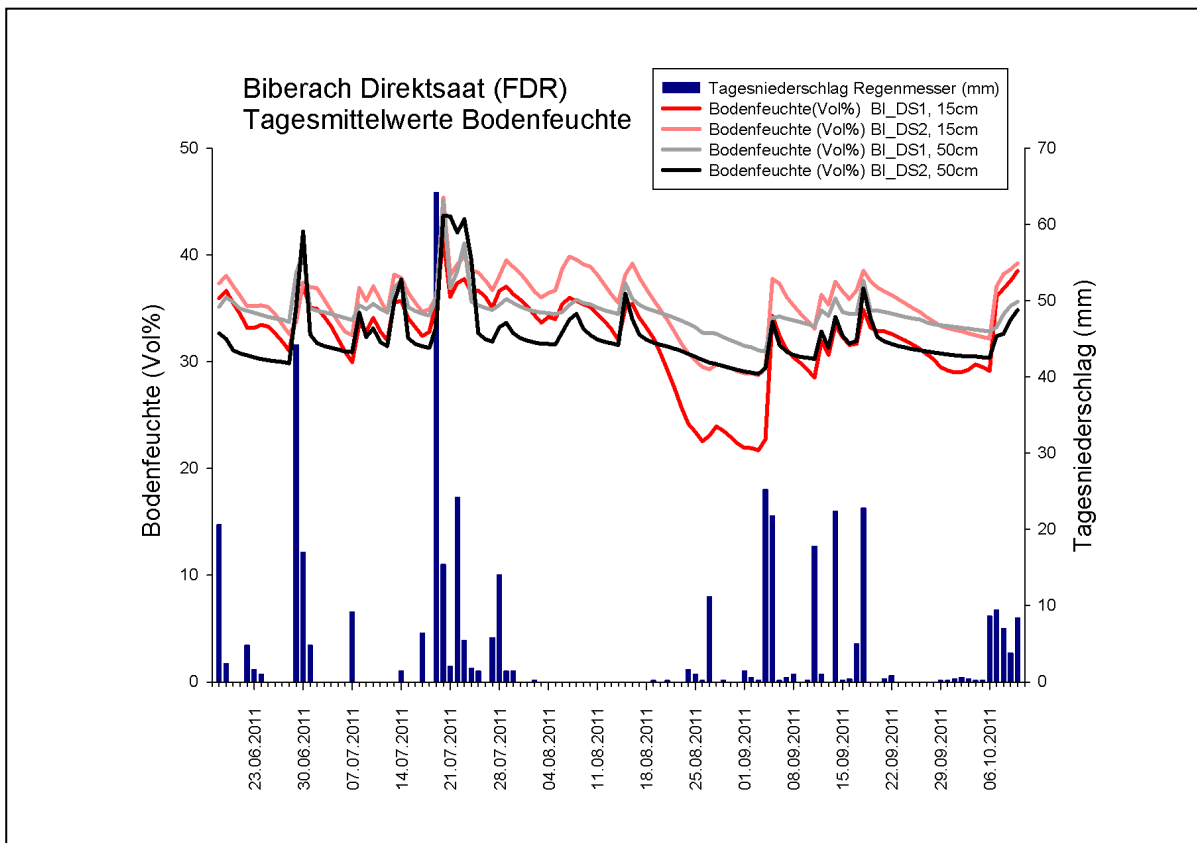


Abb. 27: Bodenfeuchte in zwei Bodentiefen in der Variante Direktsaat, Biberach

Die heißen Tage Mitte bis Ende August hinterließen in Dossenheim zwar vor allem in der Mulchsaat Spuren, indem die Bodenfeuchte messbar absank. In Biberach mit noch wachsendem und transpirierendem Maisbestand hingegen war das Absinken der Bodenfeuchte noch ausgeprägter. Allerdings fielen in Dossenheim in diesem Zeitabschnitt auch 31 mm Niederschlag an zwei aufeinander folgenden Tagen.

3.5 Bodentemperatur

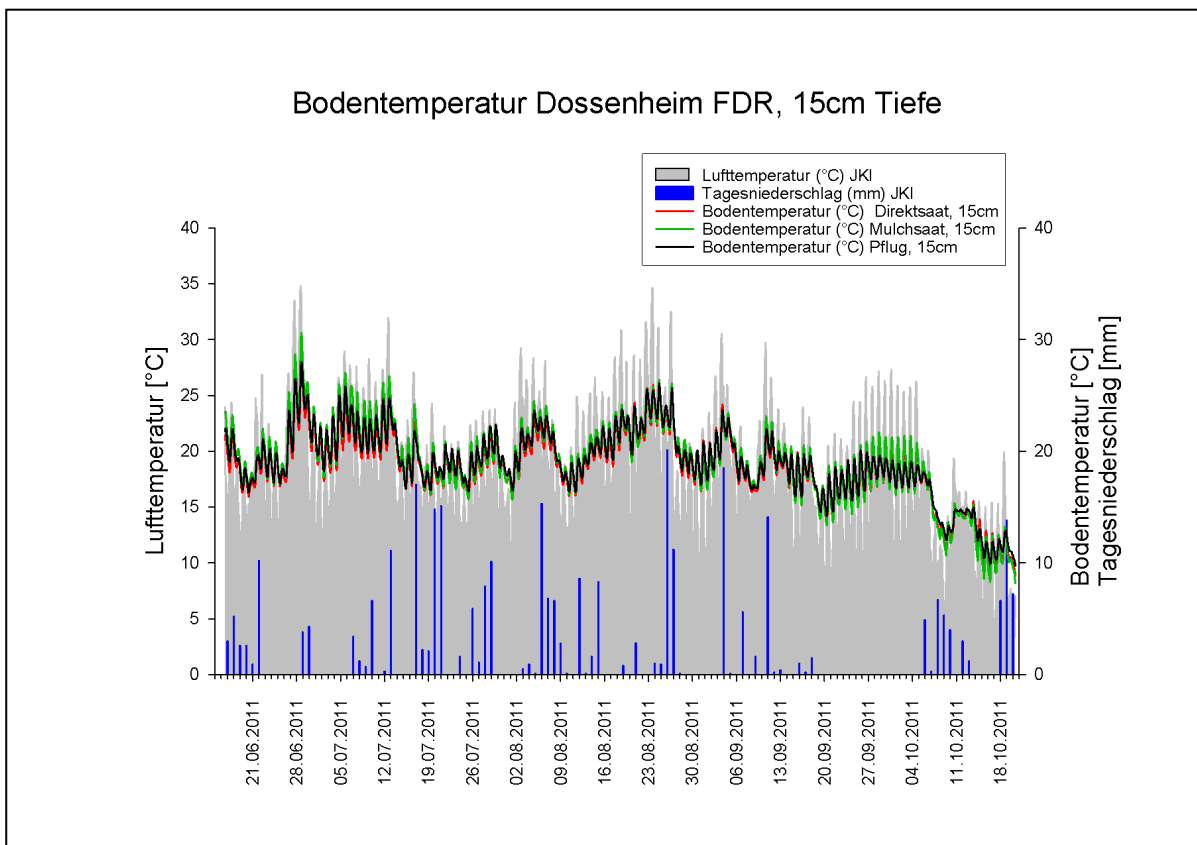


Abb. 28: Bodentemperaturen in 15 cm Tiefe und Lufttemperaturen am Standort Dossenheim

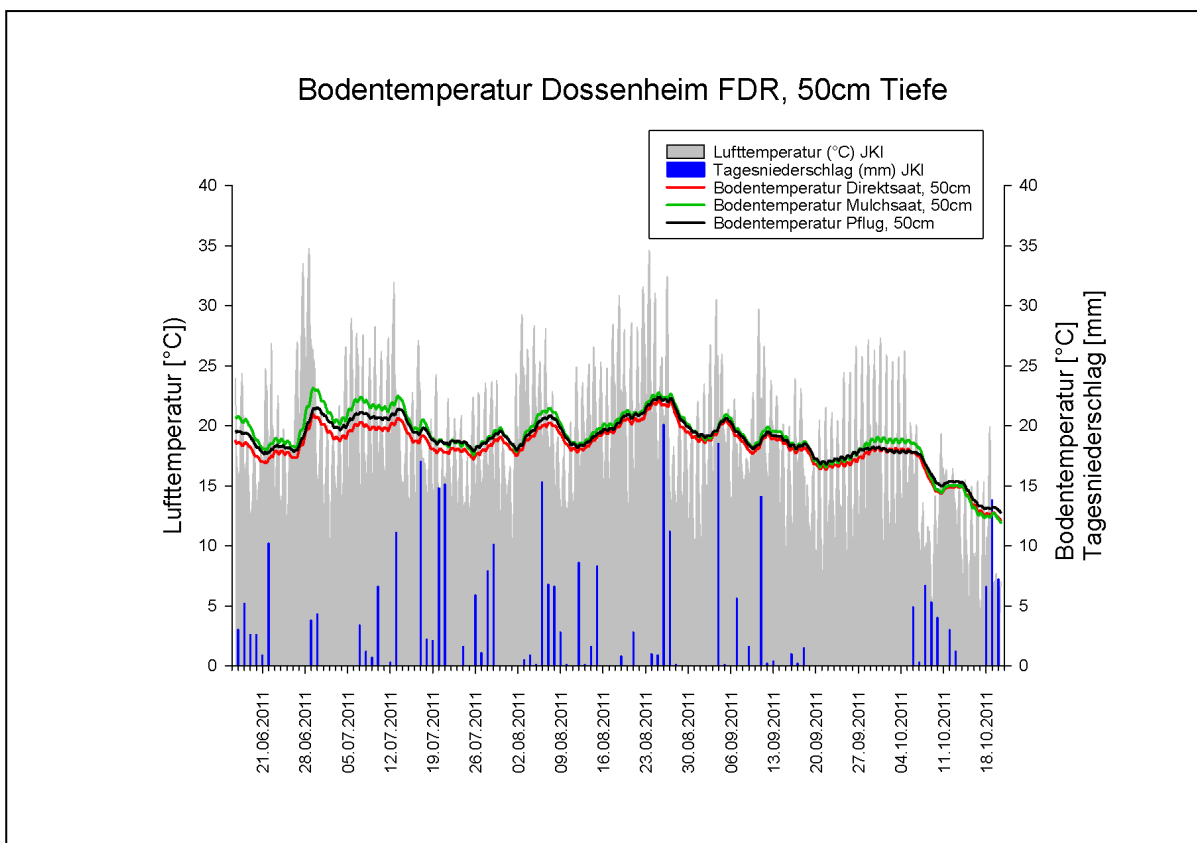


Abb. 29: Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe und Lufttemperaturen am Standort Dossenheim

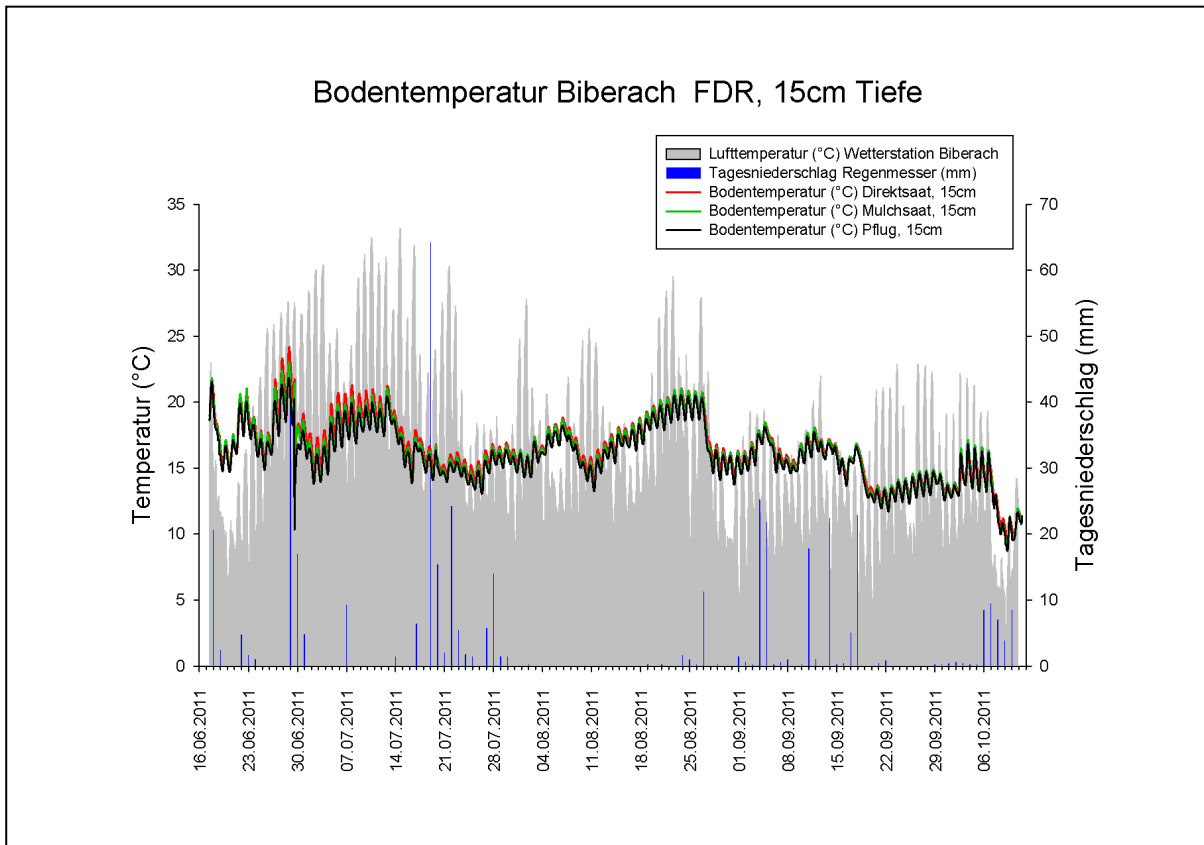


Abb. 30: Bodentemperaturen in 15 cm Tiefe und Lufttemperaturen am Standort Biberach

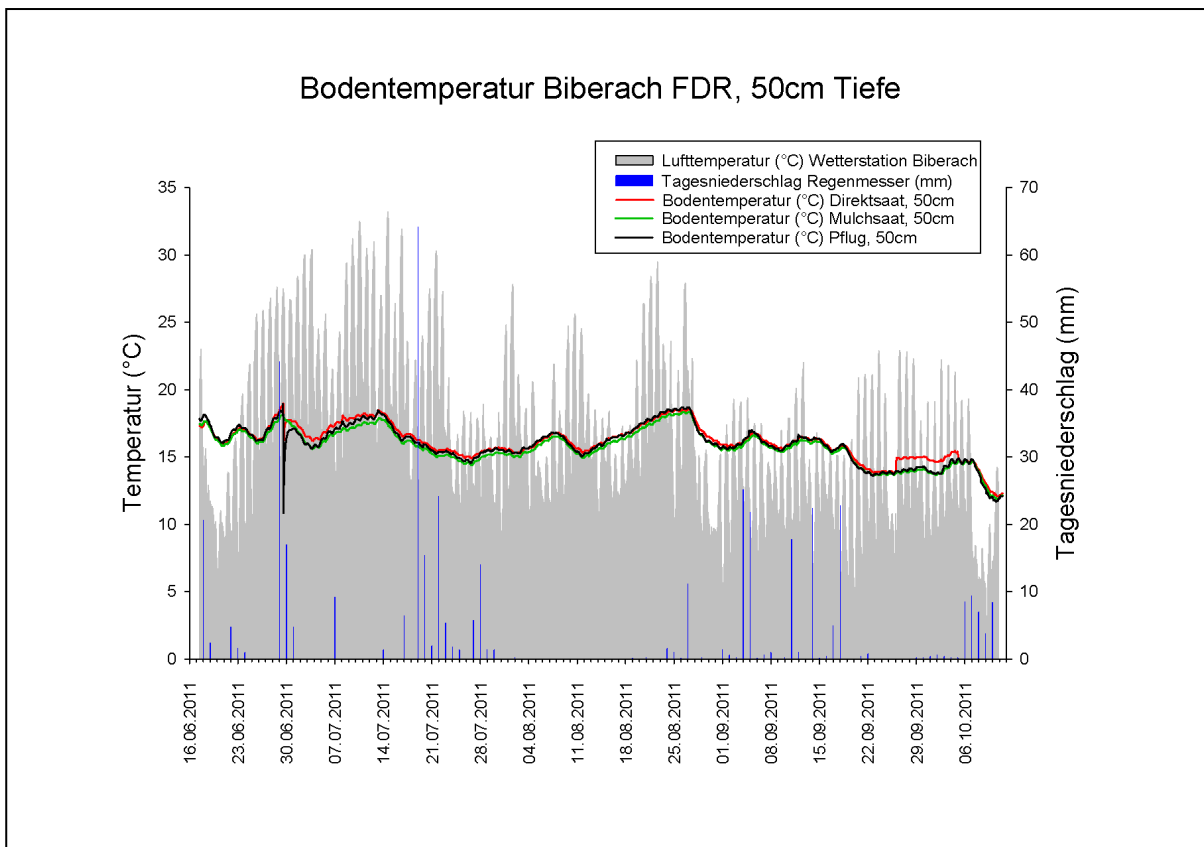


Abb. 31: Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe und Lufttemperaturen am Standort Biberach

Der Temperaturfühler der SM300-Sonde befindet sich nahe der Basis, von der die Metallstäbe für die Bodenfeuchtemessung abgehen, die in den Boden gebohrt werden. Insofern wird der Temperaturfühler nicht mit in den (möglichst) ungestört liegenden Boden eingebracht, sondern befindet sich an der Schnittstelle zwischen dem Messhorizont und dem in seiner Lagerung gestörten wieder eingefüllten Aushub. Mit dieser Einschränkung müssen die Ergebnisse betrachtet werden. Man sieht, dass die Temperatur am Standort Dossenheim in 15 cm Tiefe den Schwankungen der Lufttemperatur eng folgt (Abb. 28). In Biberach (Abb. 30) ist dies nur eingeschränkt der Fall. Der Grund für das unterschiedliche Verhalten liegt vermutlich in der Bodenbedeckung durch die Kultur. Während in Dossenheim Weizen stand, der am 4. 7. 11 bereits geerntet wurde, wuchs in Biberach Silomais, der noch bis 2. 10. 11 stand. Der Maisbestand schuf durch Beschattung und Transpiration sein eigenes Kleinklima. Die Temperatur in 50 cm Tiefe reagiert mit gewisser Verzögerung auf die Lufttemperatur (Abb. 29, Abb. 31). In Biberach fällt außerdem auf, dass die Bodentemperatur nicht nur auf die Lufttemperatur, sondern auch auf höhere Niederschlagsmengen reagiert, sogar noch in 50 cm Tiefe. Dies bestätigt den laut Bodenartbestimmung (Tab. 1 und Kap. 6.1) gegenüber Dossenheim deutlich durchlässigeren Boden, in dem das Wasser schnell versickern kann und schnell tiefere Bodenschichten erreicht. Da Luft eine deutlich geringere Wärmekapazität als Wasser besitzt, bestimmt der Wassergehalt die thermischen Eigenschaften der Böden maßgeblich.

Während man beim Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten in Dossenheim noch vermuten könnte, die Direktsaatparzellen würden sich ein bisschen weniger erwärmen als die anderen beiden Varianten (hier lag die sandigere Mulchsaatvariante vorn), zeigt sich in Biberach ein anderes Bild: Dort zeigt die Direktsaat zumindest in den Anfangswochen sogar die höheren Temperaturen. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre der lückigere Bestand, der erst im Juli den Entwicklungsrückstand aufholte.

3.6 Vergleich TDR-Profilsonde und FDR-Sonde

Die FDR-Sonden wurden in 15 cm und in 50 cm Tiefe platziert. Die TDR-Sonden umfassten Messbereiche zwischen 0 und 20 cm sowie zwischen 40 und 60 cm. Insofern maßen die FDR-Sonden sozusagen mittig in den Messbereichen der TDR-Sonden. Daher bot es sich an, die Ergebnisse der beiden Sondenarten zu vergleichen. Die TDR-Messungen wurden einmal wöchentlich durchgeführt. Als FDR-Vergleichswert wurde der in der Stunde der TDR-Messung durch die FDR-Sonden aufgezeichnete Wert genommen.

Die Messwerte von TDR- und FDR-Sonden verlaufen über den gesamten Messzeitraum hinweg weitgehend parallel. Die Werte der FDR-Sonden sind auf dem Standort Biberach fast durchgehend ein wenig höher (Abb. 38-43; SCHERZER et al. 1996). Am Standort Dossenheim ist das Bild unklarer: Zu Beginn war die Messperiode noch von Trockenheit geprägt, hier lagen die TDR-Messwerte gerade im oberen Bodenhorizont häufig höher (Abb. 32, 34, 36). Sowohl die TDR-Rohre, als auch die FDR-Sonden benötigten als Faustregel drei Wochen, bis nach den Störungen durch den Einbau wieder Bodenschluss für verlässliche Messungen erreicht ist. Eventuell benötigten die eingegrabenen und horizontal eingebrachten FDR-Sonden unter den sehr trockenen Bedingungen in Dossenheim mehr Zeit – und Niederschläge – bis zum dichten Bodenschluss.

Insgesamt sind die Messwerte der beiden Sondentypen recht gut vergleichbar, insbesondere dann, wenn es darum geht, Tendenzen im Bodenwassergehalt zu erfassen. Dies ist durchaus bemerkenswert, da die FDR-Sonde in einer bestimmten Tiefe misst, die TDR-Sonde hingegen über einen bestimmten Tiefenbereich integriert, wenn auch in diesem Fall die „FDR-Tiefe“ in etwa der Mitte des „TDR-Tiefenbereichs“ entsprach.

3.6.1 STANDORT DOSENHEIM

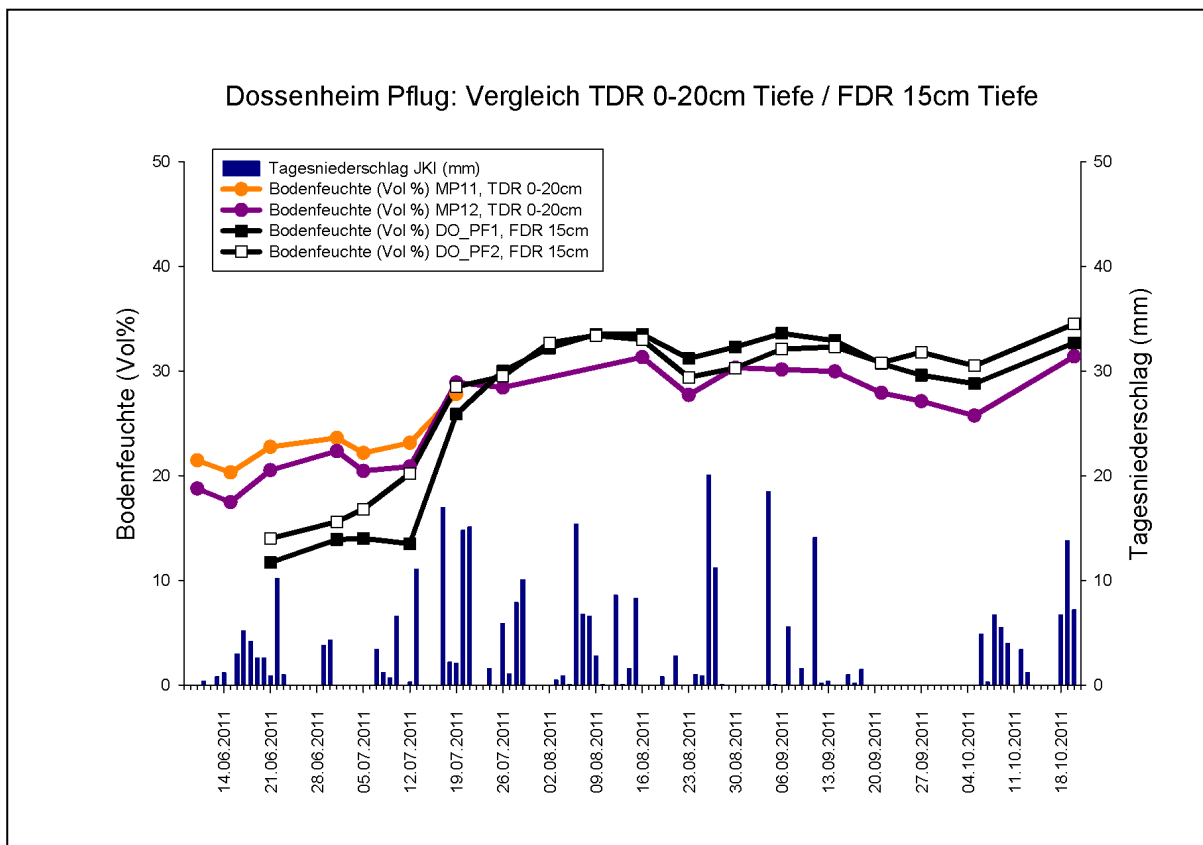


Abb. 32: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Pflugvariante, 0-20 cm / 15 cm.

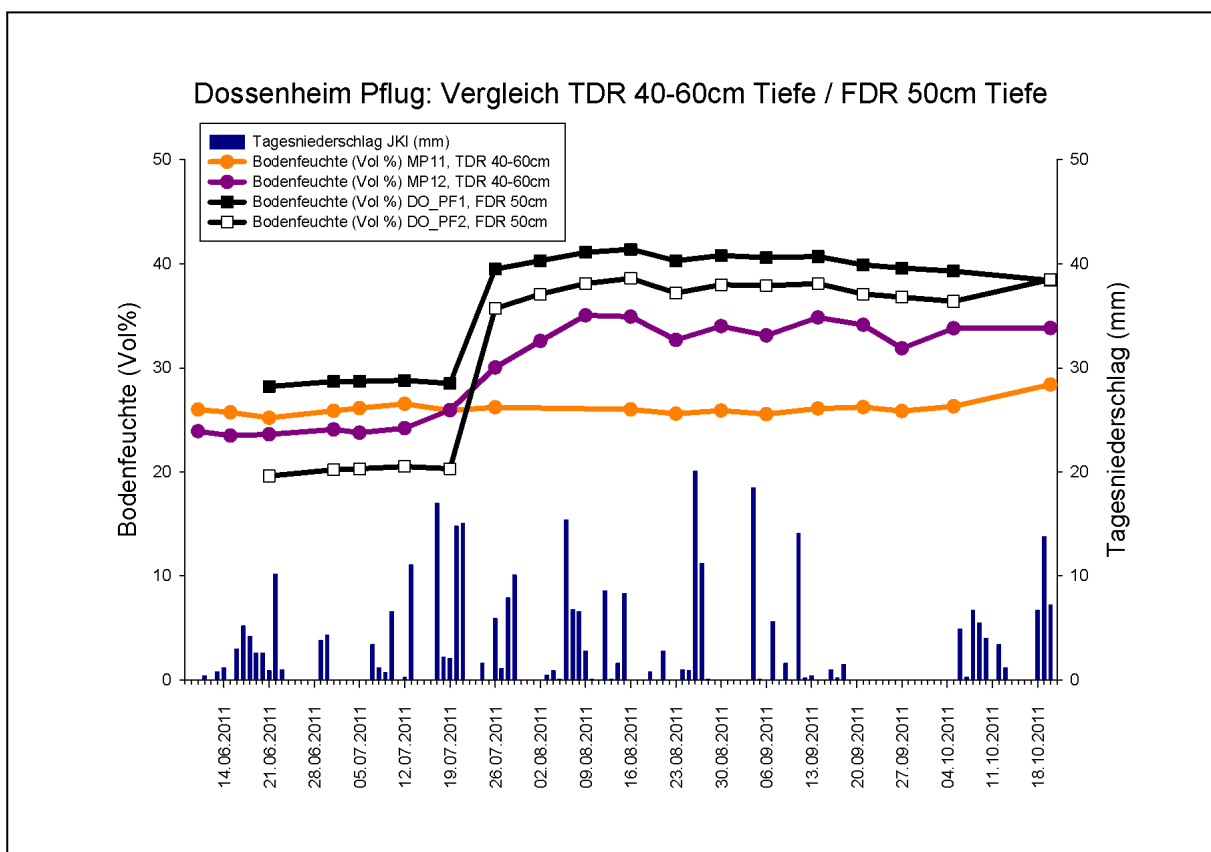


Abb. 33: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Pflugvariante, 40-60 cm / 50 cm.

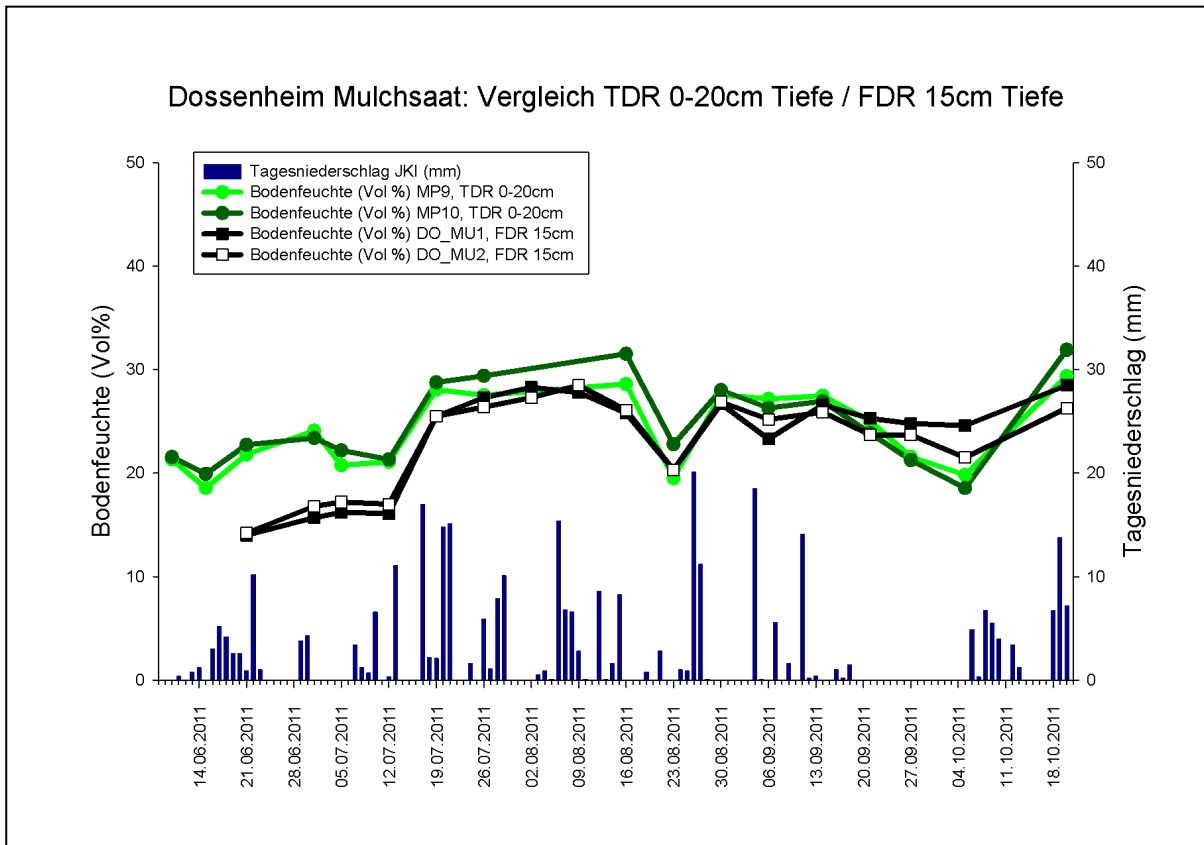


Abb. 34: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Mulchsaatvariante, 0-20 cm / 15 cm.

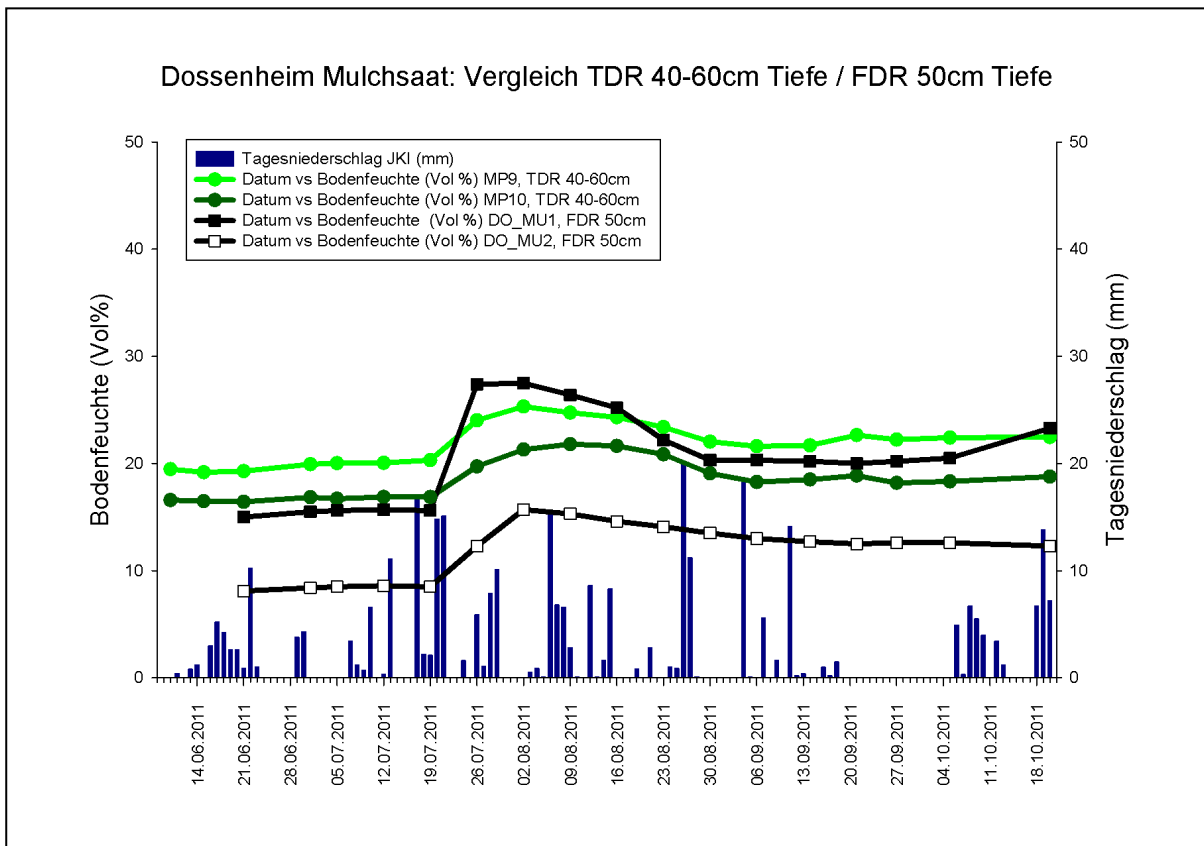


Abb. 35: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Mulchsaatvariante, 40-60 cm / 50 cm.

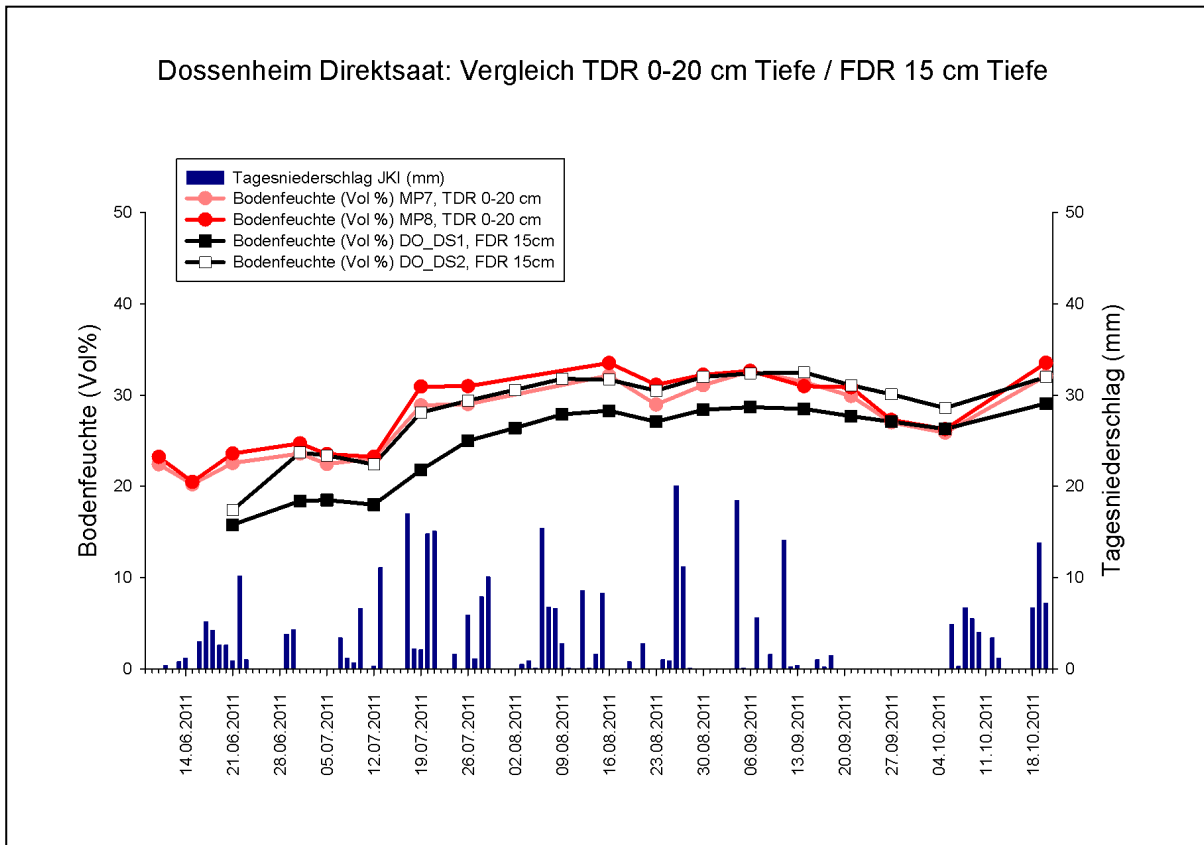


Abb. 36: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Direktsaatvariante, 0-20 cm / 15 cm

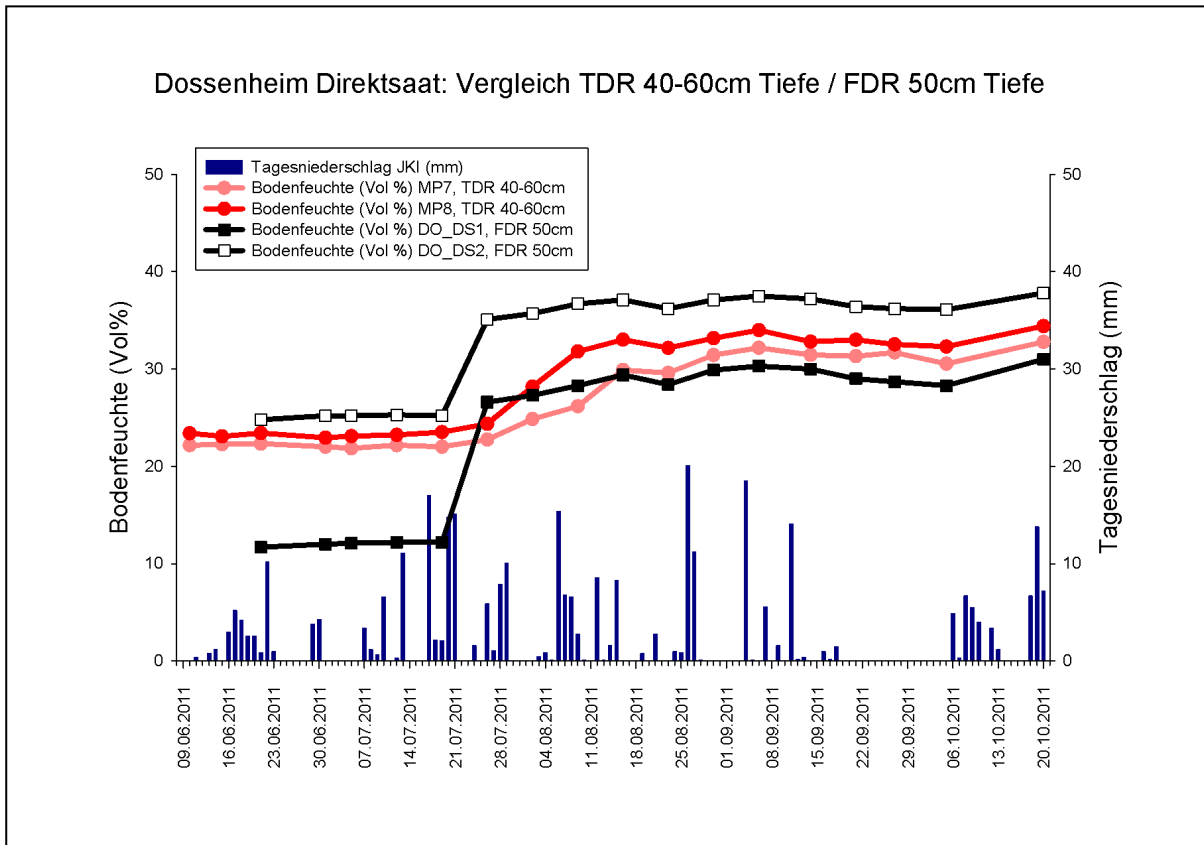


Abb. 37: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Dossenheim, Direktsaatvariante, 40-60 cm / 50 cm

3.6.2 STANDORT BIBERACH

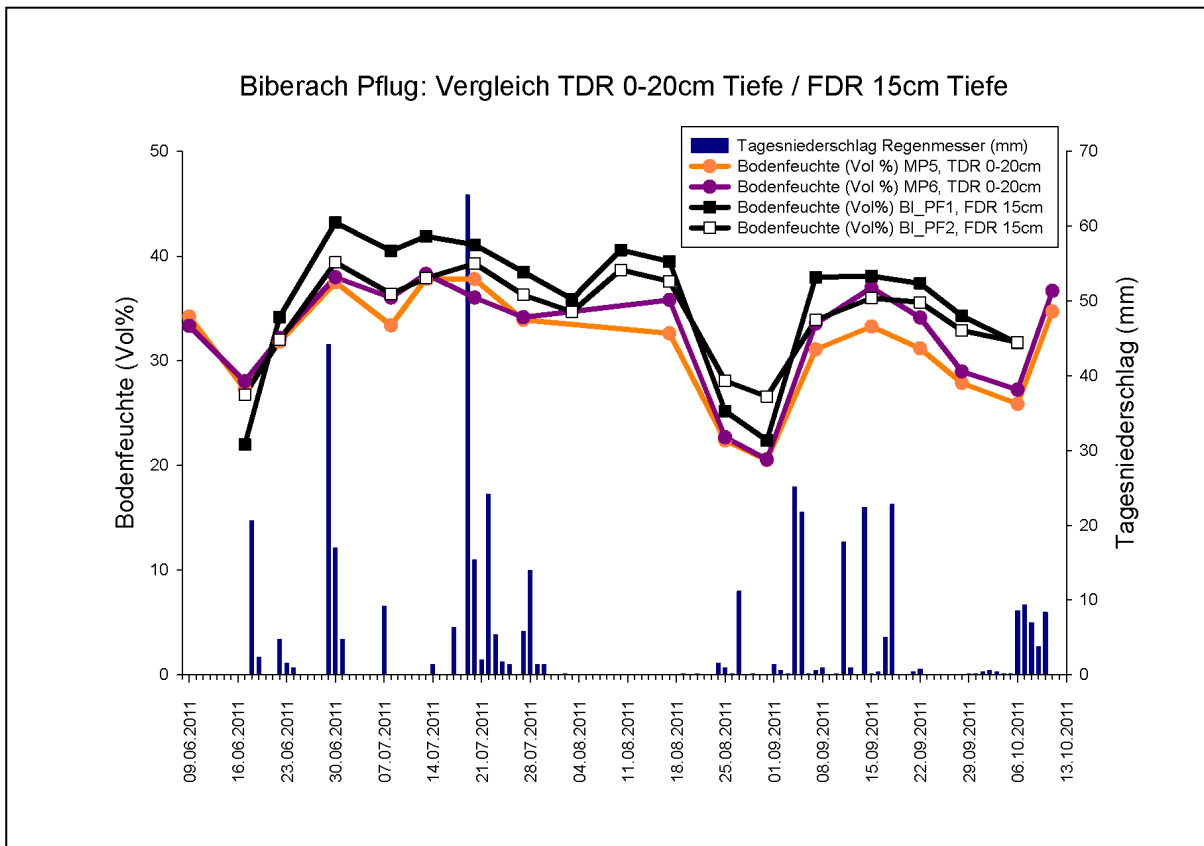


Abb. 38: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Pflugvariante, 0-20 cm / 15 cm

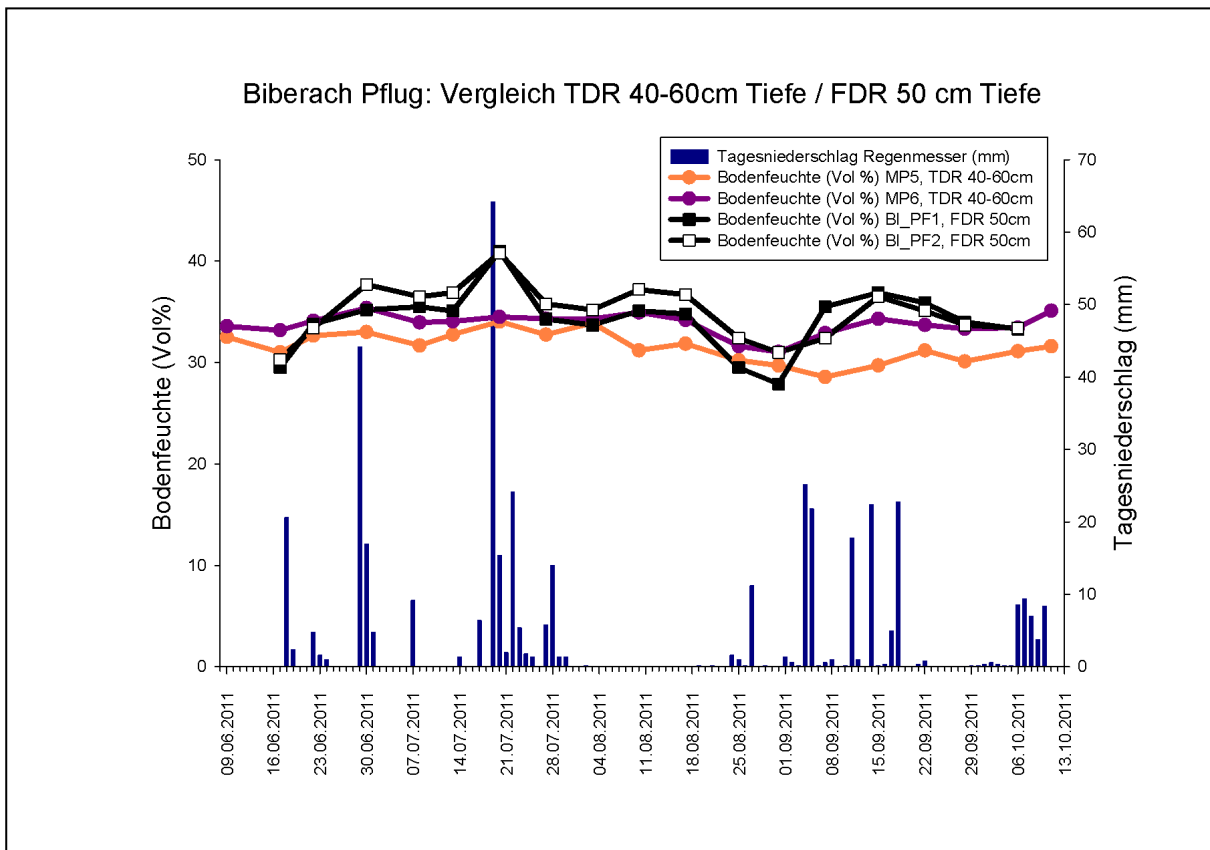


Abb. 39: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Pflugvariante, 40-60 cm / 50 cm

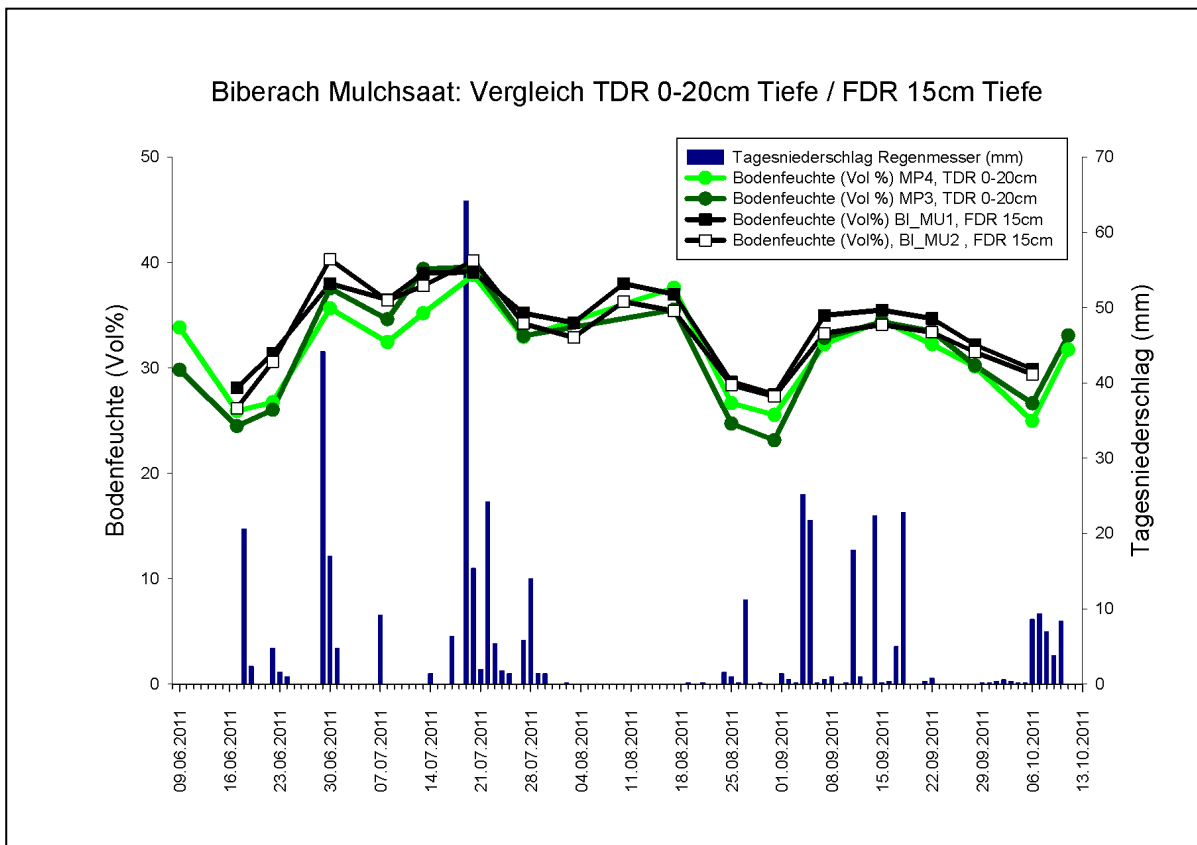


Abb. 40: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Mulchsaatvariante, 0-20 cm / 15 cm

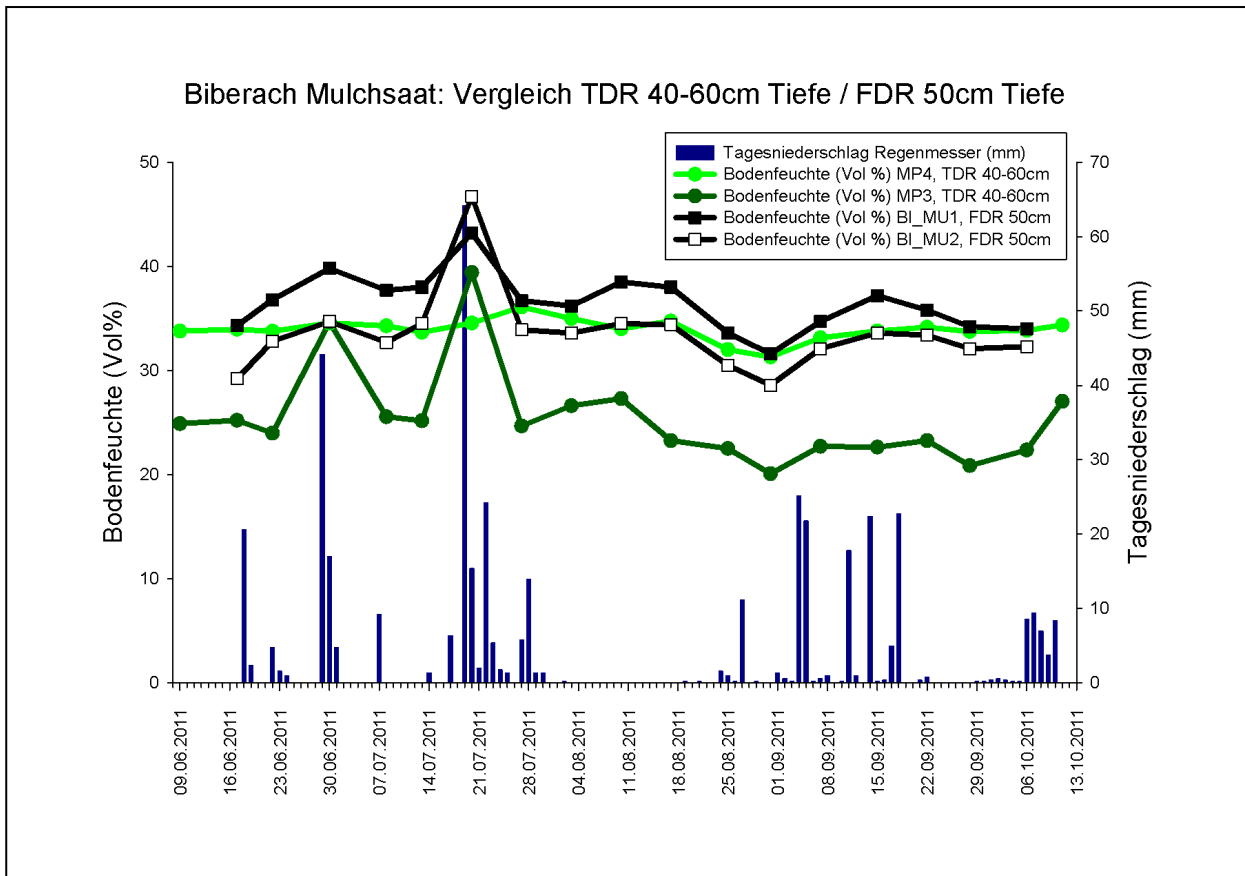


Abb. 41: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Mulchsaatvariante, 40-60 cm / 50 cm

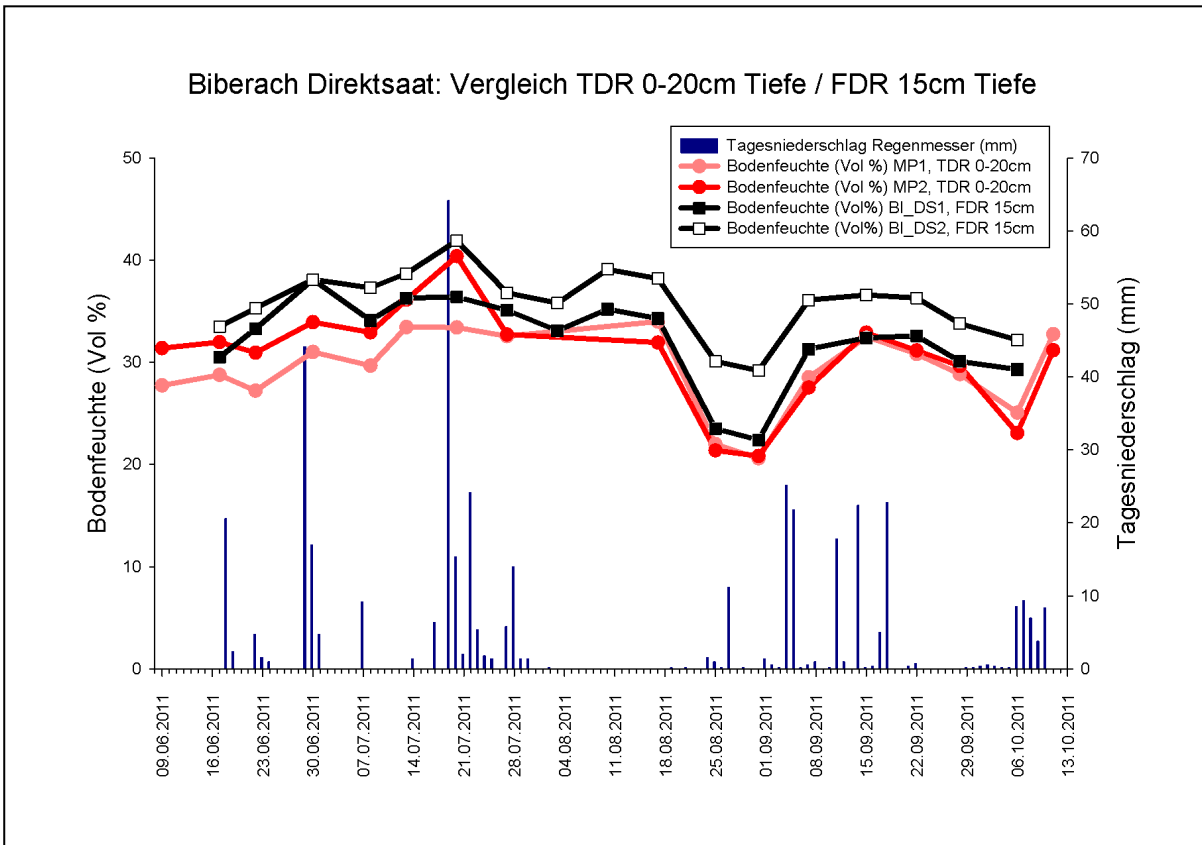


Abb. 42: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Direktsaatvariante, 0-20 cm / 15 cm

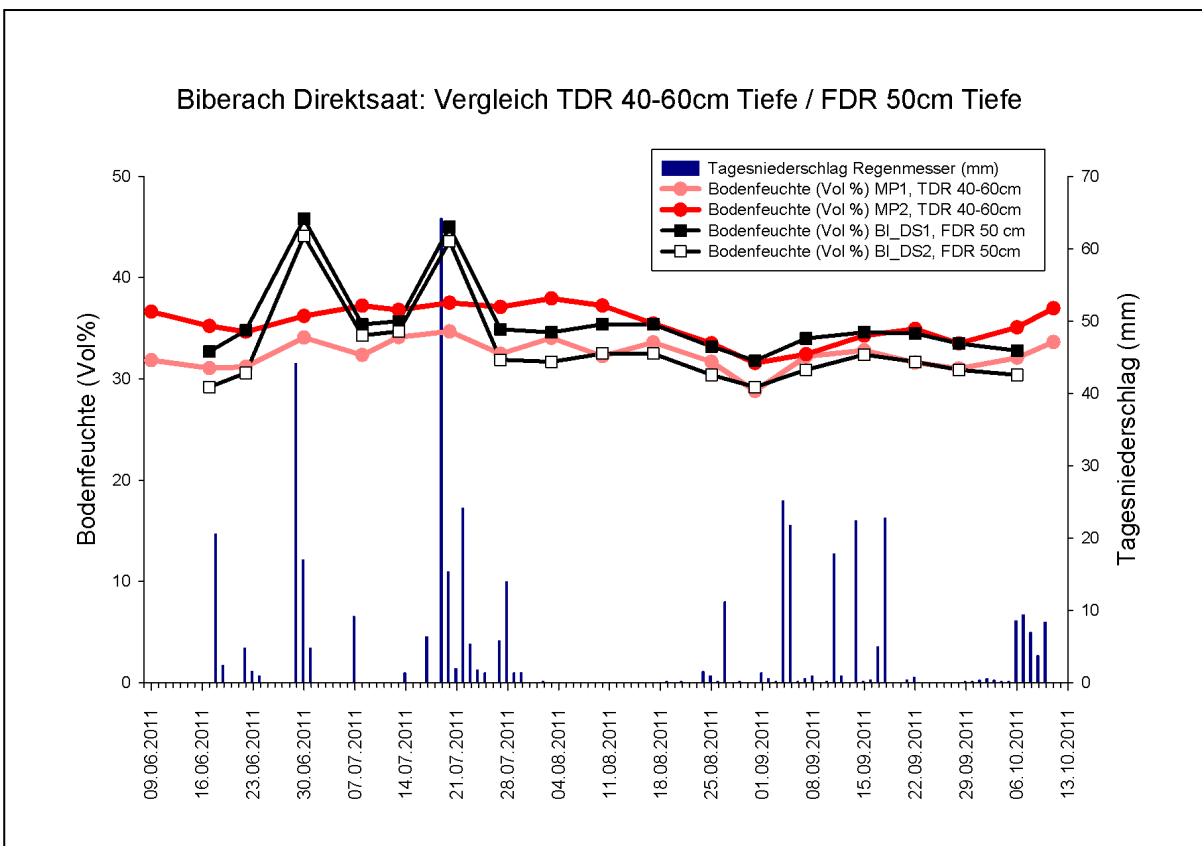


Abb. 43: Vergleich TDR-/FDR-Sonden, Standort Biberach, Direktsaatvariante, 40-60 cm / 50 cm

3.7 Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

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 an einem bestimmten Standort.

3.7.1 VERGLEICH DER TDR-MESSWERTE ZWISCHEN DEN BODENBEARBEITUNGSVERFAHREN

Standort Efringen-Kirchen

Nach Abbildung 44 könnte man (wiederum) vermuten, Direktsaatflächen würden, zumindest in den oberen 20 cm, mehr Wasser zur Verfügung haben als Mulch- und vor allem Pflugflächen (vgl. Kap. 3.3). In den unteren Bodenschichten wiederum könnte das Pflugverfahren zu mehr Bodenfeuchte führen (Abb. 47). Die Mulchsaat nimmt eine Art intermediäre Stellung ein.

Ein Blick auf andere Standorte und andere Bodentiefen liefert ein differenzierteres Bild. Zwar liegen beispielsweise in Neresheim-Dossingen (0-20 cm, Abb. 58) die Messwerte der beiden Messstellen auf derselben Variante näher beieinander als in Efringen-Kirchen (mit Ausnahme der Pflugvariante), dafür sind die Unterschiede zwischen den parallelen Messstellen in 60-80 cm Tiefe größer als die Unterschiede zwischen den Varianten Pflug und Direktsaat (Abb. 61).

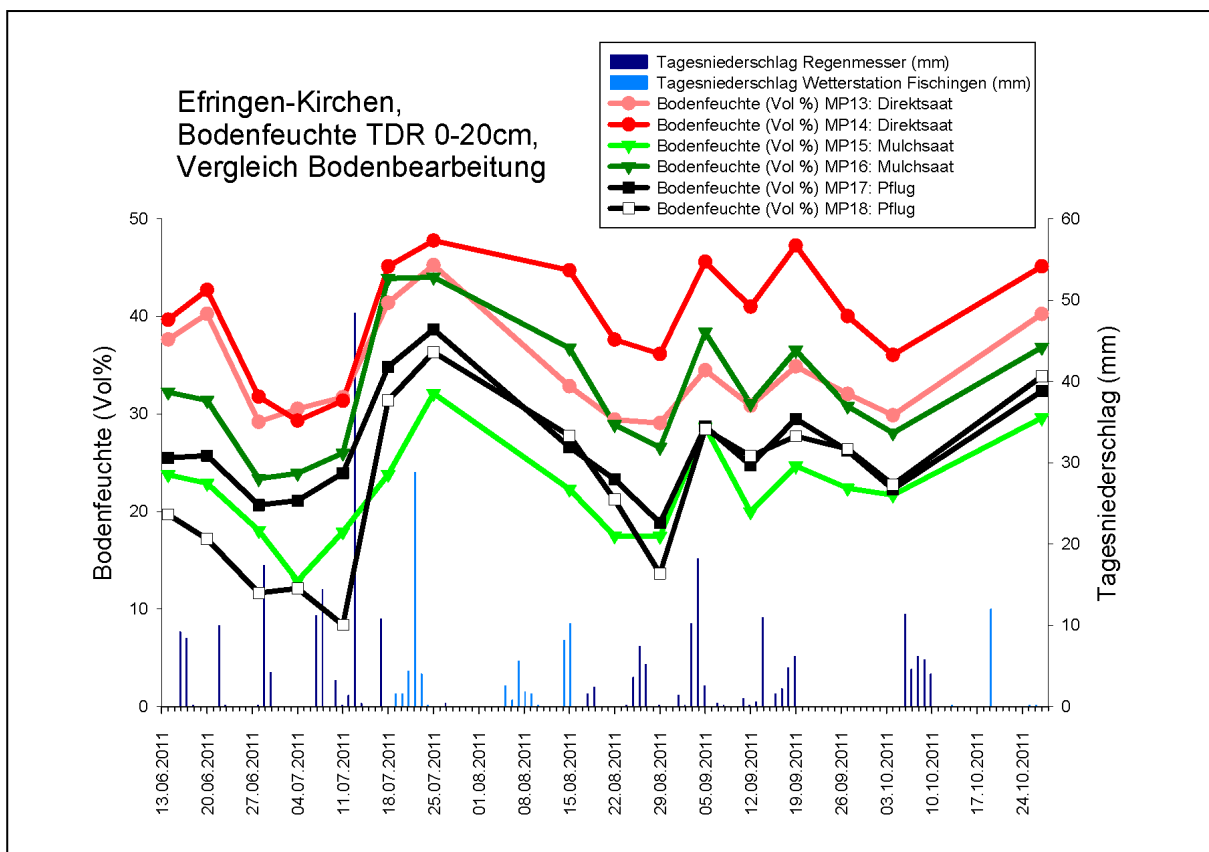


Abb. 44: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm.

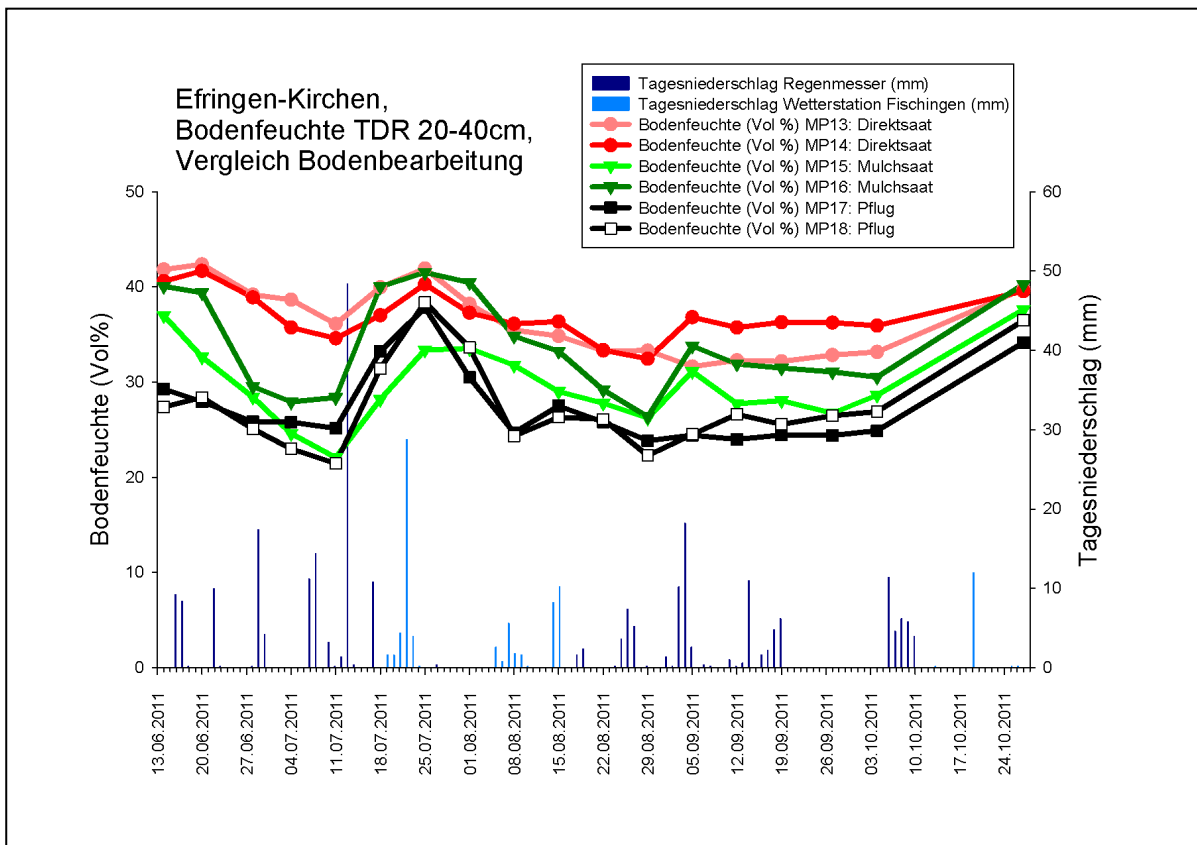


Abb. 45: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm.

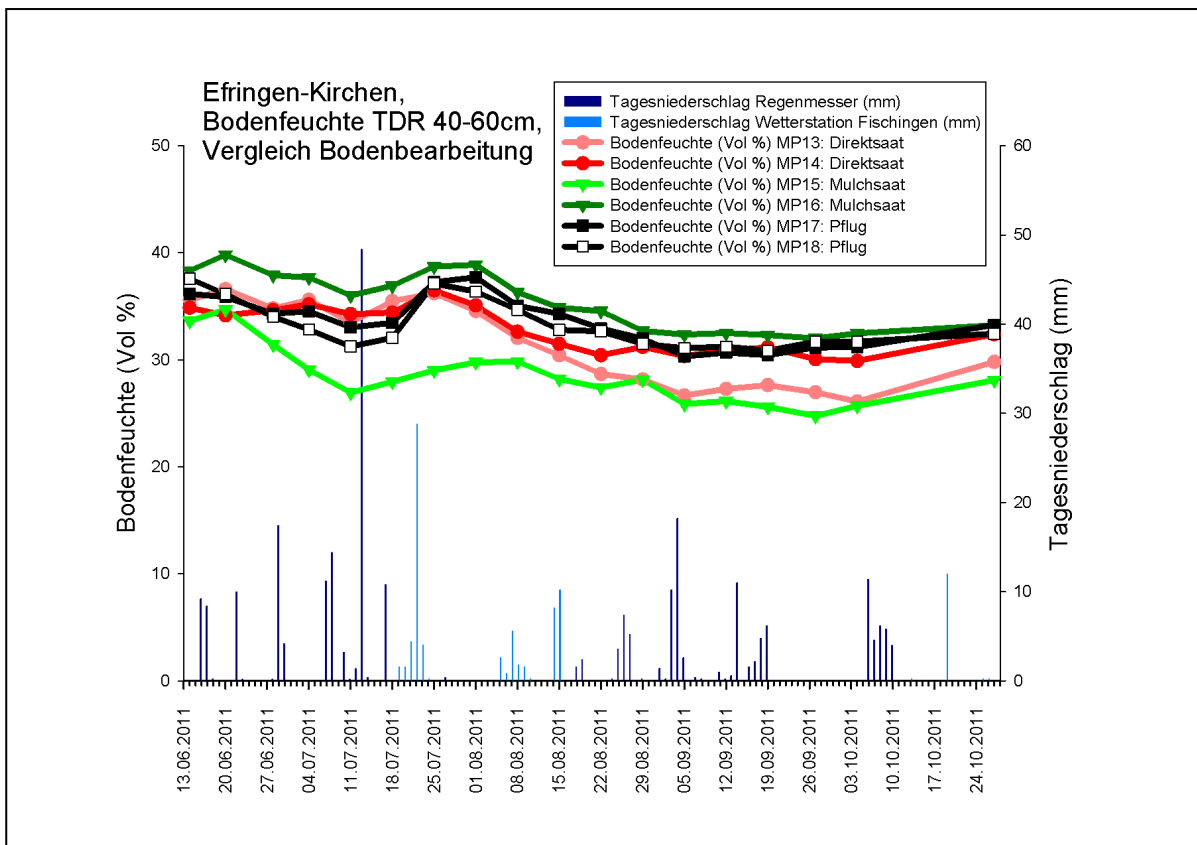


Abb. 46: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 40-60 cm.

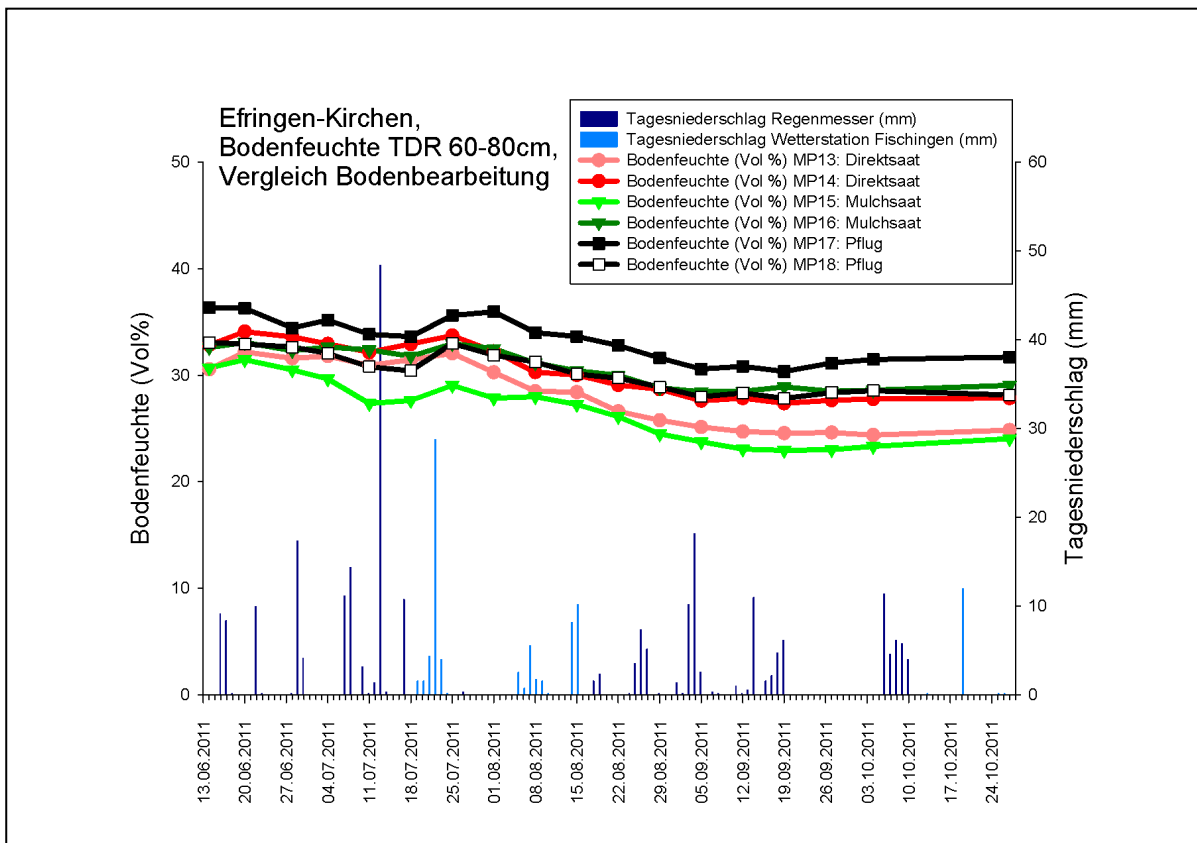


Abb. 47: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 60-80 cm.

Standort Dossenheim

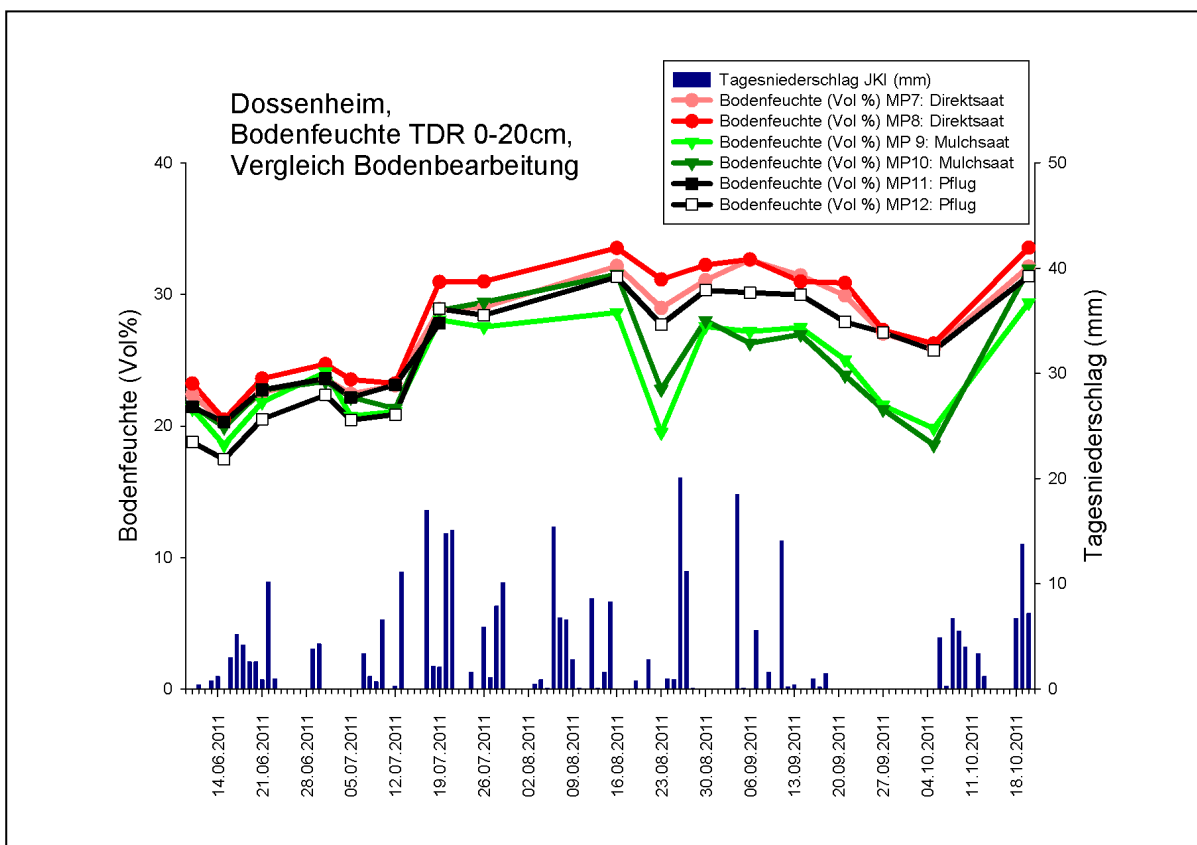


Abb. 48: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm.

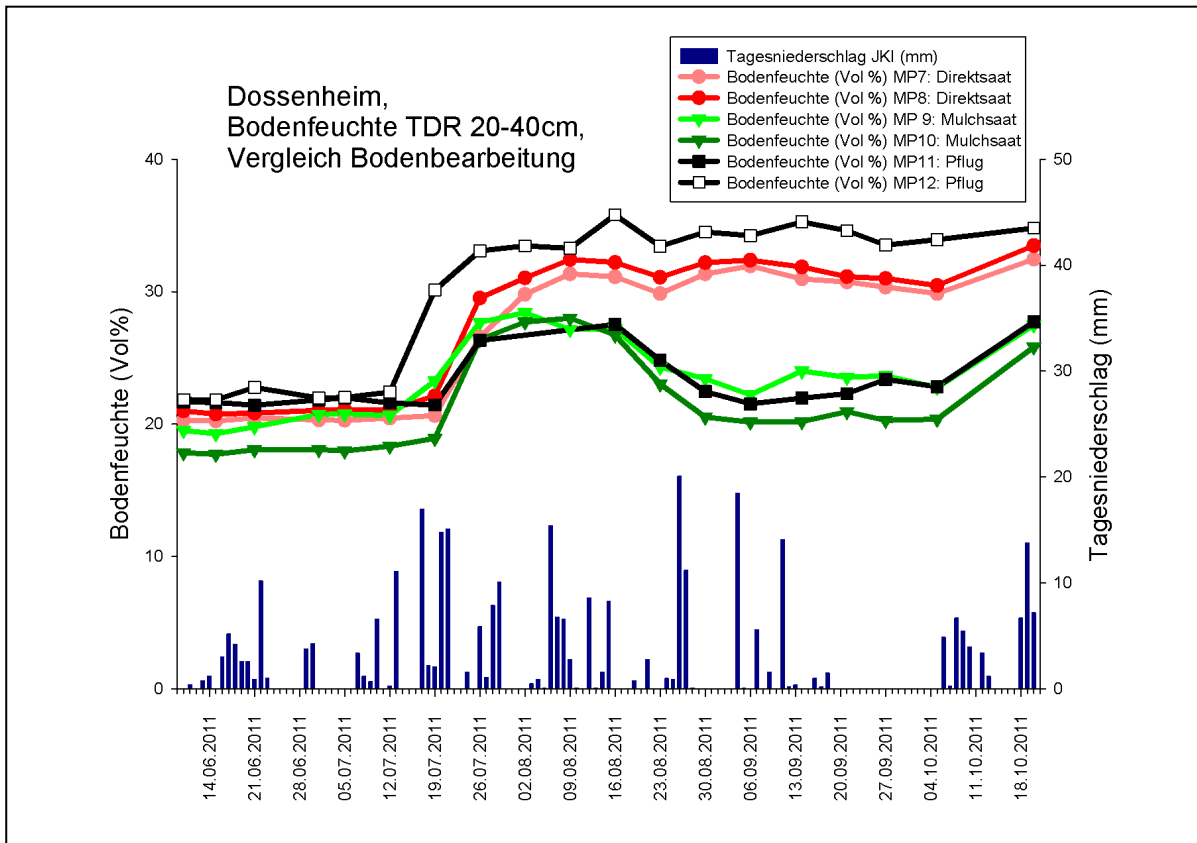


Abb. 49: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm. Am Messpunkt 12 war bei der Bergung des Rohrs in ca. 35 cm Tiefe ein kleiner Spalt festzustellen.

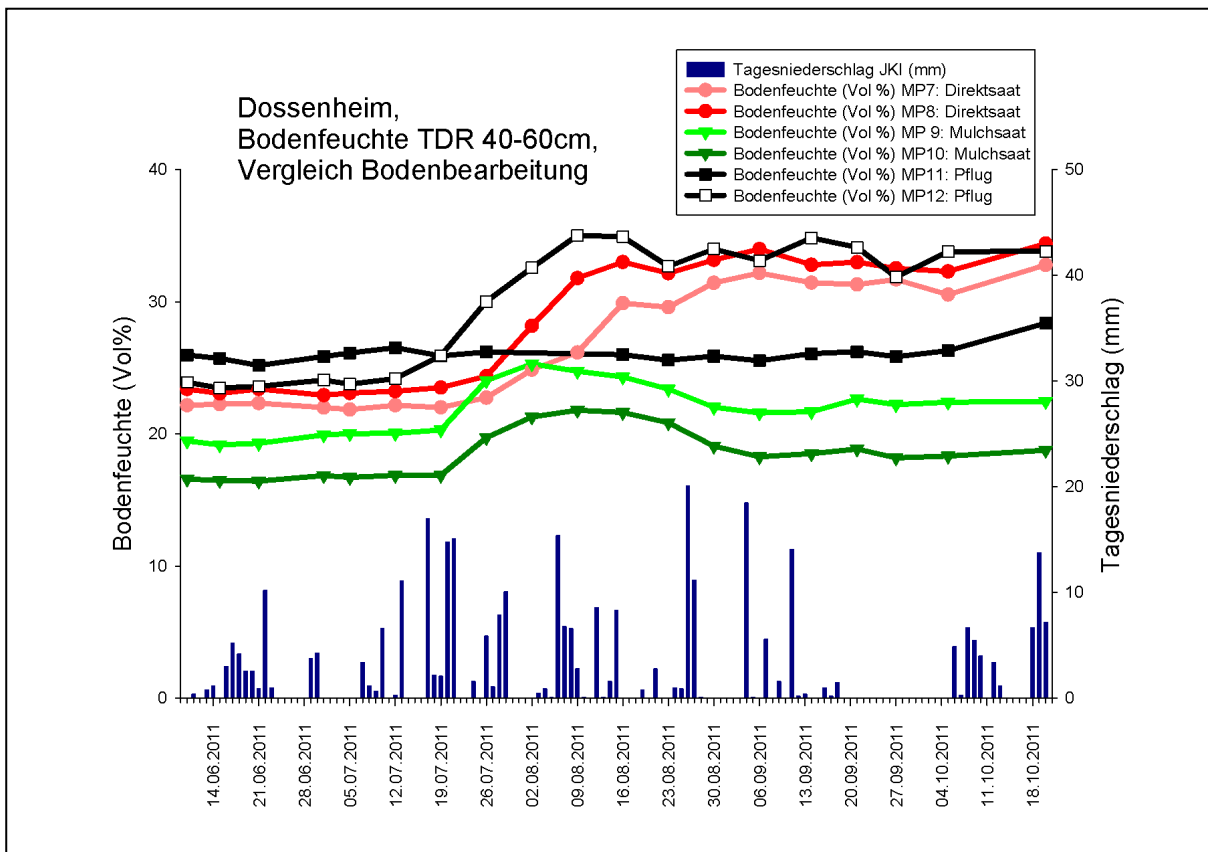


Abb. 50: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 40-60 cm.

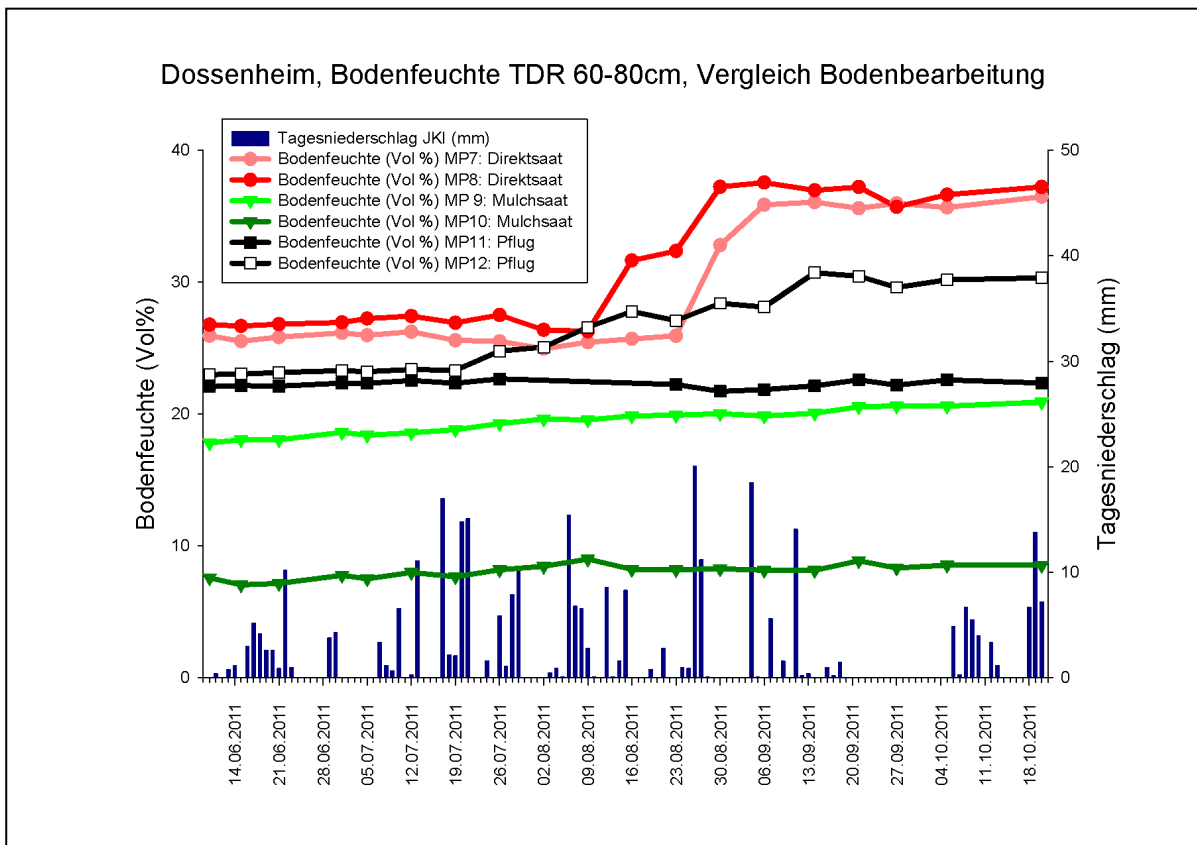


Abb. 51: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 60-80 cm.

Eine Interpretation der Daten ist in Dossenheim durch die Unterschiedlichkeit der Messwerte bei den Parallelsonden erschwert (Pflug 20-40 und 40-60 cm, Mulchsaat 60-80 cm). In der Tendenz sind an diesem Standort die Direktsaatparzellen feuchter als die Pflugparzellen, und zwar im Gegensatz zu Efringen-Kirchen nicht nur in den oberen 20 cm, sondern auch im Unterboden. Zu beachten ist jedoch, dass in Efringen-Kirchen noch Mais stand, in Dossenheim hingegen keine Kultur mehr. In den mittleren Horizonten zeigt sich die Direktsaatvariante zumindest gleich feucht wie die Pflugvariante. Die Mulchsaat liefert vermutlich wegen der heterogenen Bodenbedingungen kein repräsentatives Bild.

Da die Ergebnisse der TDR-Methodik nicht unabhängig von der Lagerungsdichte sind (vgl. Kap. 2.2), wurden mit Hilfe der Rohdichte-Werte früherer Bodenuntersuchungen (Kap. 6.2) die Bodenfeuchten aller Standorte mittels einer empirischen Korrekturfunktion (Kap. 2.2) angepasst. Dabei wurde für die Bodentiefe 0-20 cm der Mittelwert aus den Trockenrohdsichten für 0-10 und 10-20 cm verwendet (eigentlich 0-5 und 10-15 cm) und für die Tiefe 20-40 cm der Mittelwert aus den Trockenrohdsichten für 20-30 und 30-40 cm (eigentlich 20-25 und 30-40 cm). Die Korrekturen führen dazu, dass die Bearbeitungsvarianten Pflug und Mulchsaat mit niedrigeren Lagerungsdichten in den oberen Horizonten hin zu höheren Bodenfeuchtegehalten korrigiert werden. Auf den Standorten Grünfeld-Hausen, Neresheim-Dossingen und Biberach ergaben sich dadurch jedoch kaum nennenswerte Änderungen. In Efringen-Kirchen und Dossenheim wird das Bild insofern modifiziert, dass etwaige Bodenfeuchte-Vorteile der Direktsaat bzw. Nachteile des Pflugverfahrens relativiert werden und die Varianten einander näher rücken (Abb. 52-55).

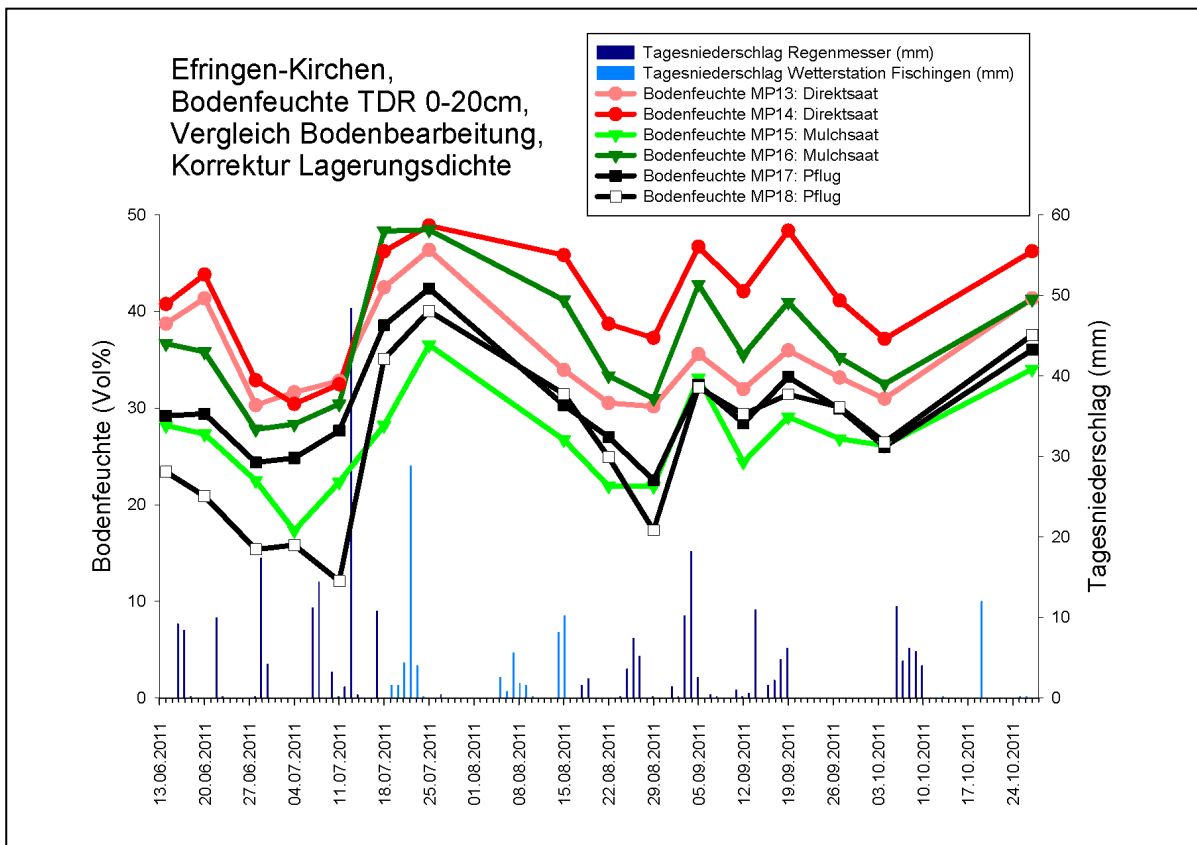


Abb. 52: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm. Korrektur für unterschiedliche Lagerungsdichten – vgl. Abb. 44.

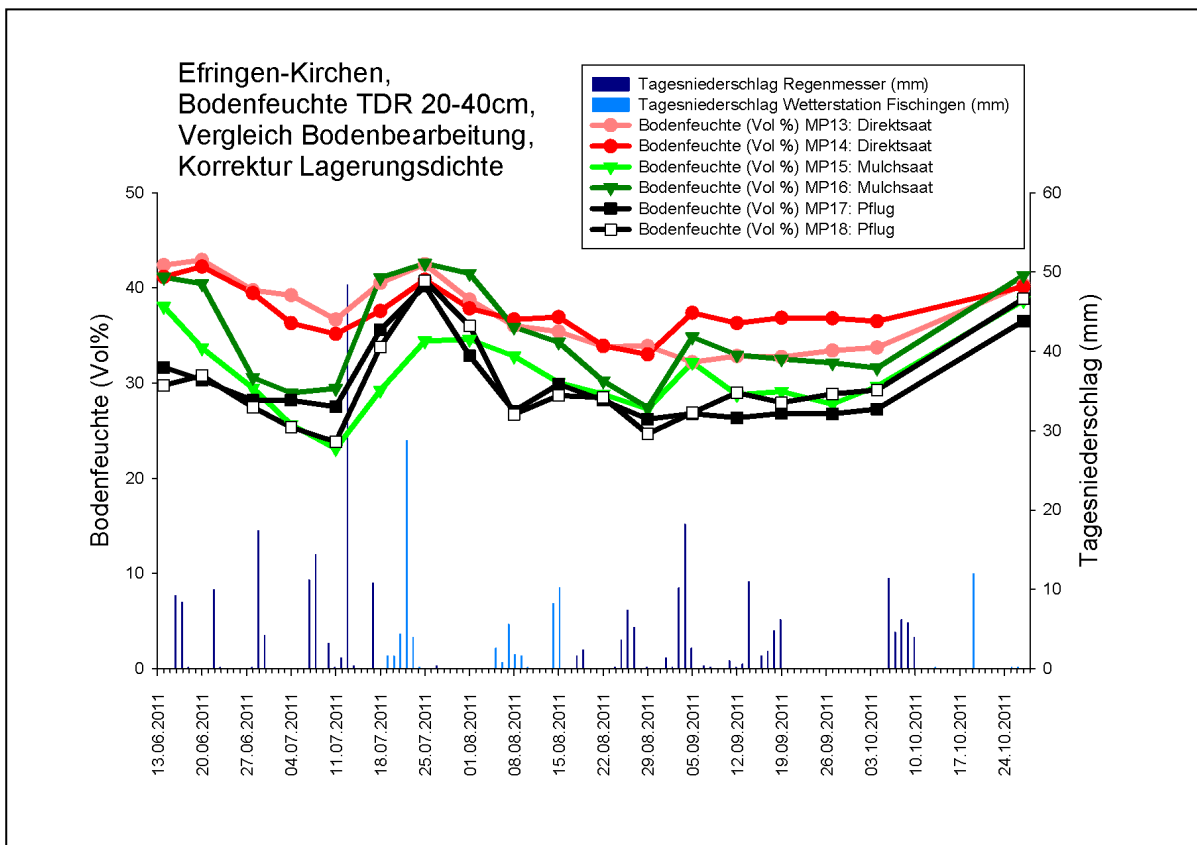


Abb. 53: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Efringen-Kirchen. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm. Korrektur für unterschiedliche Lagerungsdichten – vgl. Abb. 45.

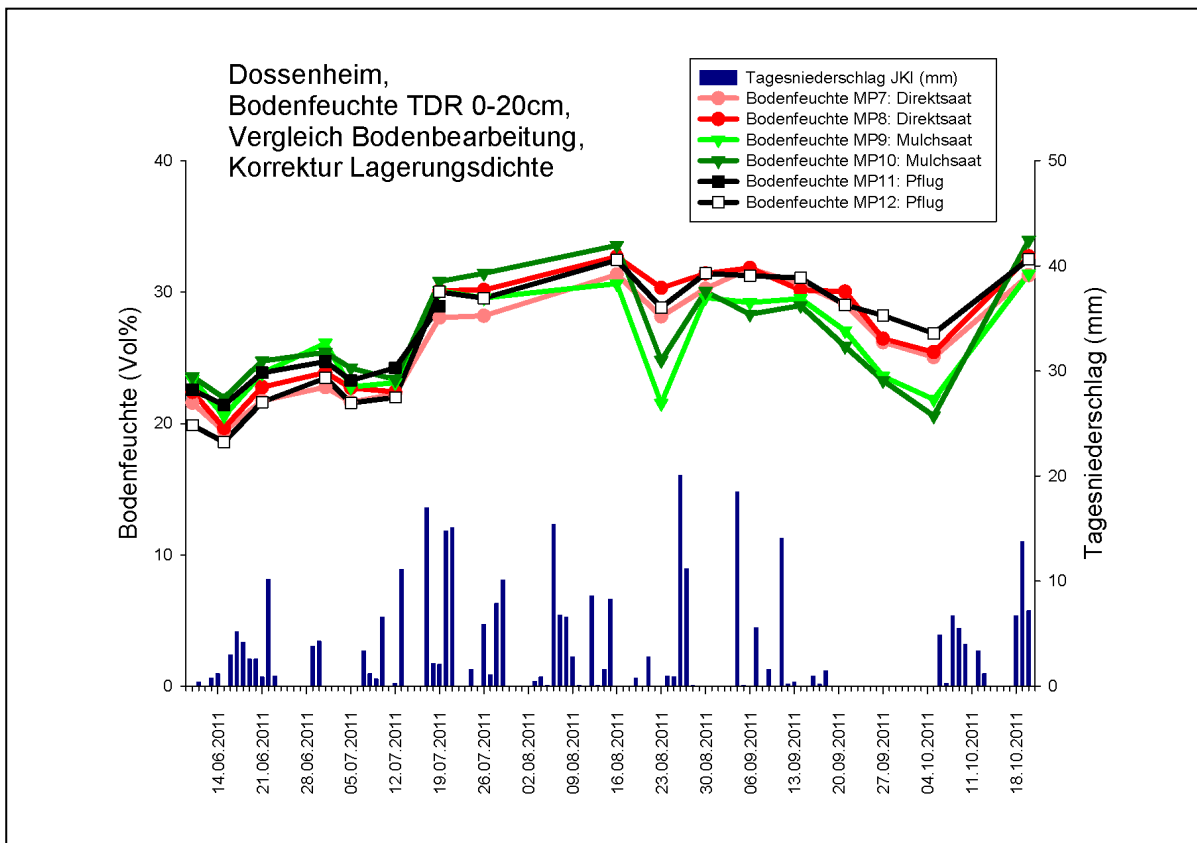


Abb. 54: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm. Korrektur für unterschiedliche Lagerungsdichten – vgl. Abb. 48.

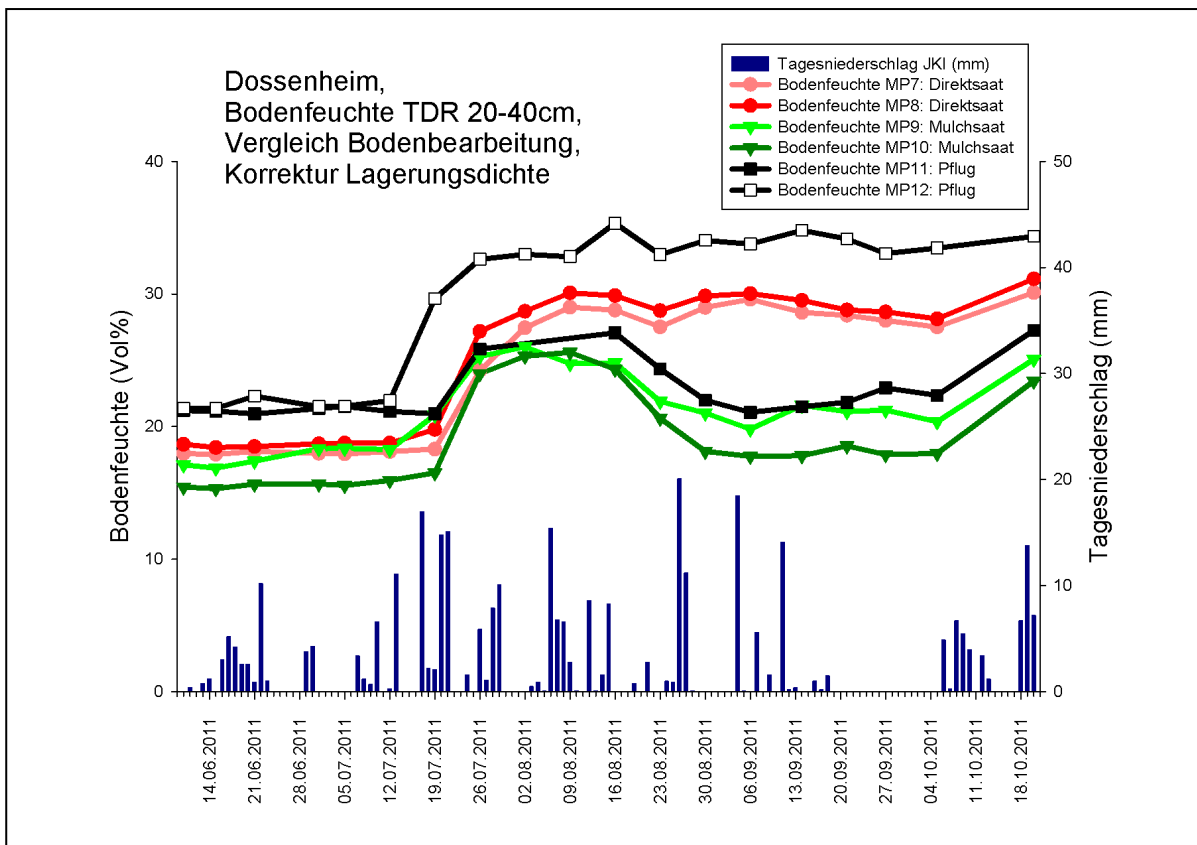


Abb. 55: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm. Korrektur für unterschiedliche Lagerungsdichten – vgl. Abb. 49.

Standort Grünsfeld-Hausen

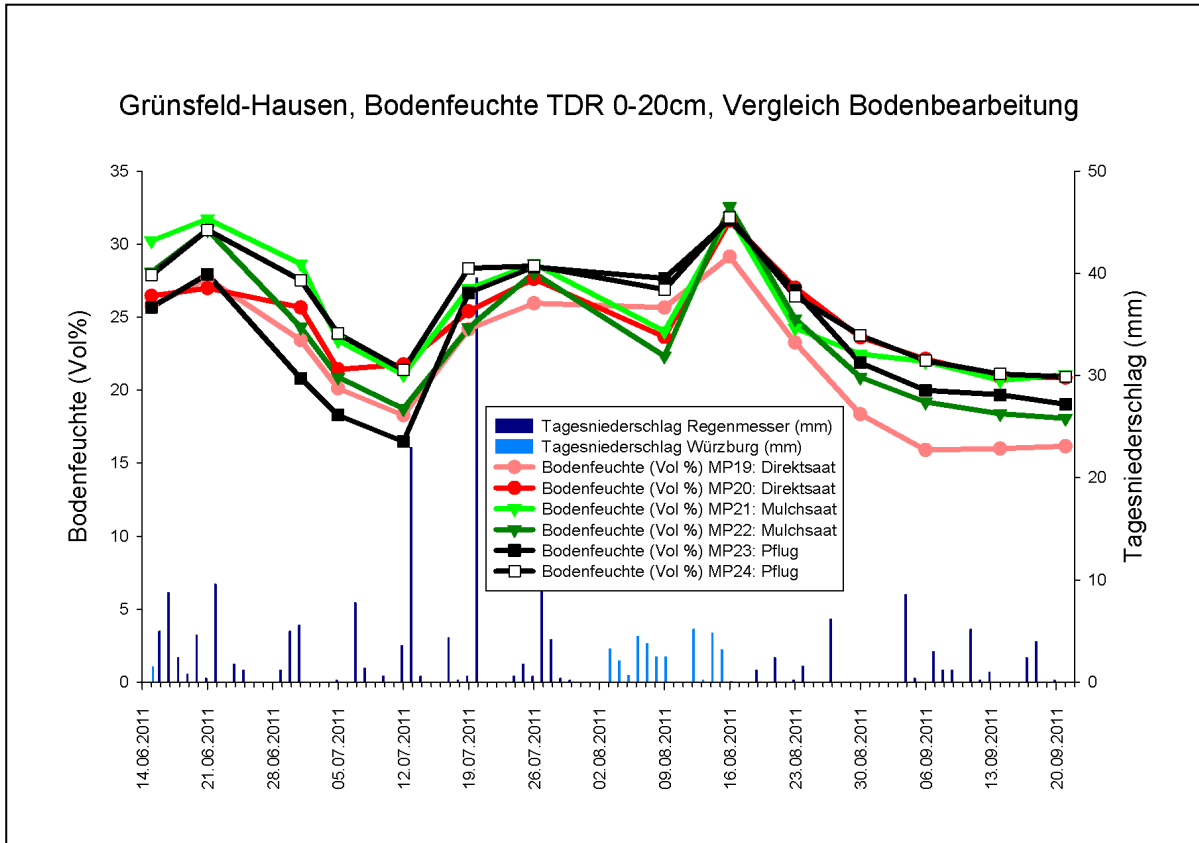


Abb. 56: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Grünsfeld-Hausen. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm.

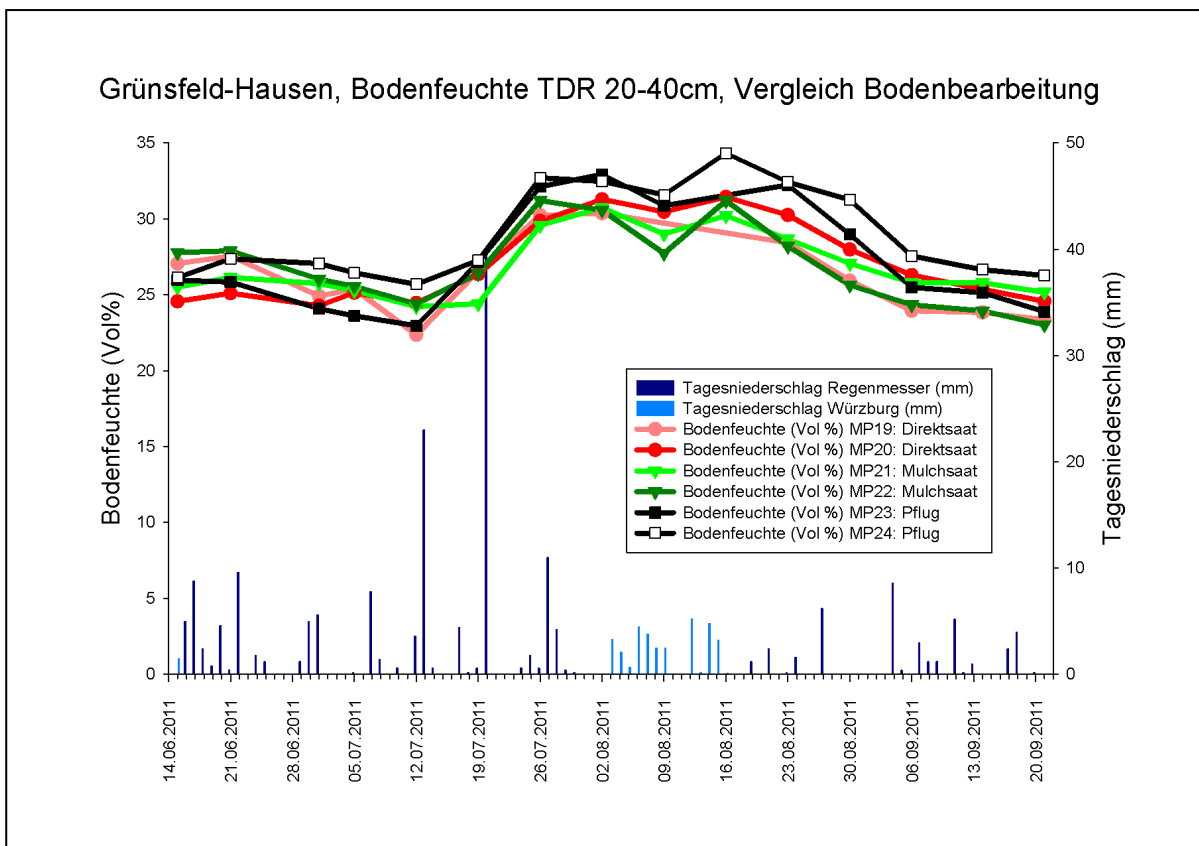


Abb. 57: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Grünsfeld-Hausen. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm.

Standort Neresheim-Dossingen

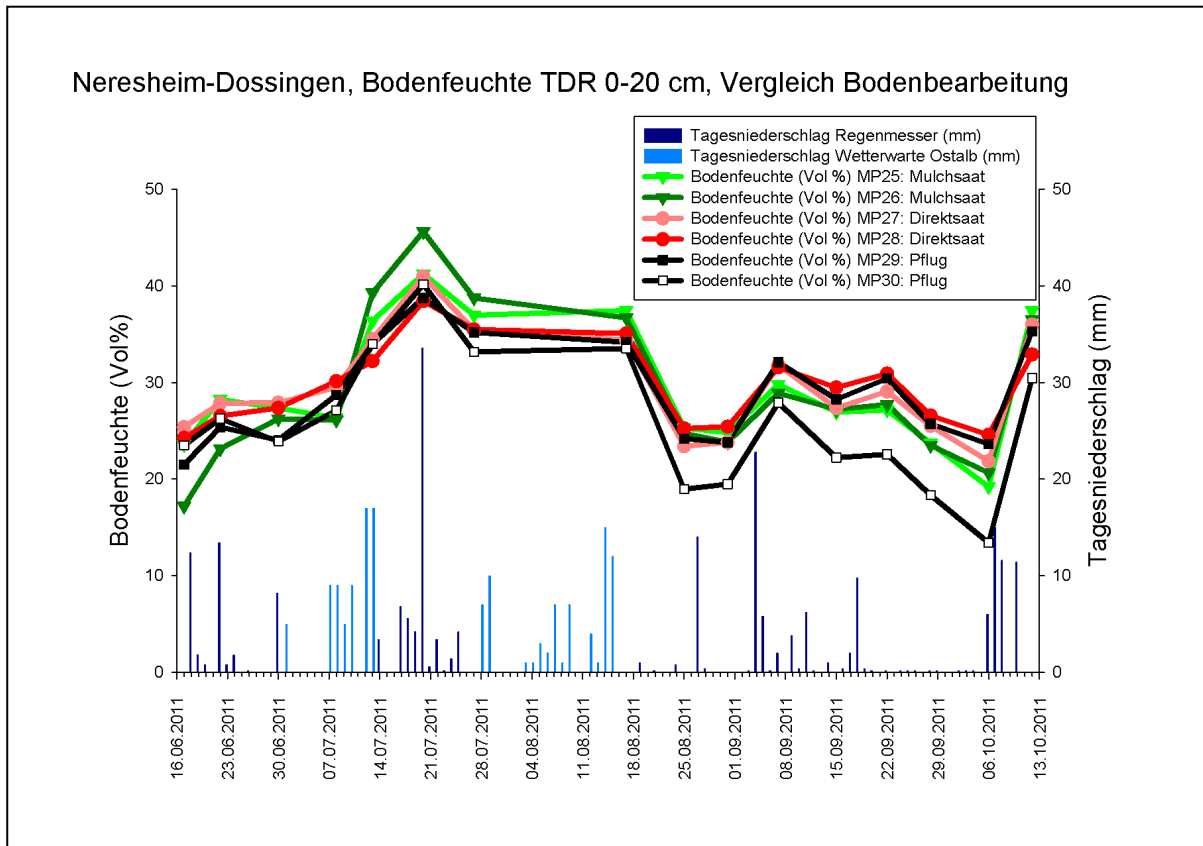


Abb. 58: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Neresheim-Dossingen. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm.

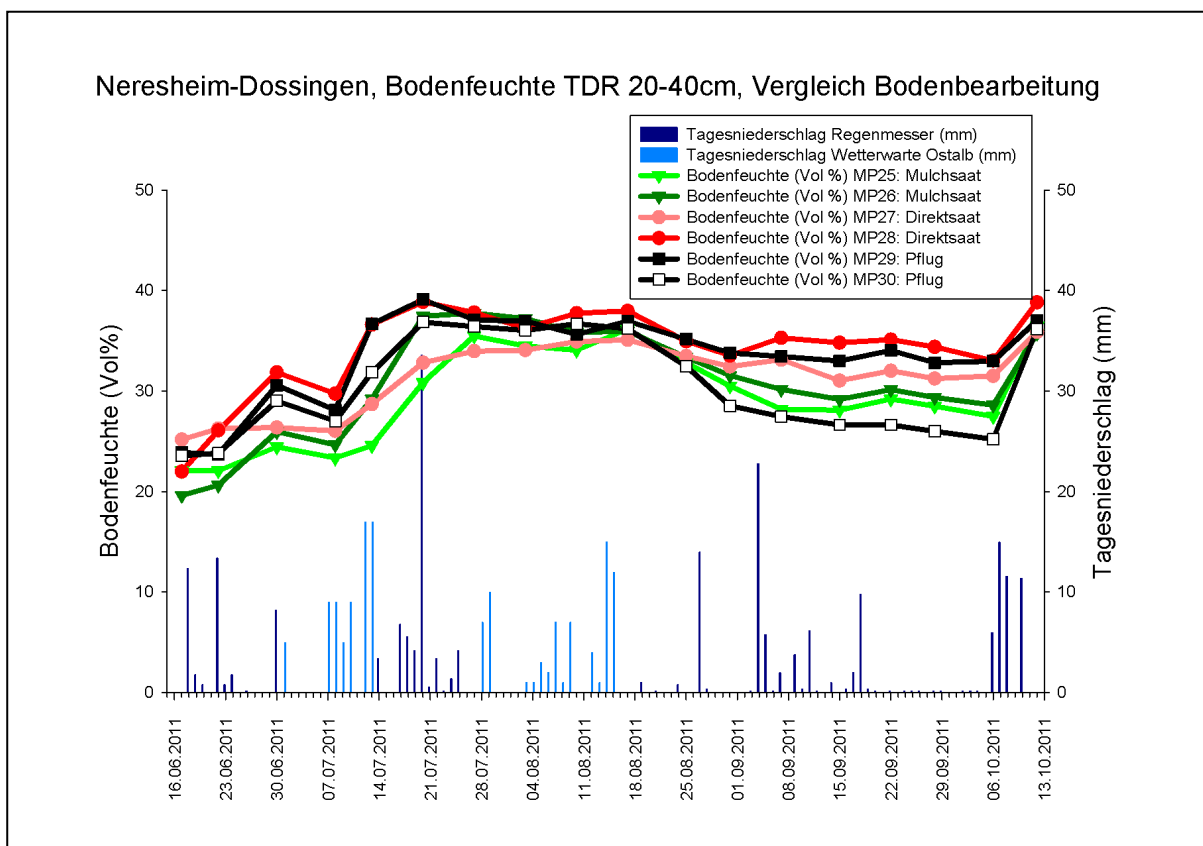


Abb. 59: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Neresheim-Dossingen. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm.

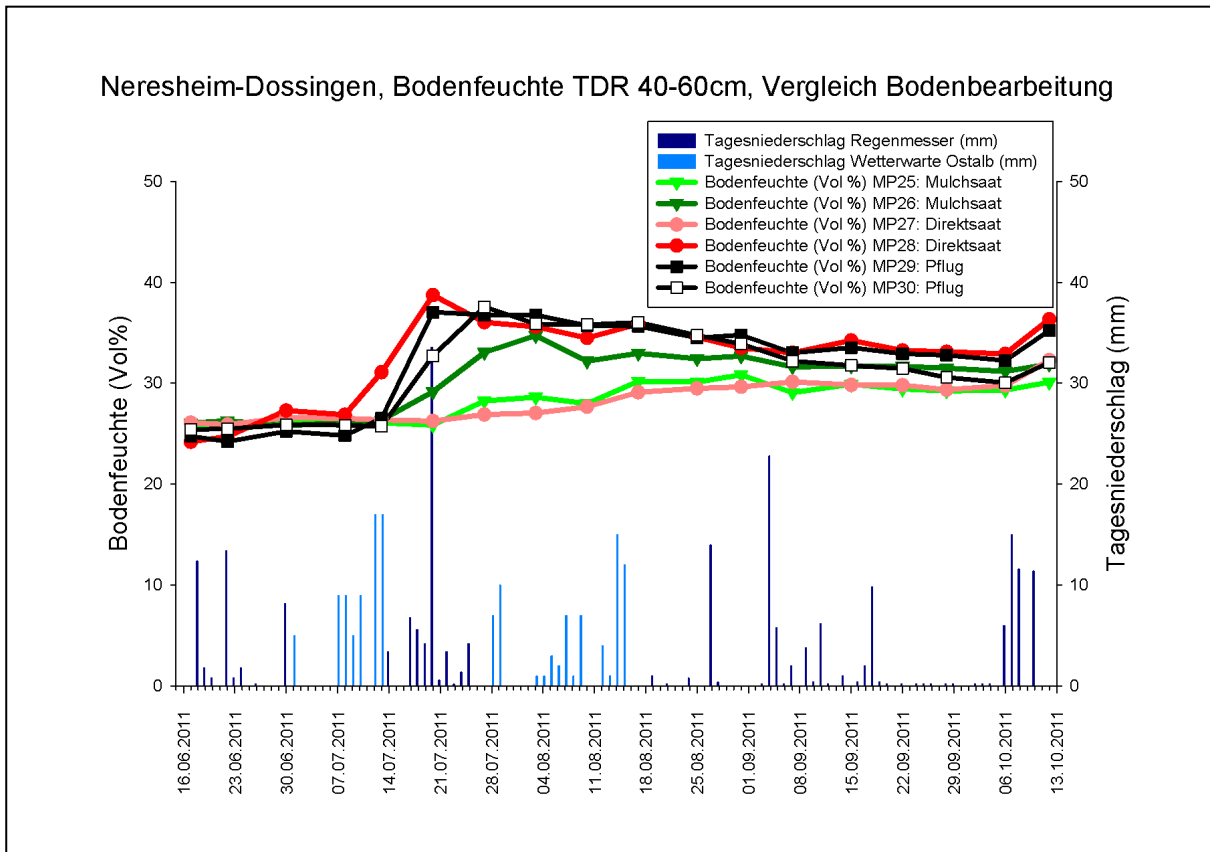


Abb. 60: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Neresheim-Dossingen. Mobile TDR-Sonden, 40-60 cm.

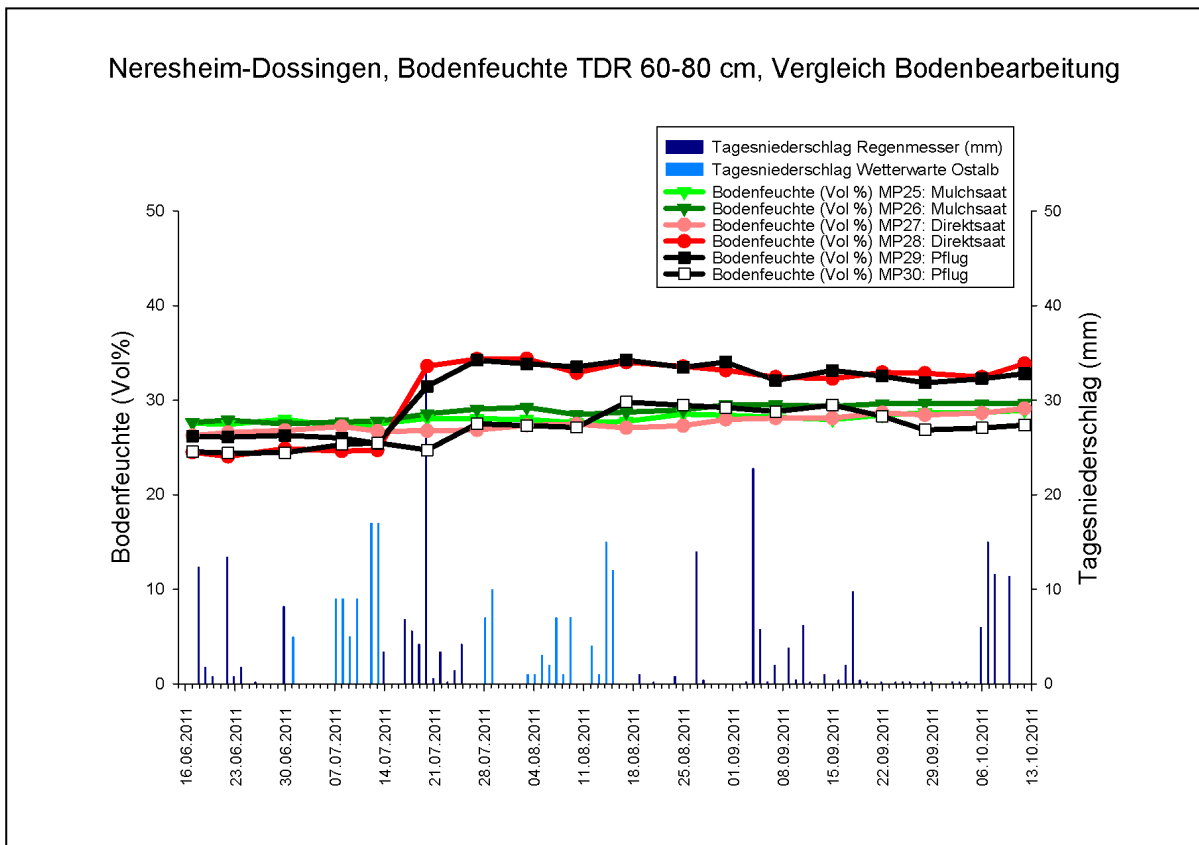


Abb. 61: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Neresheim-Dossingen. Mobile TDR-Sonden, 60-80 cm.

Standort Biberach

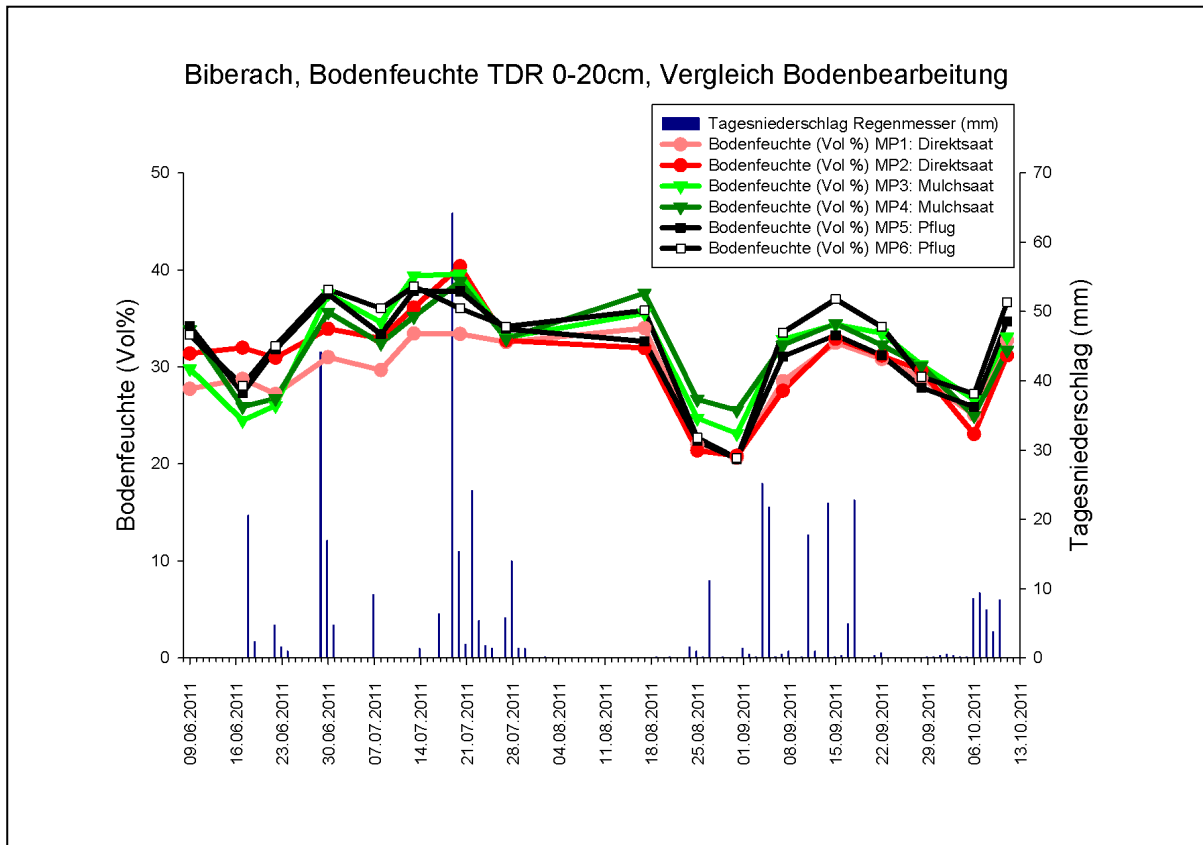


Abb. 62: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Mobile TDR-Sonden, 0-20 cm.

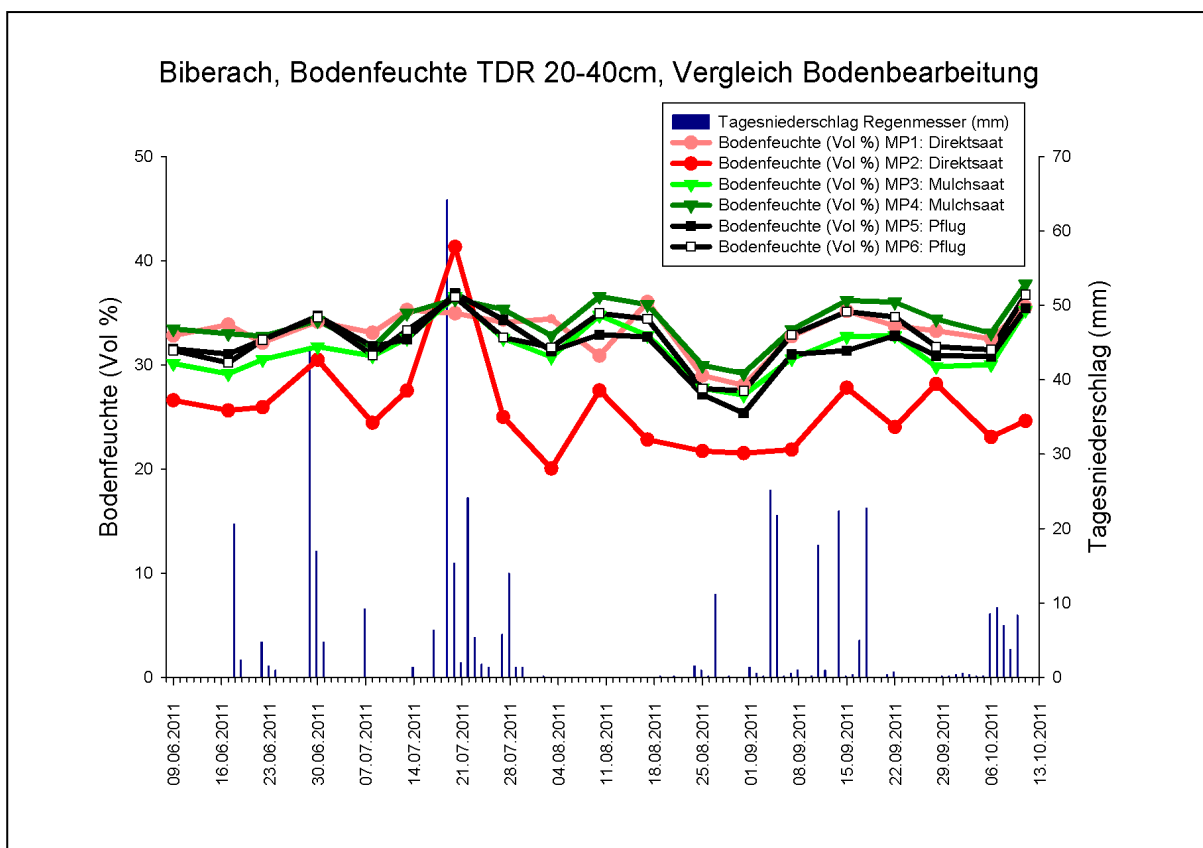


Abb. 63: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Mobile TDR-Sonden, 20-40 cm.

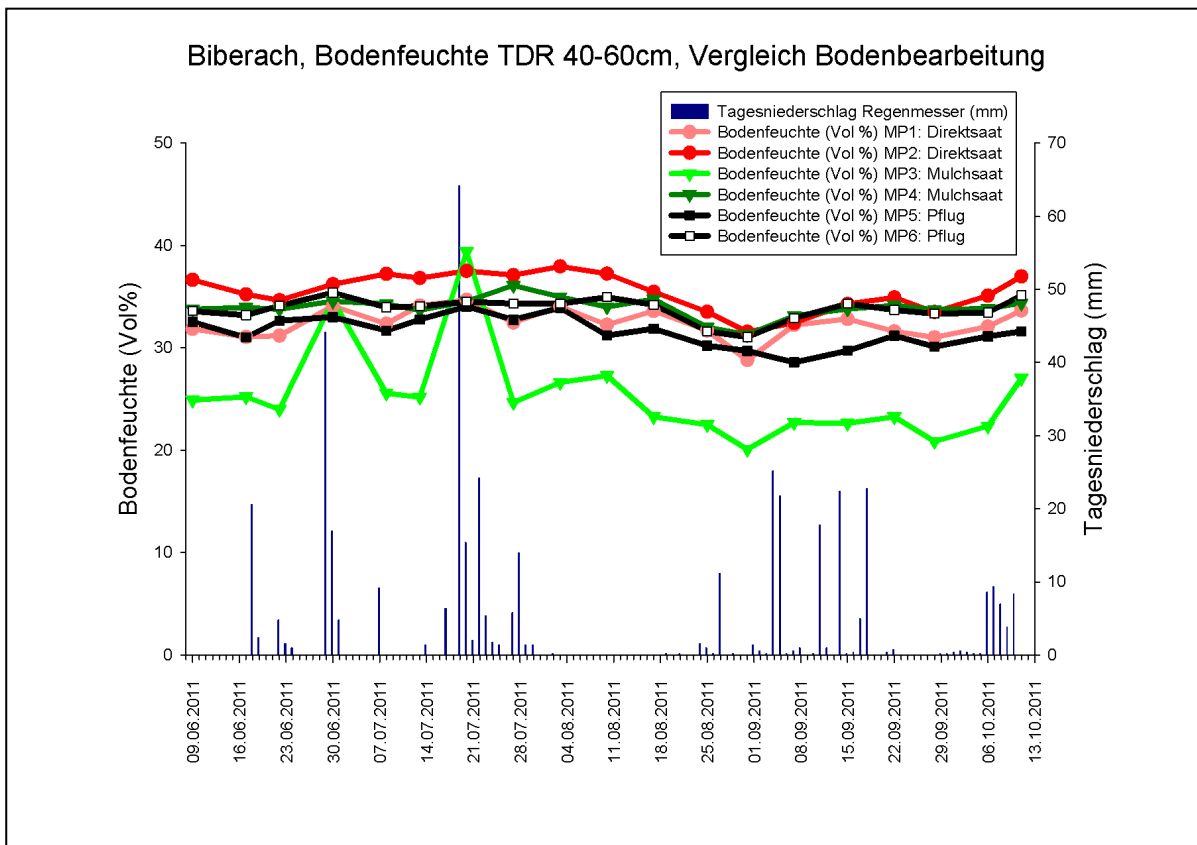


Abb. 64: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Mobile TDR-Sonden, 40-60 cm.

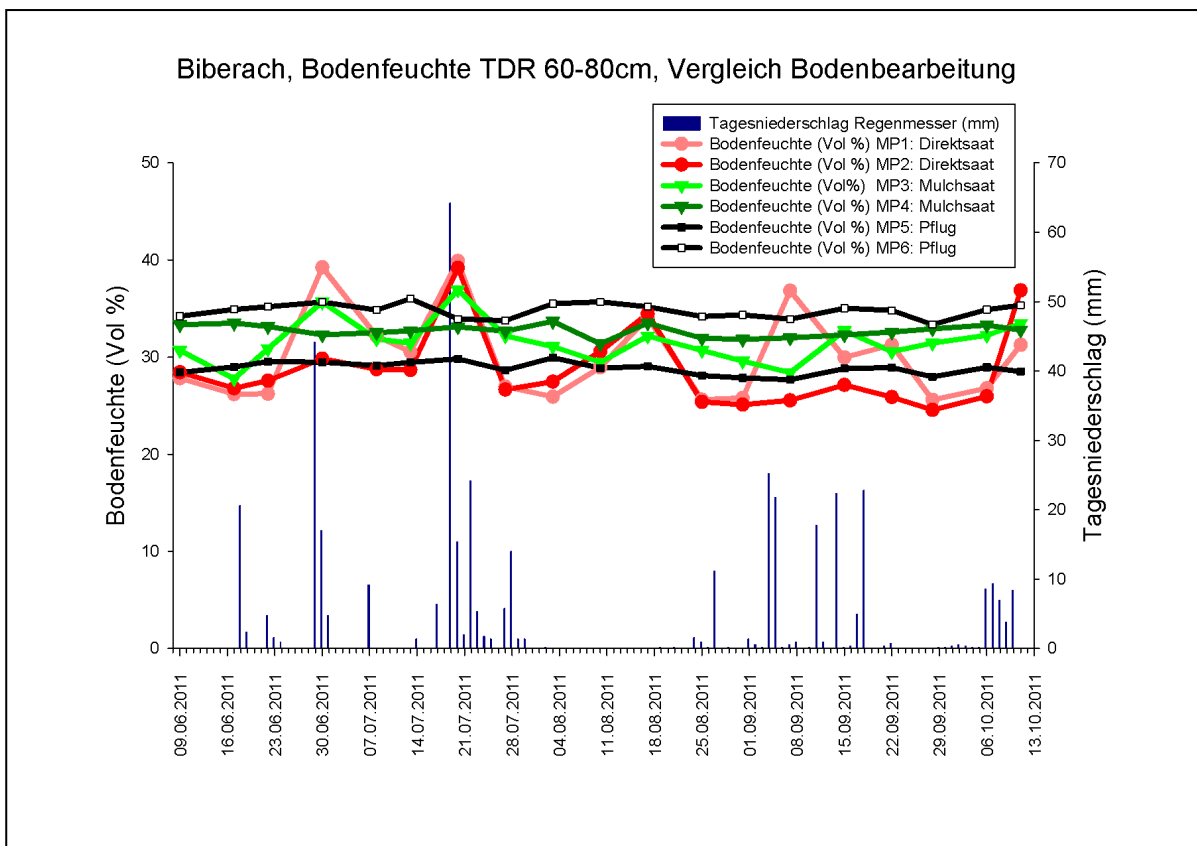


Abb. 65: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Mobile TDR-Sonden, 60-80 cm.

Weder in Neresheim-Dossingen (Abb. 58-61) noch in Grünsfeld-Hausen (Abb. 56-57) sind gesicherte Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren zu erkennen.

Bezüglich des Faktors Bodenbearbeitung sind am Standort Biberach *ad hoc* keine klaren Tendenzen in der Bodenfeuchte ableitbar (Abb. 62-65). Während in den oberen 20 cm die Messreihen relativ gleichförmig verlaufen, gibt es in den anderen Bodenschichten immer wieder Messreihen, die mit heftigen Amplitudenschwankungen auf die Niederschlagsituation reagieren (Direktsaat MP2, 20-40 und 60-80 cm; Direktsaat MP1, 60-80 cm und Mulchsaat MP3, 40-60 cm).

3.7.2 VERGLEICH DER FDR-MESSWERTE ZWISCHEN DEN BODENBEARBEITUNGSVERFAHREN

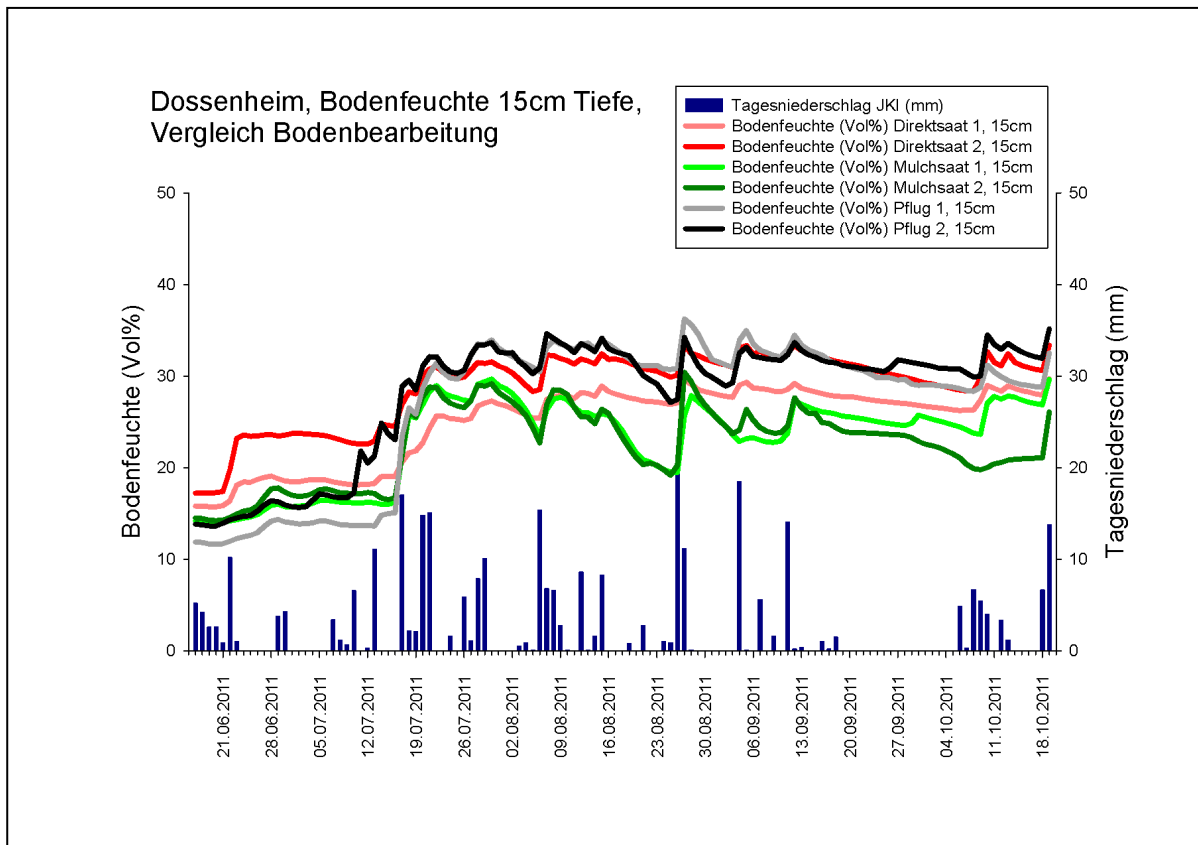


Abb. 66: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Stationäre FDR-Sonden, 15 cm

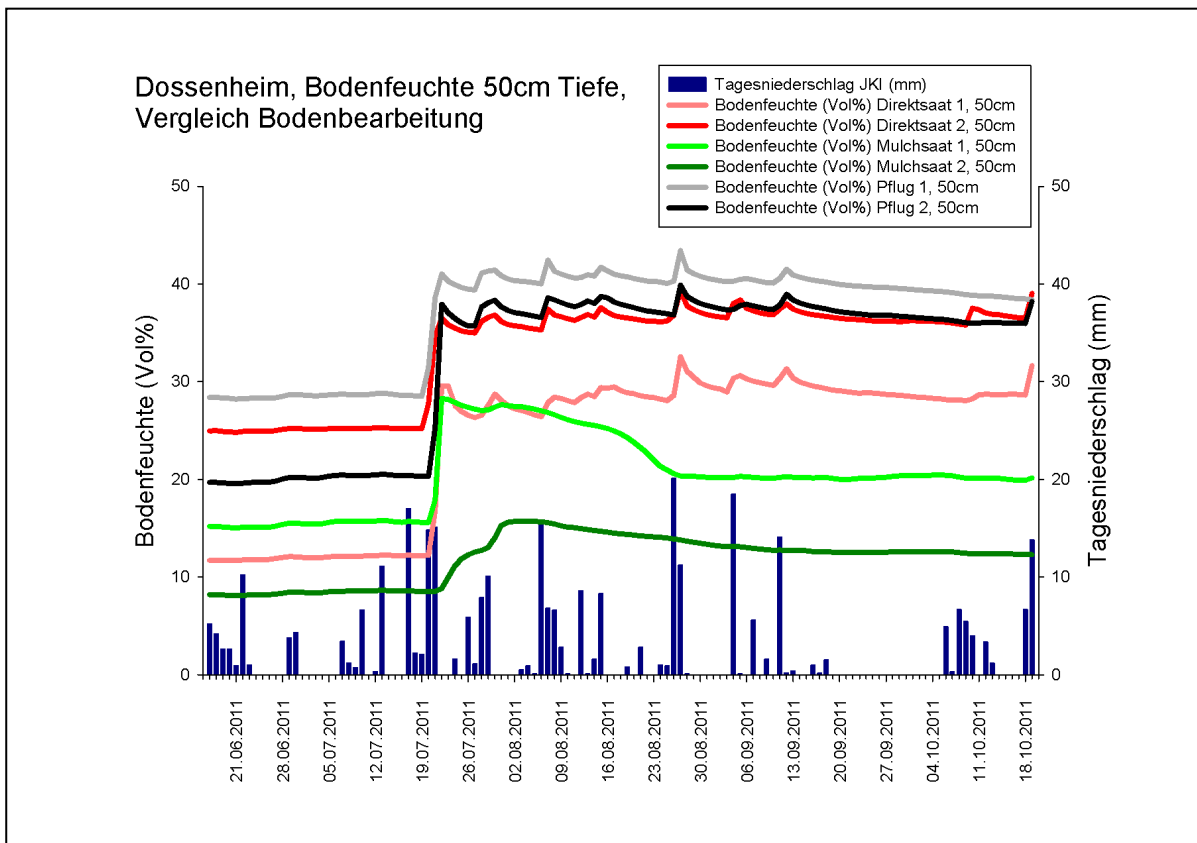


Abb. 67: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Dossenheim. Stationäre FDR-Sonden, 50 cm

In der Tendenz zeigt sich in Dossenheim auch bei dieser Analyse derselbe Befund wie beim Vergleich der TDR-Werte in den meisten Tiefenstufen (Abb. 48 und 50): Direktsaat- und Pflugvarianten sind nicht wirklich unterscheidbar. Bei den FDR-Sonden liegen die Direktsaatparzellen zu Anfang der Messkampagne noch über den Pflugflächen; dies ist in den TDR-Messungen in entsprechender Tiefe so nicht festzustellen. In 50 cm Tiefe zeigt hier eine Messreihe der Direktsaat geringere Bodenfeuchten an, bei den TDR-Sonden ist es eine der Pflug-Messreihen. Generell geben die FDR-Messreihen durch die häufige Messfrequenz die Reaktion der Bodenfeuchte in höherer Auflösung wieder.

Am Standort Biberach ist in den FDR-Messreihen kein signifikanter Unterschied in der Bodenfeuchte zu detektieren (Abb. 68 und 69). Die Messreihen auf den Mulchsaatparzellen verlaufen gleichsinnig im Gegensatz zur TDR-Messreihe (Abb. 62 und 64). Der dortige Messpunkt Nr. 3 muss wohl eher als Ausreißer betrachtet werden, der die Situation nicht repräsentativ widerspiegelt.

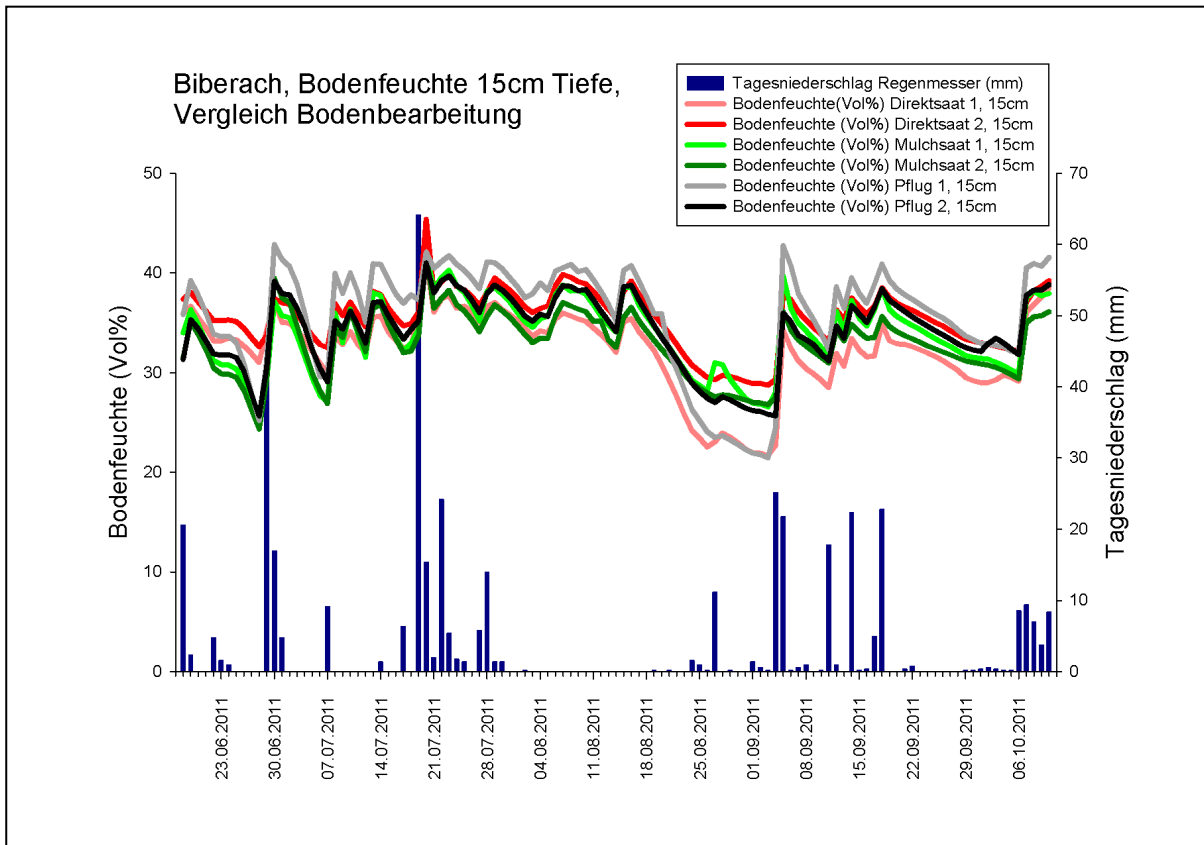


Abb. 68: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Stationäre FDR-Sonden, 15 cm

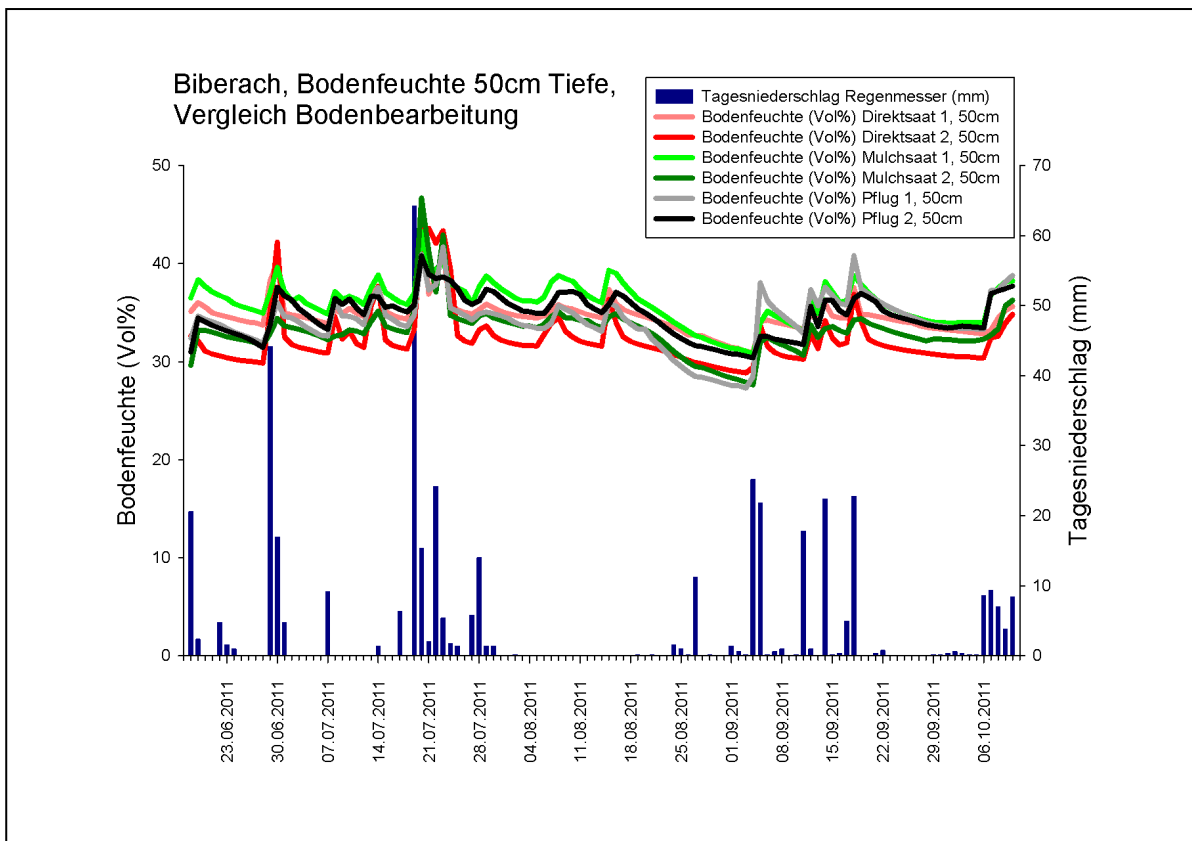


Abb. 69: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenfeuchte am Standort Biberach. Stationäre FDR-Sonden, 50 cm

3.8 Wasservorrat des Solums

Man kann aus den Bodenfeuchte-Werten in verschiedenen Bodentiefen den jeweiligen Wasservorrat, in diesem Fall (TDR-Sonden) bis in 80 cm Tiefe, errechnen. Gemessen wurde die volumetrische Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen bis 80 cm herunter. Dazu folgende Beispielrechnung:

Mit der TDR-Sonde integriert man immer über ca. 20 cm. Gesetzt den Fall, man misst folgende Werte:

0-20 cm: 25%, 20-40 cm: 30%, 40-60 cm: 30%, 60-80 cm: 25%,

dann heißt das für die oberen 20 cm, dass 25% des Volumens Wasser sind. Bei einem Quadratmeter und 10 cm Tiefe (entsprechend 100 dm^3 oder 100 Liter Boden) sind das 25 Liter Wasser auf 1 m^2 oder, wie häufig mit Bezug auf 1 m^2 angegeben, 25 mm, bei einer Bodenschicht von 20 cm sind es 50 mm. Aufsummiert auf 80 cm ergibt das im obigen Beispiel 220 mm.

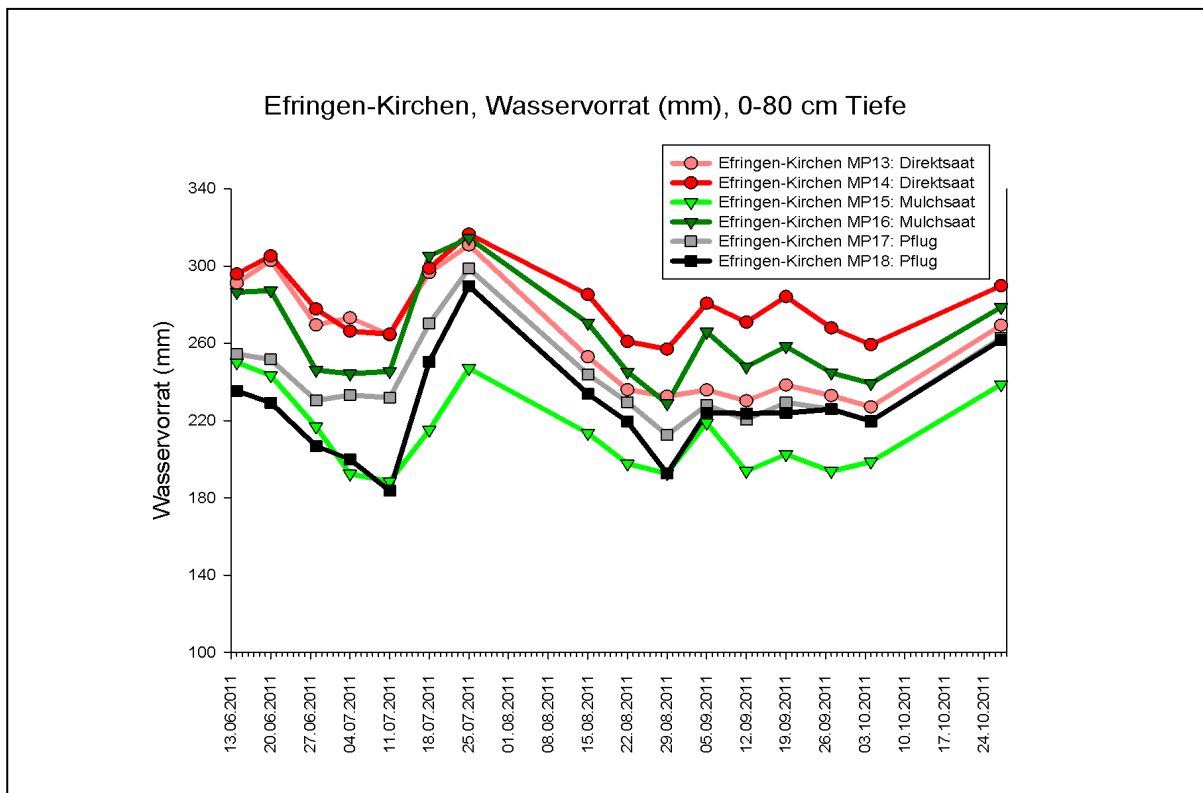


Abb. 70: Wasservorrat des Bodens; berechnet aus Bodenfeuchte-Werten der TDR-Sonden bis 80 cm Tiefe am Standort Efringen-Kirchen, Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

Man sieht zwar (Abb. 70-74), dass sich die Standorte in ihrem Wasservorrat unterscheiden. Ansonsten sind jedoch Unterschiede zwischen den Bearbeitungsverfahren schwer festzustellen. Dies gilt insbesondere für die niederschlagsreicheren Standorte wie Neresheim-Dossingen oder Biberach, aber auch für die flachgründigen Felder von Grünsfeld-Hausen. Die wärmeren, niederschlagsärmeren Standorte von Dossenheim und Efringen-Kirchen sind besser ausdifferenziert, ein klares Bild lässt sich dennoch nicht gewinnen. Feststellbar ist, dass die Direktsaat mit den Pflugvarianten hinsichtlich der Bodenfeuchte zumindest mithalten kann. In Dossenheim fehlt leider ab Ende Juli der oberste Horizont einer Pflugvariante für eine durchgehende Berechnung. In Efringen-Kirchen könnte die Direktsaat über das gesamt Solum hinweg etwas mehr Wasser zur Verfügung stellen als die Pflugflächen, signifikant ist dies jedoch nicht. Eine Beurteilung der Mulchsaatvarianten ist noch schwieriger: Im Falle Dossenheims macht die Inhomogenität der Parzellen eine Interpretation schwierig, in Efringen-Kirchen liegen die beiden Mulchsaat-Wertereihen ebenfalls relativ weit auseinander.

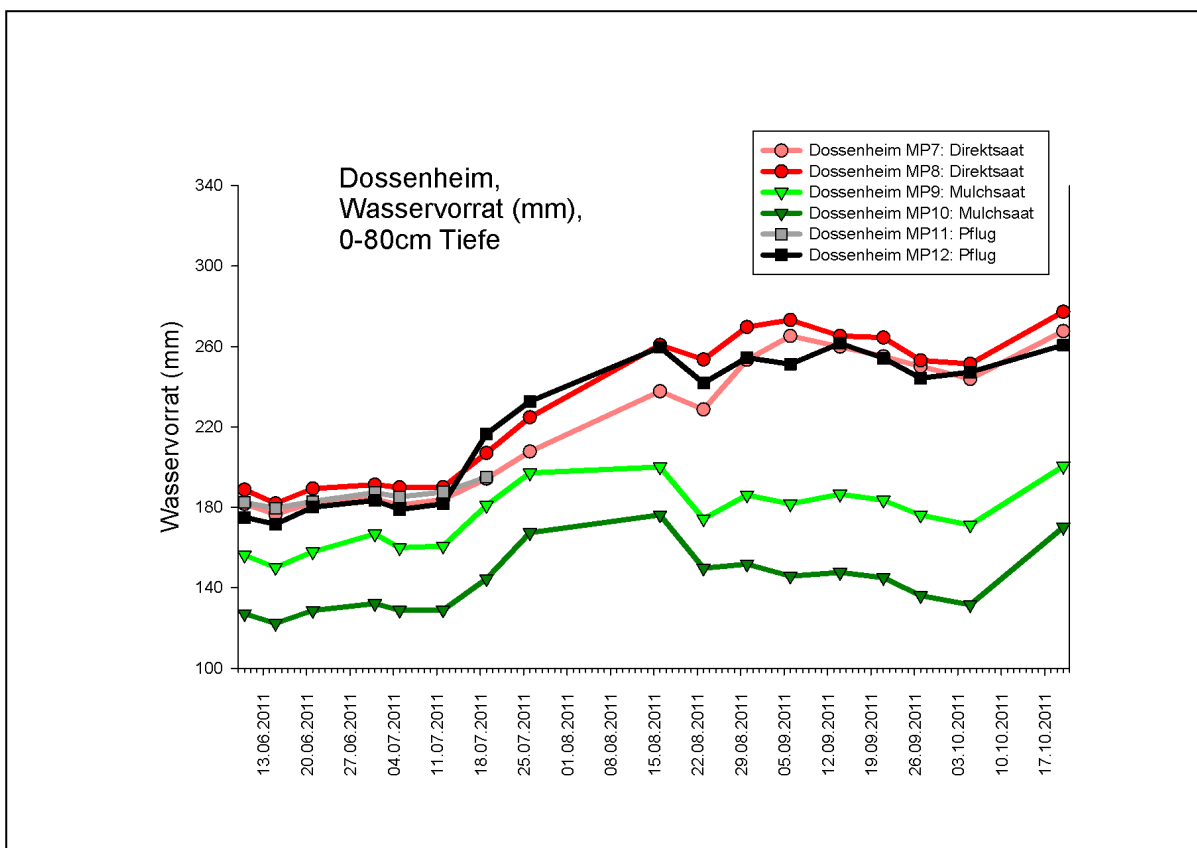


Abb. 71: Wasservorrat des Bodens; berechnet aus Bodenfeuchte-Werten der TDR-Sonden bis 80 cm Tiefe am Standort Dossenheim, Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

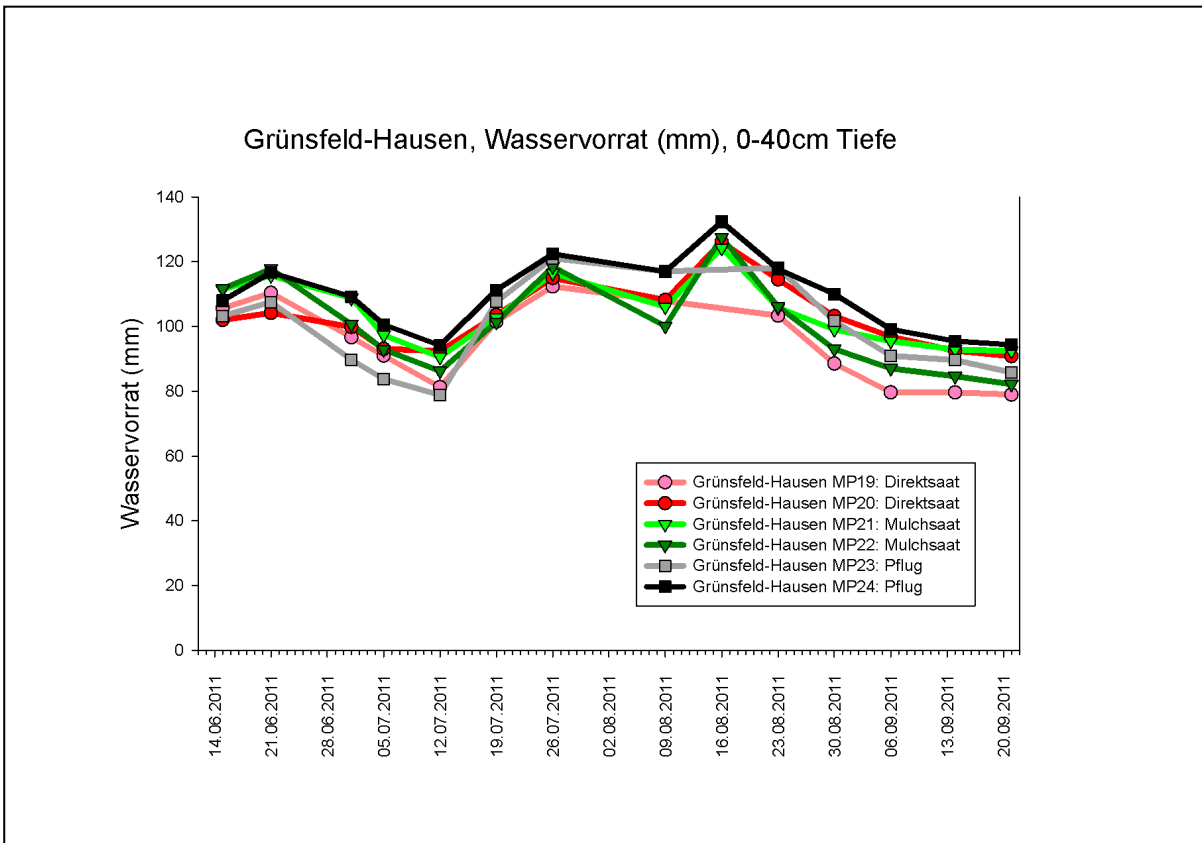


Abb. 72: Wasservorrat des Bodens; berechnet aus Bodenfeuchte-Werten der TDR-Sonden bis 40 cm Tiefe am Standort Grünfeld-Hausen, Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

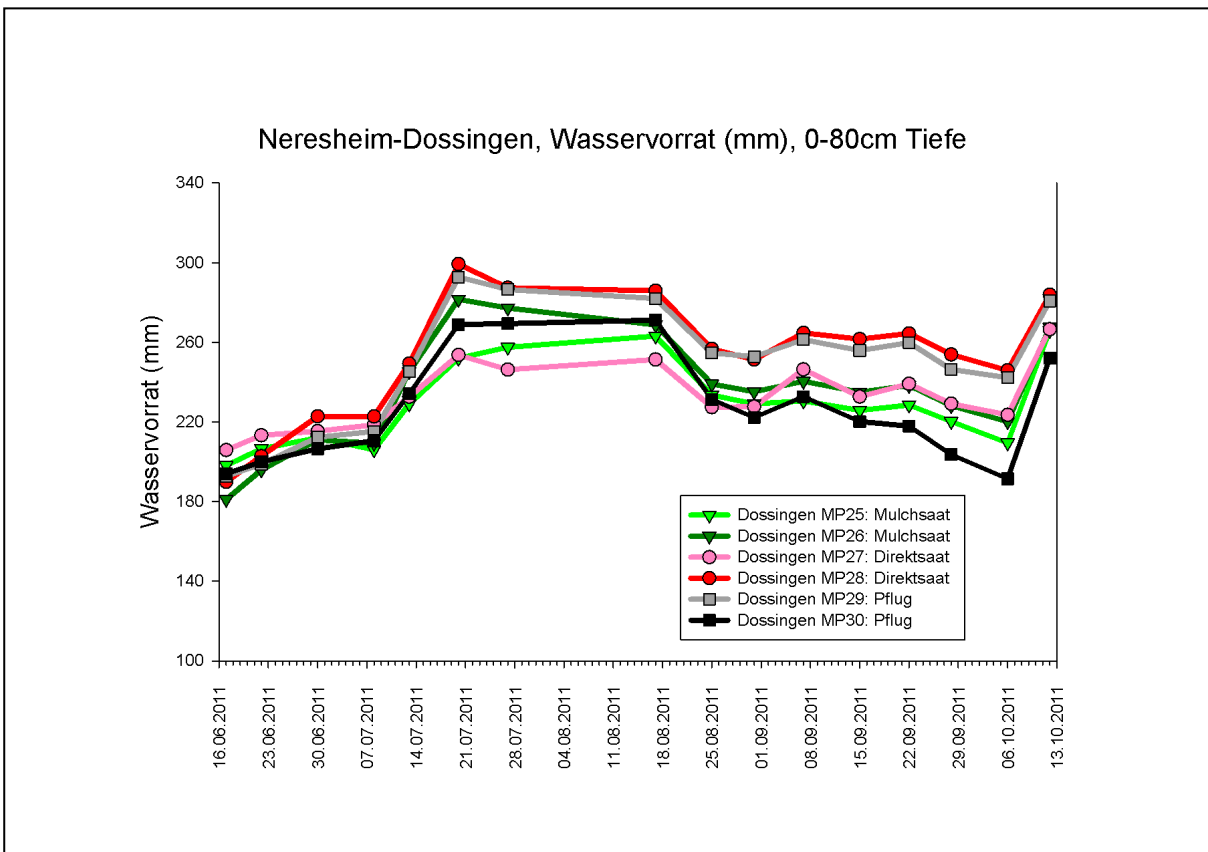


Abb. 73: Wasservorrat des Bodens; berechnet aus Bodenfeuchte-Werten der TDR-Sonden bis 80 cm Tiefe am Standort Neresheim-Dossingen, Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

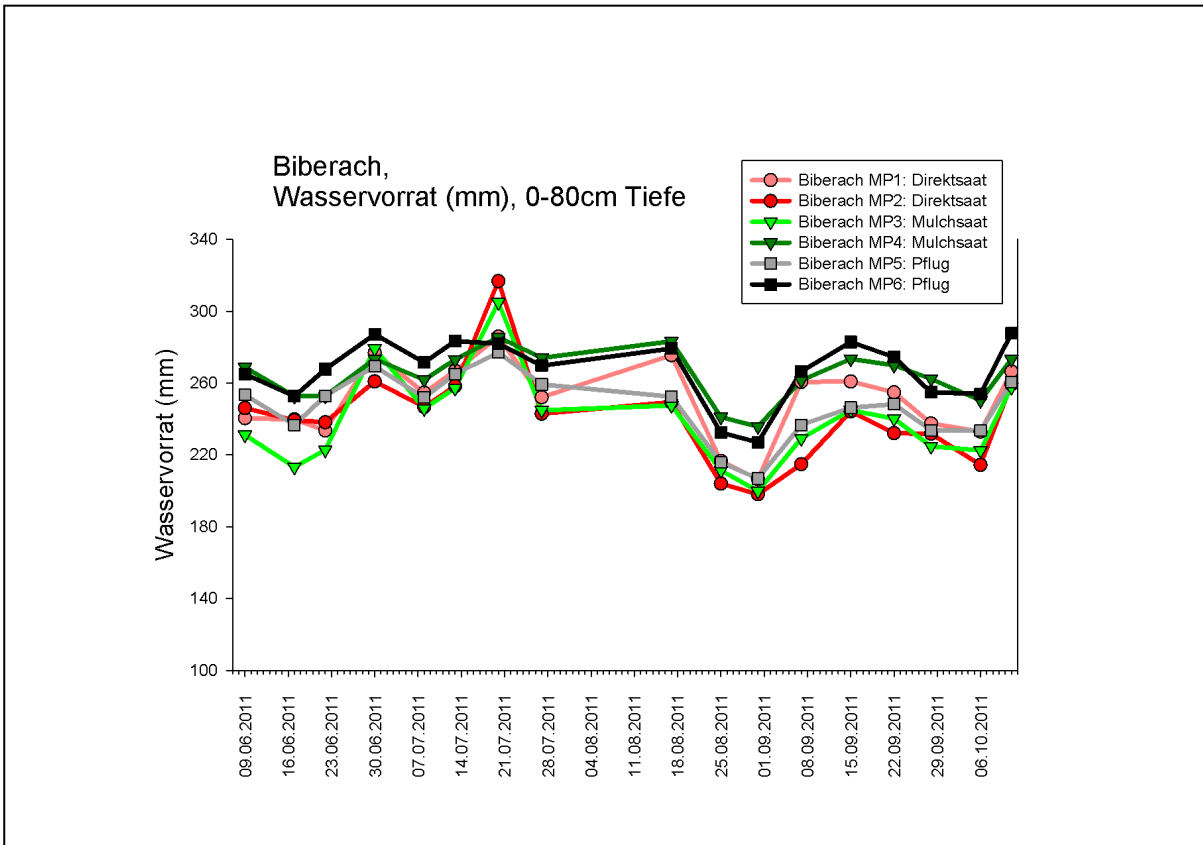


Abb. 74: Wasservorrat des Bodens; berechnet aus Bodenfeuchte-Werten der TDR-Sonden bis 80 cm Tiefe am Standort Biberach, Vergleich der Bodenbearbeitungsverfahren

4 Diskussion und Ausblick

4.1 Die Ergebnisse im Lichte von Messmethodik, Standortfaktoren und Pflanzenentwicklung

Am leichtesten lässt sich die Frage nach der Eignung der verwendeten Sonden beantworten: Beide Sondentypen, nach TDR- und FDR-Prinzip, können die Bodenfeuchte adäquat messen. Restriktionen bestehen, wenn dichter Bodenschluss nicht gewährleistet ist. Das kann dann der Fall sein, wenn die Störungen durch den Einbau sich noch nicht gesetzt haben, wenn sich größere Steine am Röhrenrand befinden oder Röhren und Sonden auf größere Poren oder gar Hohlräume stoßen. Beide Sonden sind in ihren Ergebnissen durchaus vergleichbar (SCHERZER et al. 1996), das hat diese Untersuchung bestätigt.

Mit einer mobilen TDR-Sonde lässt sich in den dazu gehörigen Röhren ein umfangreiches Tiefenprofil messen. Die Störung des Lagerungsgefüges des Bodens ist begrenzt. Das Einbringen und vor allem die Bergung der Röhren ist jedoch vor allem bei lehmigen und tonigen oder steinigen Böden schwierig. Die Messhäufigkeit der verwendeten Sonde ist von der Anwesenheit einer messenden Person abhängig. Die stationäre FDR-Sonde ermöglicht über die Loggerspeicherung der Messdaten eine kontinuierliche Messung, der Einbau hingegen ist mit Störungen der Umgebung und des Lagerungsgefüges durch Graben in unmittelbarer Umgebung der Messregion verbunden. Außerdem liefert eine Sonde nur Daten aus einer bestimmten Tiefe.

Insgesamt ergibt sich auf die Frage, ob eine unterschiedliche Bodenbearbeitung sich auf die Bodenfeuchte in messbarer Weise auswirkt, leider kein eindeutiges Ergebnis.

Die Messperiode fing Anfang Juni 2011 an, bald darauf fielen die ersten nennenswerten Niederschläge seit Monaten. Insofern wurde die ausgedehnteste Trockenperiode des Jahres 2011 messtechnisch „verpasst“. Im Laufe des Sommers fielen immer wieder Niederschläge. Insofern ist es nicht überraschend, dass sich an den niederschlagsreicheren und kühleren Standorten keine signifikanten Unterschiede messen ließen (Biberach, Neresheim-Dossingen). Der Standort in Grünsfeld-Hausen erhielt zwar die wenigsten Niederschläge während der Messperiode. Möglicherweise ist das Solum jedoch nicht tiefgründig genug, um Unterschiede messbar werden zu lassen. Hinzu kommt, dass die Direktsaatparzellen dieser Standorte seit mehreren Jahren oberflächlich bearbeitet werden (Kap. 2.1) und damit den Mulchsaatvarianten näher gekommen sind.

Lediglich die wärmeren und trockeneren Standorte in Dossenheim und Efringen-Kirchen zeigten Ansätze einer Differenzierung der Bodenfeuchte zwischen den Bearbeitungsverfahren, allerdings ergab sich auch hier kein einheitliches Bild.

Die Bodenart spielt vermutlich nicht die dominierende Rolle. Zum einen unterscheidet sich die Bodenart zwischen den Bearbeitungsvarianten eines Standorts kaum. Wenn, dann handelt es sich in der Regel um höhere Humusanteile im Oberboden der konservativ bearbeiteten Böden (Kap. 6.1). Zum andern weisen die meisten Standorte in diesem Versuch eher schluffig-lehmige Böden auf. Die Spannweite reicht von hohem Tongehalt in Grünsfeld-Hausen bis zu sandig-schluffigen Anteilen wie in Biberach. Vermutlich ist das Klima der wesentlichere Faktor, modifiziert von Unterschieden in der Bodenart. Von den beiden warmen Standorten besitzt Dossenheim mehr Tonanteile, Efringen-Kirchen einen höheren Humusgehalt. Ein hoher

Humusgehalt wiederum ist gut für die Wasserspeicherkapazität, während ein hoher Tonanteil die nutzbare Feldkapazität eher senkt. Die Bodenfeuchtwerte geben diese Unterschiede durchaus wieder.

Zu beachten ist, dass sich der Entwicklungsstand der Kulturen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten unterscheiden kann. Oft entwickeln sich die Kulturen auf den Direktsaatflächen langsamer als auf den Mulchsaat- und Pflugflächen. Dies war auf den Maisparzellen in Biberach und Efringen-Kirchen auch in diesem Versuch gut zu beobachten. Die Gründe liegen wahrscheinlich zum einen in der langsameren Bodenwärmung im Frühjahr, weil die liegendegebliebenen helleren Pflanzenreste weniger Sonnenstrahlung absorbieren als dunkler Boden. In wassergesättigtem Zustand halten die dichter gelagerten, konservierend bearbeiteten Böden das Wasser auch länger an der Oberfläche als gepflügte Böden, was das Abtrocknen verzögert (RASMUSSEN 1999). Zum anderen ist der Aufgang bei Direktsaat oft schlechter, so dass dann weniger Einzelpflanzen pro Fläche stehen können als bei den anderen Varianten; entsprechend geringer wäre die Transpirationsintensität anzusetzen (SCHMIDT et al. o.J.). Im Laufe der Vegetationsperiode holen die Pflanzen der Direktsaat den Erfahrungen der Betreuer zufolge den Entwicklungsrückstand allerdings zumeist wieder auf. Sollte die Bodenfeuchte bei Direktsaat gerade in der Anfangsphase der Pflanzenentwicklung daher höher sein als bei den anderen Varianten, so könnte das auch daran liegen, dass weniger transpiert und damit – durchaus bis zu den unteren Bodenschichten – weniger Bodenwasser verbraucht wird.

Allerdings zeigt der Vergleich der Bearbeitungsvarianten einen solchen Befund, wenn überhaupt, dann nur am Standort Efringen-Kirchen unter Körnermais in den oberen 40 cm. Dieser Befund wirkt sich bis in den berechneten Wasservorrat aus. In Dossenheim war ein solcher Effekt lediglich bei den FDR-Messungen in der oberen Bodenschicht zu Beginn zu beobachten, steht aber unter dem Vorbehalt, dass möglicherweise die Äquilibrationphase nach dem Einbau noch nicht beendet war. (Abb. 66). Bei den TDR-Messungen ist dieser Effekt höchstens in den unteren Bodenschichten (TDR 60-80 cm, Abb. 51) zu beobachten, wirkt sich jedoch nicht auf den Wasservorrat insgesamt aus (Abb. 71). Außerdem wurde der Winterweizen bereits Anfang Juli abgeerntet, so dass Effekte potentiell unterschiedlicher Entwicklungsgeschwindigkeiten hier zumindest direkt nicht mehr wirksam werden konnten.

4.2 Die Ergebnisse im Spiegel der Literatur

Ein Blick auf andere langjährige Versuche mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodenfeuchtemessungen zeigt, dass es durchaus Untersuchungen gibt, die ebenfalls keine Unterschiede zwischen Pflug und Direktsaat fanden (z.B. CHANG und LINDWALL 1992, in Kanada nach acht Jahren Versuchsdauer) oder kaum Differenzen in der Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers zwischen Pflug und Mulchsaat entdecken konnten (VERCH et al. 2004, in Brandenburg nach 18 Jahren). Ausreichende und üppige Niederschläge während der Untersuchungsperiode mögen die Ausdifferenzierung von Unterschieden in den Bearbeitungsvarianten nicht nur in unserem Versuch verhindert haben (Verein für konservierende Bodenbearbeitung Direktsaat in Sachsen 2010). Bei der Mehrzahl der analysierten Arbeiten jedoch konnten Bodenfeuchteunterschiede mit Vorteilen für konservierende Bodenbearbeitung konstatiert werden.

In einem seit 1996 laufenden Bodenbearbeitungsversuch (Pflug, flacher Grubber, Direktsaat) auf einem Schwarzerdeboden des Marchfelds in Österreich wurde von August 2008 bis April 2009 mittels FDR-Sonden die Bodenfeuchte gemessen. Die Werte der Direktsaat lagen in den oberen Horizonten deutlich über den anderen beiden Varianten (BODNER et al. 2009). Erst mit zunehmender Abtrocknung im Frühjahr glich

sich der Wassergehalt aller Varianten an. Die Ergebnisse aus Efringen-Kirchen in unserem Versuch kämen diesen Resultaten noch am nächsten. In unserem Versuch wurde freilich erst ab Juni bis Oktober gemessen. Der Vorteil der Direktsaat gilt auch für die nutzbare Feldkapazität bis in 40 cm Tiefe (SCHOLL et al. 2010). Als Gründe werden die höhere Anzahl an Mittelporen, höhere Humusgehalte im Oberboden und eine größere Porenkontinuität angegeben. Nimmt man die tieferen Bodenschichten bis 90 cm hinzu, so bestand kein Unterschied mehr zwischen der nutzbaren Feldkapazität der Varianten. Mit einem Simulationsmodell konnte gezeigt werden, dass die gemessenen höheren Bodenwassergehalte in der Direktsaat vor allem eine Funktion der Mulchdecke sind. Unter sonst gleichen Voraussetzungen konnte die Direktsaat in der Simulation nur im Fall einer Mulchdecke höhere Erträge als die anderen beiden Varianten erzielen. Wäre die Mulchauflage nicht vorhanden, so würden die Erträge der reduzierten Bearbeitungsvarianten wegen der höheren Bodenevaporation auf ein Ertragsniveau unter jenem der Variante Pflug absinken. Aufgrund des höchsten Mulch-Bedeckungsgrades ist dieser Effekt der Mulchauflage bei Direktsaat am größten (SCHOLL et al. 2010).

Dass die Bedeutung der Auflage aus Stroh bzw. Ernteresten nicht unterschätzt werden darf, verdeutlichen auch die Resultate von SINGH et al. (1998): Als Hauptursache für die größere Bodenfeuchte (max. 8%) auf Direktsaatparzellen während der Vegetationsperiode wurde die Strohauflage benannt (9-10 Jahre Versuchsdauer, Direktsaat mit Strohauflage, flaches Pflügen (10 cm) mit oder ohne Strohauflage). Experimente mit verschiedenen Regenwurmarten in Bodensäulen zeigten, dass intensive und tief reichende Grabaktivitäten die Austrocknung des Bodens zumind. bis in 10 cm Tiefe sogar beschleunigen können, wenn sie mit hohen Streuverlusten gekoppelt sind (ERNST et al. 2009).

Die Arbeitsgruppe Geoökologie der Universität Halle-Wittenberg testete verschiedene Bodenbearbeitungsmethoden auf Versuchsfeldern in Leipzig und Barnstädt: Pflug, Grubber in zwei Tiefen, Scheibenegge und Direktsaat. Die Ergebnisse zeigten kein einheitliches Bild. Ein Vorteil konservierender Bearbeitungsverfahren war lediglich für die Phase der Körnerreife der Wintergerste 2008 in Leipzig (SCHMIDT 2009) bzw. 2009 in Barnstädt ableitbar und auch dort eher in Tiefen ab 40 cm.

Bereits frühere Untersuchungen des Instituts für Allgemeinen Pflanzenbau der Universität Halle-Wittenberg ergaben auf Löß-Schwarzerde in Bernburg nach acht Jahren Versuchsdauer nur geringfügig höhere Bodenwassergehalte bei Mulch- und Direktsaat gegenüber Pflug, allerdings im entsprechenden Artikel mit gravimetrischen Angaben ohne Berücksichtigung der Lagerungsdichte (BISCHOFF et al. 2005). Vermutlich im Jahr darauf wurden mittels FDR-Sonde bei wöchentlichen Messungen in verschiedenen Tiefen bis zu 1 m die höheren Wassergehalte sogar in der gepflügten Variante gefunden (DAMM et al. 2009). Bei der Berechnung der nutzbaren Feldkapazität zeigte sich, dass ab Mitte Juni unter Weizen lediglich in der Pflugvariante das pflanzenverfügbare Bodenwasser bis 1 m Tiefe noch nicht ganz aufgebraucht war. Die Argumentation ging dahin, dass auf den konservierend bearbeiteten Parzellen das Wasser für die Ertragsbildung ausgenutzt werden konnte, in der Pflugparzelle wegen Gefügeschäden an der Krumbasis und dadurch eingeschränkter Durchwurzelbarkeit hingegen nicht. In der Tat waren die Winterweizenerträge auf Mulch- und Direktsaatflächen höher als auf gepflügten Flächen (DAMM et al. 2009).

Im sächsischen Lößhügelland wurden unter Federführung der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft neben vielen anderen bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Parametern auch die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die Bodenfeuchte untersucht (SCHMIDT et al. o.J., THIEL 2002). Am Standort Lüttewitz kamen zum Einsatz: Pflug, Grubber (flach), Grubber (tief) und Direktsaat. Sieben Jahre nach Beginn der differenzierten Bodenbearbeitung wurden hier zwischen Mitte April 1999 und Ende Juli 2001 wöchentlich Bodenfeuchtedaten mit TDR-Sonden bis in 80 cm Tiefe ermittelt. Der Wassergehalt in

den nicht gepflügten Parzellen war in einem Großteil des Messzeitraumes höher als in der Variante Pflug. Dies gilt insbesondere für den Frühsommer 1999, den Sommer und Herbst 2000 und den Frühsommer 2001 und besonders für die obere Bodenschicht 0-30 cm. Nur auf den Pflugparzellen wurde in Trockenzeiten Feuchtwerte bis nahe an oder sogar unter den permanenten Welkepunkt erreicht. In tieferen Bodenschichten schwächte sich der Unterschied ab. Direktsaat hob sich nur insofern von den anderen konservierenden Verfahren ab, als eine Aufsättigung der Bodenfeuchte nach Niederschlägen manchmal am schnellsten erfolgte. Die Unterschiede werden auf mehrere Ursachen zurückgeführt, deren Anteil aber schwer zu quantifizieren ist: schlechterer Feldaufgang und damit geringerer Wasserentzug bei Direktsaat, Auftreten von Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen in der Pflugvariante und damit weniger Versickerung, Mulchbedeckung als „Transpirationsbremse“. Die nutzbare Feldkapazität wurde freilich für die Pflugvariante am höchsten eingeschätzt (THIEL 2002), auch die Erträge von Zuckerrüben und Winterweizen waren 1999-2001 in der Pflugvariante am höchsten (SCHMIDT et al. o.J.).

Ein umfassender Vergleich zwischen Direktsaat und Pflugverfahren wird seit 1994 auf der Dauerbeobachtungsfläche „Oberacker“ in Zollikofen (Kanton Bern) durchgeführt. Seit 1998 wird mittels TDR-Sonden dreimal wöchentlich die Bodenfeuchte in sieben Tiefen der tiefgründigen Braunerde erfasst (5, 20, 35, 50, 65, 80 und 95 cm). Im Mittel von sechs Versuchsjahren wurden im Laufe des Sommers die pflanzenverfügbaren Wasservorräte Mitte bis Ende Juni und wieder ab Mitte Juli bis Mitte August fast aufgebraucht. Die Direktsaatvariante trocknete nicht so tief aus, auch wurden die Vorräte nach Niederschlägen zum Teil schneller wieder aufgefüllt. Abgeleitet aus dem volumetrischen Wassergehalt und der Porenklassenverteilung wurde berechnet, dass bei Direktsaat das leicht pflanzenverfügbare Bodenwasser in den groben Mittelporen weniger oft aufgebraucht ist als beim Pflugverfahren. Dies gilt zumindest für die Tiefenstufe 10-15 cm; in 35-40 cm Tiefe war kaum ein Unterschied zu erkennen (CHERVET et al. 2006). Die Erträge sind vergleichbar; nach einigen Jahren differenzierter Bewirtschaftung zeigt die Direktsaat sogar Ertragsvorteile (CHERVET et al. 2005).

4.3 Erklärungsansätze für Unterschiede in Bodenwassergehalt und Ertrag

Aus den eigenen Versuchen und der Analyse der Literatur kristallisieren sich folgende Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Bodenfeuchte bei verschiedenartiger Bodenbearbeitung heraus:

- Vorhandensein einer Mulchdecke als Evaporationsschutz,
- Humusgehalt mit höheren Gehalten in den oberen Horizonten konservierend bearbeiteter Böden mit Auswirkungen auf die (nutzbare) Feldkapazität,
- Oberflächenabfluss mit höheren Werten auf Pflugflächen durch die Verschlammung der Bodenoberfläche mit entsprechend geringerer Versickerung,
- Porengrößenverteilung, insbesondere Anteil an Grob- und Mittelporen mit Auswirkungen auf die nutzbare Feldkapazität,
- Kontinuität von Grobporen im Verlauf des Bodenprofils mit Auswirkungen auf die Erschließung der Wasservorräte im Unterboden,
- Vorhandensein und Entwicklungsstadium einer Kultur mit Auswirkungen auf Durchwurzelung und Transpirationsintensität.

Ohnehin stellt sich die Frage, wie der Befund „höhere Bodenfeuchte in einer bestimmten Bodentiefe“ zu beurteilen ist. Mehr Wasser im Boden kann prinzipiell bedeuten, es ist mehr Wasser hineingelangt oder es ist weniger Wasser hinausgelangt. So kann „mehr Wasser“ auch bedeuten, dass es nicht genutzt werden konnte, ist also nicht *per se* als Vorteil zu werten. Unsere und die aus der Literatur analysierten Versuche lassen zwei Fallgruppen erkennen: mehr Wasser im Unterboden (40-80 cm und tiefer) oder mehr Wasser im Oberboden (0-40 cm) bei einem bestimmten Bearbeitungsverfahren.

Was kann beispielsweise das Ergebnis „mehr Wasser im Unterboden bei Direktsaat als bei Pflug“ bedeuten? (Bei Mulchsaat sei der Einfachheit halber angenommen, sie verhalte sich intermediär bzw. eher ähnlich den Direktsaatverhältnissen).

1. Aufgrund kontinuierlicher Makroporen bei Direktsaat kann mehr Niederschlagswasser in tiefere Bodenschichten gelangen. Beim Pflug sind weniger durchgängige Makroporen vorhanden, eventuell besteht sogar eine Verdichtungszone, die das Vordringen der Versickerungsfront bzw. die Durchwurzelung tieferer Bodenschichten behindert. Im letzten Falle würde das Wasserangebot unter Pflug nicht vollständig ausgeschöpft werden können. In trockeneren Jahren wären Ertragsnachteile bei Pflug zu erwarten.
2. Die Mulchdecke der Direktsaat verhindert unproduktive Evaporation mit Auswirkungen bis in tiefere Bodenschichten. Dies könnte gerade zu Beginn der Wachstumsphase oder auf unbewachsenem Boden eine größere Rolle spielen.
3. Die Entwicklungsverzögerung bei Direktsaat führt zu geringerer Transpiration und lässt damit mehr Wasser im Boden. Auch dieser Effekt ist vermutlich zu Anfang der Wachstumsphase am größten, kann sich in tieferen Bodenschichten aber noch lange auswirken.
4. Stärkerer Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen führt zu geringerer Versickerung bei Pflug.

Was kann das Ergebnis „mehr Wasser im Oberboden bei Direktsaat als bei Pflug“ bedeuten?

1. Die Mulchdecke der Direktsaat verhindert unproduktive Evaporation. Dies könnte gerade zu Beginn der Wachstumsphase oder auf unbewachsenem Boden eine größere Rolle spielen.
2. Die Lagerungsdichte ist bei Direktsaat höher. Damit ist der Anteil an Grobporen geringer und der an Mittelporen höher, damit steigt in der Regel die nutzbare Feldkapazität. Pflug hat mehr Grobporen und diese entwässern ohne schützende Mulchdecke schneller. (Boden unter Mulchsaat weist je nach Bearbeitungstiefe oben Lagerungsdichten wie Pflug oder sogar darunter auf, ab 10-20 cm Tiefe dann wie Direktsaat.)
3. Die Entwicklungsverzögerung bei Direktsaat führt zu geringerer Transpiration und lässt damit mehr Wasser im Boden. Auch dieser Effekt ist vermutlich zu Anfang der Wachstumsphase am größten.
4. Der höhere Humusgehalt in den oberen Bodenschichten der Direktsaat bewirkt eine höhere (nutzbare) Feldkapazität. Dieser Effekt ist allerdings nur bis 10 cm, höchstens 20 cm zu vermuten (vgl. Kap. 6.1).
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.
6. Stärkerer Oberflächenabfluss bei Niederschlagsereignissen führt zu geringerer Versickerung bei Pflug bereits in die oberen Bodenschichten.

Welcher dieser Erklärungsversuche könnte nun in Efringen-Kirchen und in Dossenheim greifen? (Die anderen Standorte weisen zu wenig Differenzierung zwischen den Bearbeitungsverfahren auf).

In Efringen-Kirchen deuten sich höhere Bodenfeuchten der Direktsaatflächen in den oberen 40 cm und im Wasservorrat an als unter Pflug, sind aber aufgrund der Variabilität innerhalb der gleichen Parzelle nicht eindeutig zu belegen. Die höhere Bodenfeuchte in 0-40 cm Tiefe war vor allem am Anfang der Messperiode deutlich, zog sich aber tendenziell über die gesamte Messperiode hin. Die Bodenfeuchte unter Pflug sank bei Trockenheitsphasen schneller und tiefer als bei den anderen Varianten. In den unteren Bodenschichten war unter Pflug geringfügig mehr Wasser zu messen. Als mögliche Erklärungsansätze kommen fast alle aus der obigen Liste in Frage: Mulchdecke, Entwicklungsverzögerung beim Körnermais, Lagerungsdichte / Mittelporenanteil, Humusgehalt der oberen Bodenschichten und sogar mangelnder Zugang zu Wasser in tieferen Bodenschichten beim Pflug.

In Dossenheim sind Erklärungsversuche insofern schwieriger, da gerade zu Beginn der Messperiode tiefe Schrumpfrisse in der Pflugvariante zu beobachten waren (Abb. 4). Damit waren atypische „Gröbstporen“ auf den gepflügten und ausgetrockneten Flächen vorhanden, so dass die Niederschläge auch beim Pflug bis mindestens 30 cm (so tief waren die Schrumpfrisse problemlos messbar), wahrscheinlich tiefer, schnell in den Boden eindringen konnten. Außerdem stand der Winterweizen nur noch kurze Zeit während der Messperiode. Hinzu kommen ausgerechnet bei der Pflugvariante der frühzeitige Ausfall einer Messreihe für die obere Schicht (0-20 cm) und Beschädigungen eines Rohrs mit unklaren Auswirkungen auf die Messqualität ab 40 cm Tiefe (ebenfalls beim Pflug). Zu erwähnen sind auch erhebliche Unterschiede zwischen den Parallellsonden (TDR ab 20 cm, FDR in 50 cm Tiefe) und Inhomogenitäten in der Bodenart vor allem in der Mulchsaatvariante, was die Interpretation der Daten erschwert.

Auf diesem Standort waren mit TDR-Sonden in den oberen Bodenschichten keine Unterschiede im Wassergehalt zu messen (insbesondere nach Korrektur für die Lagerungsdichte, Abb. 54). Mit der FDR-Sonde wies die Direktsaat, gerade als noch Weizen auf der Fläche stand und der Boden noch sehr trocken war, oben mehr Bodenfeuchte auf als die Pflugparzelle. Danach allerdings – und mit einsetzenden Niederschlägen – glich sich die Bodenfeuchte zwischen Pflug und Direktsaat an. Zwischen 20 und 60 cm (TDR) waren tendenziell Feuchtevorteile beim Pflug auszumachen, in 60-80 cm Tiefe hingegen hatten die Direktsaatparzellen mehr Bodenfeuchte aufzuweisen. Als mögliche Erklärungsansätze für den eventuellen Vorteil der Direktsaat in den oberen Bodenschichten kommen infrage: Mulchdecke, Lagerungsdichte (bis 10 cm) und das Nicht-Vorhandensein von Schrumpfrissen; eher nicht infrage kommen der Humusanteil (nur in 0-5 cm Tiefe höher, Kap. 6.1) oder Entwicklungsverzögerungen (Weizen bereits reif). Die tiefen Schrumpfrisse könnten, neben mangelnder Durchwurzelung und Wasserausnutzung, die zum Teil hohen Bodenfeuchten beim Pflug zwischen 20 und 60 cm erklären helfen (und eventuell auch ein Grund für die Unterschiede zwischen den TDR-Parallelmessungen sein).

Kontinuierliche Makroporen bis in den Unterboden könnten nicht nur einen Erklärungsansatz für die höheren Bodenfeuchten in 60-80 cm unter Direktsaat bis zum Ende der Messperiode liefern, sondern eventuell auch für den Ertragsvorteil in Dossenheim, der 2011 zu verzeichnen war.

In Normaljahren liefert die Direktsaatvariante an den Systemvergleichsstandorten etwas weniger Ertrag. In Dossenheim hingegen war im Versuchsjahr 2011 zu beobachten (Versuchsbericht W. IBACH, unveröffentlicht), dass in diesem für Dossenheim extremen Jahr mit außergewöhnlicher Trockenheit und folgender Notreife des Weizens die Kultur auf der Direktsaatparzelle am besten abschnitt. Zwar wurde auf allen Parzellen nur etwa die Hälfte des üblichen Ertrags gedroschen. Allerdings wurden von der Direktsaatfläche 51,6 dt/ha geholt, bei Mulchsaat und Pflug nur 41,2 bzw. 45,6 dt/ha. Die Trockensubstanzgehalte waren fast gleich, die Proteingehalte auf der Direktsaatparzelle mit 12,3% sogar höher (gegenüber 11,5% bzw. 10,8%). In Efrin-

gen-Kirchen war zwar kein Vorteil des Direktsaatbestandes zu konstatieren. Der Mais holte aber trotz späteren Auflaufens die Entwicklungsverzögerung bis zur Ernte weitgehend auf (Versuchsbericht J. WINKLER, unveröffentlicht). Die Ertragsparameter sind nicht ganz so gut wie die auf den anderen Parzellen (Pflug und Mulchsaat sind dabei ähnlich).

Wie ist nun der Ertragsvorteil der Direktsaat bei Trockenphasen in Dossenheim zu erklären, zumal ein solcher Befund auf den Systemvergleichsflächen nicht zum ersten Mal gestellt wurde? Die Versuchsergebnisse zur Bodenfeuchte liefern keine ausreichende Erklärung. Zwar schnitt die Direktsaat keinesfalls schlechter ab als die Pflug- oder Mulchsaatvariante (die in Dossenheim untypische Werte ergab), allerdings auch nicht signifikant besser. Wenn in Dossenheim Auswirkungen auf den Wassergehalt gemessen werden konnten, dann lediglich unterhalb von 50 cm und in diesem Fall zumeist ohne Pflanzenbestand. Bei der Ermittlung des Wasservorrats im Solum machte sich das bereits nicht mehr bemerkbar. Die für die Entwicklung des Weizens entscheidende Phase wurde messtechnisch nicht mehr erfasst, weil die Sonden erst relativ spät in den Boden eingebracht werden konnten.

Auf Ackerboden ohne Pflanzenbewuchs ist der Wasserabfluss bei Starkregen und in Beregnungsversuchen auf gepflügten und geegten Flächen meist deutlich höher als auf Flächen mit Mulch- und Direktsaat. Der Grund liegt vermutlich in der höheren Verschlammung der Bodenoberfläche, wobei die Dränporen zum großen Teil verschlossen werden. Die Aggregatstabilität ist auf Direktsaatflächen deutlich höher (TEBRÜGGE und DÜRING 1999, SCHMIDT et al. o.J.). Dies wurde auch bei den Untersuchungen der Systemvergleichsflächen nachgewiesen (DELLER et al. 2006). In Flächen mit Mulch- und Direktsaat wird regelmäßig ein gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung höherer Regenwurmbesatz konstatiert (TEBRÜGGE und DÜRING 1999). Die Erhebungen auf den Flächen des Systemvergleichs, zuletzt 2011 in Efringen-Kirchen, zeigten nochmals deutlich, dass bei Direktsaat mehr Individuen und eine höhere Biomasse an Regenwürmern vorkommen (EHRMANN 2011). Daraus resultiert eine höhere Anzahl schnell dränender Grobporen an der Bodenoberfläche, die bei Vorkommen tief grabender Arten (die bei Pflugbearbeitung kaum zu erwarten sind) auch tief in den Boden reichen können. Hinzu kommen die oft langlebigen Bioporen, die aus früheren tiefreichenden Wurzelsystemen herkommen und durch Pflugbearbeitung nicht zerstört wurden. Möglicherweise wird die Durchwurzelung der Kulturpflanzen bis in den Unterboden durch die Ausbildung solcher tiefer und stabiler Grobporen erleichtert, so dass die Wurzeln leichter an Wasservorräte gelangen können, die ihnen z.B. beim Pflugverfahren und der Ausbildung einer schwer durchlässigen Pflugsohle verschlossen bleiben (BODNER 2012). Gerade in Trockenperioden werden die Wasservorräte der intensiver durchwurzelten oberen Bodenschichten schnell entleert. Bereits kleine Vorteile in der Wasserversorgung waren in Dossenheim wichtig, weil die Wassergehalte zu Beginn der Messperiode (und in der letzten Reifeperiode des Weizens) nahe am permanenten Welkepunkt lagen.

4.4 Ausblick – ein Messprogramm für mehrere Jahre

Wie könnte man weiter vorgehen? Volumetrische Bodenfeuchten bilden das Wasserangebot gut ab, insofern ist der Ansatz richtig. Allerdings müsste er ergänzt werden um eine aktuelle Erfassung der Lagerungsdichte und eine bodenphysikalischen Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität. Zur Erläuterung: 30% Wassergehalt heißt, von 1 cm³ Bodenvolumen sind 0,3 cm³ Wasser und damit 0,3 g Wasser, primär unabhängig von der Lagerungsdichte. Die Lagerungsdichte bestimmt die Porengrößenverteilung und damit u.a. den Anteil des Wassers, der pflanzenverfügbar ist. Der Anteil pflanzenverfügbaren Wassers ist jedoch derjenige, der er-

tragsrelevant ist. Dieser lässt sich allerdings im vorliegenden Fall nicht aus der Bodenart ableiten, denn die Bodenart unterscheidet sich zwischen den Bearbeitungsvarianten nicht (außer partiell im Humusgehalt), sondern müsste an Feldproben mittels Stechringen bestimmt werden. Bodenphysikalische Daten liegen für die Standorte zwar vor, allerdings sind sie nicht aktuell – sie wurden anhand von Proben bestimmt, die 2004 und 2005 gezogen wurden. Die entsprechenden Trockenrohdichten finden sich im Anhang (Kap. 6.2). Seinerzeit wurden pF-Werte bei 1,8 und 4,2 gemessen und die nutzbare Feldkapazität (nFK) abgeleitet. Die Auswirkungen der Bodenbearbeitungsverfahren auf die nFK waren jedoch gering und statistisch nicht abzusichern (DELLER et al. 2006).

Weitere Untersuchungen müssten darüber hinaus mehrere Jahre umfassen, um verschiedene Witterungsverläufe abzubilden und mit einiger Wahrscheinlichkeit auch solche Jahre zu erfassen, in denen längere Trockenperioden auftreten. In solchen Jahren werden Bodenfeuchtedifferenzen, die durch Unterschiede in der Bodenbearbeitung bedingt sind, eher messbar werden. Diese Differenzen werden auch eher an trockenwarmen Standorten als an kühleren und feuchteren zu messen sein, wie dieser Versuch gezeigt hat. Auch flachgründige Standorte sind eher nicht geeignet, wenn sich die Unterschiede erst ab einer gewissen Bodentiefe deutlich auswirken. Um bearbeitungsbedingte Differenzen gegenüber den unvermeidlichen bodenbedingten und messtechnisch begründeten Schwankungen herauszukristallisieren, sind mehrere Sonden pro Bearbeitungsvariante und Standort zu implementieren. Um die Auswirkungen einer unterschiedlich schnellen Pflanzenentwicklung zu untersuchen, müssen die Entwicklungsphasen regelmäßig dokumentiert werden. Die Schweizer Untersuchungen „Oberacker“ kamen diesem Programm am nächsten, waren aber von vornherein auf einen Dauerversuchsstandort begrenzt und ohne Mulchsaatvariante.

Ideal wäre weiterhin eine Untersuchung auf den Parzellen, wie tief die Makroporen tatsächlich reichen – z.B. über Färbemethoden analog zu den Regenwurmuntersuchungen – und wie der Durchwurzelungsgrad in verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung aussieht. Letzteres wäre allerdings sehr aufwändig, wenn eine repräsentative Anzahl von Pflanzen im Feld durch Grabungen geborgen und Wurzellängen, -dichten und/oder -durchmessern über bildgebende Verfahren (Rhizoscan o.ä.) ermittelt werden sollen. Eine praktikablere Feldmethode müsste erst entwickelt und erprobt werden.

Kurzgefasst müsste ein künftiges Messprogramm zur Ermittlung der Bodenfeuchte in Böden unterschiedlicher Bodenbearbeitung:

- sich auf ein bis zwei trocken-warme Standorte konzentrieren,
- mehrere Vegetationsperioden umfassen, um die Witterungsschwankungen von Jahr zu Jahr abzubilden und etwaige Trockenphasen zu erfassen,
- deutlich mehr Sonden pro Parzelle einsetzen (FDR oder TDR wären methodisch gleichrangig und eher eine Frage der Material- und Personalressourcen),
- den Entwicklungsverlauf der Bestände regelmäßig dokumentieren,
- die Lagerungsdichte und die nutzbare Feldkapazität in verschiedenen Bodentiefen bis in den Unterboden ermitteln, am besten am Anfang und am Ende der mehrjährigen Messperiode
- Makroporen, ihre Durchgängigkeit und den Durchwurzelungsgrad des Soliums erfassen.

5 Literatur

- Bischoff, J., Hofmann, B. und Christen, O. (2005): Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung auf die Ausnutzung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17: 399-400.
- Bodner, G (2012): Wasserreserven im Untergrund erschließen. *Landwirtschaft ohne Pflug* 3/2012, 36-41.
- Bodner, G., Karpukin, M., Wagentristsl, H., Liebhard, P. und Kaul, H.-P. (2009): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf die saisonale Dynamik hydraulischer Bodeneigenschaften. In: Bericht über die ALVA-Jahrestagung 2009 „Landwirtschaft – Grundlage der Ernährungssicherung: regional oder global?“, S. 138-139. Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen (Hrsg.), Wien, Österreich.
- Chang, C. und Lindwall, C.W. (1992): Effects of tillage and crop rotation on physical properties of a loam soil. *Soil Tillage Res.* 22: 383-389.
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W.G. und Tschannen, S. (2005): Direktsaat und Pflug im 10-jährigen Systemvergleich. *AGRARForschung* 12 (5): 184-189.
- 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.
- Damm, S., Bischoff, J., Hofmann, B. und Christen, O. (2009): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Bodenwasserhaushalt und die Pflanzenentwicklung bei Winterweizen im mitteldeutschen Trockengebiet. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 21: 171-172.
- Deller, B., Flaig, H., und Unterseher, E. (2006): Auswirkungen langjährig reduzierter Bodenbearbeitung auf physikalische Bodeneigenschaften. *VDLUFA-Schriftenreihe* 61/2006 (Kongressband 2005), S. 454-463. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, ISBN 3-922712-92-4.
- Ehrmann, O. (2011): Untersuchung von Regenwürmern und Regenwurmröhren am Standort Efringen-Kirchen des Systemvergleichs Bodenbearbeitung. Bericht für das LTZ Augustenberg. Internetfassung: <https://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1360356/ATT51535-2.pdf>
- Ernst, G., Felten, D. und Emmerling, C. (2009): Einfluss von Regenwürmern unterschiedlicher Lebensformen auf Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts. Tagungsbeitrag zu: Workshop der Kommission III der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft „Experimentieren mit Regenwürmern“, 20. – 21.03.2009 in Trier.
- Flaig, H. (2006): Bodenmikrobiologische Differenzierung bei mehrjähriger unterschiedlicher Bodenbearbeitung. *VDLUFA-Schriftenreihe* 61/2006 (Kongressband 2005), S. 494-502. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, ISBN 3-922712-92-4.
- Flaig, H. (2007): Einflussgrößen auf bodenbiologische Parameter bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. *VDLUFA-Schriftenreihe* Bd. 62/2007 (Kongressband 2006), S. 351-358. VDLUFA-Verlag, Darmstadt. ISBN 3-922712-93-2.
- IMKO (ohne Jahr): Theorie der Material- und Bodenfeuchtemessung mit der TRIME Methode. IMKO Modultechnik GmbH, Im Stöck 2, 76275 Ettlingen.
- Rasmussen, K.J. (1999): Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Tillage Res.* 53: 3-14.
- 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, G. (2009): Klimawandel in Mitteleuropa – Konsequenzen und Herausforderungen für die ackerbauliche Nutzung. Vortragsfolien zum Lokalen Themenabend der BBG (Bodenbearbeitungsgeräte) Leipzig. Internet: http://amazone.de/files/251_BBK_Klimawandel_LW.pdf
- Schmidt, W., Nitzsche, O., Krück, S. und Zimmermann, W. (o.J.): 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.
- Scholl, P., Bodner, G., Liebhard, P., Schwen, A., Loiskandl, W., Wagentristsl, H. und Kaul, H.-P. (2010): Einflussfaktoren reduzierter Bodenbearbeitungsintensität auf den Wasserhaushalt und Ertrag. In: Bericht über die ALVA-Jahrestagung 2010 „Vom Lebensmittel zum Genussmittel – was essen wir morgen?“, S. 36-38. Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen (Hrsg.), Wien, Österreich.
- Singh, B., Chanasyk, D.S. und McGill, W.B. (1998): Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems. *Soil Tillage Res.* 45: 59-74.

Tebrügge, F. und Düring, R.-A. (1999): Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Tillage Res.* 53: 15-28.

Thiel, E. (2002): Stickstoffhaushalt und sickerwassergebundener Stickstoffaustrag bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Diplomarbeit, Universität Leipzig.

Verch, G., Werner, K. und Müller, M. (2004): Effekte einer Minimalbodenbearbeitung auf Ertrag, Wasserhaushalt und Mykotoxinbelastung unter den Bedingungen des kontinental geprägten Klimas in Nordost-Brandenburg. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 167-168.

Verein für konservierende Bodenbearbeitung Direktsaat in Sachsen (2010): Bodenfeuchteversuch durch feuchte Witterung verwässert. Zum Praktikertreffen wurden Ergebnistendenzen des angelegten Versuchs in Skäßchen diskutiert (26. Oktober 2010). <http://kbd-sachsen.de/rueckblick-2010/archiv-2010.html&sid=e359c2ec081a59064066c864dc096226#> (aktuell zugänglich nur noch verkürzte Fassung)

Danksagung

Die Autoren danken Jürgen Bertsch, Silvana Bollhöfer, Heiner Hartwig, Tobias Holstein, Jerome Meschenmoser, Thomas Nickel und Harald Scharinger für ihre Beiträge zum Gelingen des Projekts, den Betreuern der Versuchsflächen an den Landwirtschaftsämtern und den bewirtschaftenden Landwirten für ihre Geduld, Berthold Deller, Jörn Breuer und Helge de Boer für wertvolle Diskussionsbeiträge sowie Guido Wekemann, Betreiber der Wetterwarte Ostalb, und Jürgen Just am Julius-Kühn-Institut Dossenheim für die Überlassung ihrer Wetterdaten.

6 Anhang

6.1 Bodeneigenschaften der Standorte

Die hier aufgeführten Bodenparameter wurden im Zuge bodenchemischer und bodenbiologischer Untersuchungen an den Standorten des Systemvergleichs Bodenbearbeitung an Bodenproben bestimmt, die in den Jahren 2004 und 2005 mittels Bohrstock gezogen und analysiert wurden. Insofern spiegeln die Daten zwar die Verhältnisse etwa 10 Jahre nach Beginn der unterschiedlichen Bodenbearbeitung wider, aber nicht die Bodeneigenschaften zum Zeitpunkt der vorliegenden Untersuchung auf Bodenfeuchte. Man kann davon ausgehen, dass sich die Bodenart nicht wesentlich verändert hat, beim pH-Wert und dem Humusgehalt könnten sich weitere Differenzierungsprozesse ergeben haben. Die Werte bieten jedoch einen Anhaltspunkt für die Diskussion der Bodeneigenschaften im Zusammenhang mit Bodenfeuchtemessungen und Standortunterschieden.

Efringen-Kirchen

Bodeneigenschaften	Bodenart			Humusgehalt			pH-Wert		
	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
Bodenbearbeitung / Bodentiefe									
0-5 cm	h uL	h uL	h uL	4,3	5,0	5,8	6,1	5,5	5,2
5-10 cm	h uL	h uL	h uL	4,3	5,1	5,2	6,1	5,8	5,5
10-20 cm	h uL	h uL	h uL	4,3	4,9	4,4	6,3	6,1	5,8
20-30 cm	h uL	h uL	h uL	4,3	4,4	4,1	6,3	6,1	5,8
30-50 cm	uL	t'L	t'L	3,1	2,6	2,1	6,3	6,4	6,1

Dossenheim

Bodeneigenschaften	Bodenart			Humusgehalt			pH-Wert		
	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
Bodenbearbeitung / Bodentiefe									
0-5 cm	t'L	t'L	t'L	2,0	2,1	2,6	7,2	7,1	6,6
5-10 cm	t'L	t'L	t'L	2,1	2,1	1,8	7,2	7,1	6,8
10-20 cm	t'L	tL	tL	2,2	1,8	1,7	7,2	7,1	7,0
20-30 cm	t'L	tL	tL	2,0	1,5	1,7	7,3	7,2	7,0
30-50 cm	IT	tL	tL	1,6	1,2	1,2	7,4	7,4	7,2

Grünsfeld-Hausen

Bodeneigen- schaften	Bodenart			Humus- gehalt [%]			pH-Wert		
	Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat
0-5 cm	IT	h IT	h IT	3,0	4,7	5,4	7,3	7,3	7,1
5-10 cm	IT	h IT	h IT	3,4	4,5	4,1	7,2	7,3	7,3
10-20 cm	IT	IT	IT	3,4	3,4	3,5	7,2	7,3	7,3
20-30 cm	IT	IT	IT	3,3	2,6	2,8	7,3	7,4	7,4

Neresheim-Dossingen

Bodeneigen- schaften	Bodenart			Humus- gehalt [%]			pH-Wert		
	Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat
0-5 cm	uL	tL	h tL	2,5	3,7	4,4	7,0	7,0	7,1
5-10 cm	tL	tL	tL	2,7	3,8	2,7	7,1	7,0	7,2
10-20 cm	tL	tL	tL	2,6	3,1	2,3	7,0	7,1	7,3
20-30 cm	tL	tL	tL	2,1	2,2	1,6	7,2	7,2	7,3
30-50 cm	tL	tL	tL	1,1	1,3	0,7	7,4	7,4	7,5

Biberach

Bodeneigen- schaften	Bodenart			Humus- gehalt [%]			pH-Wert		
	Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat	Direkt- saat	Pflug	Mulch- saat
0-5 cm	uL	uL	uL	2,7	3,5	3,6	6,1	6,2	6,2
5-10 cm	uL	uL	uL	2,6	2,7	2,4	6,0	6,2	6,1
10-20 cm	uL	uL	uL	2,4	2,1	2,2	6,0	6,0	5,9
20-30 cm	uL	uL	uL	2,0	1,9	1,8	6,0	5,9	5,8
30-50 cm	uL	t'L	uL	1,0	1,0	0,9	6,0	5,8	6,0

6.2 Rohdichte

Die Trockenrohddichte der Böden wurde im selben Zeitrahmen wie die anderen Bodeneigenschaften in den Jahren 2004 und 2005 bestimmt. Analysiert wurden Stechzylinder-Proben aus den Bodentiefen 0-5, 10-15, 20-25 und 30-40 cm. Die angegebenen Werte stellen die Mittelwerte aus zwei Parallel-Stechringen dar. Die Dichtewerte wurden auf die 10-Zentimeter-Horizonte der vorliegenden Untersuchung extrapoliert (z.B. 10-15 cm auf 10-20 cm).

Efringen-Kirchen

Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
0-10 cm	1,06	1,02	1,27
10-20 cm	1,14	1,06	1,36
20-30 cm	1,12	1,31	1,35
30-40 cm	1,30	1,33	1,37

Dossenheim

Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
0-10 cm	1,17	1,18	1,28
10-20 cm	1,46	1,30	1,67
20-30 cm	1,41	1,58	1,65
30-40 cm	1,48	1,63	1,55

Grünsfeld-Hausen

Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
0-10 cm	1,07	1,05	1,09
10-20 cm	1,15	1,35	1,43
20-30 cm	1,35	1,41	1,43
30-40 cm	---	---	---

Neresheim-Dossingen

Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
0-10 cm	1,24	1,25	1,39
10-20 cm	1,30	1,44	1,59
20-30 cm	1,35	1,60	1,60
30-40 cm	1,53	1,56	1,50

Biberach

Bodenbearbeitung / Bodentiefe	Pflug	Mulchsaat	Direktsaat
0-10 cm	1,37	1,32	1,30
10-20 cm	1,40	1,48	1,41
20-30 cm	1,41	1,50	1,49
30-40 cm	1,50	1,48	1,50

6.3 Statistik-Tabellen

Als Stichprobe wurde in der Regel eine Messreihe einer Sonde über den Untersuchungszeitraum definiert. Die in der Messperiode auftretenden Messwerte dieser Reihe wurden als Verteilung betrachtet – einer korrekten Verteilung würden allerdings Messwerte vieler Sonden zu möglichst gleichen Zeiten des Untersuchungszeitraums zu Grunde liegen. Daher haben die statistischen Prüfungen nur begrenzte Aussagekraft.

Kurvenverläufe mit größeren Amplituden schneiden wahrscheinlich noch am besten ab, da sie eine breitere Streuung der Messwerte und damit die Bildung einer „ausgewogenen“ Verteilung ermöglichen. Der statistische Befund gleicher bzw. unterschiedlicher Varianzen wird damit wahrscheinlicher (Bsp. obere 20 cm in diversen Tiefenprofilen oder TDR-/FDR-Sondenvergleiche in 0-20 cm bzw. 15 cm Tiefe), aber auch zuverlässiger. Im Fall der Bodentemperaturen beispielsweise werden u.U. systematische Unterschiede signifikant, die in der graphischen Betrachtung allein möglicherweise untergehen.

Zwei optisch relativ eng aneinander liegende Kurven ohne größere Schwankungen hingegen, die sich nicht überschneiden, zählen als verschieden, obwohl sie aufgrund der Messunsicherheiten erfahrungsgemäß als „gleich“ betrachtet werden können (Bsp. 60-80 cm Tiefenprofil Direktsaat, Efringen-Kirchen oder 50 cm Tiefenstufen Pflug, Dossenheim). Hier hat die Methodik Grenzen.

In der Regel verlief die Prüfung auf Normalverteilung negativ. Falls einzelne Wertereihen die Prüfung auf Normalverteilung „bestanden“, wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit dennoch ein non-parametrischer Test (Mann-Whitney- oder Kruskal-Wallis-Test) durchgeführt. Weitere Paarvergleiche im Anschluss an Varianzanalysen wurden wegen der prinzipiell eingeschränkten Verwendbarkeit der Tests nicht durchgeführt.

TDR-Messungen, Tiefenprofil (Kap. 3.3)

Vergleich der beiden Sondenmessungen auf derselben Variante.

Fragestellung: Sind die Messreihen der beiden Parallelsonden signifikant verschieden?

Mann-Whitney-U-Test: Falls $p < 0,05$, sind die beiden Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die beiden Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Efringen-Kirchen

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20	20-40	40-60	60-80
Pflug	0,318	0,887	0,669	<0,001
Mulchsaat	<0,001	0,014	<0,001	<0,001
Direktsaat	0,014	0,496	0,384	0,028

Dossenheim

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20	20-40	40-60	60-80
Pflug	0,204	<0,001	0,113	<0,001
Mulchsaat	0,570	0,033	<0,001	<0,001
Direktsaat	0,371	0,122	0,025	0,007

Grünsfeld-Hausen

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20	20-40
Pflug	0,148	0,064
Mulchsaat	0,280	0,983
Direktsaat	0,190	0,381

Neresheim-Dossingen

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20	20-40	40-60	60-80
Pflug	0,118	0,056	0,496	0,001
Mulchsaat	0,665	0,304	0,008	0,005
Direktsaat	0,895	0,009	0,001	0,024

Biberach

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20	20-40	40-60	60-80
Pflug	0,335	0,350	<0,001	<0,001
Mulchsaat	0,918	0,002	<0,001	0,004
Direktsaat	0,352	<0,001	<0,001	0,274

FDR-Messungen, Tiefenstufen (Kap. 3.4)

Vergleich der beiden Sondenmessungen auf derselben Variante.

Fragestellung: Sind die Messreihen der beiden Parallelsonden signifikant verschieden?

Mann-Whitney-U-Test: Falls $p < 0,05$, sind die beiden Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die beiden Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Dossenheim

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	15	50
Pflug	0,147	<0,001
Mulchsaat	0,147	<0,001
Direktsaat	<0,001	<0,001

Biberach

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	15	50
Pflug	<0,001	0,060
Mulchsaat	0,013	<0,001
Direktsaat	<0,001	<0,001

Bodentemperatur (Kap. 3.5)

Vergleich Pflug – Mulchsaat – Direktsaat in derselben Tiefenstufe.

Fragestellung: Sind die Bodentemperaturen in den Bodenbearbeitungsvarianten statistisch unterscheidbar?

Kruskal-Wallis-Test: Falls $p < 0,05$, sind die drei Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die drei Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Dossenheim

Bodentiefe [cm]	0-20 / 15	40-60 / 50
	<0,001	<0,001

Biberach

Bodentiefe [cm]	0-20 / 15	40-60 / 50
	<0,001	<0,001

TDR-FDR-Sondenvergleich (Kap. 3.6)

Vergleich der beiden Sondentypen in korrespondierenden Tiefen auf derselben Variante.

Fragestellung: Sind die Messreihen der beiden Sonden (Tageswerte) signifikant verschieden? Da die beiden Parallel-Messreihen „TDR1“ und „TDR2“ bzw. „FDR1“ und „FDR2“ untereinander nicht immer als „statistisch gleich“ betrachtet werden können (s.o.), wurden alle vier Messreihen gegeneinander getestet.

Kruskal-Wallis-Test: Falls $p < 0,05$, sind die vier Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die vier Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Dossenheim

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20 / 15	40-60 / 50
Pflug	0,054	<0,001
Mulchsaat	0,827	<0,001
Direktsaat	0,039*	<0,001

* ohne DS_1: 0,504

Biberach

Bodentiefe [cm] / Bodenbearbeitung	0-20 / 15	40-60 / 50
Pflug	0,031	<0,001
Mulchsaat	0,256	<0,001
Direktsaat	<0,001*	<0,001

* ohne DS_2: 0,062

Bodenbearbeitungsverfahren – TDR (Kap. 3.7.1)

Vergleich Pflug – Mulchsaat – Direktsaat in derselben Tiefenstufe (TDR-Messprinzip).

Fragestellung: Sind die Bodenfeuchten in den Bodenbearbeitungsvarianten statistisch unterscheidbar?

Kruskal-Wallis-Test: Falls $p < 0,05$, sind die drei Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die drei Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Bodentiefe [cm] / Standort	0-20	20-40	40-60	60-80
Efringen-Kirchen	<0,001	<0,001	<0,001* ¹	<0,001* ²
Dossenheim	0,015	<0,001	<0,001	<0,001
Grünsfeld-Hausen	0,242	0,121	---	---
Neresheim-Dossingen	0,453	0,014	<0,001* ³	<0,001* ⁴
Biberach	0,237	<0,001	<0,001	<0,001

*¹: nur Direktsaat und Pflug: 0,370

*²: nur MP 14,16,18: 0,810

*³: ohne MP25 und 27: 0,121

*⁴: MP7 und MP8 im t-Test: 0,912

nach Korrektur wegen Lagerungsdichte: Dossenheim 0-20 cm: 0,559; sonst keine Änderungen.

Bodenbearbeitungsverfahren – FDR (Kap. 3.7.2)

Vergleich Pflug – Mulchsaat – Direktsaat in derselben Tiefenstufe (FDR-Messprinzip).

Fragestellung: Sind die Bodenfeuchten in den Bodenbearbeitungsvarianten statistisch unterscheidbar?

Kruskal-Wallis-Test: Falls $p < 0,05$, sind die drei Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die drei Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Bodentiefe [cm] / Standort	15	50
Dossenheim	<0,001	<0,001
Biberach	<0,001	<0,001

Berechnung der Wasservorräte (Kap. 3.8)

Vergleich Pflug – Mulchsaat – Direktsaat in derselben Tiefenstufe (Berechnung auf Grundlage der TDR-Messdaten zur Bodenfeuchte).

Fragestellung: Sind die Bodenwasservorräte in den Bodenbearbeitungsvarianten statistisch unterscheidbar?

Kruskal-Wallis-Test: Falls $p < 0,05$, sind die drei Reihen signifikant voneinander verschieden. Liegt $p > 0,05$ sind die drei Messreihen statistisch voneinander nicht unterscheidbar. Angegeben: p-Werte.

Efringen-Kirchen	Dossenheim	Grünsfeld-Hausen	Neresheim-Dossingen	Biberach
<0,001	<0,001*	0,106	0,048	<0,001

* ohne Mulchsaat: 0,044

