

Einfluss unterschiedlicher Formen der Bewirtschaftung der Brache auf die Verdunstung ackerbaulich genutzter Böden im mitteldeutschen Trockengebiet

Steffi Knoblauch^{1*}

Zusammenfassung

Anhand langjähriger Messreihen der Lysimeteranlage Buttelstedt wird über den Einfluss verschiedener Formen der Brachebewirtschaftung auf die Verdunstung berichtet. Ein nach Ernte aufwachsender Bewuchs aus Ausfallraps bzw. –Winterweizen kann bis Mitte/Ende September den in diesem Zeitraum fallenden Niederschlag bis in die Größenordnung des normalen Niederschlagswertes verdunsten. Eine Bedeckung des Bodens mit Stroh hilft am meisten den Bodenwasservorrat nach Aberntung der Hauptkulturen zu schonen. Im Vergleich zum flachen Stoppelsturz war die Verdunstung um signifikant 0,5 mm/d geringer. Flacher Stoppelsturz eines mit Stroh bedeckten Bodens hingegen minderte im Vergleich zu einem unbedeckten und unbearbeiteten Boden die Verdunstung um signifikant 0,4 mm/d. Im Vergleich zu flachem Stoppelsturz war die Verdunstung einer tiefen Stoppelbearbeitung in den folgenden 13 bis 17 d um signifikant 0,42 mm/d höher. Daraus wurden verschiedene Schlussfolgerungen für die Stoppelbearbeitung abgeleitet.

Schlagwörter: Ausfall-Winterraps, Ausfall-Getreide, Strohbdeckung, flache und tiefe Stoppelbearbeitung

Summary

The influence of various forms of fallow land management on evaporation is reported on the basis of many years of measurement series of the Lysimeters in Buttelstedt in the Central German dry region. A vegetation of volunteer rape or winter wheat growing after harvest can evaporate the precipitation falling until mid/end September up to the order of magnitude of the normal precipitation value in this period. Covering the soil with straw helps most to conserve the soil water supply after harvesting the main crops. Compared to the shallow stubble fall, the evaporation was significantly 0.5 mm/d lower. A flat stubble fall of a soil covered with straw, on the other hand, significantly reduced evaporation by 0.4 mm/d compared to an uncovered and untreated soil. Compared to a flat stubble fall, the evaporation of a deep stubble cultivation was significantly 0.42 mm/d higher in the following 13 to 17 d. From this, different conclusions for stubble cultivation were derived.

Keywords: Volunterr rape, volunteer winter rape, straw covering, shallow and deep stubble fall

Einleitung

In niederschlagsarmen Gebieten ist Wasser häufig der ertragsbegrenzende Faktor. Dabei geht es nicht nur um die Wasserversorgung der Kulturpflanzen während der Hauptwachstumszeit, sondern auch um ein ausreichendes Wasserangebot für das Auflaufen der Winterkulturen im Spätsommer und Herbst. Aufgrund sehr trockener Verhältnisse im Sommer 2018 blieb beispielweise in Thüringen der Aufgang von Winterraps auf einem Teil der Schläge aus und mussten die Ackerflächen umgebrochen werden. Hinzu kommt, dass der Bodenwasserspeicher mittel- bis tiefgründiger Lehmböden in den mitteldeutschen Trockengebieten bis zum Frühjahr häufig nicht vollständig aufgefüllt wird. Insofern steht die Frage, wieviel Wasser ein nach der Ernte aufwachsender Bestand aus Ausfallraps oder –getreide verbraucht. Mit Hilfe langjähriger Messreihen der wägbaren Feldlysimeter in Buttelstedt soll im folgenden Beitrag über den Wasserverbrauch der Brache in Abhängigkeit vom Bewuchs mit ausgefallenem Winterweizen oder Winterraps und verschiedener Varianten der Stoppelbearbeitung bzw. –bedeckung berichtet werden.

Material und Methoden

Der Versuchsstandort Buttelstedt befindet sich am südöstlichen Rand des Thüringer Beckens im mitteldeutschen Trockengebiet. Die vieljährige Niederschlagssumme beträgt 535 mm je Jahr und das vieljährige Temperaturmittel 9,0 °C (1981...2000). Während der Vegetationszeit von April bis September bemisst sich der Niederschlag auf 329 mm, davon 73 mm im Juli, 56 mm im August und 48 mm im September.

Im Vergleich zum vieljährigen Mittelwert von 1951 bis 1980 hat es bereits eine Abnahme des Jahresniederschlags um 17 mm und eine Zunahme der Jahrestemperatur um 0,8 °C gegeben.

Die Witterung der Versuchsjahre in den Monaten Juli bis September geht aus *Tabelle 1* hervor. In den Versuchsjahren mit der Prüfung verschiedener Stoppelbewirtschaftung folgt im Jahr 2010 auf einen zu warmen und trockenen Juli ein niederschlagsreicher und kühler August. Im Jahr 2015 herrscht im Juli und August eine überdurchschnittlich warme und etwas zu feuchte Witterung vor. In den Jahren 2016 und 2018 ist es im Juli und August zu warm und zu trocken.

¹ Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Referat 31 - Pflanzenbau und Ökologischer Landbau, Postfach 100262, D-07702 JENA

* Ansprechpartner: Dr. Steffi Knoblauch, steffi.knoblauch@tillr.thueringen.de



Tabelle 1: Witterung in den Monaten Juli bis September in den Versuchsjahren.

Jahr	Niederschlag						Lufttemperatur					
	Jul. mm	Abw. ¹ in %	Aug. mm	Abw. in %	Sept. mm	Abw. in %	Jul. °C	Abw. in K	Aug. °C	Abw. in K	Sept. °C	Abw. in K
2007	128	176	54	96	150	310	17,3	-0,9	16,5	-1,3	12,3	-1,5
2008	69	95	33	59	30	63	18,1	-0,1	17,9	+0,1	11,9	-2,0
2010	65	89	127	226	64	134	20,1	+1,9	16,4	-1,4	12,3	-1,5
2011	115	158	44	79	33	69	16,0	-2,2	17,7	-0,1	15,2	+1,4
2012	75	104	53	95	32	66	17,3	-0,9	18,6	+0,8	13,8	0,0
2015	72	100	67	119	24	51	19,4	+1,2	20,3	+2,5	12,9	-0,9
2016	56	77	20	36	32	67	18,8	+0,6	18,3	+0,4	17,4	+3,6
2018	70	97	26	47	79	164	20,1	+1,9	20,1	+2,3	14,9	+1,1

¹ Abweichung vom vieljährigen Mittel

Tabelle 2: Ausgewählte Bodeneigenschaften der Versuchsböden.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Tongehalt	FK pF 2,5 Vol.%	nFK pF 2,5 Vol.%	C _{org} %	pH CaCl ₂	CaCO ₃ %
	cm		%					
Braunerde-Tschernosem aus Löß (lö)								
Ap	0...25	Lu	26,6	29,3	11,7	1,7	6,6	0,3
Ah	...43	Lu		31,9	7,2	1,2	6,5	0,3
Ah-Bv	...65	Lu	29,4	34,2	9,5	0,8	6,7	0,2
Ckc	...195	Lu	20,9	31,4	10,3	0,8	7,6	15,5
Para-Rendzina aus unterem Keuper (k)								
Ap/Ah	0...30	Lt3	39,0	36,8	9,5	1,6	7,5	7,2
II e/Cv	...65	Ls2	24,6	28,8	8,6	0,3	7,6	16,8
III e/Cv	...72	Lt2	27,3	31,3	5,0	0,4	7,6	1,1
Cv	...200	Lu, Ls3, Tu3, Lt2	18...35	27...35	5...12	0,03..0,3	7,3..7,7	0,5...13

Bei den Versuchsböden handelt es sich um einen tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löß (lö) und eine Para-Rendzina aus unterem Keuper (k). Ausgewählte Bodeneigenschaften enthält Tabelle 2. Der tiefgründige Lößboden ist durch einen 43 cm mächtigen Humushorizont gekennzeichnet. Die Bodenart ist bis in 200 cm Tiefe durchgängig schluffiger Lehm. Die Para-Rendzina ist aus carbonathaltigen, lockeren und festen Mergelsteinen hervorgegangen. Der Humushorizont reicht bis in 30 cm Tiefe und ist der Bodenart stark tonigem Lehm zuzuordnen. Darunter folgen lehmige, schluffige und tonige Verwitterungsprodukte des unteren Keupers mit stark wechselnden Korngrößen-, Skelett- und Carbonatanteilen.

Die Lysimeter in Butteltstedt weisen eine Oberfläche von 2 m² und eine Tiefe von 2,5 bzw. 2 m auf. Sie sind monolithisch befüllt und befinden sich zur Vermeidung von Oaseneffekten inmitten eines 30 ha-großen Feldes, das ebenso wie die Lysimeter bewirtschaftet wird. Die Lysimeter sind kontinuierlich wägbare mit einer Genauigkeit von 100 g, entsprechend einer Niederschlags- bzw. Verdunstungshöhe von 0,05 mm. Das Sickerwasser wird teils gravitativ über eine körnungsabgestufte Filterstrecke aus Quarzschluff-, sand und -kies, teils tensionsgesteuert mit Hilfe von Saugkerzen aus Keramik und Borosilikatglas gewonnen.

Die Bewirtschaftung der Lysimeter erfolgt ackerbaulich. In der Fruchtfolge wechseln seit 2005 die Kulturen Silomais/Sorghum bicolor, Sommergerste, Winterraps, Winterweizen und Wintergerste. Es werden im Hinblick auf die Höhe der

unvermeidbaren N-Auswaschung eine mineralische und eine mineralisch-organische Düngungsvariante geprüft. Das Stroh bleibt auf dem Feld. Für die Erfassung des Ertrages wird die Ganzpflanze geerntet und kommt das Stroh einige Tage nach der Ernte in gehäckselter Form auf den Lysimeterboden zurück. Die Wiederholungszahl beträgt bei der mineralischen Variante 4 je Boden und bei der mineralisch-organischen Variante 3 je Boden. Zwei weitere Lysimeter, die mit einem Lößboden befüllt sind, erhalten während der Hauptwachstumszeit Zusatzwasser für die Bestimmung der potenziellen Verdunstung des Pflanzenbestandes. Im Jahr 2005 waren vier Lysimeter wägbare, im Jahr 2010 zehn. Ab dem Jahr 2012 sind alle Lysimeter wägbare. Dementsprechend stehen für die Bestimmung der Verdunstung der Brache von den 16 Feldlysimetern 4 bis 16 zur Verfügung.

Die Varianten der Brachebewirtschaftung sind in Tabelle 3 erläutert. Im Jahr 2010 wurde ein flacher Stoppelsturz mit einer Strohecke auf einem unbearbeiteten Boden verglichen. Im Jahr 2015 erfolgte der Vergleich eines flachen Stoppelsturzes mit einem von Stroh beräumten baren Boden. In den Jahren 2016 und 2018 kamen eine flache und eine tiefe Stoppelbearbeitung zur Prüfung.

In den Jahren 2007 und 2011 gelangte Winterraps zum Anbau und in den Jahren 2008 und 2012 Winterweizen. Nach der Ernte erfolgte jeweils eine flache Stoppelbearbeitung, um das aus ackerbaulicher Sicht erwünschte Auflaufen des Winterrapses bzw. Getreides zu fördern. Im Einzelnen sind die Bewirtschaftungsmaßnahmen der Brache in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 3: Beschreibung der Versuchsvarianten in den Jahren 2010, 2015, 2016 und 2018.

Var.	2010 22.7.2010	23.-25.7.2010	26.7.2010	4.8.2010
1	Ernte incl. Strohabfuhr, TM-Ertrag Stroh ¹ (dt/ha): 37	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt: 100 % BG Stroh	flache Stoppelbearb., 5 cm tief: 37 % BG Stroh, mittleres bis grobes (<10...40 mm, k) bzw. feines (<5 mm, lö) Bröckelgefüge
2			Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief: 50 % BG Stroh, mittleres bis grobes (<20...40 mm, k) bzw. feines bis mittleres (<5...20 mm, lö) Bröckelgefüge	
2015				
	27.7.2015	28.-31.7.2015	1.8.2015	8.8.2015
1	Ernte incl. Strohabfuhr, TM-Ertrag Stroh ² (dt/ha): 73 (dar. 86 k, 63 lö)	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 6 cm tief u. mit Harken angedrückt: 62 % BG Stroh, feines bis mittleres (2...20, vereinz. 50 mm, lö u. k) Bröckelgefüge	
2		ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung		Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 6 cm tief u. mit Harken angedrückt: 47 % BG Stroh, feines bis mittleres (2...20, vereinz. 50 mm, lö u. k) Bröckelgefüge
2016				
	12.7.2016	13.-20.7.2016	21.7.2016	
1	Ernte ³ incl. Strohabfuhr TM-Ertrag Stroh ³ (dt/ha): 68 (dar. 70 k, 66 lö)	ohne Stroh und ohne Stoppelbearbeitung	Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief u. mit Harken angedrückt	
2			Stroh breit verteilt u. flache Stoppelbearbeitung, 14 cm tief u. mit Harken angedrückt	
2018				
	19.7.2018	20.-21.7.2018	23.7.2018	
1	Ernte incl. Strohabfuhr TM-Ertrag Stroh ⁴ (dt/ha): 65 (dar. 67 k, 63 lö)	Stroh breit verteilt: 100 % BG Stroh	flache Stoppelbearbeitung, 5 cm tief u. mit Harken angedrückt: 70 % BG Stroh, überw. feines (>70 %) bis mittleres Bröckelgefüge (<5...30 mm, lö u. k)	
2			tiefe Stoppelbearbeitung, 14 cm tief u. mit Harken angedrückt: 20 % BG Stroh, feines bis mittleres (30 %, lö bzw. 60 % k) Bröckelgefüge (<5...50 mm)	

BG...Bedeckungsgrad, ¹Braugerste-Stroh, ^{2,4}Winterweizenstroh, ³Wintergerstestroh

Tabelle 4: Bewirtschaftung der Brache in den Jahren 2007, 2008, 2011 und 2012.

	12.7.2007	13.7.2007	16.8.2007	16.8.2007
Ernte incl. Strohabfuhr		ohne Stroh Stoppelbearbeitung, 5 cm tief	Bewuchs mit Ausfallraps: BBCH 15, BH 8 cm, BG 74% (k), BBCH 15, BH 14 cm, BG 100% (lö)	Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 6 cm tief
1.8.2008		26.8.2008	8.10.2008	
Ernte incl. Strohabfuhr		Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 5 cm tief	Bewuchs mit Ausfallweizen: BBCH 21, BH 7 cm, BG 8% (k), BBCH 22, BH 12 cm, BG 42% (lö)	
14.7.2011			11.8.2011	11.-14.8.2011
Ernte incl. Strohabfuhr			Bewuchs mit Ausfallraps: BH 8 cm, BG 45% (k), BH 11cm, BG 70% (lö)	Stoppelbearbeit., 7 cm tief u. Stroh eingearbeitet
26.7.2012		10.8.2012	10.9.2012	
Ernte incl. Strohabfuhr		Stroh breit verteilt u. Stoppelbearbeitung, 8 cm tief	Bewuchs mit Ausfallweizen: BBCH 21, BH 11cm, BG 23% k), BBCH 21, BH 11cm, BG 53% (lö)	

Ergebnisse

Wasserverbrauch von Ausfallraps und Ausfallgetreide

Der sich nach Ernte aus ausgefallenem Winterraps etablierte Bestand verbrauchte von Beginn der 2. Julidekade bis Ende der 2. Septemberdekade im Mittel der beiden Böden insgesamt 159 mm im Jahr 2007 und 144 mm im Jahr 2011, wobei im Jahr 2007 der Wasserverbrauch auf dem Lößboden mit 170 mm am höchsten ausfiel (Tabelle 5).

In beiden Jahren war es im Juli und August überdurchschnittlich feucht, was die pflanzliche Entwicklung des Ausfallraps vorantrieb. Der Pflanzenbestand hatte Mitte August eine Bestandeshöhe von 8 bis 14 cm erreicht und einen Bedeckungsgrad von 74 bis 100 % im Jahr 2007 sowie 45 bis 70 % im Jahr 2011. Ein 2. Stoppelsturz Mitte August 2007 senkte die Evapotranspiration (ET) von 3 bis 4 mm/d auf 1 bis 1,5 mm/d bei anhaltend hoher Globalstrahlung (Abbildung 1). Die Wasserbilanz des betrachteten Zeitraumes fiel aufgrund der überdurchschnittlichen Niederschläge positiv aus. Die ET lag in beiden Jahren über dem vieljährigen Durchschnittswert des Niederschlags von 137 mm, so dass unter normalen Niederschlagsverhältnissen

bei unkontrolliertem Aufwuchs mit Ausfallraps in diesem Zeitraum keine Auffüllung des Bodenwasserspeichers zustande kommen würde.

Die ET eines Bewuchses mit Ausfall-Winterweizen lag demgegenüber deutlich niedriger. Bei vergleichbaren Bedingungen der Globalstrahlung im Jahr 2012 blieb die ET im Pentadenmittel unter 3 mm/d (Abbildung 2), während beim Ausfall-Winterraps im Jahr 2007 ein Anstieg bis auf 4,5 mm/d zu verzeichnen war. Im Juli und August der Jahre 2008 und 2012 war es trocken bis niederschlagsnormal. Erst nach einem flachen Stoppelsturz Mitte August begann sich ein Bestand aus Ausfall-Winterweizen zu entwickeln. Anfang Oktober 2008 war eine Bestandeshöhe von 8 bis 14 cm und ein Bedeckungsgrad von 8 bis 42 % festzustellen und Mitte September 2012 eine Bestandeshöhe von 11 cm und ein Bedeckungsgrad von 23 bis 53 %. Der üppigere Wuchs im Jahr 2012 ist im Zusammenhang mit den im Vergleich zu 2008 höheren Niederschlägen zu sehen. Insgesamt verdunstete der Ausfallweizen von Anfang August bis Ende September 66 mm im Jahr 2008 und 104 mm im Jahr 2012. In beiden Jahren war die Wasserbilanz in etwa ausgeglichen. Das bedeutet, dass auch bei einem Aufwuchs von Ausfall-Winterweizen der im August und September im Normaljahr fallende Niederschlag vollständig verdunstet werden kann.

Tabelle 5: Evapotranspiration von Brache mit Bewuchs von Ausfallraps und –weizen.

Boden/Jahr	Evapotranspiration											Nieder- schlag	Wasser- bilanz
	Juli/ Dek. 2. 3. Σ mm/d mm			August/ Dek. 1. 2. 3. Σ mm/d mm			September/ Dek. 1. 2. 3. Σ mm/d mm			$\Sigma\Sigma$ mm	$\Sigma\Sigma$ mm		
Ausfall-Winterraps													
k/ 2007	2,0	2,6	50	2,7	2,5	1,4	68	1,4	1,6		30	313	+165
lö/ 2007	1,8	3,2	53	4,0	3,2	1,3	86	1,4	1,7		31		+143
k/ 2011	2,1	1,6	44	2,6	1,5	1,8	61	1,8	2,0		36	194	+53
lö/ 2011	2,3	1,6	47	2,7	1,5	1,9	64	1,8	2,0		37		+46
Ausfall-Winterweizen													
k/ 2008				1,5	1,6	1,4	46	1,1	0,4	0,8	24	74	+4
lö/ 2008				1,1	1,3	1,2	38	1,1	0,5	0,9	25		+11
k/ 2012				1,6	1,2	1,9	49	1,4	1,8	1,6	49	93	-5
lö/ 2012				1,5	1,1	2,2	50	1,8	1,9	1,6	53		-10

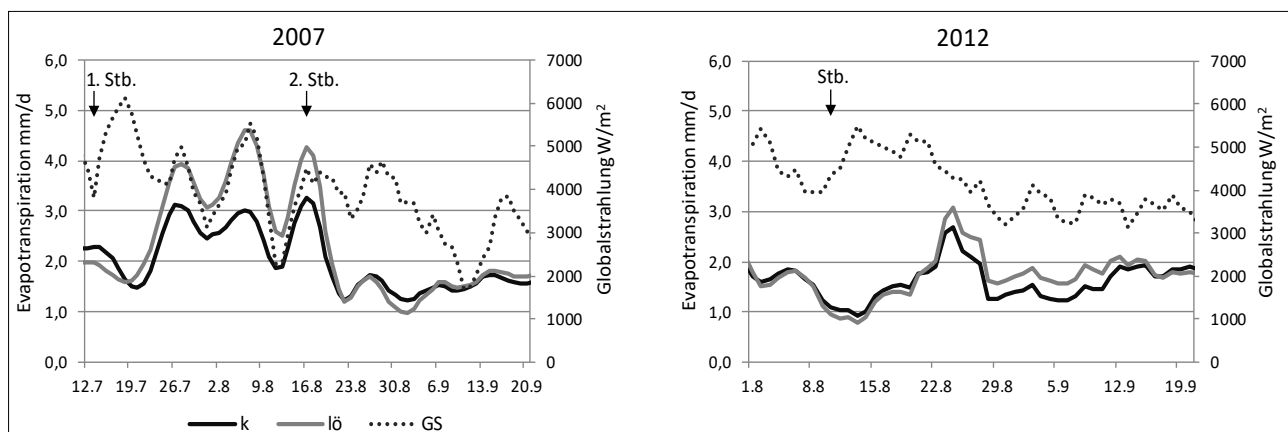


Abbildung 1: Evapotranspiration von Brache mit Bewuchs von Ausfallraps (2007) und Ausfallweizen (2012) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Pentadenmittel).

Tabelle 6: Evaporation von Stroh breit im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2010).

Var.		Evaporation			Niederschlag		
		23.-25.7. mm/d	Stroh breit	27.7.-3.8. mm/d	5.-22.8. mm/d	23.7.-22.8. mm/d	
1	ohne Stroh +	2,13 ^a	Stroh breit	1,27 ^a	Stroh breit + flache Stb. (6cm)	1,68 ^a	4,7
2	ohne Stb	1,94 ^a	Stroh breit + flache Stb (6cm)	1,79 ^b	Stroh breit + flache Stb. (Forts.)	1,62 ^a	
Differenz		-0,19		+0,52		-0,06	
GD _{Tukey, 5%}		0,25		0,16			

Stb...Stoppelbearbeitung, Wiederholungszahl der Var.: 5

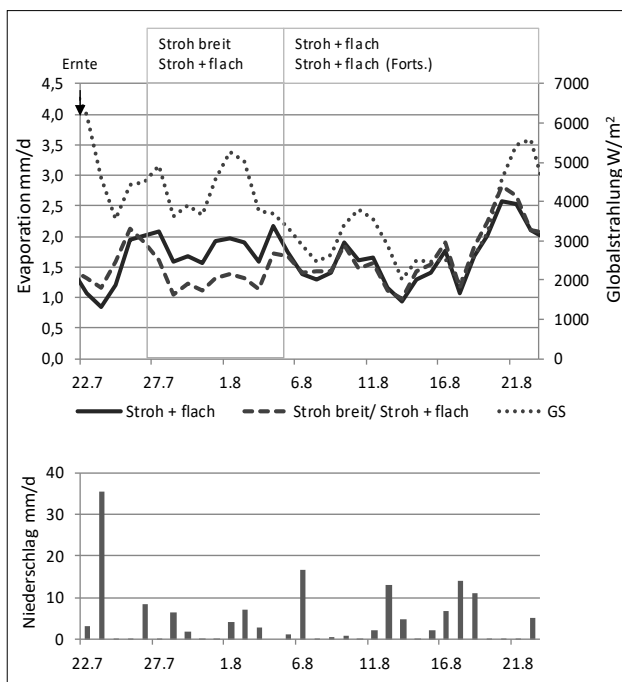


Abbildung 2: Evaporation von Stroh breit verteilt im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2010) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Dreitagewittel).

Wasserverbrauch von Strohbdeckung und verschiedener Varianten der Stoppelbearbeitung

Wasserverbrauch von Stroh breit im Vergleich zu flacher Stoppelbearbeitung

Der Wasserverbrauch einer mit Stroh häcksel bedeckten Bodenoberfläche lag im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh häcksel bedeckten Bodens um 0,52 mm/d niedriger im Mittel der folgenden 8 Tage (Tabelle 6). Der Unterschied war signifikant.

In einer sich daran anschließenden Periode, in der der mit Stroh häcksel bedeckte Boden ebenfalls einem flachen Stoppelsturz unterzogen wurde, glichen sich die Verdunstungswerte der beiden Varianten an und bestätigten die signifikante Minderung der Evaporation durch eine Strohecke im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz (Abbildung 2). Das Niederschlagsaufkommen von 4,7 mm/d war während des Untersuchungszeitraumes überdurchschnittlich. Der

Normalwert liegt bei 2,1 mm/d. Der Wasserverbrauch des nicht mit Stroh bedeckten und nicht bearbeiteten Bodens wenige Tage nach der Ernte von Winterweizen lag bei 2,0 mm/d. Während der nachfolgenden 8 Tage mit Strohbdeckung betrug die Verdunstung im Mittel 1,3 mm/d, wobei auch die Globalstrahlung etwas niedriger lag als unmittelbar nach der Ernte. Dennoch wird deutlich, dass der Wasserverlust von barem Boden unmittelbar nach der Ernte höher ausfällt als bei nachfolgender Strohbdeckung.

Wasserverbrauch von Strohabfuhr im Vergleich zu flacher Stoppelbearbeitung

Der nach der Ernte ohne Strohbdeckung und ohne Bearbeitung zurückgebliebene Boden verbrauchte im Vergleich zu einem mit Strohhäcksel bedeckten und flach bearbeiteten Boden 0,4 mm/d mehr Wasser über einen Zeitraum von 6 Tagen (Tabelle 7). Der Unterschied war signifikant.

Nachdem der Boden mit Strohhäcksel bedeckt und ebenfalls einem flachen Stoppelsturz unterzogen wurde glichen sich die Verdunstungswerte der beiden Varianten wieder an (Abbildung 3). Die höchsten Werte der Verdunstung traten mit durchschnittlich 2,4 mm/d während der viertägigen Periode nach der Ernte auf, in der der Boden keine Strohbdeckung hatte und nicht bearbeitet worden war. Während der Periode mit differenzierter Bewirtschaftung regnete es kaum und wurde durch einen flachen Stoppelsturz mit Stroh der Bodenwasservorrat im Vergleich zu einem unbedeckten Boden geschont. Die Niederschläge im Juli und August 2015 waren mit 2,3 mm/d etwas überdurchschnittlich.

Wasserverbrauch unterschiedlich tiefer Stoppelbearbeitung

Bei einem Stoppelsturz mit einer Bearbeitungstiefe von 14 cm lag die Evaporation in den folgenden 4 Tagen in beiden Versuchsjahren um etwa 0,3 mm/d höher als bei einem 6 cm tiefen Stoppelsturz (Tabelle 8). In beiden Jahren gab es in diesen ersten 4 Tagen kaum Niederschlag und wurde der zu Beginn vorhandene Bodenwasservorrat für die Verdunstung in Anspruch genommen.

In den darauffolgenden 13 bzw. 9 Tagen regnete es im Jahr 2016 durchschnittlich 4 mm/d und im Jahr 2018 2,8 mm/d. Die Verdunstung stieg daraufhin bei flacher Bearbeitung um 0,6 mm/d im Jahr 2016 und 0,7 mm/d im Jahr 2018 an. Bei tiefer Stoppelbearbeitung war die Zunahme um jeweils 0,2 mm/d stärker ausgeprägt (Abbildung 4). Im Mittel dieses niederschlagsreichen Abschnittes lag die Verdunstung bei tiefer Stoppelbearbeitung um 0,47 mm/d

Tabelle 7: Evaporation von Strohabfuhr im Vergleich zu flachem Stoppelsturz mit Stroh (2015).

Var.		Evaporation			Niederschlag		
		28.-31.7. mm/d	2.-7.8. mm/d	5.-22.8. mm/d	23.7.-22.8. mm/d		
1	ohne Stroh +	2,32 ^a	Stroh breit + flache Stb (6cm)	0,80 ^a	Stroh breit + flache Stb. (Forts.)	1,02 ^a	2,3
2	ohne Stb	2,40 ^a	ohne Stroh + ohne Stb	1,21 ^b	Stroh breit + flache Stb. (6cm)	1,01 ^a	
Differenz		+0,08		+0,41		-0,01	
GD _{Tukey, 5%}		0,28		0,14		0,06	

Stb...Stoppelbearbeitung, Wiederholungszahl der Varianten: 8

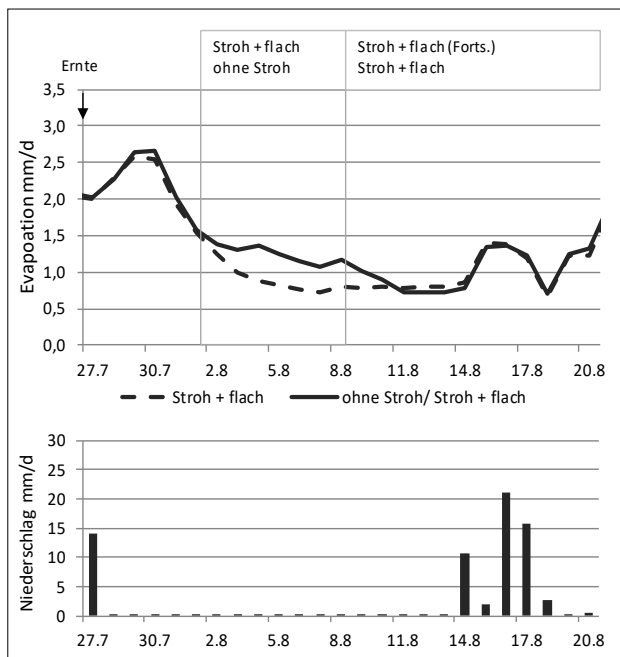


Abbildung 3: Evaporation von flachem Stoppelsturz mit Stroh im Vergleich zu einem unbedeckten und unbearbeiteten Boden (2015) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Dreitagesmittel).

im Jahr 2016 und um 0,48 mm/d im Jahr 2018 höher als bei flacher Bearbeitung.

Daran schloss sich in den folgenden 10 d in beiden Jahren eine sehr trockene Periode an mit 0,2 mm Niederschlag/d. Zwischen tiefer und flacher Bearbeitung war kein Unterschied mehr erkennbar.

Im Untersuchungszeitraum vom 22.7. bis 17.8.2016 regnete es insgesamt 58 mm. Davon wurden bei flacher Stoppelbearbeitung 39 mm und bei tiefer Stoppelbearbeitung 48 mm für die Verdunstung verbraucht. Somit blieben bei flacher Stoppelbearbeitung 9 mm mehr Wasser im Bodenwasserspeicher zurück.

Im Versuchsjahr 2018 betrug der Niederschlag vom 24.7. bis 16.8. insgesamt 28 mm und unterschied sich die Evaporation zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung um 7 mm, in etwa vergleichbar mit dem Jahr 2016.

Auffällig ist, dass in beiden Jahren in den ersten 4 d nach der tiefen Stoppelbearbeitung die Verdunstung bei der tonreicheren Para-Rendzina deutlich höher ausfiel als beim Löß. Einer Ansprache des Bodengefüges im Jahr 2018 zu-

folge wies die Para-Rendzina bei tiefer Stoppelbearbeitung ein überwiegend mittleres Bröckelgefüge auf, während beim Lößboden ein überwiegend feines Bröckelgefüge zu verzeichnen war. Vermutlich war der größere Luftanteil im größeren Bröckelgefüge der Para-Rendzina für die höhere Verdunstung verantwortlich. In der darauffolgenden niederschlagsreicheren Periode lag die Verdunstung beim Lößboden bei beiden Bearbeitungstiefen etwas höher als bei der tonreicheren Rendzina. Insgesamt fiel der Unterschied zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung beim Lößboden weniger stark aus als bei der Rendzina.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Nach der Ernte aufwachsender Bewuchs mit Ausfall-Winterraps hat in zwei Versuchsjahren bis Ende der 2. Septemberdekade, d.h. vor Grundbodenbearbeitung und Aussaat einer Folgekultur 141 bis 170 mm Wasser verbraucht. Das entsprach in etwa dem in diesem Zeitraum normalen Niederschlag. Durch eine zweite Stoppelbearbeitung, die in einem der beiden Jahre Mitte August durchgeführt wurde, konnte eine erhebliche Minderung der Evapotranspiration erreicht werden. Für den Bewuchs mit Ausfall-Winterweizen wurde in zwei Versuchsjahren von Anfang August bis Ende September ein Wasserverbrauch von 66 bis 100 mm ermittelt. Die Witterung war trocken bis niederschlagsnormal und die Evapotranspiration reichte auch in diesem Zeitraum bis an den Normalwert heran. In Trockengebieten, in denen der Bodenwasservorrat mittel- bis tiefgründiger Lehmböden häufig nicht vollständig aufgefüllt wird, kann dieser hohe Wasserverbrauch den Ertrag der folgenden Hauptkultur schmälern. Diesem unproduktiven Verdunstungsverlust sollte deshalb durch mehrmaliges Mulchen oder flache Bodenbearbeitung entgegengewirkt werden.

Im Versuchsjahr 2010 führte die Bedeckung des Bodens mit Stroh im Vergleich zu einem flachen Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh bedeckten Bodens zu einer signifikanten Minderung der Evaporation um 0,5 mm/d. Im Versuchsjahr 2015 zeigte sich andererseits, dass im Vergleich zu einem unbedeckten, unbearbeiteten Boden ein flacher Stoppelsturz eines zuvor mit Stroh bedeckten Bodens die Evaporation um 0,4 mm/d zu senken vermochte.

Die Evaporation wird maßgeblich beeinflusst von der Einstrahlungsenergie und dem Albedo der Bodenoberfläche. Der Albedo entscheidet darüber, wieviel von der eingestrahelten Energie an die Atmosphäre zurückgestrahlt wird. Je höher der Albedo, desto weniger steht für die Umsetzung der Energie in Verdunstung und die Ableitung fühlbarer

Table 8: Evaporation von flachem im Vergleich zu tiefem Stoppelsturz mit Stroh (2016, 2018).

Var.	Evaporation										Niederschlag
	13.-20.7.16		22.7.-25.7.16			26.7.-7.8.16			8.-17.8.16		13.7.-17.8.16
	mm/d		Nied.: 0,8 mm/d mm/d			Nied.: 4,0 mm/d			Nied.: 0,2 mm/d		mm/d
	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	
1	ohne Stroh 1,49 ^a	Stroh + flache Stb. (6 cm) 1,24 1,04 1,18 ^a			1,69	2,01	1,80 ^a	1,05	1,11	1,07 ^a	2,0
2	ohne Stroh 1,48 ^a	Stroh + tiefe Stb. (14 cm) 1,77 1,17 1,47 ^b			2,17	2,38	2,28 ^b	1,20	1,05	1,12 ^a	
Diff.	-0,01	+0,53	+0,13	+0,29	+0,48	+0,37	+0,48	+0,15	-0,06	+0,05	
GD	0,21			0,27			0,18			0,14	
	20.-22.7.18		24.-27.7.18			28.7.-5.8.18			6.-16.8.18		20.7.-16.8.18
	mm/d		Nied.: 0,04 mm/d mm/d			Nied.: 2,8 mm/d			Nied.: 0,2 mm/d		mm/d
	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	k	lö	Ø	
1	Stroh breit 0,73 ^a	Stroh + flache Stb. (6 cm) 1,02 ^a 0,96 ^a 0,99 ^a			1,52 ^a	1,94 ^a	1,73 ^a	0,86 ^a	0,80 ^a	0,83 ^a	1,2
2	Stroh breit 0,72 ^a	Stroh + tiefe Stb. (14 cm) 1,48 ^a 1,19 ^a 1,30 ^b			2,09 ^a	2,26 ^a	2,20 ^b	1,05 ^a	0,73 ^a	0,85 ^a	
Diff.	-0,01	+0,46	+0,23	+0,31	+0,57	+0,33	+0,47	+0,19	-0,07	+0,02	
GD	0,03	0,10	0,11	0,10	0,11	0,16	0,16	0,14	0,10	0,11	

Stb...Stoppelbearbeitung GD...Grenzdifferenz, Tukey, Diff...Differenz zwischen Var. 2 und 1, Wiederholungszahl der Varianten: 6 (2016) und 8 (2018)

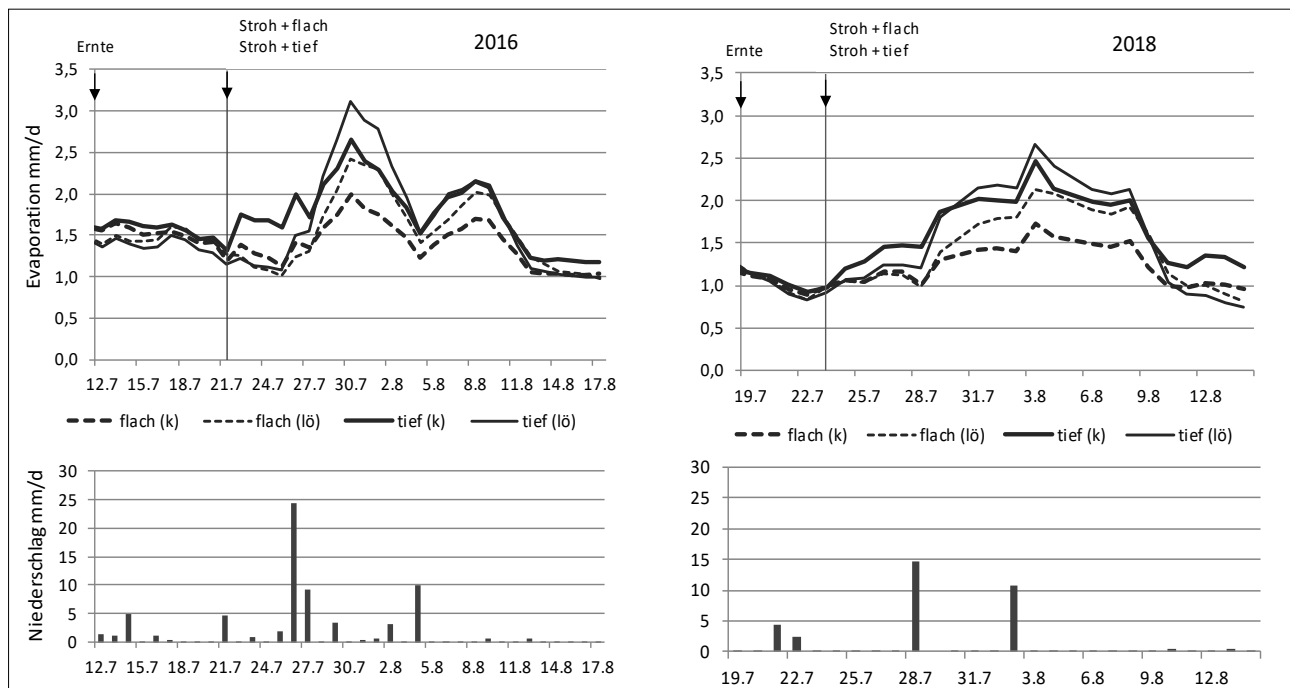


Abbildung 4: Evaporation von flachem Stoppelsturz mit Stroh im Vergleich zu tiefem Stoppelsturz mit Stroh (2016, 2018) im zeitlichen Verlauf (gleitendes Pentadenmittel).

Wärme an die Atmosphäre zur Verfügung (Scheffer & Schachtshabel 2010). Bei einer geschlossenen Strohecke ist der Albedo höher als bei einer durch flachen Stoppelsturz erzeugten Mischschicht aus Boden und Stroh, die im Versuchsjahr 2010 einen Stroheckegrad von etwa 50 % aufwies. Durch eine vollständig mit Stroh bedeckte Bodenoberfläche wird somit der Anteil der für die Verdunstung des Bodenwassers wirksamen Energieeinstrahlung

stärker vermindert als bei einem Gemisch aus Stroh und Boden. Die Verdunstung wird des Weiteren bestimmt vom Sättigungsdefizit der oberflächennahen Luft, dem Potenzialgradienten zum oberflächennahen Bodenwasser, der ungesättigten Wasserleitfähigkeit des Bodens und der Windgeschwindigkeit. Durch eine Strohecke wird der sich in der bodennahen Luftschicht ansammelnde Wasserdampf vor dem Abtransport durch den Wind länger geschützt, wo-

durch der den Wasserdampffluss antreibende Gradient zum oberflächennahen Bodenwasser länger geringer gehalten wird. Die bei einem flachen Stoppelsturz erzeugte dickere und mit Bodenteilchen vermischte Schicht kann mehr Niederschlagswasser speichern. Gleichzeitig begünstigen die durch Lockerung hergestellten Hohlräume Luftturbulenzen, die den aus den Bodenaggregaten austretenden Wasserdampf schneller zur Atmosphäre abtransportieren können. Das bedeutet der vergrößerte Bodenwasserspeicher der Stroh-Boden-Schicht wird auch schnell wieder entleert bei entsprechenden Bedingungen der Einstrahlung. Begünstigt wird dieser Prozess durch eine verminderte Wärmeleitfähigkeit der gelockerten Schicht (Bachmann 1997). Hohe Temperaturen werden weniger in den Unterboden übertragen, verbleiben in der gelockerten Schicht und erhöhen die Evaporation.

Der höhere Wasserverbrauch eines nach der Ernte baren und unbearbeiteten Bodens im Vergleich zum flachem Stoppelsturz mit Stroh kann einerseits mit dem geringeren Albedo und der dadurch höheren Einstrahlungsenergie, andererseits mit dem schnelleren Abtransport des aus dem Boden austretenden Wasserdampfes durch den Wind erklärt werden.

Zwischen flacher und tiefer Stoppelbearbeitung eines mit Stroh bedeckten Bodens zeigte sich in den Versuchsjahren 2016 und 2018 unter dem Einfluss niederschlagsnormaler und trockener Witterung ein signifikanter Unterschied. Tiefere Bearbeitung führte in den folgenden 17 bzw. 13 Tagen zu einer um 0,44 bzw. 0,42 mm/d höheren Verdunstung. Ein Aspekt dafür ist der bei tieferer Bearbeitung geringere Bedeckungsgrad mit Stroh und der daraus folgenden höheren Einstrahlungsenergie.

In den ersten 4 Tagen war das Niederschlagsaufkommen sehr gering und resultierte der Wasserverbrauch vor allem aus dem zuvor vorhandenen Bodenwasservorrat. Der Unterschied zwischen flacher und tiefer Bearbeitung war in diesen Tagen bei der lehmig-tonigen Rendzina deutlich stärker ausgeprägt als beim lehmig-schluffigen Lössboden. Die Rendzina wies nach der Bearbeitung ein mittleres bis grobes Bröckelgefüge auf, während beim Lössboden ein feinbröckeliges Gefüge festzustellen war. Das bei der Rendzina gröbere Gefüge hatte offenbar stärker als beim Lössboden Luftturbulenzen begünstigt, wodurch es zu einer höheren Verdunstung kam.

In der darauffolgenden niederschlagsreichen Phase stieg die Verdunstung des tiefer bearbeiteten Lössbodens besonders stark an und lag etwas über dem Wert der tief bearbeiteten Rendzina. Vermutlich war nun die bessere ungesättigte Wasserleitfähigkeit des sehr feinen bis feinen Bröckelgefüges des Lössbodens für den starken Anstieg der Verdunstung des bis in 14 cm Tiefe bearbeiteten Bodens ausschlaggebend. Überraschenderweise fiel in dieser niederschlagsreichen Periode auch die Verdunstung des flach bearbeiteten Lössbodens höher aus als die der flach bearbeiteten Rendzina. Dem Lössboden ist nicht nur wegen seines schluffig-lehmigen Substrates, sondern auch wegen seines Nadelstichporengefüges eine im Vergleich zur lehmig-tonigen Rendzina bessere Wasserleitfähigkeit zuzuordnen. Möglicherweise haben beide Eigenschaften den höheren Wasserverlust über Evaporation auch aus dem unbearbeiteten, oberflächennahen Bodenhorizont begünstigt. Ein weiterer Aspekt für die Verdunstungsunterschiede zwischen flacher und tiefer Bearbeitung ist auch hier die geringere Wärmeleitfähigkeit einer gelockerten Schicht, wodurch die Temperatur in dieser Schicht höher bleibt. Bei tieferer Bearbeitung wird dadurch ein größerer Bodenwasserspeicher einer höheren Temperatur ausgesetzt und die Verdunstung dadurch begünstigt.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass eine Strohecke nach Aberntung der Kulturen den Wasserverlust aus dem Boden am stärksten mindern kann. Eine Stoppelbearbeitung, die aus ackerbaulicher Sicht eine wichtige Maßnahme darstellt (Begünstigung des Aufwuchses von Ausfallgetreide, Förderung der Umsetzung der organischen Substanz, Zurückdrängen von Schaderregern etc.) sollte zur Vermeidung hoher Verdunstungsverluste so flach wie möglich ausgeführt werden. Bei Trockenheit kann es zur Vermeidung hoher Verdunstungsverluste günstig sein, die tiefere Bodenbearbeitung soweit wie möglich in eine strahlungsärmere Periode hinauszuzögern. Das dabei hergestellte Gefüge sollte nicht zu grob sein, um den Abtransport des Wassers durch Luftturbulenzen zu fördern und die nach oben abschließende Schicht nicht zu fein, um die kapillare Wassernachlieferung zu begünstigen.

Literatur

- Bachmann J. (1997) Wärmefluss und Wärmehaushalt. In Blume et al.: Handbuch der Bodenkunde, Kap. 2.7.5.
Scheffer/ Schachtschabel (2010) Lehrbuch der Bodenkunde. S. 239 ff.