

Entscheidungshilfe Bodendruck

Grundlagen

1. Zu prüfende Schätzformel zur Berechnung des Bodendrucks

Nach NEWMARK (siehe DVWK 1995):

$$\text{Mittlerer theoretischer Bodendruck } \delta_z = \delta_o \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1\right]^{vk}}} \right\}$$

δ_o = Kontaktflächendruck [kPa];

r = Radius der der Reifenkontaktfläche [cm], berechnet als Äquivalentradius eines Kreises

z = Bodentiefe

vk = Konzentrationsfaktor (Faktor für die Konzentration der Spannung um die Lastachse)

2. Verwendete Formeln für maschinenseitige Eingabe

Kontaktfläche

Für Reifen nach INNS & KILGOUR (1978) mit A = Reifenbreite x Reifendurchmesser x 0,27.

Für Gleisbänder: Breite x Länge der aufliegenden Bandfläche

Radlastschätzung

Anhand der Maschinenangaben.

Bei angebauten oder aufgesattelten Geräten an Traktoren sowie bei Bodenbearbeitung wurden die Hinterachslasten der Traktoren wie folgt ermittelt:

Anbaugeräte: Maschinengewicht [kg] x 1,3 (WERNER und PAUL, 1993);
auf die Hinterachse des Traktors dazugerechnet

Aufsattelgeräte: Stützlast [kN] laut Datenblatt der Maschine;
auf die Hinterachse des Traktors dazugerechnet

Anhängergeräte: keine Berücksichtigung von möglicher zusätzlicher Achslast

Bodenbearbeitung: Achslast der Hinterachse des Traktors [kg] x 1,4

3. Messwerte zur Validierung

Tabelle 1: Gemessene vertikale Bodenspannungen (DMS-Sensor; n=3) landwirtschaftlicher Maschinen in 20 cm und 40 cm Bodentiefe bei geringer Bodenwasserspannung ($pF \leq 2$) in gepflügten und konservierend bestellten Böden in Sachsen, Kenndaten der Maschinen sowie Bodenfeuchten bei der Messung; Vorderrad = (v), Hinterrad = (h); (*) = fehlerhafter Messwert, nicht in den Vergleich einbezogen

Arbeitsgang	Standort	Datum	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Mittlere Kontaktfläche (berechn.) [m ²]	Reifen-nen-druck [bar]	Radlast ⁽¹⁾ [kg]	Wasser-span-nung pF-Wert		gemessener Bodendruck [kPa] n=3				Achse	
										geplügter Boden		konservierend bestellter Boden			
										20 cm	40 cm	20 cm	40 cm		
Schwergrubbern:	Glesien	23.03.04	Challenger E95 mit Schwergrubber Lemken Smaragd	300 x 70 cm	2,10	-	12474	1-2	1-2			169	69	1.	
Spritzen:	Großstolpen	19.07.04	Traktor MTS 50	9-20 (v)	0,06	2,0	605	2	2			184	1	1.	
				9-42 (9.5-42) (h)	0,09	1,8	1525	2	2			338	13	2.	
				Spritze Holder 250 9.5R48	0,11	2,2	1850	2	2			298	28	3.	
	Wildenhain	14.05.04	Traktor Belarus	11.2-20 (v)	0,07	1,8	645	1-2	1-2	164	0				1.
				12.4-38 (h)	0,13	1,8	1755	1-2	1-2	269	2				2.
				Spritze BBG S330 9.5R48	0,11	3,5	2500	1-2	1-2	46	6				3.
	Lüttewitz	12.04.02	Traktor JD 3650	16.9R28 (v)	0,16	1,4	1350	2	2	227	14	206	21		1.
				18.4R38 (h)	0,22	1,4	2000	2	2	289	37	303	49		2.
				Spritze Amazone 18.4R38	0,22	1,5	2600	2	2	263	62	345	87		3.
Zschortau	23.04.02	Spritze Matrot	650/75R34 (v)	0,36	1,6	3250	2	2	196	97	191	73		1.	
Mähdreschen:	Köllitsch	09.08.01	Claas Lexion 450	650/75R32 (v)	0,32	2,8	8295	2	2	272	165	(330*)	304	1.	
				500/60-26.5 (h)	0,17	H2O	3553	2	2	241	123	(309*)	230	2.	
	Threna	24.11.04	Claas Lexion 480	200 x 65 cm (v)	1,30	-	10050	2	2			213	51	1.	
			mit Gleisband	500/70R24 (h)	0,17	3,9	3000	2	2			387	118	2.	
Kartoffelroden:	Frohburg (Elbitz)	19.10.04	Grimme KS 3000A	270/95R48 (v)	0,13	2,1	3000	2	2			24	9	1.	
				mit Gleisband	210 x 64 cm (h)	1,34		9500	2	2			60	17	2.
Erntetransport:	Köllitsch	09.08.01	Fendt 824	600/65R34 (v)	0,26	1,2	1600	2	2	103	33	111	45	1.	
				710/70R38 (h)	0,37	1,2	2345	2	2	179	56	188	106	2.	
				Lomma	445/65R22.5 (v)	0,14	6,8	4750	2	2	(330*)	150	(330*)	197	3.
	Köllitsch	09.08.01	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	0,19	1,0	1400	2	2	66	30	134	40	1.	
				710/70R38 (h)	0,38	1,6	3500	2	2	133	74	157	88	2.	
				Annaburger HTS 20.12	600/55-26.5 (v)	0,21	2,4	4500	2	2	189	98	291	165	3.
Gülle:	Köllitsch	09.08.01	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	0,19	1,0	1400	2	2	92	15	130	92	1.	
				710/70R38 (h)	0,38	1,6	3250	2	2	170	45	172	131	2.	
				HTS 102.27	550/60-22.5 (v)	0,18	2,4	3000	2	2	181	75	130	107	3.
Köllitsch	09.08.01	Traktor Fendt 824	600/65R34 (v)	0,26	1,2	1600	2	2			132	48	1.		
			710/70R38 (h)	0,37	1,2	3500	2	2			217	151	2.		
			Fuchs	600/55-26.5 (v)	0,22	2,2	4000	2	2			300	238	3.	
Traktor mit verschiedenen Reifen:	Methau		Traktor MF 3690	540/65R30 (v)	0,22	1,5	1520	2	2	131	31	144	22	1.	
				20.8R42 (h)	0,28	1,0	2280	2	2	169	33	81	15	2.	
				Traktor MF 3690	480/70R30 (v)	0,19	1,5	1520	2	2	169	40	142	32	1.
				580/70R42 (h)	0,30	1,3	2280	2	2	135	35	120	29	2.	
				Traktor MF 3690	48x25.00-20NHS (v)	0,21	0,8	1520	2	2	0	0	0	0	1.
			66x43.00-25NHS (h)	0,48	0,8	2280	2	2	30	0	40	30	2.		
Traktoren:	Köllitsch (Rüsterg.)	07.06.01	Traktor John Deere	480/70R30 (v)	0,19	1,0	1400	2	-	-	143	61	1.		
				710/70R38 (h)	0,38	1,6	2500	2	-	-	171	73	2.		
	Köllitsch (Rüsterg.)	14.06.01	Traktor John Deere	480/70R30 (v)	0,19	1,0	1400	2	79	37	203	69	1.		
				710/70R38 (h)	0,38	1,6	2500	2	144	63	225	100	2.		

v = Vorderachse; m = Mittelachse; h = Hinterachse; "- " = Messensoren ausgefallen

* = Messgrenze bei 330 kPa erreicht

1) statische Radlast; Berechnung siehe "Methoden"

4. Validierung

Berechnung mit Konzentrationsfaktoren nach SÖHNE (1953) bzw. PAUL (2004):

vk = 5 für die gepflügten Oberböden (→ weicherer, feuchter Boden) und

vk = 4 für die konservierend bearbeiteten Böden und Unterböden (→ fester, feuchter Boden)

Tabelle 2: Gemessenen vertikale Bodenspannungen (DMS-Sensor; n=3) im Vergleich mit berechneten Werten nach NEWMARK

Arbeitsgang	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Bodendruck [kPa]								Achse
			gepflügter Boden				konservierend bestellter Boden				
			20 cm		40 cm		20 cm		40 cm		
gemessen	berechnet vk = 5	gemessen	berechnet vk = 4	gemessen	berechnet vk = 4	gemessen	berechnet vk = 4				
Schwergrubbern:	Challenger E95 mit Schwergrubber Lemken Smaragd	300 x 70 cm					169	56	69	52	1.
Spritzen:	Traktor MTS 50	9-20 (v)					184	63	1	44	1.
		9-42 (9.5-42) (h)					338	114	13	82	2.
	Spritze Holder 250	9.5R48					298	122	28	89	3.
	Traktor Belarus	11.2-20 (v)	164	64	0	41					1.
		12.4-38 (h)	269	109	2	74					2.
	Spritze BBG S330	9.5R48	46	185	6	122					3.
	Traktor JD 3650	16.9R28 (v)	227	69	14	48	206	63	21	48	1.
		18.4R38 (h)	289	78	37	56	303	72	49	56	2.
Spritze Amazone	18.4R38	263	101	62	73	345	94	87	73	3.	
Spritze Matrot	650/75R34 (v)	196	81	97	62	191	76	73	62	1.	
Mähreschen:	Claas Lexion 450	650/75R32 (v)	272	234	165	177			304	177	1.
		500/60-26.5 (h)	241	175	123	123			230	123	2.
	Claas Lexion 480 mit Gleisband	200 x 65 cm (v) 500/70R24 (h)					213 387	72 136	51 118	65 104	1. 2.
Kartoffelroden:	Grimme KS 3000A mit Gleisband	270/95R48 (v)					24	170	9	126	1.
		210 x 64 cm (h)					60	66	17	60	2.
Erntetransport:	Fendt 824	600/65R34 (v)	103	54	33	40	111	50	45	40	1.
		710/70R38 (h)	179	57	56	44	188	54	106	44	2.
	Lomma	445/65R22.5 (v)			150	186			197	186	3.
	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	66	62	30	44	134	58	40	44	1.
		710/70R38 (h)	133	83	74	65	157	78	88	65	2.
	Annaburger HTS 20.12	600/55-26.5 (v)	189	182	98	132	291	169	165	132	3.
Gülle:	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	92	62	15	44	130	58	92	44	1.
		710/70R38 (h)	170	77	45	60	172	73	131	60	2.
	HTS 102.27	550/60-22.5 (v)	181	138	75	98	130	127	107	98	3.
	Traktor Fendt 824	600/65R34 (v)					132	50	48	40	1.
710/70R38 (h)						217	81	151	66	2.	
Fuchs	600/55-26.5 (v)					300	148	238	116	3.	
Traktor mit verschiedenen Reifen:	TraktorMF 3690	540/65R30 (v)	131	60	31	44	144	56	22	44	1.
		20.8R42 (h)	169	72	33	54	81	68	15	54	2.
	TraktorMF 3690	480/70R30 (v)	169	68	40	48	142	63	32	48	1.
		580/70R42 (h)	135	68	35	51	120	64	29	51	2.
	TraktorMF 3690	48x25.00-20NHS (v)	0	61	0	44	0	57	0	44	1.
	66x43.00-25NHS (h)	30	44	0	35	40	41	30	35	2.	
Traktoren:	Traktor JohnDeere	480/70R30 (v)	-		-		143	58	61	44	1.
		710/70R38 (h)	-		-		171	56	73	46	2.
	Traktor JohnDeere	480/70R30 (v)	79	62	37	44	203	58	69	44	1.
	710/70R38 (h)	144	59	63	46	225	56	100	46	2.	

v = Vorderachse; m = Mittelachse; h = Hinterachse; "-": Messensoren ausgefallen

Tabelle 3 Güte der Schätzung des Bodendrucks in 20 cm Bodentiefe im Vergleich zur Messung; dargestellt als mittlere absolute Differenz und Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (B = Reifenbreite; D = Reifendurchmesser)

Bodentiefe	Bearbeitung	Reifenkategorien	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor	Mittlere absolute Differenz [kPa]	RMSE [kPa]	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
20 cm	Pflug	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 5	90	110	0,15
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				
	Kons.	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 4	121	139	0,18
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				

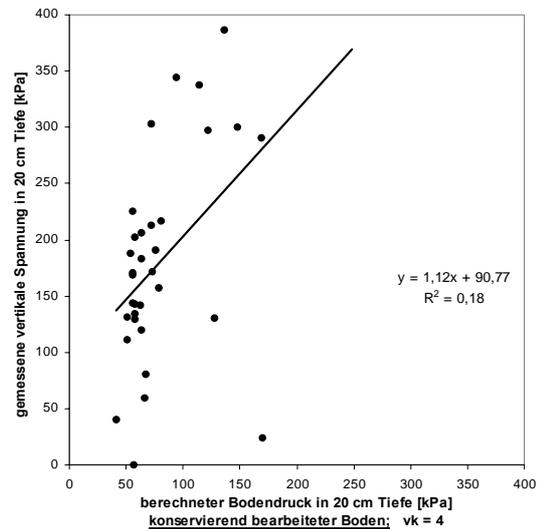
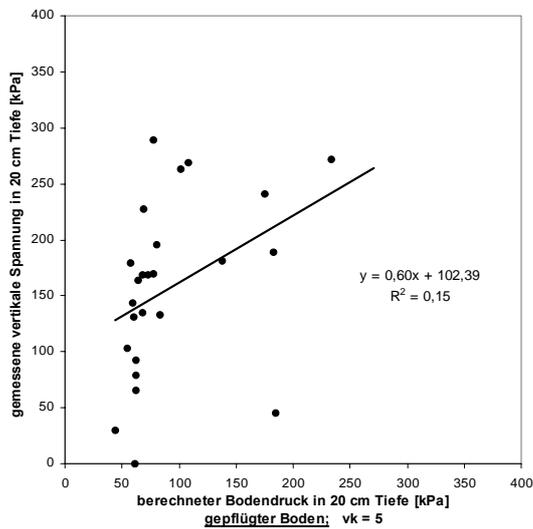


Abbildung 1 Vergleich gemessener vertikaler Spannungen (n = 3; DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Böden in 20 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $p_f \leq 2$); Konzentrationsfaktor vk = 5 (Pflug) und vk = 4 (konservierend)

Schlussfolgerung für 20 cm Bodentiefe:

- Vergleich der gemessenen Spannungen mit den berechneten Bodendrücken in 20 cm Tiefe zeigt keine gute Übereinstimmung der Werte (Abbildung 1).
 - Abweichungen zwischen berechneten Werten und den gemessenen vertikalen Spannungen bis zu 250 kPa
 - tendenziell werden Bodendrücke durch Berechnung unterschätzt
- Die dargestellte Berechnungsmethode eignet sich nicht für 20 cm Bodentiefe.

Tabelle 4 Güte der Schätzung des Bodendrucks in 40 cm Bodentiefe im Vergleich zur Messung; dargestellt als mittlere absolute Differenz und Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (B = Reifenbreite; D = Reifendurchmesser)

Bodentiefe	Bearbeitung	Reifenkategorien	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor	Mittlere absolute Differenz [kPa]	RMSE [kPa]	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
40 cm	Pflug	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 4	26	35	0,61
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				
	Kons.	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 4	39	53	0,51
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				

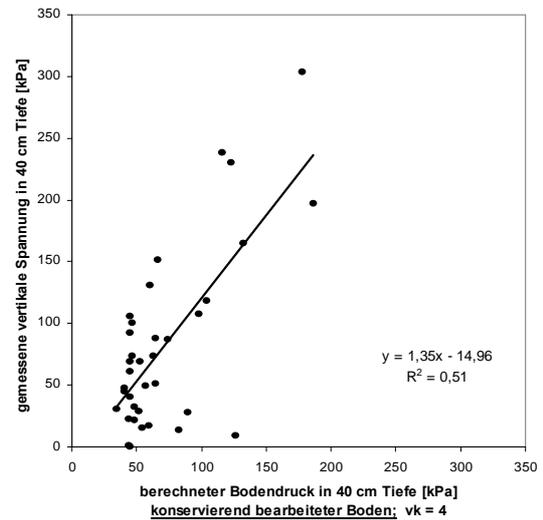
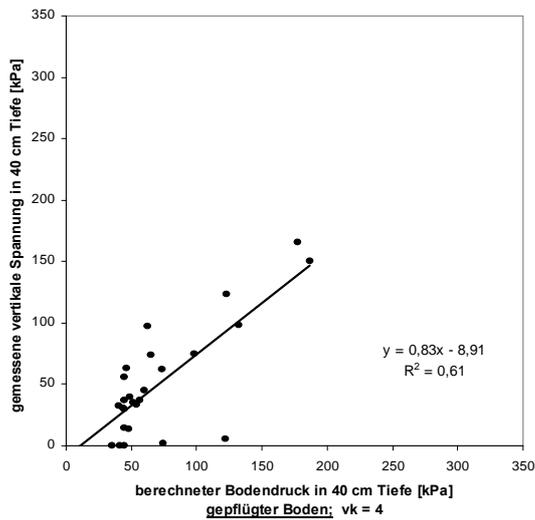


Abbildung 2 Vergleich gemessener vertikaler Spannungen (n = 3; DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden in 40 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $p_f \leq 2$); Konzentrationsfaktor vk = 4

Schlussfolgerung für 40 cm Bodentiefe:

- Vergleich der gemessenen Spannungen mit den berechneten Bodendrücken in 40 cm Tiefe zeigt, dass hier die Spannungseinträge der Maschinen relativ gut geschätzt werden (Abbildung 2)
- Bei konservierender Bodenbearbeitung werden allerdings die Bodendrücke bei der Berechnung tendenziell unterschätzt, während die Drücke unter den Pflegereifen (repräsentiert durch gemessene Drücke im Bereich 0-50 kPa) grundsätzlich überschätzt

werden, was damit zusammenhängt, dass sich die Drücke unter den kleinen Kontaktflächen schneller als bei den größeren Kontaktflächen in die Tiefe abbauen

5. Verbesserung der Schätzung

5a. Veränderung des Konzentrationsfaktors

Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation ist für beide Bodenbearbeitungsvarianten in 40 cm bei $vk = 3$ am höchsten:

Tabelle 5 Güte der Schätzung des Bodendrucks in 40 cm Bodentiefe im Vergleich zur Messung; dargestellt als mittlere absolute Differenz und Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (B = Reifenbreite; D = Reifendurchmesser)

Bodentiefe	Bearbeitung	Reifenkategorien	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor	Mittlere absolute Differenz [kPa]	RMSE [kPa]	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
40 cm	Pflug	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 3	20	29	0,62
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				
	Kons.	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 3	43	58	0,52
		Gleisbänder	Aufstandslänge \times B				

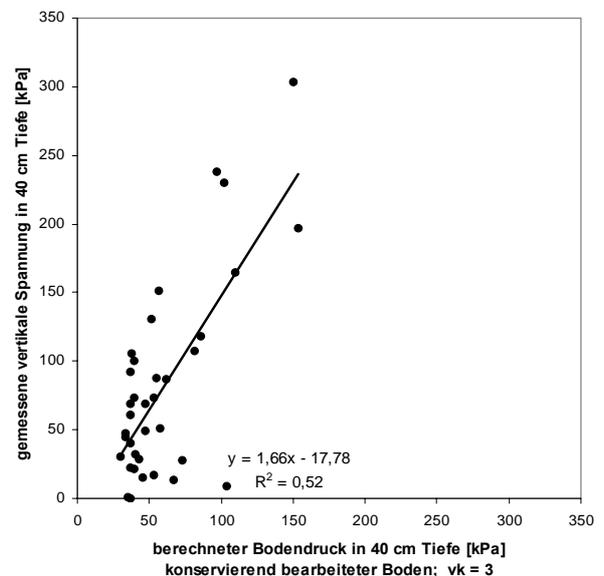
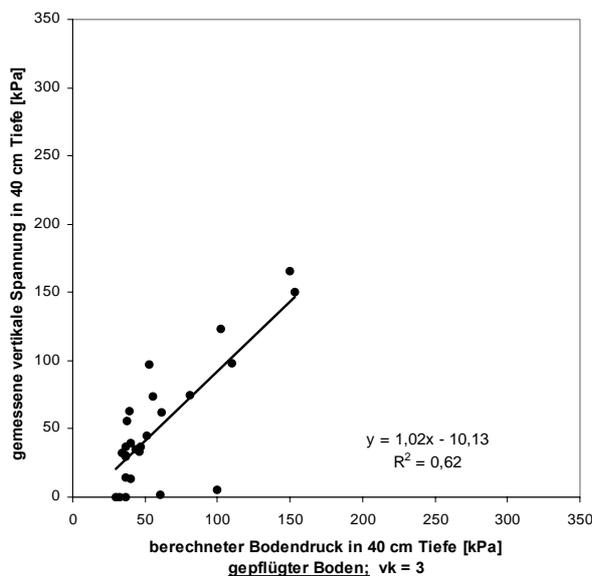


Abbildung 3 Vergleich gemessener vertikaler Spannungen ($n = 3$; DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden in 40 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $p_f \leq 2$); Konzentrationsfaktor $vk = 3$

Schlussfolgerung:

- Die Summe der quadratischen Abweichungen wird bei gepflügten Böden kleiner, während sie bei konservierend bearbeiteten jedoch zunimmt. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation wird durch Reduktion des Konzentrationsfaktors zwar etwas höher, dennoch ist es mit $R^2 = 0,62$ bzw. $R^2 = 0,52$ relativ niedrig.

5b. Variation der Kontaktflächenberechnung

Die tendenzielle Unterschätzung der Bodendrücke bei konservierender Bodenbearbeitung hängt vermutlich damit zusammen, dass die mittleren Kontaktflächen der meisten Reifen wahrscheinlich zu groß eingeschätzt werden.

Auf zwei Standorte in Sachsen (Abbildung und Abbildung) wurde exemplarisch unter Traktorhinterreifen (Traktor John Deere 3650: 18.4R38 und Traktor John Deere 4755: 710/70R38) die Reifenkontaktfläche auf verschieden bearbeitetem Boden gemessen. Die gemessenen Kontaktflächen auf den gepflügten Böden stimmten auf beiden Standorten relativ gut mit den berechneten mittleren Kontaktflächen überein. Die gemessenen Kontaktflächen auf den konservierend bearbeiteten Böden waren ca. 20 % und auf Direktsaat ca. 65 % kleiner als die berechneten Werte. Sehr wahrscheinlich sinken die Reifen auf den festeren konservierend bearbeiteten Standorten weniger in den Boden ein, so dass die Reifenkontaktflächen insgesamt kleiner sind.

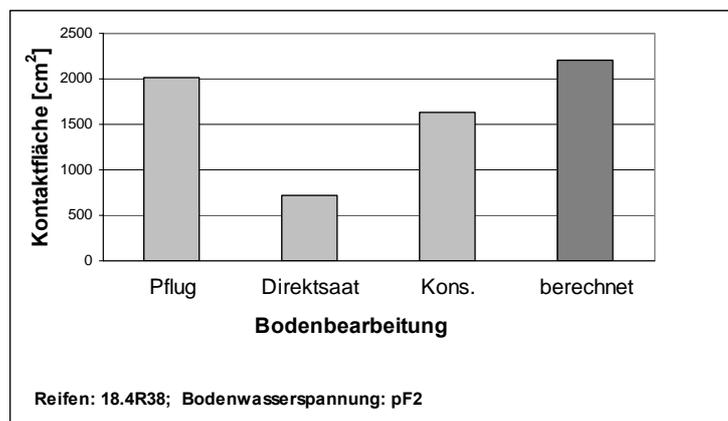


Abbildung 4 Gemessene Kontaktflächen und Stollenflächen im Vergleich zu berechneten Kontaktflächen unter einem Traktorhinterreifen (18.4R38; $p_i = 1,4$ bar) auf verschieden bearbeitetem Boden am Standort Lüttewitz

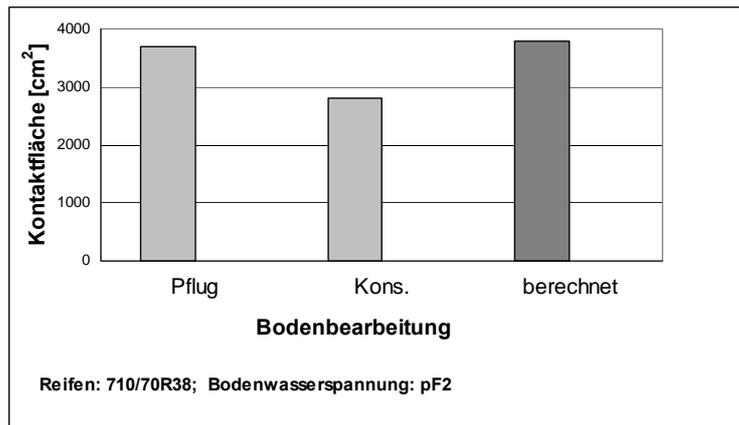


Abbildung 5 Gemessene Kontaktflächen im Vergleich zu berechneten Kontaktflächen unter einem Traktorhinterreifen (710/70R38; $p_i = 1,6$ bar) auf verschieden bearbeitetem Boden am Standort Köllitsch

Für konservierend bearbeitete Böden wurde daher die Berechnung der mittleren Kontaktfläche verändert. Die Annahme einer 20 % kleineren Kontaktfläche für Reifen auf konservierend bearbeitetem Boden führt zu einem besseren Ergebnis (RMSE = 52 kPa; $R^2 = 0,54$), jedoch kann dieses noch gesteigert werden, indem eine 50 % kleinere Kontaktfläche angenommen wird (RMSE = 50 kPa, $R^2 = 0,56$). Die Summe der quadratischen Abweichungen berechneter Werte von den gemessenen bei der Bodendruckberechnung in 40 cm Tiefe ist bei der Annahme einer nur halb so großen Kontaktfläche ($A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,13$) bei konservierend bearbeiteten Böden am kleinsten. Dies könnte dadurch zustande kommen, dass auf festem Boden die Druckunterschiede innerhalb der Kontaktfläche durch die Stollendrücke noch größer sind oder tiefer reichen und dadurch die maximalen Bodendrücke bis in 40 cm Tiefe noch höher sind.

Die Pflegereifen sanken bei den Messungen auf feuchtem gepflügtem Ackerboden stark ein, so dass von einer großen Kontaktfläche ausgegangen wird. Hier wurde durch die Kontaktflächenformel von MC KYES (1985) für weiche Böden mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,5$ eine Verbesserung der Ergebnisse erreicht. Für Pflegereifen auf dem festeren, konservierend bearbeitetem Boden wurde mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,27$ nach INNS & KILGOUR (1978) gerechnet.

Tabelle 6: Gemessenen vertikale Bodenspannungen (DMS-Sensor; n=3) im Vergleich mit berechneten Werten nach NEWMARK mit $vk = 3$ und differenziert berechneten Reifenkontaktflächen

Arbeitsgang	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Bodendruck [kPa]				Achse
			gepflügter Boden 40 cm		konservierend bestellter Boden 40 cm		
			gemessen	berechnet $vk = 3$ diff. Kontaktfläche	gemessen	berechnet $vk = 3$ diff. Kontaktfläche	
Schwergrubbern:	Challenger E95 mit Schwergrubber Lemken Smaragd	300 x 70 cm			69	47	1.
Spritzen:	Traktor MTS 50	9-20 (v)			1	35	1.
		9-42 (9.5-42) (h)			13	67	2.
	Spritze Holder 250	9.5R48			28	73	3.
	Traktor Belarus	11.2-20 (v)	0	21			1.
		12.4-38 (h)	2	39			2.
	Spritze BBG S330	9.5R48	6	64			3.
Traktor JD 3650	16.9R28 (v)	14	40	21	66	1.	
	18.4R38 (h)	37	47	49	80	2.	
	Spritze Amazone 18.4R38	62	61	87	104	3.	
Spritze Matrot	650/75R34 (v)	97	53	73	92	1.	
Mähdreschen:	Claas Lexion 450	650/75R32 (v)	165	150	304	258	1.
		500/60-26.5 (h)	123	102	230	170	2.
	Claas Lexion 480 mit Gleisband	200 x 65 cm (v) 500/70R24 (h)			51 118	58 143	1. 2.
Kartoffelroden:	Grimme KS 3000A mit Gleisband	270/95R48 (v)			9	104	1.
		210 x 64 cm (h)			17	53	2.
Erntetransport:	Fendt 824	600/65R34 (v)	33	34	45	57	1.
		710/70R38 (h)	56	38	106	65	2.
	Lomma	445/65R22.5 (v)	150	153	197	254	3.
	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	30	37	40	62	1.
		710/70R38 (h)	74	38	88	95	2.
	Annaburger HTS 20.12	600/55-26.5 (v)	98	110	165	185	3.
Gülle:	Traktor John Deere 4755	480/70R30 (v)	15	37	92	62	1.
		710/70R38 (h)	45	51	131	89	2.
	HTS 102.27	550/60-22.5 (v)	75	81	107	136	3.
	Traktor Fendt 824	600/65R34 (v)			48	57	1.
		710/70R38 (h)			151	97	2.
	Fuchs	600/55-26.5 (v)			238	163	3.
Traktor mit verschiedenen Reifen:	Traktor MF 3690	540/65R30 (v)	31	37	22	62	1.
		20.8R42 (h)	33	46	15	78	2.
	Traktor MF 3690	480/70R30 (v)	40	40	32	67	1.
		580/70R42 (h)	35	43	29	74	2.
	Traktor MF 3690	48x25.00-20NHS (v)	0	37	0	62	1.
		66x43.00-25NHS (h)	0	30	30	52	2.
Traktoren:	Traktor John Deere	480/70R30 (v)	-		61	62	1.
		710/70R38 (h)	-		73	68	2.
	Traktor John Deere	480/70R30 (v)	37	37	69	62	1.
		710/70R38 (h)	63	39	100	68	2.

v = Vorderachse; m = Mittelachse; h = Hinterachse; "-": Messensoren ausgefallen

Tabelle 7 Güte der Schätzung des Bodendrucks in 40 cm Bodentiefe im Vergleich zur Messung; dargestellt als mittlere absolute Differenz und Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung (B = Reifenbreite; D = Reifendurchmesser)

Bodentiefe	Bearbeitung	Reifenkategorien	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor	Mittlere absolute Differenz [kPa]	RMSE [kPa]	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
40 cm	Pflug	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 3	17	23	0,77
		Pflegereifen	$B \times D \times 0,5$				
		Gleisbänder	Aufstandslänge x B				
	Kons.	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,13$	vk 3	35	40	0,71
		Pflegereifen	$B \times D \times 0,27$				
		Gleisbänder	Aufstandslänge x B				

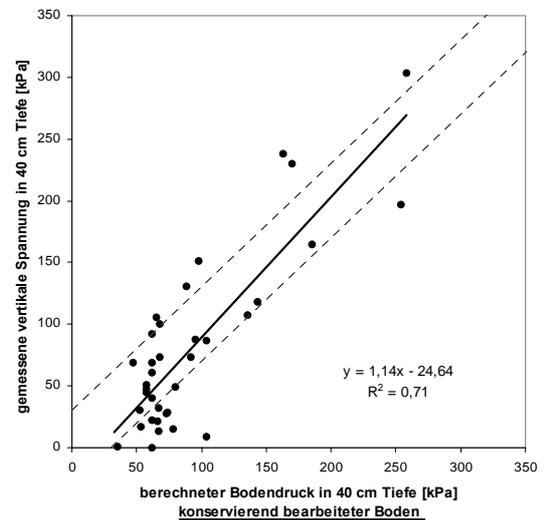
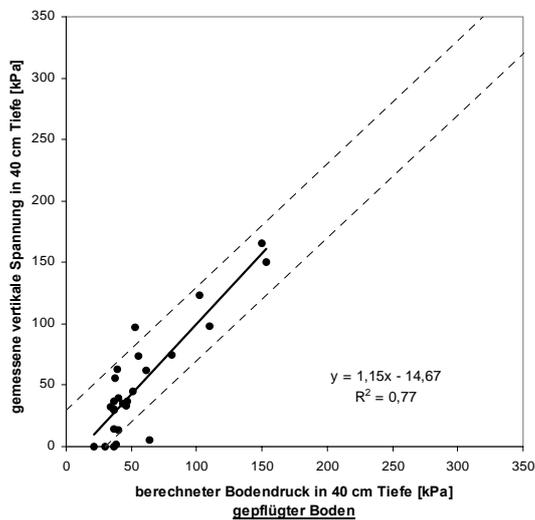


Abbildung 6 Korrelation gemessener vertikaler Spannungen ($n = 3$, DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken in gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden in 40 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $pF \leq 2$); Konzentrationsfaktor $vk = 3$, differenzierte Kontaktflächenberechnung

- Durch diese Annahmen konnte die Schätzung des Bodendrucks nach NEWMARK deutlich verbessert werden (7).
- Die Ergebnisse liegen zum großen Teil innerhalb eines Toleranzbereiches von ± 30 kPa, was dem Mittelwert der Streuungen der Messwerte in 40 cm Tiefe (Streuung der Ergebnisse von drei Druckdosen) entspricht, wobei die höchste Streuung bei den gemessenen Werten bei gepflügtem Boden bei 75 kPa und bei konservierend bearbeitetem Boden bei 105 kPa liegt (siehe STAHL et al. 2005). Angesichts der starken Streuung der Messwerte ist die Prognosegenauigkeit mit einer mittleren absoluten Differenz von 17 kPa (Pflug) bzw. 35 kPa (Kons.) und einem Root Mean Square Error (RMSE) von 23 kPa (Pflug) bzw. 40 kPa (Kons.) relativ gut (Tabelle 7).
- Bei konservierend bearbeitetem Boden sind die Abweichungen der Schätzwerte von den gemessenen Werten etwas stärker. Die geringeren Abweichungen bei gepflügten Böden könnten u. a durch das homogenere Gefüge im Oberboden und durch geringere Stollenwirkung bedingt sein.
- Die Drücke unter den Pflegereifen (repräsentiert durch gemessene Drücke im Bereich 0-50 kPa) werden noch grundsätzlich überschätzt. Da sie aber auch bei Berechnung unter 100 kPa liegen, hat diese Überschätzung eine untergeordnete Bedeutung.
- Gewisse Abweichungen der Prognoseergebnisse von den gemessenen Werten werden auch der Tatsache geschuldet sein, dass die Radlasten der Maschinen nicht gewogen werden konnten, sondern auf Grundlage von Maschinenangaben und Bunkerinhalten geschätzt wurden. Außerdem konnten dynamische Effekte, z.B. Gewichtsverlagerung durch die Zugkrafteinwirkung während der Fahrt, nicht berücksichtigt werden.

Schlussfolgerung:

Das dargestellte einfache Modell erlaubt demnach eine relativ gute Schätzung zu erwartender Bodendrücke unter landwirtschaftlichen Maschinen bei hoher Bodenfeuchte im Unterboden von gepflügten und von konservierend bearbeiteten Böden.

6. Formeln für die Schätzung des Bodendrucks in der Entscheidungshilfe

Für die Schätzung des Bodendrucks bei feuchten Bodenverhältnissen im Bereich von pF 1,8 – pF 2,5 wird somit auf Basis der Validierung wie folgt verfahren: siehe Tabelle 8

Tabelle 8 Konzentrationsfaktor und Berechnung der Kontaktfläche in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung in der Entscheidungshilfe Bodendruck

Bearbeitung	Reifenkategorien	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor
Pflug	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,27$	vk 3
	Pflegereifen	$B \times D \times 0,5$	
	Gleisbänder	Aufstandslänge x B	
Kons.	alle Reifenarten	$B \times D \times 0,13$	vk 3
	Pflegereifen	$B \times D \times 0,27$	
	Gleisbänder	Aufstandslänge x B	