



Bodenverdichtung durch Maschinenlast

**E. Diserens – Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften (INH)
Tänikon**





1. Bedeutung

- 1.1 Entwicklung der Maschinengrößen in der Landwirtschaft
- 1.2 Maschinenlast und Bodenschäden
- 1.3 Gesetz und Richtwerte

2. Parameter

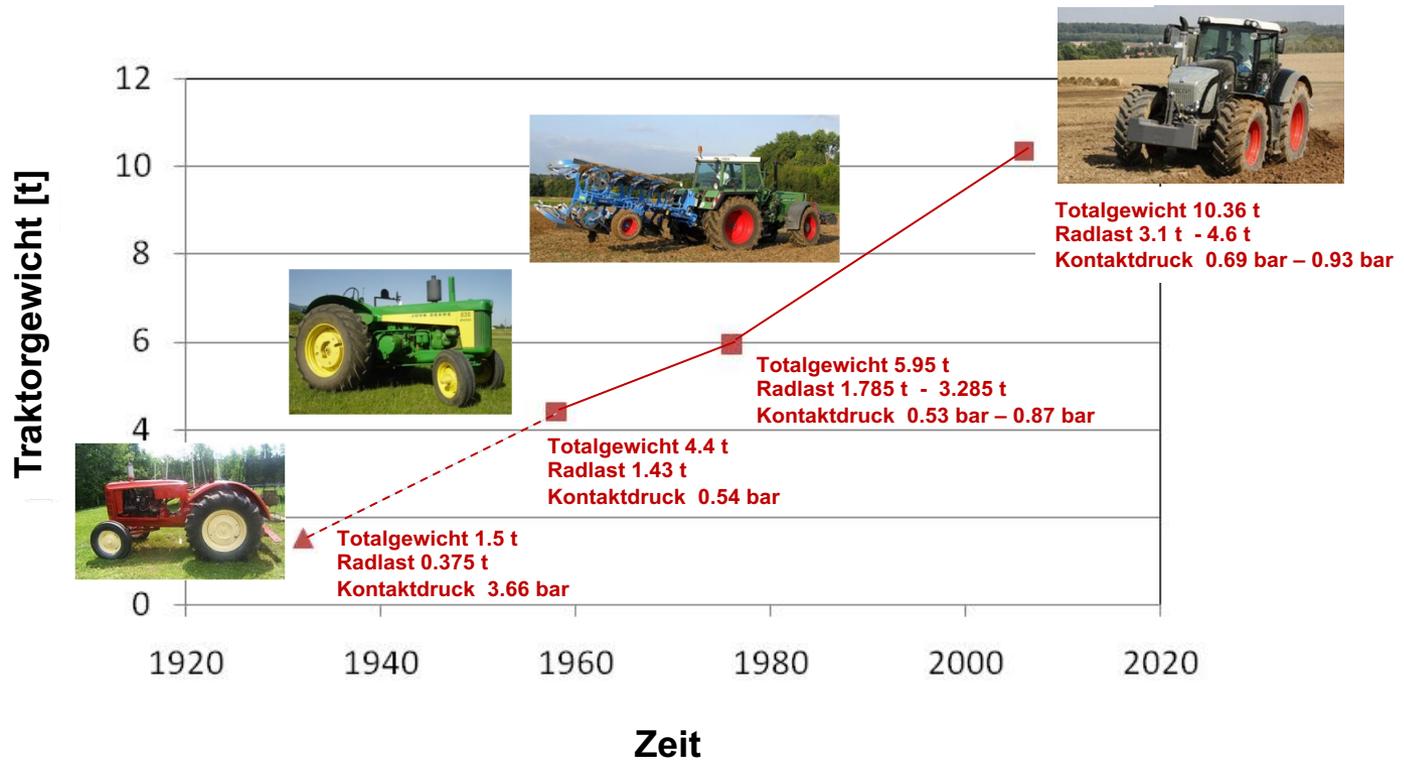
- 2.1 Last, Reifen, Reifennendruck, Druckspannung (Zusammenhang)
- 2.2 Kontaktfläche
- 2.3 Reifen
- 2.4 Reifendruckregelanlage
- 2.5 Fahrwerke

3. Bodenverdichtung - Beurteilungsprinzip

- 3.1 Prioritäten
- 3.2 TASC-Beurteilungsprinzip



Entwicklung der Traktoren



1936 - Massey-Harris 101S
5.5-16 / 11.2-24
23 kW

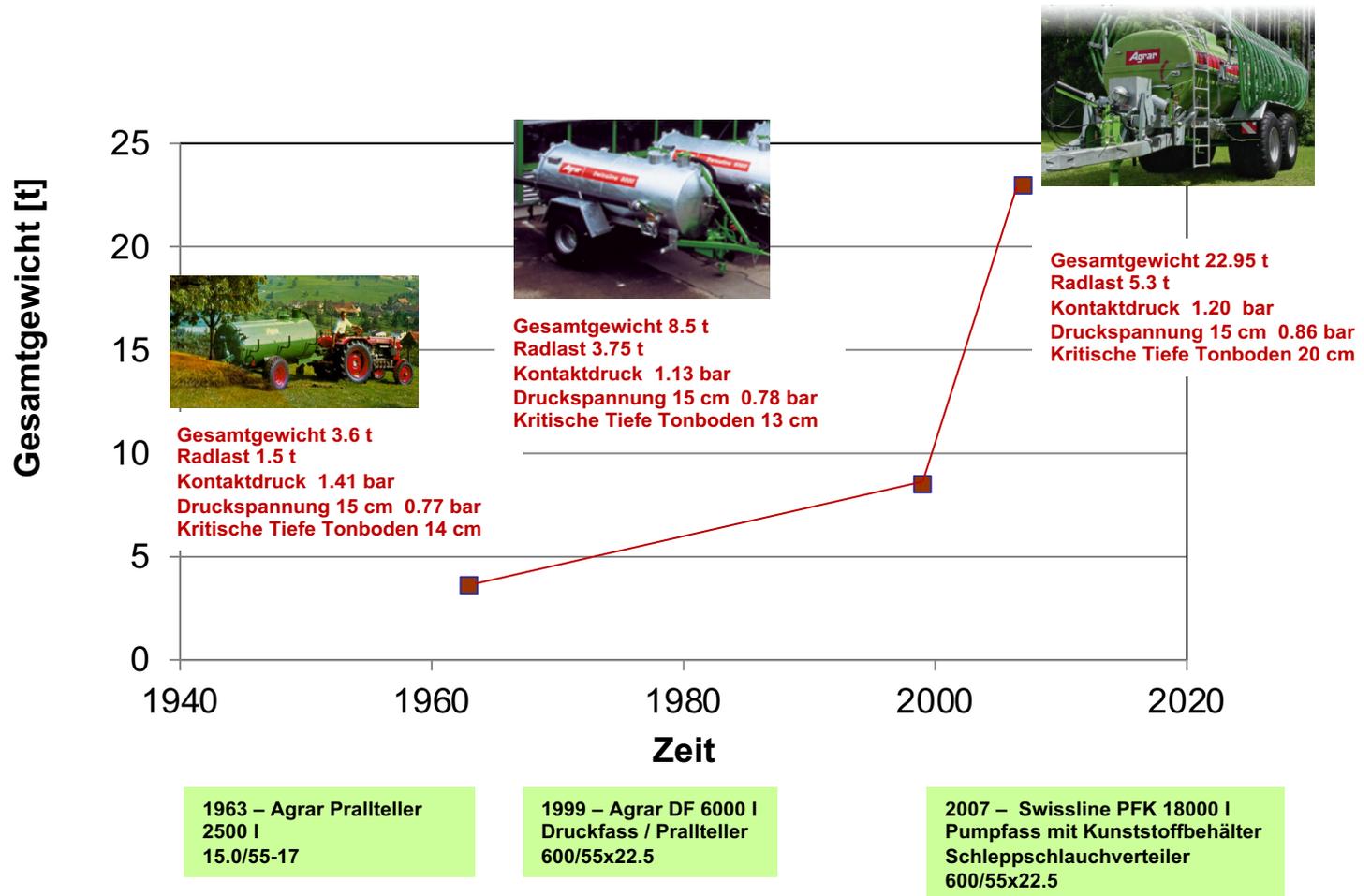
1958 - John Deere 830
7.5-18 / 18.4-34
56 kW

1976 - Fendt 614 SL
16.9R26 / 20.8R38
100 kW

2006 - Fendt vario 936
600/65R34 / 710/70R42
261 kW

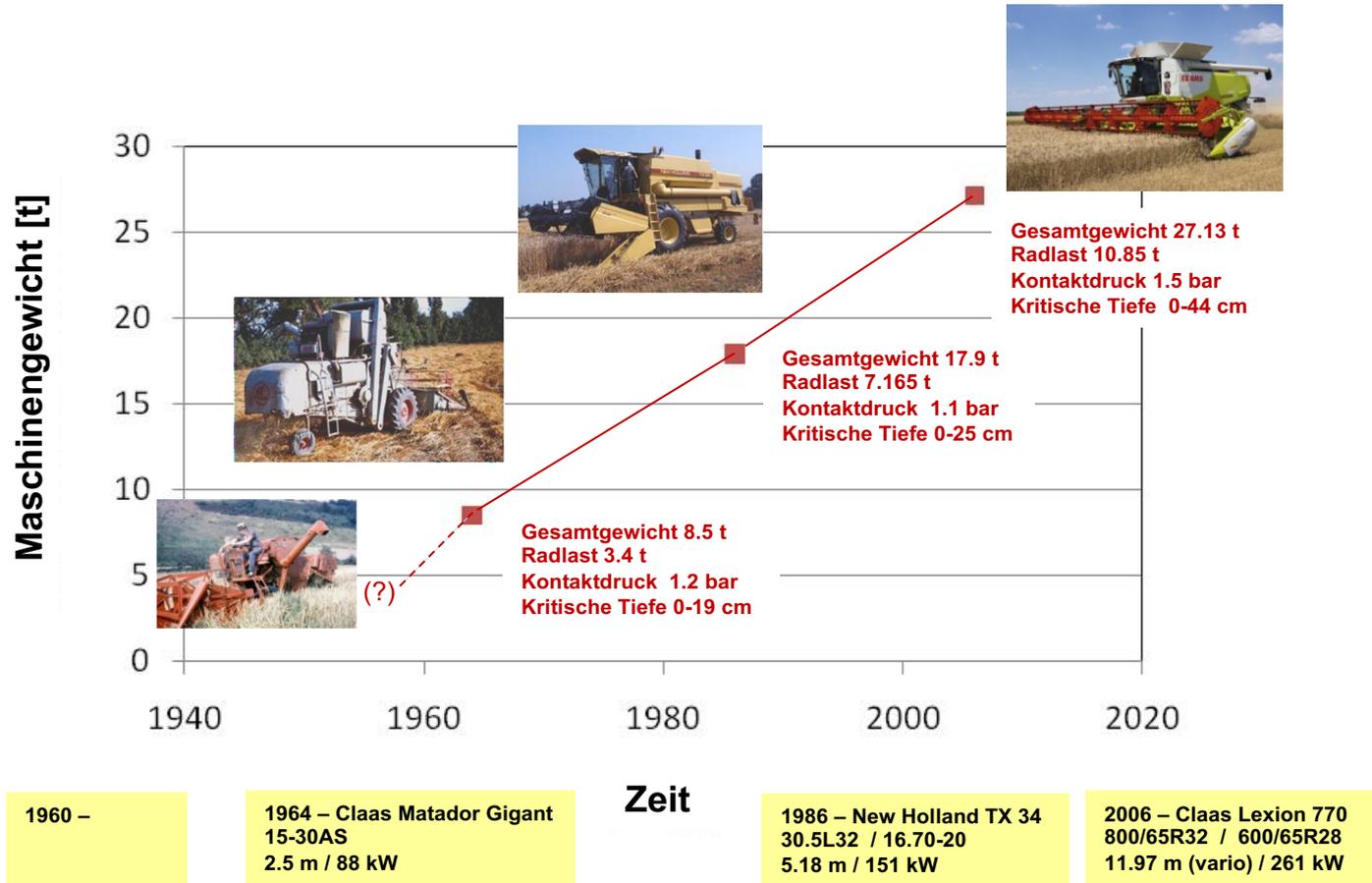


Entwicklung der Güllefässer - Beisp. Agrar



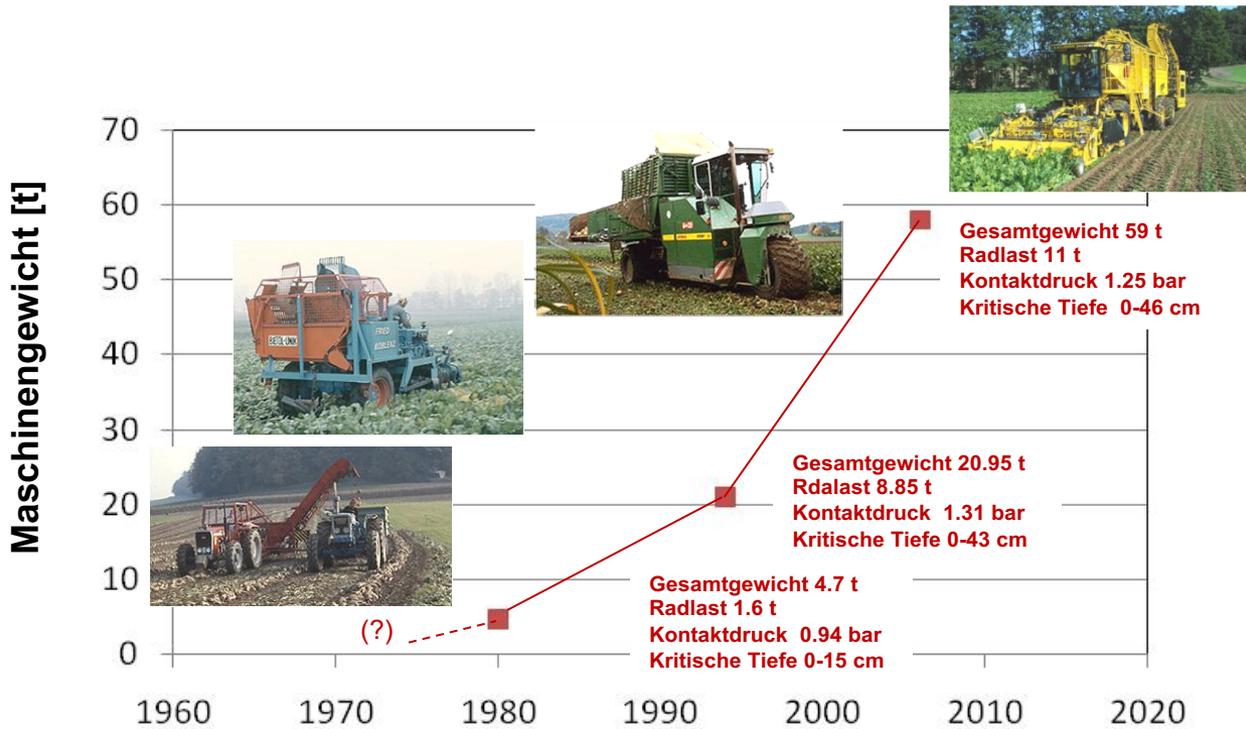


Entwicklung der Mähdrescher





Entwicklung bei den Zuckerrübenvollerntern



1975 –
Mehrphasensystemen

1980 – Fried Bietol Unik
12.4-36
1 reihig / 70 kW

Zeit

1994 – Stoll V300 SF
800/45-30.5
3 reihig / 103 kW

2006 – Ropa Tiger V8-3
900/55R32 / 1050/50R32/1000/50R25
6-9 reihig / 444 kW



Schäden im Oberboden...

im Unterboden



Forstwirtschaft



Bild: WSL



Bild: L. Volk FH Soest

Landwirtschaft



Fahrspuren

Verformung bis in die Tiefe



Reduzierte Wasserinfiltration ...



Sauerstoffmangel

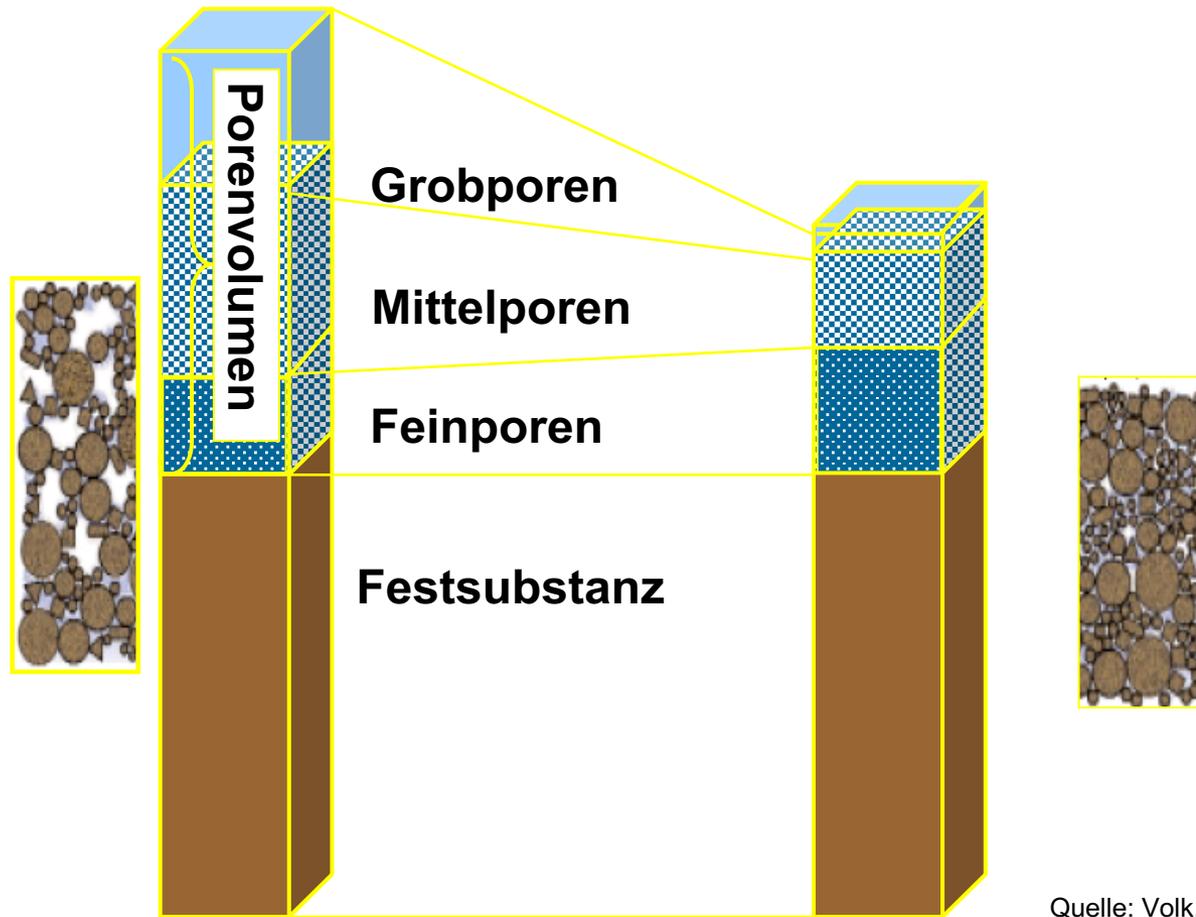


Erosion

- max. 500 t/ha/Jahr
- Toleranz CH - 2 t/ha/Jahr < 70 cm
4 t/ha/Jahr > 70 cm



Bodenverdichtung und Luftkapazität



Quelle: Volk, 2011



Im Stresssituation bei Hochwasser...



- $30 \cdot 10^6$ ha in Europa verdichtet, 40% der landwirtschaftlichen mechanisierten Fläche der Erde
- in der Bodenmatrix 50% Grobporenvolumen ≈ 500 Liter / m^2
10-20 % weniger Porenvolumen durch Verdichtung $\approx 50-100$ l / m^2
(Referenztiefe: 1 m)



Ertragsausfall - Ackerbau



Fahrspur



Feldrand

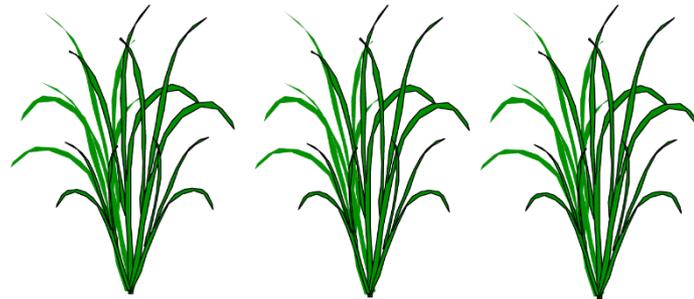


In der Parzelle

bis Ø ca. 15 % flächenmässig



Futterbau ohne Belastung



Quelle: Johann Humer, Landwirtschaftskammer, Niederösterreich

Mähwiese - hoch- und massenwüchsige Horstgräser haben eine viel dünnere Grasnarbe als Dauerweiden. Durch das Befahren werden sie stark gefährdet.



Knaulgras
Dactylis glomerata



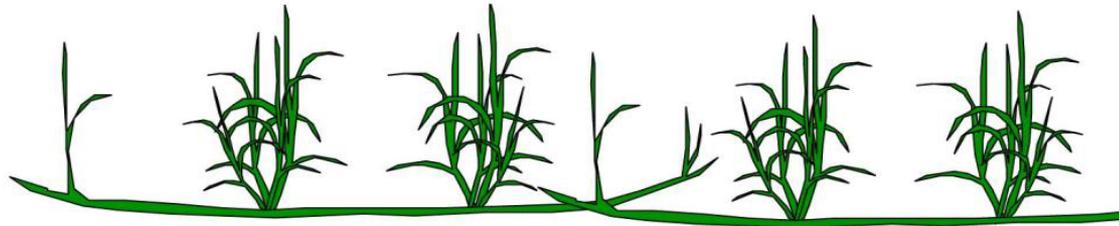
Timothee – Wiesen-Lieschgras
Phleum pratense



Wiesen-Goldhafer
Trisetum flavescens



Futterbau - mit Belastung



Quelle: Johann Humer, Landwirtschaftskammer, Niederösterreich

Dauerweiden - Starkes Befahren (genauso wie Narbenbetritt und Walzen) fördert strapazierfähige, trittverträgliche und niedrigwüchsige Gräserarten mit bodenoberflächennahen Wurzelausläufern.



Englisches Raygras
Lolium perenne

Wiesenrispe
Poa pratensis

Flechtstraussgras
Agrostis stolonifera



Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1.7.1998

Art. 6, Abs. 1

Wer Anlagen erstellt oder den Boden bewirtschaftet, muss unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der **Feuchtigkeit** des Bodens Fahrzeuge, **Maschinen** und Geräte so auswählen und einsetzen, dass Verdichtungen und andere Strukturveränderungen des Bodens vermieden werden, welche die **Bodenfruchtbarkeit** langfristig gefährden.



Bild: FH Soest (D)



Vorbelastung / Stabilitätspunkt im Grenzbereich und Textur

Richtwerte_{TASC} - Waldböden

Körnungsklasse	Stabilitätspunkt [bar] im Grenzbereich		Bewertung -	Schadverdichtungsgefahr	
	pF 1.8	pF 2.5		pF 1,8	pF 2.5
Tonreiche Böden IT, T 45 % T	0.55	0.70	sehr gering gering mässig hoch	< 0.45 0,45–0,55 0,55–0,65 > 0.65	< 0.60 0,60–0,70 0,70–0,80 > 0.80
Schluffreiche Böden tU, IU, sU, U 15 % T, 80 % U	0.60	0.85	sehr gering gering mässig hoch	< 0,45 0,45–0,60 0,60–0,75 > 0.75	< 0.70 0,70–0,85 0,85–1,00 > 1.00
Toniger Lehm und Lehmböden tL, L 21 % T	0.50	0.70	sehr gering gering mässig hoch	< 0,40 0,40–0,50 0,50–0,60 > 0,60	< 0.60 0,60–0,70 0,70–0,80 > 0.80
Sandiger Lehm, lehmreiche Sandböden sL, IrS 11 % T	0.65	0.90	sehr gering gering mässig hoch	< 0,50 0,50–0,65 0,65–0,80 > 0,80	< 0.75 0,75–0,90 0,90–1,05 > 1,05
Sandreiche Böden uS, S 5 % T	0.75	1.10	sehr gering gering mässig hoch	< 0.55 0.55–0.75 0.75–0.95 > 0.95	< 0.90 0.90–1.10 1.10–1.30 > 1.30



Vorbelastung / Stabilitätspunkt im Grenzbereich und Textur

Richtwerte_{TASC} - Landwirtschaftliche Böden

Körnungsklasse	Stabilitätspunkt [bar] im Grenzbereich		Bewertung -	Schadverdichtungsgefahr	
	pF 1.8	pF 2.5		pF 1,8	pF 2.5
Tonreiche Böden IT, T 45 % T	0.80	0.95	sehr gering gering mässig hoch	< 0.70 0,70–0,80 0,80–0,90 > 0.90	< 0.85 0,85–0,95 0,95–1.05 > 1.05
Schluffreiche Böden tU, IU, sU, U 15 % T, 80 % U	1.05	1.30	sehr gering gering mässig hoch	< 0,75 0,90–1.05 1.05–1.20 > 1.20	< 1.15 1,15–1.30 1.30–1.45 > 1.45
Toniger Lehm und Lehmböden tL, L 21 % T	0.85	1.10	sehr gering gering mässig gross	< 0.75 0.75–0.85 0.85–0,95 > 0.95	< 1.00 1.00–1.10 1.10–1.20 > 1.20
Sandiger Lehm, lehmreiche Sandböden sL, IrS 11 % T	1.10	1.45	sehr gering gering mässig hoch	< 0.95 0.95–1.10 1.10–1.25 > 1.25	< 1.30 1.30–1.45 1.45–1.60 > 1.60
Sandreiche Böden uS, S 5 % T	1.30	1.70	sehr gering gering mässig hoch	< 1.10 1.10–1.30 1.30–1.50 > 1.50	< 1.50 1.50–1.70 1.70–1.90 > 1.90



Textur in der kritischen Tiefe

Fühlprobe

Bodenart**Merkmale bei der Fühlprobe im feuchten Bodenzustand**

Tonreiche Böden mit
> 40 % Ton, < 50 % Schluff

Klebrig, Gleitfläche glänzend, Korn kaum fühlbar

Schluffreiche Böden mit
> 50 % Schluff

Wirkt seifig im feuchten Zustand, haftet aber klebt nicht

Toniger Lehm und Lehmböden mit
20–40 % Ton, < 50 % Schluff

Haftet und klebrig im feuchten Zustand, Gleitfläche stumpf

Sandiger Lehm und lehmreicher Sand mit
10–20 % Ton, < 50 % Schluff

Wenig Einzelkörner sicht- und fühlbar, schwach bindig, bleistiftdick rollbar

Sandreiche Böden mit
0–10 % Ton, < 50 % Schluff

Nicht oder etwas bindig, nicht oder wenig formbar, reisst und bricht, Korn deutlich fühlbar





Feuchte in der kritischen Tiefe

Fühlprobe

Bodenfeuchtever- hältnisse Beobachtungen

Wartezeit (ohne Regen) je nach Bodenart*

Trocken
(pF \geq 2.5)

Erdaggregate lassen sich kaum auseinanderbrechen. Die flache Hand bleibt trocken. Keine Kälteempfindung auf dem Handrücken.

Keine zeitliche Einschränkungen

Feucht
(pF 1.8)

Erdaggregate zerbröckeln leicht beim Zusammenpressen zwischen den Fingern. Erde haftet nicht an der Hand. Kälteempfindung auf dem Handrücken.

Sandreiche Böden: ca. ½ Tag
Schluff-, lehmreiche Böden:
ca. 3 Tage
Tonreiche Böden: ca. 5 Tage

Nass
(pF $<$ 1.8)

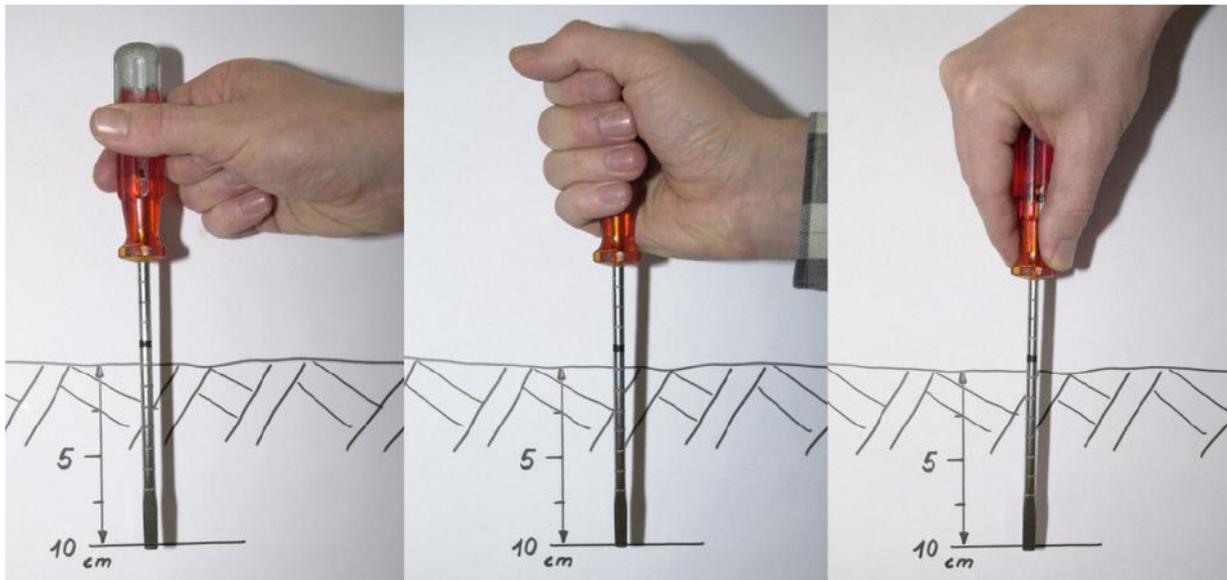
Erdaggregate sind knetbar bis breiig. Wasserlinse beim Zusammenpressen sichtbar. Erde haftet an der feuchten Hand.

Sandreiche Böden: 1 Tag
Schluff-, lehmreiche Böden:
mindestens 3 Tage
Tonreiche Böden: mindestens 5 T.



Festigkeit (Eindringwiderstand)

Schraubenziehertest



weich
0 – 5 daN

halbfest
5 – 8 daN

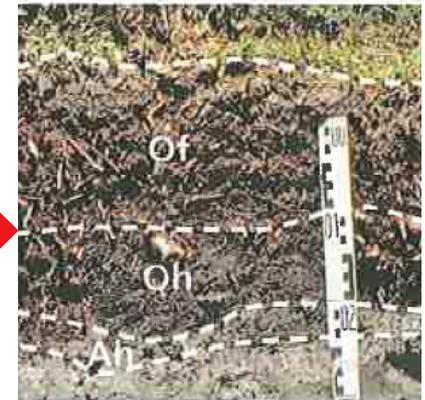
fest
> 8 daN



Kritische Bodentiefe

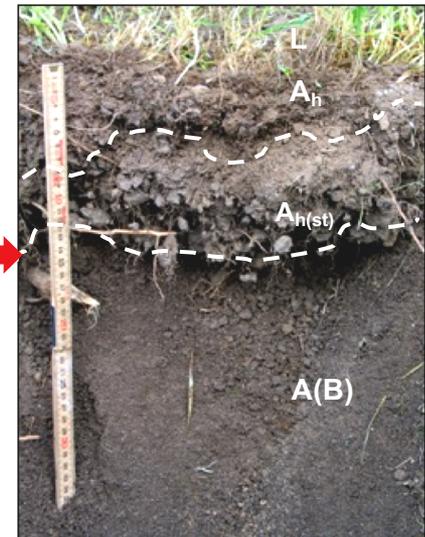
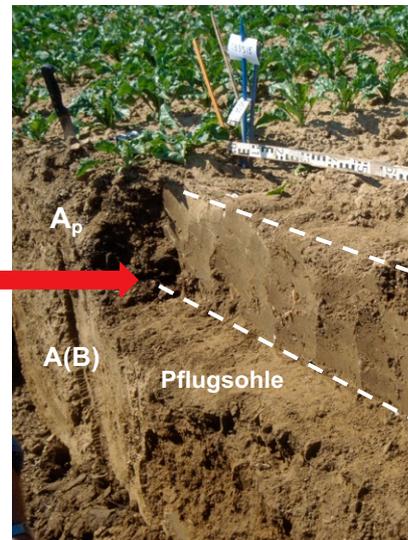
Waldböden

Humustypen Mull / Rohhumus



Landwirtschaftliche Böden

Bewirtschaftungstypen
Ackerbau / Wieselnd





Rad-, Raupenlast, Reifeninnendruck

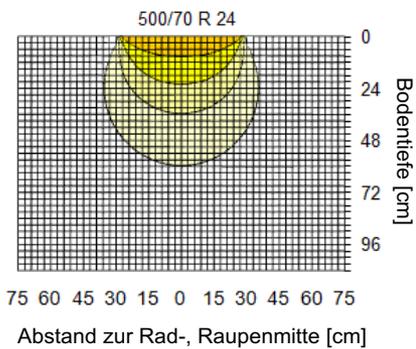
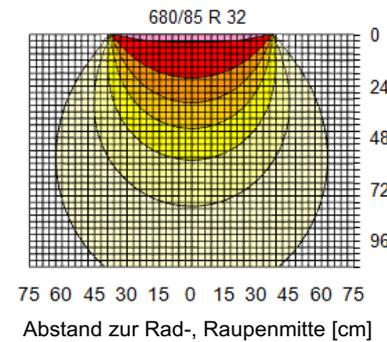
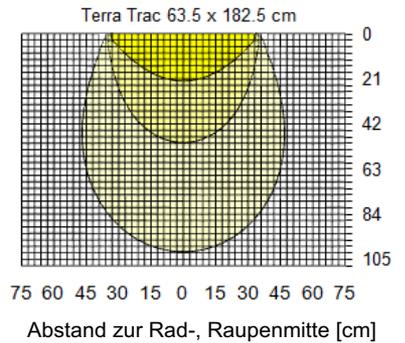
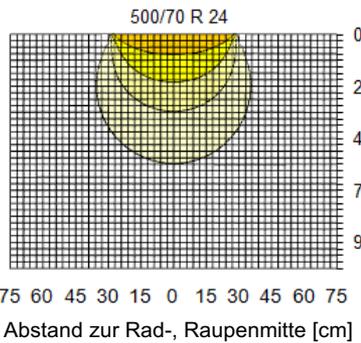
Claas Lexion 670

vorne: 10.3 t - hinten: 2.6 t / 1.6 bar

vorne: 10.3 t / 2.4 bar - hinten: 2.6 t / 1.6 bar



Photos: Claas





Kontaktfläche - Antriebsreifen

$$A = f(B [cm], D [cm])$$

Fester Boden

$$\text{Kl. Reifen } BD < 6000 \quad A = 0.2461 BD \quad n = 22; R^2 = 0.9601; p_{BD}=0.000$$

$$\text{Gr. Reifen } BD \geq 6000 \quad A = 0.2716 BD \quad n = 42; R^2 = 0.8957; p_{BD}=0.000$$

Biosystems Engineering 110 (2011) 73-82

Weicher Boden

$$\text{Kl. Reifen } BD < 6000 \quad A = 0.3406 BD \quad n = 7; R^2 = 0.9367; p_{BD} = 0.000$$

$$\text{Gr.Reifen } BD \geq 6000 \quad A = 0.3611 BD \quad n = 29; R^2 = 0.9322; p_{BD} = 0.000$$

Encyclopedia of agrophysics, Springer, 2011



$$A = f(B [cm], D [cm], F [kg], P [bar])$$

Fester Boden

$$\text{Kl. Reifen } BD < 6000 \quad A = 0.191 BD + 0.450 F - 148.39 Pi \quad n = 22; R^2 = 0.973; p_{BD}=0.000; p_F = 0.004; p_{Pi} = 0.031$$

$$\text{Gr. Reifen } BD \geq 6000 \quad A = 0.187 BD + 0.375 F - 283.73 Pi \quad n = 42; R^2 = 0.950; p_{BD}=0.000; p_F = 0.004; p_{Pi} = 0.069$$

Biosystems Engineering 110 (2011) 73-82

Weicher Boden

$$\text{Kl. Reifen } BD < 6000 \quad A = 0.247 BD + 0.571 F - 193.29 Pi \quad n = 7; R^2 = 0.949; p_{BD}=0.109; p_F = 0.134; p_{Pi} = 0.536$$

$$\text{Gr.Reifen } BD \geq 6000 \quad A = 0.127 BD + 0.489 F - 889.90 Pi + 1723.76 \quad n = 29; R^2 = 0.917; p_{BD}=0.000; p_F = 0.000; p_{Pi} = 0.000$$

Encyclopedia of agrophysics, Springer, 2011



Kontaktfläche - Transportreifen

$$A = f(B [cm], D [cm])$$

Fester Boden

Diagonal B < 50 cm	$A = 0.309 BD$	$n = 16; R^2 = 0.974; p_{BD}=0.000$
Diagonal B ≥ 50 cm	$A = 0.339 BD$	$n = 29; R^2 = 0.886; p_{BD}=0.000$
Radial undif.	$A = 0.289 BD$	$n = 87; R^2 = 0.926; p_{BD}=0.000$
Radial St. /Nieder.	$A = 0.290 BD$	$n = 41; R^2 = 0.893; p_{BD}=0.000$
Radial Terra	$A = 0.289 BD$	$n = 46; R^2 = 0.935; p_{BD}=0.000$

Traction/ Implement



Implement



$$A = f(B [cm], D [cm], F [kg], P [bar])$$

Fester Boden

Diagonal B < 50 cm	$A = 0.208 BD + 0.312 F - 67.88 P_i$	$n = 16; R^2 = 0.988; p_{BD}=0.000; p_F = 0.001; p_{P_i} = 0.144$
Diagonal B ≥ 50 cm	$A = 0.132 BD + 0.690 F - 372.50 P_i$	$n = 29; R^2 = 0.985; p_{BD}=0.000; p_F = 0.000; p_{P_i} = 0.000$
Radial undif.	$A = 0.159 BD + 0.335 F - 287.78 P_i + 718.34$	$n = 87; R^2 = 0.865; p_{BD}=0.000; p_F = 0.000; p_{P_i} = 0.000$
Radial St. /Nieder.	$A = 0.069 BD + 0.308 F - 193.47 P_i + 919.04$	$n = 41; R^2 = 0.859; p_{BD}=0.017; p_F = 0.000; p_{P_i} = 0.000$
Radial Terra	$A = 0.178 BD + 0.409 F - 424.19 P_i + 633.12$	$n = 46; R^2 = 0.830; p_{BD}=0.000; p_F = 0.000; p_{P_i} = 0.000$

Soil & Tillage research 103 (2009) 302-309

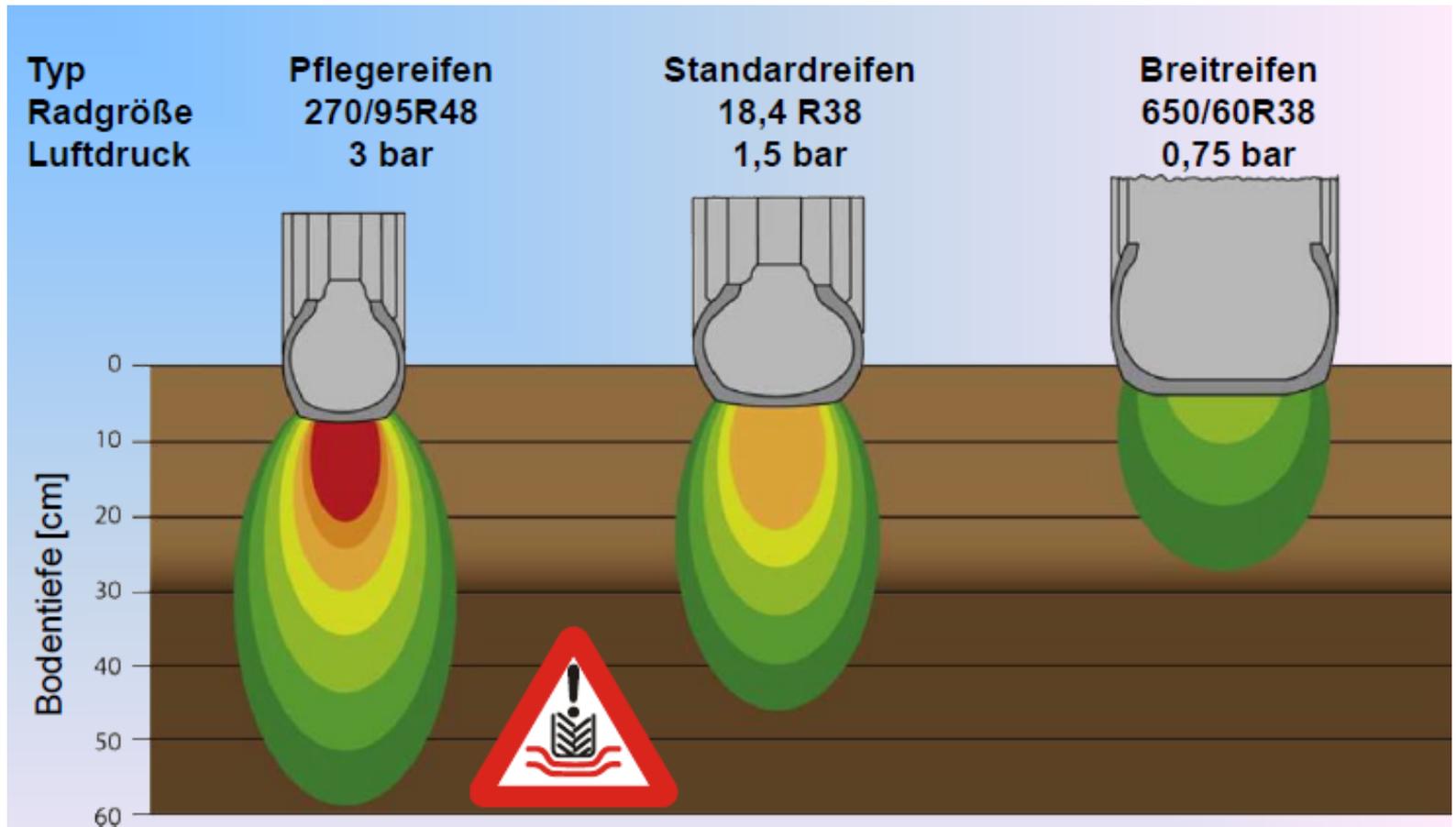


Reifendimension



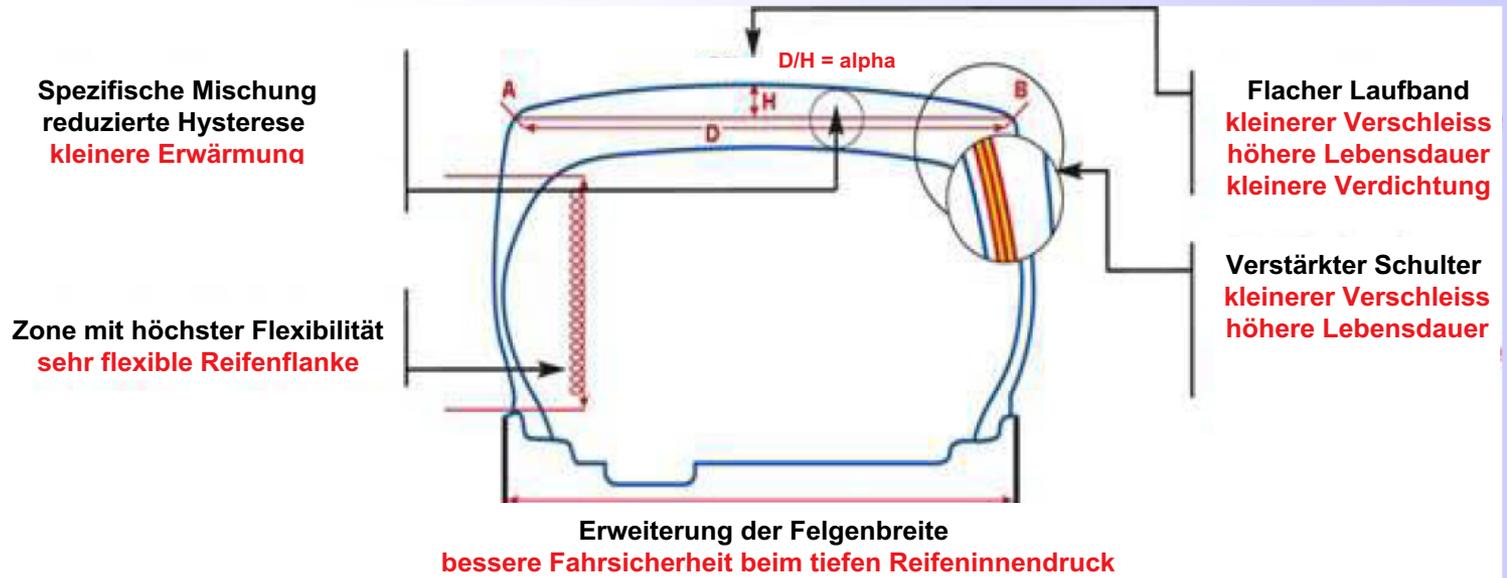


Reifeninnendruck





Reifen – Ultra-Flex Technologie



IF *improved Flexion*

VF *very high Flexion*

Gleicher Reifeninnendruck

+ 20 % Radlast

+ 40 % Radlast

Gleiche Radlast

- 20 % Reifeninnendruck

- 40 % Reifeninnendruck

Quelle: Michelin



Ultra-Flex – Pneu Trac



Ultra-Flex – Technologie In Serie bei *Michelin Trelleborg*

Pflegebereifung (*SprayBib*)
Bodenbearbeitung (*AxioBib - Xeobib*)
Vollerntemaschine (*CerexBib*)
Transportreifen (*CargoBib*)

Pneu Trac Prototype bei *Mitas* (noch nicht auf dem Markt verfügbar)

Aufstandfläche (+ 53 % als Standardreifen)
280/70R18
480/65R28 (+ 7 % Zugkraft als IF-Reifen)
600/65R38 (+ 15 % Zugkraft als IF-Reifen)

(aus ersten Testversuchen)



Reifendruckregelanlage

Pneumatische Regelungskonsole



Digitale Konsole



Fendt 900 Vario - Terminal vario



System AIRBOX/Drive



System RDS/radial





Elektro-pneumatischer Verlegeplan

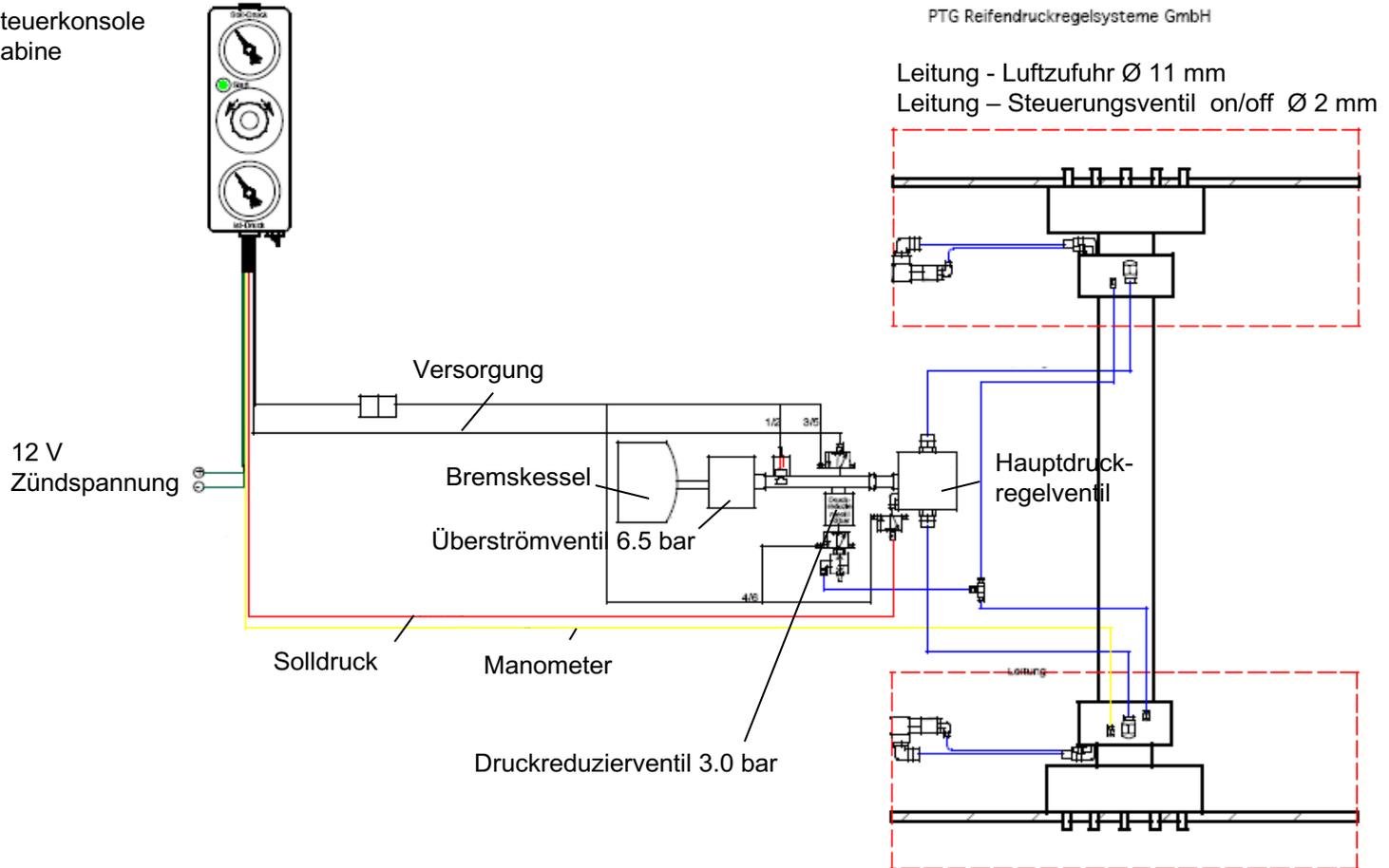
RDS/AS

2-Leiter mit Präzisionsregler

Steuerkonsole
Kabine



PTG Reifendruckregelsysteme GmbH

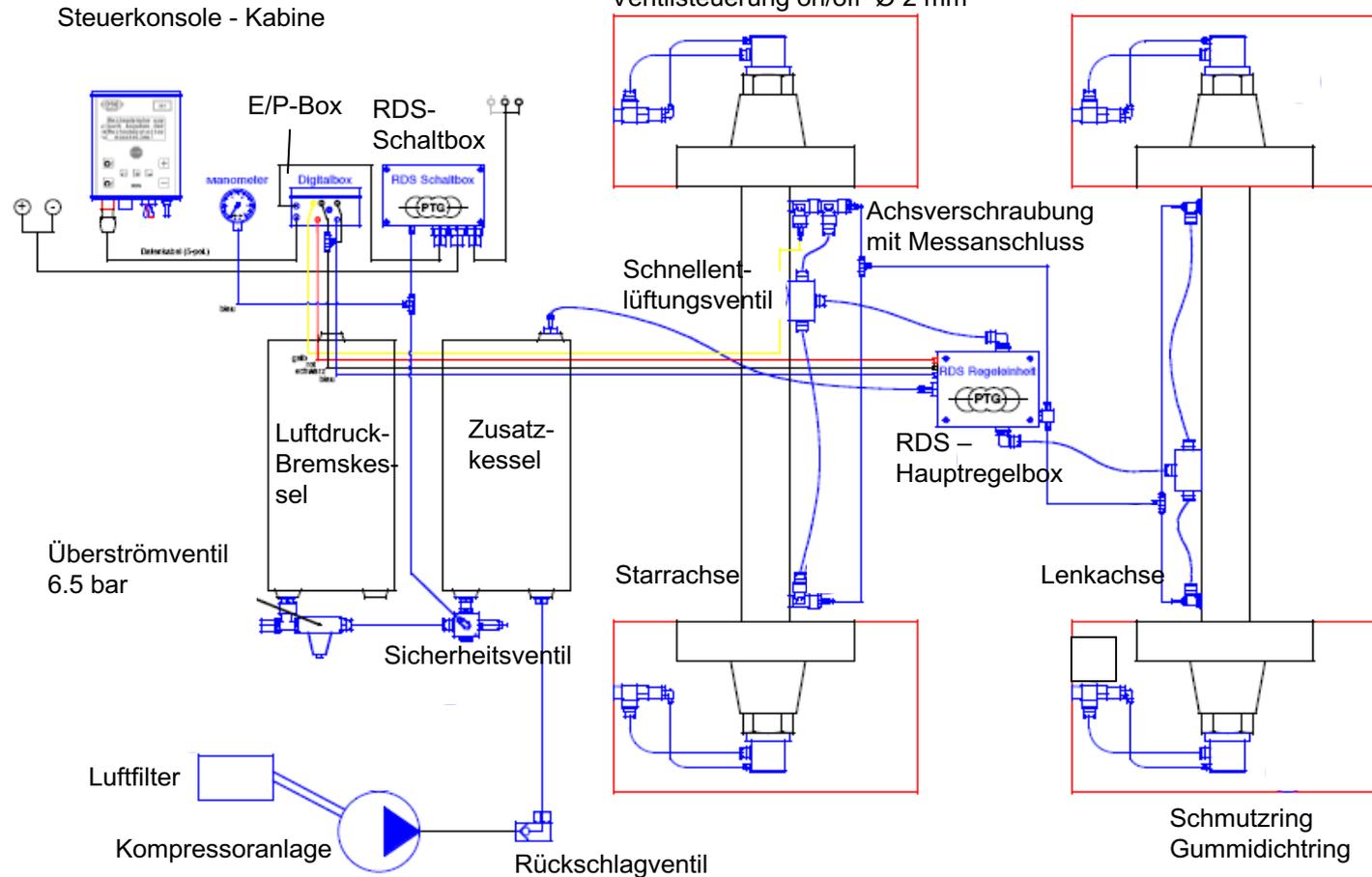




Elektro-pneumatischer-Verlegeplan

Mit 2-Druckschalter für Zusatzkompressor
2-Achser

RDS-2-Leiter-
Drehdurchführung
Luftzufuhr \varnothing 11 mm
Ventilsteuerung on/off \varnothing 2 mm





Reifendruckregelanlage

Aufpumpzeit

Aufpumpzeit = f(Leistung des Kompressors, Reifenvolumen, Reifeninnendruck_{vor/nach})

Hinterreifen: 650/65R38 – Volumen 800 l

Leistung des Kompressors: 240 l/min

Druck vorher: 0.8 bar – Druck nachher: 1.4 bar

$$t = (2 \times 800 \text{ l}) \times 0.6 / 240 = 4 \text{ min.}$$

Entlüftungszeit: 1 min. 30 sec.



Reifendruckregelanlage

- +
 - höherer Bodenschutz (tiefer Reifeninnendruck)
 - höhere Zugkraft (tiefer Reifeninnendruck)
 - weniger Treibstoff auf dem Feld (tiefer Reifeninnendruck)
 - weniger Treibstoff auf der Strasse (hoher Reifeninnendruck)
 - höhere Lebensdauer des Reifens
 - höhere Fahrsicherheit (hoher Reifeninnendruck)

- - mittelfristige Investition
 - Wartung (Dichtungen – Wasserentfernung im Kompressor)
 - im Winter, Ausfall möglich

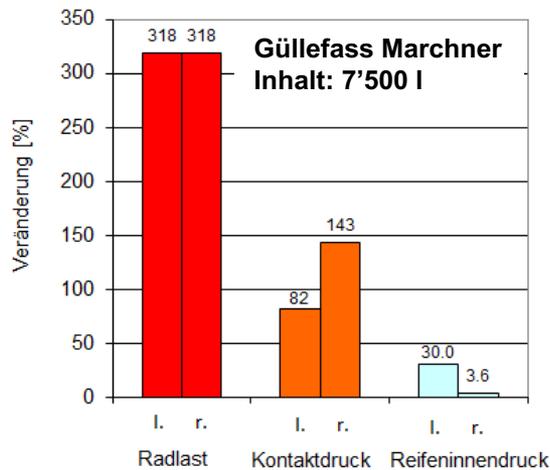


PTG Reifendruckregelsysteme GmbH

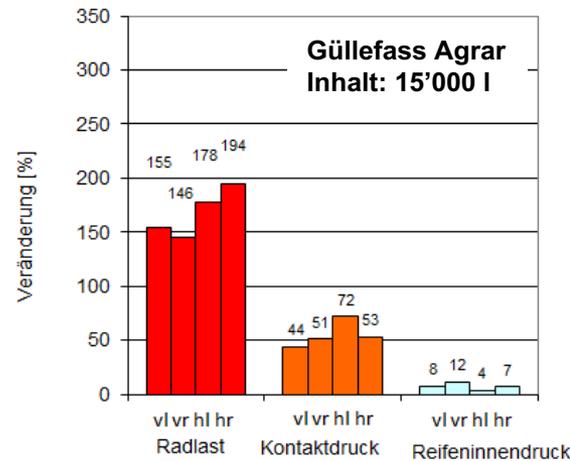
Vertretung CH:
Agro RDS Urs Kägi, Fehlhof 3, 8196 Wil



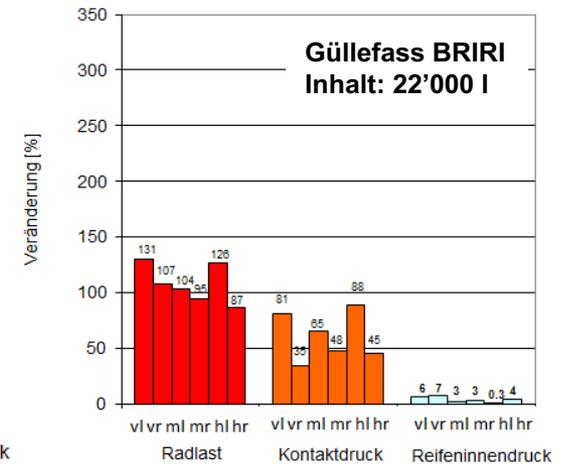
Lastveränderung bei der Fassfüllung



leer: 1050 kg / 1.0 2.8 bar
 voll: 4390 kg / 1.3 2.9 bar
 Reihe nach: l r
 560/60R22.5: Volume 411 l



leer: 2130 kg / 1.1 1.5 2.5 2.0 bar
 voll: 5700 kg / 1.2 1.6 2.6 2.1 bar
 Reihe nach: vl vr hl hr
 800/40R26.5: Volume 625 l



leer: 2840 kg / 1.1 1.8 2.8 2.2 3.5 3.9 bar
 voll: 5880 kg / 1.2 1.9 2.9 2.2 3.5 4.1 bar
 Reihe nach: vl vr ml mr hl hr
 750/60R30.5: Volume 1039 l

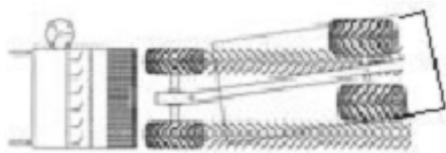


Lastveränderung bei der Fassfüllung

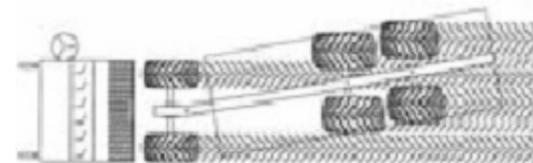
- je geringer das Reifenvolumen und der Initialreifeninnendruck sind, desto höher ist die Reifeninnendruckzunahme bei der Füllung
- grundsätzlich soll der Reifeninnendruck erst nach der Füllung neu eingestellt werden



Fahrwerk



Doppelachse
„Hundegang“

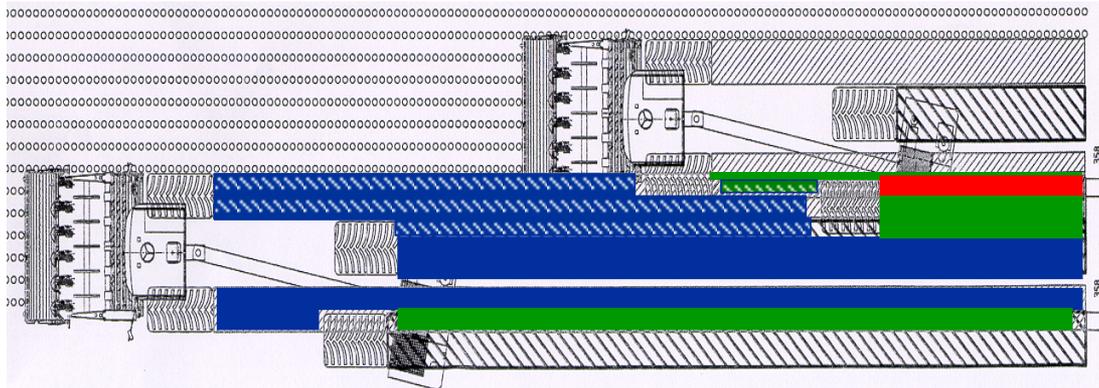


Dreiachse
„Hundegang“

Photos: R. Geischer

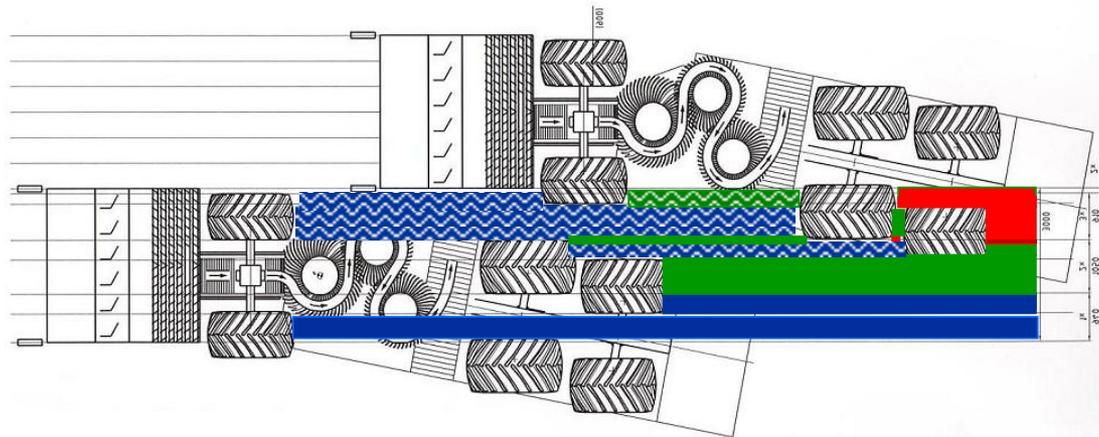


Fahrspurflächenanteil



Holmer Terra Dos

multipass	6 rangs (2.7 m)	6 rangs (3.0 m)
0 x	13.0 %	11.7 %
1x	46.3 %	53.3 %
2x	31.5 %	35.0 %
3x	9.3 %	-
a	3.80 m	3.80 m



Ropa euro-Tiger

multipass	6 rangs (2.7 m)	9 rangs (4.5 m)
0 x	1.1 %	3.6 %
1x	27.4 %	61.8 %
2x	32.6 %	34.7 %
3x	37.0 %	-
4x	1.9 %	-
a	4.04 m	4.40 m



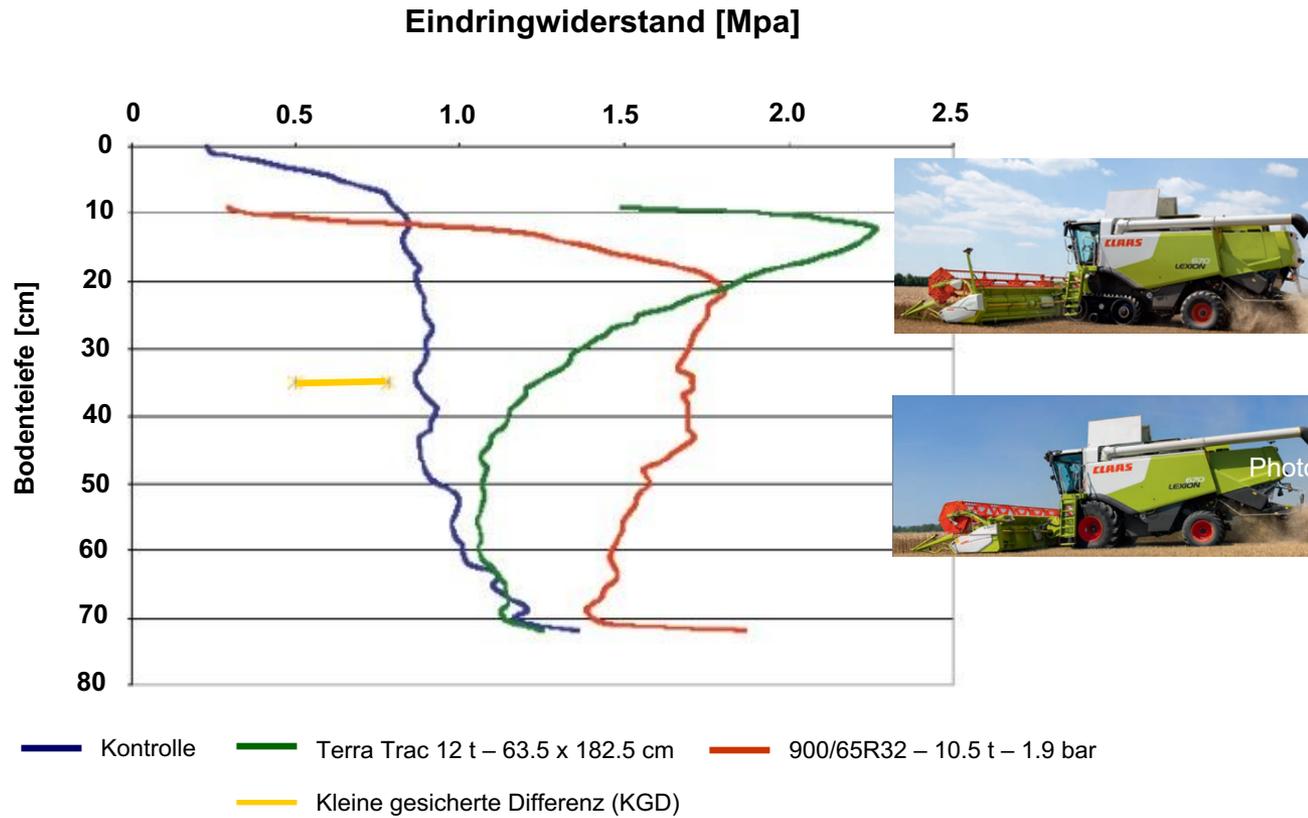
Fahrweise «Hundegang»

- +
 - Multipass kleiner (Reihenweite 50 cm)
 - Bessere Lastverteilung auf der ganzen Fläche (Grobböden)
 - Bodenoberfläche homogen (Bodenbearbeitung)
 - Höhere Fahrstabilität am Hang

- - Beinahe gesamte Fläche befahren, Oberboden verdichtet, Struktur gefährdet
 - Wasserinfiltration gehemmt
 - Auf feinkörnigen Böden a, Hang: Erosionsgefährdung
 - Langsamere Entwässerung – gehemmtes Wachstum im Frühling (Kartoffeln)



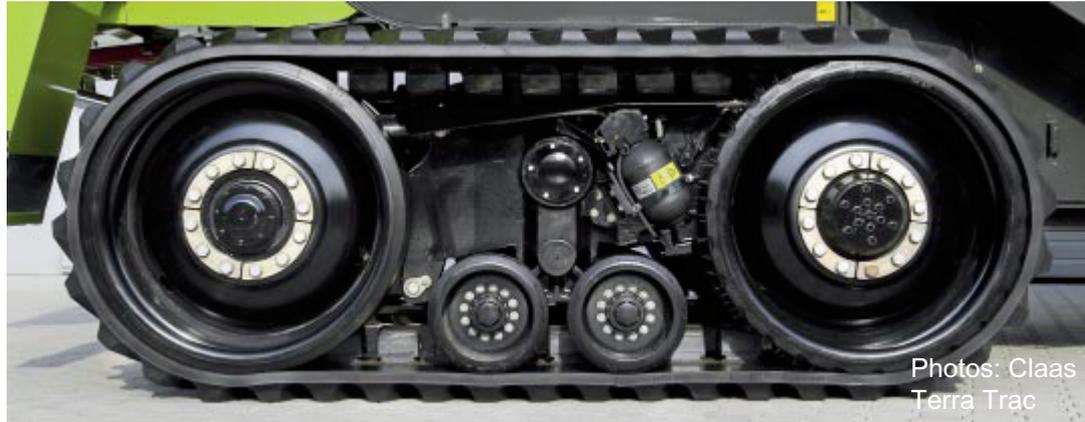
Raupen



Quelle: Dirk Ansorge, Cranfield University, Silsoe



Raupen



- +
 - kleinere Bodenverformung in der Tiefe
 - erleichterte Bodenauflockerung
 - bei gleichwertiger Last und Zugkraft: reduzierter Schlupf
 - Bodenwiderstand kleiner (weniger Treibstoff)
- - Druckspannung im Oberboden höher nicht ausgeschlossen (< 20 cm)



Priorität A: der Unterboden

Radlast und Druckfortpflanzung

Bodenart
 Oberbodenfestigkeit
 Maximale Auflockerungstiefe
 Bereifung (hinten)
 Reifeninnendruck

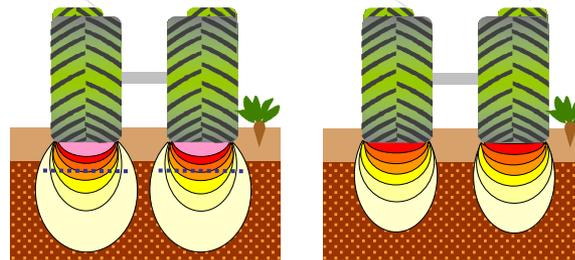
Lehm – sandiger Lehm
 halbfest
 25 cm
 73x44-32
 2,0 bar

Bunkerfüllung Radlast

100 %
11 400 kg

60 %
8500 kg

- 0.0 - 0.2 bar
- 0.2 - 0.4 bar
- 0.4 - 0.6 bar
- 0.6 - 0.8 bar
- 0.8 - 1.0 bar
- 1.0 - 1.2 bar
- 1.2 - 1.4 bar
- 1.4 - 1.6 bar



Bodenverdichtungsgefährdung

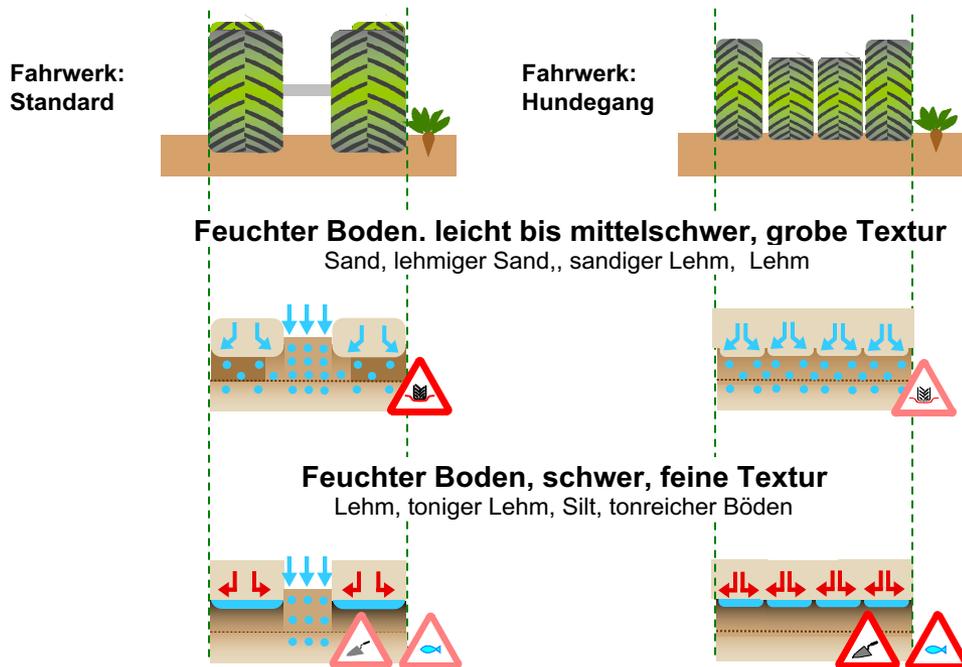
34 cm

(keine)



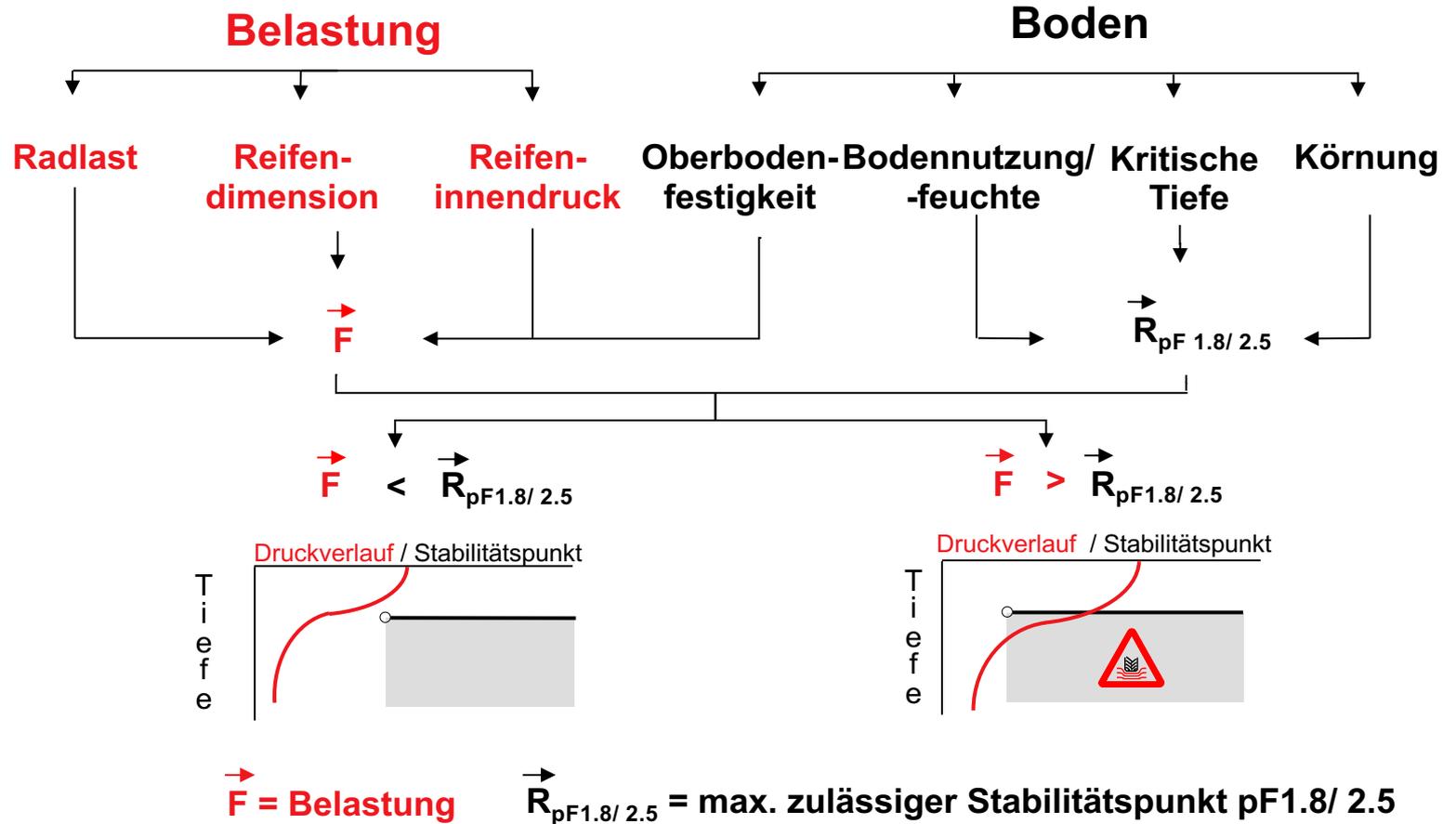
Priorität B: der Oberboden

Bodenoberfläche und Druckspannungen





TASC-Grundprinzip - Unterbodengefährdung durch Schadverdichtung





TASC V3.0 - Flussdiagramm

