

# Technischer Fortschritt für den Bodenschutz – Verdichtung vermeiden, Bodenfunktionen erhalten

Dr. Bastian Steinhoff-Knopp | Thünen-Institut | Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität  
in Vertretung für Dr. Marco Lorenz | Thünen-Institut für Agrartechnologie



Nachhaltige Sicherung und Verbesserung  
von Bodenfunktionen durch  
intelligente Landwirtschaft

(BMBF - BonaRes: Boden als nachhaltige  
Ressource für die Bioökonomie)



Institut für Agrartechnologie  
Stabstelle Klima, Boden, Biodiversität



Geographisches Institut  
Lehrstuhl für Landschafts-  
ökologie und Geoinformation



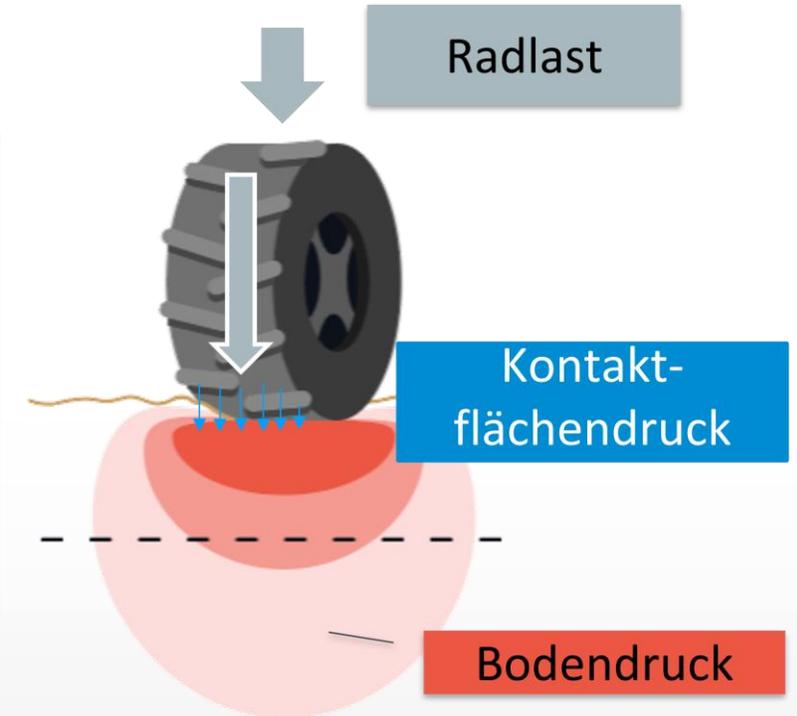
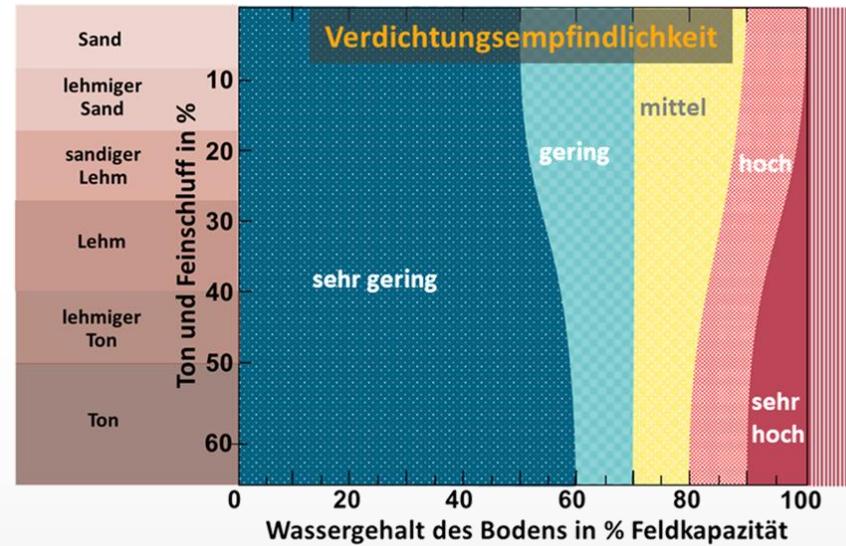
Deutsches Forschungszentrum für  
künstliche Intelligenz, Osnabrück  
Planbasierte Robotersteuerung



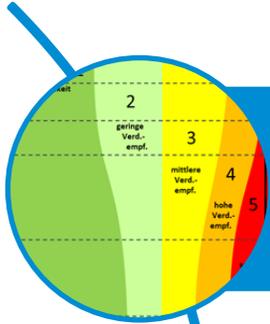
Institut für Informatik

# Entstehung von Schadverdichtungen

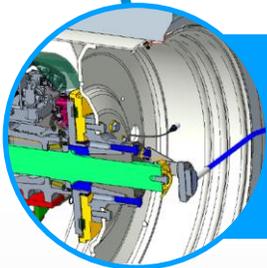
## Prozess und Faktoren



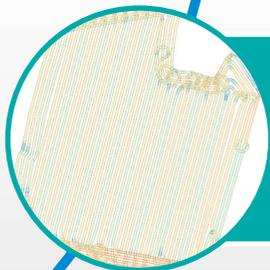
# Werkzeuge für das bodenschonende Befahren von Ackerflächen



Planung von Feldarbeitsgängen



Anpassung der mechanischen Belastung an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens



Optimierung der Befahrung

- Welche **Zeiträume** stehen zur **bodenschonenden Bearbeitung** zur Verfügung?
- Welche **Feldarbeitsgänge** auf welchen **Flächen** zu welchen **Zeiten**?
- Wann ist der **Boden** im Abhängigkeit der Verdichtungsempfindlichkeit und Bodenbelastung durch die Maschine(n) **befahrbar**?

⇒ **Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit**

# Planung Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit

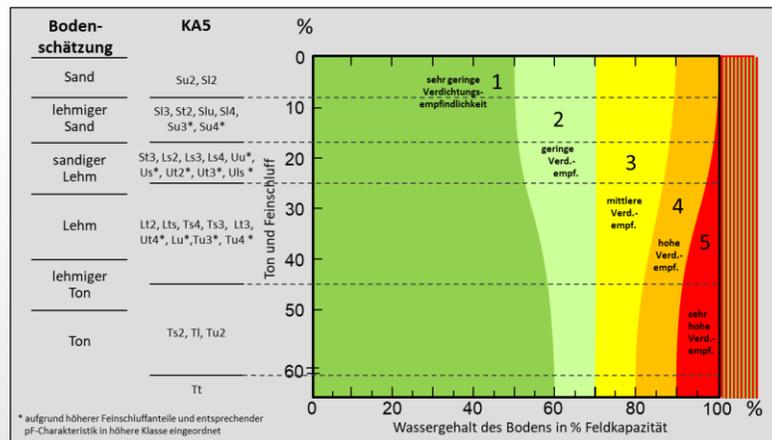


Maschine und Anzahl der zu berücksichtigenden Achsen	Traktor		Anhänger			Häcksler		Maximum	Mittelwerte		
	Vorderachse		Hinterachse			Vorderachse				Hinterachse	
	1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	6. Achse	7. Achse				
1 Radlast [t]	1,5	4,75	4,75	4,75	4,75	7,0	2,0	7,0	4,21		
2 Reifeninnendruck [bar]	1,2	1,6	3,0	3,0	3,0	1,5	1,0	3,0	2,04		
3 Kontaktfläche [m <sup>2</sup> ]											
4 Kontaktflächendruck [bar]	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	0,85	0,9	1,2	1,05		
5 Anzahl Überrollungen pro Spur	7										
6 Anteil der überrollten Fläche [%]	33										

	Wertebereich von	Wertebereich bis	Wichtung	Belastungsanteil
7 Radlast [t]	0,5	12,0	2,00	1,17
8 Reifeninnendruck [bar]	0,6	4,0	1,00	0,51
9 Kontaktflächendruck [bar]	0,4	2,5	2,00	0,84
10 Anzahl Überrollungen	1	6	0,70	0,82
11 Anteil der Überrollten Fläche	0	100	0,176	0,058
12 Summe der Wichtungen			5,88	
13 Belastungssumme				3,40
14 Belastungskennwert gesamt				0,58

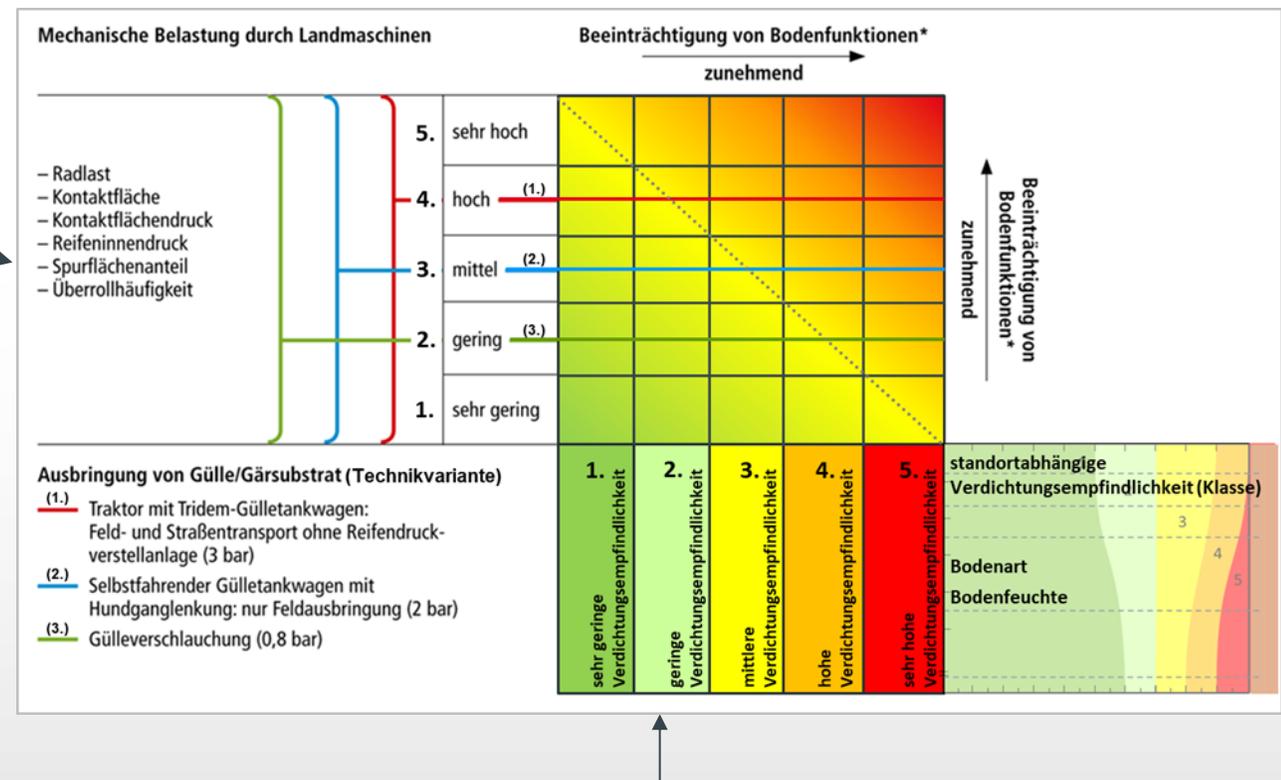
mechanische  
Bodenbelastung

Belastungskennwerte/Belastungsklassen	1	2	3	4	5
obere Grenze	0,38	0,46	0,54	0,62	0,70
untere Grenze	0,30	0,38	0,46	0,54	0,62



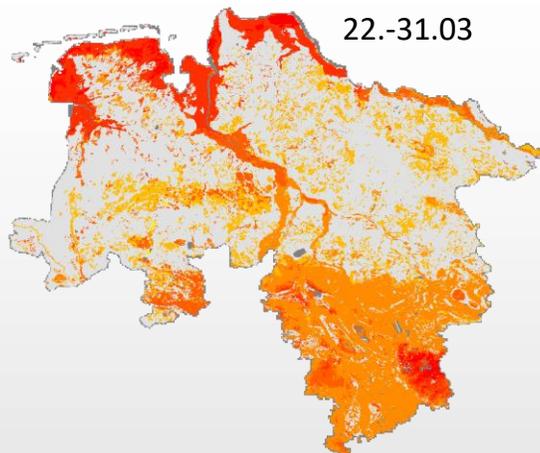
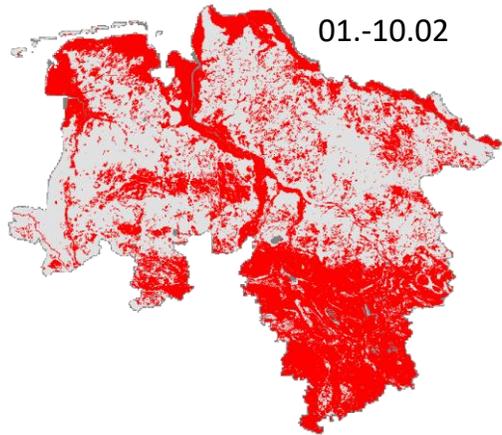
Verdichtungs-empfindlichkeit

Planung von standortbezogenen, bodenschonenden **Feldbefahrungen** und Verfahren, **Investitionen** in Technik und den **Maschineneinsatz**  
→ Ableitung von standort- und technikbezogenen Befahrbarkeitstagen

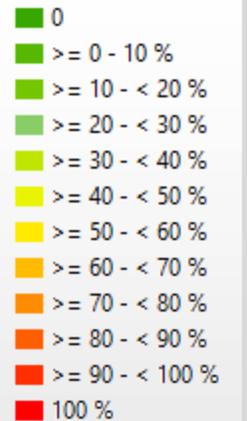
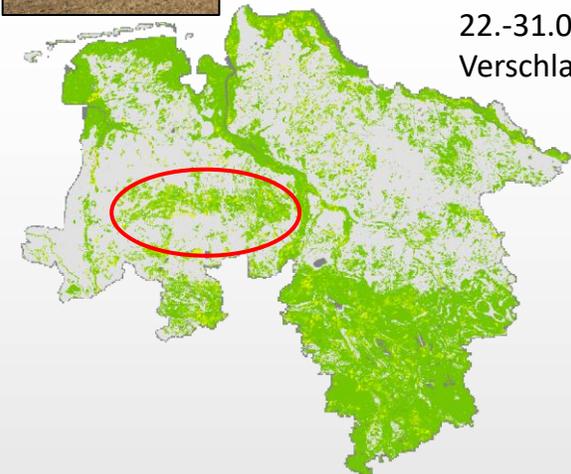
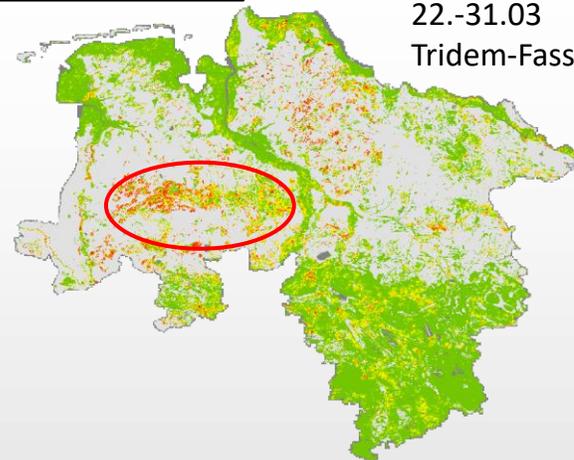
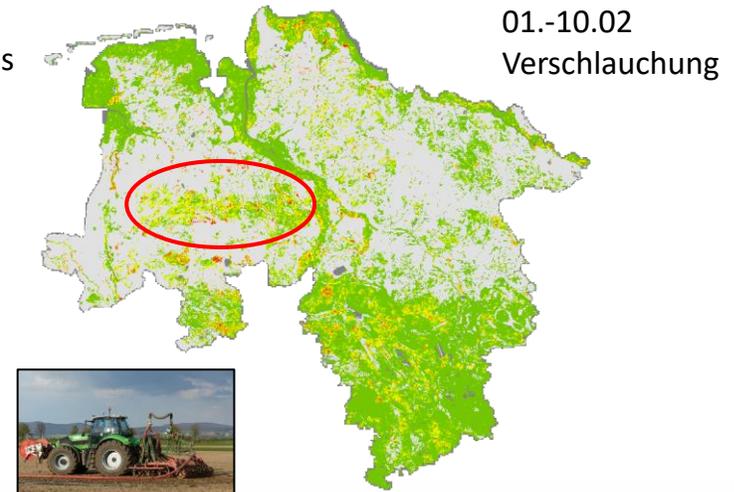
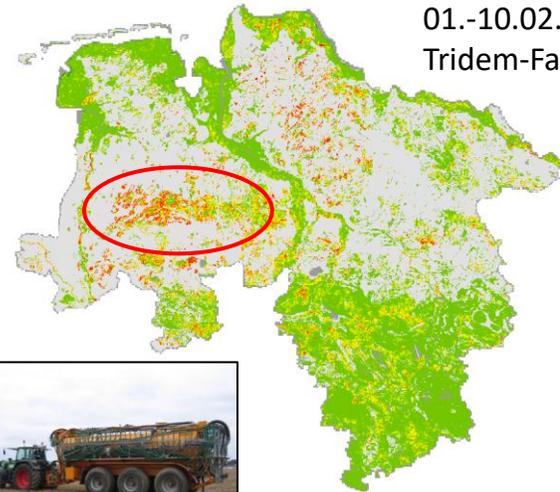


# Planung Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit

## Empfindlichkeit „hoch bis sehr hoch“



## Potentielles Verdichtungsrisiko bei Gülleausbringung im Frühjahr



Ledermüller et al. 2020

← → 🔒 <https://daten.ktbl.de/feldarbeitstage/Maehdrusch.html?> ☆ ☰

**KTBL**

VERFÜGBARE FELDDARBEITSTAGE ? BEISPIELHAFTER VORGANG ⚙️ WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN ✉️ KONTAKT

### MÄHDRUSCHSTUNDEN UND BODENBEFAHRBARKEIT

**Gemeinde:**  
Sibbesse

**Wetterstation:**  
Alfeld

**Phänologischer Beobachter:**  
Sibbesse (Ph)

**Kultur:**  
Winterweizen

**Maximale Kornfeuchte in %:**  
14,5 %

**Erntezeitraum:**  
14.07 bis 15.08

**Maschinenkombination:**  
Mährescher, 225 kW, 9500 l; 6 m  
Bitte auswählen  
Mährescher, 175 kW, 7500 l; 5 m  
Mährescher, 200 kW, 8500 l; 5 m  
Mährescher, 225 kW, 9500 l; 6 m  
Mährescher, 350 kW, 10500 l; 9 m

Schlagumrisse anzeigen

Legende anzeigen

Mähdruschstunden | Bodenbefahrbarkeit | Grafische Auswertung

Kultur	Ausgewertete Jahre	Ausgewertete Tage	verfügbare Tage			Befahrbarkeitstage gesamt
			95%	90%	80%	
Winterweizen	14	462	17	18	20	306

KTBL STARTSEITE | RECHNER-ÜBERSICHT | KONTAKT | IMPRESSUM | NUTZUNGSBEDINGUNGEN



<https://daten.ktbl.de/feldarbeitstage/Maehdrusch.html?>



# Planungen kontrollieren Feldgefügeansprache



### Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker (3. Auflage)

Analyse des Gefüge-Zustand und Planung der geeigneten Vegetationslinie

6 PARAMETER verringert am Profilschnitt zusätzlich am Ausblick durch Färbung	EIGENSCHAFTEN
<b>1 Struktur der Oberfläche</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kräftige stabile Aggregat</li> <li>• organische Bestandteile (Gänge, Durchwurzeln, Verflechtung optimal für Regen-Regenwasser)</li> <li>• Bedeckungsgrad (Fläche zur Bestäubung)</li> <li>• Reststoffe in den Gängen (Insekten, Regenwürmer)</li> <li>• RW-Lösung vorhanden</li> </ul>
<b>2 Durchwurzelung des Bodens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durchgängig über alle Horizonte</li> <li>• Wurzelverteilung gleichmäßig</li> <li>• intensive, kulturrelevante vertikale Durchwurzelung</li> </ul>
<b>3 Makroporen/ Röhren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• auf der Bodenoberfläche keine offenen Röhren</li> <li>• in Krone wenig vertikale RW-Gänge</li> <li>• Makroporen werden von oben an der Krone nach unten hin abgedichtet und sind unbrauchbar</li> <li>• alle RW-Gänge im Unterboden mit RW-Lösung und Humusmaterial gefüllt</li> </ul>
<b>4 Gefüge und Verfestigung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefüge porös, locker, fein aggregiert</li> <li>• bei Druck zwischen Fingern zerfallend</li> <li>• zerfällt bei kleinsten Kräfte und zerfällt</li> <li>• Messerwisch in die Profilschicht ohne Widerstand möglich</li> <li>• Die Oberkante soll kugelförmig (= locker tragfähig), aber kugelförmig sein</li> </ul>
<b>5 Organische Reststoffe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nach Saat gleichmäßig an der Oberfläche verteilt</li> <li>• gleichmäßig in die Krone eingemischt</li> <li>• nicht zu stark in der Krone gut verteilt</li> <li>• gleichmäßige Mineralisierung</li> </ul>
<b>6 Farbe und Geruch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Farne kann Hinweis für Humusstoffumsetzung, Laub- und Nadelhumus sollte Homogenität sein</li> <li>• gleichmäßige Farbe innerhalb der Krone</li> <li>• keine (starke) angereicherte Schicht in Oberboden für den Geruch ausgeprägter als im Unterboden</li> <li>• alle, feiner Geruch</li> </ul>

**Bewertung der Analyse**  
Zusammenfassende Beurteilung an der 5 Parameter:  
 • Gefüge in Ordnung, Lösung erfüllt (max. 12 mal -)  
 • Gefüge nach Zufriedenstand, Lösung intensiver  
 • Gefüge kritisch, Lösung ggf. erforderlich (max. 12 mal -)

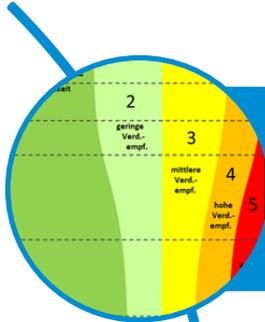
**VTI**  
Vernunftliche Technologie  
Virtuelle Technologie  
Virtuelle Technologie

**GRB**  
Gartenbauwissenschaften  
Gartenbauwissenschaften  
Gartenbauwissenschaften

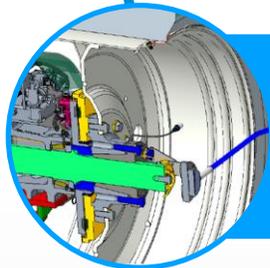


App erhältlich für  
iOS und Android

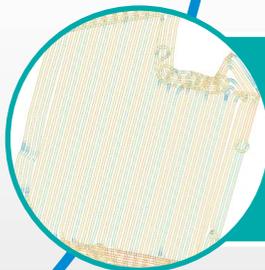
# Werkzeuge für das bodenschonende Befahren von Ackerflächen



Planung von Feldarbeitsgängen



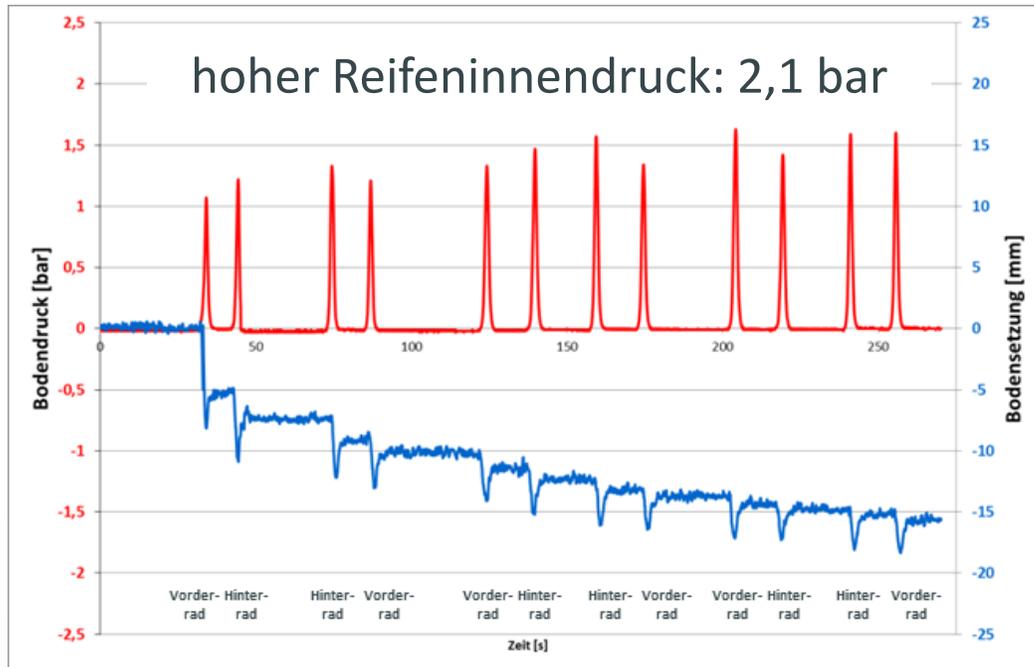
Anpassung der mechanischen Belastung an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens



Optimierung der Befahrung

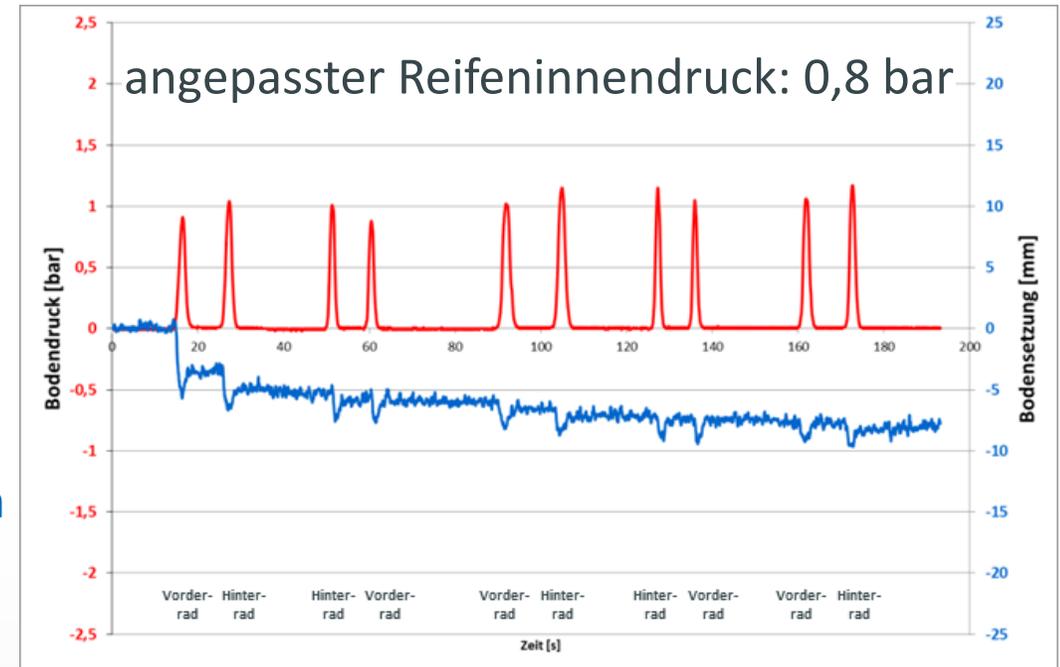
# Anpassen

## Optimierung des Reifeninnendrucks

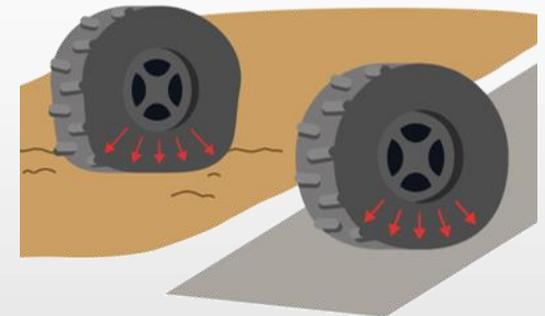


Boden-  
druck

Boden-  
deformation



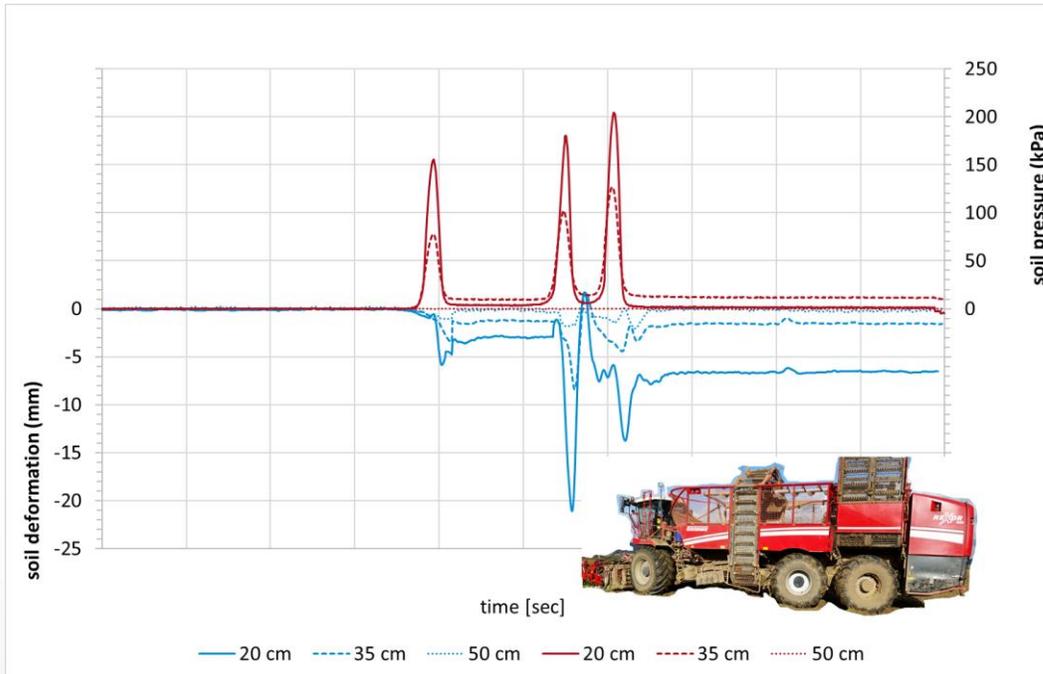
- ⇒ Anpassung des Reifeninnendrucks reduziert Lastenträge in den Boden
- ⇒ Empfehlung: Radlastabhängige Reduzierung des Reifeninnendrucks
  - ⇒ Angepasste Reifen (IF-/VF-Reifen)
  - ⇒ Reifendruckregelanlagen



# Anpassen

## Reduzierung des Kontaktflächendrucks

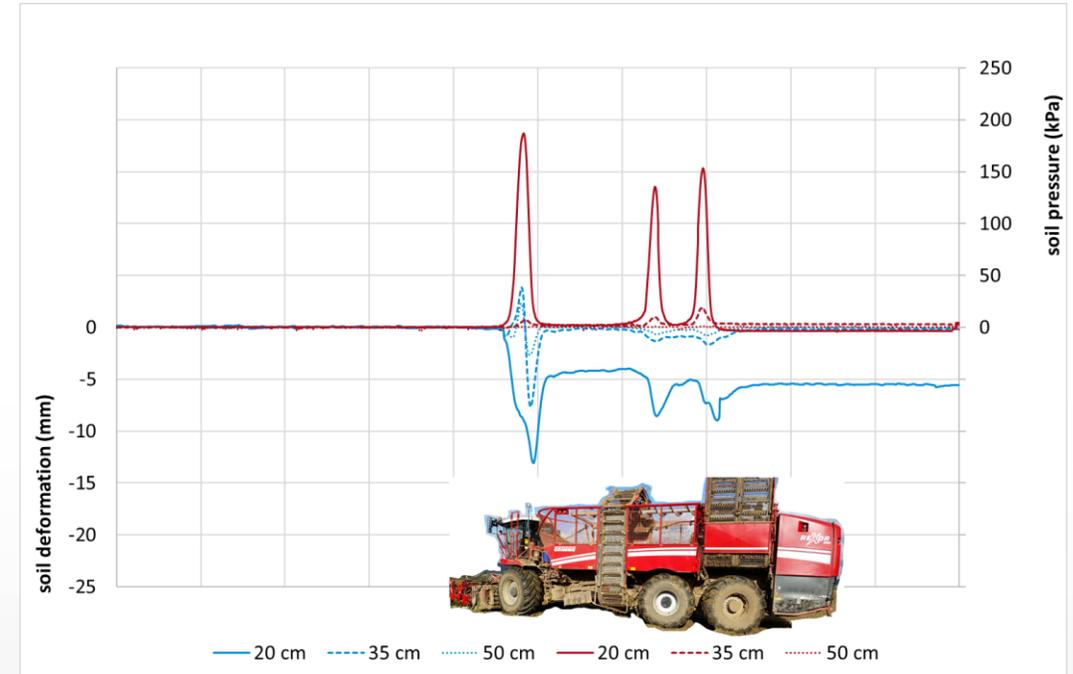
Zuckerrübenroder mit  
vollem Bunker



Boden-  
druck

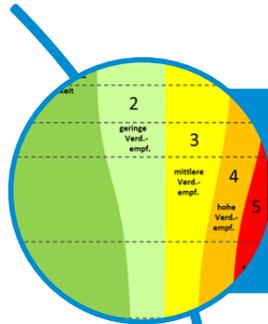
Boden-  
deformation

Zuckerrübenroder mit  
halbvollem Bunker

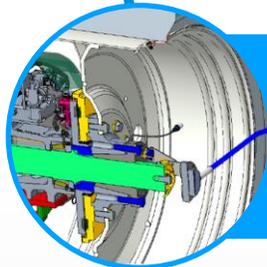


- ⇒ Radlast durch Kontrolle des Kontaktflächendrucks reduzieren
- ⇒ Anpassung der Ladung / Füllung

# Werkzeuge für das bodenschonende Befahren von Ackerflächen



Planung von Feldarbeitsgängen



Anpassung der mechanischen Belastung an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens



Optimierung der Befahrung

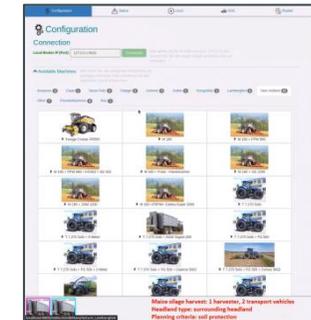
# Optimierte Befahrung

## Bodenschonende Befahrung von Ackerflächen in der Praxis



### Auf Bodenschutz optimiertes Befahrungsmanagement

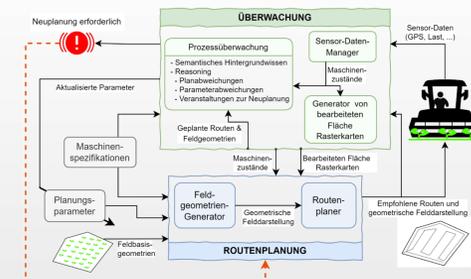
- Optimierte Fahrrouten auf Grundlage der Feldgeometrien
  - Koordination aller beteiligten Maschinen
- ⇒ **Befahrungsplanung für alle Maschinen**



### Aktuellen Belastung des Bodens durch die Maschine messen und bewerten

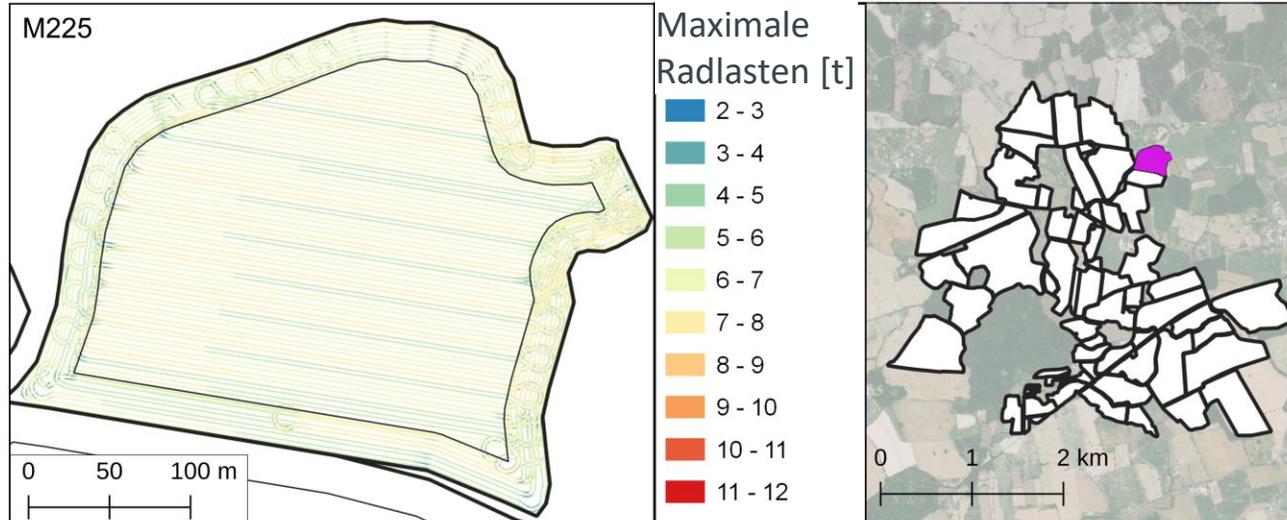
- Real-time Rückmeldung an den Maschinenführenden durch Sensorsysteme
- Anpassungen im laufenden Verfahren ermöglichen

⇒ **On-Board-Assistenz-System zur Minimierung von Lasteinträgen**



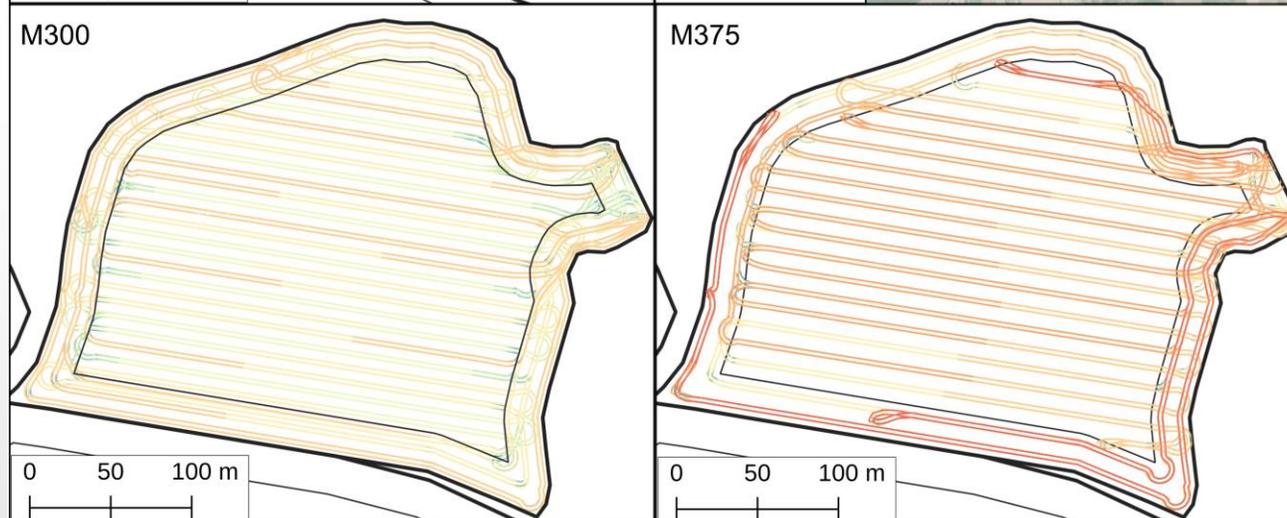
# Optimierte Befahrung Feldgeometrie und Befahrungsintensität

- Arbeitsbreite: **6 m**
- Gewicht: **15 t**
- Kapazität: **9.500 l**
- ⇒ Größte überfahrene Fläche, geringe Radlasten



**Einfluss Geometrie:**  
Kompakte Flächen  
⇒ weniger Überfahrten im Vorwende

- Arbeitsbreite: **9 m**
- Gewicht: **17,1 t**
- Kapazität: **10.500 l**
- ⇒ erhöhte Radlasten



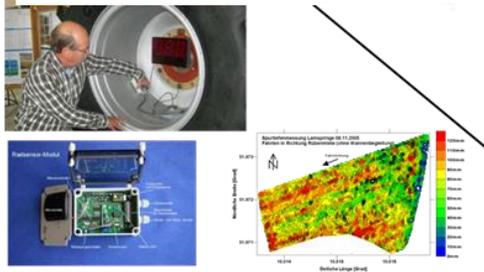
- Arbeitsbreite: **12 m**
- Gewicht: **20,8 t**
- Kapazität: **12.000 l**
- ⇒ Hohe Radlasten

Augustin et al., 2022

# Optimierte Befahrung On-board Assistance System (OBAS)



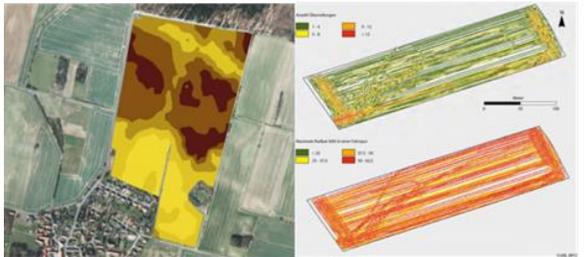
## SOILAssist Sensor System (SASS)



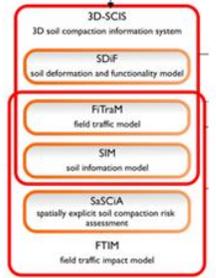
## machine data/specifications

Search/Hersteller	Model	Motor	Typ	PS	Hubraum	Diesel	AdBlue	normen	Merke
Schaeffler	Permit	628	Vario	DeutzTCD 6.1 L4	206	380	80/8	50	800/70/18 30
JOE	Palma 4230	Agri-Power	Deutz	217	80/8	390	48	800/70/18 30	750/70/18 30
Varro	724	Agri-S	Power 1	211	165	390	70	800/65/18 28	750/70/18 30
Hufvink	170 270	Hufvink	1800R-CAPS	223	170	620	38	840/65/18 28	890/65/18 28
John Deere	7200R	275 PWR	variable	208	178	80/8	54	800/70/18 30	750/70/18 30
John Deere	6210R	PowerTech	P51.6	213	160	408	20	800/70/18 30	750/70/18 30
Deutz Fahr	7200 TTV	DeutzTCD 6.1 L4	174	206	80/8	48	50	800/70/18 30	750/70/18 30
Case IH	7250R	PowerShift	P52	214	160	390	5	800/65/18 28	840/65/18 28
New Holland	78.900	Case IH	P52	214	160	390	5	800/65/18 28	840/65/18 28
Case IH	8000 Series	variable	variable	228	178	180	5	840/65/18 28	890/65/18 28
Deutz Fahr	8000 4 TTV	DeutzTCD 6.1 L4	174	206	80/8	48	28	840/65/18 28	890/65/18 28
Mikhey	Perigo	1P 7622 Dynam	AgriPower	188	130	80/8	30	840/65/18 28	890/65/18 28
Mikhey	Perigo	1P 7622 Dynam	AgriPower	188	130	80/8	30	840/65/18 28	890/65/18 28
Mikhey	Perigo	1P 7622 Dynam	AgriPower	188	130	80/8	30	840/65/18 28	890/65/18 28
Deutz Fahr	8250 TTV	DeutzTCD 6.1 L4	174	206	80/8	48	50	840/65/18 28	890/65/18 28
Mikhey	Perigo	1P 7622 Dynam	AgriPower	188	130	80/8	30	840/65/18 28	890/65/18 28
Permit	518	Vario	DeutzTCD 6.1 L4	174	206	40/20	28	840/65/18 28	890/65/18 28
John Deere	6210R	PowerTech	P51.6	213	160	408	20	800/70/18 30	750/70/18 30

## spatial information



## Models



RTK-GPS

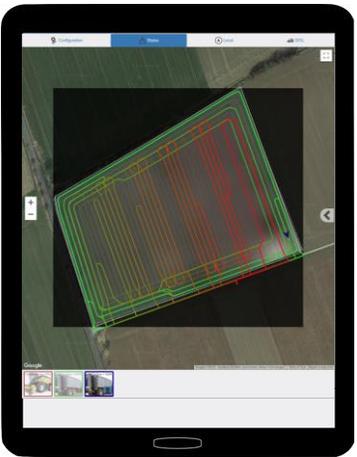
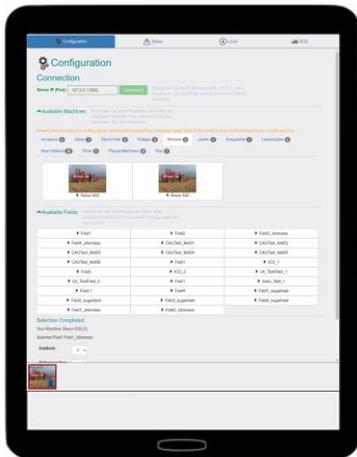


tyre pressure control system

Central Server



graphical user interface (GUI)



optimization of:

- machine parameters/specifications
- routes in the field
- rendezvous points of machineries

**Center-Right**  
 pi [bar]: 2.1 → 1.45  
 Def. [mm]: 90  
 Load [Mg]: 9.24  
 CAP [bar]: 1.07

**Back-Right**  
 pi [bar]: 3 → 2.7  
 Def. [mm]: 200  
 Load [Mg]: 18.19  
 CAP [bar]: 2.4

Recommended action: tyre pressure setpoint

Recommended action: increase/decrease

Color-code for good/warning/critical values

# Optimierte Befahrung OBAS Befahrungsmanagement Graphical User Interface (GUI)



**Configuration**

**Connection**  
Local Broker IP (Port): 127.0.0.1:9002 Connected

**Available Machines:** Hier finden Sie alle verfügbaren Maschinen der jeweiligen Hersteller. Bitte selektieren Sie den Maschinen-Typ Ihrer Maschine.

**Available Fields:** Hier finden Sie alle verfügbaren Felder. Bitte wählen Sie das Feld, für das der Prozess gesteuert werden soll.

**Process Parameters:** Hier können Sie Parameter für den Prozess festlegen.

Headland Width [m]: 24.0  
Yield [t/ha]: 50.0  
Optimization Type: Soil  
Headland Type: Surrounding  
Track sequencer: Closest next (simple)  
Switch only at track end: Inner-field  Headland

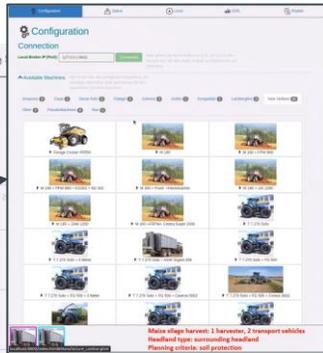
**Selection Completed:**  
Machine: Forage Cruiser FR550 (ID 2)  
Field: Bonares2024\_Field1  
Subfield: 0  
Reference line: 0  
Planning grid: soilcost wet\_2020 SET

**Selected grid maps for planning:**

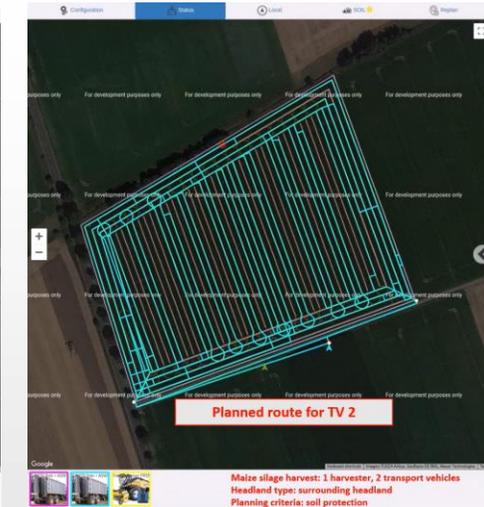
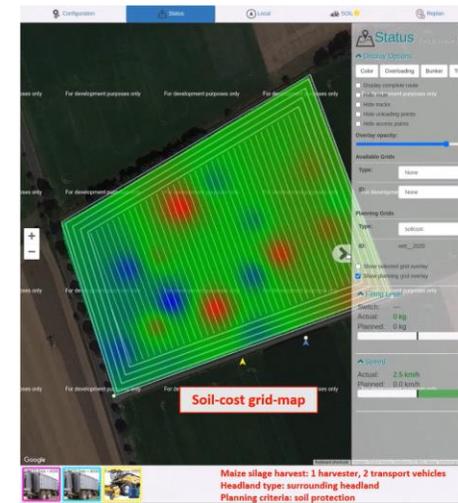
**Start/Stop Process:** Klicken Sie auf den 'Start'- oder den 'Stop'-Button, um den Prozess zu starten bzw. zu stoppen.

PROCESS FIELD PLAN ROUTES PLAN ROUTES IN BG **▶ START PROCESS** ▶ START SIMULATION

**Maize silage harvest: 1 harvester, 2 transport vehicles  
Headland type: surrounding headland  
Planning criteria: soil protection**



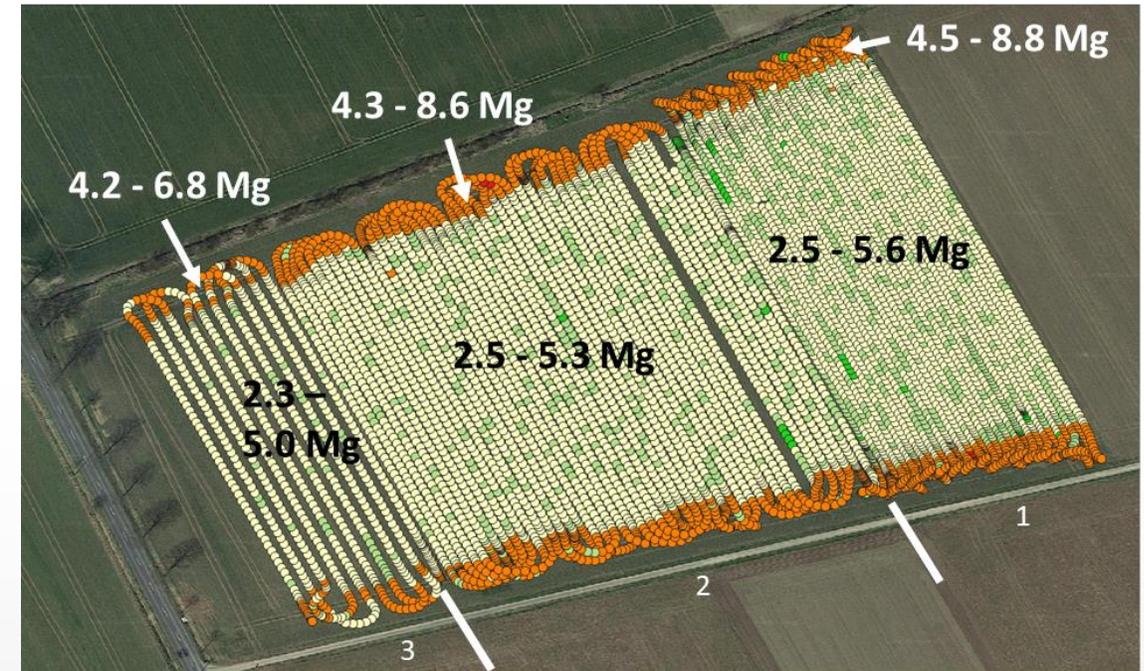
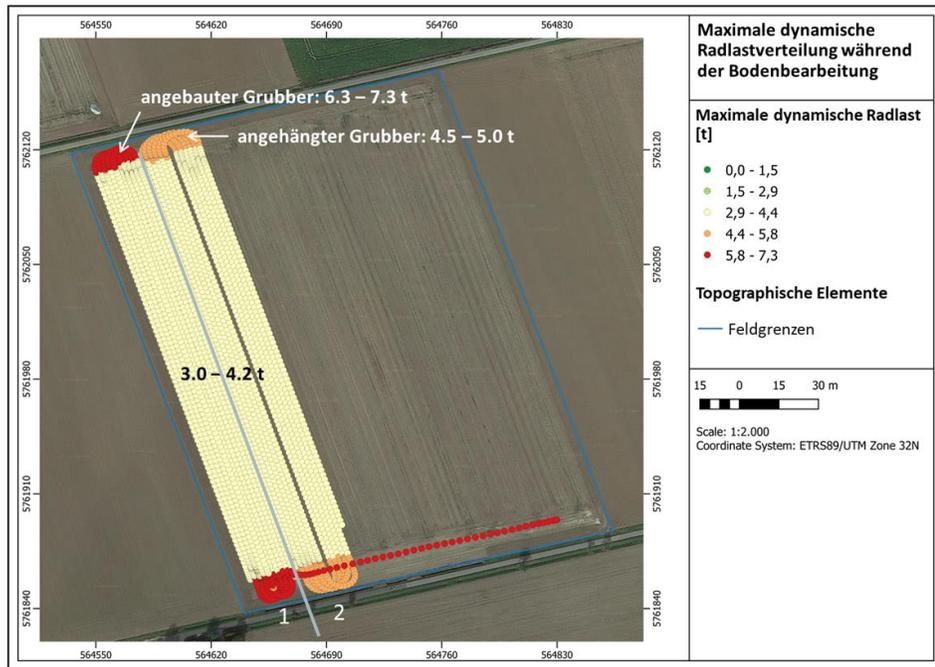
Field ID	Field Name	Area [ha]	Soil Type	Soil Cost	Soil Protection
1	Field 1	10.0	Soil 1	100	Yes
2	Field 2	15.0	Soil 2	150	Yes
3	Field 3	20.0	Soil 3	200	Yes
4	Field 4	25.0	Soil 4	250	Yes
5	Field 5	30.0	Soil 5	300	Yes
6	Field 6	35.0	Soil 6	350	Yes
7	Field 7	40.0	Soil 7	400	Yes
8	Field 8	45.0	Soil 8	450	Yes
9	Field 9	50.0	Soil 9	500	Yes
10	Field 10	55.0	Soil 10	550	Yes
11	Field 11	60.0	Soil 11	600	Yes
12	Field 12	65.0	Soil 12	650	Yes
13	Field 13	70.0	Soil 13	700	Yes
14	Field 14	75.0	Soil 14	750	Yes
15	Field 15	80.0	Soil 15	800	Yes
16	Field 16	85.0	Soil 16	850	Yes
17	Field 17	90.0	Soil 17	900	Yes
18	Field 18	95.0	Soil 18	950	Yes
19	Field 19	100.0	Soil 19	1000	Yes
20	Field 20	105.0	Soil 20	1050	Yes



# Optimierte Befahrung SOILAssist Sensor System (SASS) – Dynamische Messung



Beispiele: Maximale dynamische Radlast während der Bodenbearbeitung



# Optimierte Befahrung

## OBAS: Routenplanung und Anpassung im Feld



### Optimierung

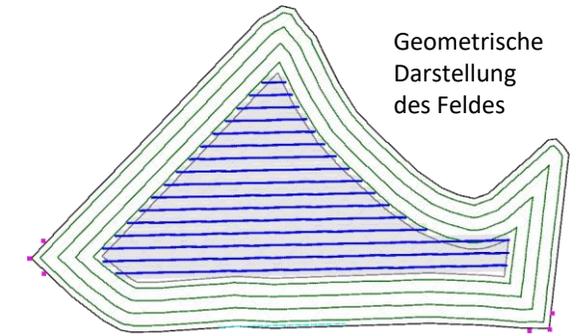
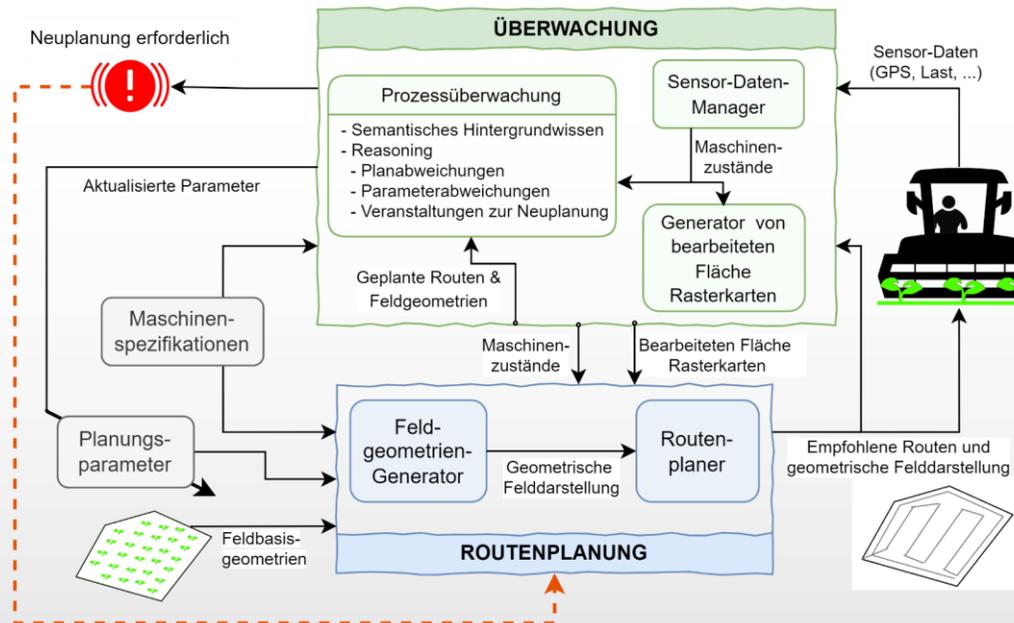
- Verringerung der **überfahrenden Massen** für jede Fläche
- **Minimierung** des Transits über Flächen mit hoher Empfindlichkeit („Kostenkarte“)

### Online-Überwachung und Neuplanung

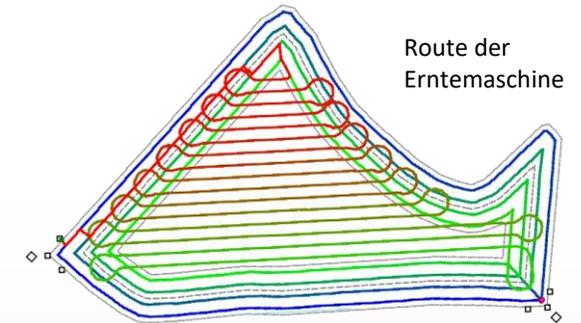
- **Abgleich** Planung mit Sensormeldungen und Ausführung
- **Dynamische Neuplanung**

### Unterstützte Szenarien

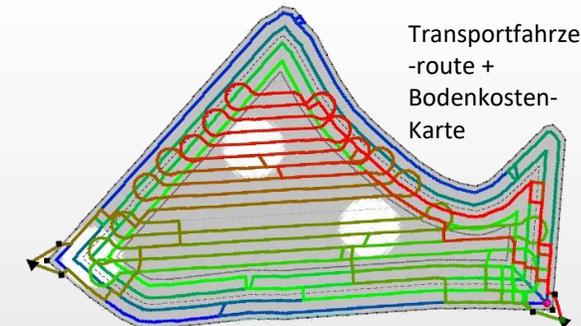
- Eine Erntemaschine **mit** Bunkerkapazität
- Eine Erntemaschine **ohne** Bunker + **ein oder mehrere** Transportfahrzeuge



Geometrische Darstellung des Feldes



Route der Erntemaschine



Transportfahrzeug-route + Bodenkosten-Karte



# Capacity Building Online-Lernmedien zu Bodenverdichtung

für Auszubildende; Berufs- und Quereinsteiger:innen in der Landwirtschaft; Interessierte;



→ Grundlagen

Hier finden Sie **Grundlagen zum Thema Bodenverdichtung im Ackerbau**. Erfahren Sie, was eine Bodenverdichtung ist, wie diese grundsätzlich entsteht und was es für Einflussfaktoren gibt.

Grundlagen: Verdichtung von Ackerböden durch Befahrungen

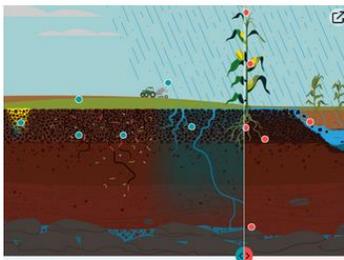
Scrollen Sie nach unten



→ Befahrbarkeit(stage)

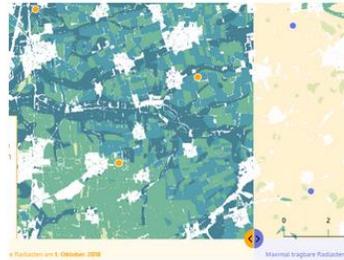
Lernen Sie, welche Faktoren bestimmen, **ob eine Befahrung einer Ackerfläche bodenschonend möglich ist oder nicht**. Mittels eines Online-Tools können Sie die mittleren **Befahrbarkeitstage** an Ihrem Standort *für den Mähdrusch* ermitteln

- Entwicklung in Kooperation mit dem BonaRes-Zentrum
- Zusätzlich: Lehrmaterialien für Fachschulen



→ Auswirkungen

Vergleichen Sie einen unverdichteten mit einem durch mechanische Belastung (schad)verdichteten Ackerboden und informieren Sie sich über die Auswirkungen von Bodenverdichtung.



→ Maximal tragbare Radlasten

Hier kann an einem Beispiel verglichen werden, wie sich die **Tragfähigkeit des Bodens im trockenen und feuchten Zustand** unterscheidet.



→ Belastung von Ackerböden

Sehen Sie hier an einem Beispiel einer 4-jährigen Fruchtfolge, welche Arbeitsgänge den Ackerboden **wie stark belasten**.

Belastung von Ackerböden durch Feldverkehr

Scrollen Sie nach unten



→ Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung

Lernen Sie **Maßnahmen** kennen, um **Bodenverdichtung im Ackerbau zu vermeiden und vermindern**.



# Zusammenfassung

## Planung, Anpassung und Optimierung für Bodenschutz



### Ziel: Minimierung der Bodenbelastungen bei der Befahrung von Ackerflächen

- ⇒ **Planungstools** unterstützen in der lang- bis mittelfristigen Planung
- ⇒ **Technische Lösungen:** Anpassung von Reifendruck und Beladung
- ⇒ **Optimierte Befahrung:** On-board Assistent System (OBAS)
  - Planung des kompletten Prozesses (z.B. Ernte) für alle beteiligten Fahrzeuge
  - Anpassung der Maschinen an die jeweilige Situation (automatische Reifendruckregelung möglich)
  - OBAS überwacht und gibt Empfehlungen zur Anpassung oder stößt eine Neuplanung an
  - Vermeidung von *random traffic*, unnötigen Befahrungen und damit Bodenbelastungen
  - Derzeit als Prototyp auf einem Betrieb in Niedersachsen im Test
- ⇒ **Info-/Lernmaterial** zum Prozess der Bodenverdichtung und Strategien zur Vermeidung

Vielen Dank!



## BonaRes (A): SOILAssist

Dr. Bastian Steinhoff-Knopp

Thünen-Institut | Stabsstelle Klima, Boden, Biodiversität

Bundesallee 49

D-38116 Braunschweig

Tel.: +49 (0)531-2570 1148

[bastian.steinhoff-knopp@thuenen.de](mailto:bastian.steinhoff-knopp@thuenen.de)

