

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de



Abschlussbericht

Prüfung, Anpassung und Weiterentwicklung des Moduls zur Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung im Betriebsbilanzierungsmodell REPRO



Förderinstitution:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Förderzeichen:

24275-34/0

Förderzeitraum:

01.01.2008 – 31.03.2010

Projektleiter:

Prof. Dr. Olaf Christen
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Professur für Allgemeinen Pflanzenbau/
Ökologischen Landbau
Betty-Heimann-Str. 5
06120 Halle/Saale

Projektbearbeiter:

Dr. Jan Rücknagel

Inhalt

1. Einleitung	6
1.1. Ziele des Forschungsvorhabens	6
1.2. Modellgrundlagen	10
2. Material und Methoden.....	17
2.1. Standorte für die Druck-Setzungsversuche	17
2.2. Durchführung der Druck-Setzungsversuche	18
2.3. Allgemeine bodenphysikalische u. chemische Untersuchungen.....	19
2.4. Modulvalidierung mit Überfahrversuchen	21
2.4.1. Zuckerrübenroder am Standort Lossa	21
2.4.2. Zuckerrübenroder am Versuchsstandort Harste	23
2.4.3. Pflanzenschutzspritze	23
2.4.4. Großraumdüngerstreuer	24
2.4.5. Ackerschlepper mit Zwillingsbereifung.....	25
2.5. Modulvalidierung mit Beobachtungsflächen	25
2.6. Datengrundlage für die Berechnungen in REPRO.....	26
2.7. Statistische Auswertung	27
3. Ergebnisse und Diskussion.....	28
3.1. Abschätzung der Gefügestabilität anhand von Druck-Setzungsversuchen.....	28
3.1.1. Gefügestabilität bei Feldkapazität.....	28
3.1.1.1. Rekultivierungsflächen	28
3.1.1.2. Natürliche Böden mit Aggregatstruktur	30
3.1.1.3. Natürliche Böden ohne Aggregatstruktur	34
3.1.1.4. Auflastabhängiges Verhalten von Aggregaten und Gesamtboden.....	36
3.1.2. Korrektur der Gefügestabilität bei unterschiedlichen Wassergehalten	38
3.1.2.1. Druck-Setzungsverhalten bei unterschiedlichem Wassergehalt.....	38

3.1.2.2. Ableitung und Weiterentwicklung des Regressionsansatzes	41
3.1.2.3. Prüfung des Regressionsansatzes	46
3.2. Modulvalidierung mit Überfahrversuchen	48
3.2.1. Zuckerrübenroder am Standort Lossa	48
3.2.2. Zuckerrübenroder am Versuchsstandort Harste	51
3.2.3. Pflanzenschutzspritze	53
3.2.4. Versuch Großraumdüngerstreuer	55
3.2.5. Versuch Zwillingsbereifung	56
3.3. Modulvalidierung mit Beobachtungsflächen	58
3.4. Übersicht der Modulvalidierungen	61
4. Schlussfolgerungen.....	69
5. Themenbezogene Veröffentlichungen.....	71
6. Themenbezogene Vorträge.....	72
7. Literaturverzeichnis.....	73

Abkürzungsverzeichnis

ARD	Aggregatdichte
ARD/TRD	Aggregatdichte - Trockenrohdichte Verhältnis
BI	Belastungsindex
BI _{Ein}	Belastungsindex einzelner Überfahrten
BWG	Bodenwassergehalt
c	Kohäsion
C _{CaCO3}	Carbonat-Kohlenstoff
C _{org}	Gehalt an organischem Kohlenstoff
C _t	Gesamtkohlenstoffgehalt
DWD	Deutscher Wetterdienst
FBMW	Festbodenmulchwirtschaft
FK	Feldkapazität
H	Ausgangshöhe
k	Konzentrationsfaktor
kf-Wert	gesättigte Wasserleitfähigkeit
k _{GS}	Korrekturfaktor zur Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung
LBW	Lockerbodenwirtschaft
LK	Luftkapazität
log	logarithmisch
log σ_p	Logarithmus der Vorbelastung
log $\sigma_{p -6kPa}$	Logarithmus der Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung
log σ_z	Logarithmus der vertikalen Spannung
M.-%	Masseprozent
MAE	mittlere absolute Abweichung
m	allgemeiner Anstieg einer linearen Gleichung
m _d	Trockenmasse
m _{EVG}	Neigung der Erstverdichtungsgerade
m _{EVG -6kPa}	Neigung der Erstverdichtungsgerade bei -6 kPa Wasserspannung
m _{EVG -30kPa}	Neigung der Erstverdichtungsgerade bei -6 kPa Wasserspannung
m _{EVG -100kPa}	Neigung der Erstverdichtungsgerade bei -6 kPa Wasserspannung
m _R	Radlast
m _{-6 kPa}	Masse bei -6 kPa Wasserspannung

NN	Höhe über Normalnull
n.b.	nicht bestimmt
nFK	nutzbare Feldkapazität
n.m.	nicht möglich
n.s.	nicht signifikant
OS	organische Substanz
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
pF	dekadischer Logarithmus der Wasserspannung in cm Wassersäule
p _i	Reifeninnendruck
R ²	Bestimmtheitsmaß
RMSE	Root Mean Square Error
S	Setzung
S _a	Sandgehalt
St.-Nr.	Standortnummer
TRD	Trockenrohdichte
TRD _{xi}	resultierende Trockenrohdichte
TRD ₃₅₀	Trockenrohdichte bei einem Druck von 350 kPa
TW	Totwasser
V _A	Aggregatvolumen
Vol.-%	Volumenprozent
W _m	Wassermassegehalt
x ₀	Schnittpunkt einer linearen Gleichung mit der Ordinate
z	Bodentiefe
σ _P	Vorbelastung
σ _{P -6kPa}	Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung
σ _{P -30kPa}	Vorbelastung bei -30 kPa Wasserspannung
σ _{P -100kPa}	Vorbelastung bei -100 kPa Wasserspannung
σ _z	vertikale Spannung in der Lastachse
φ	Winkel der inneren Reibung
Δ	allgemein Änderung des Wertes eines untersuchten Parameters
% FK	Prozent der Feldkapazität

1. Einleitung

1.1. Ziele des Forschungsvorhabens

Mit größer werdenden Ackerbaubetrieben und der zunehmenden Bedeutung des überbetrieblichen Maschineneinsatzes steigen in der pflanzlichen Produktion die Anforderungen an die Zugkräfte der Maschinen. Größere Zugkräfte und Bunkerkapazitäten der Erntemaschinen führen jedoch in der Regel zu höheren Radlasten. Damit steigt das Risiko der Entstehung von Schadverdichtungen. Das gilt insbesondere beim Befahren der landwirtschaftlichen Produktionsflächen zu Zeiten geringer Tragfähigkeit.

Die Folgen schädlicher Bodenverdichtungen sind vielfältig und beeinträchtigen alle wesentlichen ökologischen Bodenfunktionen. So werden die Luftkapazität und der Gasaustausch im Profil vermindert und eine verringerte Infiltrationsleistung infolge plattiger und kompakter Gefüge führen zu einer Zunahme von Oberflächenabfluss und Wassererosion (BALL & ROBERTSON, 1994; HORN et al., 1995; HORN & ROSTEK, 2000). Sowohl aus landwirtschaftlicher als auch ökologischer Sicht ist bedeutsam, dass bei starker Bodenverdichtung deutliche Ertragseinbußen möglich sind (HERBST & HOFMANN, 2005; VOORHEES, 2000). Das Ertragspotenzial wird nur unzureichend ausgenutzt und die Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel vermindert sich. Besonders problematisch sind diese Gefahren vor dem Hintergrund, dass Verdichtungen über einen langen Zeitraum Bestand haben und so langfristige Einschränkungen auftreten können (ALAKUKKU, 1996).

Schadverdichtungen müssen vorbeugend vermieden werden, da eine gezielte Melioration aufwändig, kostenintensiv und oft von geringer Nachhaltigkeit ist. Es ist relativ einfach, prinzipielle Empfehlungen zur Verringerung des Risikos zu geben. Eine exakte quantitative Abschätzung unter den spezifischen Boden-, Witterungs-, Produktions- und landtechnischen Bedingungen ist jedoch außerordentlich schwierig, da eine große Anzahl von Einflussgrößen in komplexen Interaktionen wirkt. Deshalb sind mathematisch-empirische Modelle ein Weg situationsbezogene Analysen vorzunehmen, um anschließend konkrete Handlungsempfehlungen zu erarbeiten. Mit solchen Modellansätzen können aufwändige Messungen eingeschränkt, das zu erwartende Verhalten des Bodens simuliert und aus den erkannten Risiken komplexe Maßnahmen zur langfristigen Vermeidung von technologisch bedingten Bodenschäden abgeleitet werden. Für das Betriebsbilanzierungsmodell REPRO (HÜLSBERGEN, 2003; KÜSTERMANN et al., 2009)

wurde ein Teilmodell (Modul „Verdichtungsgefährdung“) zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung entwickelt (RÜCKNAGEL, 2007). Aus der Integration des Moduls in REPRO ergeben sich neben der Vermeidung der Defizite bereits bestehender Modelle, wie z.B. der Vernachlässigung des standort- und fruchtartenspezifischen Jahresverlaufes des Bodenwassergehalts, folgende Vorteile:

- Die konkreten Bewirtschaftungsdaten als Voraussetzung für eine komplexe Analyse sind bereits in REPRO vorhanden.
- Die Datenbankstruktur erlaubt die Einbindung des standort- und fruchtartenabhängigen Jahresverlaufes des Bodenwassergehaltes, von Reifenparametern und Standortgrunddaten.
- Die Datenbanken ermöglichen erste Analysen bereits mit wenigen Eingabeparametern.
- Erst durch den Systemcharakter des Modells REPRO und die komplexe Verknüpfung aller wesentlichen Einflussgrößen wird eine umfassende Analyse und Bewertung einschließlich der Berechnung von Szenarien möglich.
- Der Indikator Schadverdichtungsgefährdung lässt sich innerhalb anderer betrieblicher Indikatoren im Rahmen einer Gesamtbewertung darstellen.
- Die Integration in REPRO ermöglicht eine Verbreitung des Ansatzes im Rahmen zahlreicher weiterer Anwendungen, die mit diesem Modell verbunden sind.

Eine umfassende Prüfung und gegebenenfalls Anpassung sowie Weiterentwicklung des Moduls konnte im Rahmen des abgeschlossenen Projektes zur Modellentwicklung jedoch nicht erfolgen. Diese Arbeitsschritte sind Ziel und Gegenstand des aktuellen Vorhabens und werden auf verschiedenen Versuchsebenen durchgeführt:

Abschätzung der Gefügestabilität anhand von Druck-Setzungsversuchen

Die Regressionsmodelle zur Ableitung der Gefügestabilität und der Korrektur dieser für den tatsächlichen Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt einer Überfahrt sind die bodenphysikalischen Kernstücke des Moduls. Sie wurden im bisherigen Forschungsprojekt anhand strukturierter Lehm-, Schluff- und Tonböden völlig neu entwickelt. Es ist daher zusätzlich mit uniaxialen Druck-Setzungsversuchen und dem statistischen Vergleich von gemessenen und berechneten Werten zu prüfen, inwiefern sie auch auf anderen

ähnlich texturierten Standorten und den ebenfalls zur Aggregierung neigenden sandigen Lehmen bzw. lehmigen Sanden Gültigkeit besitzen. Bei den mehr oder weniger reinen Sanden, welche entweder Einzelkorn- oder Kohärentgefüge aufweisen und keine stabilen Aggregatformen besitzen, ist außerdem zu prüfen, ob die Trockenrohdichte allein zur Ermittlung der Gefügestabilität ausreicht.

Da die Stabilität des Bodengefüges gegenüber mechanischen Belastungen maßgeblich vom Bodenwassergehalt beeinflusst wird, muss sie dem Jahresverlauf mit unterschiedlichen Bodenwassergehalten angepasst werden. Das dafür entwickelte Regressionsmodell soll in diesem Projekt für differenzierte Texturklassen erweitert und umfassend überprüft werden. Die genaue Abschätzung der Änderung der Stabilität ist für die Präzision des Gesamtmodells sehr wichtig. Alle Versuche sollen dabei sowohl an gestörten Proben mit definierten Trockenrohdichten und Aggregatdichten zur Verminderung der Streuung von Einzelwerten, wie auch an ungestört entnommenen Proben aus Krume und Unterboden durchgeführt werden.

Ergänzt werden die genannten Prüfungen der Regressionsmodelle durch Grundlagenuntersuchungen über das auflastabhängige Verhalten von Gesamtboden und Aggregaten mittels Druck-Setzungsapparatur, die zum Verständnis des Verdichtungsprozesses beitragen sollen.

Überfahrversuche mit landwirtschaftlichen Maschinen

Überfahrversuche bieten die Möglichkeit das Zusammenwirken der einzelnen für den Verdichtungsprozess relevanten Teilschritte als Einheit zu überprüfen. Die genaue Prognose des Verdichtungsrisikos von einzelnen Überfahrten ist wiederum Voraussetzung für eine erfolgreiche Aggregierung auf verschiedenen betrieblichen Ebenen bis hin zur Bewertung auf der Ebene des Gesamtbetriebes. Bei den Versuchen dieses Projektes erfolgt die Befahrung von Ackerflächen mit landwirtschaftlichen Maschinen auf vorgegebenen Trassen. Vor und nach diesen Überfahrten werden Bodenproben für physikalische und mechanische Untersuchungen entnommen. Aus der Veränderung des Gefüges kann das Verdichtungsrisiko der einzelnen Maschine abgeleitet werden. Dieses wird mit dem in REPRO anhand der technischen Daten errechneten Verdichtungsrisiko verglichen. Die Versuche sollen zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden, um auch die Effekte variierender Bodenwassergehalte mit zu erfassen. Im einzelnen soll überprüft werden, ob das Modul technische Unterschiede landwirtschaftlicher Maschinen abbil-

den kann, und dabei insbesondere wie gut die Sensitivität bei variiertem Reifeninnen-
druck, unterschiedlichen Radlasten und Bereifungsvarianten ist. Insgesamt sollen die
Überfahrversuche auch klären, ob das Modul wichtige landwirtschaftliche Arbeitsver-
fahren hinsichtlich ihrer Verdichtungsgefährdung grundsätzlich abbilden kann.

Beobachtungsflächen auf landwirtschaftlichen Betrieben

An die Prüfung der Regressionsalgorithmen und der einzelnen Überfahrten schließt sich
die Untersuchung ackerbaulich genutzter Beobachtungsflächen an. Dieser Projektteil
erlaubt Aussagen zur Genauigkeit, mit der die Aggregation der Verdichtungsgefähr-
dung auf verschiedenen betrieblichen Ebenen erfolgt. Ausgewählte Flächen werden zu
Beginn des Projektes und erneut nach einer Zeitdauer von mehreren Jahren vermessen
und bodenphysikalisch untersucht. Über die Beobachtungszeit werden die Bewirtschaf-
tungs- und Technikdaten der Schläge in REPRO erfasst und die Schadverdichtungsge-
fährdung errechnet. Die berechnete Schadverdichtungsgefährdung stellt dabei keine
abstrakte Größe dar, sondern besitzt einen realen Bezug zum Bodengefüge. Sie sollte es
deshalb ermöglichen, die Gefügeentwicklung von Ackerflächen zumindest mittelfristig
abzuleiten. Da im bisherigen Entwicklungsrahmen nur wenige Prüfungen des Gesamt-
moduls auf strukturierten Böden vorgenommen wurden, sind zunächst auf diesen Stan-
dorten weitere Prüfungen notwendig, um eine gesicherte Anwendung des Moduls zu
gewährleisten.

Das vorgestellte mehrstufige Konzept erlaubt es die Genauigkeit und Praktikabilität an
verschiedenen Stellen des Moduls, z.B. bei der Berechnung der Gefügestabilität, bei der
Korrektur anhand des Bodenwassergehaltes, bei der Berechnung des vertikalen Boden-
drucks und der Zusammenfassung auf den verschiedenen Verfahrensebenen, zu ergrün-
den. Damit wird es möglich gezielt Anpassungen und Weiterentwicklungen vorzuneh-
men.

1.2. Modellgrundlagen

Das Modul „Verdichtungsgefährdung“ enthält die vier Grundkomponenten

- Bodenwassergehalt,
- Gefügestabilität,
- Bodendruck sowie
- Auswertung und Bewertung.

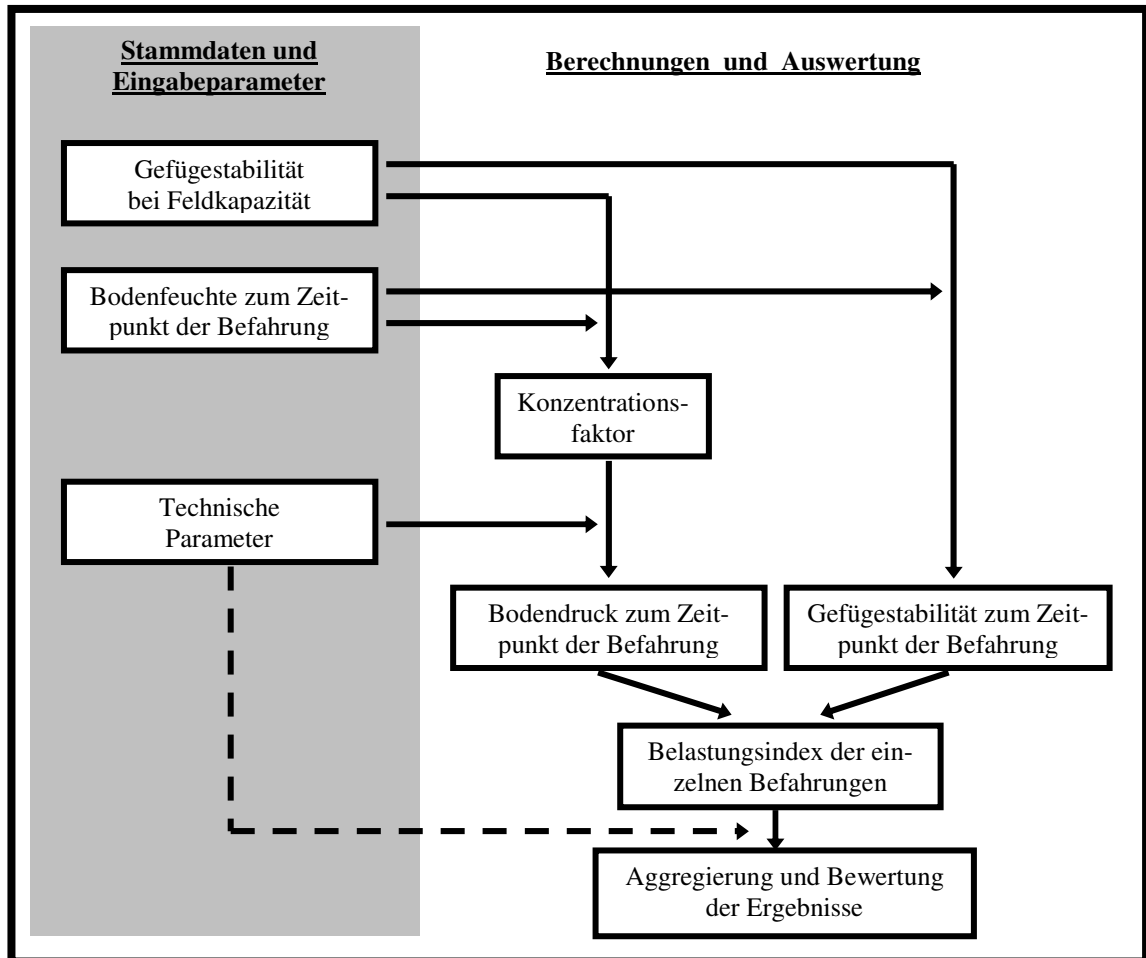


Abb. 1: Konzeption des Moduls zur Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung

In den Stammdaten sind bereits die Datenbanken zum Bodenwassergehalt verschiedener Messstationen, Standortgrundwerte der Gefügestabilität und Reifenparameter enthalten, so dass sich eine erste Abschätzung des Schadverdichtungsrisikos bereits mit wenigen Eingabeparametern durchzuführen lässt. Die Spezifizierung der Daten, insbesondere zur Gefügestabilität, erhöht die Genauigkeit der Analyse. Ergänzt wird die Dateneingabe durch betriebspezifische technische Größen. Das Modul nutzt des Weiteren die bereits

eingeegebenen Bewirtschaftungsdaten mit den entsprechenden agronomischen Terminen. Ausgehend von den Stammdaten und Eingabeparametern führt eine Reihe von Berechnungsschritten bis zur Bewertung der Verdichtungsgefährdung der Standorte auf betrieblicher Ebene (Abb. 1).

Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Überfahrt beeinflusst maßgeblich die Gefügestabilität und Druckausbreitung. Er unterliegt einem Jahresgang, der prinzipiell durch abnehmende Wassergehalte mit Beginn der Vegetation im Frühjahr, einem Minimum in den Sommermonaten und der Wiederauffüllung der Wassergehalte im Herbst charakterisiert ist. Die Ausprägung dieses Jahresverlaufs ist von der Lage des Standortes, der tatsächlichen Witterung und dem Vegetationsverlauf im einzelnen Jahr, den physikalischen Bodeneigenschaften und der angebauten Kulturart abhängig. Zur Berücksichtigung des Bodenwassergehaltes im Rahmen der Abschätzung der Verdichtungsgefährdung wurde im Modell REPRO eine Datenbank integriert. Diese enthält langjährige Mittelwerte und aktuelle Bodenwassergehalte auf Tagesbasis für verschiedene Klimastationen, zwei Bodentiefen (20 und 35 cm) und drei Fruchtartengruppen. In der ersten Gruppe sind alle Getreidearten, Körnerleguminosen sowie einjährige Begrünungen von Stilllegungen und Futterpflanzen zusammengefasst. Die zweite Gruppe enthält die im Frühjahr ausgesäten oder gepflanzten Hack- und Blattfrüchte mit einem Wasserbedarf bis in den Herbst. Alle mehrjährigen Stilllegungs- und Futterpflanzen sowie die Grünlandvarianten sind in der letzten Gruppe vereinigt.

Im Rahmen der bisherigen Nutzung des Moduls wurde auf simulierte Bodenwassergehalte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen. Diese stehen in Deutschland flächendeckend für bis zu 180 Klimastationen zur Verfügung. Die Berechnung erfolgt mit dem Wasserbilanzmodell AMBAV (BRADEN, 1992) auf Tagesbasis für eine Tiefe von 60 cm und die Kulturen Winterweizen, Zuckerrübe, Mais sowie Grünland. Als Standortdaten werden die physikalischen Bodenbedingungen am Ort der Klimastation genutzt.

Abschätzung der Gefügestabilität

Zum Schutz des Bodengefüges werden unterschiedliche Belastbarkeitsgrenzen genutzt. Im krumennahen Unterboden (35 cm Tiefe) gewährleistet die Einhaltung der Vorbelas-

gebungswerte, dass das bestehende Bodengefüge in seinem Porenvolumen und seiner Geometrie weitestgehend unbeeinflusst bleibt. Schäden am Gefüges sind in dieser Bodenschicht durch mechanischen Bodeneingriff und pflanzenbauliche Maßnahmen praktisch nur schwer zu regenerieren.

Die Belastbarkeit der unteren Ackerkrume (20 cm Tiefe) orientiert sich dagegen an der Erhaltung eines Gefüges mit Mindestfunktion. Diese Belastbarkeitswerte sind, unabhängig von der vorhandenen Vorbelastung, insbesondere für die zunehmende Umstellung auf nicht wendende und tiefenreduzierte Bodenbearbeitung von Bedeutung und sollen die langfristige Erhaltung wichtiger Bodeneigenschaften und der Ertragsfunktion sichern.

Vorbelastung und Belastbarkeit der unteren Ackerkrume werden nach einem neu entwickelten Verfahren (RÜCKNAGEL et al., 2007) aus der Trockenrohddichte und Aggregatdichte bei einer Wasserspannung von -6 kPa für die Schläge des Betriebes ermittelt:

$$\log \sigma_p = -3,15 * \text{ARD}/\text{TRD} + 0,60 * \text{TRD} + 4,49 \quad [1]$$

$\log \sigma_p$ Logarithmus der Vorbelastung

ARD Aggregatdichte [g/cm³]

TRD Trockenrohddichte [g/cm³]

Zur Berechnung der Belastbarkeit in der Unterkrume wird anstatt der tatsächlichen Dichte ein experimentell begründeter Lagerungsdichterichtwert verwandt. Dieser wurde für die im Modell hinterlegten Standardwerte anhand von Regressionen aus einer Luftkapazität von 8 Vol.-% und einer gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) von 10 cm/d ermittelt. Diese Standardschätzwerte können genutzt werden, wenn keine Messdaten für Trockenrohddichte und Aggregatdichte vorliegen. Sie sind an die Hauptbodenarten nach der Bodenschätzung geknüpft und werden nach konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung untergliedert. Liegen dem Modellnutzer gemessene oder kartierte Stabilitätswerte des Gefüges vor, so können auch diese im Modul verwandt werden.

Zur Bewertung von Befahrungen im Jahresablauf ist es notwendig die Vorbelastung bzw. Belastbarkeit auch für trockenere Bedingungen zu kennen. Anhand verschiedener Literaturarbeiten, in welchen die Vorbelastung auch bei größeren Wasserspannungen ermittelt wurde, ist ein Regressionsmodell zur stufenlosen Berechnung eines Korrekturfaktors zur Vorbelastung des Unterbodens bzw. der Belastbarkeit der Ackerkrume ent-

wickelt worden. Dieser Korrekturfaktor wird aus der Höhe der Vorbelastung und dem Wassergehalt zum Zeitpunkt der Befahrung in % der Feldkapazität berechnet.

Berechnung des Bodendrucks

Für die Berechnung des Bodendrucks (vertikale Spannung) aus Radlast und doppelten Reifeninnendruck in der Tiefe z wird die Formel von KOOLEN et al. (1992) genutzt.

$$\sigma_z = 2p_i * (1 - \cos^k (\arctan((1/z) * (m_R/\pi 2p_i)^{1/2}))) \quad [2]$$

σ_z vertikale Spannung [kPa]

p_i Reifeninnendruck [bar]

k Konzentrationsfaktor

m_R Radlast [kg]

z Bodentiefe [cm]

Eine Überprüfung verschiedener Berechnungsansätze an 117 einzelnen Bodendruckmessungen u.a. von HAMMEL (1994), GYSI et al. (1999), ARVIDSSON et al. (2000), WEISSKOPF et al. (2000), HORN et al. (2003), TRAUTNER & ARVIDSSON (2003) sowie KELLER et al. (2004) hatte die beste Reproduzierbarkeit der gemessenen Bodendrucke mit dieser Formel ergeben. Analog der Abschätzung der Gefügestabilität erfolgt die Berechnung für die untere Ackerkrume (20 cm) und den krumennahen Unterboden (35 cm). Zur Ableitung des Konzentrationsfaktors wurde aus den o.g. Arbeiten ein einfaches lineares Regressionsmodell entwickelt. In diesem wird berücksichtigt, dass der Konzentrationsfaktor mit zunehmender Vorbelastung sowie mit sinkendem Wassergehalt in % der Feldkapazität abnimmt:

$$k_{20\text{ cm}} = -2,0 * \log \sigma_{p\ 20\text{ cm}} + 0,03 * FK_{20\text{ cm}} - 3,2 \quad [3]$$

$k_{20\text{ cm}}$ Konzentrationsfaktor für die Bodentiefe 20 cm

$\log \sigma_{p\ 20\text{ cm}}$ Logarithmus der Vorbelastung in 20 cm Bodentiefe

$FK_{20\text{ cm}}$ Wassergehalt in % der Feldkapazität in 20 cm Bodentiefe

Zur Ermittlung des Konzentrationsfaktors in 35 cm Tiefe erfolgt zusätzlich die Berücksichtigung der Vorbelastung und des Bodenwassergehaltes der darüber liegenden Bodenschicht (20 cm):

$$k_{35\text{ cm}} = -2,0 * (\log \sigma_{p\ 20\text{ cm}} + \log \sigma_{p\ 35\text{ cm}}) / 2 + 0,03 * (\% FK_{20\text{ cm}} + FK_{35\text{ cm}}) / 2 - 3,2 \quad [4]$$

$k_{35\text{ cm}}$	Konzentrationsfaktor für die Bodentiefe 20 cm
$\log \sigma_{P\ 35\text{ cm}}$	Logarithmus der Vorbelastung in 35 cm Bodentiefe
$FK_{35\text{ cm}}$	Wassergehalt in % der Feldkapazität in 35 cm Bodentiefe

Auswertung und Bewertung

Als erster Auswertungsschritt wird für jede einzelne Überfahrt in den Bodentiefen 20 und 35 cm die Differenz zwischen dem berechneten Bodendruck ($\log \sigma_z$) und der Gefügestabilität ($\log \sigma_P$) gebildet. Dazu wird auch der Bodendruck in logarithmischer Form verwandt.

$$BI_{\text{Ein}} = \log \sigma_z - \log \sigma_P \quad [5]$$

BI_{Ein} Belastungsindex der Einzelüberfahrt

$\log \sigma_z$ Logarithmus der vertikalen Spannung

$\log \sigma_P$ Logarithmus der Vorbelastung bzw. Belastbarkeit

Diese Differenz ermöglicht als dimensionsloser Belastungsindex der Einzelbefahrung eine Einschätzung der Belastbarkeit. Werte größer als 0 weisen auf einen höheren Bodendruck als die Bodenstabilität hin. Negative Werte, bei welchen der Bodendruck die Bodenstabilität nicht überschreitet, werden für die weiteren Auswertungsschritte gleich 0 gesetzt. Der Belastungsindex kann zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung auf verschiedenen Ebenen aggregiert werden. Dabei werden die verfahrensspezifischen Bedingungen mit berücksichtigt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Form von Tabellenübersichten und Graphiken (Abb. 2). Folgende Betrachtungsweisen sind möglich:

1. Maschinenebene

- Analyse unter deren konkreten Einsatzterminen
- graphischer Jahresverlauf unabhängig vom tatsächlichen Einsatztermin

2. Verfahrensebene

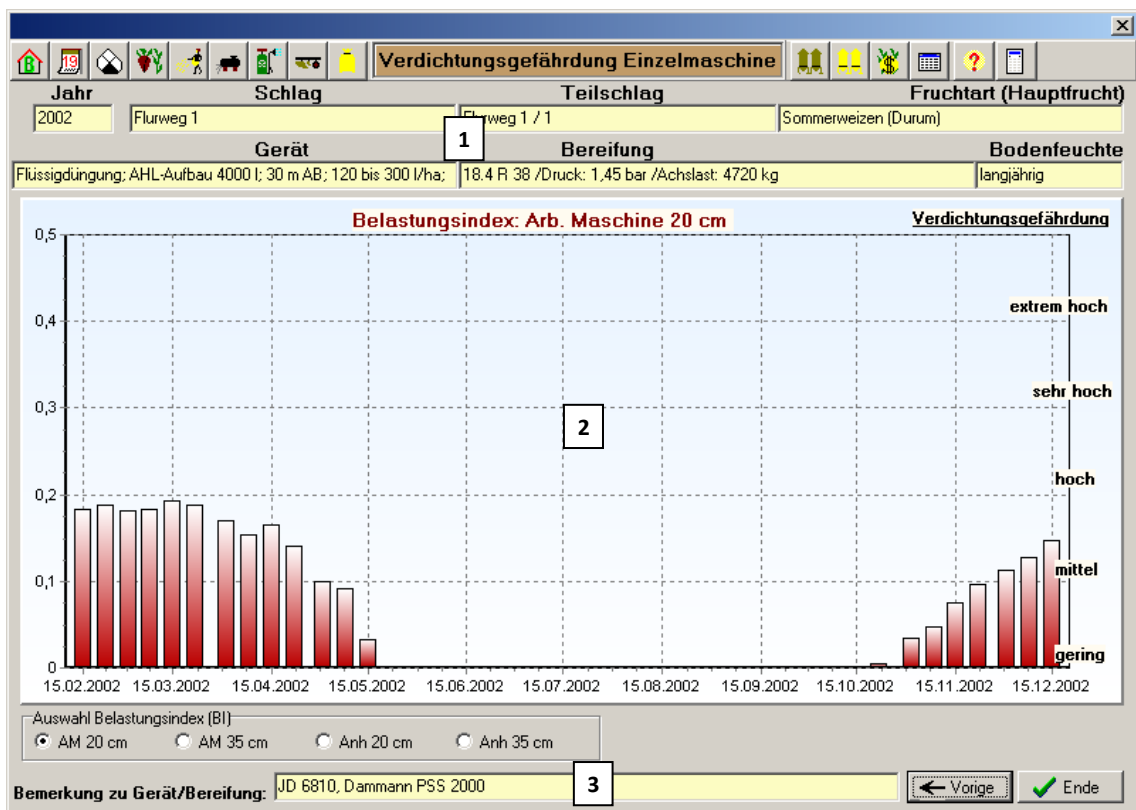
- einzelne Verfahrensabschnitte (z.B. Bodenbearbeitung)
- regelspurabhängige Verfahren
- regelspurunabhängige Verfahren
- Gesamtindex für alle Verfahren auf Basis verschiedener betrieblicher Ebenen

3. Zusammenfassung auf betrieblichen Ebenen

- Teilschlag
- Schlag
- Nutzungsarten Acker- und Grünland
- Fruchtfolgen
- Fruchtarten
- Gesamtbetrieb

4. Zeitliche Ebene

- Einzeljahresauswertung
- Jahresvergleiche



- 1 Anzeige der der Graphik zugrunde liegenden Bedingungen
- 2 graphische Darstellung des Jahresverlaufes der Verdichtungsgefährdung
- 3 Bemerkungsfeld, z.B. mit genauer Maschinenbezeichnung

Abb. 2: Graphische Darstellung der Verdichtungsgefährdung einzelner Maschinen

Eine Bewertung der Belastungsindizes kann anhand der Tab. 1 vorgenommen werden. Die Einordnung orientiert sich an der mittleren Verdichtbarkeit (Neigung der Erstverdichtungsgerade von Druck-Trockenrohdichtefunktionen) der Böden (RÜCKNAGEL et al., 2007). Sie liegt bei 0,20 (0,10 bis 0,30). Dementsprechend ist bei Überschreitung

der Belastbarkeit um je 0,10 mit einer Dichtezunahme von durchschnittlich 0,02 g/cm³ zu rechnen. Die Bewertung der Belastungsindizes wird dem Programmnutzer in den Auswertungsmenüs beim Anklicken der einzelnen Indizes angezeigt. Sie dient des weiteren als Eckpunkt einer Normalisierungsfunktion für den gesamtbetrieblichen Belastungsindex in den Tiefen 20 und 35 cm.

Tab. 1: Bewertung der Belastungsindizes

Belastungsindex	Bewertung (Gefährdungsgruppe)	Leistungsbewertung
$\leq 0,10$	geringe Verdichtungsgefährdung	1,00 – 0,75
0,11 – 0,20	mittlere Verdichtungsgefährdung	0,75 – 0,50
0,21 – 0,30	hohe Verdichtungsgefährdung	0,50 – 0,25
0,31 – 0,40	sehr hohe Verdichtungsgefährdung	0,25 – 0,00
$> 0,40$	extrem hohe Verdichtungsgefährdung	0,00

2. Material und Methoden

2.1. Standorte für die Druck-Setzungsversuche

Für alle Untersuchungen im Rahmen der Prüfung der Regressionsmodelle wurden im zurückliegenden Projektzeitraum an Standorten in verschiedenen Regionen Deutschlands natürlich gelagerte und gestörte Bodenproben entnommen (Tab. 2). Sie stammen aus einem standörtlich eingegrenzten Datensatz von Rekultivierungsflächen im rheinischen Braunkohlegebiet (St.-Nr. 1.1.-8.1.), aus der Ackerkrume und dem krumennahen Unterboden von Praxisschlägen (St.-Nr. 9.1.-17.2.) und von Bodenbearbeitungsversuchen (St.-Nr. 18.1.-20.2.). Zur Erweiterung der Druck-Setzungsversuche für die Korrektur der Gefügestabilität bei unterschiedlichen Wassergehalten wurden die natürlich entnommenen Stechzylinderproben durch gestörte Proben ergänzt (St.-Nr. 21.1.-24.1.). Bei ihnen wurde im feldfeuchten Zustand gesiebter Boden mit einem Aggregatdurchmesser <10 mm in die Stechzylinder eingebaut.

Die Standorte verteilen sich auf alle Bodenartenhauptgruppen (Sande, Lehme Schluffe und Tone; AG BODENKUNDE, 2005). Einen Schwerpunkt bildet jedoch die Bodenartenhauptgruppe der Schluffe mit den Bodenarten mittel und stark toniger Schluff (Ut3, Ut4) bzw. die Bodenart „Silt Loam“ nach dem USDA Schema (GEE & BAUDER, 1986).

Tab. 2: Textureigenschaften der Standorte für die Drucksetzungsversuche; ¹nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODENKUNDE, 2005), ² USDA Schema (GEE & BAUDER, 1986), n.b. nicht bestimmt

St.-Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	Textur (M.-%)			Bodenart ¹	Bodenart ²
		Ton	Schluff	Sand		
1.1.	Neurath I 35-38	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
1.3.	Neurath I 80-83	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
2.1.	Neurath II 35-38	16	81	3	Ut3	Silt Loam
2.2.	Neurath II 55-58	16	81	3	Ut3	Silt Loam
2.3.	Neurath II 80-83	16	81	3	Ut3	Silt Loam
3.1.	Fortuna II 17-20	16	81	3	Ut3	Silt Loam
3.2.	Fortuna II 35-38	16	82	2	Ut3	Silt Loam
3.3.	Fortuna II 80-83	16	82	2	Ut3	Silt Loam
4.1.	Fischbach I 30-33	20	62	18	Lu	Silt Loam
5.1.	Frechen 35-38	15	82	3	Ut3	Silt Loam
5.2.	Frechen 55-58	15	82	3	Ut3	Silt Loam
5.3.	Frechen 80-83	15	82	3	Ut3	Silt Loam

Tab. 2: Fortsetzung

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	Textur (M.-%)			Boden- art ¹	Boden- art ²
		Ton	Schluff	Sand		
6.1.	Neurath III 45-48	15	80	5	Ut3	Silt Loam
7.1.	Fortuna IV 32-35	16	81	3	Ut3	Silt Loam
7.2.	Fortuna IV 55-58	17	79	4	Ut3	Silt Loam
7.3.	Fortuna IV 85-88	13	83	4	Ut3	Silt Loam
8.1.	Königshofen III 35-38	14	81	5	Ut3	Silt Loam
9.1.	Pesch 40-43	12	85	3	Ut3	Silt Loam
10.1.	Quellendorf 10-13	11	29	60	Sl3	Sandy Loam
11.1.	Herrengosserstedt I 18-21	22	65	13	Ut4	Silt Loam
11.2.	Herrengosserstedt I 32-35	24	63	13	Ut4	Silt Loam
11.3.	Herrengosserstedt II 12-15	44	44	12	Lt3	Silty Clay
11.4.	Herrengosserstedt II 25-28	55	37	8	Tu2	Clay
12.1.	Uchtdorf 19-22	3	14	83	Su2	Loamy Sand
12.2.	Uchtdorf 35-38	1	3	96	Ss	Sand
13.1.	Lossa 2-5	15	69	16	Ut3	Silt Loam
14.1.	Hemleben I 9-12	46	37	18	Tu2	Clay
15.1.	Rothenberga I 14-17	6	83	11	Uu	Silt
15.2.	Rothenberga II 17-20	13	82	5	Ut3	Silt Loam
16.1.	Torgau 17-20	4	16	80	Su2	Loamy Sand
16.2.	Torgau 30-33	5	15	80	Su2	Loamy Sand
17.1.	Bergzow I 6-9	20	26	54	Ls4	Sandy Clay Loam
17.2.	Bergzow II 6-9	23	24	53	Ls4	Sandy Clay Loam
18.1.	Lückstedt I 17-20	4	21	75	Su2	Loamy Sand
18.2.	Lückstedt II 17-20	4	21	75	Su2	Loamy Sand
19.1.	Buttelstedt I 15-18	31	64	5	Tu3	Silty Clay Loam
19.2.	Buttelstedt I 45-48	27	65	8	Tu4	Silty Clay Loam
19.3.	Buttelstedt II 15-18	31	66	3	Tu4	Silty Clay Loam
20.1.	Görzig I 19-22	19	73	8	Ut4	Silt Loam
20.2.	Görzig II 19-22	19	73	8	Ut4	Silt Loam
21.1.	Halle I 15-25	8	26	66	Sl3	Sandy Loam
22.1.	Hemleben II 15-25	50	38	12	Tu2	Clay
23.1.	Niestetal 15-25	13	80	7	Ut3	Silt Loam
24.1.	Seehausen 15-25	12	45	43	Slu	Loam

2.2. Durchführung der Druck-Setzungsversuche

Das eingesetzte Oedometer arbeitet vollautomatisch. Die Setzung wird mit einer Genauigkeit von 0,01 mm aufgezeichnet. An den Stechzylinderproben (220 cm³, 78 cm²) wur-

den nacheinander die Druckstufen 5, 10, 25, 50, 100, 200, 350 und 550 kPa (z.T. 1200 und 2500 kPa) aufgebracht. Nach jeder Stufe wurde eine Entlastungsphase geschaltet. Die Versuche erfolgten mit einer Belastungszeit von 180 Minuten je Druckstufe und einer Entlastungszeit von jeweils 15 Minuten. Alle Versuche fanden unter drainierten Bedingungen statt (DIN 18135, 1999). Aus der Setzung im Vergleich zur Ausgangshöhe der Probe nach jeder Druckstufe und der Trockenrohdichte zu Beginn des Versuches wurde die resultierende Trockenrohdichte der jeweiligen Druckstufe berechnet.

$$\text{TRD}_{\text{xi}} = ((H - S)/H)^{-1} * \text{TRD} \quad [6]$$

TRD Trockenrohdichte [g/cm³]

TRD_{xi} resultierende Trockenrohdichte [g/cm³]

H Ausgangshöhe [mm]

S Setzung [mm]

Die Bestimmung der mechanischen Vorbelastung erfolgte anhand der Druck-Trockenrohdichtefunktionen nach dem graphischen Verfahren von CASAGRANDE (1936) durch zwei unabhängige Versuchspersonen (RÜCKNAGEL et al., 2010).

Am Beispiel des Rekultivierungsstandorts „Neurath II 35-38 cm“ und des Bodenbearbeitungsversuchs „Görzig I 19-22 cm“ (Pflug-Variante) sowie „Görzig II 19-22 cm“ (Grubber-Variante) wurde das auflastabhängige Verhalten des Gesamtbodens und der Aggregate separat analysiert. Abweichend von der oben beschriebenen Versuchsdurchführung wurde auf die einzelne Stechzylinderprobe nur jeweils eine Druckstufe aufgebracht. Es wurden insgesamt 5 Druckstufen (5, 16, 50, 160, 500 kPa) mit je 3 Wiederholungen durchgeführt. Im Anschluss an den Kompressionsvorgang erfolgte die Bestimmung der Aggregatdichte (Fraktion 8-10 mm) an jeder Stechzylinderprobe. Aus der Trockenrohdichte der einzelnen Stechzylinder und deren Aggregatdichte wurde das ARD/TRD-Verhältnis errechnet.

2.3. Allgemeine bodenphysikalische u. chemische Untersuchungen

Die Stechzylinder zur Bestimmung des Druck-Setzungsverhaltens wurden mit 3 bis 7 Wiederholungen im Sandsaugtisch (DIN ISO 11274) zunächst auf einen Wassergehalt bei einer Saugspannung von -6 kPa eingestellt. Eine Entwässerung auf -10 kPa (pF 2,0) bis -1500 kPa (pF 4,2) für die Überprüfung des Regressionsmodells zur Korrektur der Vorbelastung bei niedrigeren Bodenwassergehalten wurde im Druckplattenextraktor

(DIN ISO 11274) erreicht. Die Trocknung der Stechzylinder nach den Drucksetzungsversuchen bei 105 °C bis zur Massekonstanz diente zur Ermittlung der Trockenrohddichte (DIN ISO 11272).

An 250 cm³ Stechzylindern wurde in 8-12 Wiederholungen die gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) bestimmt. Es kam eine stationäre Anlage (DIN 19683) mit 30 Messplätzen zum Einsatz. Nach einer Zeit von 4 Stunden wurde das gesamte perkolierte Wasservolumen gemessen. Aus den gewonnenen Daten wurden geometrische Mittelwerte errechnet.

Mit der Entnahme der Stechzylinder wurden in den selben Tiefenbereichen gestörte Bodenproben entnommen. Dieses Bodenmaterial wurde in feldfeuchtem Zustand vorsichtig durch ein Sieb mit 20 mm Öffnungsweite zerteilt und anschließend die Aggregate der Größenfraktion 8-10 mm, soweit diese bodenartenabhängig vorhanden waren, ausgesiebt. Zur Aufsättigung der Aggregate und Einstellung einer Wasserspannung von -6 kPa diente eine Sandsaugbox. In ihr wurden die Aggregate in Ringen mit einem Durchmesser von 50 mm so angeordnet, das jedes Aggregat Kontakt zum Sandboden hatte. Die Aufsättigung erfolgte durch kapillaren Sog der Aggregatporen aus einem ca. 1 mm hohen Wasserfilm in der Sandsaugbox. Das Einfüllen eines höheren Wasserstandes birgt die Gefahr des Zerfallens der Aggregate. Im Anschluss an die Einstellung der Wasserspannung (nach einem Tag) wurde an einem Teil jeder Probe (ca. 10-15 g) durch Trocknung bei 105 °C der Wassergehalt bestimmt. Der zweite Teil der Probe (weitere 10-15 g) wurde gewogen, in ein feinmaschiges Netz überführt und in ein pflanzliches Öl (Viskosität 32) getaucht. Die so getränkten Aggregate wurden auf Filterpapier ausgebreitet, um das überschüssige Öl ablaufen zu lassen. Damit wurde das Aggregat mit einem dünnen Wasser abweisenden Film, der das Volumen vernachlässigbar beeinflusst, umhüllt. Anschließend wurden die so vorbehandelten Aggregaten vollständig in Wasser getaucht. Die Aggregate verdrängen ein ihrem Volumen entsprechendes Wasservolumen (Archimedisches Prinzip). Die Masse des verdrängten Wassers wurde mit einer Genauigkeit von 0,01 g bestimmt. Sie entspricht bei einer Dichte des Wassers von 1,0 g/cm³ dem Volumen der eingewogenen Aggregate. Aus der Masse der trockenen Aggregate und dem Volumen der Aggregate lässt sich die Aggregatdichte errechnen:

$$ARD = m_d / V_A \quad [7]$$

ARD Aggregatdichte [g/cm³]

m_d Masse der trockenen Aggregate [g]

V_A Volumen der Aggregate [ml]

Die Trockenmasse der eingewogenen Aggregate ergibt sich aus der eingewogenen Aggregatmenge bei einer Wasserspannung von -6 kPa und dem parallel bestimmten Wassermassegehalt:

$$m_d = m_{-6 \text{ kPa}} / (W_m / 100 + 1) \quad [8]$$

m_d Trockenmasse [g]

$m_{-6 \text{ kPa}}$ Aggregatmenge bei einer Wasserspannung von -6 kPa [g]

W_m Wassergehalt [g]

Jede Aggregatdichtebestimmung wurde mit 3 Wiederholungen aus einer Mischprobe von 5 Entnahmen je Standort und Tiefe durchgeführt.

Die kombinierte Sieb- (> 63 μm) und Pippetmethode (< 63 μm), (DIN ISO 11277) diente zur Untersuchung der Korngrößenverteilung der Versuchsstandorte. Mit einem Heliumpyknometer (HARTGE & HORN, 2009) wurde die Festsubstanzdichte bestimmt. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) wurde aus der Differenz von Gesamtkohlenstoffgehalt (C_t) und Gehalt an Carbonat-Kohlenstoff (C_{CaCO_3}) bestimmt (DIN ISO 10694).

2.4. Modulvalidierung mit Überfahrversuchen

2.4.1. Zuckerrübenroder am Standort Lossa

Anfang Oktober 2007 wurden auf einer Zuckerrübenfläche in Lossa (Erhebung der Finne am Nordostrand des Thüringer Beckens; Höhe 320 m über NN; Jahresniederschlag 580 mm; Jahresdurchschnittstemperatur 8,5 °C) während der Zuckerrübenernte bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Der Bodentyp auf der Versuchsfläche ist eine Braunerde-Fahlerde. Bodenarten sind mittel toniger Schluff (16 M.-% Sand, 15 M.-% Ton) in der Ackerkrume und stark toniger Schluff (8 M.-% Sand, 25 M.-% Ton) im Unterboden.

Die Zuckerrübenernte erfolgte mit einem 6-reihigen selbstfahrenden Köpfrodebunker „Eurotiger“ der Firma ROPA Maschinenbau. Gefahren wurde während der Ernte im sogenannten Schongang, bei dem durch Versetzen der hinteren Achsen ein möglichst geringer Flächenanteil an Mehrfachüberrollungen erreicht werden soll (Abb. 3).

Die Reifeninnendrucke betragen zwischen 270 und 305 kPa. Sie wurden von der Rodegemeinschaft eingestellt und für die Untersuchungen nicht verändert. Aufgrund einer kurzen Schlaglänge von ca. 350 m konnte die Bunkerkapazität des Rübenrodgers nur etwa zur Hälfte ausgeschöpft werden. Die aus dem Leergewicht, dem Füllvolumen des Bunkers und der Gewichtsverteilung des Rübenrodgers geschätzten Radlasten betragen deshalb nur zwischen ca. 6,1 und 6,7 t.

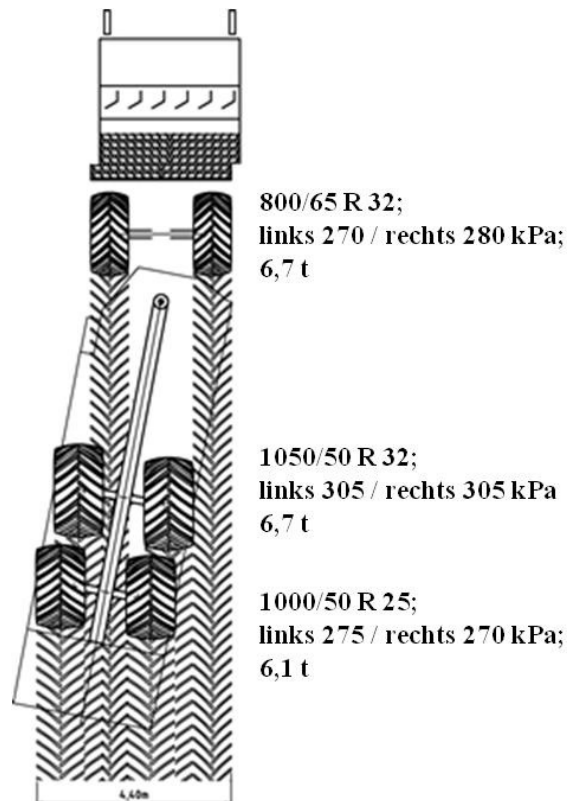


Abb. 3: Radstellung, Reifendimension, Reifeninnendruck und Radlast des Zuckerrübenrodgers „Eurotiger“ im Befahrungversuch (ROPA MASCHINENBAU, 2009, geändert)

Der Herbst 2007 war durch ein besonders hohes Niederschlagsaufkommen geprägt, so dass die Bodenwassergehalte zum Zeitpunkt der Zuckerrübenernte bei 97 % der Feldkapazität in der Ackerkrume (0-30 cm) und 95 % im Unterboden (30-60 cm) lagen.

Vor und nach der Ernteüberfahrt wurden an zufällig ausgewählten Stellen auf einem Teilschlag Stechzylinderproben (n = 14 bzw. 10) aus den Tiefen 17-23 cm, 32-35 cm und 47-53 cm entnommen. Sie dienten zur Bestimmung der Luftkapazität, der gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Trockenrohdichte. An gestört entnommenen Bodenpro-

ben aus den selben Tiefen wurde die Aggregatdichte (Größenfraktion 8-10 mm) ermittelt.

2.4.2. Zuckerrübenroder am Versuchsstandort Harste

Auf einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch des IfZ Göttingen in Harste (Varianten: Festbodenmulchwirtschaft-FBMW, Lockerbodenwirtschaft-LBW) wurden Überfahrversuche mit einem selbstfahrenden sechsreihigen Zuckerrübenroder (Radlast 9,3-10,4 t; Reifeninnendruck 200-310 kPa) durchgeführt (KOCH et al., 2008), die zur unabhängigen Validierung des Schadverdichtungsmoduls in REPRO herangezogen werden. Die Versuchsfläche (Bodentyp: Parabraunerde, Bodenart in der Krume: Ut3) wurde am 17.11.2003 (Bodenwassergehalte 88-109 % FK), 10.11.2004 (Bodenwassergehalte 98-102 % FK) und 11.11.2005 (Bodenwassergehalte 97-106 % FK) jeweils einmal überfahren, mit dem Ziel, die Auswirkung wiederholter Befahrung auf das Bodengefüge zu prüfen. Nach der letzten Überfahrt wurden die bodenphysikalischen Parameter Trockenrohddichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Luftkapazität in den Tiefen 18-23 cm, 30-35 cm und 40-45 cm von KOCH et al. (2008) untersucht. Gestört entnommene und gekühlt gelagerte Rückstellproben aus den selben Schichten dienten zur Ermittlung der Aggregatdichte im Rahmen dieses Projektes. Für die Modellüberprüfung wurde die Tiefen 40-45 cm der REPRO Berechnungstiefe 35 cm als krumennaher Unterboden gegenübergestellt, weil die Tiefe 30-35 cm in der LBW-Variante mit gelockert wurde. Auch die Tiefe 18-23 cm konnte in der LBW-Variante nicht in die Modellvalidierung einbezogen werden, weil die Entnahme der Stechzylinder nicht direkt nach der letzten Überfahrt sondern nach der Bearbeitung mit dem Pflug erfolgte.

2.4.3. Pflanzenschutzspritze

Der Versuch wurde im Frühjahr 2008 auf einer mit Winterweizen bestellten Praxisfläche in Zwenkau (Leipziger Tieflandbucht; Höhe 136 m über NN; Jahresniederschlag 565 mm; Jahresdurchschnittstemperatur 9,3 °C) durchgeführt. Bodenart in der Ackerkrume (0-30 cm) ist schwach toniger Schluff (23 M.-% Sand, 10 M.-% Ton). Bodentyp ist eine Parabraunerde. Die Bodenwassergehalte zum Zeitpunkt der Überfahrt betrugen 75 % der Feldkapazität in 17-23 cm Tiefe und 86 % der Feldkapazität in 32-38 cm Tiefe.

Als Versuchsmaschine diente ein Traktor „John Deere 6920“ mit angehangener Pflanzenschutzspritze „Hardi Commander plus 4200 Twin Force“ (Arbeitsbreite 27 m, Füll-

volumen 4200 l). Die Radlasten wurden im gefüllten Zustand der Pflanzenschutzspritze ausgewogen. Sie betragen 1,3 t für die Vorderachse des Traktors, 2,8 t für die Hinterachse des Traktors und 4,0 t für die Pflanzenschutzspritze. Neben einer unbefahrenen Kontrolle wurden die in Tabelle 3 beschriebenen Varianten der Reifeninnendrucke untersucht.

Jede Luftdruckvariante wurde 4 mal wiederholt und je Wiederholung wurden 3 Stechzylinderproben zur Bestimmung der Trockenrohddichte, der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie gestörte Proben zur Bestimmung der Aggregatdichte aus den Tiefen 17-23 cm und 32-38 cm entnommen.

Tab. 3: Reifeninnendrucke und deren Begründung im Überfahrversuch

Versuchsvariante / Reifeninnendruck	Variantenbegründung
70 kPa	Niedrigster technisch realisierbarer Reifeninnendruck, bei dem die Tragfähigkeit der Reifen der Pflanzenschutzspritze und die Fahrsicherheit im Versuch gewährleistet werden konnte
90 kPa	Reifeninnendruck, der bei Feldfahrt mit max. 10 km/h und ohne starkes, durchgehendes Drehmoment nach technischem Ratgeber des Reifenherstellers möglich ist
130 kPa	Reifeninnendruck im Mittel zwischen den Bedingungen für Feld- und Straßenfahrt
170 kPa	Reifeninnendruck, der bei Straßenfahrt mit max. 30 km/h nach technischem Ratgeber des Reifenherstellers möglich ist

2.4.4. Großraumdüngerstreuer

Nach der Ausbringung von Kalkdünger mit einem Großraumdüngerstreuer „Terragator 2104“ (Bereifung: 1050/50 R 32; Reifeninnendruck: 250 kPa; Radlast berechnet aus Ladevolumen und Gewichtsverteilung: 7,2 t) im November 2008 wurden in den befahrenen und unbefahrenen Schlagbereichen aus der unteren Ackerkrume (17-23 cm) Stechzylinderproben (n=12) zur Bestimmung der Trockenrohddichte, der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie gestörte Proben zur Bestimmung der Aggregatdichte entnommen. Der Versuchsstandort befindet sich am Nordostrand des Thüringer Beckens (Höhe 300 m über NN; mittlerer Jahresniederschlag 580 mm; mittlere Jahrestemperatur 8,5 °C). Bodentyp ist eine Braunerde-Fahlerde mit der Bodenart

schluffiger Lehm (Lu, 21 M.-% Sand, 19 M.-% Ton) im Ap-Horizont (0-30 cm). Der Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Überfahrt betrug 93 % der Feldkapazität.

2.4.5. Ackerschlepper mit Zwillingsbereifung

Im April 2009 wurde in Rothenberga (Erhebung der Finne am Nordostrand des Thüringer Beckens; Höhe 300 m über NN; mittlerer Jahresniederschlag 580 mm; mittlere Jahrestemperatur 8,5 °C) ein Überfahrversuch zur Prüfung verschiedener Bereifungsvarianten angelegt. Bodenart in der Ackerkrume des Versuchsstandortes ist mittel toniger Schluff (Ut3, 5 M.-% Sand, 14 M.-% Ton) und der Bodentyp ist eine Braunerde-Fahlerde. Der Versuch beinhaltet die Varianten (jeweils einfache Überfahrt): Unbefahrene Kontrolle, Einfachbereifung (Dimension Hinterrad 18.4 R 30, Radlast 2,0 t) mit 160 kPa Reifeninnendruck, Zwillingsbereifung (Dimension Hinterräder 18.4 R 30, Radlast 1,15 t und 13.6 R 36, Radlast 0,85 t) mit 160 kPa Reifeninnendruck und Zwillingsbereifung (gleiche Dimensionen und Radlasten) mit 60 kPa Reifeninnendruck. Der Luftdruck der Normalbereifungsvariante und der abgesenkte Luftdruck in der zweiten Zwillingsbereifungsvariante orientieren sich an den Vorgaben der Reifenhersteller für die entsprechenden Radlasten. Mit der Variante Zwillingsbereifung 160 kPa Reifeninnendruck soll ein in der landwirtschaftlichen Praxis verbreitetes Vorgehen abgebildet werden. Dort werden oft die Zwillingsreifen ohne entsprechende Anpassung des Luftdrucks montiert. Analog zu den anderen Versuchen wurden für alle Überfahrvarianten die physikalischen Bodenparameter mittels Stechzylinderproben (n=12) in der Tiefe 17-23 cm bestimmt. Bei den Zwillingsbereifungen erfolgte die Untersuchung für beide Räder separat. Der Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung betrug 83 % der Feldkapazität.

2.5. Modulvalidierung mit Beobachtungsflächen

Im Rhein Hessischen Tafel- und Hügelland (Rheinland-Pfalz, 510-590 mm langjähriger Niederschlag; mittlere Jahrestemperaturen von 9,5-10,5 °C) wurden auf zwei Praxisflächen in Hechtsheim und Wöllstein erstmalig im Frühjahr 2003 bzw. 2004 und wiederholt 2009 bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Bodenart über die gesamte Tiefe bis 38 cm ist in Hechtsheim mittel toniger Schluff (Ut3) und in Wöllstein schwach toniger Lehm (Lt2), (Tab. 4).

Die Grundbodenbearbeitung erfolgte in Hechtsheim nichtwendend mit einer maximalen Arbeitstiefe von 15 cm. Bis zur ersten Untersuchung im Jahr 2003 wurde mit einem

Zweischichtpflug bis in 40 cm Tiefe gearbeitet. Ein völliger Lockerungsverzicht mit Direktsaat erfolgte auf dem Schlag in Wöllstein mehrere Jahre vor und während des Beobachtungszeitraums. Die Flächen wurden mit praxisüblicher Technik bewirtschaftet. In den Jahren zwischen den Untersuchungen wurden vorrangig Getreide und Zuckerrüben angebaut.

Tab. 4: Textur und C_{org} -Gehalt der Beobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz

Schlagbezeichnung und Entnahmetiefe (cm)	Ton (M.-%)	Schluff (M.-%)	Sand (M.-%)	C_{org} -Gehalt (M.-%)
Hechtsheim 17-23	15	70	15	2,89
Hechtsheim 32-38	17	74	9	3,12
Wöllstein 17-23	31	46	23	1,86
Wöllstein 32-38	29	45	26	2,29

2.6. Datengrundlage für die Berechnungen in REPRO

Parallel zu den bodenphysikalischen Messungen wurde die Schadverdichtungsgefährdung mit REPRO (Belastungsindex) in den Tiefen 20 cm bzw. 35 cm errechnet. Als Eingangsgröße für die Stabilität des Bodengefüges dient immer die Vorbelastung, berechnet aus den gemessenen Aggregatdichten und Trockenrohdichten. Diese ermöglicht eine einfache Gegenüberstellung der Veränderung von bodenphysikalischen Eigenschaften mit den berechneten Belastungsindizes.

Soweit die Bodenwassergehalte in den Versuchen bestimmt wurden, gingen sie direkt in die Berechnungen ein. Auf den Beobachtungsflächen wurde auf berechnete Daten des Deutschen Wetterdienstes in der entsprechenden Fruchtartengruppe zurückgegriffen. Die nächste verfügbare Klimastation der rheinland-pfälzischen Flächen ist Frankfurt/Main-Flughafen.

Als technische Größen wurden die Reifendimension, der aktuelle Reifeninnendruck und die Achslast der eingesetzten Maschinen verwandt. Während die Achslasten zum Teil aus den Gesamtmassen der Maschinen und der Gewichtsverteilung geschätzt werden mussten, wurde der Reifeninnendruck generell gemessen.

Für eine weitergehende Risikoabschätzung erfolgte im Versuch Zuckerrübenroder am Standort Lossa die Berechnung mit einer maximalen Radlast bei voller Bunkerauslastung sowie angepasstem Reifeninnendruck. Bei den Zwillingsbereifungen erfolgte die

Berechnung mit REPRO jeweils als Gesamtbereifung und für beide Räder separat. Auf den Beobachtungsschlägen wurden die Bewirtschaftungsdaten des entsprechenden Zeitraumes aus den Schlagkarteien der Betriebe bzw. der Versuchsstation in das Modell REPRO übertragen und die technischen Daten der Maschinen aufgenommen.

2.7. Statistische Auswertung

Für die Ableitung einfacher linearer Regressionsbeziehungen sowie Varianzanalysen wurde das Programm Statistica (STATSOFT, INC., 2009) genutzt. Die Vorbelastung wurde stets in logarithmischer Form verwandt. Zur Modellvalidierung dienen das 95 % Prognoseintervall der Einzelwerte, die mittlere absolute Abweichung (MAE), der „Root Mean Square Error“ (RMSE), das Bestimmtheitsmaß (R^2) sowie die Neigung der Regressionsfunktion und deren Schnittpunkt mit der Ordinate (WILLMOTT, 1982). Die Kennzeichnung statistischer Signifikanzen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$ (Testverfahren t-Test bzw. Tukey-Test abhängig von der Variantenanzahl) erfolgt mit unterschiedlichen Buchstaben.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Abschätzung der Gefügestabilität anhand von Druck-Setzungsversuchen

3.1.1. Gefügestabilität bei Feldkapazität

Die Überprüfung und Weiterentwicklung des Regressionsmodells zur Abschätzung der Gefügestabilität bei Feldkapazität wird nachfolgend für den standörtlich abgegrenzten Datensatz der nordrhein-westfälischen Rekultivierungsflächen (St.-Nr. 1.1.-8.1.) und die natürlich gelagerten Böden (St.-Nr. 9.1.-20.2.) separat durchgeführt. Damit soll eine Vermischung von natürlich und anthropogen entstandenen Böden vermieden werden. Zudem werden die natürlichen Standorte in Böden mit und ohne Aggregatstruktur unterteilt. An Böden mit Aggregatstruktur lässt sich eine ausreichende Menge an stabilen Aggregaten der Größenfraktion 8-10 mm für die Bestimmung der Aggregatdichte gewinnen. Für diese Böden kann das Regressionsmodell der Gleichung [1] überprüft werden. Das Verdichtungsverhalten der aggregierten Böden lässt sich weiterhin durch die separate Analyse der Veränderung von Trockenrohdichte und Aggregatdichte mit steigender Auflast gut veranschaulichen. An den Böden ohne Aggregatstruktur können keine Aggregate ausgesiebt werden. Für diese Standorte wird eine Validierung an bereits bestehenden Regressionsfunktionen anderer Autoren vorgenommen.

3.1.1.1. Rekultivierungsflächen

Tabelle 5 enthält einen Überblick der Trockenrohdichten, Aggregatdichten, Vorbelastungen (in kPa und logarithmisch) sowie des ARD/TRD-Verhältnisses aller untersuchten rekultivierten Standorte. Die verschiedenen auf den Einzelflächen angewandten Verteil- und Planierverfahren bei der Rekultivierung und deren Zeiträume führen auch bei vergleichbarer Textur zu unterschiedlichen Bodenstrukturbedingungen (DUMBECK, 2009). So variieren die ARD/TRD-Verhältnisse von 0,99 (sehr gering) bis 1,27 (sehr hoch). Der Schwerpunkt liegt mit Werten zwischen 1,10 und 1,15 im mittleren Bereich. Besonders niedrige Vorbelastungen besitzen Horizonte mit einem hohen bis sehr hohen ARD/TRD-Verhältnis (z.B. „Fortuna II 80-83 cm“ und „Fortuna IV 85-88 cm“). Mit abnehmendem ARD/TRD-Verhältnis nehmen die Vorbelastungen zu. Sehr hohe Vorbelastungen mit ARD/TRD-Verhältnissen von $<1,03$ liegen beispielsweise an den Standorten „Neurath I 80-83 cm“ und „Neurath III 45-48 cm“ vor. Die gemessenen Tro-

ckenrohddichten und ARD/TRD-Verhältnisse der Rekultivierungsflächen repräsentieren jedoch nur einen Teilausschnitt gegenüber dem Datensatz von RÜCKNAGEL (2007).

Tab. 5: Trockenrohddichte (TRD), Aggregatdichte (ARD), ARD/TRD-Verhältnis, Logarithmus der Vorbelastung ($\log \sigma_P$) und Vorbelastung (σ_P) der untersuchten nordrhein-westfälischen Ackerflächen

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	TRD (g/cm ³)	ARD (g/cm ³)	ARD/TRD- Verhältnis	$\log \sigma_P$	σ_P (kPa)
1.1.	Neurath I 35-38	1,61	1,79	1,11	1,89	78
1.3.	Neurath I 80-83	1,71	1,69	0,99	2,47	295
2.1.	Neurath II 35-38	1,51	1,73	1,15	1,85	71
2.2.	Neurath II 55-58	1,54	1,68	1,09	2,27	186
2.3.	Neurath II 80-83	1,49	1,73	1,16	1,74	55
3.1.	Fortuna II 17-20	1,56	1,70	1,09	2,21	162
3.2.	Fortuna II 35-38	1,49	1,74	1,17	1,61	41
3.3.	Fortuna II 80-83	1,40	1,78	1,27	1,16	15
4.1.	Fischbach I 30-33	1,63	1,79	1,10	2,30	200
5.1.	Frechen 35-38	1,57	1,77	1,13	2,06	115
5.2.	Frechen 55-58	1,51	1,68	1,11	1,63	43
5.3.	Frechen 80-83	1,54	1,70	1,10	1,76	58
6.1.	Neurath III 45-48	1,73	1,77	1,02	2,39	245
7.1.	Fortuna IV 32-35	1,54	1,64	1,06	1,84	69
7.2.	Fortuna IV 55-58	1,43	1,59	1,11	1,79	62
7.3.	Fortuna IV 85-88	1,40	1,66	1,19	1,37	23
8.1.	Königshofen III 35-38	1,72	1,77	1,03	2,47	295

Eine Gegenüberstellung der gemessenen und kalkulierten Vorbelastungswerte im Vergleich zu den Untersuchungen von RÜCKNAGEL (2007) ist in Abbildung 4 enthalten. Die Regressionsfunktion der nordrhein-westfälischen Rekultivierungsflächen verläuft flacher (Tab. 6). Im Mittel sind die 17 Messwerte der Vorbelastung im logarithmischen Maßstab jedoch nur um 0,01 höher als die aus Aggregatdichte und Trockenrohddichte berechneten Werte. Die mittlere absolute Abweichung (MAE) von gemessenen und berechneten Werten liegt bei 0,16. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung beträgt 0,81. Damit befinden sich die Werte alle im 95 % Prognoseintervall des Datensatzes von RÜCKNAGEL (2007). Die mittlere absolute Abweichung und das Bestimmtheitsmaß sind bei vergleichbarem Werteintervall aber etwas ungünstiger.

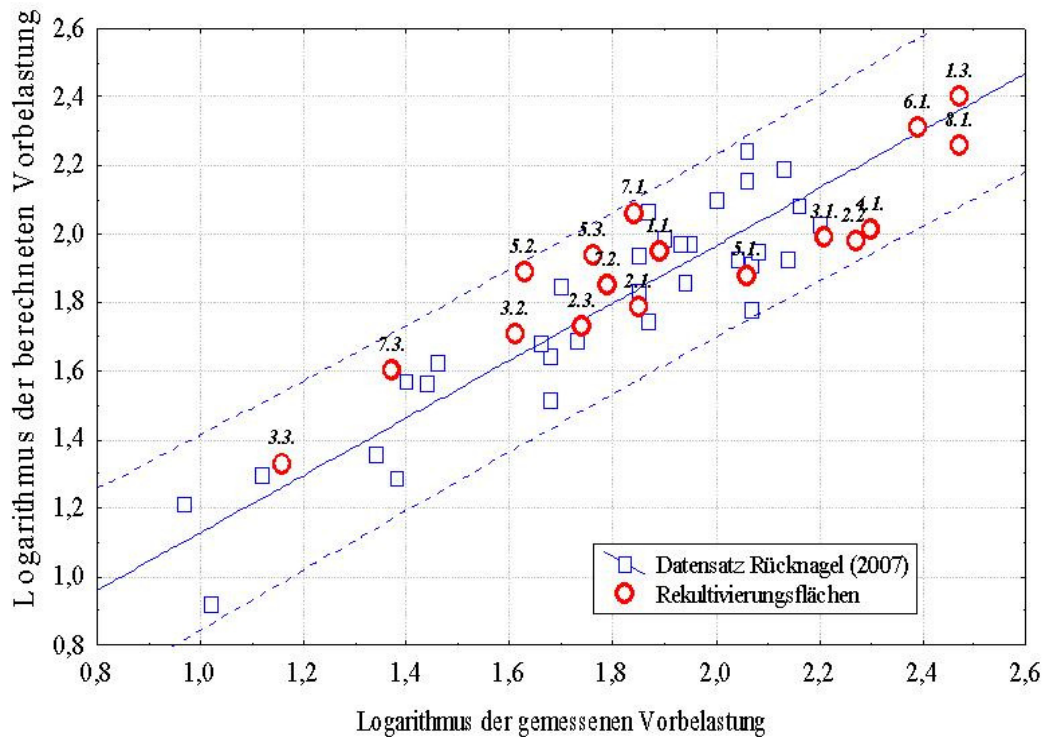


Abb. 4: Gemessene und kalkulierte Vorbelastungswerte der Rekultivierungsflächen und von RÜCKNAGEL (2007), (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte, die Nummer entspricht der Standortnummer)

Tab. 6: Statistische Parameter der Datensätze von RÜCKNAGEL (2007) und aus der vorliegenden Modellvalidierung an den Rekultivierungsflächen

Parameter	RÜCKNAGEL (2007)	Rekultivierungsflächen
Mittlere absolute Abweichung (MAE)	0,12	0,16
Bestimmtheitsmaß (R^2 , Intervall)	0,84 (1,19)	0,81 (1,31)
Anstieg der linearen Funktion (m)	0,84	0,61
Schnittpunkt mit der Ordinate (x_0)	0,29	0,74

3.1.1.2. Natürliche Böden mit Aggregatstruktur

An zahlreichen Böden, auch aus der Hauptgruppe der Sande konnten stabile Aggregate für die Bestimmung der Aggregatdichte ausgesiebt werden. Die Tabelle 7 gibt einen Überblick der Vorbelastungen (Einheit kPa und Logarithmus), Trockenrohdichten und Aggregatdichten sowie des ARD/TRD-Verhältnisses aller untersuchten Böden mit Aggregatstruktur. Höhe und Spannbreite der Trockenrohdichte sowie des ARD/TRD-Verhältnisses decken sich sehr gut mit dem Datensatz zur ursprünglichen Ableitung des Regressionsmodells (Abb. 5).

Tab. 7: Trockenrohdichte (TRD), Aggregatdichte (ARD), ARD/TRD-Verhältnis, Logarithmus der Vorbelastung ($\log \sigma_P$) und Vorbelastung (σ_P) der natürlich gelagerten Böden mit Aggregatstruktur

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	TRD (g/cm ³)	ARD (g/cm ³)	ARD/TRD- Verhältnis	$\log \sigma_P$	σ_P (kPa)
9.1.	Pesch 40-43	1,55	1,66	1,07	2,30	200
10.1.	Quellendorf 10-13	1,72	1,87	1,09	2,16	145
11.1.	Herrengosserstedt I 18-21	1,44	1,63	1,13	2,09	123
11.2.	Herrengosserstedt I 32-35	1,56	1,70	1,09	2,24	174
11.3.	Herrengosserstedt II 12-15	1,34	1,35	1,01	1,95	89
11.4.	Herrengosserstedt II 25-28	1,38	1,38	1,00	1,96	91
13.1.	Lossa 2-5	1,22	1,58	1,30	1,25	18
14.1.	Hemleben I 9-12	1,27	1,46	1,15	1,51	32
15.1.	Rothenberga I 14-17	1,59	1,68	1,06	2,19	155
15.2.	Rothenberga II 17-20	1,36	1,53	1,13	1,72	53
17.1.	Bergzow I 6-9	1,55	1,70	1,10	2,01	102
17.2.	Bergzow II 6-9	1,68	1,77	1,05	2,36	229
19.1.	Buttelstedt I 15-18	1,21	1,62	1,34	1,28	19
19.2.	Buttelstedt I 45-48	1,26	1,51	1,20	1,81	65
19.3.	Buttelstedt II 15-18	1,38	1,62	1,17	1,72	53
20.1.	Görzig I 19-22	1,26	1,59	1,26	1,57	37
20.2.	Görzig II 19-22	1,53	1,71	1,12	1,75	56

In den vorliegenden Proben betragen die Vorbelastungswerte zwischen 18 ($\log 1,25$) und 229 kPa ($\log 2,36$). Besonders niedrige Vorbelastungswerte besitzen wiederum Standorte mit einem hohen bis sehr hohen ARD/TRD-Verhältnis. Dies sind vor allem intensiv mechanisch bearbeitete Böden, wie die Pflug-Varianten der Bodenbearbeitungsversuche „Buttelstedt I 15-18 cm“ und „Görzig I 19-22“ cm. Mit abnehmendem ARD/TRD-Verhältnis nehmen die Vorbelastungen zu. Gefüge mit geringem und sehr geringem ARD/TRD-Verhältnis finden sich insbesondere an den Standorten „Herrengosserstedt II 12-15 cm“, „Herrengosserstedt II 25-28 cm“ und „Bergzow II 6-9 cm“.

Der statistische Vergleich von gemessenen und berechneten Vorbelastungen ergibt eine mittlere absolute Abweichung von 0,17 (Tab. 8). Die Werte befinden sich weitestgehend im 95% Prognoseintervall des Datensatzes von RÜCKNAGEL (2007), (Abb. 6).

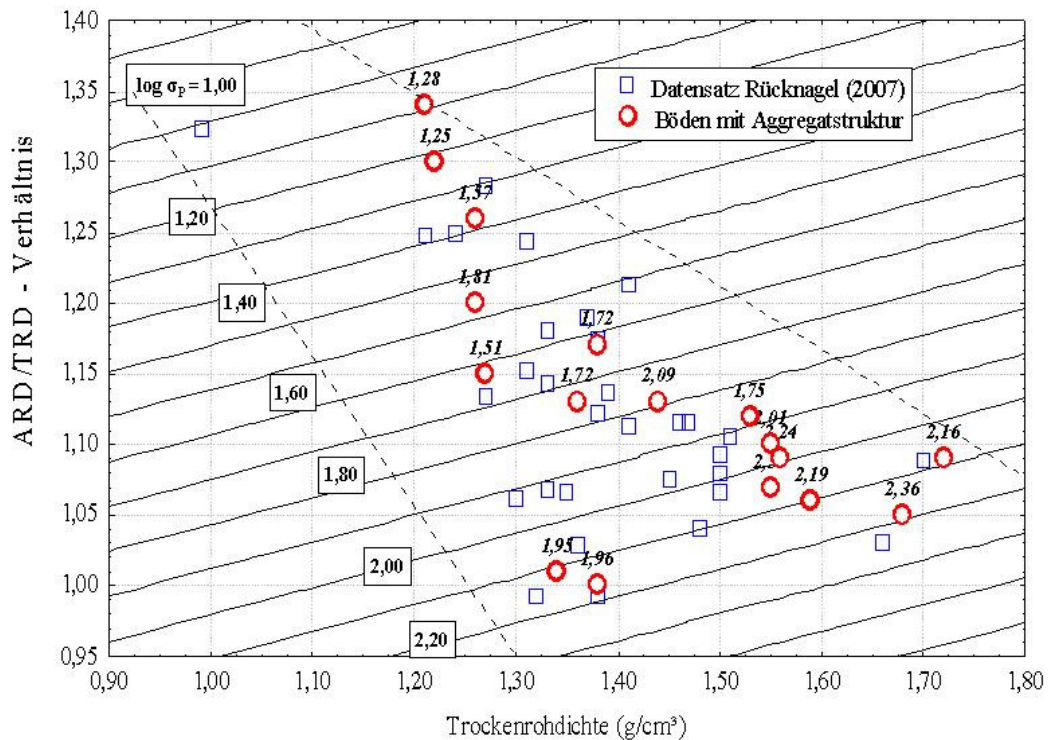


Abb. 5: Spannbreite der gemessenen Trockenrohddichte und ARD/TRD-Verhältnisse aller Böden mit Aggregatstruktur im Vergleich zu den Daten von RÜCKNAGEL (2007)

Tab. 8: Statistische Parameter der Datensätze von RÜCKNAGEL (2007) und aus der Modellvalidierung an natürlich gelagerten Böden mit Aggregatstruktur

Parameter	RÜCKNAGEL (2007)	alle Böden mit Aggregatstruktur
Mittlere absolute Abweichung (MAE)	0,12	0,17
Bestimmtheitsmaß (R^2 , Intervall)	0,84 (1,19)	0,77 (1,11)
Anstieg der linearen Funktion (m)	0,84	0,96
Schnittpunkt mit der Ordinate (x_0)	0,29	0,03

Im Durchschnitt aller Böden mit Aggregatstruktur sind die gemessenen Vorbelastungen um 0,09 höher als die berechneten. Die MAE sind vergleichbar mit den Rekultivierungsflächen, aber wiederum etwas höher als im Datensatz von RÜCKNAGEL (2007). Die Regressionsfunktion verläuft deutlich steiler als die Funktionen von RÜCKNAGEL (2007) und die der Rekultivierungsflächen.

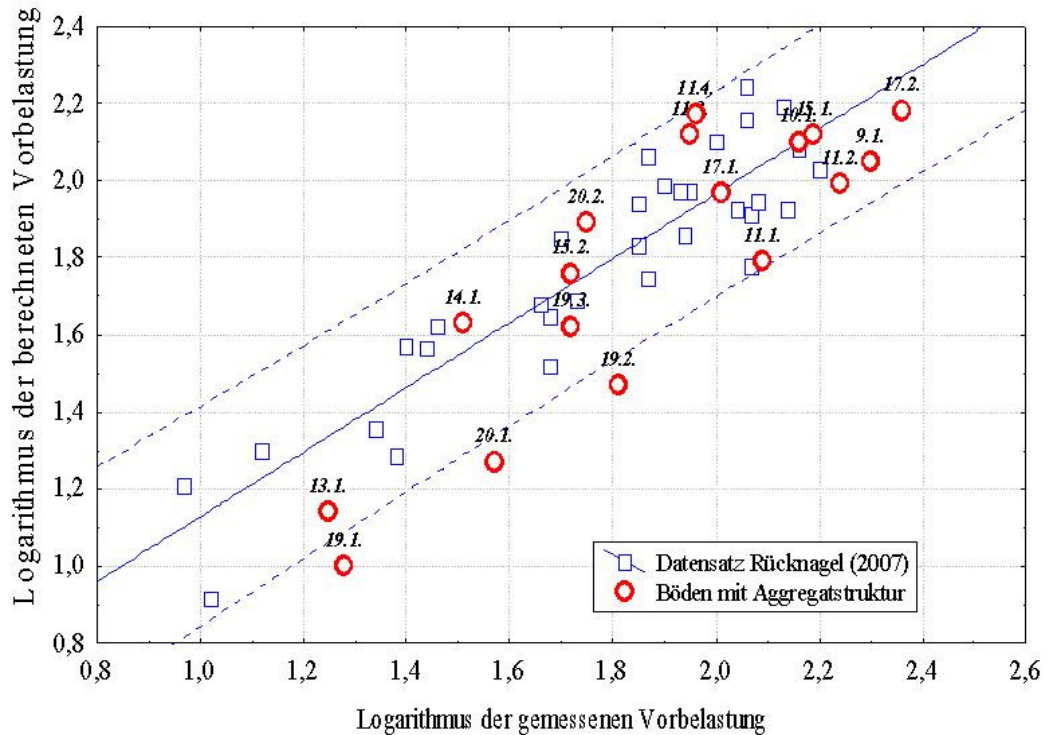


Abb. 6: Gemessene und kalkulierte Vorbelastungswerte von den Böden mit Aggregatstruktur und von RÜCKNAGEL (2007), (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte, Nummer entspricht der Standortnummer)

Eine Unterteilung der vorliegenden Standorte nach Bodenartenhauptgruppen oder gar einzelnen Bodenarten ist aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl vorliegender Werte unsicher. Es zeichnet sich jedoch tendenziell ab, dass die Funktion für die Tonböden ($n=6$; St.-Nr. 11.3., 11.4., 14.1., 19.1., 19.2., 19.3.) beim statistischen Vergleich von gemessenen und berechneten Werten sehr steil ($m=1,33$) und mit einem Schnittpunkt $x_0=-0,62$ deutlich unter $y=0$ verläuft. Dies bedeutet, dass vor allem niedrige Vorbelastungswerte nach dem derzeitigen Modellansatz unterschätzt werden. Die Funktion der Schluffböden ($n=8$; St.-Nr. 9.1., 11.1., 11.2., 13.1., 15.1., 15.2., 20.1., 20.2.) ist etwa mit der von RÜCKNAGEL (2007) vergleichbar ($R^2=0,81$; $m=0,87$; $x_0=0,12$; $MAE=0,18$).

Eine Anpassung des Regressionsmodells für die Tonböden ($n=13$) unter Einbezug der Standorte „Buttstädt I 2-5 cm“ (St.-Nr. 4.1.), „Buttstädt I 19-22 cm“ (St.-Nr. 4.2.), „Sprendlingen I 19-22 cm“ (St.-Nr. 6.1.), „Sprendlingen I 33-36 cm“ (St.-Nr. 6.2.), „Hemleben 19-22 cm“ (St.-Nr. 7.1.), „Hemleben 33-36 cm“ (St.-Nr. 7.2.) und „Bad Kreuznach I 33-36 cm“ (St.-Nr. 8.2.) aus der Arbeit von RÜCKNAGEL (2007) ergibt eine Verbesserung der Prognosegenauigkeit:

$$\log \sigma_p = -1,91 * \text{ARD}/\text{TRD} + 0,86 * \text{TRD} + 2,79 \quad [9]$$

$\log \sigma_p$ Logarithmus der Vorbelastung

ARD Aggregatdichte [g/cm^3]

TRD Trockenrohdichte [g/cm^3]

Bei der Berechnung der Vorbelastung mit der Gleichung [9] werden die gemessenen Werte mit einer mittleren absoluten Abweichung (MAE) von 0,11 wiedergegeben. Das Bestimmtheitsmaß der Funktion beträgt 0,84. Die Funktion beim Vergleich von gemessenen und berechneten Vorbelastungswerten verläuft flacher als die theoretische 1:1 Linie ($m=0,84$; $x_0=0,28$).

Mit dem bisherigen Regressionsmodell (Gleichung [1]) kann die mechanische Vorbelastung somit insbesondere für die Bodenartenhauptgruppe der Schluffe sicher angewandt werden. Auch für die Lehme und Sande (Tongehalte >8 M.-% und Sandgehalte <60 M.-%) ist es nach derzeitigem Stand der Validierungen gut anwendbar. Die Berechnung für Tonböden sollte dagegen mit dem angepassten Modellansatz erfolgen, um eine hohe Modellgenauigkeit insbesondere beim Vorliegen niedriger Vorbelastungen zu gewährleisten.

3.1.1.3. Natürliche Böden ohne Aggregatstruktur

Nur an sehr wenigen sandigen Standorten, meist mit Tongehalten unter 5 M.-% und Sandgehalten über 70 M.-% (Bodenart vorwiegend Su2) konnten keine Aggregate für die Aggregatdichtebestimmung gewonnen werden (Tab. 9).

Tab. 9: Trockenrohdichte (TRD), Logarithmus der Vorbelastung ($\log \sigma_p$) und Vorbelastung (σ_p) der natürlich gelagerten Böden ohne Aggregatstruktur

St.-Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	TRD (g/cm^3)	$\log \sigma_p$	σ_p (kPa)
12.1.	Uchtdorf 19-22	1,52	1,76	58
12.2.	Uchtdorf 35-38	1,68	1,60	40
16.1.	Torgau 17-20	1,34	1,29	20
16.2.	Torgau 30-33	1,40	1,75	56
18.1.	Lückstedt I 17-20	1,61	2,19	155
18.2.	Lückstedt II 17-20	1,43	1,81	65

An den vorliegenden Sandböden wurden mechanische Vorbelastungen von 20 (log 1,29) bis 155 kPa (log 2,19) bei Trockenrohdsichten zwischen 1,34 und 1,68 g/cm³ gemessen. Im Durchschnitt beträgt die Vorbelastung 66 kPa (log 1,74).

Im Schadverdichtungsmodul ist die Berechnung der Verdichtungsgefährdung für Sandböden ohne Aggregatstruktur (Bodenart in REPRO „Sand“) momentan nur mit der direkten Eingabe der Vorbelastung bzw. der Belastbarkeit bis zum Erhalt eines Gefüges mit Mindestfunktion möglich. Es sind weder Standardwerte noch Berechnungsalgorithmen hinterlegt worden. Die Vorbelastung sollte für diese Böden analog des Zusammenhangs von Trockenrohdsichte und mechanischer Vorbelastung (Abb. 7) berechnet werden, auch wenn der Datensatz nur einen geringen Umfang besitzt (Gleichung [10]). Eine umfangreiche Überprüfung sollte nachgeholt werden. Für die Sandböden mit Aggregatstruktur gelten die Gleichung [1] sowie die bereits hinterlegten Standardwerte.

$$\log \sigma_p = 1,06 * TRD + 0,14 \quad [10]$$

$\log \sigma_p$ Logarithmus der Vorbelastung

TRD Trockenrohdsichte [g/cm³]

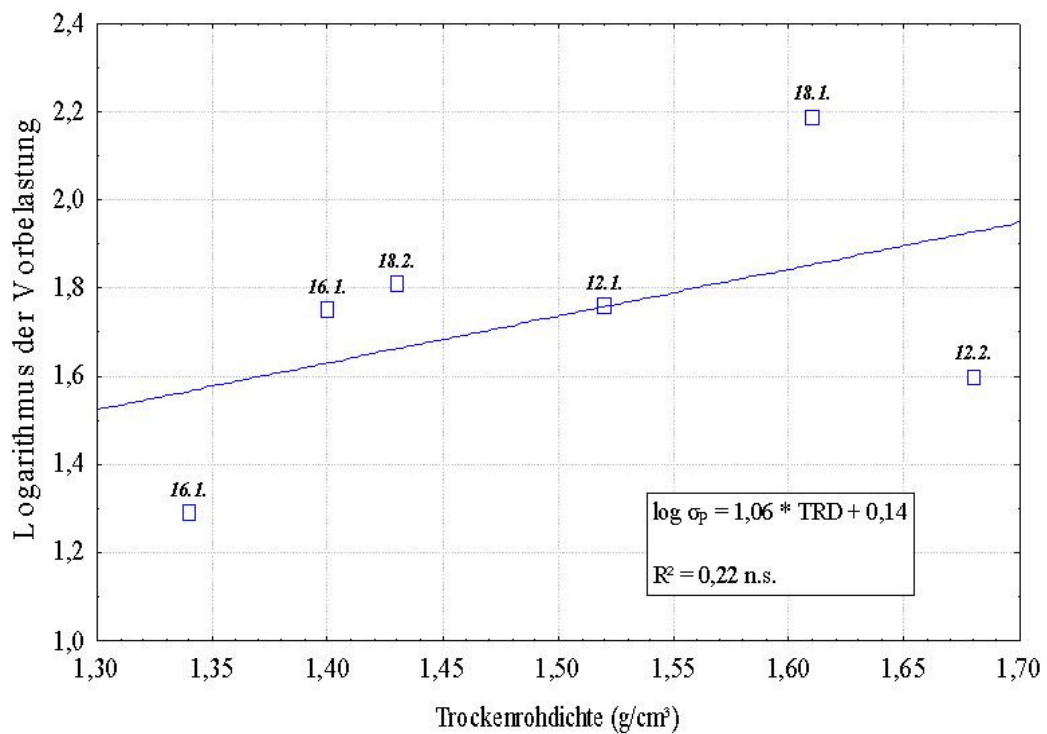


Abb. 7: Zusammenhang von Trockenrohdsichte und mechanischer Vorbelastung bei den Böden ohne Aggregatstruktur (die Nummer entspricht der Standortnummer)

3.1.1.4. Auflastabhängiges Verhalten von Aggregaten und Gesamtboden

Zur Analyse des Verdichtungsprozesses ist es zweckmäßig das Verhalten von Gesamtboden (Trockenrohddichte) und Aggregaten (Aggregatdichte) separat zu betrachten. Beispielhaft ist dies für die Standorte „Neurath II 35-38 cm“ (Abb. 8) sowie „Görzig I 19-22 cm“ (Pflugvariante) und „Görzig II 19-22 cm“ (Grubber-Variante) durchgeführt worden (Tab. 10).

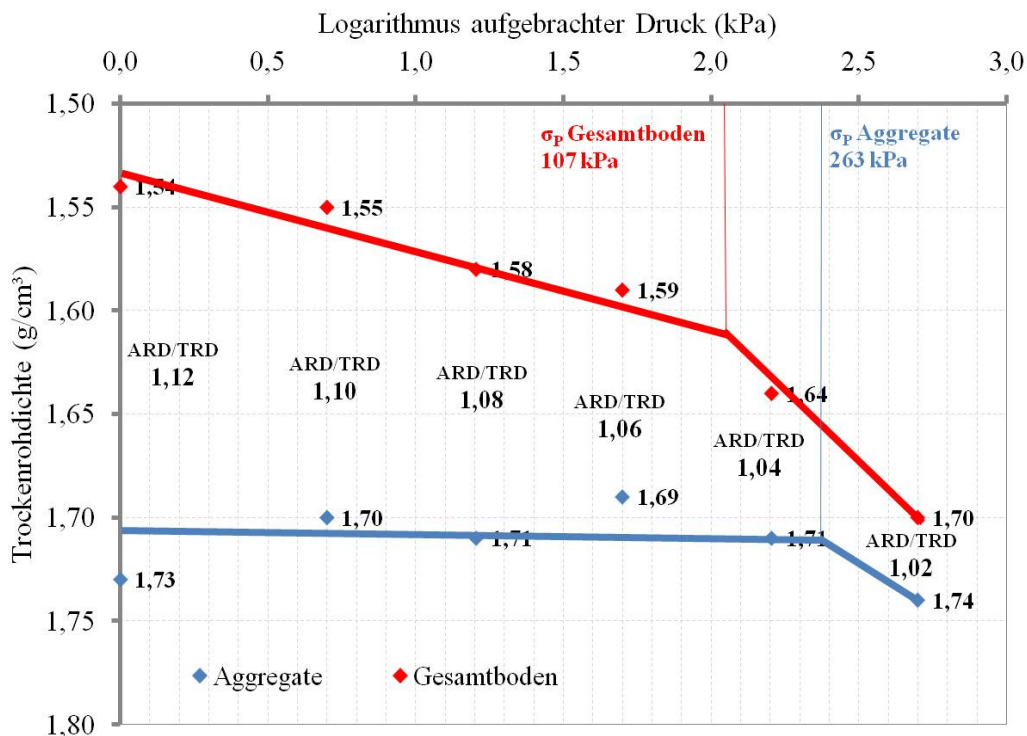


Abb. 8: Veränderung von Trockenrohddichte (Gesamtboden) und Aggregatdichte mit steigendem Druck am Beispiel des Standortes „Neurath II 35-38 cm“

Die Veränderung von Trockenrohddichte und Aggregatdichte verläuft nicht synchron. Im Wiederverdichtungsbereich des Gesamtbodens (Spannungen kleiner der mechanischen Vorbelastung) nimmt die Trockenrohddichte geringfügig zu, während im Wiederverdichtungsbereich der Aggregate keine Änderung der Dichte zu beobachten ist. Die Vorbelastung der Aggregate ist sehr viel höher als die des Gesamtbodens. Mit Überschreitung der mechanischen Vorbelastung des Gesamtbodens (Übergang zum Erstverdichtungsbe- reich), ist lastabhängig ein deutlicher Anstieg der Trockenrohddichte verbunden. Eine Zunahme der Aggregatdichte erfolgt in den Versuchen erst bei der höchsten Laststufe von 500 kPa. Die Dichte der Aggregate und des Gesamtbodens nähern sich bei dieser

Auflast an. Während des gesamten Verdichtungsvorgangs reduziert sich das ARD/TRD-Verhältnis bis hin zu einem weitgehend geschlossenen Aggregatverband.

Tab. 10: ARD/TRD-Verhältnis im unbelasteten Zustand und nach einer Belastung mit 500 kPa sowie die Vorbelastung von Gesamtboden und Aggregaten

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	ARD/TRD-Verhältnis		Vorbelastung Gesamtboden		Vorbelastung Aggregate	
		unbelastet	500 kPa	kPa	log	kPa	log
2.1.	Neurath II 35-38	1,12	1,02	107	2,03	263	2,42
20.1.	Görzig I 19-22	1,26	0,98	37	1,57	155	2,19
20.2.	Görzig II 19-22	1,12	0,98	56	1,75	200	2,30

Ursache dieser unterschiedlichen Verdichtungsverläufe ist die zweigipflige Häufigkeitsverteilung der Kornkontaktpunkte in aggregierten Böden (HARTGE & SOMMER, 1982). Die mittlere Kornkontaktpunktzahl zwischen den Aggregaten ist geringer als die Kontaktpunktzahl innerhalb der Aggregate. Beim Aufbringen niedriger Laststufen wird somit zunächst die Kornkontaktpunktzahl zwischen den Aggregaten erhöht und diese werden aneinander geschoben. Erst bei hohen Drücken erhöht sich auch die Kontaktpunktzahl in den Aggregaten verbunden mit einer Zunahme der Aggregatdichte.

Die Vorbelastung des Bodens wird als wichtiges Kriterium für dessen Stabilität gegenüber mechanischen Belastungen angesehen (HORN & ROSTEK, 2000). Ihre Überschreitung führt zu irreversiblen Veränderungen der Bodenfunktionen. Die vorliegende Untersuchung zeigt jedoch, dass bei mechanischen Belastungen zwischen dem Wert der Vorbelastung des Gesamtbodens und der Aggregate grundsätzlich eine Regeneration durch Bearbeitungsmaßnahmen möglich erscheint, weil die Aggregate noch nicht beeinträchtigt sind. Aus ökonomischer Sicht ist dieser Aufwand meist jedoch sehr hoch und die Nachhaltigkeit dieser Maßnahmen nicht immer gewährleistet. Eine Überschreitung der Vorbelastung der Aggregate ist durch Bodenbearbeitungs- und pflanzenbauliche Maßnahmen nicht zu regenerieren. Hier ist die maximale mechanische Belastbarkeit erreicht.

3.1.2. Korrektur der Gefügestabilität bei unterschiedlichen Wassergehalten

3.1.2.1. Druck-Setzungsverhalten bei unterschiedlichem Wassergehalt

Tabelle 11 gibt einen Überblick der Ergebnisse aller durchgeführten Versuche. Ein typisches Beispiel für das Druck-Setzungsverhalten und die Veränderung der mechanischen Vorbelastung mit abnehmendem Wassergehalt ist in der Abbildung 9 dargestellt (St.-Nr. 7.3., „Fortuna IV 85-88 cm“). Die Zunahme der Vorbelastung beruht dabei zunächst auf einer Verschiebung der Erstverdichtungsgeraden in Richtung höherer Drücke. Über eine annähernd parallele Verschiebung mit nahezu konstantem „Compression Index“ (entspricht der Änderung der Porenziffer im Verhältnis zur logarithmischen Änderung des Drucks) berichten auch LARSON et al. (1980). Im Gegensatz dazu erhöhen sich am Standort „Fortuna IV 85-88 cm“ aber auch die Neigungen der Erstverdichtungsgeraden mit abnehmendem Wassergehalt.

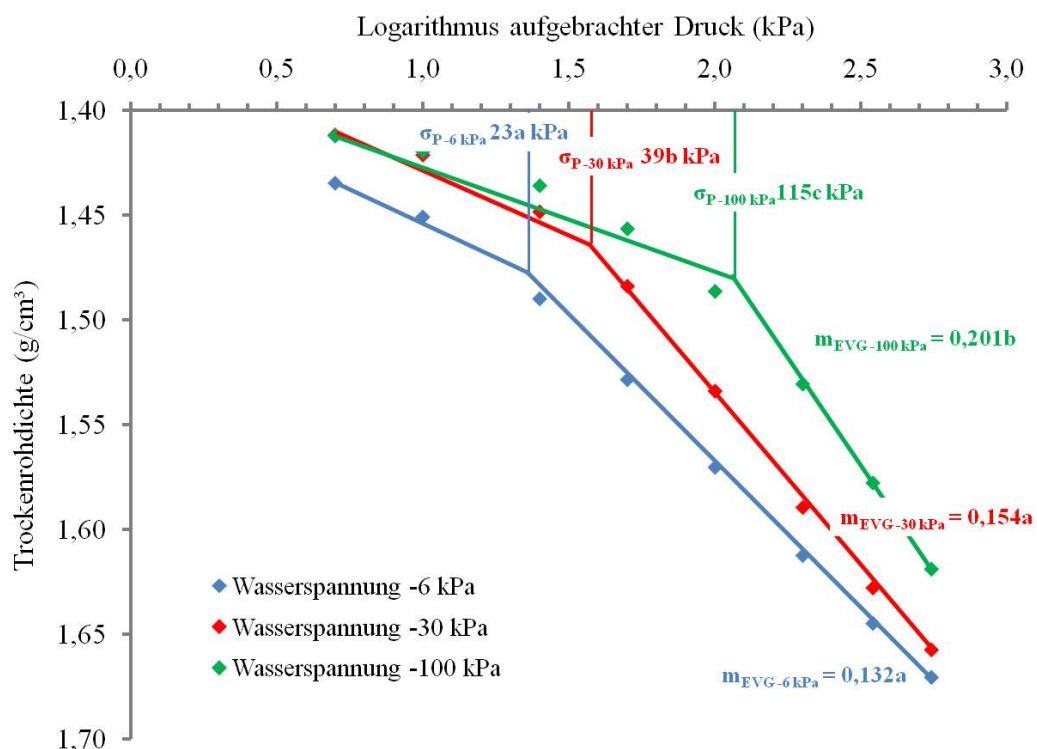


Abb. 9: Druck-Trockenrohdichtefunktion und Vorbelastung bei unterschiedlichen Wasserspannungen am Beispiel des Standortes „Fortuna IV 85-88 cm“, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$

Tab. 11: Bodenwassergehalt (BWG), Logarithmus der Vorbelastung ($\log \sigma_P$), Neigung der Erstverdichtungsgeraden (m_{EVG}) und Trockenrohddichte (TRD_{350}) bei einer Auflast von 350 kPa an den Standorten zur Validierung des Korrekturmodells der Gefügestabilität bei unterschiedlichen Wassergehalten

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	pF-Stufe	BWG (% FK)	$\log \sigma_P$	m_{EVG}	TRD_{350} (g/cm ³)
6.1.	Neurath III 45-48	1,8	100	2,39	0,088	1,85
		2,5	83,9	2,44	0,113	1,85
		3,0	80,3	2,43	0,093	1,89
7.1.	Fortuna IV 32-35	1,8	100	1,84	0,130	1,73
		2,5	73,8	1,75	0,119	1,68
		3,0	62,9	1,85	0,142	1,69
		4,2	54,4	2,11	0,138	1,68
7.2.	Fortuna IV 55-58	1,8	100	1,79	0,148	1,65
		2,5	80,4	1,59	0,144	1,65
		3,0	50,0	1,94	0,176	1,63
		4,2	33,0	2,15	0,149	1,50
7.3.	Fortuna IV 85-88	1,8	100	1,37	0,132	1,65
		2,5	79,0	1,59	0,154	1,63
		3,0	52,9	2,06	0,201	1,58
9.1.	Pesch 40-43	1,8	100	2,30	0,134	1,68
		2,5	85,7	2,30	0,150	1,70
		3,0	73,6	2,35	0,159	1,71
10.1.	Quellendorf 10-13	1,8	100	2,16	0,148	1,89
		2,5	85,1	2,16	0,143	1,89
		3,0	83,4	2,12	0,163	1,89
11.1.	Herregosserstedt I 18-21	1,8	100	2,09	0,214	1,69
		3,0	88,8	2,11	0,225	1,69
11.2.	Herregosserstedt I 32-35	1,8	100	2,24	0,182	1,75
		3,0	90,4	2,32	0,203	1,73
11.3.	Herregosserstedt II 12-15	1,8	100	1,95	0,174	1,54
		3,0	91,9	2,03	0,163	1,53
11.4.	Herregosserstedt II 25-28	1,8	100	1,96	0,166	1,58
		3,0	78,9	2,21	0,171	1,51
12.1.	Uchtdorf 19-22	1,8	100	1,76	0,142	1,74
		2,0	95,3	1,85	0,137	1,75
12.2.	Uchtdorf 35-38	1,8	100	1,60	0,074	1,86
		2,0	92,6	1,49	0,067	1,84
13.1.	Lossa 2-5	1,8	100	1,25	0,178	1,62
		4,0	46,2	2,02	0,277	1,49

Tab. 11: Fortsetzung

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	pF-Stufe	BWG (% FK)	$\log \sigma_P$	m_{EVG}	TRD ₃₅₀ (g/cm ³)
14.1.	Hemleben I 9-12	1,8	100	1,51	0,204	1,62
		3,0	87,6	1,76	0,254	1,62
15.1.	Rothenberga I 14-17	1,8	100	2,19	0,154	1,74
		2,5	91,3	2,19	0,144	1,74
		3,0	90,0	2,34	0,142	1,74
15.2.	Rothenberga II 17-20	1,8	100	1,72	0,144	1,56
		2,5	85,7	1,73	0,161	1,55
		3,0	79,5	2,09	0,208	1,52
18.1.	Lückstedt I 17-20	1,8	100	2,19	0,105	1,73
		3,0	58,5	2,36	0,082	1,75
18.2.	Lückstedt II 17-20	1,8	100	1,81	0,156	1,66
		3,0	69,6	1,99	0,142	1,67
19.1.	Buttelstedt I 15-18	1,8	100	1,28	0,223	1,59
		2,5	96,0	1,23	0,231	1,62
19.2.	Buttelstedt I 45-48	1,8	100	1,81	0,248	1,55
		2,5	84,9	1,90	0,267	1,54
19.3.	Buttelstedt II 15-18	1,8	100	1,72	0,224	1,60
		2,5	79,9	2,05	0,319	1,64
21.1.	Halle I 15-25	1,8	100	1,76	0,206	1,85
		3,0	75,6	1,99	0,281	1,86
22.1.	Hemleben II 15-25	1,8	100	1,62	0,289	1,55
		4,2	64,5	2,30	0,478	1,45
23.1.	Niestetal 15-25	1,8	100	1,38	0,138	1,60
		3,0	63,8	1,86	0,234	1,59
24.1.	Seehausen 15-25	1,8	100	1,39	0,158	1,67
		2,5	92,1	1,64	0,201	1,68
		3,0	75,3	1,80	0,249	1,67

Insgesamt ist die zunehmende Vorbelastung auf die Änderung beider Parameter der Erstverdichtungsgerade zurückzuführen. Von den insgesamt 36 durchgeführten Drucksetzungsvorsuchen mit Wassergehalten kleiner als der Feldkapazität kommt es an immerhin 17 (47 %) zu einer Verschiebung der Erstverdichtungsgerade in Richtung höherer Drücke (Tab. 11, Trockenrohdichte bei 350 kPa). An 9 Versuchen (25 %) verändert sich die Lage nicht und nur bei 10 Versuchen (28 %) kommt es zur Verschiebung in Richtung niedrigerer Drücke. Die Neigung der Erstverdichtungsgerade spielt in den

vorliegenden Versuchen eine entscheidende Rolle für die Vorbelastungszunahme, denn in 26 Versuchen (72 %) nimmt sie mit abnehmendem Wassergehalt zu. Eine Verschiebung der Erstverdichtungsgerade in Kombination mit der Zunahme deren Neigung kann analog zum Beispiel „Fortuna IV 85-88 cm“ in etwa der Hälfte der Versuche beobachtet werden.

3.1.2.2. Ableitung und Weiterentwicklung des Regressionsansatzes

Der Regressionsansatz zur Abschätzung der mechanischen Vorbelastung bei unterschiedlichen Wassergehalten basiert zunächst auf der Auswertung verschiedener Literaturarbeiten (HORN, 1986; LEBERT, 1989; NISSEN, 1998; ARVIDSSON, 2001; ARVIDSSON et al., 2003; BERLI et al., 2003; KELLER et al., 2004), bei denen Vorbelastungen an insgesamt 160 natürlich gelagerten und unterschiedlich texturierten Bodenproben bei -6 und -30 kPa Wasserspannung bestimmt wurde. Diese Auswertungen dienen zur Ermittlung der Differenzen der Vorbelastungen zwischen den beiden Wasserspannungen (Abb. 10).

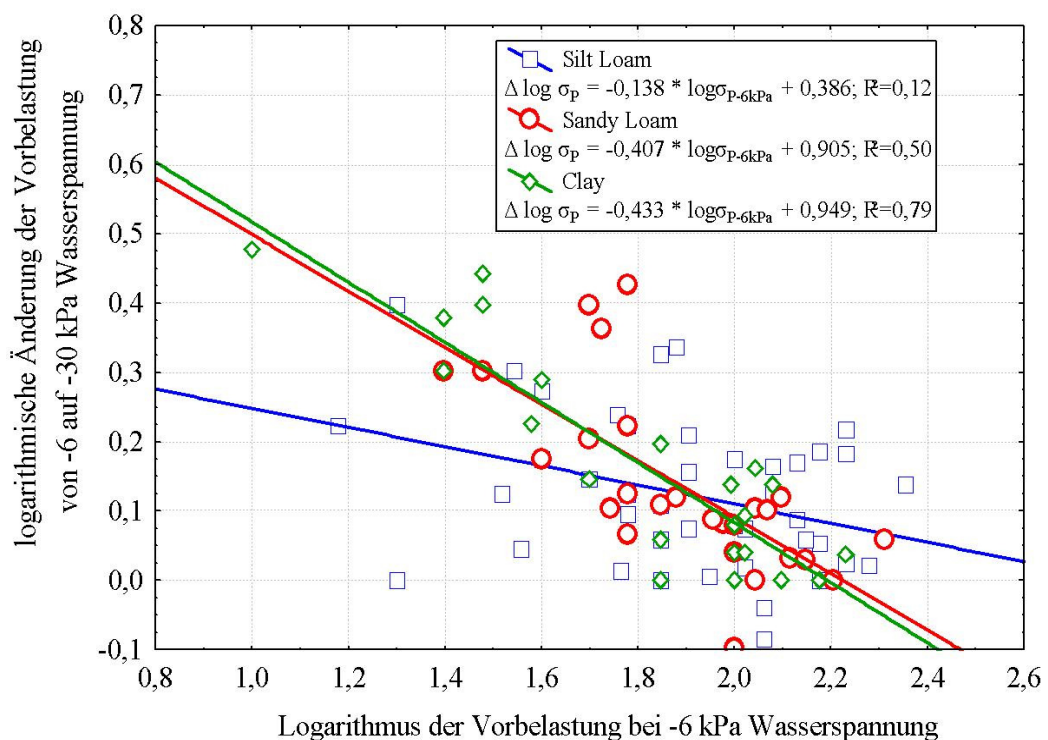


Abb. 10: Änderung der Vorbelastung bei einer Änderung der Wasserspannung von -6 auf -30 kPa am Beispiel der Texturgruppen „Silt Loam“, „Sandy Loam“ und „Clay“; zusammengestellt nach Arbeiten von HORN (1986), LEBERT (1989), NISSEN (1998), ARVIDSSON (2001), ARVIDSSON et al. (2003), BERLI et al. (2003), KELLER et al. (2004)

Die betragsmäßige Änderung der Vorbelastung bei einer Wasserspannungsänderung von -6 auf -30 kPa ist von der Höhe der Ausgangsvorbelastung (-6 kPa Wasserspannung) abhängig. Mit steigender Vorbelastung nimmt die Änderung kontinuierlich ab. Die Böden können dabei in zwei Gruppen untergliedert werden. Zum einen in Böden mit hoher Änderung der Vorbelastung bei niedrigem Ausgangswert sowie einem starken Rückgang der Änderung mit zunehmender Vorbelastung. Zu dieser Gruppe zählen die Bodenarten „Loam“, „Sandy Loam“, „Clay“ und „Clay Loam“. Zum anderen weisen die Bodenarten „Sand“, „Silt Loam“ und „Silty Clay Loam“ eine eher geringe Änderung bei niedriger Ausgangsvorbelastung auf und die Abnahme der Vorbelastung ist mit zunehmender Höhe weniger ausgeprägt als in der ersten Gruppe. Die Streuung der Einzelwerte ist insgesamt erheblich. In einigen Fällen wurden mit zunehmender Wasserspannung sogar abnehmende Vorbelastungen gemessen. Der Zusammenhang ist dennoch signifikant. Die starke Streuung der Literaturdaten erklärt sich daraus, dass Böden mit vergleichbarer Vorbelastung und Textur differenzierte Gefügeeigenschaften und somit Grobporenanteile aufweisen können (ARVIDSSON & KELLER, 2004). Die Entwässerung dieser führt zu einer unterschiedlichen Stabilitätszunahme. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Spanne an Ton-, Schluff- und Sandgehalten, die auch innerhalb einer Texturklasse vorliegen kann und zur weiteren Streuung des Grobporenanteils beiträgt. Neben der Porengrößenverteilung kann die in den meisten Arbeiten angewandte Bestimmung der Vorbelastung nach dem Verfahren von CASAGRANDE (1936) zur Streuung der Werte beitragen, da die Methode mit einer gewissen Subjektivität des Betrachters verbunden ist (RÜCKNAGEL et al., 2010).

Analog zu den Böden der Literaturoswertung wurden für verschieden texturierte Böden Beziehungen zwischen der Vorbelastung bei einer Wasserspannung von -6 kPa und dem relativen Wassergehalt in % der Feldkapazität bei einer Wasserspannung von -30 kPa abgeleitet. Die Vorbelastungen wurden dazu nach RÜCKNAGEL et al. (2007) aus der Trockenrohichte und Aggregatdichte berechnet. Beispielhaft sind ein „Silt Loam“ (24 % Ton, 23 % Sand), ein „Sandy Loam“ (8 % Ton, 66 % Sand) und ein „Clay“ (46 % Ton, 17 % Sand) dargestellt. Die Änderungen der mechanischen Vorbelastung sollen berechnet werden, ohne bei der Modellanwendung standortspezifische Wasserretentionskurven kennen zu müssen. Der Wasserspannung von -30 kPa muss dazu für die verschiedenen Böden und in Abhängigkeit der Ausgangsvorbelastung ein relativer Wassergehalt (% FK) zugeordnet werden. Exemplarisch ist dieses Vorgehen in Abb. 11 für den

„Silt Loam“, den „Sandy Loam“ und den „Clay“ dargestellt. Mit steigender Vorbelastung steigt der relative Wassergehalt bei -30 kPa Wasserspannung. Dies ist Folge einer zunehmenden Dichte, die bei konstanter Aggregatdichte auch zur Zunahme der Vorbelastung führt (RÜCKNAGEL et al., 2007). Bei der Dichtezunahme werden zuerst die größten und instabilsten Poren verengt. Am stärksten sind davon die Grobporen > 50 µm betroffen, aber auch die engen Grobporen mit einem Durchmesser von 10-50 µm (LEBERT, 1989). Letzterer Porengrößenbereich wird bei der Erhöhung der Saugspannung von -6 auf -30 kPa entwässert. Zwischen den Bodenarten lassen sich erhebliche Unterschiede erkennen. Insbesondere der „Clay“ weist bei vergleichbarer Vorbelastung relativ niedrigere Wassergehalte auf als der „Sandy Loam“ und der „Silt Loam“.

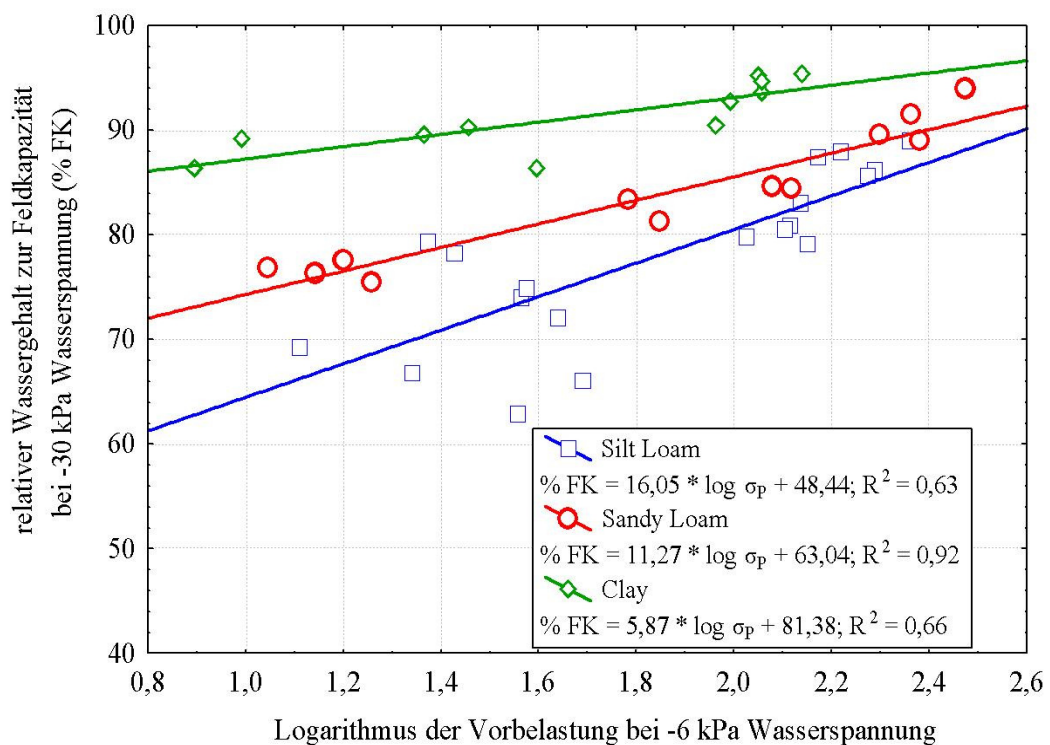


Abb. 11: Relativer Wassergehalt bei einer Saugspannung von -30 kPa (-6 kPa = 100 % FK) in Abhängigkeit der Vorbelastung berechnet nach RÜCKNAGEL et al. (2007) am Beispiel eines „Silt Loam“, „Sandy Loam“ und „Clay“

Werden die Beobachtungen der Abb. 10 und 11 in Zusammenhang gebracht, dann lassen sich empirisch vier Gruppen von Böden differenzieren:

1. Die Zunahme der Vorbelastung von -6 auf -30 kPa Wasserspannung ist „hoch“ und auch die relative Änderung des Wassergehaltes ist „hoch“. Dazu gehören die Bodenarten „Loam“ und „Sandy Loam“.
2. Die Zunahme der Vorbelastung von -6 auf -30 kPa Wasserspannung ist „hoch“ aber die relative Änderung des Wassergehaltes ist „niedrig“. Dazu gehören die Bodenarten „Clay“ und „Clay Loam“.
3. Die Zunahme der Vorbelastung von -6 auf -30 kPa Wasserspannung ist „niedrig“ und auch die relative Änderung des Wassergehaltes ist „niedrig“. Dazu gehören die Bodenarten „Silty Clay Loam“ und „Silty Clay“.
4. Die Zunahme der Vorbelastung von -6 auf -30 kPa Wasserspannung ist „niedrig“ aber die relative Änderung des Wassergehaltes ist „hoch“. Dazu gehören die Bodenarten „Sand“, „Silt Loam“, „Silt“ und „Loamy Sand“.

Für jede der vier Bodengruppen sowie für „Alle Böden“ wird nun eine Matrix interpoliert (Tab. 12). Die Eckpunkte werden festgelegt, indem verschiedenen Vorbelastungswerten deren Zunahme, und gleichzeitig der relative Wassergehalt bei -30 kPa Wasserspannung zugeordnet wird. Beispielsweise beträgt für „Alle Böden“ die Zunahme der Vorbelastung von -6 auf -30 kPa Wasserspannung bei einem Ausgangswert der Vorbelastung von 1,4 etwa 0,30. Der Wassergehalt bei -30 kPa Wasserspannung und einer Vorbelastung von 1,4 beträgt etwa 80 % der Feldkapazität. Demnach wird der Vorbelastung von 1,4 bei einem Bodenwassergehalt von 80 % der Feldkapazität ein Wert von 0,30 zugeordnet.

Tab. 12: Zunahme der Vorbelastung als Eckpunkte des Regressionsmodells für „Alle Böden“, $\log \sigma_{P-6kPa}$ Vorbelastung bei -6 kPa Wasserspannung

$\log \sigma_{P-6kPa}$	Wassergehalt in % der Feldkapazität				
	100	90	80	70	60
1,40	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60
1,85	0,00	0,11	0,22	0,33	0,44
2,30	0,00	0,07	0,14	0,21	0,28

Die Eckpunkte für weitere Wassergehalte werden anhand der so gewonnenen Punkte linear interpoliert. Beispielsweise beträgt die Zunahme bei einer Initialvorbelastung von 1,40 und 90 % Wassergehalt 0,15. Die so gewonnenen Matrizen dienen als Grundlage

In der Tab. 13 sind die Konstanten zur Berechnung der Zunahme k_{GS} nach Gleichung [11] für „Alle Böden“ und die unterschiedlichen Bodenarten angegeben.

Tab. 13: Konstanten zur Berechnung der Zunahme der Vorbelastung für unterschiedliche Bodenarten und „Alle Böden“

Texturklasse	Konstante				
	a	b	c	d	e
Alle Böden	2,8335	-0,9271	-0,0279	$1,67 \cdot 10^{-7}$	0,00906
Loam, Sandy Loam	2,7833	-1,0000	-0,0278	$-116 \cdot 10^{-15}$	0,01000
Clay, Clay Loam	4,3056	-1,4444	-0,0431	$-537 \cdot 10^{-16}$	0,01440
Silty Clay Loam, Silty Clay	2,5333	-0,6667	-0,0253	$21 \cdot 10^{-14}$	0,00667
Sand, Silt Loam, Silt, Loamy Sand	1,7611	-0,5556	-0,0176	$4,11 \cdot 10^{-14}$	0,00556

3.1.2.3. Prüfung des Regressionsansatzes

Die Genauigkeit des vorgestellten Modellansatzes ist sowohl bei der Nutzung der Gleichungssysteme für „Alle Böden“ als auch nach differenzierten Texturklassen gut (Abb. 13). Die statistischen Funktionen im Vergleich der gemessenen und berechneten Werte verlaufen dabei flacher als die theoretische 1:1 Linie ($m=0,72$ für „Alle Böden“ bzw. $m=0,59$ nach texturabhängiger Berechnung) und schneiden die Abszisse etwas über dem Nullpunkt ($x_0=0,16$ für „Alle Böden“ bzw. $x_0=0,11$ nach texturabhängiger Berechnung). Die Änderungen der Vorbelastung werden somit im niedrigen Bereich etwas überschätzt und im hohen Bereich unterschätzt. Mit der Berechnung nach Texturklassen lassen sich im Vergleich zu „Allen Böden“ die mittleren absoluten Abweichungen (MAE) von 0,15 auf 0,11 bzw. der RMSE von 0,19 auf 0,14 reduzieren. Gleichzeitig nehmen das Bestimmtheitsmaß von 0,54 auf 0,67 und der Übereinstimmungsindex (IA) von 0,92 auf 0,95 zu. Eine Berechnung nach unterschiedlichen Texturklassen ist somit besonders bei Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen zu empfehlen.

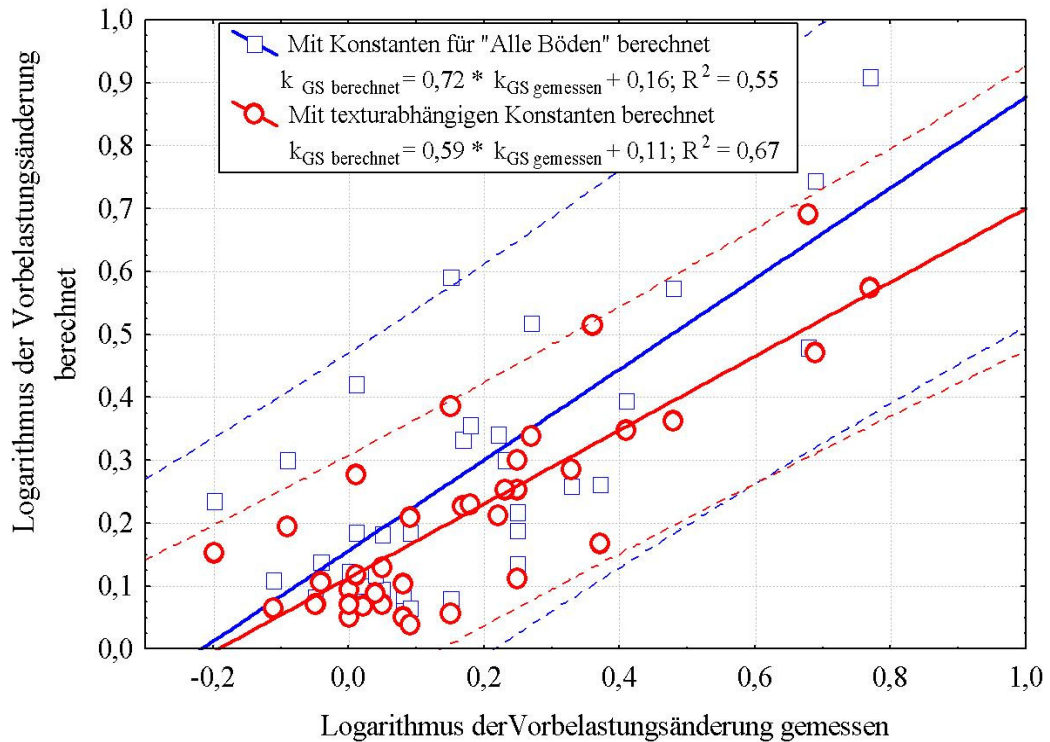


Abb. 13: Vergleich von gemessenen und nach den Gleichungen für „Alle Böden“ bzw. in Abhängigkeit der Bodenart berechneten Änderungen der mechanischen Vorbelastung (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte)

Vorbelastungsänderungen von Böden für deren Texturklassen keine Konstanten ermittelt werden konnten („Sandy Clay“ und „Sandy Clay Loam“) müssen nach den Konstanten für „Alle Böden“ berechnet werden. Dennoch ist die texturabhängige Anwendung für einen sehr großen Standortbereich möglich. Die Fehler des vorgestellten Modellansatzes sind mit den Streuungen der Einzelwerte in den Wasserspannungs-Vorbelastungsbeziehungen von ARVIDSSON et al. (2003) und BERLI et al. (2003) vergleichbar. In einigen Fällen wurden mit zunehmender Wasserspannung analog zu den Literaturdaten abnehmende Vorbelastungen gemessen. Mit einer Spanne zwischen 18 (log 1,25) und 246 kPa (log 2,39) ist fast die gesamte Breite von Vorbelastungswerten, die bei einer Wasserspannung von -6 kPa in Ackerböden gemessen wurden, repräsentiert (LEBERT, 1989). Wassergehalte bis zu 33 % der Feldkapazität bei den Prüfungen erlauben zudem eine Absicherung für ein breites Spektrum an Feuchtebedingungen.

3.2. Modulvalidierung mit Überfahrversuchen

3.2.1. Zuckerrübenroder am Standort Lossa

Die Auswirkungen auf das Gefüge beim Befahren mit hohen Radlasten und unter feuchten Bodenbedingungen werden zum Teil kontrovers diskutiert (EHLERS et al., 2005; KOCH et al., 2005). Vorliegender Versuch soll einen Beitrag zur Problemlösung liefern und gleichzeitig zur Überprüfung des Schadverdichtungsmoduls dienen.

Zum Erntetermin betrug die berechnete Vorbelastung 63 kPa in 17-23 cm (log 1,80), 83 kPa in 32-38 cm (log 1,92) und 100 kPa in 47-53 cm Tiefe (log 2,00). Nach HORN & FLEIGE (2003) sind dies mittlere (17-23 cm und 32-38 cm) bzw. hohe Werte (47-53 cm). Im unbefahrenen Zustand liegt in allen Tiefen ein schadverdichtungsfreies Bodengefüge mit mindestens 5 Vol.-% (Unterboden) bzw. 8 Vol.-% (Ackerkrume) Luftkapazität und einem kf-Wert von mehr als 10 cm/d vor (Tab. 14).

Tab. 14: Bodenphysikalische Parameter vor und nach einfacher Überfahrt mit einem 6-reihigen selbstfahrenden Zuckerrübenroder, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$

Bodentiefe	Parameter	vor Überfahrt	nach Überfahrt	Veränderung
17-23 cm	Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,45 a	1,48 b	+0,03
	kf-Wert (cm/d)	37 a	4 b	-33
	Luftkapazität (Vol.-%)	9,9 a	7,8 b	-2,1
32-38 cm	Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,49 a	1,53 b	+0,04
	kf-Wert (cm/d)	33 a	12 a	-21
	Luftkapazität (Vol.-%)	9,4 a	7,7 a	-1,7
47-53 cm	Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,47 a	1,52 b	+0,05
	kf-Wert (cm/d)	13 a	6 a	-7
	Luftkapazität (Vol.-%)	8,7 a	6,3 b	-2,4

Die Überfahrt reduziert die Luftkapazität sowie den kf-Wert in der Ackerkrume signifikant und beide Parameter unterschreiten die Mindestanforderungen an ein nicht schadverdichtetes Bodengefüge. Die Trockenrohdichte nimmt signifikant, jedoch in Relation zum kf-Wert eher gering zu. Dies ist ein Hinweis auf eine überwiegend knetende Wirkung der Überfahrt, mit der Folge einer verringerten Porenkontinuität. Ursache dafür sind Scherprozesse, welche insbesondere im Oberboden durch horizontale Bewegungen

unter angetriebenen oder gezogenen Rädern auftreten können (WIERMANN et al., 2000). Zudem entsteht aufgrund des hohen Bodenwassergehaltes ein Porenwasserüberdruck (FAZEKAS & HORN, 2005) und die eingetragenen Spannungen werden nur zum Teil über die Kornkontaktpunkte übertragen. Der Porenwasserüberdruck kann wegen der nur sehr kurzen Belastungsdauer nicht abgebaut werden, so dass die Setzung als nicht abgeschlossen angesehen werden muss. Die Zunahme der Trockenrohdichte fällt deshalb nur relativ gering aus. Im krumennahen Unterboden nehmen die Trockenrohdichte signifikant zu und die Luftkapazität sowie der kf-Wert zumindest tendenziell ab. Dies deutet auf die Überschreitung der gefügeeigenen Stabilität im Unterboden hin. Das Bodengefüge ist nach der Überfahrt jedoch nicht schadverdichtet. Ähnliche Aussagen können auch für die Bodenschicht 47-53 cm getroffen werden. Mit lediglich 6 cm/d erfüllt der kf-Wert nach der Überfahrt in dieser Tiefe nicht mehr die Mindestanforderungen. Die Luftkapazität unterschreitet mit 6,3 Vol.-% den Zielwert dagegen nicht.

Insgesamt führt die Ernte der Zuckerrüben bei Bodenwassergehalten nahe der Feldkapazität und mit einer Radlast von ca. 6,1 - 6,7 t zu Gefügeveränderungen bis in den Unterboden. Diese Erkenntnis bestätigt u.a. Untersuchungen von TRAUTNER & ARVIDSSON (2003), in denen hohe Radlasten bei einfacher Überfahrt ebenfalls zu Gefügeveränderungen im Unterboden geführt haben. Die zum Zeitpunkt der Überfahrt bestehende Gefügestabilität kann dabei als typisch für eine Reihe ähnlicher Standorte angesehen werden (MARSCHALL & STAHL, 2004). Stabilitätsfördernd wirkt zudem die langjährige konservierende Bodenbearbeitung auf dem Versuchsschlag.

Bei dem beschriebenen Versuch handelt es sich um eine einfache Überfahrt im Schongang des Rübenroders. Langfristig sind die Auswirkungen wiederholter Überfahrten, z.B. im Rahmen der Wiederkehr des Zuckerrübenanbaus innerhalb der Fruchtfolge interessant. Hierzu liegen unterschiedliche Ergebnisse vor. Während KOCH et al. (2008) nach mehrmaligem Befahren nachhaltige Gefügeveränderungen bis in den Unterboden feststellen konnten, lassen sich bei BRANDHUBER et al. (2007) keine additiven Effekte auf das Bodengefüge ermitteln.

Das Schadverdichtungsmodul in REPRO gibt die gemessene Gefügeveränderung anschaulich wieder (Abb. 14). Es weist für den krumennahen Unterboden (35 cm) eine hohe Verdichtungsgefährdung aus (Belastungsindex 0,28). Im Versuch wurde aus verfahrenstechnischen Gründen nur mit halber Bunkerfüllung gearbeitet.

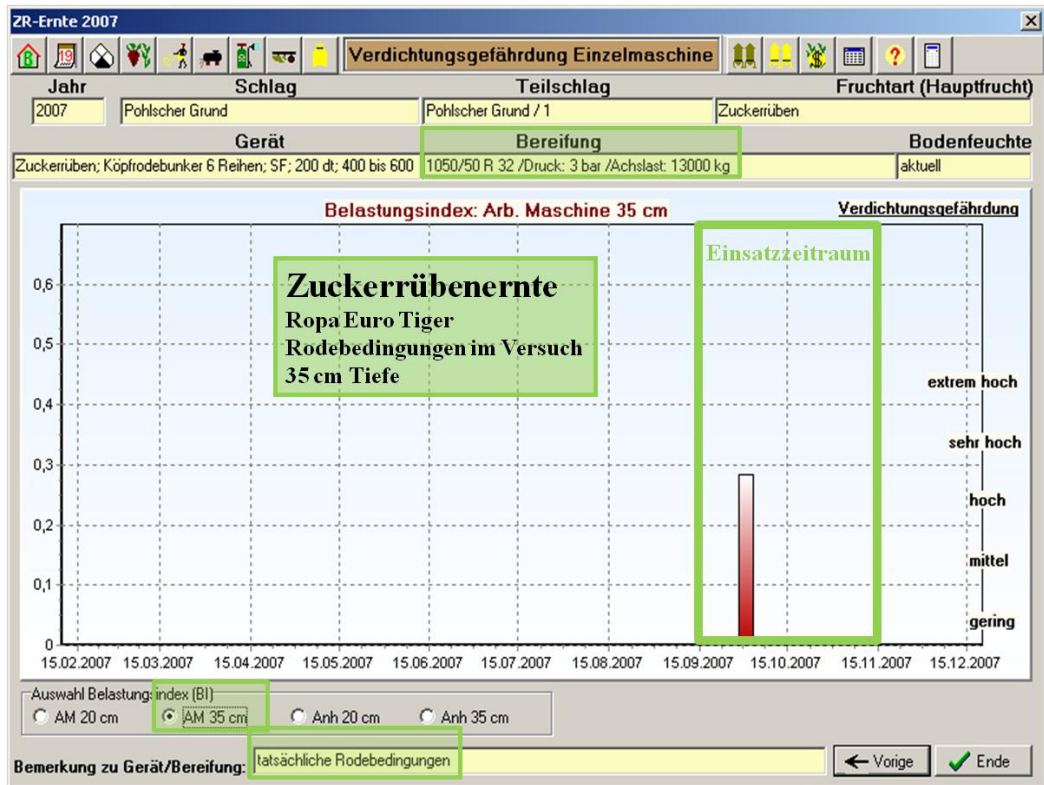


Abb. 14: Berechnete Schadverdichtungsgefährdung für die Überfahrt des Zuckerrübenrodgers unter den tatsächlichen Versuchsbedingungen in 35 cm Bodentiefe

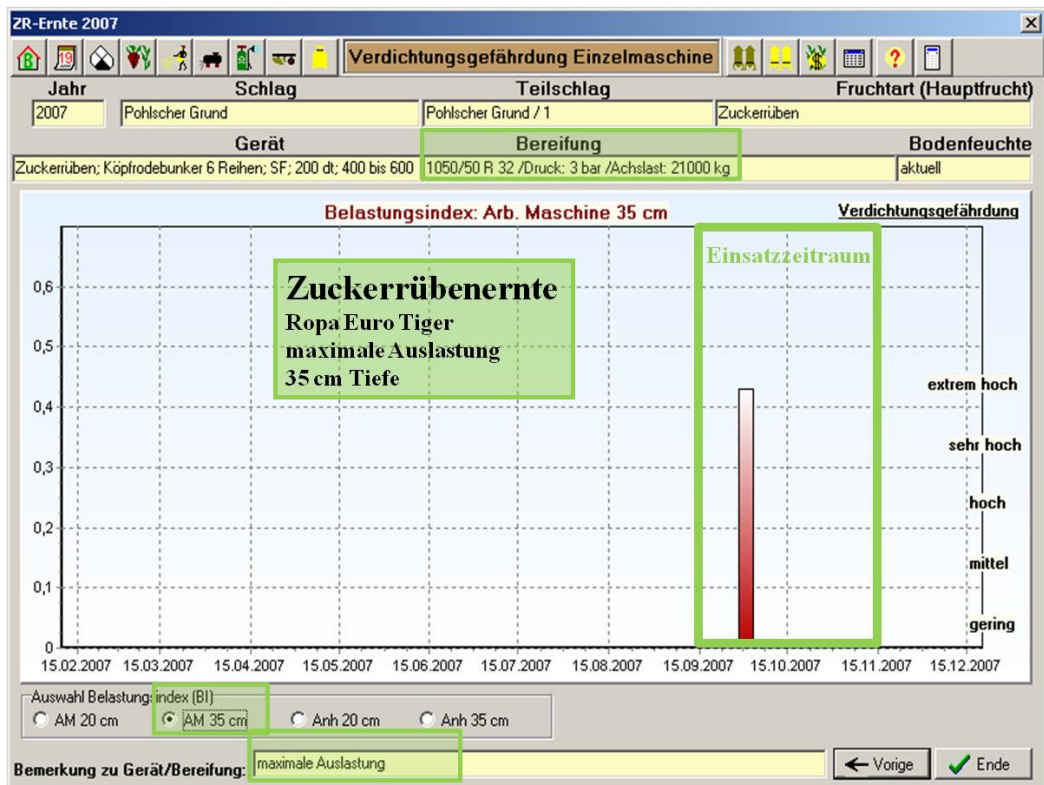


Abb. 15: Berechnete Schadverdichtungsgefährdung für die Überfahrt des Zuckerrübenroders bei simulierter maximaler Bunkerfüllung in 35 cm Bodentiefe

Dies entspricht meist nicht den Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis mit dem Ziel eines kosteneffizienten Ernteverfahrens. Maximale Radlasten von ca. 10,5 t werden bei voller Auslastung des Bunkers realisiert. Eine Simulation der Auswirkungen der vollen Bunkerfüllung unter den beschriebenen Erntebedingungen führt nochmals zur deutlichen Erhöhung des Verdichtungsrisikos (Abb. 15). Nach Angaben von ENGELBRECHT (2007) liegt der Reifeninnendruck der Testmaschine auch bei einer Ausnutzung der vollen Bunkerkapazität deutlich über den allgemeinen Empfehlungen des Herstellers (200 kPa). Ein optimal gewählter Reifeninnendruck führt nach Simulation mit REPRO nur zur Verringerung des Belastungsindex um 0,07. Das Schadverdichtungsrisiko mit vollem Bunker ist damit immer noch als sehr hoch einzustufen.

3.2.2. Zuckerrübenroder am Versuchsstandort Harste

Die wiederholte Überfahrt mit dem selbstfahrenden sechsreihigen Zuckerrübenroder bei Bodenwassergehalten nahe der Feldkapazität führt in beiden Bodenbearbeitungsvarianten zu einer signifikanten Zunahme der Aggregatdichte in der unteren Ackerkrume (Tab. 15). In der zweiten Schichttiefe von 30-35 cm ist in der Lockerbodenwirtschaft eine signifikante und in der Festbodenmulchwirtschaft eine tendenzielle Aggregatdichtterhöhung feststellbar. Messungen des Eindringwiderstandes von HEUER et al. (2006) und KOCH (2007) lassen erkennen, dass diese Schicht durch die Bearbeitung mit dem Pflug erfasst wurde. Das Bodenmaterial ist durch die wendende Wirkung des Pfluges vermutlich zum Zeitpunkt einer der Überfahrten in Oberflächennähe gewesen und wurde deshalb während der Überfahrt einer stärkeren Druckbelastung ausgesetzt. In der Unterbodenschicht 40-45 cm wurden noch tendenzielle Erhöhungen der Aggregatdichte gemessen.

Tab. 15: Aggregatdichte nach wiederholter Überfahrt mit einem selbstfahrenden sechsreihigen Zuckerrübenroder im Bodenbearbeitungsversuch Harste; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p < 0,05$ zwischen befahrener und unbefahrener Variante

Varianten	Aggregatdichte (g/cm^3) in der Bodentiefe			
	18-23 cm	30-35 cm	40-45 cm	
LBW	unbefahren	1,63 a	1,63 a	1,54 a
	befahren	1,68 b	1,69 b	1,58 a
FBMW	unbefahren	1,56 a	1,58 a	1,56 a

Anhand der Beispiele im Kapitel „Auflastabhängiges Verhalten von Aggregaten und Gesamtboden“ konnte bereits gezeigt werden, dass die Aggregate mit 155-263 kPa (log 2,19-2,42) meist eine viel höhere mechanische Vorbelastung besitzen als der Gesamtboden. Die Zunahme der Aggregatdichte im Bodenbearbeitungsversuch Harste deutet somit auf das Auftreten sehr hoher Bodendrücke. Mit dem Modul in REPRO werden vertikale Spannungen von 275-437 kPa in 20 cm Tiefe sowie 148-209 kPa in 35 cm Tiefe für die einzelnen Überfahrten errechnet. Diese Werte übersteigen die Vorbelastung vergleichbarer Aggregate insbesondere in der Ackerkrume deutlich.

Tab. 16: Berechneter Belastungsindex und gemessene Veränderung bodenphysikalischer Eigenschaften durch wiederholte Überfahrt mit einem selbstfahrenden 6-reihigen Zuckerrübenroder im Bodenbearbeitungsversuch Harste; Δ TRD - Änderung der Trockenrohdichte, Δ LK - Änderung der Luftkapazität, Δ kf-Wert - Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit, ¹ nach KOCH (2007), ² nach der letzten Überfahrt gelockert

Bearbeitungsvariante	Belastungsindex (BI)	Δ TRD ¹ (g/cm ³)	Δ LK ¹ (Vol.-%)	Δ kf-Wert ¹ (cm/d)
FBMW 20 cm	0,40	0,09	-4,1	-12
FBMW 35 cm	0,17	0,04	-1,5	-42
² LBW 20 cm	0,86	0,07	-3,2	-182
LBW 35 cm	0,13	0,04	-1,2	-76

Die wiederholten Überfahrten führten zur Zunahme der Trockenrohdichte sowie zur Abnahme der Luftkapazität und des kf-Wertes (Tab. 16). Die Ergebnisse des Versuches werden von KOCH et al. (2008) umfassend beschrieben. Mit berechneten Belastungsindizes von 0,13 (mittel) bis 0,40 (sehr hoch) wird die Deformation des Bodengefüges gut wiedergegeben. Ausgenommen bleibt die LBW-Variante mit einem Index von 0,86 (extrem hoch) in 20 cm Tiefe. In dieser wurde zwischen der letzten Überfahrt und der Probenahme die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug durchgeführt. Trotz der Maßnahme verbleibt eine Dichtezunahme von 0,07 g/cm³. Die ARD/TRD-Verhältnisse der unbefahrenen und befahrenen Variante sind mit 1,14 und 1,12 sehr ähnlich. Die Trockenrohdichteänderung entspricht also etwa der Zunahme der Aggregatdichte. Eine Überschreitung der Vorbelastung der Aggregate kann durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen somit nicht regeneriert werden.

3.2.3. Pflanzenschutzspritze

Ein an die jeweiligen Arbeitsbedingungen korrekt angepasster Reifeninnendruck wird als wichtige Maßnahme zur Verringerung des Schadverdichtungsrisikos angesehen (SOMMER et al., 2002). Nachfolgender Versuch soll klären, wie exakt die Wirkungen des Reifeninnendrucks mit dem Schadverdichtungsmodul in REPRO abzubilden sind.

Tab. 17: Bodenphysikalische Parameter bei einfacher Überfahrt mit angehangener Pflanzenschutzspritze in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck; n.b. nicht bestimmt, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$

Parameter	Versuchsvariante / Reifeninnendruck				
	Unbefahren	70 kPa	90 kPa	130 kPa	170 kPa
Bodentiefe 17-23 cm					
Trockenrohddichte (g/cm ³)	1,21 a	1,27 ab	1,27 ab	1,29 b	1,33 b
kf-Wert (cm/d)	174 a	103 a	49 ac	19 b	35 bc
Luftkapazität (Vol.-%)	20,1 a	16,7 b	15,8 bc	14,5 bc	12,9 c
Bodentiefe 32-38 cm					
Trockenrohddichte (g/cm ³)	1,55 a	1,56 a	n.b.	n.b.	1,52 a
kf-Wert (cm/d)	23 a	14 a	n.b.	n.b.	17 a
Luftkapazität (Vol.-%)	8,8 a	8,3 a	n.b.	n.b.	9,3 a

Die berechnete mechanische Vorbelastung auf der Versuchsfläche beträgt unter den vorliegenden Bodenwassergehaltsbedingungen 85 kPa (log 1,93) in 17-23 cm Tiefe und 186 kPa (log 2,27) in 32-38 cm Tiefe. Auf der unbefahrenen Kontrolle der Testfläche liegt ein intaktes, nicht schadverdichtetes Bodengefüge vor (Tab. 17). Die von LEBERT et al. (2004) und PAUL (2004) vorgeschlagenen Mindestanforderungen an die Luftkapazität von 5 Vol.-% (Unterboden) bzw. 8 Vol.-% (Ackerkrume) werden in beiden Tiefen ebenso wenig unterschritten wie ein kf-Wert von 10 cm/d.

Bereits die Überfahrt mit dem niedrigsten Reifeninnendruck von 70 kPa führt in 17-23 cm Bodentiefe tendenziell zur Zunahme der Trockenrohddichte sowie zur Abnahme des kf-Wertes und der Luftkapazität. Mit steigendem Reifeninnendruck nimmt die Trockenrohddichte weiter kontinuierlich zu und der kf-Wert sowie die Luftkapazität ab. Die Mindestanforderungen an die physikalischen Bodeneigenschaften werden jedoch selbst beim höchsten, für die Straßenfahrt vorgesehenen Reifeninnendruck von 170 kPa, nicht

unterschritten. Eine Ursache für die nur moderate Gefügeveränderung in der Ackerkrume ist der relativ niedrige Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung. Er ist ein wesentlicher Faktor für die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens (FLEIGE et al., 2002; PENG et al., 2004). Im krumennahen Unterboden konnte keine Gefügeveränderung beobachtet werden. Die hohe Stabilität des Bodens gegenüber mechanischen Belastungen wird in dieser Tiefe von den eingetragenen Drücken nicht überschritten.

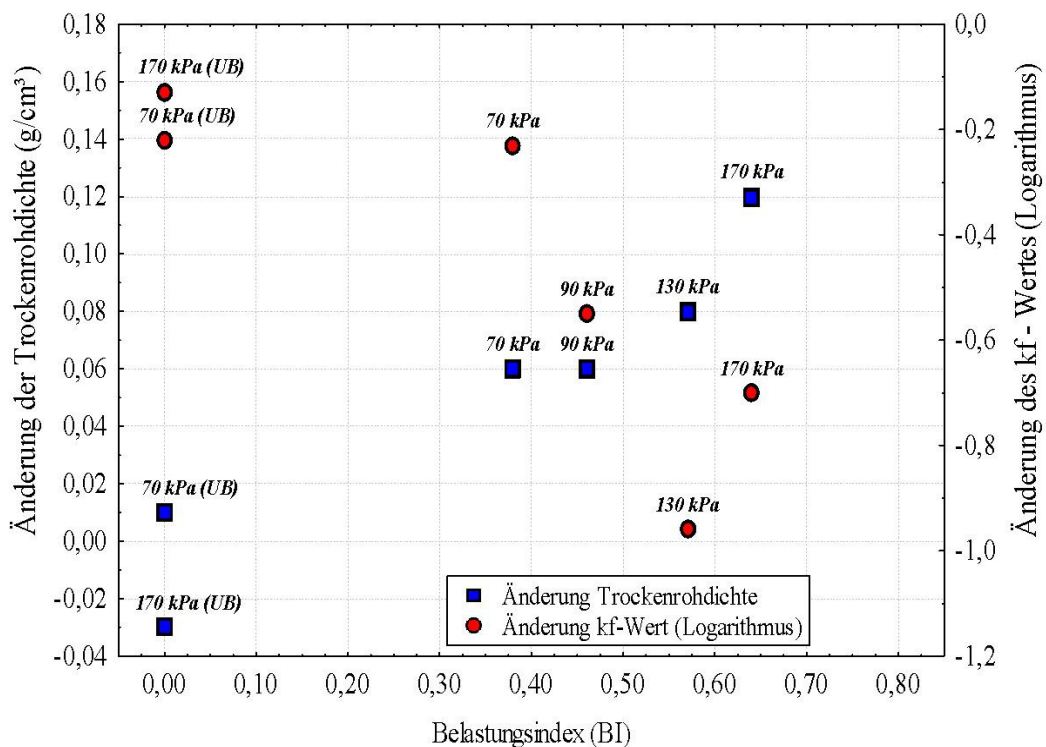


Abb. 16: Änderung von Trockenrohichte und kf-Wert in Abhängigkeit der berechneten Belastungsindizes für die verschiedenen Reifeninnendrucke

Insgesamt bestätigt der Versuch die bereits bekannten Auswirkungen der Reifenluftdruckabsenkung. Sie führt zur Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche (GYSI, 1999) und in Folge dessen zur Verringerung des mittleren Kontaktflächendruckes. Dies reduziert insbesondere die in den Oberboden eingetragenen Spannungen, während für den Spannungszustand im Unterboden die Radlast von größerer Bedeutung ist (ARVIDSSON et al., 2002). Auswirkungen einer ungleichmäßigen Druckverteilung in der Kontaktfläche, die insbesondere bei übermäßig abgesenktem oder erhöhtem Reifeninnendruck auftreten können (DÖLL, 1998), sind im Rahmen des vorliegenden Versuchs nicht ana-

lysiert worden. Die Ergebnisse der physikalischen Untersuchungen bilden nur mittlere Veränderungen über die gesamte Aufstandsfläche des Reifens ab.

Die mit dem Programm REPRO berechneten Belastungsindizes korrespondieren gut mit der Entwicklung von Trockenrohdichte und kf-Wert (Abb. 16). Für den krumennahen Unterboden wird in allen untersuchten Varianten ein Index von 0,00 berechnet und es finden praktisch keine Veränderungen der physikalischen Bodeneigenschaften statt. Die Belastungsindizes der unteren Ackerkrume variieren zwischen 0,38 (70 kPa Variante) und 0,64 (170 kPa Variante). Analog dazu nimmt die Trockenrohdichte um 0,06 bis 0,12 g/cm³ zu und der kf-Wert um 71 bis 139 cm/d (log -0,23 bis -0,70) ab. Insgesamt zeigt das Modell am untersuchten Standort damit eine gute Sensitivität für die Wirkung des Reifeninnendrucks.

3.2.4. Versuch Großraumdüngerstreuer

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Etablierung pflugloser und tiefenreduzierter Bodenbearbeitung ist auch in der Ackerkrume ein schadverdichtungsfreies Bodengefüge anzustreben. Die Wiederauffüllung des Wasservorrates erfolgt im Herbst aber zunächst in der Ackerkrume, weshalb sie in diesem Zeitraum meist einer höheren Verdichtungsgefährdung unterliegt als der noch trockene Unterboden. Zudem werden einzelne agronomische Maßnahmen, die nicht einer direkten Terminbindung unterliegen, in dieser für den Ackerbau arbeitsarmen Zeit durchgeführt. Eine solche Maßnahme ist die Ausbringung von Kalkdünger, die oft überbetrieblich mit entsprechender Großtechnik durchgeführt wird.

Tab. 18: Bodenphysikalische Eigenschaften in den befahrenen und unbefahrenen Schlagbereichen, Tiefe 17-23 cm, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$

Parameter	unbefahren	befahren	Veränderung
Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,51 a	1,58 b	+0,07
kf-Wert (cm/d)	27 a	11 a	-16
Luftkapazität (Vol.-%)	9,2 a	6,3 b	-2,9

Die Überfahrt mit dem „Terra-Gator 2104“ führte in der unteren Ackerkrume zu einer signifikanten Dichtezunahme sowie der Abnahme der Luftkapazität und tendenziell des

kf-Wertes (Tab. 18). Dabei wurden die Mindestanforderungen an die Luftkapazität unterschritten. Die Aggregatdichte von $1,68 \text{ g/cm}^3$ wurde durch die Überfahrt nicht verändert.

Das Schadverdichtungsmodul in REPRO weist eine extrem hohe Verdichtungsgefährdung aus (Belastungsindex 0,48) und spiegelt damit die gemessene Gefügeentwicklung gut wieder. Insgesamt zeigt der Versuch, dass Großgeräte mit hohen Radlasten auch bei entsprechend günstiger Bereifung zu negativen Gefügeveränderungen in der unteren Ackerkrume führen können. Für eine langfristige Anwendung pflugloser und tiefenreduzierter Bodenbearbeitung sind diese jedoch unbedingt zu vermeiden.

3.2.5. Versuch Zwillingsbereifung

Die Montage von Zwillingsreifen kann eine sinnvolle technische Möglichkeit zur Reduzierung der Einzelradlasten darstellen. Unter Beachtung der Betriebsanleitung des Reifenherstellers ist meist auch die Absenkung des Reifeninnendrucks möglich, wodurch sich zusätzlich der mittlere Kontaktflächendruck verringert. In der Summe dieser beiden Wirkungen soll ein schonenderes Befahren für das Boden gegenüber der Einzelbereifung erreicht werden.

Tab. 19: Physikalische Bodenparameter im Versuch Zwillingsbereifung, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$ zwischen den Bereifungsvarianten, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$ zwischen innerem und äußerem Rad

Variante	Parameter		
	Trockenrohdichte (g/cm^3)	Luftkapazität (Vol.-%)	kf-Wert (cm/d)
Unbefahren	1,21 a	18,8 a	97 a
Einfachbereifung	1,34 b	10,8 b	17 b
Zwillingsbereifung 1,6 bar	1,30 c	11,7 b	20 b
inneres Rad	1,31 A	11,2 A	20 A
äußeres Rad	1,29 A	12,1 A	19 A
Zwillingsbereifung 0,6 bar	1,28 c	14,3 c	53 a
inneres Rad	1,29 A	14,1 A	53 A
äußeres Rad	1,28 A	14,5 A	53 A

Im unbefahrenen Zustand der Versuchsfläche liegt nach intensiver, krumentiefer Bearbeitung ein lockeres Bodengefüge mit hoher Luftkapazität und gesättigter Wasserleitfähigkeit vor (Tab. 19). Die Überfahrt mit einfacher Bereifung und 160 kPa Innendruck hat eine deutliche Verdichtungswirkung. Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit unterschreiten jedoch nicht die kritischen Werte von 8 Vol.-% bzw. 10 cm/d.

Mit Zwillingsbereifung kann die Verdichtungswirkung gegenüber der Einzelbereifung signifikant herab gesetzt werden. Dies spiegelt sich auch in den Parametern Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit wieder. Besonders ausgeprägt ist die schonende Wirkung bei abgesenktem Reifeninnendruck. Hier ist nochmals eine deutliche Verringerung der Verdichtungswirkung verbunden mit höheren kf-Werten und Luftkapazitäten feststellbar. Tendenziell weist das Gefüge nach der Überfahrt unter den äußeren Rädern der Zwillingsbereifung günstigere Eigenschaften im Vergleich zu den inneren Rädern in beiden Luftdruckvarianten auf. Dies könnte folgende Ursachen haben:

1. Die äußeren Räder besitzen mit 145,8 cm einen geringfügig kleineren Durchmesser als die inneren Räder (147,1 cm). Sie sinken weniger in den Boden ein und stützen deshalb einen geringeren Teil der Maschinenmasse ab, als dies aus dem Verhältnis der Reifenbreiten zu erwarten wäre.
2. Die schmalen inneren Räder (34,5 cm gegenüber 46,7 cm) haben nach SÖHNE (1953) einen kleineren Äquivalentradius der Reifenkontaktfläche. Bei vergleichbarem Kontaktflächendruck erfolgt damit ein stärkerer Spannungsabbau mit der Bodentiefe. So werden mit REPRO in 20 cm Tiefe für das innere Rad vertikale Spannungen in der Lastachse von 110 kPa bzw. 72 kPa (bei 160 bzw. 60 kPa Reifeninnendruck) und für das äußere Rad von 87 kPa bzw. 63 kPa berechnet, wenn beide Räder als Einzelrad betrachtet werden.

Mit dem Modul zur Verdichtungsgefährdung in REPRO werden in 20 cm Tiefe Belastungsindizes für die Einzelbereifung mit 160 kPa Luftdruck von 0,70, für die Zwillingsbereifung mit 160 kPa Luftdruck (beide Räder) von 0,55 und für die Zwillingsbereifung mit 60 kPa Luftdruck (beide Räder) von 0,37 berechnet. Für die einzelnen Räder der Zwillingsbereifung errechnen sich Indizes von 0,55 (inneres Rad) bzw. 0,45 (äußeres Rad) bei 160 kPa Luftdruck und 0,37 (inneres Rad) bzw. 0,31 (äußeres Rad) bei 60 kPa Luftdruck. Die Modulergebnisse spiegeln damit die gemessene Entwicklung der Gefügeeigenschaften sowohl beim Vergleich der Überfahrten zur unbefahrenen Kon-

trolle als auch zwischen den Bereifungsvarianten gut wieder (Abb. 17). Zudem wird der tendenzielle Unterschied der Gefügeeigenschaften zwischen innerem und äußerem Rad gut wiedergegeben.

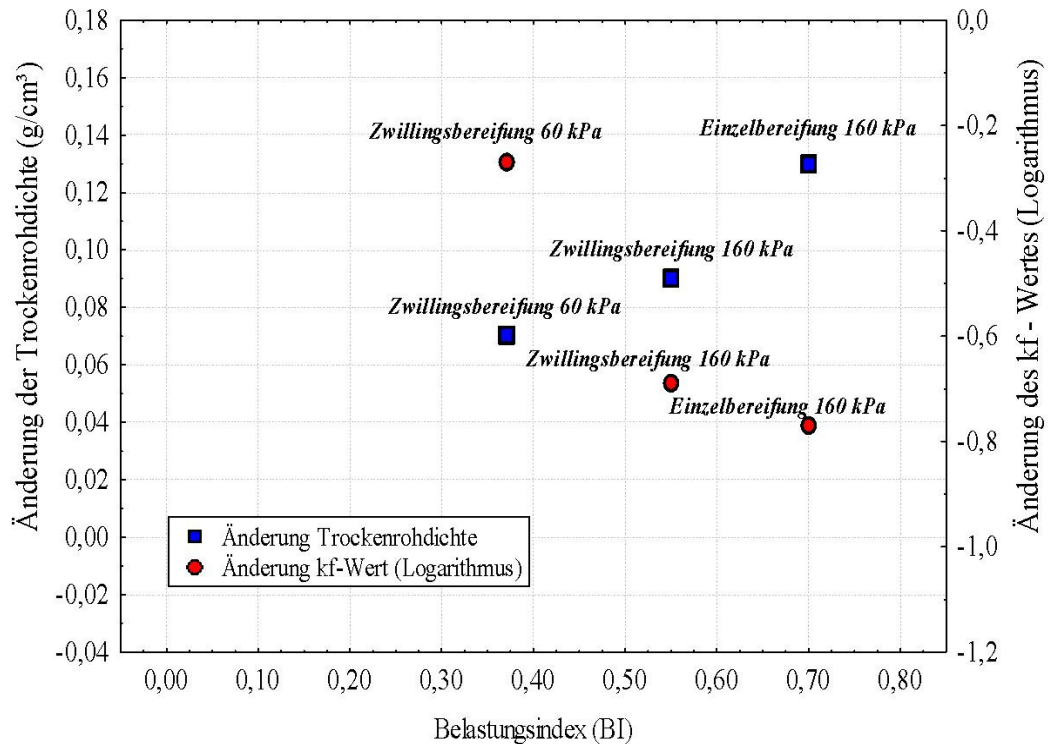


Abb. 17: Änderung von Trockenrohddichte und kf-Wert (Logarithmus) in Abhängigkeit der berechneten Belastungsindizes für die verschiedenen Bereifungsvarianten

3.3. Modulvalidierung mit Beobachtungsflächen

Beobachtungsflächen dienen zur komplexen Überprüfung der Berechnungsschritte des Moduls, weil sie neben den grundlegenden mathematischen Beziehungen die landwirtschaftlichen Verfahrensabschnitte in die Bewertung mit einbeziehen. Dabei erfolgt auch zu unterschiedlichen Terminen die Verknüpfung der zufälligen Überfahrten mit den Regelspuren, in dessen Konsequenz eine flächenhafte Abschätzung der Verdichtungsgefährdung ermöglicht wird. Weiterhin kann mit den Beobachtungsflächen die Auswirkung der Landbewirtschaftung auf das Bodengefüge direkt beobachtet werden.

Durch Umstellung auf pfluglose Bodenbearbeitung mit reduzierter Bearbeitungstiefe kam es in Hechtsheim II im Zeitraum von 2003-2009 zu einer Dichtlagerung der unteren, nicht mehr bearbeiteten Ackerkrume (Tab. 20). Dies spiegelt sich in einer Zunahme der Trockenrohddichte von 0,16 g/cm³ und Abnahme der Luftkapazität um 8,1 Vol.-%

bzw. des kf-Wertes um 122 cm/d wieder. Der Abfall des kf-Wertes lässt sich auch durch Ausbildung eines durch Wurm- und Wurzelröhren dominierten Grobporensystems, welches bei Umstellung auf langjährig nichtwendende Bodenbearbeitung beschrieben wird (WUEST, 2001), nicht vollständig kompensieren. Die Mindestanforderungen an ein intaktes Bodengefüge werden aber bei weitem erfüllt. Trockenrohddichte und Luftkapazität verändern sich im Unterboden nur unwesentlich. Dagegen führt die unterlassene Unterbodenbearbeitung mit dem Zweischichtpflug nach der ersten Probenahme und die anschließende Umstellung auf nichtwendende Bodenbearbeitung zumindest tendenziell zur Verbesserung des kf-Wertes. Dies ist Ausdruck für die Ausbildung eines vorrangig vertikal orientierten und durch biogene Poren dominierten Porensystems.

Tab. 20: Bodenphysikalische Eigenschaften und deren Veränderung zum zweiten Untersuchungstermin für die rheinland-pfälzischen Ackerflächen, TRD - Trockenrohddichte, LK - Luftkapazität, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen $p < 0,05$ zwischen den untersuchten Jahren

Parameter	Hechtsheim II		Wöllstein	
	17-23 cm	32-38 cm	17-23 cm	32-38 cm
TRD _{2003/04} (g/cm ³)	1,24 a	1,33 a	1,49 a	1,42 a
TRD ₂₀₀₉ (g/cm ³)	1,40 b	1,31 a	1,49 a	1,39 a
Δ TRD (g/cm ³)	+0,16	-0,02	$\pm 0,00$	-0,03
LK _{2003/04} (Vol.-%)	20,8 a	12,9 a	8,6 a	11,7 a
LK ₂₀₀₉ (Vol.-%)	12,7 b	14,3 a	8,3 a	13,8 a
Δ LK (Vol.-%)	-8,1	+1,4	-0,3	+2,1
kf-Wert _{2003/04} (cm/d)	261 a	41 a	16 a	44 a
kf-Wert ₂₀₀₉ (cm/d)	139 b	86 a	24 a	35 a
Δ kf-Wert (cm/d)	-122	+45	+8	-9

Am Standort Wöllstein können für den Beobachtungszeitraum (2004-2009) keine Gefügeveränderungen nachgewiesen werden. Insgesamt liegt auch hier in beiden Bodenschichten ein intaktes Gefüge (>8 Vol.-% Luftkapazität; >10 cm/d kf-Wert) vor. Die Belastungsindizes betragen für den Standort Wöllstein 0,03 in 20 cm und 0,00 in 35 cm Tiefe. Für die untere, im Beobachtungszeitraum sehr kompakt gewordene Acker-

krume des Standortes Hechtsheim II, wird ein Index von 0,75 (extrem hoch) errechnet. Im krumennahen Unterboden (35 cm Tiefe) beträgt der Index 0,00. Damit wird die Entwicklung des Bodengefüges auf den Beobachtungsschlägen mit den berechneten Belastungsindizes sehr gut wiedergegeben.

Dynamik und Entwicklung des Bodengefüges sind von zahlreichen Faktoren abhängig. Dies sollte beim Vergleich der Entwicklung der Gefügeeigenschaften mit den berechneten Verdichtungsgefährdungen berücksichtigt werden. Zum einen führen mechanische Belastungen durch das Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen, wie sie im Modell REPRO erfasst werden, zur Zunahme der Trockenrohdichte bzw. Abnahme der Luftkapazität sowie des kf-Wertes (RÜCKNAGEL & CHRISTEN, 2009). Dies begründet sich aus der Einstellung eines Kräftegleichgewichtes zwischen dem aufgebrachtten Druck und dem mechanischen Widerstand des Bodens (HARTGE & SOMMER, 1982; RÜCKNAGEL et al. 2007). Weiterhin neigen stark gelockerte Böden zeitabhängig und ursächlich durch ihr Eigengewicht oder den Einfluss von Niederschlagswasser zum sacken (SCHAAF, 1998).

Andererseits findet auf konventionell bearbeiteten Ackerflächen zumindest eine regelmäßige Lockerung der Krume statt. Auch die Anreicherung mit organischer Substanz führt zur Herabsetzung der Dichte (ULRICH, 2008). Dies kann durch direkte Akkumulation von Kohlenstoffverbindungen in die Aggregate (SIX et al., 1999) oder die Erhöhung der Bioturbation durch Förderung von Mikroorganismen und Regenwürmern geschehen. Die mechanischen Wirkungen einer Überfahrt können jedoch die positiven Effekte der organischen Bodensubstanz vollständig nivellieren (EDEN et al., 2009).

Weitere Ursachen für die Regeneration des Gefüges können zyklische Quellungs- und Schrumpfungprozesse sowie Frostereignisse sein, wenn die Auflockerung durch unterlassene mechanische Belastungen nicht wieder rückgängig gemacht wird. So wiesen BOIZARD et al. (2009) an einem Ackerstandort mit Verdichtungsmerkmalen Änderungen der Gefügeform in der unteren Ackerkrume aufgrund von Schrumpfung- und Quellungszyklen sowie eine Regeneration des Regenwurm induzierten Makroporensystems nach. Die Wirkungen biogener und klimatischer Faktoren sind jedoch schwer quantifizierbar und wurden im bisherigen Modellansatz nicht integriert. In Grenzen werden einzelnen Fruchtarten mit Pfahlwurzelsystem sowie längerer Bodenruhe und Beschattungsintensität, wie beispielsweise Winterraps (*Brassica napus L. var. napus*), regenerative Effekte zugeschrieben (PAUL, 2002).

3.4. Übersicht der Modulvalidierungen

Im Folgenden werden alle Validierungen der im Rahmen des Projektes durchgeführten Überfahrversuche zusammengefasst (Tab. 21, St.-Nr. 1-19). Ergänzt werden die Darstellungen durch die bereits von RÜCKNAGEL (2007) vorgenommenen Validierungen (St.-Nr. 20-25) sowie einen weiteren, am gleichen Standort wie der Versuch Ackerschlepper mit Zwillingsbereifung, durchgeführten Überfahrversuch (St.-Nr. 26, Ergebnisse im Bericht nicht gesondert dargestellt). Insgesamt ergeben sich damit 26 Einzelwerte verschiedener Standorte aus den Bodentiefen 20 und 35 cm.

In der Summe aller Modulvalidierungen spiegelt der Belastungsindex die Veränderungen des Bodengefüges durch die mechanischen Belastungen bei den Überfahrten und Bewirtschaftungsmaßnahmen sehr gut wieder. Besonders ausgeprägt ist die Beziehung zur Änderung der Luftkapazität (Abb. 18). Die größte Streubreite weist die Veränderung des k_f -Wertes (Logarithmus) auf (Abb. 19). Die Trockenrohichteänderung rangiert zwischen diesen beiden (Abb. 20). Alle statistischen Schätzfunktionen zum Belastungsindex schneiden die Ordinate fast genau beim Nullpunkt. Die Veränderungen der Gefügeeigenschaften werden damit von Anfang an ohne absolute Verschiebungen wiedergegeben. Auffällig ist die große Abweichung der Dichte und Luftkapazitätsänderung von den erwarteten Werten im Versuch mit dem Zuckerrübenroder am Standort Lossa in 20 cm Tiefe (St.-Nr.1). Die Änderung des k_f -Wertes folgt dagegen dem allgemeinen Trend. Die Differenzierung zwischen den physikalischen Bodenparametern ist auf die überwiegend knetende Wirkung bei der Überfahrt in 20 cm Tiefe zurückzuführen.

Tab. 21: Berechneter Belastungsindex (BI), Änderung von Trockenrohddichte (Δ TRD), Luftkapazität (Δ LK), Logarithmus des kf-Wertes (Δ log kf-Wert) und mittlere relative Änderung der physikalischen Bodeneigenschaften aller Versuche zur Modulvalidierung, n.b. - nicht bestimmt, * höchste gemessene Änderung der Eigenschaft entspricht relativ 100 Prozent

St.- Nr.	Bezeichnung und Tiefe (cm)	BI	Δ TRD (g/cm ³)	Δ LK (Vol.-%)	Δ log kf-Wert	mittlere relative Änderung
1	Lossa 20	0,72	0,03	-2,1	-0,97	44
2	Lossa 35	0,28	0,04	-1,7	-0,44	28
3	Harste FBMW 20	0,40	0,09	-4,1	-0,60	53
4	Harste FBMW 35	0,17	0,04	-1,5	-0,25	22
5	Harste LBW 35	0,13	0,04	-1,2	-0,57	30
6	Zwenkau I 20	0,38	0,06	-3,4	-0,23	33
7	Zwenkau I 35	0,00	0,01	-0,5	-0,22	11
8	Zwenkau II 20	0,46	0,06	-4,3	-0,55	47
9	Zwenkau III 20	0,57	0,08	-5,6	-0,96	68
10	Zwenkau IV 20	0,64	0,12	-7,2	-0,70	75
11	Zwenkau IV 35	0,00	-0,03	0,5	-0,13	-4
12	Rothenberga I 20	0,48	0,07	-2,9	-0,39	38
13	Rothenberga II 20	0,70	0,13	-8,0	-0,77	83
14	Rothenberga III 20	0,55	0,09	-7,1	-0,69	69
15	Rothenberga IV 20	0,37	0,07	-4,5	-0,27	41
16	Hechtsheim II 20	0,75	0,16*	-8,1*	-0,27	75
17	Hechtsheim II 35	0,00	-0,02	1,4	0,32	-19
18	Wöllstein 20	0,03	0,00	-0,3	0,18	-4
19	Wöllstein 35	0,00	-0,03	2,1	-0,10	-12
20	Halle 20	0,32	0,13	n.b.	-0,50	63
21	Wieskau 20	0,32	0,08	-1,7	-0,63	42
22	Wieskau 35	0,27	0,04	-0,3	-0,10	13
23	Rothenberga V 20	0,00	0,02	n.b.	-0,24	17
24	Großstorkwitz 20	0,63	0,16*	n.b.	-0,64	79
25	Großstorkwitz 35	0,26	0,04	n.b.	0,14	6
26	Rothenberga VI 20	0,58	0,12	-7,8	-1,12*	90

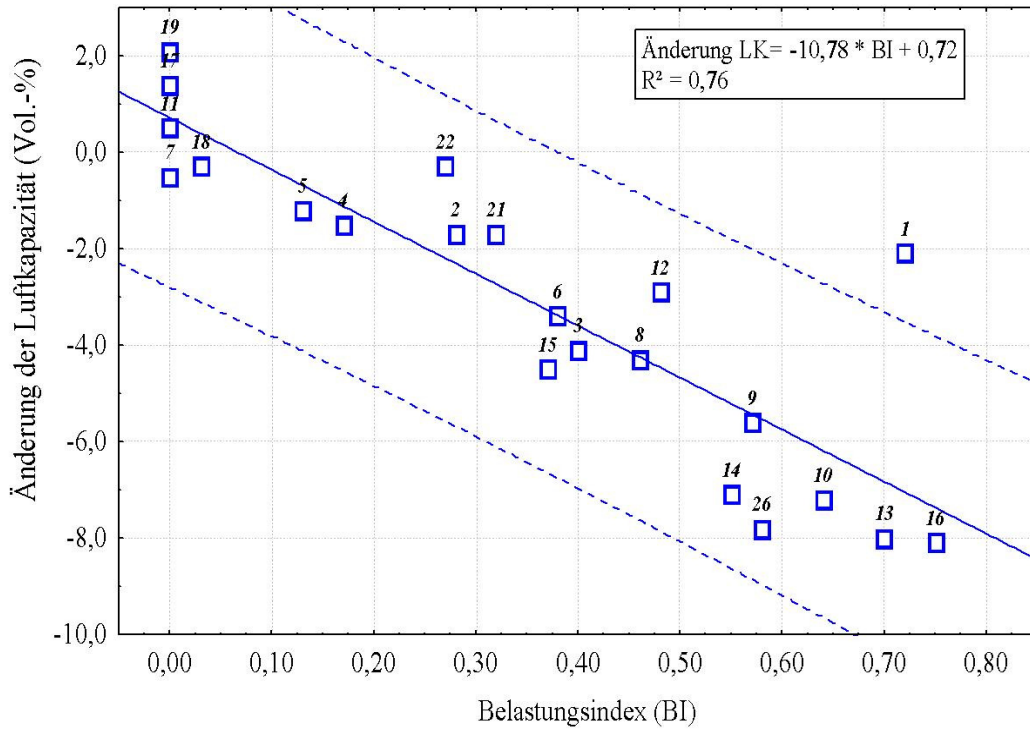


Abb. 18: Zusammenhang von errechneten Belastungsindizes und der Änderung der Luftkapazität für alle Modulvalidierungen (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte, die Nummer entspricht der Versuchsnummer in Tab. 22)

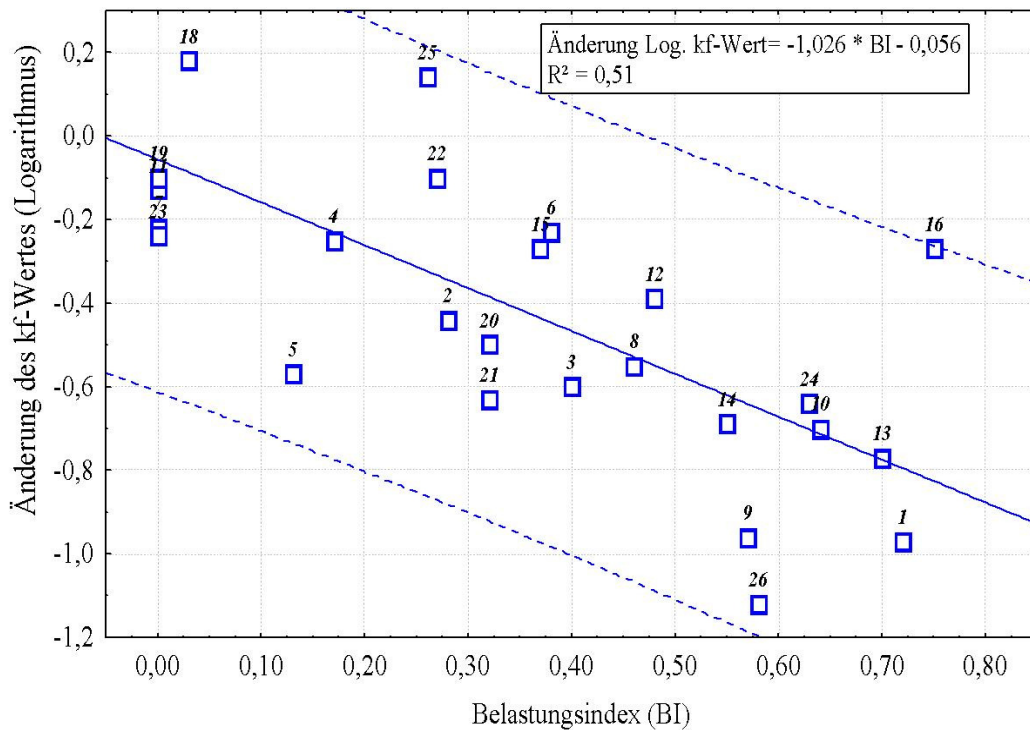


Abb. 19: Zusammenhang von errechneten Belastungsindizes und der Änderung des Logarithmus des kf-Wertes für alle Modulvalidierungen (Linien entsprechen dem 95%

Prognoseintervall der Einzelwerte, die Nummer entspricht der Versuchsnummer in Tab. 22)

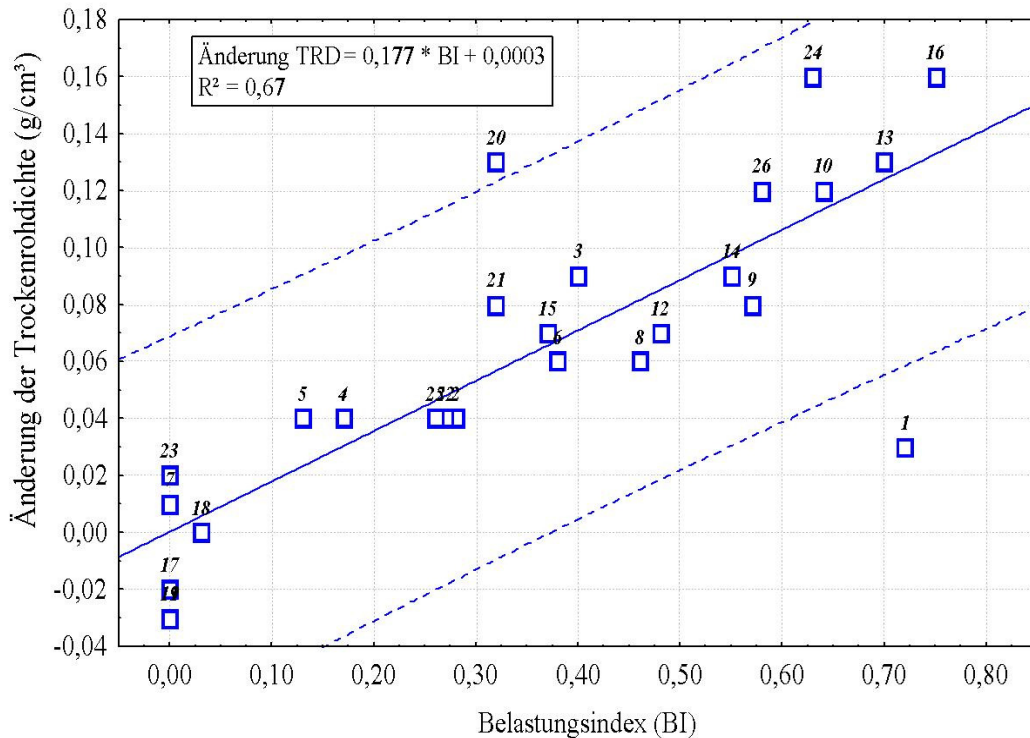


Abb. 20: Zusammenhang von errechneten Belastungsindizes und der Änderung der Trockenrohddichte für alle Modulvalidierungen (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte, die Nummer entspricht der Versuchsnummer in Tab. 22)

Für die Streuungen in den Beziehungen zwischen den physikalischen Bodenparametern und den berechneten Belastungsindizes sind folgende Ursachen zu diskutieren:

Bodenwassergehalt

Messwerte für den Bodenwassergehalt liegen nicht für alle Validierungen des Moduls vor. Insbesondere auf den Beobachtungsflächen musste auf berechnete Werte des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen werden. Diese können von den tatsächlichen Werten abweichen. So beträgt die mittlere absolute Abweichung von den in vorliegenden Versuchen gemessenen und den berechneten Bodenwassergehalten (n=7) immerhin 11 % der Feldkapazität. Bei einer durchschnittlichen Vorbelastung bei Feldkapazität von 100 kPa (log 2,00) ergibt sich daraus ein Schätzfehler der Korrektur von ca. 20-30 kPa ($\Delta \log 0,10$). Eine Ursache für die Abweichungen der Bodenwassergehalte ist die fehlende Schichtauflösung der Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes für die Kul-

turen Winterweizen und Zuckerrübe. Der Bodenwassergehalt ist im Jahresverlauf über die Tiefe 0-60 cm jedoch nicht gleichmäßig verteilt. Im Frühjahr findet die Abtrocknung des Bodens von der Oberfläche statt und die Wassergehalte des Unterbodens sind höher als die des Oberbodens. Im Herbst nehmen dagegen die Wassergehalte von der Bodenoberfläche her zu, so dass die Unterböden niedrigere Wassergehalte aufweisen.

Abschätzung der Gefügestabilität

In die Kalkulation des Belastungsindex fließen zunächst die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Schätzfehler der Regressionen zur Berechnung der Gefügestabilität bei Feldkapazität und der Korrektur dieser für den tatsächlichen Wassergehalt zum Zeitpunkt der Überfahrt mit ein.

Die Verdichtungsgefährdung in Form des Belastungsindex beschreibt in den vorliegenden Versuchen die Änderung der Bodeneigenschaften bei Überschreitung der mechanischen Vorbelastung in logarithmischer Skalierung. Die Änderungen des Gefüges sind damit vom Verlauf der Erstverdichtungsgeraden abhängig, und deren Neigung wiederum u.a. vom Tongehalt (LARSON et al., 1980; ARVIDSSON et al., 2001) und der Ausgangstrockenrohddichte (RÜCKNAGEL, 2007). Deshalb kann die Verdichtungswirkung bei gleichem Belastungsindex unterschiedlich sein.

Einige physikalische Bodenparameter, wie die Luftkapazität besitzen nicht über das gesamte Belastungsintervall der Erstverdichtungsgeraden einen linearen Verlauf. Ihre Werte nähern sich mit zunehmendem Druck asymptotisch dem Wert Null an. Besitzt ein Boden nur eine geringe Luftkapazität, dann kann diese auch bei enormer Überschreitung der mechanischen Vorbelastung nicht wesentlich reduziert werden.

Im Zuge der dreidimensionalen Druckverteilung bei der Überfahrt reagieren die bodenphysikalischen Parameter nicht in jedem Fall gleichartig. Liegen vorwiegend knetende (maßgeblich durch nicht abgebauten Porenwasserüberdruck) bzw. scherende Deformationen (Spannungsverhältnisse entscheidend) vor, dann erfolgt wie im Beispiel Zuckerrübenroder am Standort Lossa, Bodentiefe 20 cm eine vergleichsweise hohe Änderung des k_f -Wertes bei geringer Dichteänderung. Um diese differenzierten Reaktionen zum Zwecke der Gesamtbewertung der Modulgenauigkeit auszugleichen, wird nachfolgend eine Relativierung vorgenommen (Abb. 21). Dazu werden die größte Veränderung eines Parameters relativ 100 Prozent und alle weiteren Änderungen in Relation dazu gesetzt. Beispielsweise beträgt die größte Zunahme der Trockenrohddichte aller

Versuche 0,16 g/cm³ (Versuche „Hechtsheim II 20 cm“ und „Großstorkwitz 20 cm“). Sie entspricht 100 Prozent. Daran ausgerichtet, beträgt zum Beispiel die Zunahme der Trockenrohddichte im Versuch Zuckerrübenroder Lossa 20 cm mit 0,03 g/cm³ relativ 19 %. Schlussendlich werden alle vorliegenden Relativwerte von Trockenrohddichte, Luftkapazität und kf-Wert für jede Prüfung arithmetisch gemittelt und den Belastungsindizes gegenübergestellt. Der Zusammenhang der Belastungsindizes mit der mittleren relativen Gefügeveränderung ist besser als die Zusammenhänge mit den Einzelgrößen.

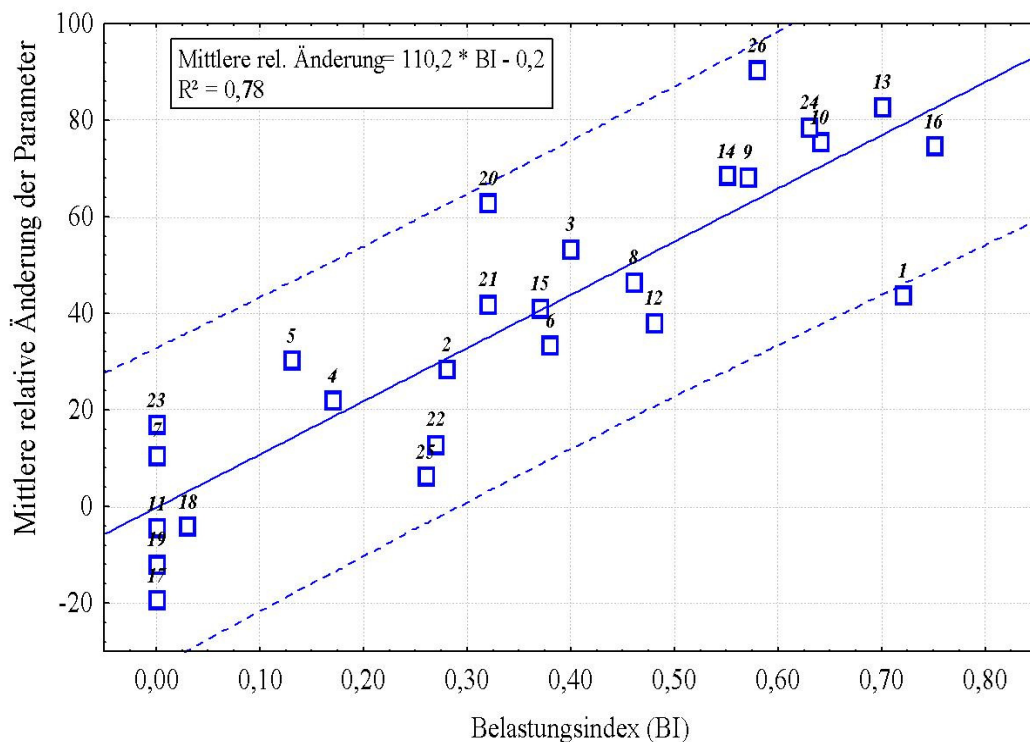


Abb. 21: Zusammenhang von errechneten Belastungsindizes und der mittleren relativen Änderung von Trockenrohddichte, Luftkapazität und Logarithmus des kf-Wertes für alle Modulvalidierungen (Linien entsprechen dem 95% Prognoseintervall der Einzelwerte, die Nummer entspricht der Versuchsnummer in Tab. 22)

Die Belastungsdauer bzw. -häufigkeit innerhalb der Validierungen ist nicht in jedem Fall vergleichbar. Es überwiegen zwar Versuche mit einfacher Überfahrt, doch es fließen auch Versuche mit wiederholten Überfahrten z.B. „Harste FBMW 20 cm“, „Harste FBMW 35cm“, „Harste LBW 35 cm“, „Wieskau 20 cm“ und „Wieskau 35 cm“ in die Gesamtprüfung des Moduls ein. Mit wiederholten Überfahrten ist eine höhere Belastungsdauer verbunden. Diese ist Voraussetzung für den Abbau von Porenwasserüber-

drücken und somit für eine stärkere Verdichtungswirkung bei gleichem Druck (FAZEKAS & HORN, 2005).

Antagonistisch zu den Verdichtungswirkungen durch die Überfahrten mit landwirtschaftlichen Maschinen können Regenerationsprozesse, wie Quellung und Schrumpfung, Frost oder Bioturbation wirken. Insbesondere auf den Beobachtungsflächen mit einem längeren Zeitraum zwischen den Probenahmen können diese Prozesse Abweichungen von erwarteter und gemessener Entwicklung des Gefüges verursachen. Vermutlich werden diese Effekte noch verstärkt, wenn eine Umstellung von konventioneller zu konservierender Bodenbearbeitung, verbunden mit der Ausbildung eines vorwiegend vertikal orientierten Porensystems erfolgt.

Berechnung des Bodendrucks

Während die Reifeninnendrucke generell gemessen wurden, basieren die Radlasten zum Teil auf Schätzungen nach den Formeln von RÜCKNAGEL (2007). Dies wurde vor allem in Versuchen mit Bodenbearbeitungsgeräten (u.a. Beobachtungsflächen) notwendig, weil eine direkte Gewichtsbestimmung einschließlich der Zusatzbelastungen durch den Zugwiderstand der Geräte praktisch nicht möglich ist. Da die Radlast großen Einfluss auf das Verdichtungsrisiko ausübt, sollte sie für die Eingabe im Modell REPRO sehr exakt berechnet werden. Insbesondere wenn Maschinen mit hohen Gesamtmassen eingesetzt werden, können schon kleinere Abweichungen bei der Gewichtsverteilung oder der Bunkerfüllung zu Fehleinschätzungen führen. Beispielsweise führt die Änderung der Radlast von 6,5 t auf 7,5 t bei Wassergehalten um die Feldkapazität und einer mechanischen Vorbelastung von 60-80 kPa (log 1,80-1,90) im Unterboden zur Erhöhung des Belastungsindex um ~0,05.

Die Methode zur Berechnung der vertikalen Spannung in der Lastachse konnte im Rahmen der Projektbearbeitung nicht gesondert überprüft werden. KOOLEN et al. (1992) hatten ihre Modifizierung der Gleichung von SÖHNE (1953) bereits in zahlreichen Messungen selbst überprüft und dabei festgestellt, dass Abweichungen vor allem bei sehr steifen oder besonders flexiblen Karkassen und einem für die Radlast überhöhten Reifeninnendruck auftreten können. Der Formel liegen die Annahmen zugrunde, dass die Kontaktfläche eben, kreisrund sowie horizontal ist und eine gleichmäßig verteilte Normalspannung in der Nähe der Kontaktfläche herrscht. Diese Annahmen und die Beschränkungen der maschinenspezifischen Parameter auf Radlast und Reifeninnendruck

vereinfachen die Berechnungen, jedoch bleiben die eigentlich elliptische Form der Kontaktfläche (FEBO et al., 2000) sowie die oft ungleichmäßige Druckverteilung in dieser (HAMMEL, 1994; GYSI, 2000) unberücksichtigt. Nach O`SULLIVAN et al. (1999) ist die Anwendung der zugrundeliegenden BOUSSINESQ-Theorie aber nur unter der Bedingung gültig, dass bei einer Belastung keine Volumenänderung stattfindet. Gerade im Oberboden können größere Deformationen auftreten, so dass die Theorie auf lockeren Oberböden nicht sicher anwendbar ist. Die Gleichung wurde weiterhin für ein ideal elastisches, homogenes, isotropes und unendliches Medium entwickelt. Der natürlich gelagerte Boden entspricht diesen Anforderungen jedoch nur ungenügend.

Spannungen breiten sich im Boden dreidimensional aus. Neben den Hauptspannungen existieren drei unabhängige Scherspannungen (HORN et al., 1992; KÜHNER, 1997). Die Beschränkung der Bodenbelastung auf die vertikale Spannung in der Lastachse ist mit einer unvollständigen Abbildung des Spannungszustands verbunden, in dessen Folge nur eine unvollständige Abbildung der Bodenbeanspruchung möglich wird.

Weiterhin werden dynamische Effekte beim Befahren nicht beachtet. Die Komponente mit der größten Bedeutung ist der Radschlupf. Positiver Schlupf eines Rades beim Antrieb sowie Bremsvorgänge, die insbesondere auf den Vorgewenden stattfinden, führen zur Zunahme von Druck- und Scherspannungen (BURGER et al., 1987; HAMMEL, 1994). Zudem ist durch Eigenschwingungen des Fahrzeugs, insbesondere bei größeren Fahrgeschwindigkeiten, eine Erhöhung des Kontaktflächendrucks möglich (DVWK, 2002).

4. Schlussfolgerungen

In dem vorliegenden Projekt wurde eine umfangreiche Überprüfung des REPRO-Moduls zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten vorgenommen. Diese beinhaltet zahlreiche Druck-Setzungsversuche, Überfahrversuche mit landwirtschaftlichen Maschinen und Untersuchungen auf Beobachtungsflächen in landwirtschaftlichen Betrieben. Mit dem methodisch abgestuften Vorgehen wird das Ziel verfolgt, sowohl einzelne mathematische Algorithmen als auch das komplexe Modul hinsichtlich Genauigkeit und Aussagekraft zu überprüfen. Folgendes Resümee kann gezogen werden:

- Die Überprüfung des Modells zur Berechnung der mechanischen Vorbelastung aus Aggregatdichte und Trockenrohdichte zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten. Auch für zahlreiche Sandböden mit Aggregatstruktur ist der Ansatz anwendbar. Eine Anpassung der Modellkonstanten speziell für Tonböden erhöht die Genauigkeit weiter.
- Für die reinen Sandböden ohne Aggregatstruktur, bei denen die Anwendung des Regressionsmodells mit Einbezug der Aggregatdichte nicht möglich ist, wurde vorläufig ein einfacher Trend zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte abgeleitet. Dieser sollte aber zwingend weiter überprüft werden.
- Mit den Regressionsgleichungen für die Korrektur der Vorbelastung bei unterschiedlichen Wassergehalten stehen nunmehr relativ genaue Modelle zur Verfügung, um die Verdichtungsgefährdung im Jahresverlauf abbilden zu können. Insbesondere die Auflösung nach Bodenarten verbessert die Präzision.
- Das Modul zur Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung zeigt eine gute Sensitivität für die Wirkung des Reifeninnendrucks und für unterschiedliche Bereifungssysteme wie Zwillingsreifen.
- Auswirkungen hoher Radlasten insbesondere auf das Bodengefüge des Unterbodens können sicher abgebildet werden. Simulationen erlauben eine Prognose der Schadverdichtungsgefährdung ohne erheblichen messtechnischen Aufwand.
- Die Untersuchungen auf den Beobachtungsflächen belegen, dass das Zusammenspiel aller Algorithmen bis hin zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung auf Schlagebene gut funktioniert. Der Einfluss von Regenerationsprozessen oder Bewirtschaftungsumstellungen kann im Modell jedoch nicht quantifiziert werden.

Die Anlage von Beobachtungsflächen sollte auf weitere Standorte ausgedehnt werden, um eine größere Spannweite von Boden- und Klimabedingungen zu erreichen.

- Über alle Modulvalidierungen wird eine sehr sichere Abschätzung der Verdichtungsgefährdung ersichtlich. Die Zusammenhänge zwischen den Änderungen der physikalischen Parameter und dem Belastungsindex bestätigen die bisherige Bewertungsfunktion im Modul.

Aus den vorgestellten Untersuchungen können zudem folgende grundsätzliche Schlussfolgerungen zur Verdichtungsgefährdung durch landwirtschaftliche Maschinen und Verfahren abgeleitet werden:

- Ein verringerter bzw. nach technischem Ratgeber des Reifenherstellers für Feldbedingungen optimal eingestellter Reifeninnendruck verringert das Schadverdichtungsrisiko in der Ackerkrume.
- Angepasste Bereifungsvarianten (z.B. Zwillingsreifen, Gleisbänder) sind sehr effektive Möglichkeiten die Schadverdichtungsgefährdung generell herab zusetzen.
- Bei Überfahrten mit Radlasten von mehr als ca. 6 t, Reifeninnendrücken von 200-300 kPa und Bodenwassergehalten nahe der Feldkapazität besteht auf Ackerstandorten mit Vorbelastungen zwischen 60 und 100 kPa ein erhebliches Risiko für Gefügeveränderungen bis in den Unterboden. Die genannten Bedingungen führen in Verbindung mit Bodenbearbeitungssystemen ohne Lockerung sehr wahrscheinlich auch zur Verdichtung der Ackerkrume.

Insgesamt ermöglicht das Modul innerhalb des Betriebsbilanzierungsmodells REPRO nach Abschluss des vorliegenden Projektes die komplexe und sichere Analyse des Problembereiches Schadverdichtungsgefährdung für eine breite Spanne von Standortbedingungen. Es kann damit als eigenständiges Instrument zur Verbesserung des Bodengefügeschutzes im Sinne nachhaltiger Landbewirtschaftung beitragen. Neben der Anwendung im Rahmen des DLG-Nachhaltigkeitsstandards (DBU Projekt AZ 22544) haben die Modulalgorithmen oder Teile davon Eingang in das C/N-Simulationsmodell CANDY und das „Prüfkonzept zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ (UBA-Vorhaben FKZ 3707 71) gefunden.

5. Themenbezogene Veröffentlichungen

- RÜCKNAGEL, J., HOFMANN, B. & O. CHRISTEN (2007): Konzept zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung. KTBL Schrift 458, 51-61.
- KNOBLOCH, M., DÖLL, H., RÜCKNAGEL, J., HOFMANN, B. & O. CHRISTEN (2007): Wirkung eines Gummibandlaufwerkes bei unterschiedlicher Überrollhäufigkeit und Fahrgeschwindigkeit auf physikalische Bodeneigenschaften einer Löß-Schwarzerde. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19, 176-177.
- RÜCKNAGEL, J., BRANDHUBER, R., HOFMANN, B., LEBERT, M., MARSCHALL, K. & R. PAUL (2007): Varianz der mechanischen Vorbelastung bei der graphischen Bestimmung nach dem Casagrande-Verfahren. Mitteilng. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 110, 131-132.
- HOFMANN, B., BISCHOFF, J., RÜCKNAGEL, J. & O. CHRISTEN (2009): Einfluss langjährig differenzierter Bearbeitungsintensität auf den C-Gehalt bindiger Standorte. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 21, 125-126.
- HOFMANN, B., BISCHOFF, J., RÜCKNAGEL, J. & O. CHRISTEN (2009): Einfluss langjähriger Bodenbearbeitung auf Corg-Gehalte bei Löß-Schwarzerde und pseudovergleyter Parabraunerde. In: Böden - eine endliche Ressource, September 2009, Bonn. Publikationen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft: <http://eprints.dbges.de/334/>
- RÜCKNAGEL, J. & O. CHRISTEN (2009): Use of the information system REPRO to assess physical aspects of soil fertility. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T1-032, 1-6.
- RÜCKNAGEL, J., HARRACH, T., DUMBECK, G., GERSCHLAUER, F. & O. CHRISTEN (2009): Morphological characterization of soil structure and the relation to precompression stress for recultivated loess soils. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T1-031, 1-5.
- RÜCKNAGEL, J., HARRACH, T., DUMBECK, G., GERSCHLAUER, F. & O. CHRISTEN (2009): Gefügemorphologie (Packungsdichte) und mechanische Bodeneigenschaften rekultivierter Böden aus Löß. In: Böden - eine endliche Ressource, September 2009, Bonn. Publikationen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft: <http://eprints.dbges.de/331/>
- RÜCKNAGEL, J., BRANDHUBER, R., HOFMANN, B., LEBERT, M., MARSCHALL, K., PAUL, R., STOCK, O. & O. CHRISTEN (2010): Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. Soil & Tillage Research 106, 165-170.

6. Themenbezogene Vorträge

- 19.04.2007: Akzeptanz und Bewertung von Lösungsansätzen zum Schutz des Bodengefüges vor Verdichtungen. 1. Expertengespräch Bodenschutz am Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen.
- 21.06.2007: Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
28. 11.2007: Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden – Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007. Ackerbautagung der LLFG Sachsen-Anhalt in Bernburg.
- 29.11.2007: Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden – Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007. Ackerbautagung der LLFG Sachsen-Anhalt in Iden.
- 29.02.2008: Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden – Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007. Vortragsveranstaltung des landwirtschaftlichen Beratungsrings Roßlau.
- 03.04.2008: Eigenschaften von Ackerstandorten der Altmark unter Berücksichtigung der Bodenschadverdichtung. Arbeitskreis Ackerbau Altmark.
- 28.11.2008: Bodengefüge beurteilen – aber wie? Praxistag der GUBB Halle mbH in Sachsen-Anhalt.
- 03.11.2009: Bodengefüge beurteilen – aber wie? Feldtag der LMS Landwirtschaftsberatung in Warin.

7. Literaturverzeichnis

- AG BODENKUNDE (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- ALAKUKKU, L. (1996): Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine - textured and organic soils. *Soil & Tillage Research* 37, 223-238.
- ARVIDSSON, J., TRAUTNER, A. & J.J.H. VAN DEN AKKER (2000): Subsoil compaction - risk assessment and economic consequences. *Advances in GeoEcology* 32, 3-12.
- ARVIDSSON, J. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil & Tillage Research* 60, 67-78.
- ARVIDSSON, J., TRAUTNER, A. & T. KELLER (2002): Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. *Advances in GeoEcology* 35, 331-338.
- ARVIDSSON, J., SJÖBERG, E. & J.J.H. VAN DEN AKKER (2003): Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. *Soil & Tillage Research* 73, 77-87.
- BALL, B.C. & E.A.G. ROBERTSON (1994): Effects of uniaxial compaction on aeration and structure of ploughed or direct drilled soils. *Soil & Tillage Research* 31. 135-148
- BERLI, M., KIRBY, J.M., SPRINGMANN, S.M. & R. SCHULIN (2003): Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research* 73, 57-66.
- BOIZARD, H., CAPOWIEZ, Y., LEONARD, J., CADOUX, S., LHEUREUX, S., COUSIN, I., ROGER-ESTRADE, J. & G. RICHARD (2009): Soil structure regeneration after compaction in a loamy soil in Northern France: The influence of climate and earthworms. *ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings*, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T1-049, 1-6.
- BRADEN, H. (1992): Das agrarmeteorologische Bodenwassermodell AMWAS - ein universell einsetzbares Modell zur Berechnung der Bodenwasserströme und -gehalte unter Berücksichtigung bodenwassergehaltsabhängiger Evaporations- und Transpirationsreduktion. Braunschweig: Deutscher Wetterdienst, Abschlussbericht zum Projekt K/U 28.
- BRANDHUBER, R., GEISCHER, R. & M. DEMMEL (2007): Bodengefügeschutz mit optimierter Fahrwerkstechnik – Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt. *Mitteilng. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 110, 673-674.
- BURGER, N., LEBERT, M. & R. HORN (1987): Druckausbreitung unter fahrenden Traktoren im natürlich gelagerten Boden. *Mitteilng. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 55, 135-140.
- CASAGRANDE, A. (1936): The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: *Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. of ICSMFE*. Cambridge, MA, 22-26 June 1936. vol. 3. Cambridge, MA, 93-108.
- DIN ISO 10694 (1996): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung.

- DIN 19683 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - physikalische Laboruntersuchungen - Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben.
- DIN 18135 (1999): Eindimensionaler Kompressionsversuch - Baugrund, Untersuchung von Bodenproben.
- DIN ISO 11272 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte.
- DIN ISO 11274 (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens.
- DIN ISO 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation.
- DÖLL, H. (1998): Bewertung von Landwirtschaftsreifen nach agrotechnischen, ökologischen und technisch - energetischen Kriterien. Forsttechnische Informationen 3/1998, 36-38.
- DUMBECK, G. (2009): Exkursion G1 – Rekultivierung landwirtschaftlicher Flächen im rheinischen Braunkohlenrevier im Wandel der Zeit. Exkursionsführer, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft Band 112, 66-77.
- DVWK (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- EDEN, M., SCHJØNNING, P., DE JONGE, L.W. & P. MOLDRUP (2009): Effects of mechanical impact on soil pore characteristics in soils with different organic matter content. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T4-012, 1-7.
- EHLERS, W., GOSS, M.J. & R. HORN (2005): Comment on „Effects agricultural machinery with high axle-load on soil properties of normally managed fields” (Authors L. SCHÄFER-LANDEFELD, R. BRANDHUBER, S. FENNER, H.-J. KOCH, N. STOCKFISCH. Soil & Tillage Research 75 (2004) 75-86). Soil & Tillage Research 80, 251-254.
- ENGELBRECHT, M. (2007): Allgemeine Empfehlungen des Herstellers zum Reifennendruck der Zuckerrübenroder. Persönliche Mitteilung.
- FAZEKAS, O. & R. HORN (2005): Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, 60-67.
- FEBO, P., LUCARELLI, F. & D. PESSINA (2000): Soil-tyre interaction parameters influencing soil compaction: A study of contact area prediction models. Advances in GeoEcology 32, 191-201.
- FLEIGE, H., HORN, R. & F. STANGE (2002): Soil mechanical parameters derived from the CA - database on subsoil compaction. Advances in GeoEcology 35, 359-366.
- GEE, G.W. & J.W. BAUDER, (1986): Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Hrsg.): Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Second Edition. 383-412.
- GYSI, M. (1999): Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuinnendruck. Agrarforschung 6, 9-12.

- GYSI, M. (2000): Soil compaction due to heavy agricultural wheel traffic. Zurich: A dissertation to The Swiss Federal Institute of Technology.
- HAMMEL, K. (1994): Soil stress distribution under lugged tires. *Soil & Tillage Research* 32, 163-181.
- HARTGE, K.-H. & C. SOMMER (1982): Einfluss der Bodenentwicklung auf den Zusammenhang zwischen Lagerungszustand und vertikaler Spannung im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 145, 25-35.
- HARTGE, K.-H. & R. HORN (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller).
- HERBST, F. & B. HOFMANN (2005): Ursachen und Auswirkungen von Wachstumsstörungen bei Sommerweizen in einem Feldbestand. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17, 38-41.
- HEUER, H., TOMANOVÁ, O. & H.-J. KOCH (2006): Vorsorgender Bodenschutz bei der Rübenerte: Einfluss wiederholter Befahrung bei differenzierter Bodenbearbeitung. *Zuckerindustrie* 131, 16-23.
- HORN, R. (1986): Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, 9-18.
- HORN, R., JOHNSON, C., SEMMEL, H., SCHAFER, R. & M. LEBERT (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155, 269-274.
- HORN, R., DOMZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. & C. VAN OUWERKERK (1995): Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. *Soil & Tillage Research* 35, 23-36.
- HORN, R. & J. ROSTEK (2000): Subsoil compaction processes - state of knowledge. *Advances in GeoEcology* 32, 44-54.
- HORN, R. & H. FLEIGE (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research* 73, 89-99.
- HORN, R., WAY, T. & J. ROSTEK (2003): Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research* 73, 101-106.
- HÜLSBERGEN, K.J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. *Berichte aus der Agrarwirtschaft*. Aachen: Shaker Verlag.
- KELLER, T., ARVIDSSON, J., DAWIDOWSKI, J.B. & A.J. KOOLEN (2004): Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress - displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* 77, 97-108.
- KOCH, H.-J., STOCKFISCH, N., SCHÄFER-LANDEFELD, L. & R. BRANDHUBER (2005): Response to the comment on „Effects agricultural machinery with high axle-load on soil properties of normally managed fields” (Authors L. Schäfer-Landfeld, R. Brand-

- huber, S. Fenner, H.-J. Koch, N. Stockfisch. *Soil & Tillage Research* 75 (2004) 75-86) by W. Ehlers, M.J. Goss, R. Horn. *Soil & Tillage Research* 80, 255-257.
- KOCH, H.-J. (2007): Ergebnisse aus dem Bodenbearbeitungsversuch Harste. Persönliche Mitteilung.
- KOCH, H.-J., HEUER, H., TOMANOVÁ, O. & B. MÄRLÄNDER (2008): Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agriculturally machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil & Tillage Research* 101, 69-77.
- KOOLEN, A.J., LERINK, P., KURSTJENS, D.A.G., VAN DEN AKKER, J.J.H. & W.B.M. ARTS (1992): Prediction of aspects of soil - wheel systems. *Soil & Tillage Research* 24, 381-396.
- KÜHNER, S. (1997): Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Universität Kiel: Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde 39.
- KÜSTERMANN, B., CHRISTEN, O. & K.-J. HÜLSBERGEN (2009): Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135, 70-80.
- LARSON, W.E., GUPTA, S.C. & R.A. USECHE (1980): Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 450-457.
- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuth: Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Band 12.
- LEBERT, M., BRUNOTTE, J. & C. SOMMER (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA Texte 46-04.
- MARSCHALL, K. & H. STAHL (2004): Risikomanagement Bodengefügeschutz. 2. Zwischenbericht, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- NISSEN, B. (1998): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz. Universität Kiel: Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
- O`SULLIVAN, M.F., HENSHALL, J.K. & J.W. DICKSON (1999): A simplified method for estimating soil compaction. *Soil & Tillage Research* 49, 325-335.
- PAUL, R. (2002): Ergebnisse der Bodengefügeuntersuchung auf Thüringer Dauerbeobachtungsflächen. Umweltbundesamt Texte 66/02, 127-131.
- PAUL, R. (2004): Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbau-lich genutzten Böden. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Zwischenbericht 46.02.
- PENG, X.H., HORN, R., ZHANG, B. & Q.G. ZHAO (2004): Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenised and recompacted Ultisols. *Soil & Tillage Research* 76, 125-137.
- ROPA MASCHINENBAU (2009): Prospekt Eurotiger V8-3. ROPA Fahrzeug- und Maschinenbau GmbH, Sittelsdorf 24, 84097 Herrngiersdorf. 20 S.

- RÜCKNAGEL, J. (2007): Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. Tönning: Der Andere Verlag. Schriftenreihe der Pflanzenbauwissenschaften des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Bd. 1.
- RÜCKNAGEL, J., HOFMANN, B., PAUL, R., CHRISTEN, O. & K.-J. HÜLSBERGEN (2007): Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil & Tillage Research* 92, 213-220.
- RÜCKNAGEL, J. & O. CHRISTEN (2009): Use of the information system REPRO to assess physical aspects of soil fertility. ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, 2009 Izmir-Turkey. T1-032, 1-6.
- RÜCKNAGEL, J., BRANDHUBER, R., HOFMANN, B., LEBERT, M., MARSCHALL, K., PAUL, R., STOCK, O. & O. CHRISTEN (2010): Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil & Tillage Research* 106, 165-170.
- SCHAAF, T., (1998): Integration von Modellansätzen zur Bodenbearbeitung und Düngung in den Baukasten für Stickstoffs simulationsmodell EXPERT-N. Band 10. Schriftreihe der Zentralstelle für Agrardokumentation und -information, Bonn.
- SIX, J., E.T. ELLIOTT & K. PAUSTIAN, 1999: Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1350-1358.
- SÖHNE, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* 5, 49-63.
- SOMMER, C., BRANDHUBER, R., BRUNOTTE, J. & W. BUCHNER (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung. In: BMVEL: Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. 14-41.
- STATSOFT, INC. (2009): Statistica für Windows (Software-System für Datenanalyse), Version 9.0. www.statsoft.com.
- TRAUTNER, A. & J. ARVIDSSON (2003): Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research* 73, 107-118.
- ULRICH, S. (2008): Zum Indikatorwert ausgewählter physikalischer Parameter und Kenngrößen des Kohlenstoffhaushaltes im Boden unter Berücksichtigung von Daten aus langjährigen Bodenbearbeitungs- und Dauerdüngungsversuchen. Tönning: Der Andere Verlag. Schriftenreihe der Pflanzenbauwissenschaften des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Bd. 3.
- VOORHEES, W.B. (2000): Long - term effect of subsoil compaction on yield of maize. *Advances in GeoEcology* 32., 44-54.
- WEISSKOPF, P., ZIHLMANN, U., WIERMANN, C., HORN, R., ANKEN, T. & E. DISERENS (2000): Influence of conventional and onland - ploughing on soil structure. *Advances in GeoEcology* 32, 73-81.
- WIERMANN, C., WERNER, D., HORN, R., ROSTEK & B. WERNER (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated Silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil & Tillage Research* 53, 117-128.

- WILLMOTT, C. J. (1982): Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63, No. 11, 1309-1313.
- WUEST, S.B. (2001): Soil biopore estimation: effects of tillage, nitrogen, and photographic resolution. Soil & Tillage Research 62, 111-116.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Förderung des Projektes. Für die engagierte Betreuung des Projektes seitens der DBU danken wir Herrn Dr. H. Wurl sehr herzlich.

Die Autoren bedanken sich bei den Landwirten und Lohnunternehmern für ihre Bereitschaft an den Versuchen im Rahmen des Projektes mitzuwirken. Insbesondere den Herren M. Büchner (Agrargenossenschaft „Elsteraue“, Zwenkau), H.-P. Zehe (Landwirtschaftsbetrieb, Hechtsheim) und K. Vestner (Landwirtschaftsbetrieb, Wöllstein) sei gedankt.

Wir bedanken uns bei Herrn Dr. J. Bischoff (LLFG Sachsen-Anhalt) und Herrn Dr. H.-J. Koch (IfZ Göttingen) für die Nutzung ihrer Feldversuche in unserem Projekt.

Für die Möglichkeit Untersuchungen auf den nordrhein-westfälischen Rekultivierungsflächen durchzuführen, bedanken wir uns sehr herzlich bei Herrn Dr. G. Dumbeck (RWE Power AG) und Herrn Prof. Dr. T. Harrach (Universität Gießen).

Herrn Dr. H.-J. Koch und Herrn Dr. M. Lebert sei zudem für die Diskussion der Projektergebnisse gedankt.