

Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland

Marco Lorenz*, Joachim Brunotte*, Thomas Vorderbrügge**, Robert Brandhuber***, Heinz-Josef Koch****, Marion Senger*****, Norbert Fröba***** und Franz-Josef Löpmeier*****

Zusammenfassung

Landwirtschaftliche Maschinen haben in den letzten Jahrzehnten vor allem aufgrund ökonomischer und arbeitswirtschaftlicher Vorteile an Größe und Gesamtmasse zugenommen. Teure Spezialmaschinen fordern hohe Auslastungsgrade, werden mitunter auch dann eingesetzt, wenn die Böden zu feucht und damit verdichtungsempfindlich sind und stoßen damit allzu oft an die Grenzen einer bodenschonenden Befahrbarkeit. Das vorgestellte Konzept zur ‚Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden‘ verknüpft bodenkundliche Grundlagendaten zur Bodenart und Ergebnisse des Bodenwassermodells AMBAV zur Bodenfeuchte mit Expertenwissen und leitet für typische Standorte Deutschlands die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden im langjährigen Jahresverlauf und verfügbare Befahrbarkeitstage ab. Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung erfolgte eine Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit (Tragfähigkeit) der Böden mit der Bodenbelastung durch die jeweilige Maschine. Hieraus werden mittlere regionale Einsatzzeiten (Befahrbarkeitstage) der jeweiligen Mechanisierungsverfahren abgeleitet. Die Angabe von regionalen Befahrbarkeitstagen in den wichtigsten Zeitspannen der Feldarbeiten sind für den Landwirt eine wertvolle Hilfe, Maschineninvestitionen und Einsatzzeiten zu planen und eine Anpassung der Maschine an die vorherrschenden Bodenverhältnisse im Sinne eines bodenschonenden Befahrens von Ackerflächen umzusetzen.

Schlagwörter: *Verdichtungsempfindlichkeit, Bodenbelastung, Befahrbarkeit, bodenschonendes Befahren von Ackerflächen, landwirtschaftliche Technik*

Abstract

Adaption of load input by agricultural machines to the susceptibility of soil to compaction – Principles of soil conserving traffic on arable land

The sizes and total weights of agricultural machinery have increased steadily over the last decades. This has primarily been for economic and process-efficiency reasons. Highly specialized machinery requires high operating levels. Under adverse conditions, considerable negative changes in soil structure and in multiple soil functions occur. The presented concept to ‘adapt machinery specifications to the susceptibility of soil to compaction’ combines basic soil data of soil texture and results of the soil water model AMBAV of soil moisture, with expert knowledge, and derives the susceptibility of soil to compaction and the long term trafficability of typical sites in Germany for main time spans of field work. Therefore the susceptibility of soil to compaction was compared with the soil load of the agricultural machinery. From this data, average days of trafficability of agricultural soil were derived depending on machinery and agricultural technique. The information on days of trafficability for main time spans of field work within a year will be helpful for the farmer to plan new investments and operating levels of machinery, and to adapt machinery specifications to the prevailing soil conditions to carry out soil-conserving traffic on arable land.

Keywords: *susceptibility of soil to compaction, soil load, trafficability, soil conserving traffic on arable land, agricultural technique*

* Johann Heinrich von Thünen Institut, Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

** Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

*** Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, Lange Point 12, 85354 Freising

**** Institut für Zuckerrübenforschung (IFZ), Holtenser Landstraße 77, 37079 Göttingen

***** Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK), Hans-Böckler-Allee 20, 30173 Hannover

***** Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt

***** Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

1 Hintergrund und Zielsetzung

Landwirtschaftliche Maschinen haben in den letzten Jahren und Jahrzehnten vor allem aufgrund ökonomischer und arbeitswirtschaftlicher Vorteile an Größe und Gesamtmasse zugenommen. Teure Spezialmaschinen fordern allerdings hohe Auslastungsgrade, werden deshalb mitunter auch dann eingesetzt, wenn die Böden zu feucht und damit verdichtungsempfindlich sind und stoßen damit allzu oft an die Grenzen einer bodenschonenden Befahrbarkeit. Parallel dazu hat sich auch die Fahrwerkstechnik (z. B. Hundeganglenkung, 3-Rad, Bandlaufwerke) fortlaufend weiterentwickelt. So sind heute Reifen verfügbar, die hohe Radlasten bei vergleichsweise geringen Reifeninnendruck und damit größeren Aufstandsflächen bodenschonend abstützen können (Typ IF (improved flexion) oder VF (very high flexion)). Ebenso lässt sich die Fahrwerkslast schwerer Erntemaschinen, wie z. B. Rübenroder oder Mähdrescher, auf modernen Bandlaufwerken mit großen Aufstandsflächen bodenschonend abstützen. Bei modernen Traktoren sorgen Schlupfregelung, Allradantrieb, Differenzialsperre, Zugkraftregelung, Reifeninnendruckverstellanlage, Aufsattelgeräte etc. für eine möglichst bodenschonende Befahrung von Ackerflächen. Dies sind Entwicklungen, die prinzipiell zu einer höheren Bodenschonung führen sollen. Diese bodenschonenden Effekte werden jedoch z. T. zunichte gemacht, wenn gleichzeitig Arbeitsbreiten und Bunkerkapazitäten und damit die Gesamtmassen der Maschinen vergrößert werden oder häufiger bei ungünstigen Bodenverhältnissen befahren wird. Daher fordert beispielsweise Brandhuber (2005) „Maschinen und Arbeitsverfahren bodenschonend auszurichten und den technischen Fortschritt in der Reifen- und Fahrzeugentwicklung künftig vermehrt zur Senkung der mechanischen Belastung der Böden zu nutzen, um die Funktionsfähigkeit des Bodengefüges zu erhalten“.

Der Einsatz großer Maschinen ist jedoch nicht pauschal negativ zu beurteilen. Größere Arbeitsbreiten erhöhen die Schlagkraft, Zeitfenster mit günstigen Bodenbedingungen können damit prinzipiell für die Erledigung der Feldarbeiten besser genutzt werden. Mit weniger Überfahrten kann ein höherer Feldanteil unbefahren bleiben. Außerdem können durch den Einsatz moderner Maschinen mit aktueller Fahrwerks- und Reifentechnologie auch höhere Radlasten bodenschonend abgestützt werden, sofern bei der Befahrung der aktuelle Bodenzustand berücksichtigt wird.

Um schädliche Bodenveränderungen und negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen zu vermeiden, sollte daher immer eine Bewertung und Anpassung der Maschine bzw. der gesamten Verfahrenskette und deren Lasteinträge an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens und die aktuellen Randbedingungen erfolgen. Hierzu ist es jedoch erforderlich, sowohl die Bodenbelastungen durch die jeweilige Maschine bzw. Verfahrenskette, als auch die jeweilige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens einzuschätzen und zu bewerten. Durch die Gegenüberstellung von Belastung (Maschine) und Belastbarkeit (Boden) lassen sich dann mögliche schädliche Bodenveränderungen abschätzen sowie Maßnahmen zu deren Vermeidung ableiten.

Die Vermeidung bzw. Verminderung anthropogen verursachter Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen bzw. schädlichen Bodenveränderungen ist Bestandteil des Leitbilds einer nachhaltigen Bodennutzung in der Pflanzenproduktion. Schädliche Bodenveränderungen sind vom Landwirt nicht nur hinsichtlich des Ertrags der Kulturpflanzen (Produktionsfunktion des Bodens) zu vermeiden, sondern haben ebenfalls negative Auswirkungen auf Stoff- und Wasserkreisläufe (Puffer- und Regelungsfunktion) sowie auf Bodenlebewesen (Lebensraumfunktion).

Im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) schreibt der Gesetzgeber vor, dass Landbewirtschaftung entsprechende Vorsorge (§§7, 17) und gegebenenfalls Gefahrenabwehr (§4) zu berücksichtigen hat. Befolgt der Landwirt die Vorgaben des §17 zur guten fachlichen Praxis bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung, erfüllt er seine Vorsorgepflicht nach §7. In §17 (2) werden die wesentlichen Grundsätze der ‚Guten fachlichen Praxis‘ (GfP) in den Punkten 1 bis 7 genauer erläutert. Unter Punkt 3. wird dabei festgelegt, dass „Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden“ sollen. Der Konkretisierung speziell zu diesem Punkt widmet sich der nachfolgende Beitrag.

Deutschland hat mit dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) einen hohen Standard, der in konkreten Handlungsempfehlungen für die „Gute fachliche Praxis (GfP)“ ausführlicher beschrieben wird. Diese Handlungsempfehlungen wurden jüngst durch eine Experten-Gruppe aktualisiert und geben dem Landwirt eine Vielzahl von Hinweisen und Empfehlungen zur Umsetzung der GfP an die Hand (aid Nr. 3614, 2015).

Was zur Einschätzung der potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch Wasser oder Wind bereits umgesetzt ist (Gefährdungskarten in Abhängigkeit von Hangcharakteristik oder Windströmungsverhältnissen und Bodeneigenschaften), gestaltet sich bei der Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit ungleich schwieriger. Die Herausforderungen bei der Charakterisierung eines Bodens hinsichtlich seiner Verdichtungsempfindlichkeit und den möglicherweise schädlichen Auswirkungen einer Verdichtung auf Bodenfunktionen (Bodenschadverdichtung) liegen vor allem darin, die aktuelle Bodenfeuchte, die über das Entstehen und das Ausmaß einer Verdichtung wesentlich mitbestimmt und räumlich wie zeitlich hoch variabel ist, entsprechend zu berücksichtigen sowie die physikalischen Eigenschaften des Bodens und deren Änderungen unter der jeweiligen Belastung mit einzubeziehen. Der seit einigen Jahren eingeführte Begriff „potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit“ meint dabei eine langjährige, bewirtschaftungsunabhängige Verdichtungsempfindlichkeit auf Grundlage von statischen Bodeneigenschaften (abgeleitet aus verfügbaren Daten mit entsprechendem Generalisierungsgrad) und klimatischen Einflussgrößen. Damit ist allerdings nur eine grobe Vorabschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit zu erzielen. Finden darüber hinaus der aktuelle Bodenzustand, die

aktuelle Nutzung und die Bewirtschaftung Berücksichtigung, kann aus der „potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit“ die „aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit“ bzw. „aktuelle Verdichtungsgefährdung“ abgeleitet werden.

Darüber hinaus liefern Staturerhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), die den tatsächlichen Bodenstrukturzustand und eine evtl. Gefährdung der Bodenfunktionen beschreiben, Klarheit über das Ausmaß und die Verteilung von Bodenverdichtungen in Deutschland. Leider liegen solche Untersuchungen bislang nur in wenigen Bundesländern bzw. Regionen vor (z. B. Brandhuber, 2005; Brunotte et al., 2008; Cramer et al., 2006; Eckert et al., 2006; Harrach et al., 2003; Isensee und Schwark, 2006). Übersichten finden sich u. a. bei Brunotte et al. (2008) oder Lorenz (2008). Einen Überblick zu Arbeiten und Erhebungen zum Status der Bodenverdichtung in Europa geben Vorderbrügge und Brunotte (2011).

Im Gegensatz zur asphaltierten Straße mit mehr oder weniger konstanten Befahrungsbedingungen, verändert sich die Fahrbahn ‚Boden‘ zeitlich fortwährend. Die Tragfähigkeit und damit Befahrbarkeit des Bodens hängt neben der aufgebrachten mechanischen Belastung durch die Maschine v. a. von der aktuellen Bodenfeuchte, der Bodenart, dem Bodengefüge, dem Anteil an organischer Substanz und dem Wechsel dieser Eigenschaften innerhalb eines Bodenprofils (Horizontabfolge), sowie der angebauten Kultur ab. In Abhängigkeit dieser Parameter ändert sich auch die Fahrsituation von festem, befahrbarem Boden bis hin zu plastisch verformbarem Boden, dessen Befahren zur Schädigung des Bodens und seiner Funktionen bis hin zu Ertragsminderungen führen kann. Generell nimmt die Tragfähigkeit der Böden mit zunehmender Bodenfeuchte ab und die Verdichtungsempfindlichkeit nimmt zu.

Somit müssen, um eine realistische Einschätzung der Verdichtungsgefährdung von landwirtschaftlich genutzten Böden zu erhalten und den tatsächlichen Bodenzustand sowie die relevanten Bodeneigenschaften bestmöglich abzubilden, zum einen die jeweiligen Bodeneigenschaften sowie das standörtliche Klima und damit die mittleren Bodenfeuchteverläufe berücksichtigt werden. In einem weiteren Schritt muss die jeweilige Belastungssituation durch die Maschinen bzw. Verfahrensketten verlässlich abgebildet werden, und schließlich ist die jeweilige Anbaukultur zu berücksichtigen, um Bodenfeuchteänderungen ableiten und Zeitfenster mit ausreichender Bodentragfähigkeit bei den unterschiedlichen Feldarbeiten mit berücksichtigen zu können. Für einige der Bodenparameter existieren nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarten (z. B. BÜK 1000N, BÜK 200, BÜK 50), z. T. auch in digitaler Form. Zur Ableitung der mittleren Bodenfeuchte können Bodenwasserhaushaltsmodelle herangezogen werden, die unter Berücksichtigung von Niederschlag, kapillarem Aufstieg, Versickerung, Verdunstung, Bodenart, Pflanzenbestand und -entwicklung, etc., Aussagen zur täglichen Bodenfeuchte in unterschiedlichen Bodentiefen zulassen. Modelle und Ansätze zur Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden, wie z. B. das Vorbelastungskonzept, müssen die genannten Einflussfaktoren angemessen berücksichtigen.

Für die Beurteilung der mechanischen Belastung von landwirtschaftlichen Maschinen sind die relevanten technischen Daten, wie z. B. Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktfläche, zu messen und mithilfe von Belastungsversuchen und Staturerhebungen in ihren Auswirkungen auf die Bodenstruktur zu quantifizieren (Brunotte et al., 2015). Grundlage der hier dargelegten Untersuchungsergebnisse sind eine Vielzahl von Messungen aus z. T. 20-jährigen Versuchsreihen (Befahrungsversuchen) zum Bodendruck, der Bodensetzung und zur Veränderung bodenphysikalischer Parameter. Diese Daten ermöglichen die Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden und der Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen. Auch die Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen können mithilfe von Modellen (z. B. Terranimo (Stettler et al., 2014), TASC (Diserens und Battiato, 2013), SOILFlex (Keller et al., 2007; 2015), FRIDA (Schjønning et al., 2008; 2015), SOCOMO (Van den Akker, 2004), Compsoil (O’Sullivan et al., 1999) u. a.) berechnet werden. Diese basieren hauptsächlich auf Grundlagen von Bussinesq (1885), Fröhlich (1934) und Söhne (1953). Der Boden wird meist als homogenes, isotropes und damit ungeschichtetes Medium betrachtet. Da der Boden in der Realität in Oberkrume, Unterkrume, Krumenbasis und Unterboden mit jeweils unterschiedlichen bodenphysikalischen Ausprägungen gegliedert ist, liefern solche Druckberechnungen nur idealisierte Annäherungen. Die Übertragung in reale Verhältnisse kann im Einzelfall zu Fehlinterpretationen führen. Sie können daher reale Messungen unter den Maschinen hinsichtlich Bodendruck, Bodendeformation (-setzung) und bodenphysikalischen Parametern nicht ersetzen, sollten jedoch ergänzend eingesetzt werden.

Das **Konzept** zur „Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden“ verfolgt, aufgrund der räumlichen und zeitlichen Komplexität des Systems Boden und der derzeit noch unzureichenden Praxistauglichkeit von Modellen in diesem Bereich, einen von Experten gestützten Ansatz mit praxisnahen Lösungen unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenverhältnisse anstelle der Vorgabe von Grenzwerten, z. B. der Radlast oder des Kontaktflächendrucks.

Das Konzept besteht aus **drei Bausteinen**:

1. **Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden für Deutschland** auf der Basis der Haupteinflussfaktoren Bodenart und Bodenfeuchte, sowie der Unterscheidung in Ober- und Unterboden,
2. **Ableitung der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten** auf der Basis langjähriger Feldmessungen und technischer Maschinenparameter,
3. **Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten** und die Ableitung von mittleren regionalen **Befahrbarkeitstagen** für unterschiedliche Kulturen, Arbeitsgänge und Mechanisierungen anhand von Beispielstandorten.

2 Stand des Wissens zur Interaktion Maschine – Boden

Bodenverdichtung ist sowohl ein Zustand als auch ein Prozess infolge mechanischer Belastung und Umorientierung der Bodenpartikel, der in aller Regel mit einer Zunahme der Bodendichte (Abnahme des Gesamtporenvolumens) verbunden ist (VDI, 2007). Damit gehen eine veränderte Funktionalität des Porensystems und eine Erhöhung der mechanischen Stabilität einher. Im Gegensatz zu Verdichtungen im regelmäßig bearbeiteten Oberboden sind Unterbodenverdichtungen als kaum reparabel einzustufen, weil die Intensität von Regenerationsprozessen mit zunehmender Tiefe in Abhängigkeit von Boden- und Klimaverhältnissen abnimmt (Håkansson, 2005; Horn et al., 2009; Garrigues et al., 2013).

Unter **Bodenschadverdichtung** wird eine Bodenverdichtung verstanden, die sich auf physikalische, chemische und biologische Vorgänge im Boden auswirkt, sodass Bodenfunktionen nachhaltig negativ beeinträchtigt werden (Sommer, 1998; Sommer et al., 2001; BMVEL, 2001; Brunotte et al., 2008). Im BBodSchG wird nicht von Schadverdichtung gesprochen, sondern stattdessen der Rechtsbegriff „schädliche Bodenveränderung“ verwendet, definiert als „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Beeinträchtigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen“. „Bodenschadverdichtung“ und „schädliche Bodenveränderung durch Bodenverdichtung“ sind jedoch keine identischen Begriffe.

Die Literatur zum Problembereich Bodenverdichtung in der pflanzlichen Produktion ist umfangreich und widmet sich dabei vielen Themen (Ursachen, Folgen, Verbreitung, Schutzmaßnahmen, Theorien, Modellierung, Prüfkonzepte mit Schlüsselindikatoren, Messmethoden). An dieser Stelle sollen jedoch nur die für das Konzept relevanten Themenfelder näher beleuchtet werden.

Tabelle 1

Kriterien, Parameter und Schadensschwelle für Unterböden sowie verwendete Quellen nach Lebert et al. (2004)

Kriterien	Parameter	Schadensschwelle	Quellen
Durchlüftung	Luftkapazität	Krume: 8 Vol% Unterboden: 5 Vol%	Flühler (1973), Blume (1968), Dumbeck (1986), Werner und Paul (1999)
Leitfähigkeit	gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm/d	DVWK (1999), Blume (1968), Zakosek (1960), Werner und Paul (1999)
morphologische Beschaffenheit	effektive Lagerungsdichte	Stufen 4 und 5	AG-Boden (1994)
	Packungsdichte	Stufen 4 und 5	DIN 19682-10 (1998)
	Spatendiagnose	Stufen 4 und 5	Diez und Weigelt (1997)

Lebert et al. (2004) beschreiben und vergleichen vier „Prüfkonzepte“ zur Gefahrenerkennung hinsichtlich zu erwartender Gefügeänderungen im Unterboden und kommen zu dem Schluss, dass diese zur Bewertung von Bodenschadverdichtungen noch nicht vollständig ausreichen. Daher entwickelten sie ein **Indikatorsystem** zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung. Dabei beziehen sie drei Kriterien und fünf Parameter in die Betrachtungen ein (Tabelle 1). Erst die Einbeziehung aller drei Kriterien bringt Klarheit über das Auftreten einer Bodenschadverdichtung.

Für Oberböden wird ein Messwert für die Luftkapazität von 8 Vol% als prinzipielle Schadensschwelle angegeben. Alle anderen Parameter werden analog zum Unterboden auch für den Oberboden verwendet. Cramer et al. (2006) halten die Identifikation einer Schadverdichtung nach Lebert et al. (2004) grundsätzlich für möglich, sehen jedoch Überarbeitungsbedarf insbesondere hinsichtlich der Schadensschwelle für Sandböden. Horn et al. (2009) stellen am Beispiel der Bodenverdichtung ein Belastbarkeitskonzept vor und schlagen ebenfalls „(...) die vorrangige Berücksichtigung der die Bodenfunktionen berücksichtigenden Kenngrößen (z. B. Luftkapazität, Luft- und Wasserleitfähigkeit) vor.“ Horn et al. (2009) und Horn und Fleige (2009) definieren darüber hinaus auf Grundlage zahlreicher Untersuchungen für Nordwest-Deutschland Vorsorge- und Maßnahmenwerte zur Bewertung von Bodenschadverdichtungen für eine Reihe von weiteren Bodenparametern, wie z. B. die Sauerstoffdiffusionsrate, der Redoxwiderstand oder das Verhältnis von Kationenaustauschkapazität zu -intensität. Einen Überblick, u. a. auch zu existierenden Prüfkonzepten und der Verbreitung von Bodenverdichtungen in Deutschland, geben Lebert et al. (2004); Brunotte et al. (2008); Lorenz (2008); Horn et al. (2009) und UBA (2015). Ein Überblick zum Status der Bodenverdichtung in Europa ist u. a. bei Vorderbrügge und Brunotte (2011); Houskova und Montanarella (2008 a; b) und Le Bas et al. (2006) zu finden.

Nach Vorderbrügge und Brunotte (2011) kommt es „(...) Mangels einer ausreichend validen und plausiblen Datengrundlage zum Status der Bodenverdichtung bzw. zur Verdichtungsanfälligkeit der Böden in Deutschland, insbesondere der Unterböden, (...) zu einer vermehrten Anwendung von Regressionsmodellen (Pedotransferfunktionen) zur Berechnung der Gefährdung durch Verdichtung.“ So veröffentlichte z. B. die Bundesregierung in ihrem ‚Zweiten Bodenschutzbericht‘ eine Karte der ‚Potenziellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete‘ (Deutscher Bundestag, 2009). Diese Karte resultierte aus der Studie ‚Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden‘, die im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde (Lebert, 2010; Glante et al., 2009; Lebert und Marahrens, 2009; 2010 Marahrens und Lebert, 2009) und basiert auf dem Vorbelastungskonzept. In dieser Studie werden Pedotransferfunktionen zur Bestimmung der Vorbelastung aus unterschiedlichen Bodenparametern verifiziert und modifiziert, um die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit nach DVWK (1995, 1997); DIN-V-19688 (2001) und ATV-

DVWK (2002) abzuleiten. In einem weiteren Schritt werden auf Grundlage der verfügbaren Datenbasis die Gleichungen der drei Verfahren nach einem visuellen ‚best-fit‘ Verfahren den Bodenartenhauptgruppen der ‚Bodenkundlichen Kartieranleitung‘ (KA5, AG Boden, 2005) zugewiesen. Auf Grundlage der ‚Nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1 000 000‘ (BÜK 1000N) werden die ermittelten Vorbelastungswerte der Unterböden für die landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands regionalisiert. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass 68 % der ackerbaulich genutzten Flächen im Unterboden bei einer der Feldkapazität ($pF_{1,8}$) entsprechenden Bodenfeuchte eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen. Bei einem Bodenwassergehalt von 80 % Feldkapazität sind es noch 32 % (Lebert, 2010). Besonders betroffen sind demnach die Böden der Jungmoränenlandschaften, des Lössgürtels, des Tertiärhügellandes und der Marschen im Küstenbereich (Deutscher Bundestag, 2009; Vorderbrügge und Brunotte, 2011). So werden z. B. für Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Bayern großflächig Böden mit hoher bis sehr hoher Verdichtungsempfindlichkeit ausgewiesen.

Überprüfungen anhand von Ergebnissen aus Staturerhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) aus Sachsen (Harrach et al., 2003) und Bayern (Brandhuber, 2005) zeigen jedoch keine flächenhaften Schadverdichtungen in diesen Regionen. Nach Harrach et al. (2003) wurden Schadverdichtungen im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelsächsischen Lösshügelland „... nur in Sonderfällen, nämlich auf vernässten Stellen und gehäuft auch im Vorgehende festgestellt. (...) Auch die systematische Bonitur der Kulturpflanzenbestände im Zusammenhang mit Bodengefügeuntersuchungen (Spatendiagnose und Porengrößenanalyse) hat weder bei pflugloser noch bei konventioneller Bewirtschaftungsweise auf durchschnittlichen Ackerflächen Anhaltspunkte für das Vorliegen von Schadverdichtungen, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen, erbracht.“ Auch Brandhuber (2005) stellte anhand von 29 Dauerbeobachtungsflächen unter Ackernutzung in Bayern fest, dass alle untersuchten Flächen eine Krumbasisverdichtung aufwiesen, bei der „... in etwa der Hälfte der Fälle (...) die Ausprägungen der Luftkapazität nahe am kritischen Wert von 5 Vol%, in wenigen Fällen auch darunter“ lagen. Unterhalb der Pflugsohle lagen die Gefügewerte mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich, der auf ausreichende Funktionsfähigkeit schließen lässt. Bei der bodenkundlichen Aufnahme der Vergleichsstücke (VSt.) und der Musterstücke (MSt.) der Bodenschätzung in Hessen durch das HLUNG (Zeitraum 2000 bis 2015, ca. 1.500 Profile) wurden keine Anhaltspunkte für flächendeckende „Schad“-Verdichtungen gefunden. Ausnahmen finden sich auch hier vereinzelt in Vorgewenden, Fahrgassen und z. T. in der Krumbasis (Vorderbrügge, 2016, mündl. Mitteilung)

Zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung wird von einigen Autoren auch die **Bodendichte** bzw. das **Porenvolumen** herangezogen (Gieska et al., 2003; Ehlers et al., 2003), z. B. nach dem Konzept des optimalen Porenvolumens (Czeratzki, 1972) oder mit oberen Grenzwerten des

optimalen Trockenrohrichtebereiches (Petelkau et al., 1998). Für die Beurteilung des Bodenverdichtungsgrades reicht die Trockenrohrichte alleine jedoch nicht aus (Renger et al., 2014), es ist zusätzlich zumindest die Textur zu berücksichtigen (Petelkau et al., 1998). Die **effektive Lagerungsdichte** (LD_{eff}) ist nach Renger et al. (2014) ein Kennwert, der den kombinierten Einfluss der Textur und der Trockenrohrichte auf den Grad der Bodenverdichtung bzw. der Verfestigung des Bodens beschreibt. Für die quantitative und qualitative Beschreibung von Verdichtungsprozessen durch Laboruntersuchungen ist jedoch auch der Parameter LD_{eff} nach Lebert et al. (2004) nicht geeignet. Renger et al. (2014) kommen zu dem gleichen Schluss. Sie stellen beim Vergleich mit Felderhebungen fest, dass die nach der aktuellen bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) aus Trockenrohrichte und Tongehalt berechneten LD_{eff} nicht unabhängig von der Textur sind und leiten auf Grundlage einer Vielzahl von Feld- und Labormessungen eine neue Gleichung zur Bestimmung der LD_{eff} ab, bei der neben der Trockenrohrichte und dem Tongehalt auch der Schluffgehalt mit einbezogen wird. Durch Einbeziehung der Arbeiten von Petelkau (1984), Petelkau und Seidel (1986) und Petelkau et al. (1998) zu oberen Grenzwerten der optimalen Trockenrohrichte kommen Renger et al. (2014) zu dem Schluss, dass der obere Grenzwert der optimalen LD_{eff} im Unterboden, bei dem noch keine Ertragsminderungen auftreten, bei $1,71 \text{ g/cm}^3$ liegt, berechnet nach der neu entwickelten Gleichung. Dieser Grenzwert gilt „für sämtliche Bodenarten und weist nur minimale Abweichungen von $0,01 \text{ g/cm}^3$ auf. Nur bei den reinen Sanden treten Abweichungen von $0,03$ bis $0,04 \text{ g/cm}^3$ auf. (...) Die erste Stufe der Bodenschadverdichtungen im Krumbasisbereich, bei der gesicherte Mindererträge nach Petelkau (1984) zu erwarten sind, tritt bei LD_{eff} -Werten von $1,76 \text{ g/cm}^3$ auf und liegt damit bereits im Bereich der LD-Klasse 4 (hoch).“ Weiterhin geben sie mit Bezug auf Petelkau et al. (1998) relative Ertragsabnahmen für Winterroggen bei ansteigender Lagerungsdichte an (vgl. Abbildung 1). Petelkau und Seidel (1986) geben darüber hinaus Ertragskurven bei steigender Lagerungsdichte und LD-Grenzwerte für Winterweizen und Sommergerste an.

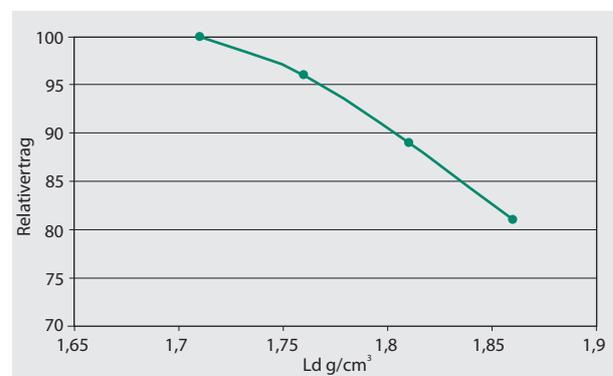


Abbildung 1

Einfluss der effektiven Lagerungsdichte LD_{eff} des Unterbodens auf den Kornertrag von Winterroggen (Renger et al., 2014, Ertragssergebnisse von Petelkau et al., 1998)

Auch wenn die Überschreitung dieses Grenzwertes einen Hinweis auf eine mögliche Bodenschadverdichtung geben kann, sollte dennoch zur Identifikation einer Schadverdichtung das Indikatorsystem von Lebert et al. (2004) herangezogen werden, bei dem zusätzlich die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit einbezogen werden. Letztendlich Sicherheit geben aber weiterhin nur eine Profilsprache des Bodens (z. B. nach der Packungsdichte), eine Spaten-diagnose und das Wurzelbild in Kombination mit den laborativ bestimmten Bodenparametern, um das Vorliegen einer Bodenschadverdichtung zu verifizieren.

Um die tatsächliche **Belastung des Bodens durch landwirtschaftliche Maschinen** zu beurteilen und daraus praxisrelevante Schlussfolgerungen zu ziehen, sind sowohl die Radlast und der Kontaktflächendruck als auch die Überrollhäufigkeit von Bedeutung. Eine Reihe von Studien haben gezeigt, dass die **Radlast** direkten Einfluss auf Verdichtungsprozesse im Unterboden hat. Diserens (2009) gibt an, dass Achslasten über 10 Mg/Achse zu Bodenverdichtungen auf Ackerflächen und im Grünland führen. Weiterhin können mehrfache Überrollungen auch bei geringeren Reifen- bzw. Achslasten schon zu Verdichtungen auch im Unterboden führen (Botta et al., 1999; 2009; Hamza und Anderson, 2005; Koch et al., 2008; Schjøning et al., 2016). Der mittlere **Kontaktflächendruck** beschreibt die Wirkung der Radlast auf die Radaufstandsfläche in der Berührungsfläche Reifen-Boden und somit die Wirkung der Befahrung auf die Bodenoberfläche. Die Kontaktfläche und damit auch der Kontaktflächendruck werden maßgeblich vom **Reifeninnendruck** mitbestimmt (Bolling und Söhne, 1982). Um den Boden zu schonen, muss daher der Reifeninnendruck auf ein Radlastabhängiges Minimum nach Herstellerangaben gesenkt werden, um zum einen eine möglichst große Kontaktfläche zu erzeugen, zum anderen aber den Reifen nicht zu überlasten (Brunotte et al., 2015). Reifeninnendruckregelanlagen können hier helfen, den Reifeninnendruck lastabhängig anzupassen.

Radlasten nehmen bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit der Maschinen und der Fahrzeuge zu, allerdings führen die damit häufig einhergehenden größeren Arbeitsbreiten zu einer Abnahme der zurückgelegten Fahrtstrecke je Hektar. Es ist also nötig, die Kenngrößen **Überrollhäufigkeit** und **Spurflächenanteil** ebenfalls mit einzubeziehen, um Produktionsverfahren im Hinblick auf Bodenbelastung differenziert betrachten zu können (Brunotte und Fröba, 2007; Brunotte et al., 2015).

Neben der Radlast, Überrollhäufigkeit und dem Kontaktflächendruck sind auch die **Bodenart**, die **Bodenfeuchte** und die **Bodenstruktur** maßgebend für Bodenverdichtungsprozesse, letztere auch für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens (Bakker und Davis, 1995; Garrigues et al., 2013; Seehusen et al., 2014; Schjøning et al., 2016; Destain et al., 2016). Auch Keller et al. (2015) weisen auf die Abhängigkeit von Verdichtungsprozessen von der Bodenfeuchte und der Bodenart hin und beziehen in ihre Untersuchungen zur Bodenverdichtung mit Hilfe des SOILFlex Modells die Least Limiting Water Range (LLWR) mit ein. Sie kommen zu dem Schluss, dass Verdichtungsprozesse über die Veränderung der Trockenrohdichte auch das Porensystem im Boden

beeinflussen und so wiederum auf Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts wirken. Sie verknüpfen das SOILFlex_Modell mit dem Least Limiting Water Range-Konzept und schätzen so die Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser ab.

Es existiert eine Reihe von **Modellen** zur Berechnung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodenverdichtungsprozesse (z. B. Terranimo (Stettler et al., 2014), TASC (Diserens und Battiato, 2013), SOILFlex (Keller et al., 2007; 2015), FRIDA (Schjøning et al., 2008; 2015), SOCOMO (Van den Akker, 2004), Compoil (O'Sullivan et al., 1999) u. a.). Diese betrachten in der Mehrzahl nur den Bodendruck in unterschiedlichen Tiefen als Haupteinflussgröße und basieren überwiegend auf Grundlagen von Bussinesq (1885), Fröhlich (1934) und Söhne (1953). Hierfür werden z. T. vereinfachte Berechnungsformeln für die Kontaktfläche und die Druckausbreitung im Boden herangezogen. Keller et al. (2007) berechnen neben dem Bodendruck und dessen Ausbreitung in die Tiefe auch die Änderung der Trockenrohdichte und die Bodenverformung (-deformation) und beziehen in ihre Berechnungen eine elliptische Kontaktfläche ein. Schjøning et al. (2015) leiten aus Belastungsversuchen und deren Charakteristik Schätzformeln für die Kontaktfläche und die Druckausbreitung im Boden ab. Die Kontaktfläche wird dabei als Superellipse betrachtet.

Einige dieser Modelle (z. B. Terranimo, Stettler et al., 2014) beziehen bei Ihren Betrachtungen das Vorbelastungskonzept (z. B. Horn et al., 1989) mit ein und vergleichen den modellierten bzw. sensorisch gemessenen Bodendruck mit dem im Labor bzw. über Pedotransferfunktionen ermittelten Vorbelastungswert zur Identifikation einer Verdichtung. Nach Keller und Lamandé (2010) können diese Werte jedoch nicht die Bedingungen einer realen dynamischen Überrollung von landwirtschaftlichen Maschinen von wenigen Sekunden abbilden und liefern daher nur Vorabschätzungen der Auswirkungen von Befahrungen auf die Bodenverdichtung.

Im Gegensatz zum aktuellen Wissen zu den vielfältigen Effekten von landwirtschaftlichen Maschinen und Befahrungen auf den Boden und dessen Funktionen gibt es nur wenige Studien zur **räumlichen Verteilung der Belastungen** (z. B. Radlast, Kontaktflächendruck) auf einem Feld während unterschiedlicher Feldarbeiten. Kroulík et al. (2009) verwendeten Daten eines DGPS zur Bestimmung der Befahrungintensität bei wendender (Pflug) und minimaler, nicht wendender Bodenbearbeitung sowie Direktsaat (no-till) während einer Vegetationsperiode. Bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug wurden danach bei Verwendung von Zwillingsbereifung bis zu 95 % der Ackerfläche mindestens einmal im Jahr überrollt. Die gesamte überrollte Fläche kann dabei unter Einbeziehung der Mehrfachüberrollungen bis zu 145 % betragen. Duttmann et al. (2013; 2014) zeigten für eine Silomaisernte, dass mehr als 62 % der Ackerfläche während einer einzigen Silomaisernte überfahren werden. Hierbei wurden 44 % mindestens einmal mit einer Radlast von > 50kN überrollt. Nach Gasso et al. (2013) und Tullberg (2010) kann die überrollte Fläche innerhalb eines Feldes drastisch reduziert werden, in dem Maßnahmen des Controlled Traffic Farming (CTF) angewendet werden.

Ausführliche Beschreibungen der vielfältigen Effekte von landwirtschaftlicher Befahrung auf Bodenverdichtungsprozesse finden sich z. B. bei Van den Akker et al. (2003); Nevens und Reheul (2003); Håkansson (2005); Horn et al. (2005; 2008); Horn (2011); NJF (2012); Brunotte et al. (2015).

3 Konzept zur Anpassung von Lasteinträgen landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden

Das hier vorgestellte Konzept zur Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden stützt sich auf drei Bausteine:

1. Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden für Deutschland auf der Basis der Haupteinflussfaktoren Bodenart und Bodenfeuchte für Ober- und Unterboden (Kap. 4.1)
2. Ableitung der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten auf der Basis langjähriger Feldmessungen und technischer Maschinenparameter (Kap. 4.2)
3. Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten und die Ableitung von mittleren regionalen Befahrbarkeitstagen für unterschiedliche Kulturen, Arbeitsgänge und Mechanisierungen (Kap. 4.3)

Der **1. Baustein** befasst sich mit der Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden in Deutschland. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind Bodenart und Bodenfeuchte. Dabei wird nicht nur der Unterboden, sondern auch der Oberboden berücksichtigt, da die Druckausbreitung bis in den Unterboden und damit einhergehende Verdichtungsprozesse vom gesamten Bodenprofil beeinflusst werden. Um sowohl Schichtungen als auch Unterschiede im Bodenprofil z. B. hinsichtlich Bodenfeuchte berücksichtigen zu können, wurde zwischen Ober- (0 bis 30 cm) und Unterboden (30 bis 60 cm) unterschieden. Hierbei wurde aus der Horizontbeschreibung der BÜK 1000N (BGR, 2013a) die Hauptbodenart des jeweiligen Tiefenbereiches abgeleitet (siehe auch Tabelle 4, Kap. 4.3). Die Verdichtungsempfindlichkeit wurde in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte von den Autoren und einer erweiterten Expertengruppe in einem mehrstufigen Verfahren eingeschätzt, bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft.

Im **2. Baustein** erfolgt die Einbeziehung der regionalen Flächenbewirtschaftung hinsichtlich unterschiedlicher Anbaukulturen und verschiedener Mechanisierungsketten. Dabei soll die Belastung des Bodens durch landwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung regional möglichst präzise, gleichzeitig jedoch mit einem hinreichenden Generalisierungsgrad, abgebildet werden. Die in Modellen hauptsächlich angestellte Betrachtung eines einzelnen Rades (bzw. einer einzelnen Maschine), welches sich auf dem homogenen Medium Boden abstützt, wird durch die Betrachtung der Belastungen durch ganze Arbeitskettens ersetzt.

Datengrundlagen sind umfangreiche mehrjährige Feldmessungen sowie Technikdatenbanken z. B. des KTBL (2014).

Im **3. Baustein** wird die Belastbarkeit des Bodens mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen verknüpft. Für die wichtigsten Arbeitskettens (z. B. Gülleausbringung, Mähdrusch-, Silomais-, Zuckerrübenerte) können so mittlere regionale Befahrbarkeitstage für die gängigen Zeitfenster der jeweiligen Feldarbeiten abgeleitet und Anpassungsstrategien für unterschiedliche Regionen und Einsatzsituationen erarbeitet werden.

Bei der Betrachtung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden, unter Nutzung verschiedener Datenquellen und Kartenwerke sind unterschiedliche Skalenebenen zu beachten. So erfolgt die Ermittlung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden, u. a. auch aufgrund der Zielstellungen und der zur Verfügung stehenden Daten, flächendeckend für ganz Deutschland (Deutschlandebene). Die Betrachtung der jeweiligen Bewirtschaftung und die Ableitung sinnvoller Handlungsempfehlungen für den Praktiker müssen dagegen auf regionaler und lokaler Ebene, z. T. auch auf Schlagebene, erfolgen. Ein Herunterbrechen der Ergebnisse der deutschlandweiten Betrachtung auf einzelne Flächen oder Schläge ist, aufgrund des Generalisierungsgrades sowohl der Boden- als auch der Klimadaten, nicht zulässig. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig.

Abbildung 2 zeigt ein vereinfachtes Schema des Vorgehens, der einbezogenen Daten und deren Quellen sowie der geplanten Ergebnisse. Grundlage der Betrachtungen ist der einzelne Gitterrasterpunkt eines 1 x 1 km Rasters. Aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell AMBAV werden die Zeitreihen der Wetterstationen des DWD in Deutschland für die Modellberechnungen verwendet und die Ergebnisse für den jeweiligen Gitterrasterpunkt im Abstand von 1 km für Deutschland generiert. Für jeden dieser Gitterrasterpunkte werden aus der BÜK 1000N (BGR, 2013a) das Ausgangssubstrat, die Bodenart und Horizontierung abgefragt. Da in diesen Untersuchungen zwei Tiefenbereiche einbezogen werden (Oberboden 0 bis 30 cm, Unterboden 30 bis 60 cm), die Horizontierungen der einzelnen Bodenprofile jedoch sehr unterschiedlich sein können, wurden in einem ersten Schritt die Bodenarten des jeweiligen Tiefenbereiches extrahiert. Hierbei wurden in Abhängigkeit der Horizontmächtigkeiten die Bodenarten extrahiert, die für den jeweiligen Tiefenbereich (Ober-/Unterboden) die größte Relevanz aufweisen. Nur diese werden für die weiteren Betrachtungen und Berechnungen verwendet. Dieses Vorgehen ist notwendig, um die Bandbreite der unterschiedlichen Böden in Deutschland für die Untersuchungen handhabbar zu machen. Für diese Bodenarten werden aus den Daten des Bodenwasserhaushaltsmodells des DWD die entsprechenden Werte der Feldkapazität abgeleitet. Dadurch können neben unterschiedlichen Tiefenbereichen auch Substratwechsel im Profil mit berücksichtigt werden.

Auf der Grundlage der ermittelten Bodenarten für die unterschiedlichen Tiefenstufen erfolgt dann eine datenbankgestützte Analyse, Auswertung und Verknüpfung mit den Klimadaten des DWD (Model AMBAV), um den Jahresverlauf der täglichen Bodenfeuchte in %FK ableiten zu können. Auf

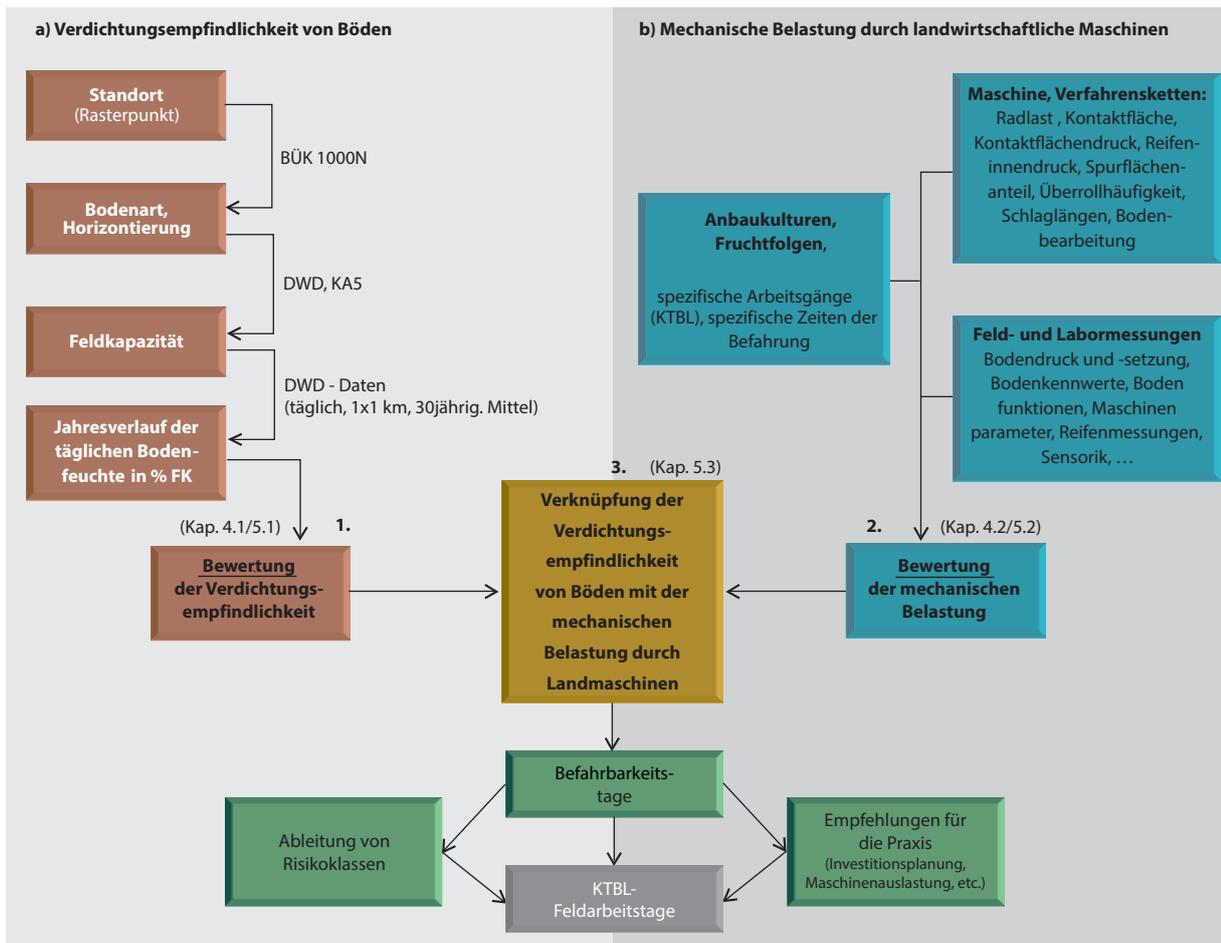


Abbildung 2

Vereinfachtes Schema des Vorgehens

diese Weise lassen sich Zeiten hoher bzw. niedriger Bodenfeuchten auf Tagesbasis ableiten. Um darauf aufbauend Aussagen zu Zeiten hoher bzw. niedriger Verdichtungsempfindlichkeit oder zu Befahrbarkeitstagen treffen zu können, bedarf es einer Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenfeuchte und der Bodenart. Die diesbezüglichen Bewertungsansätze sind im Kapitel 4.1 (Verdichtungsempfindlichkeit) dargestellt.

Für die Einschätzung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen wurde auf umfangreiche langjährige Feldmessungen des Thünen-Instituts (TI), des Instituts für Zeitgeschichte (IFZ) und der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Bayern zurückgegriffen (z. B. Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischer, 2011). Hieraus wurden für unterschiedliche kulturartspezifische Arbeitsverfahren und Variationen unter Einbeziehung der Technikdatenbanken des KTBL typische Werte für Radlasten, Reifendrucke, Kontaktflächendrucke, Spurflächenanteile, Überrollhäufigkeiten etc. abgeleitet. Diese wurden dann mit den Feldmessungen von Bodendruck, -setzung und den Änderungen bodenfunktionaler Größen und Parameter, wie z. B. der gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Luftkapazität, verknüpft. Durch Wichtung der unterschiedlichen Parameter

einer Technikvariante hinsichtlich ihrer Wirkung auf Bodenverdichtungsprozesse konnten die landwirtschaftlichen Verfahren bezüglich ihrer Bodenbelastung bewertet werden. Weiterhin können typische Zeiten unterschiedlicher Arbeitsgänge abgeleitet und in die Untersuchungen einbezogen werden. Das Vorgehen ist detailliert in Kap. 4.2 beschrieben.

Um Zeiten hoher Verdichtungsgefährdung und die Anzahl der Befahrbarkeitstage zu bestimmen, werden die Daten (Kap. 4.3) in einem GIS zusammengeführt und mit den Anbaukulturen, Mechanisierungen und Verfahrensketten verknüpft. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden am Beispiel von neun über Deutschland verteilten Standorten dargestellt. Weiterhin erfolgt am Ende eine Plausibilitätsprüfung durch den Vergleich der real festgestellten Befahrbarkeitstage und der mit dem Konzept ermittelten Befahrbarkeitstage für das Jahr 2014 und den Beispielstandort Adenstedt.

4 Grundlagen und Methodik

4.1 Expertengestützter Bewertungsansatz zur Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden in

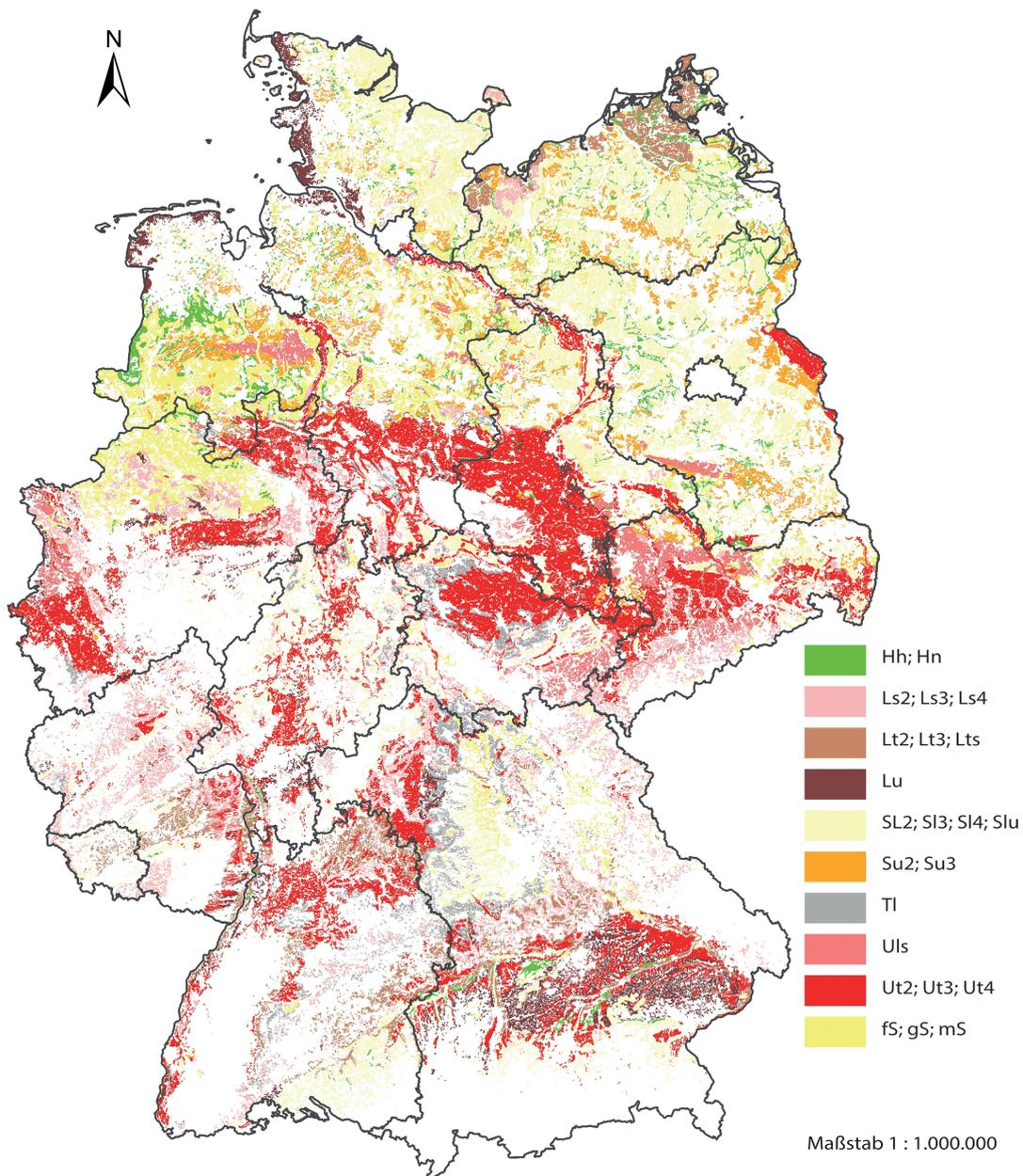


Abbildung 3
Bodenarten des Oberbodens, BÜK 1000N Ackernutzung (verändert nach BGR, 2013a)

Deutschland in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte dargestellt. Im ersten Schritt (Kap. 4.1.1) werden die verfügbaren Bodendaten und die Herleitung der verwendeten Bodenarten aus der Horizontbeschreibung der BÜK gezeigt. Im zweiten Schritt (Kap. 4.1.2) wird das Modell AMBAV des DWD und die Herleitung der mittleren Tageswerte der Bodenfeuchte erläutert. Zusammenführend wird daraus im 3. Schritt die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von ackerbaulich genutzten Böden in Deutschland in Abhängigkeit der Bodenart und Bodenfeuchte dargestellt. Hierbei wird ein expertengestützter Ansatz verfolgt, bei dem die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte von den Autoren und einer

erweiterten Expertengruppe in einem mehrstufigen Verfahren eingeschätzt, bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft wurde.

4.1.1 Bodenkennwerte

Um Bodendaten flächendeckend für ganz Deutschland in die Betrachtungen einbeziehen zu können, muss auf verfügbare digitale Bodenkarten zurückgegriffen werden. Derzeit stellt die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000N) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2013a) die einzige einheitliche, flächendeckende, digital verfügbare Bodenkarte dar.

1. Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000N) – Auszug Ackerböden (Version 2.31, Stand: 22.02.2013).

Die BÜK 1000N – Auszug Ackerböden (Abbildung 3 (BGR, 2013a)) stellt bundesweit die Verbreitung der Böden und deren Vergesellschaftung in einheitlicher Form auf dem Aggregierungsniveau der Leitbodenassoziationen dar. Diese umfasst 14 Landnutzungsklassen bei einer Mindestflächengröße der Einzelpolygone von ca. 4 km².

Die flächenbezogenen Inhaltsdaten des Teilauszugs Ackerböden setzen sich aus 78 Acker-Referenzprofilen mit je 3 auf Bodenformen und 16 auf Horizonte bezogenen Parametern zusammen (BGR, 2013a). Abbildung 3 zeigt die Bodenarten des Oberbodens, abgeleitet aus der BÜK 1000N, wie sie für diese Untersuchungen verwendet werden.

2. Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200)

Die Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) wird von der BGR in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder (SGD) erstellt und herausgegeben (BGR, 2013b). Die BÜK 200 ist ein blattschnittfreies Kartenwerk, das für länderübergreifende Aussagen zu Bodennutzung und -schutz eine detaillierte, bundesweit einheitliche und flächendeckende Informationsgrundlage liefert. Sie stellt die Verbreitung und Vergesellschaftung der Böden und ihrer Eigenschaften in Deutschland dar. Weiterhin lassen sich Flächeninhalte (Leit- und Begleitböden mit Informationen zu Bodentyp, Bodenart, Bodenausgangsgestein, Humus- und Carbonatgehalt, Schicht- u. Horizonttiefe, Grundwasserstand usw.) sowie Grafikdaten (Grenzen der Kartiereinheiten) der Bodenkarte abrufen (BGR, 2013b).

Die Kartenserie umfasst derzeit 50 von insgesamt 55 Karten (Stand Juli 2015). Die noch ausstehenden fünf Kartenblätter werden ab 2016 bearbeitet (Bodenschutz 02/2015, S. 64).

3. Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK 50)

Bodeninformation in höherer räumlicher Auflösung für regionale Darstellungen und Auswertungen bieten die Kartenwerke und Informationssysteme der SGD in Maßstäben von z. B. 1:50.000 oder 1:25.000.

4. Bodenschätzungsdaten

In der Maßstabsebene bis 1:10.000 dominieren Bodenkarten, die auf Basis der Bodenschätzungsdaten oder darauf aufbauender Datensätze erarbeitet wurden. Diese Daten sind bundesweit flächendeckend für alle Acker- und Grünlandflächen erhoben worden. Sie liegen aber meist in einer Nomenklatur vor, die keine weitere direkte Auswertung in Methoden Anwendungen ermöglicht. Die konkrete Verfügbarkeit der Daten wird durch die unterschiedliche Art der Datenbereitstellung erschwert. Während z. B. in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg große Teile der Landesfläche digital und in moderne Nomenklatur übersetzt vorliegen und damit direkt auswertbar sind, können andere Bundesländer nur analoge Originaldaten zur Verfügung stellen.

Aufgrund der noch fehlenden Kartenausschnitte in der BÜK 200 stellt die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte BÜK 1000N derzeit die einzige einheitliche, flächendeckende, digital verfügbare Bodenkarte dar und wird daher im Folgenden verwendet.

Zukünftig ist geplant, die entwickelte Methodik auf einzelne Kartenblätter der BÜK 200 und für einzelne Regionen in Niedersachsen auf die BÜK 50 und die Bodenschätzungsdaten anzuwenden, um die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu überprüfen und skalenbedingte Unterschiede und Verallgemeinerungen aufzudecken und bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

4.1.2 Klimadaten

Der Bodenwasserhaushalt hat sowohl für die pflanzlichen Wachstumsprozesse und die Ertragsbildung als auch für die Durchführung landwirtschaftlicher Arbeiten eine zentrale Bedeutung. Insbesondere auf leichten (sandigen, humusarmen) Standorten ist das Wasserspeichervermögen des Bodens häufig der maßgebliche ertragsbegrenzende Faktor, wenn nicht bewässert werden kann. Die Bodenfeuchte ist der entscheidende Faktor für die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und der Verdichtungsgefährdung durch landwirtschaftliche Maschinen.

Um regionale und kleinräumige klimatische Unterschiede des Verlaufs der Bodenfeuchte, in Abhängigkeit der jeweiligen Bodeneigenschaften und Anbaukultur, darstellen zu können, wurden räumlich und zeitlich hoch auflösende Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewertet. Mit Hilfe des Modells AMBAV (Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung, Löpmeier, 2013) wurden auf Grundlage von Daten aus ca. 500 Wetterstationen Bodenfeuchtedaten auf Tagesbasis als 30-jähriges Mittel (1971 bis 2000) für die Bodentiefen 0 bis 30 cm (Oberboden) und 30 bis 60 cm (Unterboden) berechnet. Das Modell AMBAV basiert auf der klassischen Penman-Monteith-Beziehung. Wesentliche Merkmale sind (Löpmeier, 2013):

- Koppelung mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell, das u. a. in AMBETI / BEKLIMA (weitere Modelle des DWD; Löpmeier (1994); Braden (1995)) Anwendung findet. AMBAV ist ein physikalisch begründetes Standortmodell, das in umfangreicher Weise für Standorte in Deutschland validiert wurde und u. a. in der Bewässerungsberatung des DWD eingesetzt wird.
- Bestimmung des kulturspezifischen Stomata-/Bestandswiderstandes über Lysimetermessungen und umfangreiche Bodenfeuchtemessungen,
- Beschreibung der Pflanzenparameter wie Blattflächenindex, Pflanzenbedeckungsgrad, Durchwurzelungstiefe über charakteristische phänologische Phasen,
- deterministische Behandlung der Interzeption des Niederschlags im Pflanzenbestand,
- Nutzung von Daten meteorologischer Routinemessungen und Wetterstationsdaten.

Das Modell AMBAV ist ein Wasserbilanzmodell, in dem der Niederschlag und der kapillare Aufstieg als Quellen und die Versickerung sowie die Verdunstung als Senken behandelt werden (Löpmeier, 2013). Um exakt bilanzieren zu können, muss die Wechselwirkung Boden – Pflanze und Pflanze – Atmosphäre möglichst genau beschrieben werden. Der jeweilige Boden mit seinen charakterisierenden Boden-

kenngößen wie Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt, Trockenrohdichte (z. B. AG Boden, 2005; Wessolek et al., 2009) sowie die Pflanzenart sind fest vorgegebene Randbedingungen. Zum Startzeitpunkt des Modells muss die momentane Pflanzenentwicklung in Form von Höhe, Blattflächenindex, Durchwurzelungstiefe und -dichte sowie die Wasserverteilung im Boden angegeben werden.

Das Wachstum der Pflanzen wird mit Hilfe von phänologischen Phasen simuliert, die von ca. 500 Beobachtungsstationen zur Verfügung stehen. Mit fünf über den Pflanzenzyklus verteilten Pflanzenphasen wird eine genormte Pflanzenentwicklung abgeleitet. Weitere variable Einflussgrößen für das Modell sind Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur. Besonders schwierig sind die Wasserbewegungen im Boden zu simulieren, denn zum einen wird je nach Wurzeldichteverteilung und Bodenwassergehalt den 10 cm mächtigen Bodenschichten Wasser durch die Pflanzen entzogen, zum anderen wird das Bodenwasser je nach Bodenart und Wassergehalt vertikal zwischen den Bodenschichten verlagert. Neben den äußeren meteorologischen Rahmenbedingungen ist auch das momentane Bodenwasser bzw. pflanzenverfügbares Wasser für die Höhe der tatsächlichen Verdunstung verantwortlich. Bei nahezu ausgetrockneten Böden geht daher die tatsächliche Verdunstung gegen Null (Löpmeier, 2013).

Aus den Angaben aus der Bodenfeuchteberechnung zur nutzbaren Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und permanentem Welkepunkt (PWP) wurden standortspezifische Tageswerte in %FK oder %nFK abgeleitet. Die räumliche Auflösung liegt dabei bei 1 x 1 km.

Die Berechnungen erfolgten für **sechs Bodenarten**:

1. schwach lehmiger Sand (S12)
2. stark lehmiger Sand (S14)
3. toniger Schluff (Ut3)
4. schluffiger Lehm (Lu)
5. toniger Lehm (Lt3)
6. lehmiger Ton (Tl)

und für **vier Kulturarten sowie eine unbewachsene Variante**:

1. Winterweizen (WW)
 2. Sommerweizen (SW)
 3. Silomais (SM)
 4. Zuckerrüben (ZR)
- + unbewachsen.

Es bestehen somit 30 Kombinationen aus Boden- und Kulturart, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden in Abhängigkeit von Bodenart, Pflanzenbestandsentwicklung und Witterungsverlauf zu quantifizieren. Ziel ist es die Bodenfeuchte auf Tagesbasis für unterschiedliche Bodenschichten unter Einbeziehung der aktuellen Pflanzenentwicklung und Klimadaten zu berechnen. Der nachfolgend vorgestellte Ansatz zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit sollte nur in Verbindung mit einem für unterschiedliche Standorte in Deutschland validierten Bodenwasserhaushaltsmodell verwendet werden, um die Änderungen der Bodenfeuchte für unterschiedliche Schichten tagesgenau abbilden zu können. Das Modell AMBAV des DWD bietet diese Voraussetzungen und wurde daher für diese Untersuchungen verwendet. Es hat sich

weiterhin in verschiedenen Ensemble-Simulationen und in der Bewässerungsberatung des DWD über Jahre bewährt (Löpmeier, 1994; Braden, 1995). Um die Einflüsse modellimmanenter Voraussetzungen und Festlegungen zu prüfen und den Modellfehler in den Ausgabeparametern zu verifizieren, ist bei einer Weiterentwicklung die Einbindung weiterer Bodenwasserhaushaltsmodelle zu empfehlen.

4.1.3 **Expertengestützter Bewertungsansatz zur Verdichtungsempfindlichkeit**

Bewertungsansätze zur Verdichtungsempfindlichkeit von Böden basieren hauptsächlich auf expertengestützten Ansätzen (z. B. Houskova und Montanarella, 2008 a; b; Jones et al., 2008; Le Bas et al., 2006; Fraters, 1996) oder physikalischen Messgrößen, wie z. B. dem Bodendruck (z. B. BAFU und BLW, 2013; Horn et al., 2005; Van den Akker und Simota, 2008; Van den Akker, 1997).

Das hier vorgestellte **Konzept** zur „Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden“ verfolgt aufgrund der räumlichen und zeitlichen Komplexität des Systems Boden und der derzeit noch unzureichenden Praxistauglichkeit von Modellen in diesem Bereich einen von Experten gestützten Ansatz. Dieser wurde auf Grundlage langjähriger Erfahrungen einer Expertengruppe, einer Vielzahl von Feldmessungen (z. B. TI Braunschweig, LfL Bayern, IFZ Göttingen) und unter Einbeziehung einschlägiger Tabellenwerke (z. B. Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, (KA5; AG Boden, 2015) u. a.) entwickelt. Dabei erfolgte eine Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden in Abhängigkeit von der Bodenart und der Bodenfeuchte.

Im ersten Schritt wurden hierzu die Bodenarten in ihrer Abstufung zueinander bewertet und geordnet. Hierzu wurde zunächst eine Einstufung von Petelkau et al. (1998) herangezogen, welche die Bodenarten hinsichtlich ihres Ton- und Feinschluffgehaltes unterscheidet und klassifiziert. Da im hier vorgestellten Ansatz die Eigenschaften und Veränderungen der Verdichtungsempfindlichkeit unterschiedlicher Bodenarten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten berücksichtigt werden sollten, wurden zusätzlich die Bodenarten hinsichtlich ihrer Wasserretentionsfunktion unterschieden und klassifiziert. Weiterhin wurde eine Anpassung an die aktuelle Nomenklatur der KA5 vorgenommen (AG Boden, 2005). Hierdurch kam es v. a. bei Bodenarten mit sehr hohen Schluffgehalten zu Anpassungen bzw. Änderungen der Klassifizierung gegenüber der von Petelkau et al. (1998). Um sowohl die Bodenfeuchte als auch die DWD-Daten berücksichtigen und einbeziehen zu können, wurde auch hier die Bodenfeuchte in %FK verwendet. Im Ergebnis ergibt sich eine Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit landwirtschaftlich genutzter Böden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist.

Bei Sanden ist der Wassergehalt bei Feldkapazität (FK = nutzbare FK (nFK) + Totwasser (PWP)) generell erheblich geringer (z. B. Ss 10 bis 15 Vol%, S12 23 bis 28 Vol%) als bei Lehmen oder Tonen (z. B. Tt 35 bis 51 Vol%). Hierin wird u. a.

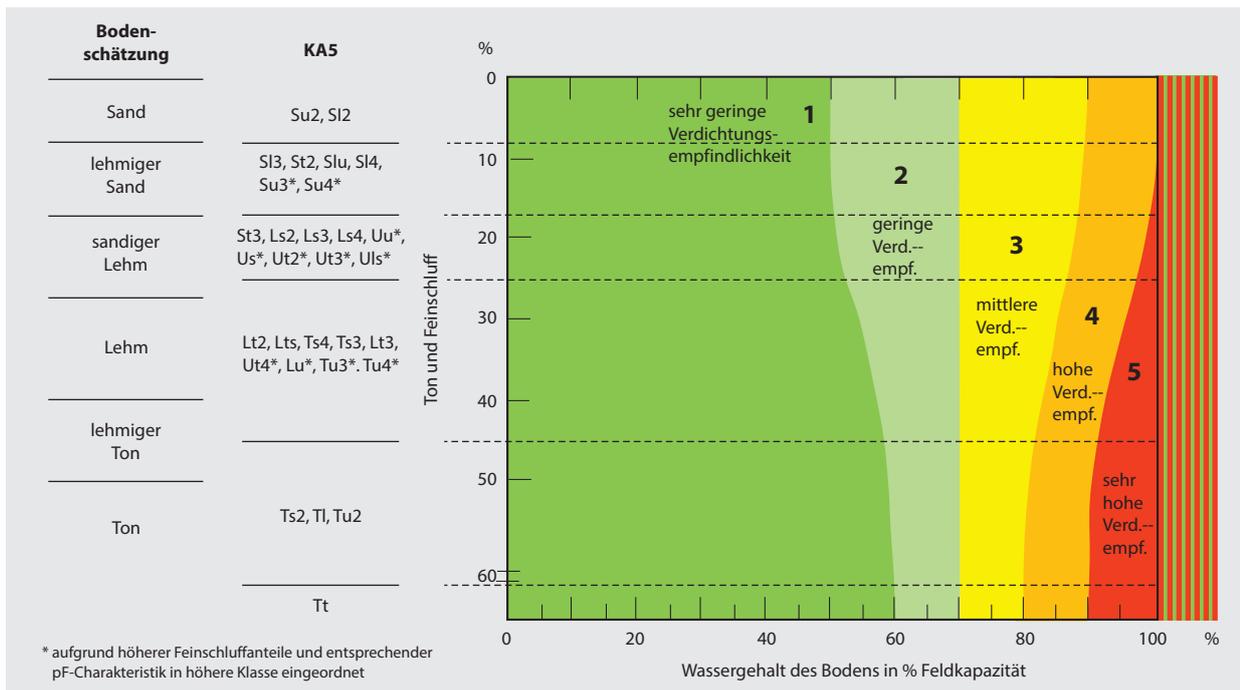


Abbildung 4
Bodenart- und feuchteabhängige Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

auch deutlich, dass z. B. bei Sanden mit sehr geringer Feldkapazität (z. B. 15 Vol%) schon kleine Wassergehaltsänderungen (z. B. -3 Vol%) große Änderungen des Wertes der %FK bewirken (im Beispiel: -20 %), wohingegen bei Tonen mit hoher Feldkapazität (z. B. Tl 40 Vol%) diese Wassergehaltsänderung (z. B. -3 Vol%) nur eine Änderung des Wertes der %FK von -7,5 % hervorrufen. Weiterhin ist der z. T. erhebliche Totwasseranteil (PWP) bei steigenden Tongehalten bei der Betrachtung der Feldkapazität zu beachten.

Für die weiteren Betrachtungen wurden dann die entsprechenden Feldkapazitätswerte (%FK) der Klassenmitte der jeweiligen Bodenartenklasse ermittelt (vgl. Abbildung 4). Weiterhin wurden die Werte der oberen und unteren Grenzen herangezogen, um die Spannweite der einzelnen Klassen mit zu berücksichtigen. Auf Grundlage der täglichen Bodenfeuchten (%FK) aus den Daten des DWD wurde für jeden Tag im Jahr die mittlere langjährige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens bestimmt. Hierzu werden die jeweiligen Bodenfeuchten des Ober- und Unterbodens verwendet. Die Ergebnisse für neun über Deutschland verteilte Beispielstandorte finden sich in Kapitel 4.3.

4.2 Methodik zur Ableitung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Um die mechanische Belastung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen spezifizieren zu können, ist die Berücksichtigung der gängigen Mechanisierungen der jeweiligen Arbeitsgänge und deren Spannweite von großer Bedeutung. Hierzu wurden sowohl Literaturquellen ausgewertet als auch auf Expertenwissen des Thünen Instituts für Agrartechnologie und einer Arbeitsgruppe des KTBL zu

verfügbaren Feldarbeitstagen zurückgegriffen. Die Fülle an Mechanisierungsmöglichkeiten lässt sich im Rahmen dieser Studie in ihrer Detailliertheit nicht darstellen, findet aber Eingang in das vorgestellte Konzept und wird über das beschriebene Schema (siehe Kap. 4.3) der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit gegenübergestellt.

Um die jeweilige Mechanisierung vor dem Hintergrund der mechanischen Belastung durch Landmaschinen (vgl. z. B. Abbildung 19) einordnen und der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden gegenüber stellen zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, der im ersten Schritt den Einfluss von Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktflächen- druck, Anzahl Überrollungen und Anteil der überrollten Fläche gewichtet. Die so bestimmten Belastungsanteile werden aufsummiert und durch Division mit der Summe der Wichtungen normiert. Der so ermittelte Wert ermöglicht die Einordnung in eine der fünf Belastungsklassen. Tabelle 2 zeigt das Vorgehen am Beispiel eines Feldhäckslers bei der Silomaisernte mit parallel fahrendem Häckselgutwagen, der das Häckselgut direkt zum Silo transportiert und deshalb mit Reifeninnendrücken für Straßenfahrten auch auf dem Acker fährt. Im Vergleich dazu ist dieses Verfahren in Abbildung 19 zwei alternativen Silomaisernteverfahren mit Trennung von Feld- und Straßentransport gegenübergestellt.

Bei diesem Vorgehen sind die Radlast und der Kontaktflächen- druck höher gewichtet als die anderen Parameter (vgl. C7 und C9 in Tabelle 2), da Änderungen dieser Parameter einen größeren und direkteren Einfluss auf die Bodenbelastung haben (Tijink, 2003; Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Horn et al., 2008; 2009; Diserens, 2009). Weiterhin werden die Gewichtungsfaktoren für die Parameter ‚Anzahl der Überrollungen‘ und ‚Anteil der überrollten

Tabelle 2

Beispiel Feldhäcksler und Häckselwagen direkt zum Silo (Technikvariante 1)

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

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

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

Berechnung der Wichtungsfaktoren der Parameter ‚Anzahl Überrollungen‘ und ‚Anteil der überrollten Fläche‘:

- (1) $C10 = (11/B7) \cdot C7$
- (2) $C11 = C10 \cdot (A6/100)$

Berechnung der Belastungsanteile:

- (3) $D7 = (H1/B7) \cdot C7$
- (4) $D8 = (I2/B8) \cdot C8$
- (5) $D9 = (I4/B9) \cdot C9$
- (6) $D10 = (A5/B10) \cdot C10$
- (7) $D11 = (A6/B11) \cdot C11$

Fläche‘ dynamisch an die Radlast gekoppelt (vgl. Formeln (1) und (2), Tabelle 2), so dass für höhere Radlasten auch eine höhere Gewichtung der Überrollhäufigkeiten erfolgt.

Darüber hinaus wird der jeweilige Wert der Technikvariante auf die in der Praxis übliche obere Begrenzung des Wertebereiches der Parameter bezogen (z. B. 12 t beim Parameter ‚Radlast‘, vgl. B7 in Tabelle 2), um Abweichungen vom praxisüblichen Verfahren mit in die Betrachtungen einbeziehen zu können. Zusammen mit dem Wichtungsfaktor ergibt sich ein Belastungsanteil des jeweiligen Parameters an der Gesamtbelastung (vgl. Formeln (3) bis (7), Tabelle 2). Die sich aus allen Parametern ergebende Belastungssumme (D13, Tabelle 2) wird dann durch die Summe der Wichtungen (C12, Tabelle 2) geteilt, um den Belastungskennwert (D14, Tabelle 2) zu ermitteln und damit die Technikvarianten auf einer Skala von 0,3 bis 0,7 bewerten und in fünf Belastungs-

klassen einteilen zu können. Mit diesem Verfahren wird es möglich, unter Berücksichtigung der jeweiligen Maschinenspezifikationen (Berücksichtigung von Radlast, Reifennendruck, Kontaktflächendruck, Anzahl Überrollungen und Anteil der überrollten Fläche) eine Einordnung der jeweiligen Mechanisierung in eine der 5 Belastungsklassen (siehe Abbildung 5; sehr gering bis sehr hoch) bzw. auch in feineren Abstufungen vorzunehmen, verschiedene Mechanisierungen gegenüberzustellen und hinsichtlich ihrer Bodenbelastung zu bewerten sowie der jeweiligen Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens gegenüberzustellen (vgl. Abbildung 5).

Zur Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen wurde ein Schema von Brunotte et al. (2015, verändert nach Chamen et al., 2003) verwendet und angepasst (Abbildung 5). Hierbei wird auf der Ordinate die

mechanische Belastung der Maschine bzw. Verfahrenskette in Abhängigkeit der dargestellten Parameter, wie z. B. Radlast, Kontaktflächendruck etc. klassifiziert in 5 Belastungsklassen von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) dargestellt. Die jeweiligen mechanischen Belastungen der verschiedenen Mechanisierungen wurden aus einer Vielzahl von Feldmessungen abgeleitet. Auf der Abszisse wird die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens in Abhängigkeit von Bodenart und -feuchte, ebenfalls in einer 5-stufigen Klasseneinteilung von 1 (sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit) bis 5 (sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit) eingestuft. Hierbei wurde der bisher verwendete Ansatz zur Bestimmung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit nach Konsistenzbereichen nach Brunotte et al. (2015), verändert nach Chamen et al. (2003) durch den hier vorgestellten, neu entwickelten Bewertungsansatz zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden (vgl. Kap. 4.1) ersetzt.

Der „Feldhäcksler mit Häckselwagen direkt zum Silo“ (Technikvariante 1) erreicht mit diesen Spezifikationen (max. 7 t Radlast, max. 3 bar Reifeninnendruck, max. 1,2 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 7-facher Überrollung und einem Spurflächenanteil von 33 %) einen Belastungskennwert von 0,58 und ist demnach in Belastungsklasse 4 (hoch) einzuordnen (vgl. auch rote Linie in Abbildung 19 und 20, Kap. 5.3). Nach gleichem Prinzip wurden auch die anderen betrachteten Verfahren eingeordnet. Die Ergebnisse finden sich in Kap. 5.3.

Die mechanische Belastung durch die jeweilige Mechanisierungsvariante (5 Klassen) wird dabei der Verdichtungsempfindlichkeit des jeweiligen Bodens (5 Klassen)

gegenübergestellt (vgl. Abbildung 5). Hierbei wird ersichtlich, ob der Boden unter den gegebenen Bedingungen mit den Spezifikationen der jeweiligen Technikvariante bodenschonend befahren werden kann oder nicht. Liegt der Schnittpunkt der Geraden der mechanischen Belastung und der Geraden der Verdichtungsempfindlichkeit unterhalb der Diagonalen (grün bis gelber Bereich), so ist eine bodenschonende Befahrung gegeben. Liegt der Schnittpunkt oberhalb der Diagonalen (gelb bis roter Bereich), so ist eine bodenschonende Befahrung schwierig bis nicht gegeben und es ist ggf. mit schädlichen Bodenveränderungen zu rechnen. Weiterhin können verschiedene Technikvarianten hinsichtlich ihrer Bodenbelastung verglichen werden, wodurch eine Optimierung der Befahrung unter den gegebenen Bedingungen möglich wird. Die Ergebnisse können die Entscheidungsfindung für mittel- bis langfristige Investitionsplanungen unterstützen, da über das Bodenwasserhaushaltsmodell mittlere, langjährige Verhältnisse abgebildet werden können. In Kapitel 5.3 ist dieses Verfahren am Beispiel der Silomaiserte mit drei unterschiedlichen Ernteverfahren dargestellt.

4.3 Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Charakteristik von neun Beispielstandorten

Um die Plausibilität und Ergebnisse der gezeigten Methodik zu überprüfen, wurde diese an neun Beispielstandorten, verteilt über ganz Deutschland, angewendet. Hierzu wurden die Standorte so ausgewählt, dass 1. möglichst unterschiedliche Bodenarten des Oberbodens berücksichtigt wurden (vgl.

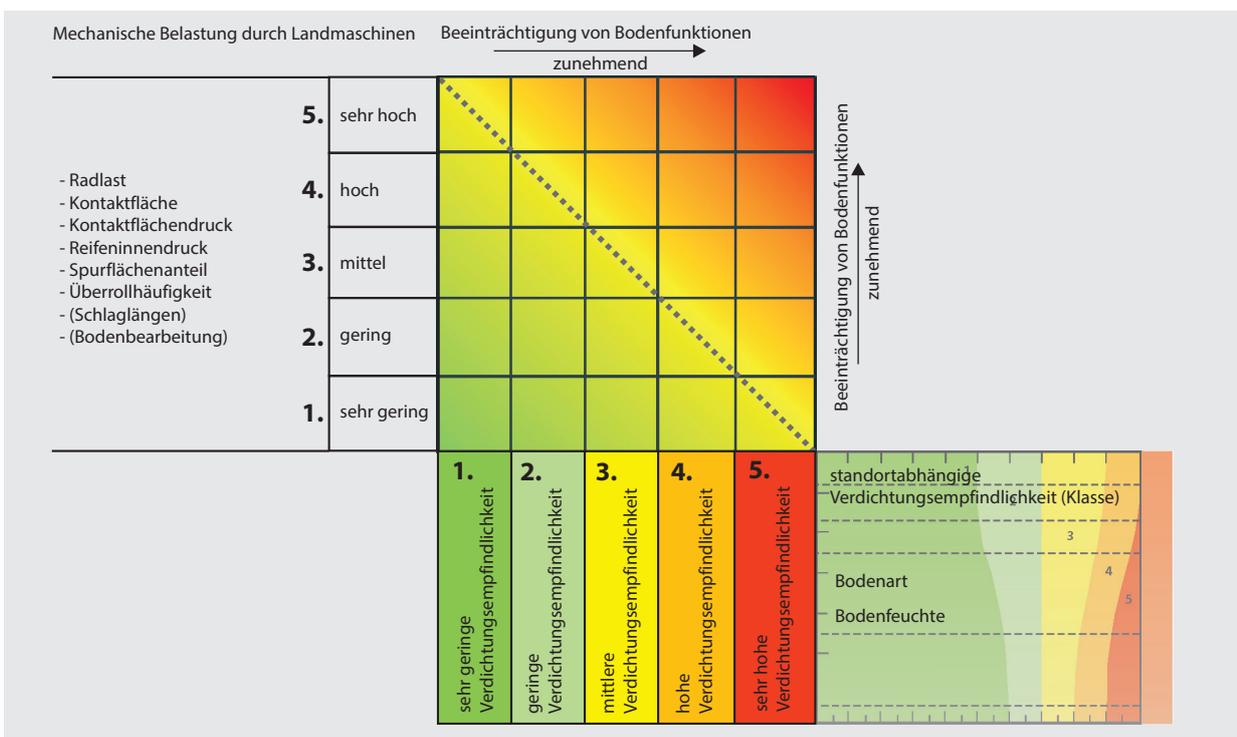


Abbildung 5

Schema der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

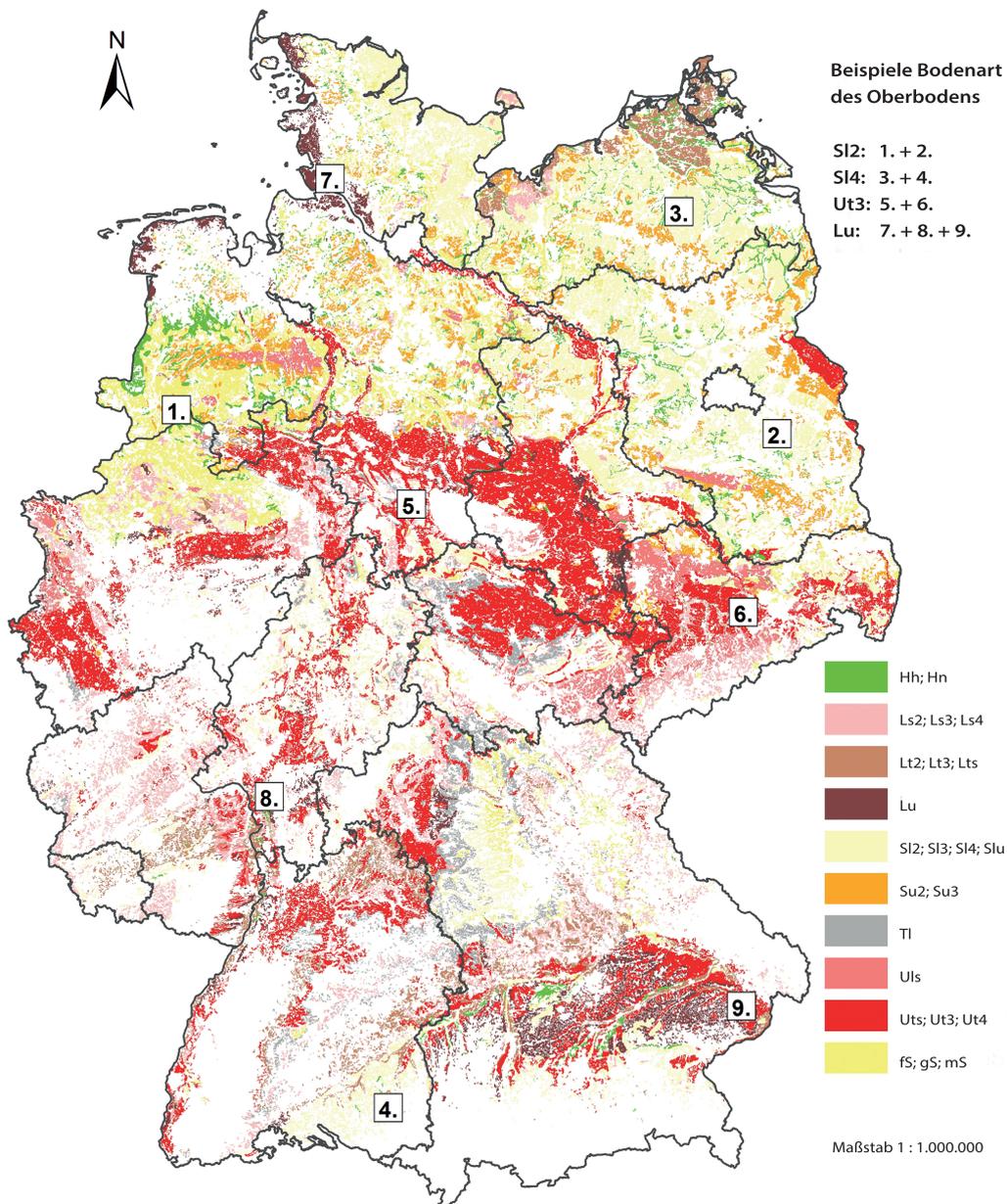


Abbildung 6
 Beispielstandorte auf Grundlage der BÜK 1000N Ackernutzung (BGR, 2013a)

Abbildung 6 und Tabelle 4) und 2. mindestens je zwei Standorte die gleiche Bodenart aufweisen, jedoch in Regionen mit sehr unterschiedlicher Niederschlagshöhe und -verteilung liegen (vgl. Tabelle 3). Hierdurch sollte eine möglichst weite Spannweite an Bodenart – Klima – Variationen einbezogen werden. Abbildung 6 zeigt die Lage der Standorte und die zugehörigen Bodenarten des Oberbodens.

Die Standorte 1 und 2 sind schwach lehmige Sande (SI2) im westlichen Niedersachsen (bei Lingen (Ems)) und in Brandenburg, südöstlich von Berlin (bei Storkow). Die Standorte 3 und 4 sind stark lehmige Sande (SI4) in Mecklenburg-Vorpommern (bei Neubrandenburg) und im südlichen Baden-Württemberg (bei Bad Waldsee). Die Standorte 5 und 6 sind tonige Schluffe aus Löß im südlichen Niedersachsen (bei Adenstedt) und in Sachsen (bei Lommatzsch). Die

Standorte 7, 8 und 9 sind schluffige Lehme (Lu) aus unterschiedlichen Ausgangssubstraten. Auf Standort 7 liegt ein schluffiger Lehm (Lu) aus der Marsch in Schleswig-Holstein (bei Marne), auf Standort 8 ein schluffiger Lehm (Lu) über Festgestein in Hessen (bei Griesheim) und auf Standort 9 ein schluffiger Lehm (Lu) aus Löss im südöstlichen Bayern (bei Eggenfelden) vor. In nachfolgender Tabelle 3 sind die entsprechenden Jahres- und Monatsniederschläge der Beispielstandorte dargestellt.

Tabelle 4 zeigt die Charakteristik der Beispielstandorte mit den jeweiligen Daten zur Horizontierung und der Bodenart aus der BÜK 1000N. Hieraus wurden die Bodenarten für Ober- und Unterboden bestimmt und die entsprechenden Bodenarten zu den verfügbaren Bodenarten des DWD zugewiesen.

Tabelle 3

Mittlere Jahres- und Monatsniederschlagshöhen der Beispielstandorte für den Zeitraum 1971 bis 2000

Standort-Nr.	Lage bei ...	Niederschlag Jahreswerte (1971 bis 2000)	Monatsniederschläge (1971 bis 2000)												
			Jan.	Feb	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
1.	Lingen (Ems)	MW	777	71	48	60	45	59	73	76	68	70	65	69	74
		Min.	582	6	2	7	1	8	12	13	15	5	15	6	16
		Max.	1084	160	136	146	94	127	157	176	154	172	246	125	171
2.	Storkow	MW	579	44	34	38	34	55	63	66	59	49	40	44	52
		Min.	387	1	4	9	1	3	6	10	11	8	5	1	9
		Max.	834	112	89	113	89	147	166	185	156	135	134	102	132
3.	Neubrandenburg	MW	584	49	34	41	36	48	64	61	54	51	46	46	52
		Min.	384	0	4	9	1	4	10	13	12	8	12	5	10
		Max.	776	135	92	91	80	135	130	279	159	144	183	103	110
4.	Bad Waldsee	MW	850	45	47	50	64	84	105	102	89	73	63	63	63
		Min.	627	2	9	13	11	14	32	19	14	26	7	1	9
		Max.	1072	118	103	144	158	187	232	212	191	164	143	182	159
5.	Adenstedt	MW	817	75	54	67	52	68	71	76	79	65	67	67	75
		Min.	620	0	10	5	5	5	20	18	19	4	12	0	32
		Max.	1150	154	110	143	126	170	124	197	135	184	193	136	188
6.	Lommatzsch	MW	714	36	33	37	46	56	71	75	64	47	44	41	44
		Min.	413	1	5	9	3	5	15	12	13	7	10	0	2
		Max.	938	142	72	149	104	166	171	200	235	126	178	133	147
7.	Marne	MW	821	67	42	52	39	54	79	83	78	85	86	81	75
		Min.	487	2	3	7	5	11	4	5	16	32	28	8	13
		Max.	1189	129	120	130	98	118	182	183	179	200	220	161	196
8.	Griesheim	MW	677	39	40	50	46	73	66	78	64	54	57	56	54
		Min.	448	3	9	10	13	13	18	18	2	11	15	9	7
		Max.	1034	101	101	119	109	243	137	188	171	117	153	93	170
9.	Eggenfelden	MW	848	53	43	60	55	83	101	110	100	68	54	61	60
		Min.	568	4	7	20	2	13	31	19	36	10	8	9	5
		Max.	1086	160	93	143	123	185	266	219	179	157	128	125	127

Tabelle 4

Charakteristik der Beispielstandorte und Zuordnung zu den Bodenarten und Gitterrasterpunkten

Standort-Nr.	Lage bei ...	Bodenart	Bodenart DWD	Tiefe DWD	Oberboden			Übergang		
					Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK1 000	Horizont BÜK 1000	Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000
1.	Lingen (Ems)	SI2	SI2	0-30	SI2	0-10/10-20	Ap/Ae			
2.	Storkow	SI2	SI2	0-30	SI2	0-15/15/30	Ap/Ae			
3.	Neubrandenburg	SI4	SI4	0-30	SI4	0-25	Ap			
4.	Bad Waldsee	SI4	SI4	0-30	SI4	0-25	Ap	SI3	AI	25-40
5.	Adenstedt	Ut3	Ut3	0-30	Ut3	0-25	Ap	Aep	Ut4	30-40
6.	Lommatzsch	Ut3	Ut3	0-30	Ut3	0-25	Ap			
7.	Marne	Lu	Lu	0-30	Lu	0-25	Ap-Go			
8.	Griesheim	Lu	Lu	0-30	Lu	0-30	Ap	Bv	Ls3	30-40
9.	Eggenfelden	Lu	Lu	0-30	Lu	0-30	Ap	AI	Ut4	30-40

Standort-Nr.	Lage bei ...	Bodenart	Bodenart DWD	Tiefe DWD	Unterboden			Übergang		
					Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000	Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000
1.	Lingen (Ems)	SI2	SI2	30-60	fS	20-60	Bhs	fS	60-95	Bhs-Go
2.	Storkow	SI2	SI2	30-60	mS	30-200	Bs/Bv/C			
3.	Neubrandenburg	SI4	SI4 (Lu)	30-60	Ls3	25-50	AI	Lts	50-90	Bt
4.	Bad Waldsee	SI4	Lt3 (Lu)	30-60	Lt2	40-80	Bt			
5.	Adenstedt	Ut3	Ut3 (Lu)	30-60	Ut4	40-120	Bvt			
6.	Lommatzsch	Ut3	Ut3 (Lu)	30-60	Ut4	30-55	Sw			
7.	Marne	Lu	SI2 (SI4)	30-60	Su3	25-45	Go	Su2	45-105	Gro
8.	Griesheim	Lu	SI2	30-60	SI2	40-100	IIbV			
9.	Eggenfelden	Lu	Lt3 (Lu)	30-60	Tu3	40-80	Bt			

Für jeden Beispielstandort wurden aus der BÜK 1000N die Bodenart (nach KA5) und Horizontierung bestimmt und den entsprechenden Tiefenstufen zugeordnet (vgl. Abbildung 2 links: zeigt das vereinfachte Schema des Vorgehens). Aufgrund der unzureichenden Detailliertheit der Daten der BÜK 1000N bezüglich der Trockenrohdichte (TRD) und der Humusgehalte wird für die Beispielstandorte von einer mittleren Trockenrohdichte (TRD3) und einem geringen bis mittleren Humusgehalt (h2 bis 3) ausgegangen.

Die Ergebnisse zur Verdichtungsempfindlichkeit der gezeigten Beispielstandorte finden sich in Kap. 5.1. In Kap. 5.2 wird die mechanische Belastung für unterschiedliche landwirtschaftliche Mechanisierungen (z. B. Traktoren, Erntemaschinen, Transport) anhand umfangreicher Messdaten dargestellt. In Kap. 5.3 werden darauf aufbauend die Ergebnisse der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden mit der mechanischen Belastung und die Ableitung von Befahrbarkeitstagen am Beispiel der Silomaiserte gezeigt.

5 Ergebnisse

5.1 Standort- und kulturartspezifische Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

Die in Kap. 4.1 beschriebene Methodik wurde für die in Kap. 4.3 beschriebenen neun Beispielstandorte umgesetzt. Das Ergebnis sind standort- und kulturartspezifische Zeiträume unterschiedlicher Verdichtungsempfindlichkeit im langjährigen Mittel der Witterung. Diese werden für die einzelnen Tage der Kalendermonate als Säulenabschnitte dargestellt. Dabei wurden die Zeiträume zur besseren Übersichtlichkeit entsprechend Abbildung 4 farblich unterschieden.

Abbildung 7 zeigt die Tage mit unterschiedlicher Verdichtungsempfindlichkeit für die Kulturart **Silomais** im **Oberboden**. Die Darstellung erfolgt in Form gestapelter Säulen, daher werden nur Summen der Tage in der jeweiligen Klasse angezeigt. Rückschlüsse auf die Verhältnisse eines einzelnen Tages im jeweiligen Monat sind in

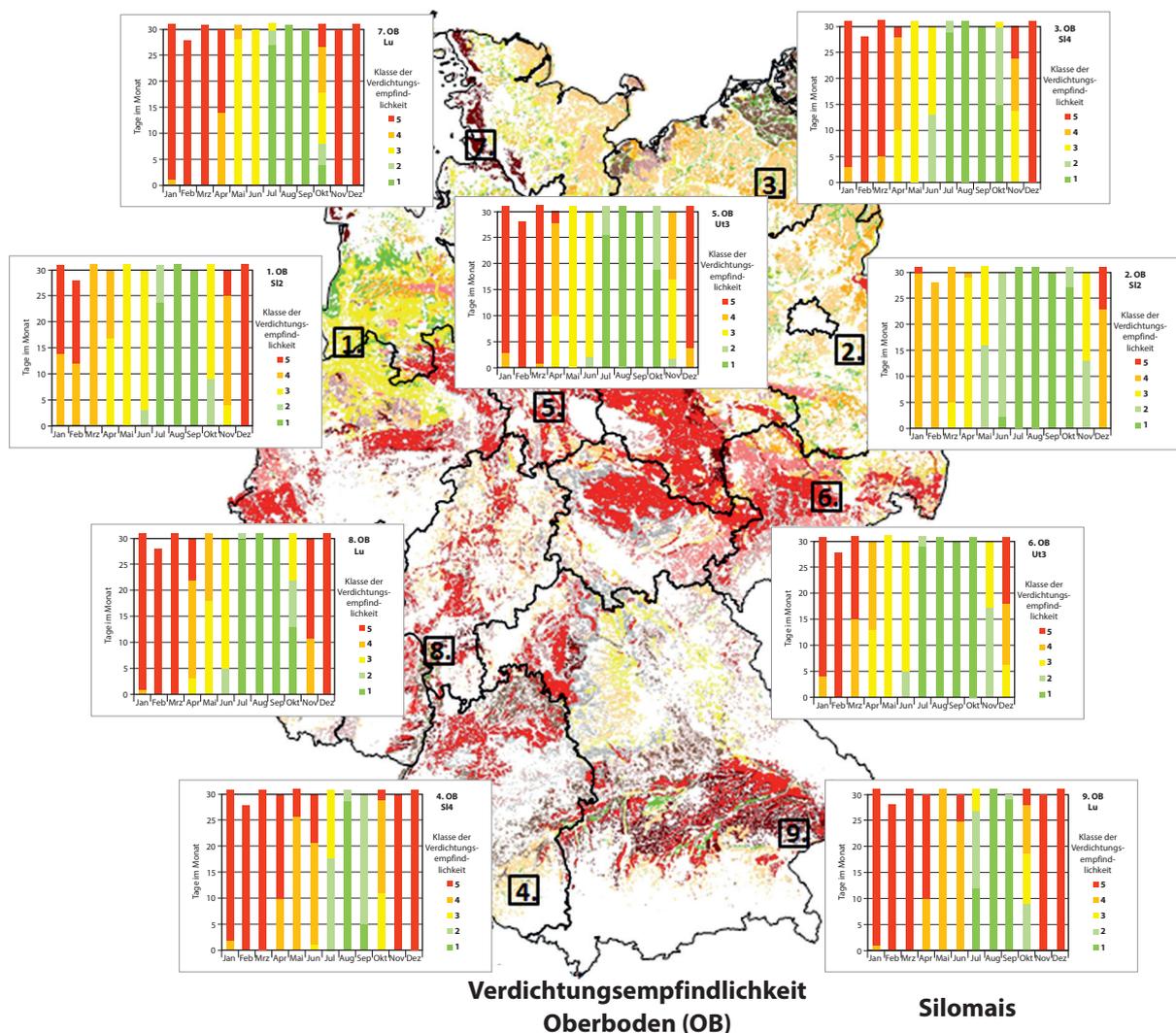


Abbildung 7

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Silomais an den Standorten 1 bis 9

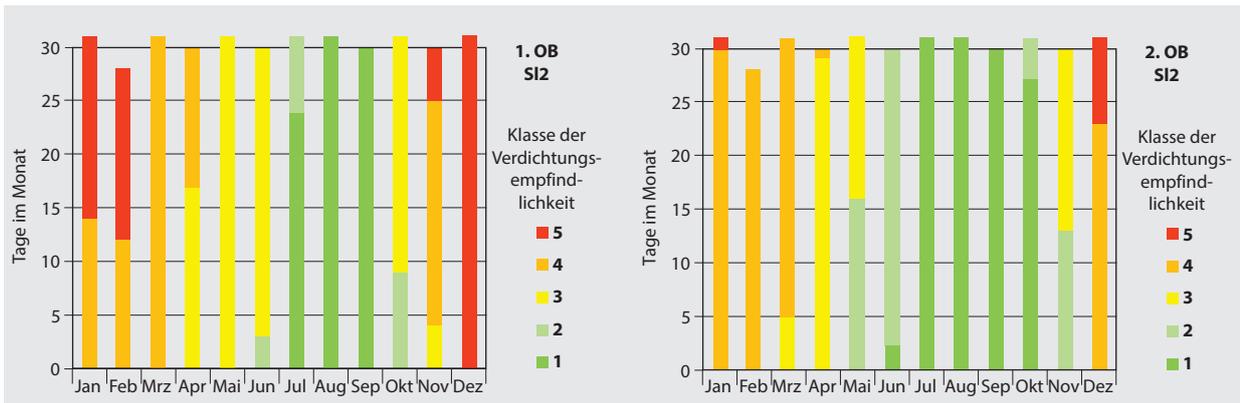


Abbildung 8
Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 1 (links) und 2 (rechts)

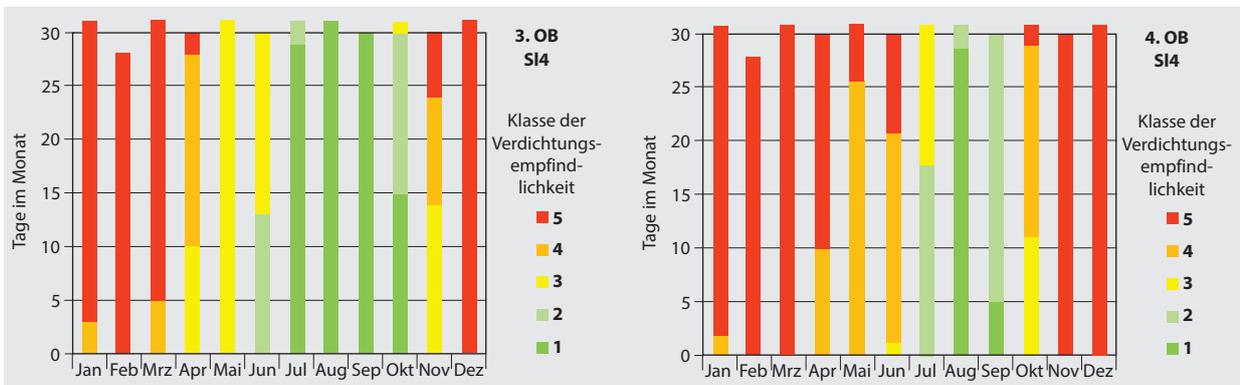


Abbildung 9
Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 3 (links) und 4 (rechts)

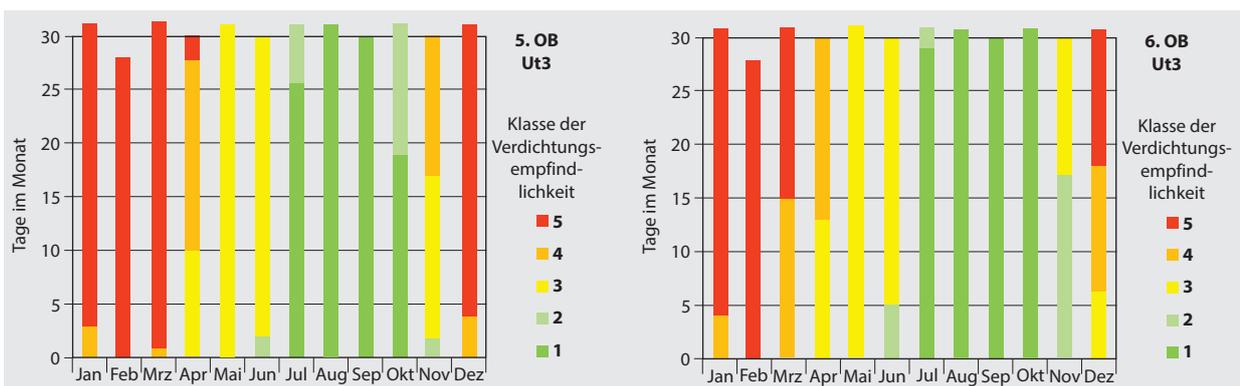


Abbildung 10
Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 5 (links) und 6 (rechts)

dieser Darstellung nicht möglich, generelle Tendenzen können dennoch abgeleitet werden.

Am **Standort 1** (Lingen (Ems), Niedersachsen, Bodenart: SI2) besteht von Anfang November bis Anfang-Mitte April eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit. Von Juni bis Anfang-Mitte Oktober herrschen gute

Befahrungsbedingungen mit niedrigen bis sehr niedrigen Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

Am **Standort 2** (Storkow, Brandenburg, Bodenart: SI2) bestehen im Vergleich dazu, aufgrund der geringeren Niederschläge, nur von Mitte-Ende November bis Mitte-Ende März hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Im

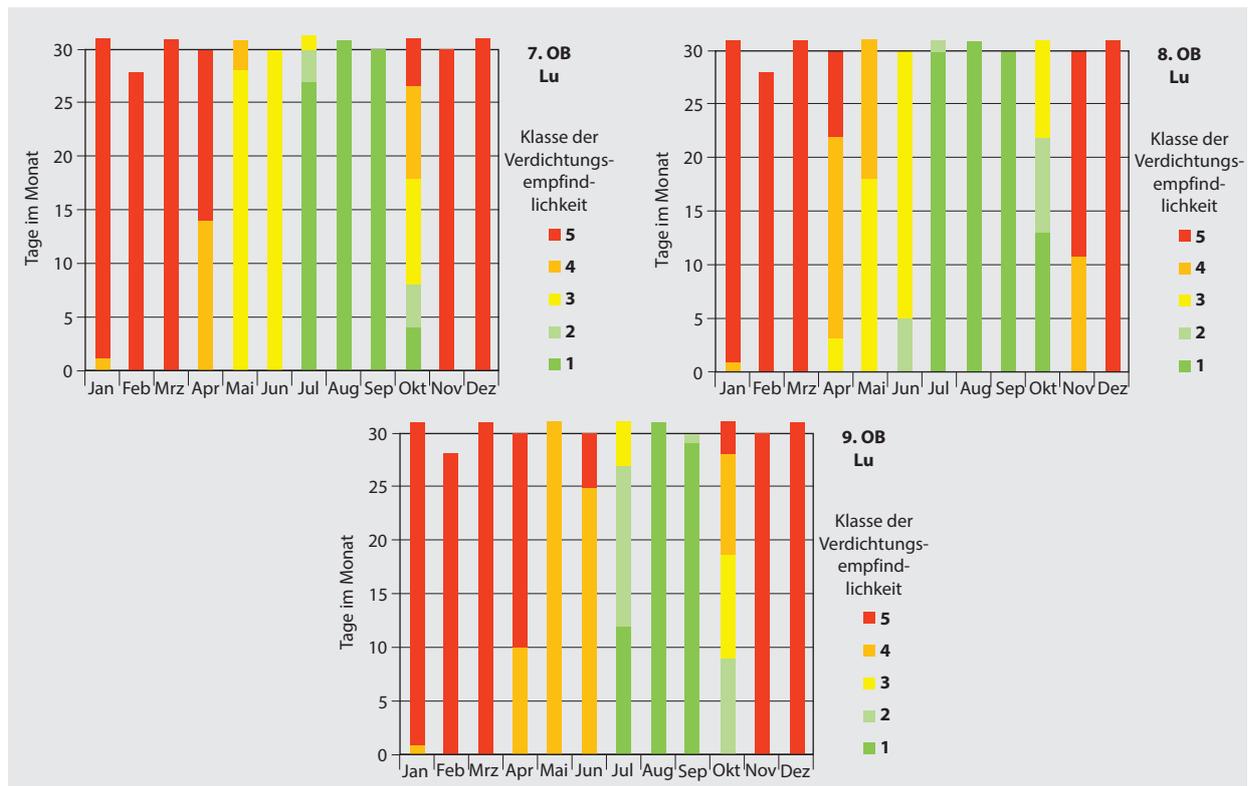


Abbildung 11

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 7 (links), 8 (rechts) und 9 (unten)

Großteil des Jahres (Anfang-Mitte Mai bis Mitte November) bestehen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten.

Standort 3 (Neubrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Bodenart: Sl4) weist von Ende Oktober bis Mitte April hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten auf. Von Juni bis Ende Oktober herrschen dagegen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

Standort 4 (Bad Waldsee, Baden-Württemberg, Bodenart: Sl4) zeigt, aufgrund der höheren Niederschläge (vgl. Tabelle 3), dagegen ein völlig anderes Bild. Hier herrschen von Mitte Oktober bis in den Juni hinein hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten vor. Nur von Anfang-Mitte Juli bis Ende September bestehen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten.

Standort 5 (Adenstedt, Niedersachsen, Bodenart: Ut3) weist von Mitte November bis Mitte April eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit auf, wohingegen von Ende Juni bis Anfang November niedrige, im Großteil dieses Zeitraums sogar sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten herrschen.

Standort 6 (Lommatsch, Sachsen, Bodenart: Ut3) zeigt eine ähnliche Verteilung, wobei geringe Verdichtungsempfindlichkeiten noch bis Mitte November vorherrschen und hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten erst ab Anfang Dezember zu erwarten sind.

Die Standorte 7, 8 und 9 zeigen, aufgrund des höheren Tongehaltes und entsprechender Niederschlagsmengen, im

Großteil des Jahres hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Auf **Standort 7** (Marne, Schleswig-Holstein, Bodenart: Lu, Marsch) herrschen lediglich von Anfang Juli bis Anfang-Mitte Oktober niedrige, z. T. auch sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten vor, auf **Standort 8** (Griesheim, Hessen, Bodenart: Lu, Festgestein) von Ende Juni bis Mitte-Ende Oktober. **Standort 9** (Eggenfelden, Bayern, Bodenart: Lu, Löss) zeigt von Juli bis Anfang-Mitte Oktober niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeit. Im Großteil des Jahres herrschen auf diesem Standort, aufgrund der sehr hohen Niederschlagsmengen, hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

In Tabelle 10 (Anhang Kap.9) ist zusammenfassend die mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Oberboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9) dargestellt.

Im Unterboden zeigen sich im Vergleich dazu die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenarten, Horizontierungen, Bodenfeuchteverläufe und Horizontunterschiede (vgl. Abbildung 12, Tabelle 4 und Tabelle 6). Auf **Standort 1** (Lingen (Ems), Niedersachsen, Bodenart: fS) bleibt der Unterboden noch bis Ende Juni feucht und damit verdichtungsempfindlich, befeuchtet jedoch im Herbst etwas langsamer und zeigt ab Mitte November wieder hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten.

Auf **Standort 2** (Storkow, Brandenburg, Bodenart: mS) trocknet der Unterboden im Frühjahr dagegen etwas

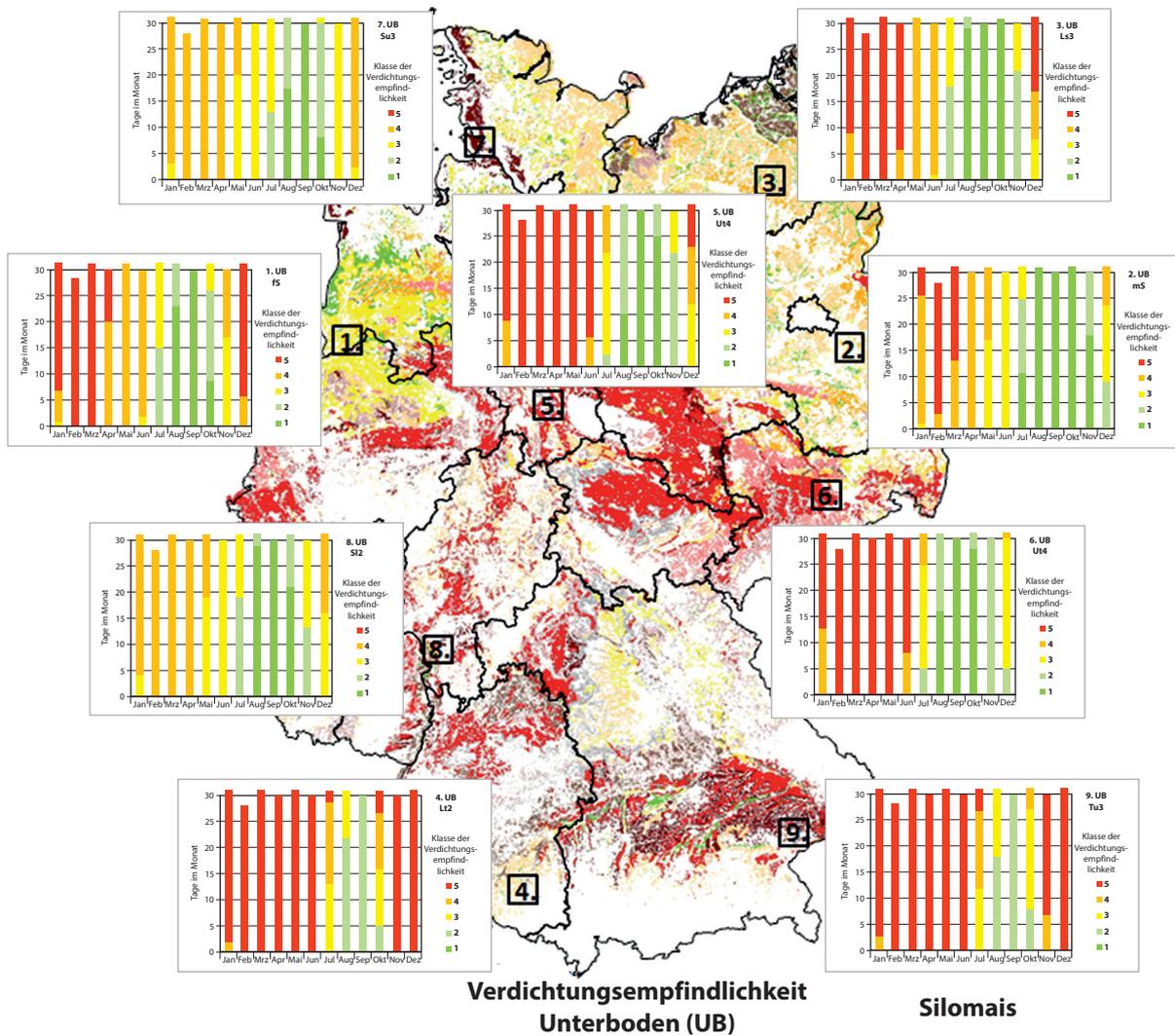


Abbildung 12
Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Silomais an den Standorten 1 bis 9

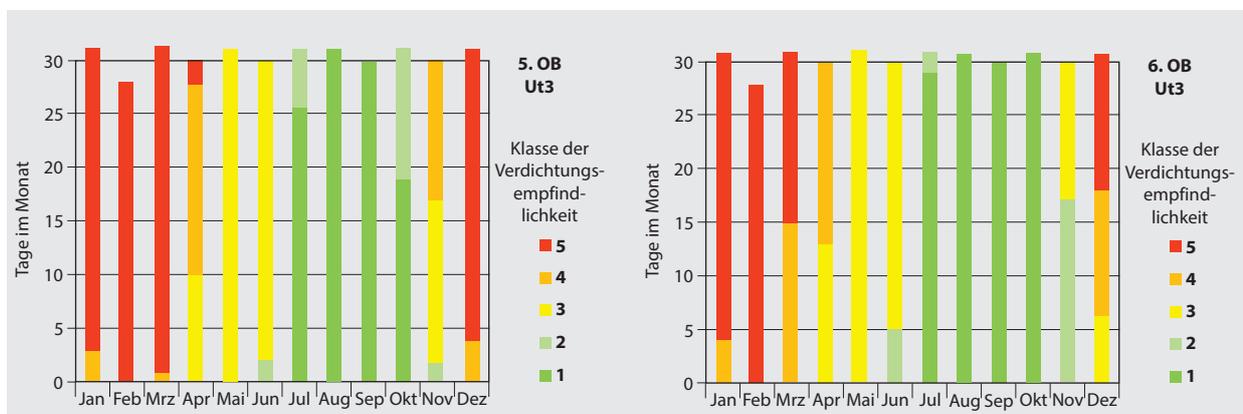


Abbildung 13
Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens (UB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 1 (links) und 2 (rechts)

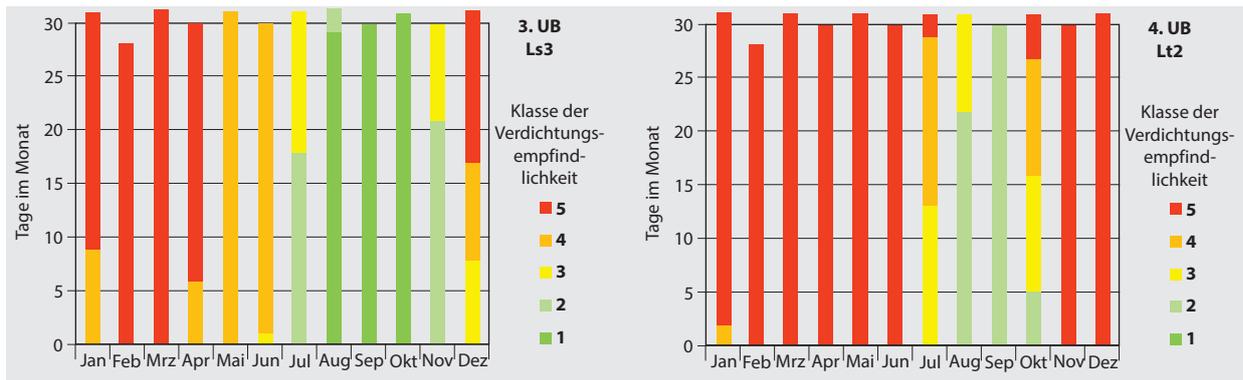


Abbildung 14

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 3 (links) und 4 (rechts)

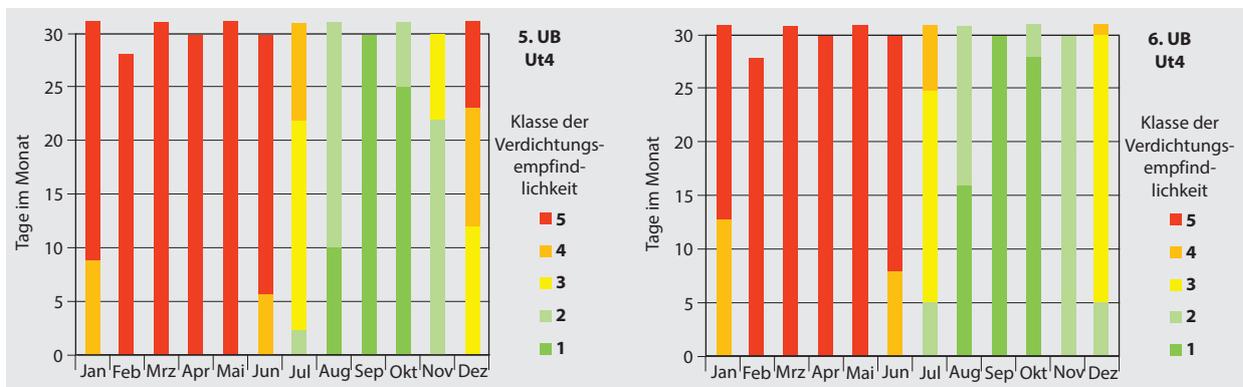


Abbildung 15

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 5 (links) und 6 (rechts)

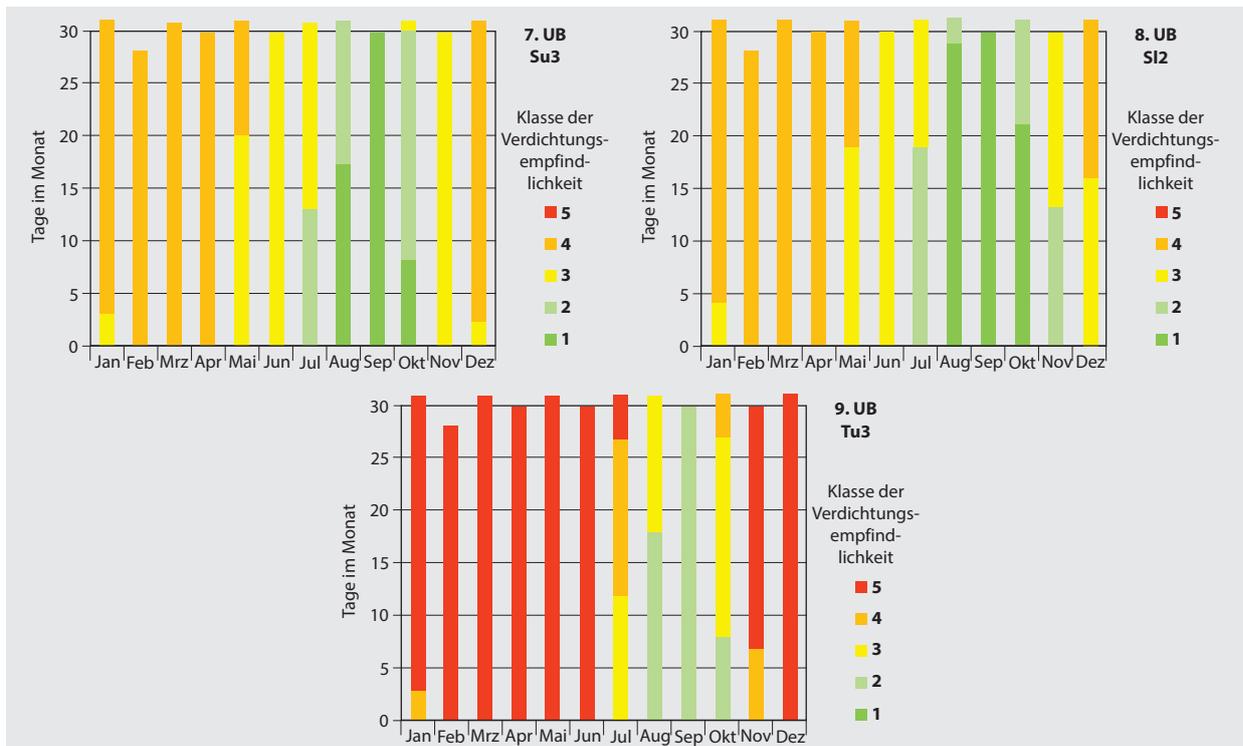


Abbildung 16

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 7 (links), 8 (rechts) und 9 (unten)

schneller ab, zeigt jedoch bis weit in den Dezember hinein noch geringe bis mittlere Verdichtungsempfindlichkeiten.

Bei den etwas tonigeren Substraten treten ähnliche Verläufe und Verschiebungen im Vergleich zum Oberboden auf (Abbildung 14 und 15). Lediglich die **Standorte 7 (Su3) und 8 (Sl2)** zeigen aufgrund des Substratwechsels zu sandigeren Substraten etwas geringere Verdichtungsempfindlichkeiten im Vergleich zum Oberboden v.a. im Herbst und Winter (Abbildung 16). Die Verschiebungen aufgrund der Durchfeuchtungsfront sind jedoch auch hier zu sehen.

Die Unterböden der sehr feuchten **Standorte 4 (Lt2) und 9 (Tu3)** trocknen, auch aufgrund der sehr tonigen Substrate, im Jahresverlauf nicht ausreichend ab und zeigen überwiegend hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Lediglich von Juli bis Oktober treten geringe bis mittlere Verdichtungsempfindlichkeiten auf. Die Ernte des Silomais sollte im Mittel der Jahre, aufgrund der geringen Verdichtungsempfindlichkeiten in diesem Zeitraum, auf diesen Standorten jedoch kein größeres Problem sein. Bei der Gülleausbringung zu Mais und der Bestellung im Frühjahr, sowie den nachfolgenden Pflegemaßnahmen ist jedoch erhöhte Vorsicht geboten. In feuchteren Einzeljahren kann es jedoch aufgrund des höheren Tongehaltes und Bodenfeuchten zu Gefährdungen des Bodens bei der Silomaisernte kommen.

In Tabelle 11 (Anhang Kap. 9) ist zusammenfassend die mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Unterboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9) dargestellt.

Diese Berechnungen wurden neben Silomais auch für die Kulturen Winterweizen, Sommerweizen und Zuckerrübe für die beschriebenen Standorte durchgeführt. Die entsprechenden Abbildungen finden sich im Anhang (Kap. 9, Abbildung 25 bis 30).

Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Ansatz die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Bodenart und Bodenfeuchte im Jahresverlauf abgeschätzt werden kann. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte im Jahresverlauf sehr stark schwankt. Daher macht die Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit anhand einer einzigen Bodenfeuchte (z. B. der Feldkapazität hier 100%FK) keinen Sinn, da diese nur in einem Bruchteil des Jahres vorkommen kann. Vielmehr muss das jeweilige Zeitfenster der Befahrung in die Untersuchungen einfließen, um eine realistische Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden zu erlangen. Im nachfolgenden Kap. 5.2. wird daher die mechanische Belastung durch unterschiedliche Technikvarianten abgeleitet und bewertet und in Kap. 5.3 der Verdichtungsempfindlichkeit des jeweiligen Bodens im jeweiligen Zeitfenster der Befahrung gegenübergestellt, um Aussagen über deren Gefährdungspotenzial bzw. Optimierungsvarianten ableiten zu können.

5.2 Bewertung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Zur Spezifizierung der mechanischen Belastung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen konnte auf einen umfangreichen Datensatz aus Feldmessungen und Messungen im Reifenprüfstand des Thünen Instituts für Agrartechnologie zurückgegriffen werden. Dieser wurde durch Feldmessungen der LfL Bayern, des IFZ Göttingen und weitere Literaturquellen ergänzt (u. a. Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011).

Aus diesen Daten wurde der mittlere Kontaktflächen- druck in Abhängigkeit von der Radlast ermittelt. Dieser ist in Abbildung 17 dargestellt. Aufgrund der großen Spannweite der Daten wurden diese weiter unterteilt in Radfahrwerke, wie Traktoren, Fahrzeuge mit Transportbereifung, Erntemaschinen und Bandfahrwerke z. B. am Rübenroder. Die höchsten mittleren Kontaktflächendrücke ($> 2,5$ bar) treten bei Transportfahrzeugen auf. Hier sind meist Reifen mit geringeren Querschnitten und kleineren Volumen montiert, die auch bei moderaten Radlasten (hier 4 bis 5 t) schon hohe mittlere Kontaktflächendrücke ($> 3,0$ bar) erzeugen können. Hier kommt es speziell auf eine Fahrwerksoptimierung und angepasste Reifeninnendrücke an. Auch im Bereich der Erntemaschinen treten einzelne höhere Werte hervor. Hierbei handelt es sich um Feldmessungen, bei denen suboptimale Kombinationen aus Reifen, Radlast und Reifeninnendruck gewählt wurden. Weiterhin fallen die Werte für die Bandlaufwerke auf, die auch bei hohen Radlasten (13,0 bis 16,5 t) mittlere Kontaktflächendrücke $< 1,5$ bar ermöglichen. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass mittlere Kontaktflächendrücke dargestellt sind, welche die gesamte Fläche des Bandlaufwerks als Aufstandsfläche einbeziehen. Druckspitzen z. B. durch die Bandlaufwerksrollen sind dabei nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für die Reifen, bei denen der Anteil der Stollen und des Zwischenraumes an der Kontaktfläche nicht klar unterschieden werden kann, da je nach Einsinktiefe des Reifens Stollen und Zwischenbereiche tragen. Dennoch sollte man bei Radlasten $> ca. 12$ t generell besser auf Bandlaufwerke zurückgreifen, sofern diese sehr hohen Radlasten nicht vermieden werden können, da dann eine größere Aufstandsfläche genutzt werden kann.

Aus den Untersuchungen der einzelnen Fahrwerkskombinationen können, unter Berücksichtigung verschiedener Optimierungsvarianten, radlastabhängige Spannweiten und Bereiche des Kontaktflächendrucks abgeleitet werden (vgl. Abbildung 17, gestrichelte Linie). Hierbei wird nach Radlast gestaffelt ein maximaler Kontaktflächendruck angegeben, bei dem die gängigen Reifen und Fahrwerkskombinationen einbezogen werden und je nach Randbedingungen von einer weitgehenden Optimierung ausgegangen werden kann. Darüber hinaus lassen sich zusammen mit weiteren Parametern, wie z. B. bei der jeweiligen Maschine durch Fahrwerksausstattung, Überrollhäufigkeiten, Spurfächenanteil, Aussagen zur jeweiligen mechanischen Belastung ableiten. Diese können dann der standortspezifischen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden gegenübergestellt werden (Kap. 5.3).

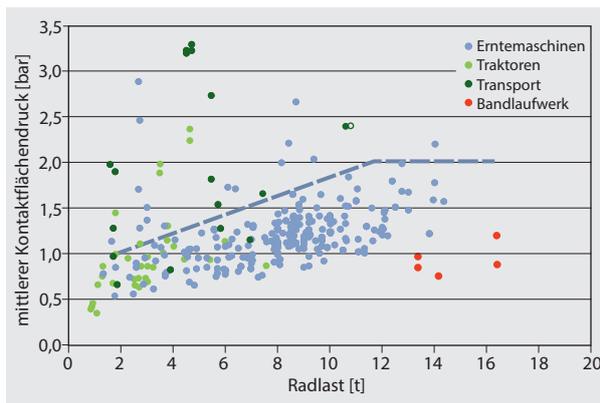


Abbildung 17

Mittlerer, radlastabhängiger Kontaktflächendruck für Erntemaschinen, Traktoren und Transportfahrzeuge auf Grundlage umfangreicher Messungen (u. a. Brunotte et al., 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011)

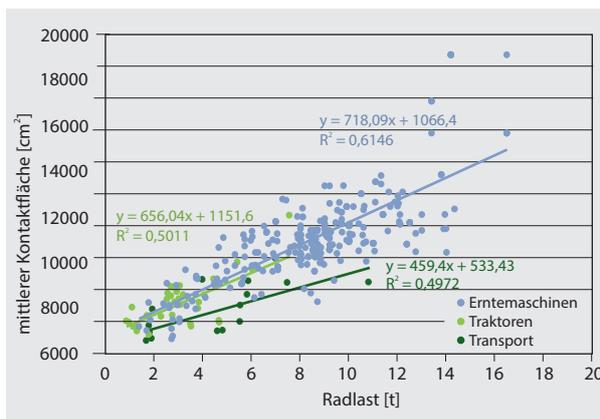


Abbildung 18

Mittlere, radlastabhängige Kontaktfläche für Erntemaschinen, Traktoren und Transportfahrzeuge auf Grundlage umfangreicher Messungen (u. a. Brunotte et al., 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011)

In Abbildung 18 ist die mittlere Kontaktfläche der jeweiligen Radlast gegenübergestellt. Die Daten wurden auf Normalverteilung getestet (Kolmogorow-Smirnow 0,098, crit. value 0,134) und diese bestätigt. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regressionsgeraden liegen zwischen 0,49 und 0,61. In der Gegenüberstellung von Erntemaschinen-, Traktor- und Transportbereifung zeigt sich das grundlegende Problem der Transportbereifung. Bei dieser sind die Kontaktflächen bei gleicher Radlast im Vergleich zu Traktoren und Erntemaschinen generell kleiner und steigen mit zunehmender Radlast weniger stark an. Dies führt in der Konsequenz zu hohen Kontaktflächendrücken und einer hohen mechanischen Bodenbelastung insbesondere in der Krume. Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass hohe Radlasten (in gewissen Grenzen) nicht per se als ungünstig zu beurteilen sind. Es muss vielmehr das gesamte Fahrwerk mit Maschinenspezifikationen bzw. die gesamte Verfahrenskette angepasst und

optimiert werden, um einen maximalen Bodenschutz zu gewährleisten. Am Beispiel der Transportbereifung wird deutlich, dass bei einer Befahrung des Ackers mit Reifennendrücken für die Straßenfahrt (z. B. 3 bar) auch schon bei geringen bis mittleren Radlasten (z. B. 2 bis 6 t) hohe Kontaktflächendrücke ($> 2,5$ bar) entstehen können. Die Untersuchungen zeigen, dass der Transport auf dem Feld ohne angepasste Bereifung und angepassten Reifennendruck einen Problembereich hinsichtlich bodenschonenden Befahrens darstellt. Hier besteht zukünftig verstärkt Optimierungsbedarf. Das vorgestellte Konzept und Verfahren kann hierbei einen wichtigen Beitrag leisten.

Die mechanische Belastung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Technik konnte aus einer Vielzahl von Prüfstand- und Feldmessungen (z. B. Kontaktflächen, Kontaktflächendruck, Bodendruck etc.) zu Maschinenparametern (wie z. B. Reifengröße, Reifennendruck, Radlast etc.) und verfahrensspezifischen Parametern (Überrollhäufigkeit, Spurflächenanteil etc.) abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Verknüpfung der mechanischen Belastung mit der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und der Ableitung von Befahrbarkeitstagen werden im nachfolgenden Kapitel 5.3 am Beispiel der Silomaisernernte gezeigt.

5.3 Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung muss eine Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Bodenbelastung durch die jeweilige Maschine bzw. die Verfahrenskette erfolgen. Hierbei müssen zwangsläufig die regionalen Einsatzzeiten der jeweiligen Maschine zur angebauten Kulturart berücksichtigt werden.

Zur Ableitung der mechanischen Belastung der jeweiligen Maschine bzw. Verfahrenskette für die Silomaisernernte wurde das in Kap. 4.2 beschriebene Verfahren zur Ermittlung des jeweiligen Belastungskennwertes auf drei unterschiedliche Technikvarianten angewendet (vgl. Abbildung 19). Zur besseren Verständlichkeit sind in den Abbildungen 20 und 21 die drei untersuchten Technikvarianten der Silomaisernernte illustriert und beschrieben.

Technikvariante 1 besteht aus dem Häcksler und der Transporteinheit (Traktor plus Häckselgutwagen), der das Häckselgut direkt zum Silo fährt. Dieser Häckselgutwagen verfügt nicht über eine Reifennendruckverstellanlage, deshalb muss er mit dem Reifennendruck für die Straßenfahrt (ca. $> 3,0$ bar) auch auf dem Feld fahren. Durch die hohen Reifennendrucke und eine 6-fache Überrollung kommt es zu hohen mechanischen Belastungen. Der „**Feldhäcksler mit Häckselwagen direkt zum Silo**“ (Technikvariante 1) erreicht dabei mit den Spezifikationen (max. 7 t Radlast, max. 3 bar Reifennendruck, max. 1,2 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 7-facher Überrollung und einem Spurflächenanteil von 33 %) einen Belastungskennwert von 0,58 und ist demnach in Belastungsklasse 4 (hoch) einzuordnen (vgl. Tabelle 2, Kap. 4.2 und rote Linie in Abbildung 19 und Abbildung 20 links).

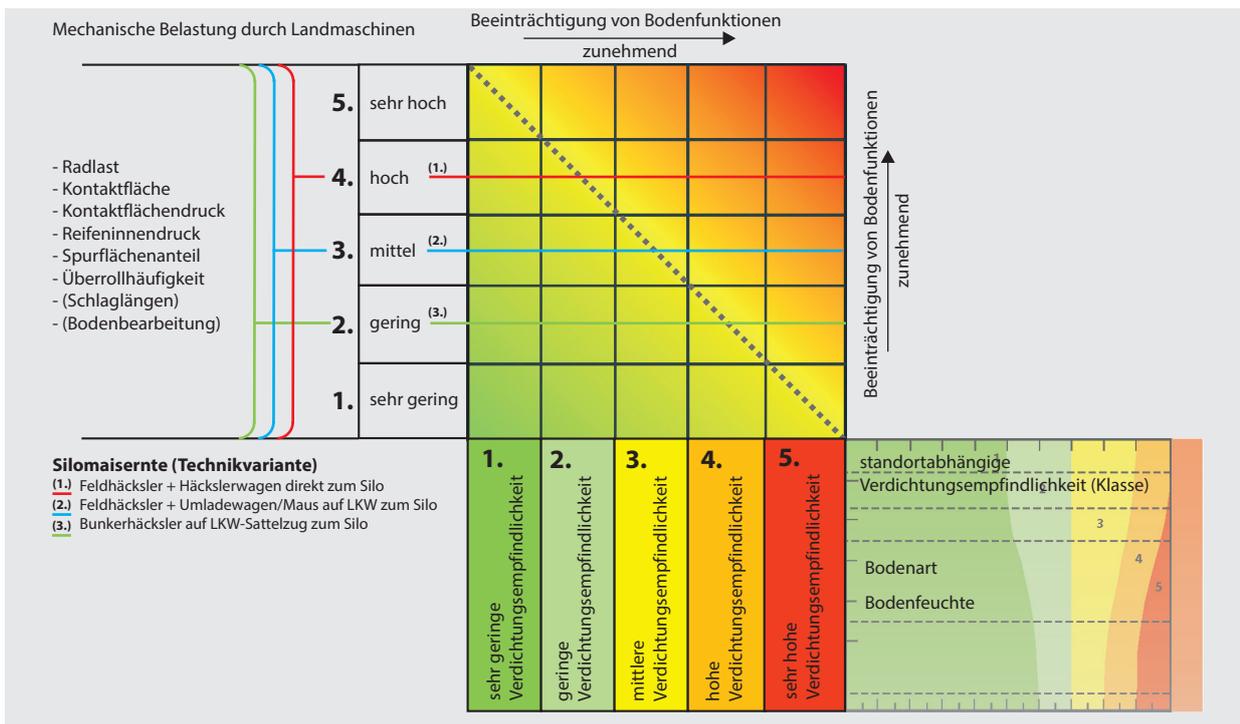


Abbildung 19
Schema der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Silomaisertechnikvarianten (verändert nach Brunotte et al., 2015)



Abbildung 20
Technikvariante 1 (links: Häcksler + Häckslerwagen direkt zum Silo, rote Linie in Abbildung 19, Foto: Ortmeier, TI), Technikvariante 2 (rechts: Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Trennung von Feld- und Straßenfahrt, blaue Linie in Abbildung 19, Foto: Brunotte, TI)

Bei **Technikvariante 2** werden durch das Überladen auf LKW am Feldrand Feld- und Straßenfahrt getrennt, so dass das Überladefahrzeug mit einem geringen Reifeninnendruck (ca. 1,5 bar) fahren kann und so die Bodenbelastung reduziert wird, obwohl der Boden auch hier 6-fach überrollt wird. Für das Verfahren „**Häcksler + Überladewagen auf LKW zum Silo**“ (Technikvariante 2), d. h. Trennung von Feld- und Straßenfahrt (max. 7 t Radlast, max. 1,6 bar Reifeninnendruck, max. 1,0 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 6-facher Überrollung und einem Spurflächenanteil von 33 %) ergibt sich

danach ein Belastungskennwert von 0,51. Technikvariante 2 wird somit in Belastungsklasse 3 (Mittel) eingeordnet (blaue Linie in Abbildung 19 und Abbildung 20 rechts).

Technikvariante 3 ist der Bunkerhäcksler. Das Häckselgut wird im Bunker des Häckslers transportiert und am Feldrand auf LKW umgeladen. Durch breite Bereifung und an den Acker angepassten Reifeninnendruck entstehen größere Reifenaufstandsflächen und der Kontaktflächendruck wird gesenkt. Das dritte Verfahren „**Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo**“ (Technikvariante 3: max. 8 t Radlast, max.



Abbildung 21
Technikvariante 3 (Bunkerhäcksler auf Straßentransportfahrzeug (LKW-Sattelzug/Traktor mit Häckselgutwagen) zum Silo, grüne Linie in Abbildung 19), (Foto: Claas, Harsewinkel)

1,5 bar Reifeninnendruck, max. 1,0 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 1-facher Überrollung (Hundegang) und einem Spurfächenanteil von 66 %) kommt auf einen Belastungskennwert von 0,44 und wird damit in Belastungsklasse 2 (gering) eingestuft (grüne Linie in Abbildung 19 und Abbildung 21). Diese Technikvariante ist hinsichtlich Bodenschonung die günstigste der betrachteten Varianten.

Hieraus lassen sich für bestimmte Einsatzzeiträume, z. B. bei der Silomaisernte, für unterschiedliche Mechanisierungen Tage mit hoher bzw. niedriger Verdichtungsempfindlichkeit bzw. Tage mit hoher oder niedriger Verdichtungsgefahr (Befahrbarkeitstage) ableiten. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für die neun Beispielstandorte und die drei Technikvarianten für die Silomaisernte im Zeitraum 01.09. bis 31.10. Angegeben ist die Anzahl der Befahrbarkeitstage für die jeweilige Technikvariante (vgl. Abbildung 19) bis zur jeweiligen

zulässigen Verdichtungsempfindlichkeitsklasse, berechnet aus dem Mittelwert der entsprechenden Bodenartenklasse (vgl. Abbildung 4). Die Werte in Klammern kennzeichnen die obere und untere Grenze der jeweiligen Bodenartenklasse und damit die bodenartbedingte Schwankungsbreite.

Es wird deutlich, dass die verfügbaren Befahrbarkeitstage sowohl zwischen den Standorten, als auch zwischen den Mechanisierungsvarianten schwanken. Beispielhaft sollen die Standorte 3 und 4 verglichen werden. In der Technikvariante 1 mit der höchsten mechanischen Belastung (Häcksler + Häckselwagen direkt zum Silo, Abbildung 19) stehen auf dem eher trockeneren Standort 3 im Zeitraum 01.09. bis 31.10. insgesamt 60 (±1) Tage für eine bodenschonende Befahrung während der Ernte zur Verfügung. Auf dem sehr feuchten Standort 4 sind es mit ca. 30 (±2) Tagen nur halb so viele. In der Technikvariante mit mittlerer Belastung

Tabelle 5

Befahrbarkeitstage bei der Silomaisernte für die Technikvarianten 1 bis 3 und die Standorte 1 bis 9 für die Kulturart Silomais (01.09. bis 31.10.)

Oberboden			
insg. 61	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 31.10)		
Beispielstandorte	(1.) Feldhäcksler + Häckselwagen direkt zum Silo	(2.) Feldhäcksler + Umladewagen/ Maus auf LKW zum Silo	(3.) Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo
SI2 1.	39 (±2)	61	61
SI2 2.	61	61	61
SI4 3.	60 (±1)	61	61
SI4 4.	30 (±2)	41 (±2)	59 (±2)
Ut3 5.	61	61	61
Ut3 6.	61	61	61
Lu 7.	38 (±2)	48 (±3)	57 (±3)
Lu 8.	52 (±2)	61	61
Lu 9.	39 (±2)	49 (±3)	58 (±3)

Unterboden			
insg. 61	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 31.10)		
Beispielstandorte	(1.) Feldhäcksler + Häckselwagen direkt zum Silo	(2.) Feldhäcksler + Umladewagen/ Maus auf LKW zum Silo	(3.) Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo
fs 1.	56 (±2)	61	61
mS 2.	61	61	61
Ls3 3.	61	61	61
Lt2 4.	35 (±2)	46 (±3)	57 (±3)
Ut4 5.	61	61	61
Ut4 6.	61	61	61
Su3 7.	60 (±1)	61	61
SI2 8.	61	61	61
Tu3 9.	38 (±2)	57 (±3)	61

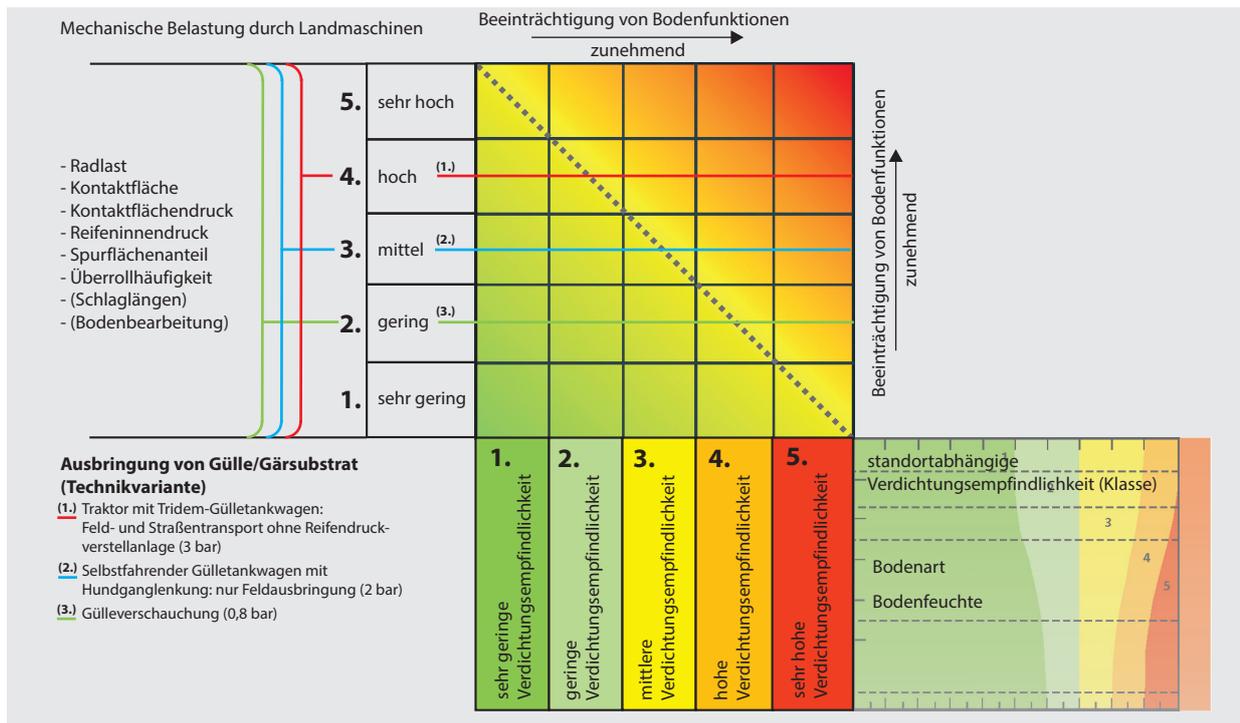


Abbildung 22

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Ausbringung von Gülle und Gärssubstrat

(Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Trennung von Feld- und Straßenfahrt) sind es immer noch ca. 20 Tage weniger und in Technikvariante 3 bei geringerer mechanischer Belastung (Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo) stehen auf dem feuchten Standort 4 mit 59 (±2) fast genauso viele Tage wie auf dem trockeneren Standort 3 (61 Tage) zur Verfügung.

Auch zwischen den Mechanisierungsvarianten treten deutliche Unterschiede auf. Auf Standort 4 stehen z. B. bei der Technikvariante 1 (Häcksler + Häckselwagen direkt zum Silo, Straßenluftdruck auf dem Feld, Abbildung 19 und 20 links) im Zeitraum 01.09. bis 31.10. nur die Hälfte der Tage (ca. 30 von insgesamt 61) zur Verfügung. Durch Trennung von Feld- und Straßenfahrt (Technikvariante 2: Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Abbildung 19 und 20 rechts) sind es 11 Tage mehr. Bei Verwendung eines Bunkerhäckslers und damit Reduzierung der Bodenbelastung durch größere Bereifung und Reduzierung der Überrollhäufigkeit (Technikvariante 3) kann nahezu der gesamte Zeitraum genutzt werden (59 Tage).

Dies zeigt deutlich die Möglichkeiten auf, die sich durch angepasste Mechanisierung und Maschinenparameter für ein bodenschonendes Befahren ergeben. Weiterhin wird deutlich, dass die Mechanisierung unbedingt an die jeweiligen aktuellen Standortverhältnisse angepasst werden muss. So zeigt sich auf dem feuchten Standort 4, dass durch eine Verfahrensoptimierung sehr große Erfolge hin zu einem bodenschonenden Befahren erzielt werden können. Auf dem trockeneren Standort 3 mit generell geringerer

Verdichtungsempfindlichkeit in diesem Zeitraum treten zwischen den Technikvarianten auch geringere Unterschiede auf. Speziell auf Standorten mit hoher bzw. im Jahresverlauf stark schwankender Bodenfeuchte und damit Verdichtungsempfindlichkeit, sollte in verstärktem Maße auf eine Anpassung der Mechanisierung an die vorherrschenden Bodenverhältnisse geachtet werden, um auch hier eine bodenschonende Befahrung der Flächen zu realisieren.

Bei der Ausbringung von **Gülle und Gärsubstrat** (Abbildung 22 und Tabellen 6 und 7) wurden sowohl die Herbst- als auch die Frühjahrsausbringung untersucht. Hierbei wird deutlich, dass die Gülleausbringung im Spätwinter bzw. im zeitigen Frühjahr generell mit hohem Risiko für Bodenverdichtungen verbunden ist. Hohe Belastungen werden zu einer Zeit aufgebracht, in der eine hohe Bodenfeuchte und damit auch eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit der Böden vorherrschen. Dies wird in der Zahl der Befahrtstage (vgl. Tabellen 6 und 7) und deren Vergleich zwischen Herbst- und Frühjahrsausbringung deutlich. Im Herbst (vgl. Tabelle 6) steht z. B. auf Standort 5 in den Varianten Gülle selbstfahrer und Gülleverschlauchung im Zeitraum 01.09. bis 31.10. noch die komplette Zeit von 61 Tagen für die Gülleausbringung zur Verfügung. Gleiches gilt für Standort 6. In der Variante Traktor mit Tridemgülewagen sind es in diesem Zeitraum auf Standort 5 noch ca. 36 Tage und auf Standort 6 ca. 50 Tage. Im Frühjahr (Tabelle 7) gibt es auf beiden Standorten im Mittel der Jahre im Zeitraum 01.02. bis 30.04. (89 Tage) für die Variante Traktor mit Tridemgülewagen keinen Tag an dem die Gülle bodenschonend ausgebracht

werden kann. Die beiden anderen Varianten zeigen am Standort 5 im Oberboden 9 bzw. 24 Tage am Standort 6, 11 bzw. 39 Tage. Der Unterboden ist jedoch zu dieser Zeit auf beiden Standorten für eine Gülleausbringung zu feucht.

Dies zeigt deutlich die Problematik, die sich aus einer Verschiebung eines großen Teils der Gülleausbringung

vom Herbst in das Frühjahr aus Sicht des Bodenschutzes und der Befahrbarkeit ergibt. In einzelnen Jahren, in denen ein trockeneres Frühjahr vorherrscht, stehen mehr Befahrbarkeitstage zur Verfügung, in feuchten Jahren allerdings noch weniger. Die Verwendung mittlerer, langjähriger Daten soll die langfristige Planung unterstützen und mögliche

Tabelle 6

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Ausbringung von Gülle zu Winterweizen im Herbst (01.09. bis 31.10.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)			insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)		
Herbst	(1.)	(2.)	(3.)	Herbst	(1.)	(2.)	(3.)
Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Gülletankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckverstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Gülletankwagen mit Hundeganglenkung: nur Felddausbringung (2,0 bar)	Gülleverschlauchung (0,8 bar)	Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Gülletankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckverstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Gülletankwagen mit Hundeganglenkung: nur Felddausbringung (2,0 bar)	Gülleverschlauchung (0,8 bar)
SI2 1.	8 (± 2)	36 (± 2)	61	fs 1.	11 (± 2)	48 (± 2)	61
SI2 2.	57 (± 2)	61 (± 2)	61	mS 2.	61	61	61
SI4 3.	35 (± 2)	60 (± 1)	61	Ls3 3.	51 (± 2)	61	61
SI4 4.	0 (+2)	0 (+2)	34 (± 2)	Lt2 4.	0 (+2)	0 (+2)	9 (± 3)
Ut3 5.	36 (± 2)	61	61	Ut4 5.	37 (± 2)	61	61
Ut3 6.	56 (± 2)	61	61	Ut4 6.	50 (± 2)	61	61
Lu 7.	9 (± 2)	25 (± 2)	36 (± 2)	Su3 7.	14 (± 2)	61	61
Lu 8.	35 (± 2)	49 (± 3)	61	SI2 8.	31 (± 2)	61	61
Lu 9.	0 (+2)	2 (± 1)	26 (± 4)	Tu3 9.	0 (+2)	0 (+2)	18 (± 5)

Tabelle 7

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Ausbringung von Gülle zu Mais im Frühjahr (01.02. bis 30.04.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 89	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.02. bis 30.04)			insg. 89	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.02. bis 30.04)		
Frühjahr	(1.)	(2.)	(3.)	Frühjahr	(1.)	(2.)	(3.)
Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Gülletankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckverstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Gülletankwagen mit Hundeganglenkung: nur Felddausbringung (2,0 bar)	Gülleverschlauchung (0,8 bar)	Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Gülletankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckverstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Gülletankwagen mit Hundeganglenkung: nur Felddausbringung (2,0 bar)	Gülleverschlauchung (0,8 bar)
SI2 1.	0 (+2)	17 (±2)	73 (±2)	fs 1.	0 (+2)	0 (+2)	20 (±2)
SI2 2.	0 (+2)	34 (±2)	89 (±2)	mS 2.	0 (+2)	0 (+2)	46 (±2)
SI4 3.	0 (+2)	14 (±2)	33 (±2)	Ls3 3.	0 (+2)	0 (+2)	6 (±3)
SI4 4.	0 (+2)	0 (+2)	10 (±2)	Lt2 4.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Ut3 5.	0 (+2)	10 (±2)	29 (±4)	Ut4 5.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Ut3 6.	0 (+2)	13 (±2)	45 (±5)	Ut4 6.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Lu 7.	0 (+2)	0 (+2)	14 (±3)	Su3 7.	0 (+2)	0 (+2)	89
Lu 8.	0 (+2)	3 (±3)	22 (±4)	SI2 8.	0 (+2)	0 (+2)	89
Lu 9.	0 (+2)	0 (+2)	10 (±2)	Tu3 9.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)

mittel- und langfristige Probleme aufzeigen. Bei der Diskussion um die Novellierung der Düngeverordnung sollten daher beim dargestellten Problembereich Gülleausbringung im Frühjahr verstärkt auch Bodenschutzaspekte mit einbezogen werden. Die Integration von Boden- und Gewässerschutz (Anforderungen der Düngeverordnung) gelingt letztlich nur mit ausreichender Güllelagerkapazität, die es erlaubt, die Gülle zu Zeiten des Pflanzenbedarfs auf tragfähigen Böden auszubringen.

Dieses Verfahren zur Ableitung der Befahrbarkeitstage wurde auch für die Getreideernte (Anhang Kap. 9, Abbildung 32, Winterweizen Tabelle 13, Sommerweizen Tabelle 14), die Zuckerrübenenernte (Abbildung 31, Tabelle 12), und die Kartoffelernte (Abbildung 33, Tabelle 15) angewendet. Die entsprechenden Abbildungen und Tabellen finden sich im Anhang (Kap. 9).

6 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse anhand des Standortes Adenstedt

Um die ermittelten Werte für die Befahrbarkeitstage für unterschiedliche Zeiträume und unterschiedliche Kulturen auf ihre Plausibilität prüfen zu können, wurden im Jahr 2014 weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde auf Standort 5 (Adenstedt) ein mit Winterweizen bestellter Schlag vom Landwirt selbst täglich auf seine Befahrbarkeit hinsichtlich der zum jeweiligen Zeitpunkt verwendeten Technik eingeschätzt und in die 5 Klassen des Bewertungssystems eingestuft. Dies sollte die Plausibilität der Werte des vorgestellten Verfahrens überprüfen. Um Abweichungen im klimatischen Verlauf des Jahres 2014 von den 30-jährigen Mittelwerten berücksichtigen zu können, wurden die täglichen Bodenfeuchten für den Standort für das Jahr 2014 mit dem Modell AMBAV (Löpmeier, 2013) modelliert. Grundlagen waren Wetterstationsdaten der nächstgelegenen Wetterstation Alfeld, die ebenfalls bei den Berechnungen der 30-jährigen Mittel einbezogen wurden, und eigene Messungen am Standort. Weiterhin wurden die modellierten täglichen Bodenfeuchten des AMBAV Modells

als 30-jährige Mittel mit in die Untersuchungen einbezogen. Hieraus ergeben sich 3 Verfahren, die nachfolgend vergleichend gegenübergestellt werden sollen:

1. Reale Experteneinschätzung der Befahrbarkeit vor Ort,
2. Ermittlung der Befahrbarkeitstage auf Grundlage der modellierten Bodenfeuchtedaten des DWD aus dem Modell AMBAV für das Jahr 2014,
3. Ermittlung der Befahrbarkeitstage auf Grundlage der langjährigen modellierten Bodenfeuchtedaten des DWD aus dem Modell AMBAV des DWD (30-jährige Reihe)

Für die Verfahren 2. und 3. wurden die Tage im jeweiligen Monat den fünf Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit nach der beschriebenen Methodik (vgl. Kap. 4) zugeordnet. Der Boden wurde am jeweiligen Tag als befahrbar eingeordnet, wenn an diesem Tag geringe (Klasse 2.) oder sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 1.) vorlag.

Abbildung 23 zeigt die Niederschlagsverteilung als Monatswerte des Jahres 2014 (rot) im Vergleich zum langjährigen mittleren Niederschlag (1989 bis 2013, schwarz). Weiterhin sind die Minimum- und Maximum-Werte des jeweiligen Monats für den langjährigen Zeitraum 1989 bis 2013 unterhalb der Monatsbezeichnungen angegeben. Der Jahresniederschlag des Jahres 2014 lag mit 767 mm genau 50 mm unter dem langjährigen Niederschlag von 817 mm.

Bei Betrachtung der einzelnen Monate zeigen sich Abweichungen des Jahres 2014 von den mittleren langjährigen Werten. So gibt es sehr trockene Monate mit geringen Niederschlägen, wie z. B. März und November, aber auch sehr feuchte Monate mit überdurchschnittlich hohen Niederschlägen, wie z. B. Mai und Juli. Weiterhin gibt es Monate mit Niederschlägen, die dem langjährigen Mittel entsprechen, wie z. B. Juni und Dezember.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der täglichen Vor-Ort-Beurteilung des Landwirtes zur Befahrbarkeit (grün) und die entsprechenden täglichen Niederschläge (blau) dargestellt. Ein Wert der Befahrbarkeit von 2 bedeutet sehr gute Befahrbarkeit, ein Wert von 1 gute Befahrbarkeit. Es zeigt sich ein plausibler Zusammenhang zwischen hohen Tagesniederschlägen und der Befahrbarkeit des Standortes. Nach hohen Niederschlägen und damit Durchfeuchtung des Bodens ist

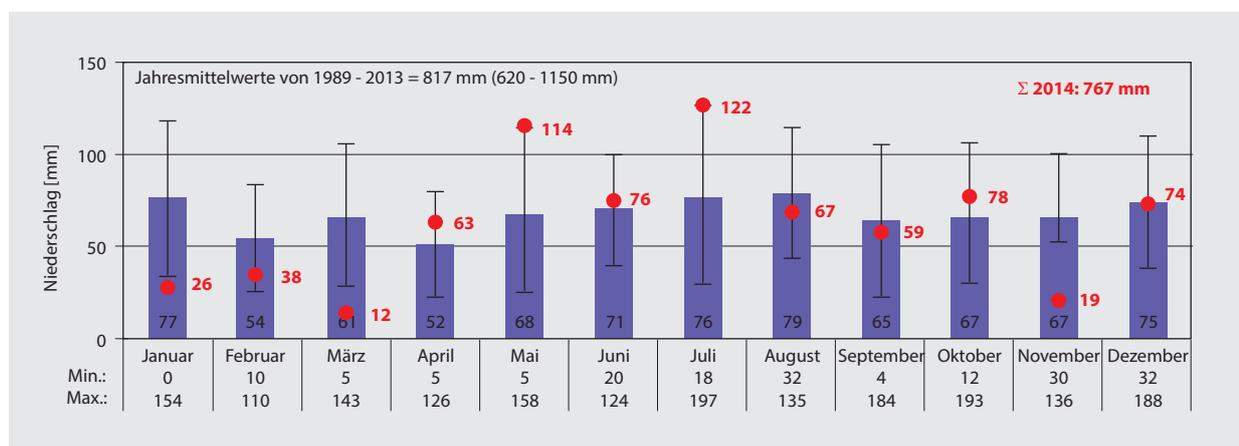


Abbildung 23

Niederschlagsverteilung für Standort 5 (Adenstedt) von 1989 bis 2013 im Vergleich zu den Monatswerten aus 2014

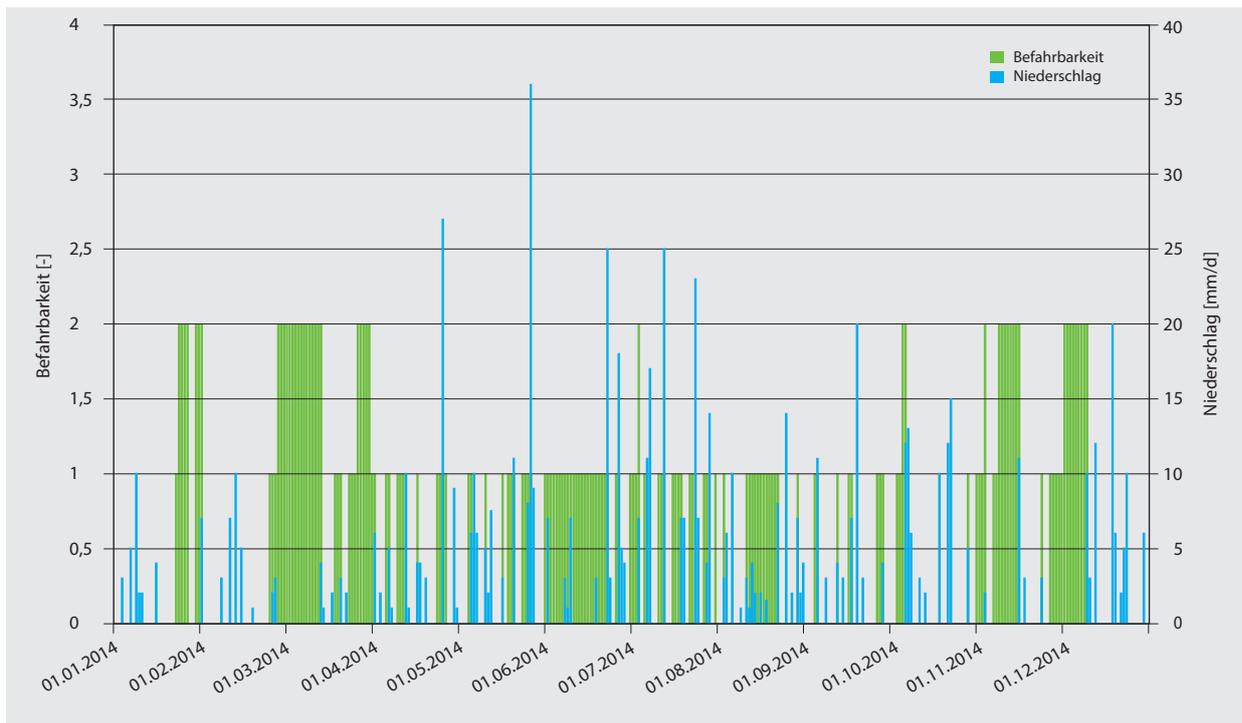


Abbildung 24
Niederschläge und Befahrbarkeitstage auf Standort 5 (Adenstedt) 2014

der Boden z. T. mehrere Tage danach nicht befahrbar und muss erst wieder abtrocknen, bevor er befahren werden kann. Im Sommer bei höheren Temperaturen und geringeren Bodenfeuchten kann diese Phase sehr kurz sein, im Herbst bei niedrigeren Temperaturen und höheren Bodenfeuchten auch länger.

Die in Abbildung 24 dargestellte erste Phase der Befahrbarkeit Ende Januar bis Anfang Februar ist auf vorherrschenden Bodenfrost zurückzuführen. Im zu Grunde liegenden Modell AMBAV wird Bodenfrost nicht in die Modellierung einbezogen, so dass es dadurch im Januar und Februar zu Abweichungen kommen kann. Weiterhin treten eine Reihe von Starkregenereignissen (≥ 20 mm/ 6 h, DWD, 2016) auf. Zwischen Anfang Mai und Ende Juli wurden im Jahr 2014 auf dem Standort insgesamt 5 Starkregenereignisse registriert.

In Tabelle 8 sind die ermittelten Befahrbarkeitstage nach den drei beschriebenen Verfahren dargestellt. Es zeigen sich generell recht gute Übereinstimmungen zwischen der realen Begutachtung der Befahrbarkeit und der Modellierung für das gleiche Jahr 2014. Zwischen den verschiedenen Monaten und den langjährigen Werten treten jedoch gewisse Unterschiede auf.

Im **Januar** und **Februar** finden sich in beiden Modellberechnungen (Verfahren 2. und 3.) keine Tage mit ausreichender Befahrbarkeit. Die Unterschiede zur realen Begutachtung treten durch die Berücksichtigung von Bodenfrost auf, der in den Modellbetrachtungen nicht integriert ist. Der **März** war im Jahr 2014 ein sehr trockener Monat. Die Berechnungen für das Jahr 2014 (Verfahren 2.) stimmen gut mit den realen Beobachtungen überein. Im Vergleich zu den langjährigen mittleren Werten treten aufgrund der sehr trockenen

Tabelle 8

Befahrbarkeitstage nach drei Verfahren (1. Reale Experteneinschätzung, 2. Wetterdaten DWD für 2014, 3. Langjährige Wetterdaten des DWD (30-jährige Reihe))

Winterweizen	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
(1.) Befahrbarkeitstage 2014 (real)	8	5	25	13	12	25	19	17	16	14	19	9
(2.) Befahrbarkeitstage 2014 (DWD - AMBAV)	0	0	23	18	9	25	17	17	14	12	10	2
(3.) Befahrbarkeitstage 1971 bis 2000 (DWD - AMBAV)	0	0	0	13	24	27	31	31	30	21	6	0
Tage im Monat	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Bedingungen jedoch größere Unterschiede auf. Für den **April** und auch den **Juni** als durchschnittliche Monate liefern beide Modellierungen im Vergleich zu den realen Beobachtungen gute Übereinstimmungen. Die Monate **Mai** und **Juli** waren im Jahr 2014 sehr feuchte Monate mit hohen Niederschlagssummen. Daher fallen auch die Befahrbarkeitstage im Vergleich zum langjährigen Mittel geringer aus. Die berechneten Werte für das Jahr 2014 stimmen jedoch sehr gut mit den Beobachtungen überein. Im **August, September** und **Oktober** zeigen sich ähnliche Tendenzen. Die ermittelten Befahrbarkeitstage für diese Monate stimmen gut mit den Beobachtungen überein, liegen jedoch beide deutlich unter den langjährigen mittleren Werten. Der **November** war im Jahr 2014 ein sehr trockener Monat. Daher liegen die Berechnungen ebenso wie die Beobachtungen der Befahrbarkeitstage über denen des langjährigen Mittels.

In Tabelle 9 sind in Ergänzung dazu die Befahrbarkeitstage nach Halbjahren aufgeteilt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Berechnungen der Befahrbarkeitstage in der **Vegetationszeit** von April bis September des Jahres 2014 gut mit den Beobachtungen übereinstimmen. Im **Winterhalbjahr** treten jedoch, u. a. auch aufgrund der Berücksichtigung von Bodenfrost, modellbedingt Unterschiede auf. Für das gesamte Jahr liefern die langjährigen mittleren Werte der Befahrbarkeit eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen, in den einzelnen Halbjahren treten jedoch, aufgrund des unterschiedlichen Witterungsverlaufes größere Abweichungen auf.

Tabelle 9

Anteile der Befahrbarkeitstage am jeweiligen Zeitraum nach 3 Verfahren (1. Reale Experteneinschätzung, 2. Wetterdaten DWD für 2014, 3. Langjährige Wetterdaten des DWD (30-jährige Reihe)); BFT = Befahrbarkeitstage, TjJ = Tage im Jahr

	Zeitraum Jan. bis Dez.			Zeitraum Apr. bis Sept.			Zeitraum Okt. bis März		
	BFT	TjJ	%	BFT	TjJ	%	BFT	TjJ	%
Winterweizen									
Befahrbarkeitstage 2014 (real)	182	365	50	102	183	56	80	182	44
Befahrbarkeitstage 2014 (DWD - AMBAV)	147	365	40	100	183	55	47	182	26
Befahrbarkeitstage 1971 bis 2000 (DWD - AMBAV)	183	365	50	156	183	85	27	182	15

Der Vergleich der Ergebnisse des hier beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung der Befahrbarkeit mit realen Beobachtungen am Standort zeigt, dass das System plausible Ergebnisse mit guten Übereinstimmungen liefert. Größere Unterschiede zu den langjährigen mittleren Verhältnissen treten durch unterschiedliche Witterungsverläufe in Einzeljahren (hier 2014) und Einzelmonaten und die unterschiedliche Berücksichtigung von Bodenfrost auf. Die Abweichungen sind bei Betrachtung der Niederschläge ebenfalls plausibel. Wird das beschriebene Verfahren auf den

Witterungsverlauf des Einzeljahres (hier 2014) angewendet, liefert es gute Übereinstimmungen zu den realen Beobachtungen.

Es zeigt sich an diesen ersten Überprüfungen des Verfahrens, dass es zu einer guten Übereinstimmung mit realen Beobachtungen geführt hat. Es besteht jedoch die Notwendigkeit einer breiteren und überregionalen Plausibilisierung des Verfahrens. Zukünftig sollte das Verfahren daher Anwendung auf weitere Regionen finden und auf unterschiedlichen Skalen eingesetzt werden, um es weiter auf seine Plausibilität zu testen. Weiterhin haben das verwendete Bodenwasserhaushaltsmodell und die zu Grunde liegenden Bodendaten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Daher sollen in weiteren Schritten andere Bodenwasserhaushaltsmodelle und Bodendaten Anwendung finden.

7 Zusammenfassung, weiteres Vorgehen und Ausblick

Aus den zur Verfügung stehenden bodenkundlichen Grundlagendaten (z. B. BÜK 1000N), dem Einsatz des Bodenwassermodells AMBAV und Expertenwissen konnten für typische Standorte Deutschlands die **Verdichtungsempfindlichkeit von Böden** (Ober- und Unterböden) im langjährigen Jahresverlauf und **verfügbare Befahrbarkeitstage** abgeleitet werden. Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung erfolgte eine **Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit (Tragfähigkeit) der Böden mit der Bodenbelastung** bzw. der Belastung durch die jeweilige Maschine bzw. die Verfahrenskette. Die mechanische Belastung konnte aus einer Vielzahl von Prüfstand- und Feldmessungen (z. B. Kontaktflächen, Kontaktflächendruck, Bodendruck), Maschinenparametern (wie z. B. Reifengröße, Reifeninnendruck, Radlast) und verfahrensspezifischen Parametern (Überrollhäufigkeit, Spurfächenanteil etc.) abgeleitet und der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit gegenübergestellt werden.

Zur Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen wurde ein Schema von Brunotte et al., (2015, verändert nach Chamen et al., 2003) verwendet und angepasst. Hieraus lassen sich **mittlere regionale Einsatzzeiten der jeweiligen Mechanisierungsverfahren** angeben und **Handlungsempfehlungen für den Maschineneinsatz im Sinne eines bodenschonenden Befahrens von Ackerflächen** ableiten.

Neben der Silomaisenernte wurde dies für die Mähdruschernte, Zuckerrübenenernte, Kartoffelernte und die Ausbringung von Gülle und Gärresten umgesetzt.

Mit diesem **Ansatz zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von ackerbaulich genutzten Böden** in Deutschland können regionale Befahrbarkeitstage abgeleitet werden. Die Kombination mit praxisüblicher Maschinenteknik und Verfahrensketten macht die **Ableitung von schlüssigen und praxistauglichen Empfehlungen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerflächen** möglich und gibt so dem Landwirt konkrete Lösungsvorschläge an

die Hand. Dieses System wurde in Abstimmung mit einer Expertengruppe der Bodenspezialisten der Bundesländer und einer KTBL Arbeitsgruppe zu verfügbaren Feldarbeitstagen entwickelt und abgestimmt. Weiterhin wurde ein erweiterter Kreis mit Experten aus unterschiedlichen Bundesländern zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und des Konzeptes mit einbezogen. Der Vergleich mit realen Beobachtungen zur Befahrbarkeit auf einem Standort zeigt, dass das vorgestellte Verfahren plausible Werte liefert.

Die Ausarbeitung und Angabe von z. B. regionalen Befahrbarkeitstagen in den wichtigsten Zeitspannen auf Grundlage von Klimadaten sind für den Landwirt/Lohnunternehmer eine wertvolle Hilfe, Maschineninvestitionen, -auslastungen und Einsatzzeiten besser zu planen und somit eine situationsabhängige Anpassung der Mechanisierung (Maschine, Fahrwerk, Belastung) an die jeweiligen vorherrschenden Bodenverhältnisse umzusetzen. Somit existiert ein konkreter Lösungsvorschlag zur „Anpassung der mechanischen Belastung von Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden“. Dies ist für die Landmaschinenindustrie und die praktische Landwirtschaft eine wichtige Hilfestellung, nicht nur für die mittel- bis langfristige Investitionsplanung, sondern auch für die Umsetzung eines nachhaltigen Bodenschutzes bei der Befahrung von Ackerflächen.

Das hier entwickelte Konzept zur **Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden** stellt daher ein wichtiges Managementinstrument moderner Landbewirtschaftung dar. Die aus Verdichtungsempfindlichkeit und mechanischer Belastung abgeleiteten regionalen **Befahrbarkeitstage** dienen auf Betriebsebene der Planung von Investitionen und dem Einsatz in der Erntekampagne. Langfristig soll eine **Online-Anwendung** entwickelt werden, bei der sowohl Wettervorhersagedaten der regionalen Wetterstation als auch betriebsindividuelle Maschinendaten eingegeben werden, um somit eine standortspezifische Einsatzplanung zu ermöglichen.

Während auf der **Planungsebene** der potenzielle Einsatz vorbereitet wird, wird auf der **Schlagebene** über den tatsächlichen Einsatz entschieden. Dies geht nur vor Ort mit Instrumenten wie z. B. der „**Feldgefügeansprache**“. Mit dem Spaten wird ein kleines Profil ausgehoben, um Bodenstruktur und -feuchte zu kontrollieren. Sensorik aus der Forschung hilft während der Befahrung z. B. Bodensetzung punktuell und Spurtiefe online zu erfassen. So hat der Maschinenführer permanent eine **Anzeige zur Beobachtung der Bodenzustände** und kann ggf. Fahrzeugparameter bzw. ganze Arbeitsketten anpassen oder ändern.

Teure Spezialmaschinen fordern aus Rentabilitätsgründen hohe **Auslastungsgrade**. Zählt die Erhaltung der **Bodenfruchtbarkeit** mit zu den prioritären Zielen der Landbewirtschaftung, kann sich der Einsatz nicht ausschließlich nach der technischen Machbarkeit z. B. beim Ernten richten. Einerseits müssen Zeitfenster eingebaut werden, in denen die Maschinen nach hohen Niederschlagsmengen pausieren. Andererseits müssen Arbeitsketten umstrukturiert werden können, um das Maß der Bodenschonung zu erhöhen. Hier sind Forschung und Beratung stark gefordert, denn erst wenn der monetäre Nutzen z. B. aus einem Überladen der

Maissilage am Feldrand auf LKWs beziffert wird, kann mit einer Akzeptanzsteigerung in der Praxis gerechnet werden. Den **Nutzen** aus Maßnahmen zum Bodenschutz und zur Bodenschonung zu monetarisieren (z. B. KTBL, 2011; 2013), ist die Herausforderung der nächsten Jahre.

Das vorgestellte Verfahren soll zukünftig in dem vom BMBF im Rahmen des BonaRes-Forschungsprogramm geförderten Projektes SOILAssist (Nachhaltige Sicherung und Verbesserung von Bodenfunktionen durch intelligente Landbewirtschaftung) einer weiteren Plausibilitätsprüfung für unterschiedliche Regionen, unter Einbeziehung und Prüfung von Einzel- und Extremjahren (trocken/feucht) unterzogen werden. Um die Einflüsse modellimmanenter Voraussetzungen und Festlegungen zu prüfen, den Modellfehler in den Ausgabeparametern und skalenbedingte Unterschiede zu verifizieren, ist die Einbindung weiterer Bodenwasserhaushaltsmodelle und Bodendaten auf unterschiedlichen Maßstabsebenen geplant. Darüber hinaus werden zukünftig weitere Technik- und Befahrungsvarianten wie z. B. bei der Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln, in das System integriert. Um die Verknüpfung der Befahrbarkeit mit der Bearbeitbarkeit des Bodens bei unterschiedlicher Bodenfeuchte für eine Abschätzung des Zeitraums einer optimalen Bodenbearbeitung zu realisieren, ist ein ergänzendes Verfahren zur Bestimmung der Bearbeitbarkeit von Böden derzeit in Entwicklung.

Literatur

- AG Boden (1994) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 392 p
- AG Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- aid (2015) Brunotte J, Schmidt W, Brandhuber R, Busch M, Honecker H, Bug J, Breitschuh T, Schrader S, Weyer T, Vorderbrügge T, von Chappuis A, Fröba N, Höppner F, Löber M, Mosimann T, Ortmeier B, List M (2015) Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn : AID, 118 p, AID 3614
- ATV-DVWK (2002) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Hennef : GFA-Ges zur Förderung der Abwassertechnik, 27 p
- BAFU, BLW (2013) Bodenschutz in der Landwirtschaft : ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bern : BAFU, 59 p, Umwelt-Vollzug 1313
- Bakker DM, Davis RJ (1995) Soil deformation observations in a vertisol under field traffic. Austral. J. Soil Res. 33:817-832.
- BBodSchG – Bundes-Bodenschutzgesetz (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundesgesetzblatt: Teil 1 / Bundesministerium der Justiz (16):502
- BBodSchV – Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999) Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bundesgesetzblatt: Teil 1 / Bundesministerium der Justiz (36):1554
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013a) Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1000 N) [online]. Zu finden in <<http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Informationsgrundlagen-abgeschlossen/BUEK1000N/BUEK1000N.html>> [zitiert am 25.11.2013]
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013b) Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) [online]. Zu finden in <<http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Informationsgrundlagen-laufend/BUEK200/BUEK200.html>> [zitiert am 25.11.2013]

- Blume H-P (1968) Stauwasserböden : vergleichende Untersuchungen über Entstehung und Standorteigenschaften von Waldböden mit und ohne Wasserstau und zugleich ein Beitrag zur Kenntnis der Böden Baden-Württembergs, Ostholsteins sowie der Dänischen Inseln. Stuttgart : Ulmer, 242 p, Arb Univ Hohenheim (Landwirtsch Hochschule) 42
- BMVEL (2001) Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. Bonn : BMELV, 105 p
- Bolling I, Söhne W (1982) Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik* 37:54-57
- Botta GF, Jorajuria CD, Draghi TL (1999) Soil compaction during secondary tillage traffic. *Agro-Ciencia* 15:139-144
- Botta GF, Tolon Beccerra A, Bellora Tourn F (2009) Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Tillage Res* 103:381-386
- Boussinesq J (1885) Application des potentiels á l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris : Gauthier-Villais, 721 p
- Braden H (1995) The model AMBETI : a detailed description of a soil-plant-atmosphere model. Offenbach : DWD, 117 p, Ber Dtschen Wetterdienstes 195
- Brandhuber R (2005) Bodengefüge : Status und Veränderungen. *SchrR Bayer Landesanst Landwirtsch* 8:57-60
- Brandhuber R, Dommel M, Geischeder R (2010) Bodengefügeschutz mit optimierter Fahrwerktechnik. *Schr Landesamt Umwelt Landwirtsch Geol* 15:38-45
- Brunotte J, Nolting K, Lorenz M, Sommer C, Isensee E (2007) Befahrbarkeits-sensor : flexibles Einsatzmanagement und Bodenschonung während der Ernte. *Zuckerrübe* 56(5):246-249
- Brunotte J, Fröba N (2007) Schlaggestaltung : kostensenkend und bodenschonend. *Darmstadt : KTBL*, 178 p, KTBL-Schr 460
- Brunotte J, Lorenz M, Sommer C, Harrach T, Schäfer W (2008) Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. *Ber Landwirtsch* 86(2):262-284
- Brunotte J, Brandhuber R, Vorderbrügge T (2015) Vorsorge gegen Bodenverdichtung. In: Henke W (ed) *Gute fachliche Praxis : Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz*. Bonn AID, pp 21-69, AID 3614
- Chamen WCT, Alakukku L, Pires S, Sommer C, Spoor G, Tijink FGJ, Weisskopf P (2003) Prevention strategies for field-traffic-induced subsoil compaction : a review ; part 2: Equipment and field practices. *Soil Tillage Res* 73(1-2):161-174
- Cramer B, Botschek J, Weyer T (2006) Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Bodenschutz* 3:78-85
- Czeratzki W (1972) Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforsch Völknerode* 22(1):29-36
- Destain MF, Roisin C, Dalcq AS, Mercatoris BCN (2016) Effect of wheel traffic on the physical properties of a Luvisol. *Geoderma* 262:276-284
- Deutscher Bundestag (2009) Unterrichtung durch die Bundesregierung : zweiter Bodenschutzbericht der Bundesregierung. Bonn, 77 p, Drucksache / Deutscher Bundestag 16/12658
- Diez T, Weigelt H (1997) Bodenstruktur erkennen und beurteilen : Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. DLZ-Agrarmag Sonderdr 1997
- DIN 19682-10 (1998) Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen : Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Berlin : Beuth
- DIN-V-19688 (2001) Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. DIN-Vornorm 19688. Berlin : Beuth
- Diserens E (2009) Calculating the contact area of trailer tires in the field. *Soil Tillage Res* 103:302-309
- Diserens E, Battiato A (2013) TASC V3.0-Prognose Bodengefährdung und Treibstoffverbrauch : eine PC-Anwendung zur Beurteilung der Bodenbeanspruchung im Ober- und Unterboden in der Land- und Forstwirtschaft sowie zur Schätzung des Energie- und Treibstoffbedarfs im Ackerbau. Ettenhausen : ART, 8 p, ART-Ber 766
- Dumbeck G (1986) Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Gießen : Univ, 236 p
- Duttmann R, Brunotte J, Bach M (2013) Spatial analyses of field traffic intensity and modeling of changes in wheel load and ground contact pressure in individual fields during a silage maize harvest. *Soil Tillage Res* 126:100-111
- Duttmann R, Schwanebeck M, Nolde M, Horn R (2014) Predicting soil compaction risks related to field traffic during silage maize harvest. *Soil Sci Soc Am J* 78(2):408-421
- DVWK (1995) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, 12 p, DVWK-Merkbl Wasserwirtsch 234
- DVWK (1997) Bodenphysikalische Untersuchungen über Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, DVWK-Materialien 1997,1
- DVWK (1999) Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung : Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, 29 p, DVWK-Regeln Wasserwirtsch 136
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2016) Wetterlexikon : Starkregen [online]. Zu finden in <<http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572>> [zitiert am 23.08.2016]
- Eckert H, Paul R, Fettisov A (2006) Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung. Themenblatt-Nr.: 46.17.220 der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena : Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, p 4-12
- Ehlers W, Schmidtke K, Rauber R (2003) Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. *Landnutzung Landentwickl* 44:9-18
- Fühler H (1973) Sauerstoffdiffusion im Boden. *Schweiz Anst forstl Versuchswes Mitt* 49:125-250
- Fraters B (1996) Generalized soil map of Europe : aggregation of the FAO-UNESCO soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes [online]. Zu finden in <<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/481505006.pdf>> [zitiert am 23.08.2016]
- Fröhlich OK (1934) Druckverteilung im Baugrunde. Wien : Springer, 185 p
- Gasso V, Sørensen CAG, Oudshoorn FW, Green O (2013) Controlled traffic farming : a review of the environmental impacts. *Eur J Agron* 48:66-73
- Garrigues E, Corson M, Angers D, Werf HG, Walter C (2013) Development of a soil compaction indicator in life cycle assessment. *Int J LCA* 18:1316-1324
- Geischeder R (2011) Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. *Freising : Geischeder*, 196 p, Forschungsber Agrartechn Arbeitskr Forsch Lehre MEG 504
- Gieska M, van der Ploeg RR, Schweigert P, Pinter N (2003) Physikalische Bodendegradierung in der Hildesheimer Börde und das Bundes-Bodenschutzgesetz. *Ber Landwirtsch* 81(4):485-511
- Glante F, Marahrens S, Mathews J, Hillges F (2009) Einsatz von Länderdaten für Bundesaufgaben [online]. Zu finden in <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Einsatz_von_Laenderdaten_fuer_Bundesaufgaben.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Håkansson I (2005) Machinery-induced compaction of arable soils : incidence - consequences - counter measures [online]. Zu finden in <http://pub.epsilon.slu.se/5517/1/hakansson_i_101206.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Hamza MA, Andersson WK (2005) Soil compaction in cropping systems : a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res* 82:121-145
- Harrach T, Pfeiffer B, Heitzmann S, Sauer S (2003) Langfristige nutzungsbedingte Bodendegradierung ackerbaulich genutzter Lössböden in Sachsen : Abschlussbericht. Gießen : Univ, 144 p
- Horn R, Lebert M, Burger N (1989) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ Messungen : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. München : Bayer StMUL, 178 p
- Horn R, Fleige H, Richter FH, Czyn EA, Dexter A, Diaz-Peraira E, Dumitru E, Enarache R, Mayol F, Rajkai K, de la Rosa D, Simota C (2005) SIDASS project : part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Tillage Res* 82:47-56
- Horn R, Rabbel W, Volk L (2008) Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten

- Flächen : Abschlussberichte zum BMELV-Verbundvorhaben, Teilvorhaben der Universität Kiel (FKZ 03HS003/1) und der Fachhochschule Südwestfalen (FKZ03HS003/2)
- Horn R, Fleige H, Peth S (2009) Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde : Vorsorge und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung von Böden in der Landwirtschaft. *Bodenschutz* 3:80-85
- Horn R, Fleige H (2009) Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Tillage Res* 102:201-208
- Horn R (2011) Management effects on soil properties and functions. In: Gliński J, Horabik J, Lipiec (eds) *Encyclopedia of Agrophysics*. Dordrecht : Springer, pp 447-455
- Houskova B, Montanarella L (2008a) The natural susceptibility of European soils to compaction. In: Toth G, Montanarella L, Rusco E (eds) *Threats to soil quality in Europe*. Luxembourg : Off Official Publ EC, pp 23-35
- Houskova B (2008b) The natural susceptibility of European soils to compaction [online]. Zu finden in <<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/natural-susceptibility-soil-compaction-europe>> [zitiert am 23.08.2016]
- Isensee E, Schwark A (2006) Langzeitwirkung von Bodenschonung und Bodenverdichtung auf Ackerböden. *Ber Landwirtschaft* 84(1):17-48
- Jones RJA, Verheijen FGA, Reuter HI, Jones AR (2008) Environmental assessment of soil for monitoring : vol V: Procedures and protocols [online]. Zu finden in <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Envasso/documents/ENV_Vol-V_Final2_web.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Keller T, Defosse P, Weißkopf P, Arvidsson J, Richard G (2007) SoilFlex : a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil Tillage Res* 93:391-411
- Keller T, Lamandé M (2010) Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil Tillage Res* 111:54-64
- Keller T, da Silva CA, Tormena CA, Giarola NFB, Cavalieri KMV, Stettler M, Arvidsson J, Goss M (2015) SoilFlex-LLWR : linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. *Soil Use Manag* 31(2):321-329
- Koch H-J, Brandhuber R, Stockfisch N, Schäfer-Landefeld L (2002) Bodenschutz bei Zuckerrübenanbau und Gülleausbringung. *Zuckerrübe* 1:34-37
- Koch H-J, Heuer H, Tomanova O, Märkländer B (2008) Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil Tillage Res* 111:69-77
- Kroulík M, Kumlhála F, Hůla J, Honzík I (2009) The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil Tillage Res* 105:171-175
- KTBL (2011) *Boden schonen und Kosten senken*. Darmstadt : KTBL-Heft 89, 64 p
- KTBL (2013) *Logistik rund um die Biogasanlage*. Darmstadt : KTBL-Schr 498, 132 p
- KTBL (2014) *Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15 : Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*. Darmstadt : KTBL, 832 p
- Le Bas C, Houskova B, Bialousz S, Bielek P (2006) Soil compaction : identifying risk areas for soil degradation in Europe by compaction. In: Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibblewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Varallyay G, Hall MY, Zypan M (eds) *Common criteria for risk area identification according to soil threats*. Luxembourg : Off Official Publ EC, pp 20:35-42
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C (2004) *Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr*. Berlin : UBA, 122 p, Texte / Umweltbundesamt 04/46
- Lebert M, Marahrens S (2009) Risk area identification according to soil compaction of agricultural soils in Germany. In: *Proceedings of the ISTRO 18th triannual Conference*. Izmir, Turkey, June 15 -19.2009, T4-013 [online]. Zu finden in <http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/p_frame.htm> zitiert am 11.11.2015]
- Lebert M (2010) *Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden* [online]. Zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4027.pdf>> [zitiert am 23.08.2016]
- Lebert M, Marahrens S (2010) Ausweisung von Risikoflächen für Unterbodenverdichtungen. In: Schilling B (ed) *Bodenschutz in Europa : Ziele und Umsetzung ; 6. Marktredwitzer Bodenschutztag ; Tagungsband*. Marktredwitz : Stadt Marktredwitz, pp 218-224
- Löpmeier F-J (1994) Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Z Bewässer-Wirtsch* 29:157-167
- Löpmeier F-J (2013) Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung [online]. Zu finden in <ftp://ftp.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/daily/evapo_p/AMBAV.pdf> [zitiert am 24.08.2016]
- Lorenz M (2008) Status der Bodenverdichtung auf niedersächsischen Ackerböden und eine Übersicht der Verhältnisse in Deutschland. *Schriftenr Inst Landwirtschaft Umwelt* 15:57-70
- Marahrens S, Lebert M (2009) *Auswertungskarten zur Verdichtungsgefährdung in der Bundesrepublik Deutschland auf der Basis der BÜK 1000*. DBG-Mitt 112
- Nevens F, Reheul D (2003) The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil Tillage Res* 70:175-184
- NJF - Nordic Association of Agricultural Scientists (2012) *NJF seminar 448 : Soil compaction - effects on soil functions and strategies for prevention*, House of Science and Letters, Helsinki, Finland, 6-8 March 2012 ; proceedings. Helsinki : NJF; 116 p, NJF Report 8(1)
- O'Sullivan MF, Henshall JK, Dickson JW (1999) A simplified method for estimating soil compaction. *Soil Tillage Res* 49:325-335
- Petelkau H (1984) *Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung*. Tag-Ber Akad Landwirtschaft Wiss DDR 227:25-34
- Petelkau H, Seidel K (1986) *Bearbeitbarkeit und Befahrbarkeit von Ackerböden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte*. Tag-Ber Akad Landwirtschaft-Wiss DDR 246:46-54
- Petelkau H, Seidel K, Frielinghaus M (1998) *Ermittlung des Verdichtungs-widerstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen : Forschungsbericht*. Münchenberg : ZALF, 144 p
- Renger M, Bohne K, Wessolek G (2014) *Bestimmung und Aussagemöglichkeiten der effektiven Lagerungsdichte*. *Bodenökol Bodengene* 43:27-41
- Schjønning P, Lamandé M, Tøgersen FA, Arvidsson J, Keller T (2008) Modeling effects of tire inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst Eng* 99:119-133
- Schjønning P, Stettler M, Keller T, Lassen P, Lamandé M (2015) Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil Tillage Res* 152:52-66
- Schjønning P, Lamandé M, Munkholm LJ, Lyngvig HS, Nielsen JA (2016) Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil Tillage Res* 163:298-308
- Seehusen T, Riley H, Riggert R, Fleige H, Børresen T, Horn R, Zink A (2014) Traffic-induced soil compaction during manure spreading in spring in South-East Norway. *Acta Agric Scand B* 3:220-234
- Söhne W (1953) *Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen*. *Grundl Landtechn* 5:49-63
- Sommer C (1998) *Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion*. *Bodenschutz* 3(1):12-16
- Sommer C, Brandhuber R, Brunotte J, Buchner W (2001) *Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen*. In: *BMVEL (2001) Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion*. Bonn : BMELV, pp 14-41
- Stettler M, Keller T, Weisskopf P, Lamandé M, Lassen P, Schjønning P (2014) *TERRANIMO – ein webbasiertes Modell zur Abschätzung des Bodenverdichtungsrisikos*. *Landtechnik* 69(3):132-138
- Tijink FGJ (2003) *Technical guidelines for preventing subsoil compaction*. *Landbauforsch SH* 256:39-47
- Tullberg J (2010) *Tillage, traffic and sustainability : a challenge for ISTRO*. *Soil Tillage Res* 111:26-32
- UBA - Umweltbundesamt (2015) *Bodenstruktur : Erosion und Verdichtung*. In: *Umweltbundesamt (2015) Bodenzustand in Deutschland : zum „Internationalen Jahr des Bodens“ 2015*. Dessau-Roßlau : UBA, pp 46-59

- Van den Akker JJH (1997) Construction of a wheel-load bearing capacity map of the Netherlands : proceedings of the ISTRO 14th Conference held in Pulawy, Poland, July 27 – August 1, 1997. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 2A/97:15-18
- Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (2003) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Tillage Res* 73:1-186
- Van den Akker JJH (2004) SOCOMom : a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil Tillage Res* 79:113-127
- Van den Akker JJH, Simota C (2008) Risk assessment methods of compaction. RAM-SOIL project report 2.3, deliverable 2.3.2.5 [online]. Zu finden in <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/projects/Ramsoil/Results/WP2/PR23_compaction.pdf> [zitiert am 24.08.2016]
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2007) Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtl 6101. Berlin : Beuth, 67 p
- Vorderbrügge T, Brunotte J (2011) Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerböden (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis : Teil 1: Validierung von Pedotransferfunktionen. *Landbauforsch* 61(1):1-21
- Vorderbrügge T (2016) mündl. Mitteilung
- Werner D, Paul R (1999) Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser Boden* 51:10-14
- Wessolek G, Kaupenjohann M, Renger M (2009) Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis : Teil I: Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe 'Kennwerte des Bodengefüges' zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte'. Berlin : Selbstverl, 80 p, *Bodenökol Bodengenese* 40
- Zakosek H (1960) Durchlässigkeitsuntersuchungen an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleye. Wiesbaden : Hess Landesamt Bodenforsch, 62 p, *Abh hess LAMt Bodenforsch* 32

Anhang

Tabelle 10

Mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Oberboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9)

		Silomais Oberboden												
		Klasse	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Standort 1	SI2	1	0	0	0	0	0	0	24	31	30	0	0	0
		2	0	0	0	0	0	3	7	0	0	9	0	0
		3	0	0	0	17	31	27	0	0	0	22	4	0
		4	14	12	31	13	0	0	0	0	0	0	21	0
		5	17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	5	31
Standort 2	SI2	1	0	0	0	0	0	2	31	31	30	27	0	0
		2	0	0	0	0	16	28	0	0	0	4	13	0
		3	0	0	5	29	15	0	0	0	0	0	17	0
		4	30	28	26	1	0	0	0	0	0	0	0	23
		5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Standort 3	SI4	1	0	0	0	0	0	0	29	31	30	15	0	0
		2	0	0	0	0	0	13	2	0	0	15	0	0
		3	0	0	0	14	31	17	0	0	0	1	14	0
		4	3	0	5	14	0	0	0	0	0	0	10	0
		5	28	28	26	2	0	0	0	0	0	0	6	31
Standort 4	SI4	1	0	0	0	0	0	0	0	29	5	0	0	0
		2	0	0	0	0	0	0	18	2	25	0	0	0
		3	0	0	0	0	0	1	13	0	0	11	0	0
		4	2	0	0	10	26	20	0	0	0	18	0	0
		5	29	28	31	20	5	9	0	0	0	2	30	31
Standort 5	Ut3	1	0	0	0	0	0	0	26	31	30	19	0	0
		2	0	0	0	0	0	2	5	0	0	12	2	0
		3	0	0	0	10	31	28	0	0	0	0	15	0
		4	3	0	1	18	0	0	0	0	0	0	13	4
		5	28	28	30	2	0	0	0	0	0	0	0	27
Standort 6	Ut3	1	0	0	0	0	0	0	29	31	30	31	0	0
		2	0	0	0	0	0	5	2	0	0	0	17	0
		3	0	0	0	13	31	25	0	0	0	0	13	6
		4	4	0	15	17	0	0	0	0	0	0	0	12
		5	27	28	16	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Standort 7	Lu	1	0	0	0	0	0	0	27	31	30	4	0	0
		2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0
		3	0	0	0	0	28	30	1	0	0	10	0	0
		4	1	0	0	14	3	0	0	0	0	9	0	0
		5	30	28	31	16	0	0	0	0	0	4	30	31
Standort 8	Lu	1	0	0	0	0	0	0	30	31	30	13	0	0
		2	0	0	0	0	0	5	1	0	0	9	0	0
		3	0	0	0	3	18	25	0	0	0	9	0	0
		4	1	0	0	19	13	0	0	0	0	0	11	0
		5	30	28	31	8	0	0	0	0	0	0	19	31
Standort 9	Lu	1	0	0	0	0	0	0	12	31	29	0	0	0
		2	0	0	0	0	0	0	15	0	1	9	0	0
		3	0	0	0	0	0	0	4	0	0	10	0	0
		4	1	0	0	10	31	25	0	0	0	9	0	0
		5	30	28	31	20	0	5	0	0	0	0	3	30

Tabelle 11

Mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Unterboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9)

		Silomais Unterboden											
	Klasse	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Standort 1 Sl2	1	0	0	0	0	0	0	0	23	30	9	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	15	8	0	17	0	0
	3	1	0	0	0	0	2	16	0	0	5	17	0
	4	6	0	0	20	31	28	0	0	0	0	13	6
	5	24	28	31	10	0	0	0	0	0	0	0	25
Standort 2 Sl2	1	0	0	0	0	0	0	11	31	30	31	18	0
	2	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	12	9
	3	1	0	0	0	17	30	6	0	0	0	0	15
	4	25	3	13	30	14	0	0	0	0	0	0	7
	5	5	25	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 3 Sl4	1	0	0	0	0	0	0	0	29	30	31	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	18	2	0	0	21	0
	3	0	0	0	0	0	1	13	0	0	0	9	8
	4	9	0	0	6	31	29	0	0	0	0	0	9
	5	22	28	31	24	0	0	0	0	0	0	0	14
Standort 4 Sl4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	22	30	5	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	13	9	0	11	0	0
	4	2	0	0	0	0	0	16	0	0	11	0	0
	5	29	28	31	30	31	30	2	0	0	4	30	31
Standort 5 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	0	10	30	25	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	2	21	0	6	22	0
	3	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	8	12
	4	9	0	0	0	0	6	9	0	0	0	0	11
	5	22	28	31	30	31	24	0	0	0	0	0	8
Standort 6 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	0	16	30	28	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	5	15	0	3	30	5
	3	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	25
	4	13	0	0	0	0	8	6	0	0	0	0	1
	5	18	28	31	30	31	22	0	0	0	0	0	0
Standort 7 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	17	30	8	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	13	14	0	22	0	0
	3	3	0	0	0	20	30	18	0	0	1	30	2
	4	28	28	31	30	11	0	0	0	0	0	0	29
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 8 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	29	30	21	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	19	2	0	10	13	0
	3	4	0	0	0	19	30	12	0	0	0	17	16
	4	27	28	31	30	12	0	0	0	0	0	0	15
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 9 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	18	30	8	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	12	13	0	19	0	0
	4	3	0	0	0	0	0	15	0	0	4	7	0
	5	28	28	31	30	31	30	4	0	0	0	23	31

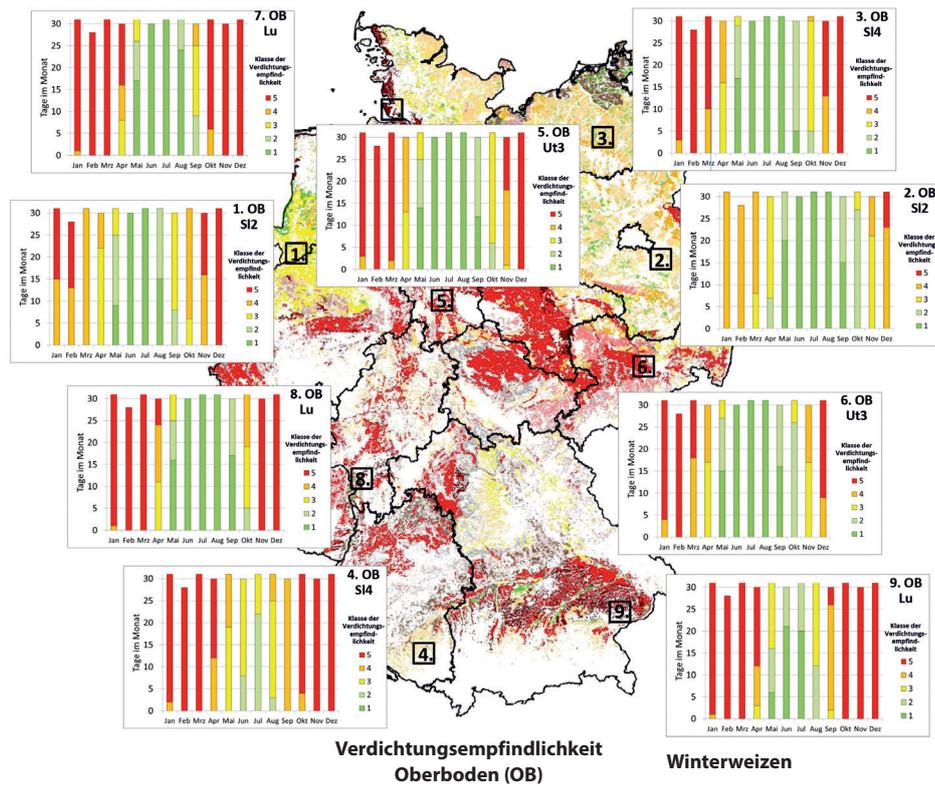


Abbildung 25

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Winterweizen an den Standorten 1 bis 9

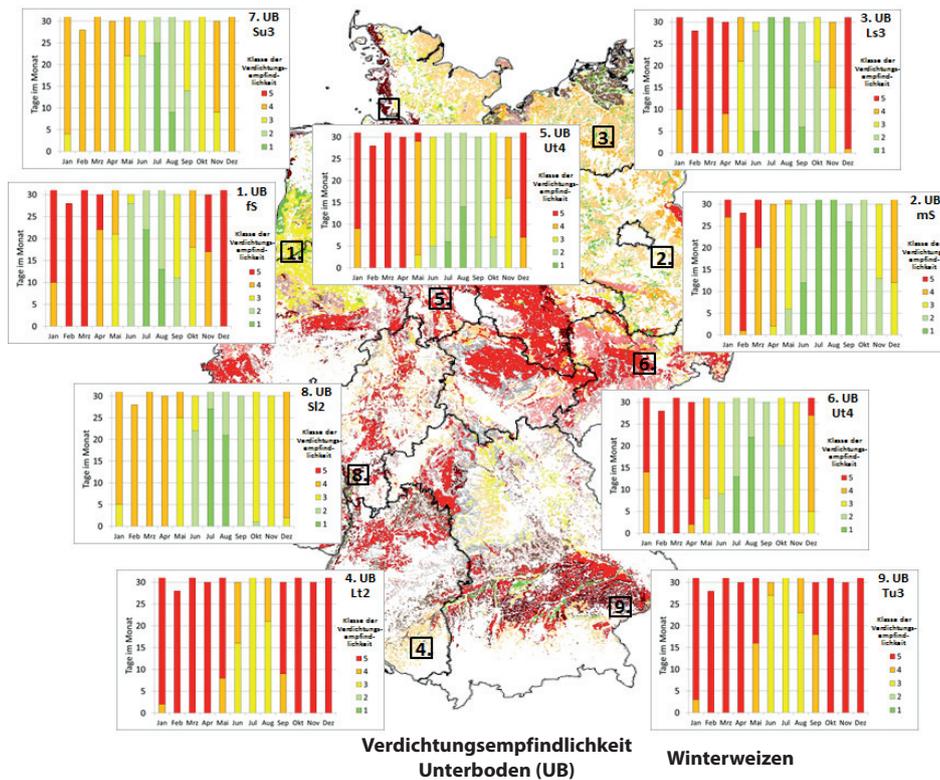


Abbildung 26

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Winterweizen an den Standorten 1 bis 9

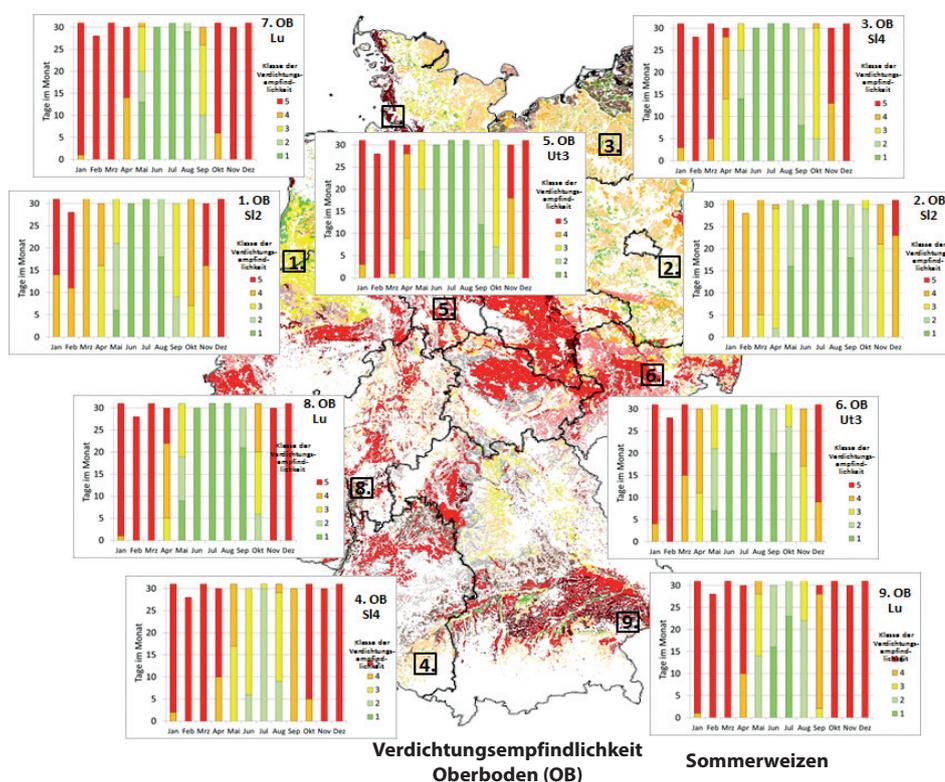


Abbildung 27

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Sommerweizen an den Standorten 1 bis 9

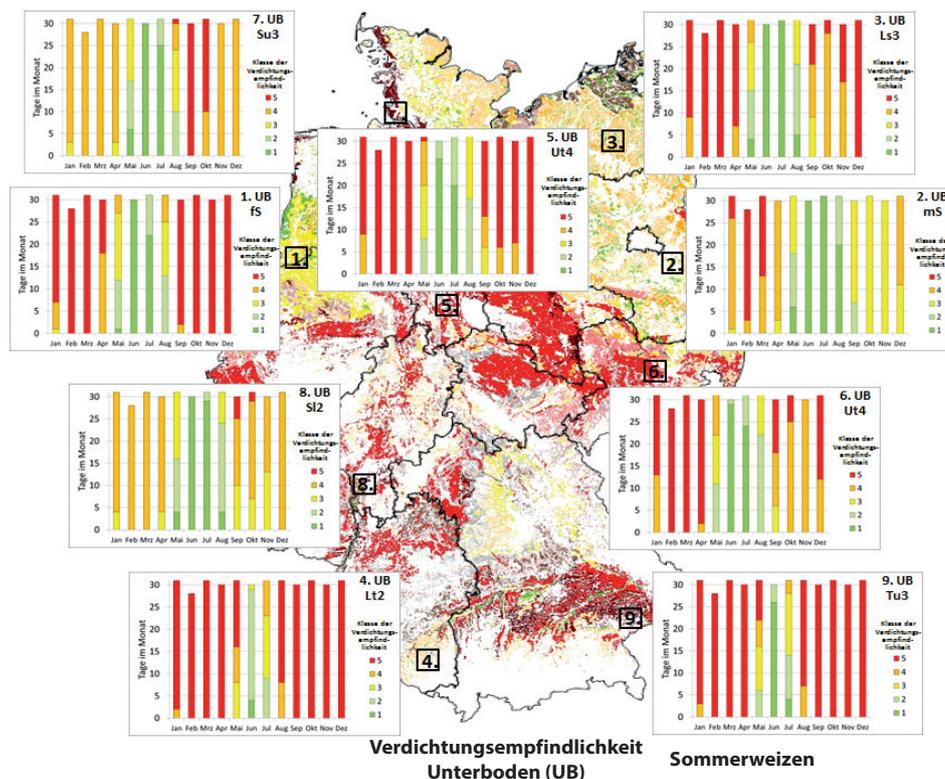


Abbildung 28

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Sommerweizen an den Standorten 1 bis 9

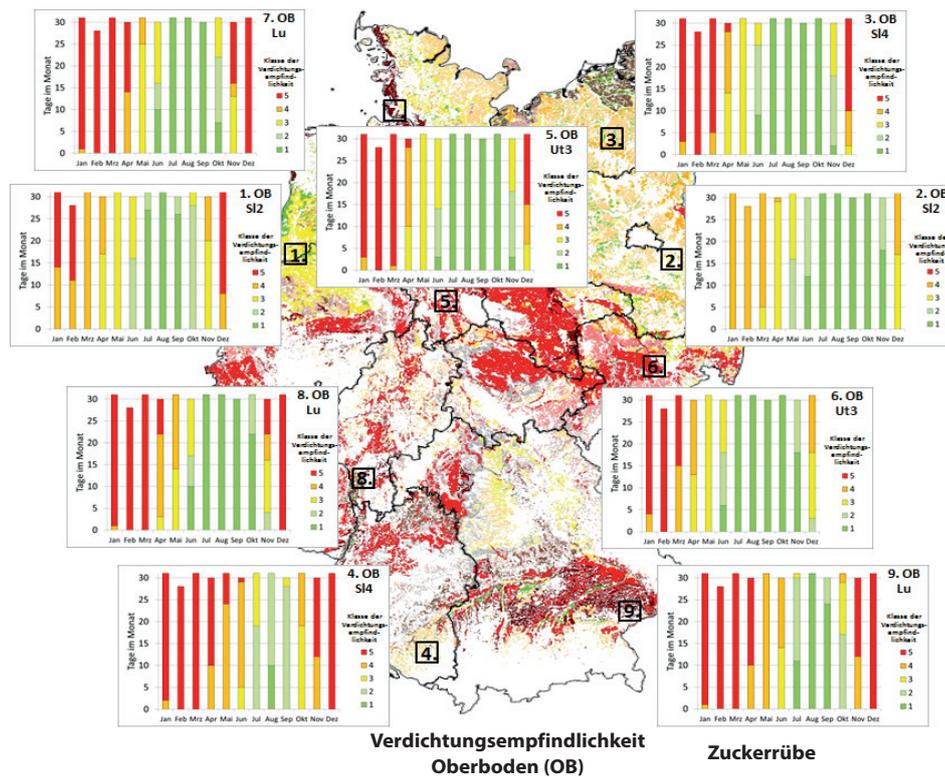


Abbildung 29

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Zuckerrübe an den Standorten 1 bis 9

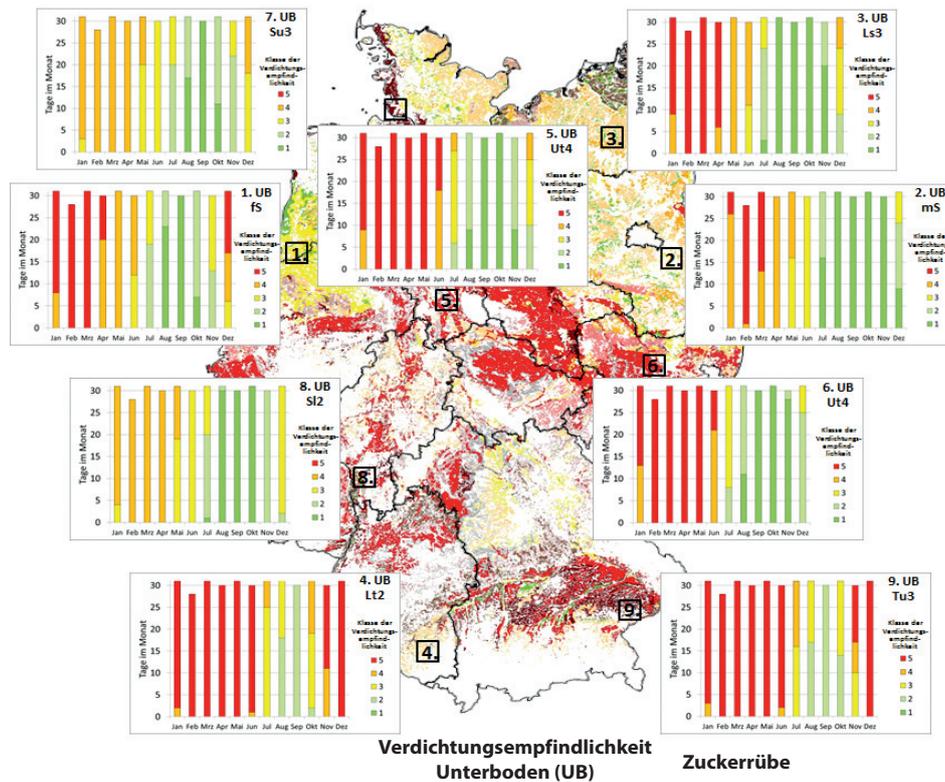


Abbildung 30

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Zuckerrübe an den Standorten 1 bis 9

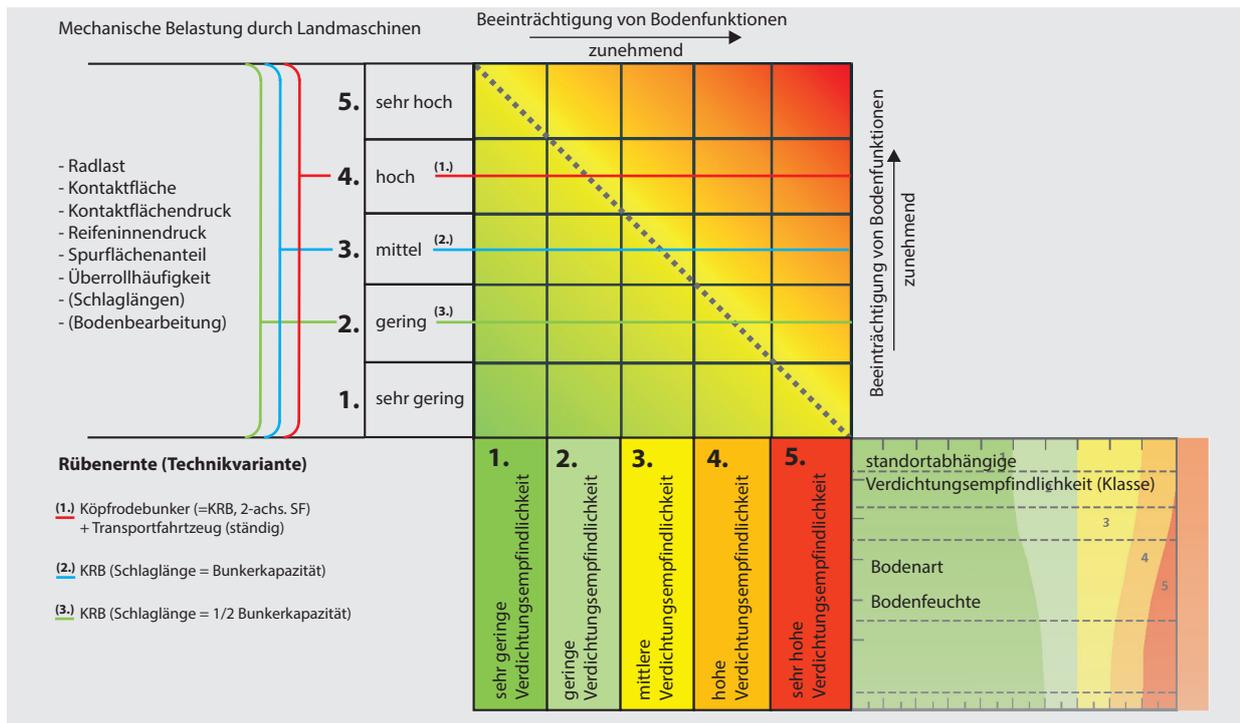


Abbildung 31
Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Rübenerte

Tabelle 12
Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Zuckerrübe (01.09. bis 30.11.)

Oberboden			
insg. 91	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 30.11)		
Beispielstandorte	(1.)	(2.)	(3.)
	Roder plus Transportfahrzeug	Roder mit Auslastung der Bunkerkapazität	Roder mit 1/2 Bunker-auslastung
Sl2 1.	58 (±2)	81 (±2)	91
Sl2 2.	91	91	91
Sl4 3.	79 (±2)	91	91
Sl4 4.	28 (±2)	49 (±2)	73 (±2)
Ut3 5.	79 (±2)	91	91
Ut3 6.	91	91	91
Lu 7.	52 (±2)	74 (±3)	77 (±3)
Lu 8.	65 (±2)	77 (±3)	83 (±3)
Lu 9.	47 (±2)	59 (±3)	73 (±3)

Unterboden			
insg. 91	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 30.11)		
Beispielstandorte	(1.)	(2.)	(3.)
	Roder plus Transportfahrzeug	Roder mit Auslastung der Bunkerkapazität	Roder mit 1/2 Bunker-auslastung
fs 1.	74 (±2)	91	91
mS 2.	91	91	91
Ls3 3.	91	91	91
Lt2 4.	32 (±2)	49 (±3)	72 (±3)
Ut4 5.	91	91	91
Ut4 6.	91	91	91
Su3 7.	83 (±2)	91	91
Sl2 8.	91	91	91
Tu3 9.	44 (±2)	71 (±4)	78 (±3)

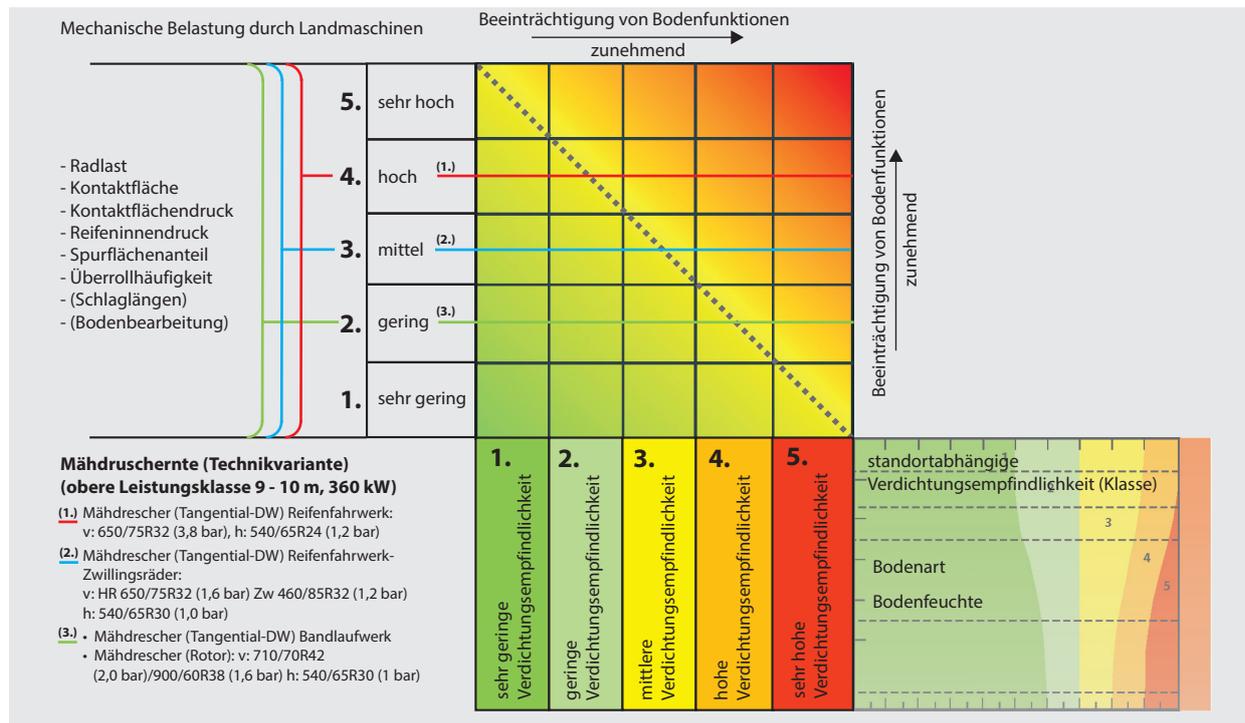


Abbildung 32

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Mähdruschernte

Tabelle 13

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Winterweizen (01.07. bis 31.08.)

	Oberboden			Unterboden			
	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08.)			Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08.)			
	(1.)	(2.)	(3.)	(1.)	(2.)	(3.)	
insg. 62	Mähdruscher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdruscher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk-Zwillingsräder: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdruscher (Tangential-DW), Bandlaufwerk (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	insg. 62	Mähdruscher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdruscher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk-Zwillingsräder: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdruscher (Tangential-DW), Bandlaufwerk (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)
Beispielstandorte				Beispielstandorte			
SI2 1.	62	62	62	fS 1.	62	62	
SI2 2.	62	62	62	mS 2.	62	62	
SI4 3.	62	62	62	Ls3 3.	62	62	
SI4 4.	25 (± 2)	56 (± 2)	62	Lt2 4.	0 (+2)	52 (± 3)	
Ut3 5.	62	62	62	Ut4 5.	62	62	
Ut3 6.	62	62	62	Ut4 6.	62	62	
Lu 7.	62	62	62	Su3 7.	62	62	
Lu 8.	62	62	62	SI2 8.	62	62	
Lu 9.	43 (± 3)	62	62	Tu3 9.	0	54 (± 6)	

Tabelle 14

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Sommerweizen (01.07. bis 31.08.)

	Oberboden			Unterboden		
	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)			Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)		
insg. 62	(1.)	(2.)	(3.)	(1.)	(2.)	(3.)
	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdrescher (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrescher (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdrescher (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrescher (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)
Sl2 1.	62	62	62	fs 1.	44 (±2)	56 (±2)
Sl2 2.	62	62	62	mS 2.	62	62
Sl4 3.	62	62	62	Ls3 3.	52 (±2)	62
Sl4 4.	39 (± 2)	60 (± 2)	62	Lt2 4.	9 (±2)	23 (±2)
Ut3 5.	62	62	62	Ut4 5.	48 (±2)	62
Ut3 6.	62	62	62	Ut4 6.	53 (±2)	62
Lu 7.	62	62	62	Su3 7.	41 (±2)	55 (±2)
Lu 8.	62	62	62	Sl2 8.	55 (±2)	62
Lu 9.	53 (± 3)	62	62	Tu3 9.	14 (±2)	28 (±2)

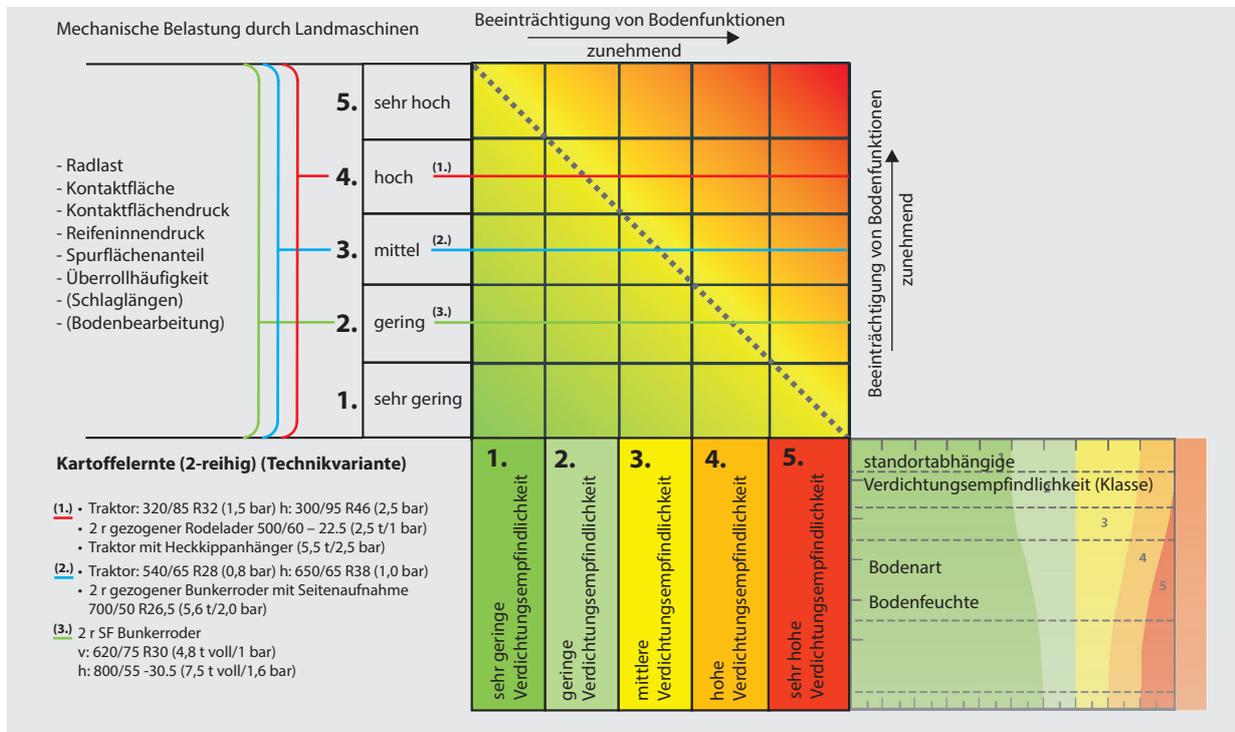


Abbildung 33

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Kartoffelernte (2-reihig)

Tabelle 15

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Kartoffel (01.06. bis 31.10.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 153	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.06. bis 31.10)			insg. 153	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.06. bis 31.10)		
Beispielstandorte	(1.)	(2.)	(3.)	Beispielstandorte	(1.)	(2.)	(3.)
	1. Traktor: v: 320/85R32 (1,5 bar) h: 300/95R46 (2,5 bar)	1. Traktor: v: 540/65R28 (0,8 bar) h: 650/65R38 (1,0 bar)	2-r SF Bunker- roder v: 620/75R30 (4,8 t voll / 1,0 bar)		1. Traktor: v: 320/85R32 (1,5 bar) h: 300/95R46 (2,5 bar)	1. Traktor: v: 540/65R28 (0,8 bar) h: 650/65R38 (1,0 bar)	2-r SF Bunker- roder v: 620/75R30 (4,8 t voll / 1,0 bar)
	2. 2-r gezogener Rodelader 500/60 - 22.5 (2,5 t / 1,0 bar)	2. 2-r gezogener Bunkerroder mit Seitenaufnahme 700/50R26.5 (5,6 t / 2,0 bar)	h: 800/55 - 30.5 (7,5 t voll / 1,6 bar)		2. 2-r gezogener Rodelader 500/60 - 22.5 (2,5 t / 1,0 bar)	2. 2-r gezogener Bunkerroder mit Seitenaufnahme 700/50R26.5 (5,6 t / 2,0 bar)	h: 800/55 - 30.5 (7,5 t voll / 1,6 bar)
	3. Traktor mit Heckkippanhänger (5,5 t / 2,5 bar)				3. Traktor mit Heckkippanhänger (5,5 t / 2,5 bar)		
Sl2 1.	136 (±2)	153	153	fs 1.	111 (±2)	135 (±2)	153
Sl2 2.	153	153	153	mS 2.	123 (±2)	153	153
Sl4 3.	148 (±2)	153	153	Ls3 3.	116 (±2)	134 (±2)	153
Sl4 4.	78 (±2)	116	152	Lt2 4.	50 (±2)	105 (±7)	124 (±2)
Ut3 5.	137 (±2)	153	153	Ut4 5.	98 (±2)	119 (±2)	141 (±5)
Ut3 6.	141 (±2)	153	153	Ut4 6.	100 (±2)	123 (±2)	144 (±3)
Lu 7.	130 (±2)	153	153	Su3 7.	112 (±2)	153	153
Lu 8.	140 (±2)	153	153	Sl2 8.	112 (±2)	153	153
Lu 9.	108 (±2)	135 (±5)	153	Tu3 9.	61 (±2)	108 (±6)	125 (±2)