Bodenverdichtung

Ursachen, Auswirkungen und Vorsorgemaßnahmen

Umweltinstitut - Bericht UI-02/2020
Institut für Umwelt- und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg

Bodenverdichtung

Ursachen, Auswirkungen und Vorsorgemaßnahmen

Gesamtbearbeitung:
Katharina Sexlinger

Unter Mitarbeit von:
Monika Humer
Email: monika.humer@vorarlberg.at

Impressum

Herausgeber und Medieninhaber:
Amt der Vorarlberger Landesregierung
Römerstraße 15, 6901 Bregenz

Verleger:
Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg
Montfortstraße 4, 6901 Bregenz
T +43 5574 511 42099

Titelbild: Verdichtung in der Fahrspur, Ackerfläche in Höchst.
Quelle: Monika Humer, Umweltinstitut 2019

Bregenz, März 2020

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2

2 Definitionen 3

3 Einflussfaktoren auf die Stabilität und Belastbarkeit von Böden 4

4 Ursachen von Bodenschadverdichtungen 5

5 Auswirkungen und Folgen von Bodenschadverdichtungen 7

6 Maßnahmen für bodenschonendes Befahren und Bearbeiten 11

7 Lockerung und Regenerierung von Bodenschadverdichtungen 14

8 Verdichtungsempfindlichkeit Vorarlberger Böden anhand der mechanischen Vorbelastung ... 15

9 Erkennen von Bodenschadverdichtungen 18

10 Bewertung von Bodenverdichtungen im Vollzug 19

11 Zusammenfassung 21

12 Literatur 22

1 Einleitung

Böden sind die Grundlage der landwirtschaftlichen Produktion. Da es sich um eine begrenzte und nicht erneuerbare Ressource handelt, muss deren Bewirtschaftung so erfolgen, dass langfristig eine gute Bodenqualität gewährleistet wird.

Die verschiedenen Prozesse die im Boden ablaufen sind an den Raum gebunden den das Bodengefüge bereitstellt. Während der Bodenentwicklung hat sich bei den meisten Böden ein Gefüge entwickelt, das den Pflanzen eine ausreichende Durchwurzelbarkeit und Standsicherheit sowie eine ausreichende Versorgung mit Wasser und Nährstoffen ermöglicht (Brunotte et al., 2015). Bei der Bodenbewirtschaftung werden Böden bewusst gelockert und verdichtet. Kommt es dabei jedoch zu einer Belastung des Bodens über dessen Tragfähigkeit hinaus entstehen nachhaltige Verdichtungen.

Diese ziehen eine Verschlechterung von wichtigen Bodenfunktionen nach sich und somit auch eine langfristige Verschlechterung der Bodenfruchtbarkeit. Die Anfälligkeit eines Bodens zur Verdichtung hängt dabei von den Bodeneigenschaften, der Bodenfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Befahrung, der Boden- und Flächenbewirtschaftung und den verwendeten Maschinen ab.

Das häufige Vorkommen von Bodenschadverdichtungen in den letzten Jahren ist vor allem auf die steigende Leistungsfähigkeit und das steigende Gewicht der eingesetzten Maschinen zurückzuführen. Aufgrund des anhaltenden Drucks auf die Produktion von Nahrung, Fasern und Biotreibstoffen ist auch in Zukunft mit steigenden Bodendegradierungen durch Verdichtungen zu rechnen (Keller, et al., 2017).

Obwohl Bodenverdichtungen zu großen Problemen für Landwirtschaft und Umwelt führen, ist diese Art der Bodendegradation am schwierigsten zu lokalisieren und zu erkennen (Hamza und Anderson, 2005).

Um Verdichtungen der Bodenstruktur zu vermeiden ist es wichtig, die Ursachen und Auswirkungen zu kennen um sinnvolle Vorsorgemaßnahmen ergreifen zu können.

Aufgrund der Bodenbeschaffenheiten sind besonders im Rheintal große Teile der Böden anfällig für Verdichtungen. Aus diesem Grund haben Maßnahmen hinsichtlich der Vermeidung von Schadverdichtung besondere Relevanz.

2 Definitionen

Bodenverdichtung

Durch die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden werden diese bewusst gelockert und verdichtet. Von Bodenverdichtung wird gesprochen, wenn der mit Wasser und Gas gefüllte Porenanteil im Boden sinkt und gleichzeitig das Volumen der festen Phase zunimmt. Somit nimmt das Gesamtporenvolumen ab und die Lagerungsdichte zu. Vor allem das Zusammendrücken und Abscheren der Grobporen ist hierbei problematisch. Die Abnahme des Porenvolumens, oder eine Porenumverteilung führt zu einer Abnahme der Leitfähigkeit für Wasser und Luft sowie des Wasserspeichervermögens und wirkt sich auch negativ auf die Durchwurzelbarkeit des Bodens aus (Krebs et al., 2017).

Bodenschadverdichtung

Eine Bodenverdichtung bedeutet vorerst nur eine Erhöhung der Masse pro Volumeneinheit (g/cm^3). Solange das Porenvolumen nur so stark verdichtet wird, dass der Boden seine Funktionen unbeschadet erfüllen kann, gilt sie als unkritisch. Wird der Boden jedoch über seine Belastbarkeit hinaus weiterverdichtet, entstehen sogenannte Bodenschad-verdichtungen. Als Bodenschadverdichtung wird daher jene Bodenverdichtung bezeichnet, deren Gefügeveränderung negative Auswirkungen auf eine oder mehrere Bodenfunktionen hat. Die negativen Folgen einer Bodenschadverdichtung können sich zum Beispiel in einer erschwerten Bewirtschaftung infolge langer Staunässe zeigen.

Oberbodenverdichtung: Als Oberboden wird der humusreiche oberste Bereich des Bodens (0 bis ca. 25 cm Tiefe), in welcher auch die Bodenbearbeitung stattfindet bezeichnet. Verdichtungen des Oberbodens sind vorranging auf den Kontaktflächendruck und das Befahren des Bodens in zu feuchtem Zustand zurückzuführen.

Unterbodenverdichtung: Der Unterboden beginnt ab ca. 25 cm Tiefe und ist im Vergleich zum Oberboden weniger stark belebt und durchwurzelt. Ursache von Verdichtungen im Unterboden sind vor allem zu hohe Radlasten von Maschinen und Geräten. Kommt es im Unterboden zu einer Verdichtung ist diese nicht mehr bzw. nur schwer unter Einsatz von teuren Spezialgeräten zu beheben und bleibt über lange Zeit unverändert bestehen. Der Erfolg einer Unterbodenlockerung ist dabei vielmals ungewiss (Agridea, 2015).

Bodenverdichtungen im Grünland:

Im Grünland sind vor allem Intensivmähwiesen in niederschlagsreichen Regionen von Verdichtungen betroffen, da sie häufig und oft zur falschen Zeit befahren werden. Dabei kann es sowohl zu Verdichtungen im Ober- als auch im Unterboden kommen. Anders als im Ackerbau können Oberbodenverdichtungen gewöhnlich nicht durch mechanische Bearbeitungsmaßnahmen behoben werden.

Bodenverdichtungen im Ackerland:

Im Ackerland sind besonders Flächen in Gebieten mit eher feuchtem Klima und gleichzeitig wenig durchlässigen Böden verdichtungsgefährdet. Auch die intensivere Befahrung und Bearbeitung von Ackerland macht dieses anfällig für Verdichtungen der Bodenstruktur (BAFU/BLW, 2013).

3 Einflussfaktoren auf die Stabilität und Belastbarkeit von Böden

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die Stabilität und Belastbarkeit des Bodens. Am stärksten bestimmt die Bodenfeuchtigkeit die Tragfähigkeit des Bodens. Je feuchter der Boden desto geringer ist dessen Stabilität und desto stärker breitet sich der Bodendruck in die Tiefe aus. Auch Bodenart und Bodenstruktur bestimmen die Festigkeit eines Bodens. Generell lässt sich jeder Boden verdichten. Schwere Böden mit einem hohen Tonanteil sind stärker verdichtungsgefährdet als leichte, sandige Böden. Bei Sandböden erhöhen jedoch bereits geringe Schluff- und Tonanteile die Verdichtungsempfindlichkeit. Je gröber und rauer die Körnung und je stärker die Aggregierung, desto stabiler ist der Boden (FiBL, 2013; Agridea, 2014).

Die Bodenstruktur bzw. das Bodengefüge wird nach der räumlichen Anordnung der Bodenteilchen zueinander bestimmt und beeinflusst den Wasser- und Lufthaushalt und somit die Tragfähigkeit eines Bodens maßgeblich (Weyer und Boeddinghaus, 2016) (siehe Abbildung 1).

Bei der Entstehung der Bodenstruktur gibt es verschiedenste Mechanismen welche die Bodenpartikel zusammenhalten (Krebs et al., 2017; Blume et al., 2010):

- Kohäsion von Kolloiden wie Tonpartikeln, Eisenoxiden und organischen Makromolekülen aufgrund von van-der-Waals-Kräften und elektrostatischer Anziehung zwischen entgegengesetzt geladenen Oberflächen und funktionellen Gruppen
- Verkittung durch anorganische und organische Klebstoffe (auf chemischen Bindungen beruhend) (z.B. Kalziumkarbonat, Metall(hydr)oxide und Silikate; von Wurzeln und Bodenorganismen ausgeschiedene Schleimstoffe)
- Verbindung von Bodenpartikeln durch Pilzhyphen und Pflanzenwurzeln
- Rauigkeit der Bodenpartikel (Scherfestigkeit)
- Bodenwasser: Kittwirkung durch Kapillarkräfte, die zwischen benetzten Bodenpartikeln wirken

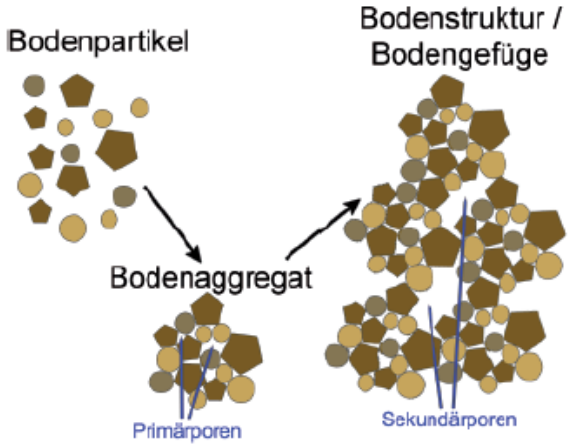


Abbildung 1: :Entstehung des Bodengefüges (Weyer und Boeddinghaus, 2015)

4 Ursachen von Bodenschadverdichtungen

Eine Bodenverdichtung ergibt sich aus dem maschinenbedingten Lasteintrag (mechanische Bodenbelastung), dem daraus resultierenden Druck auf den Boden (Kontaktflächendruck) und die Weitergabe des Druckes im Boden (Bodenbeanspruchung, Bodendruck) (Brunotte et al., 2015) (siehe Abbildung 2).

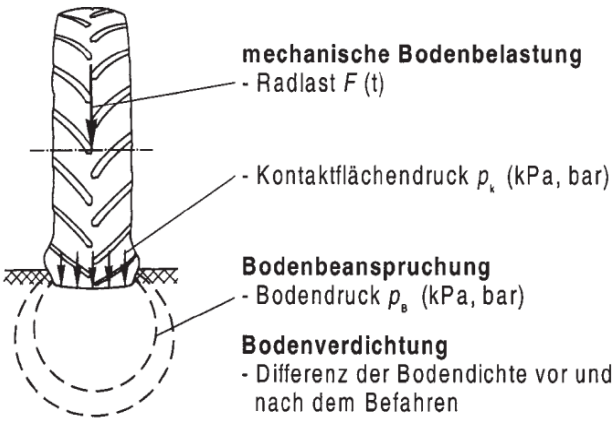


Abbildung 2: Schema zu Belastung, Beanspruchung und Verdichtung eines Bodens durch Maschinen (Sommer, 1985)

Um praxisrelevante Schlussfolgerungen ableiten zu können sind deshalb vor allem folgende Faktoren zu beachten:

- Radlast
- Kontaktflächendruck
- Überrollhäufigkeit und
- Spurflächenanteil

Tendenziell nehmen die Radlasten mit steigender Leistungsfähigkeit der Maschinen zu. Gleichzeitig kommt es durch die meist damit verbundenen größeren Arbeitsbreiten zu einer Verringerung der zurückgelegten Fahrstrecken pro Hektar. Somit steht der höheren Bodenbelastung eine Verringerung des belasteten Bodenareals gegenüber. Spurflächenanteil und –druck, sowie Überrollhäufigkeit sind deshalb notwendige Ergänzungen (Brunotte et al., 2015).

Um Aussagen über die Druckwirkung im Boden aufgrund einer Druckeinwirkung auf den Boden zu treffen, ist der mittlere Kontaktflächendruck (kPa) in der Fahrspur zu beachten. Dieser ergibt sich als Quotient aus Radlast und der Größe der Radaufstandsfläche. Da das Messen der Kontaktfläche jedoch aufwendig ist, gibt es verschiedene Modelle zur Annäherung. Im Modell TASC (Tyres/Tracks and Soil Compaction) etwa, ist eine Vielzahl an Messungen zur Kontaktfläche hinterlegt. Anhand von Feldversuchen wurden Algorithmen für die Ermittlung der Kontaktfläche und für die Berechnung der Druckausbreitung im Bodenprofil erarbeitet und im Modell integriert (Diserens und Spiess, 2005).

Der Verlauf der durch Lasteinträge entstandenen Drücke wird als Linien gleichen Bodendrucks bzw. ‚Druckzwiebeln' angegeben. Abbildung 3 zeigt unterschiedliche Druckzwiebelfortpflanzungen im Boden.

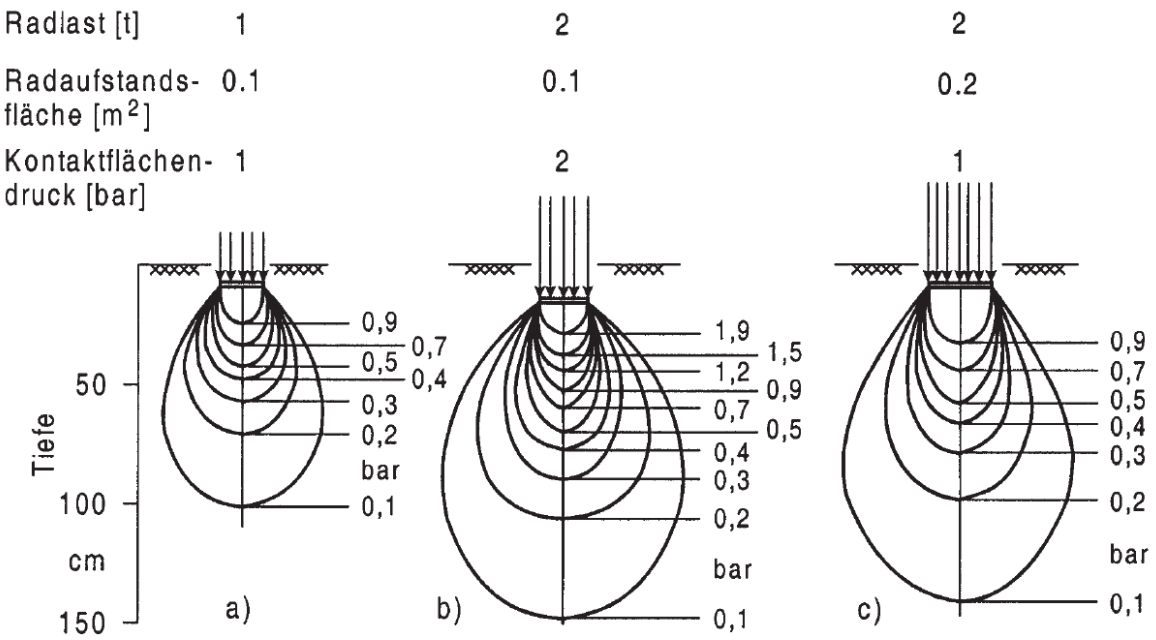


Abbildung 3: Druckzwiebelfortpflanzungen im Boden bei unterschiedlicher Radlast und Radaufstandsfläche (Bolling und Söhne, 1982 in Brunotte et al., 2015)

Aus dem Schema der Druckzwiebelfortpflanzung lassen sich einige grundlegende Aussagen ableiten:

- mit größerer Tiefe sinkt der Bodendruck, da er von immer mehr Bodenpartikeln mitgetragen wird
- ist der Kontaktflächendruck gleich, kommt es bei einer höheren Radlast zu einer tieferen Fortpflanzung der 0,1 bar Druckzwiebeln (Vergleich Bsp. a und c)
- bei gleicher Radlast entscheidet der Kontaktflächendruck über die Auswirkungen des Bodendrucks in der Ackerkrume. Das heißt, dass eine Umrüstung von schmalen auf breitere Reifen oder Zwillingsreifen bei gleichbleibender Radlast kaum eine Auswirkung im Tiefenbereich hat, jedoch zur Verringerung des Bodendrucks in Oberflächennähe beiträgt. Erst durch eine überproportionale Radverbreiterung und dadurch erheblich reduzierten Kontaktflächendruck kommt es auch zu einer Verringerung des Bodendrucks im Tiefenbereich.

Die Radlast ist demnach ausschlaggebend für die Belastung des Bodens in der Tiefe während der Kontaktflächendruck vor allem die Druckbelastung im Oberboden bestimmt (Weyer und Boeddinghaus, 2016).

Voraussetzung der Anwendbarkeit dieses Models ist jedoch unter anderem die Gleichmäßigkeit der bodenmechanischen Eigenschaften über das gesamte Bodenprofil. Die Form der Druckzwiebeln wird durch die Festigkeit des Bodens bestimmt. In hartem, trockenem und dicht gelagertem Boden ergeben sich kreisförmige Druckzwiebeln. Die

Druckzwiebeln werden umso länger je nachgiebiger der Boden wird. Generell hängt die Übertragung von Bodendrücken im Boden sehr stark vom Wassergehalt ab (Brunotte et al., 2015).

Neben Radlast und Kontaktflächendruck spielt aber auch die zeitliche Dauer der Belastung bei der Druckfortpflanzung eine wesentliche Rolle. Mit erhöhter Fahrtgeschwindigkeit reichen die Druckzwiebeln weniger tief in den Boden. Und schließlich hat auch die Überrollhäufigkeit (Anzahl der Achsen/Räder, die den Boden überrollen) Auswirkungen auf die Bodenbeanspruchung, da sich mehrfache Überfahrten in ihrer Wirkung verstärken. Die in der Vergangenheit vorherrschende Strategie, den Bodendruck durch Absenkung des Kontaktflächendrucks mittels breiterer Bereifung etc. (bei grundsätzlich steigenden Radlasten) zu verringern ist aufgrund der eben aufgezählten Ableitungen nicht immer zielführend, da ein geringerer Kontaktflächendruck bei gleicher Radlast nur Auswirkungen auf die Verringerung des Bodendrucks in der Ackerkrume hat und weniger auf dessen Tiefenwirkung (Brunotte et al., 2015; Weyer und Boeddinghaus, 2016). Abbildung 4 und Abbildung 5 sollen die Eigenschaften und Tiefenwirkung von Bodenbelastungen verdeutlichen.

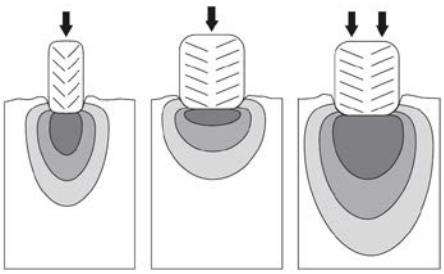


Abbildung 5: Bei schweren Maschinen führt eine breitere Bereifung nicht zu geringeren Bodendrücken

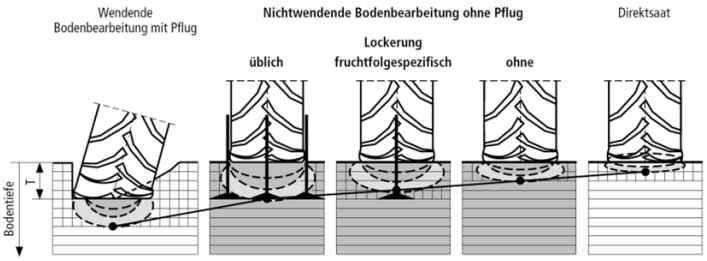


Abbildung 4: Tiefenwirkung von Bodendruck bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren (Sommer und Brunotte, 2003)

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass für eine wirksame Vorsorge vor Bodenverdichtungen beim Maschineneinsatz eine Anpassung der Radlast verbunden mit Reifenbreite und Reifeninnendruck sowie reduzierter Überrollhäufigkeit nötig ist (Brunotte et al., 2015; Krebs et al., 2017).

5 Auswirkungen und Folgen von Bodenschadverdichtungen

Mechanische Belastungen die über die Eigenfestigkeit des Bodens hinausgehen bedeuten nicht nur eine Änderung der festen, flüssigen und gasförmigen Phase im Boden, sondern auch der Bodenfunktionen. Ein schadverdichteter Boden kann seine Funktionen als Speicher für Wasser und Gas, als Filter und Puffer für Qualität und Menge an Grundwasser und als Lebensraum für Pflanzen und Tiere nur mehr eingeschränkt wahrnehmen (Blume et al., 2010).

Bodenverdichtungen führen in einem ersten Schritt zu einer Verringerung des Grobporenvolumens, was einen geringeren Austausch von Luft und Wasser zwischen Ober- und Unterboden zur Folge hat. Durch die geringere Versickerung trocknet der Boden

langsamer ab. Bei länger anhaltenden Niederschlägen kann es dann zu Staunässe kommen, was sich in Form von Wurzelfäulnis, Sauerstoffmangel und dem Absterben von Pflanzen äußern kann. Die geringere Wasserleitfähigkeit erhöht die Gefahr von Bodenerosionen durch Oberflächenabfluss was gleichzeitig einen Nährstoffaustrag sowie eine Verschlämmung lehmreicher Böden bedeuten kann. Die verminderte Infiltration führt außerdem dazu, dass der Boden weniger Wasser speichern kann und somit auch die Grundwasserneubildung beeinflusst wird. Gleichzeitig steigt nach Starkregen das Risiko für Hochwasser (Abbildung 7). Die Veränderung des Wasser- und Lufthaushaltes bewirkt zudem eine Veränderung des Wärmehaushaltes. Verdichtete Böden erwärmen sich schwerer und bleiben im Frühling länger kalt.

Die Verringerung des Porenvolumens und der Porenkontinuität beeinträchtigt maßgeblich das Wurzelwachstum wodurch der nutzbare Bodenraum vermindert wird. Die Wurzeln können nicht in verdichtete Aggregate eindringen und können somit auch nicht die innerhalb der Aggregate gespeicherten Nährstoff- und Wasservorräte nutzen. Dadurch sinkt die Nährstoffaufnahme der Pflanze. Weiters werden die Wurzeln durch zu hohe Dichtelagerungen gehindert in tiefere Bodenschichten vorzudringen. Abbildung 6 zeigt die Porenstruktur von nicht verdichteten und verdichteten Böden.

Die biologische Aktivität im Boden wird ebenfalls beeinflusst. Durch Dichtlagerungen wird der Bewegungsraum von größeren Bodentieren eingeschränkt. Regenwürmer, die maßgeblich die Bildung von Ton-Humus-Komplexen sowie die Schaffung von Grobporen und Lebendverbauung beeinflussen, kommen in verdichteten Böden wesentlich seltener vor. Die mikrobielle Aktivität wird vor allem von der Senkung der Luftkapazität und dem damit verbundenen Rückgang von Diffusion und Sauerstoffversorgung beeinträchtigt. Die veränderte mikrobielle Aktivität hat wiederum Einfluss auf den Nährstoffkreislauf (Weyer und Boeddinghaus, 2016; Blume, 1992; Blume et al., 2010).

Die genannten Auswirkungen führen als Konsequenz zu Stresssituationen für die Pflanzen und steigern somit auch deren Krankheitsrisiko was in Folge Mehrkosten für Pflanzenschutzmaßnahmen verursacht (Weyer und Boeddinghaus, 2016). Neben den Folgen für Pflanzenwachstum und Umwelt steigt zudem auch der Kraftstoffverbrauch bei der Bearbeitung von verdichteten Böden (Moitzi und Boxberger, 2007).

Resultate eines Forschungsversuchs zeigten, dass bei Verdichtungen im Oberboden das Wachstum der Pflanzen vor allem unmittelbar nach der Verdichtung beeinflusst wurde. Nach fünf Jahren wurden keine negativen Einflüsse mehr festgestellt, da Bodenlebewesen und Wurzeln zu einer Verbesserung der Bodenstruktur führten. Im Vergleich dazu beeinflusste die Unterbodenverdichtung den Ertrag weniger stark, jedoch blieb sie länger unverändert vorhanden. Über mehrere Jahrzehnte wurden somit nur etwa 95 % des möglichen Ertrags erreicht (Agridea, 2014).

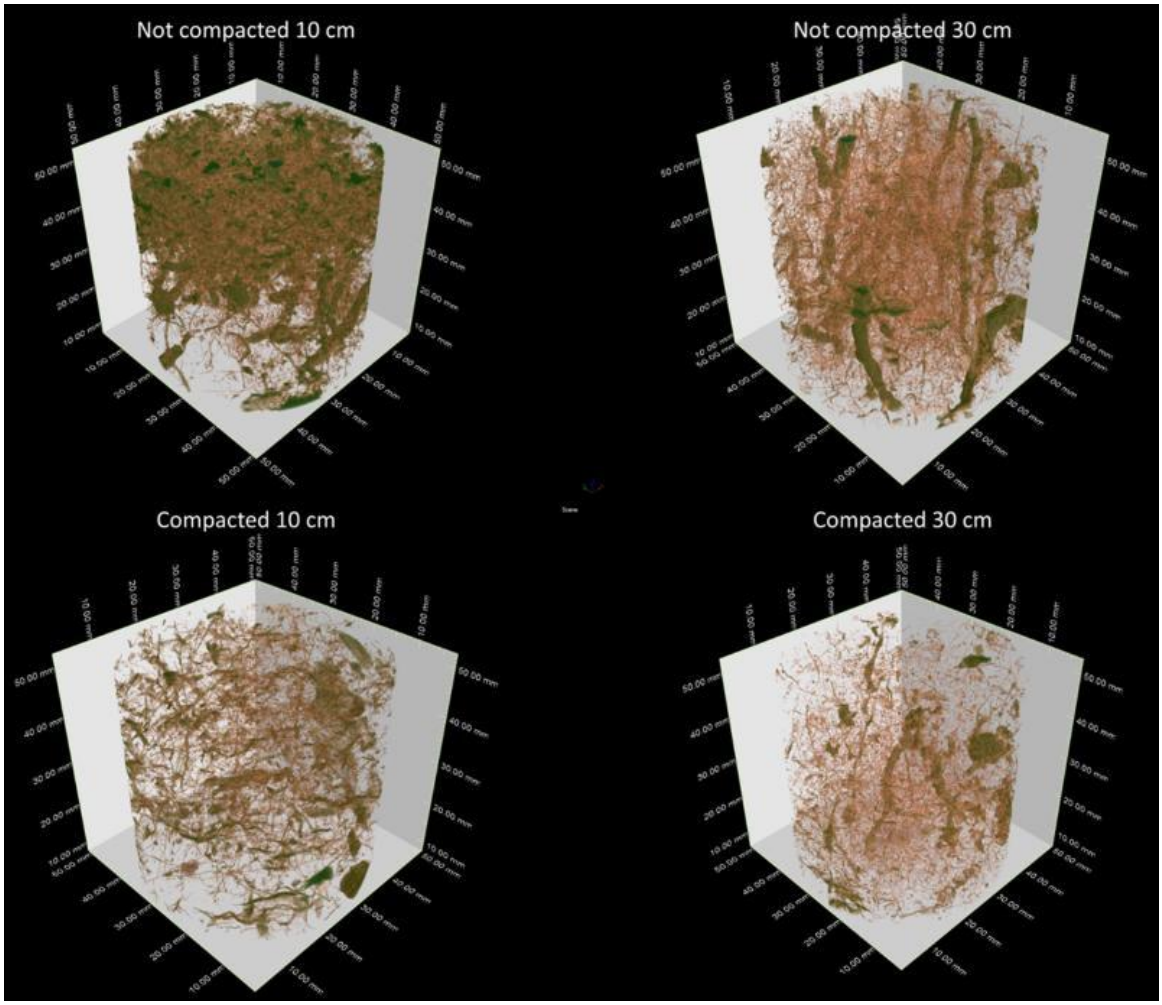


Abbildung 6: Porenstuktur von nicht verdichteten (oben) und verdichteten (unten) Bodenproben in 10 und 30 cm Tiefe. (Keller et al., 2017)

Abbildung 7: optische Anzeichen einer Bodenverdichtung. Links: Wasserstau in Fahrspuren. Rechts: gute Bodenstruktur im Feld und verdichteter Boden in der Fahrspur (Diez et al., 2017)

Abbildung 8 fasst schematisch die Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Bodenfunktionen und die Umwelt zusammen.

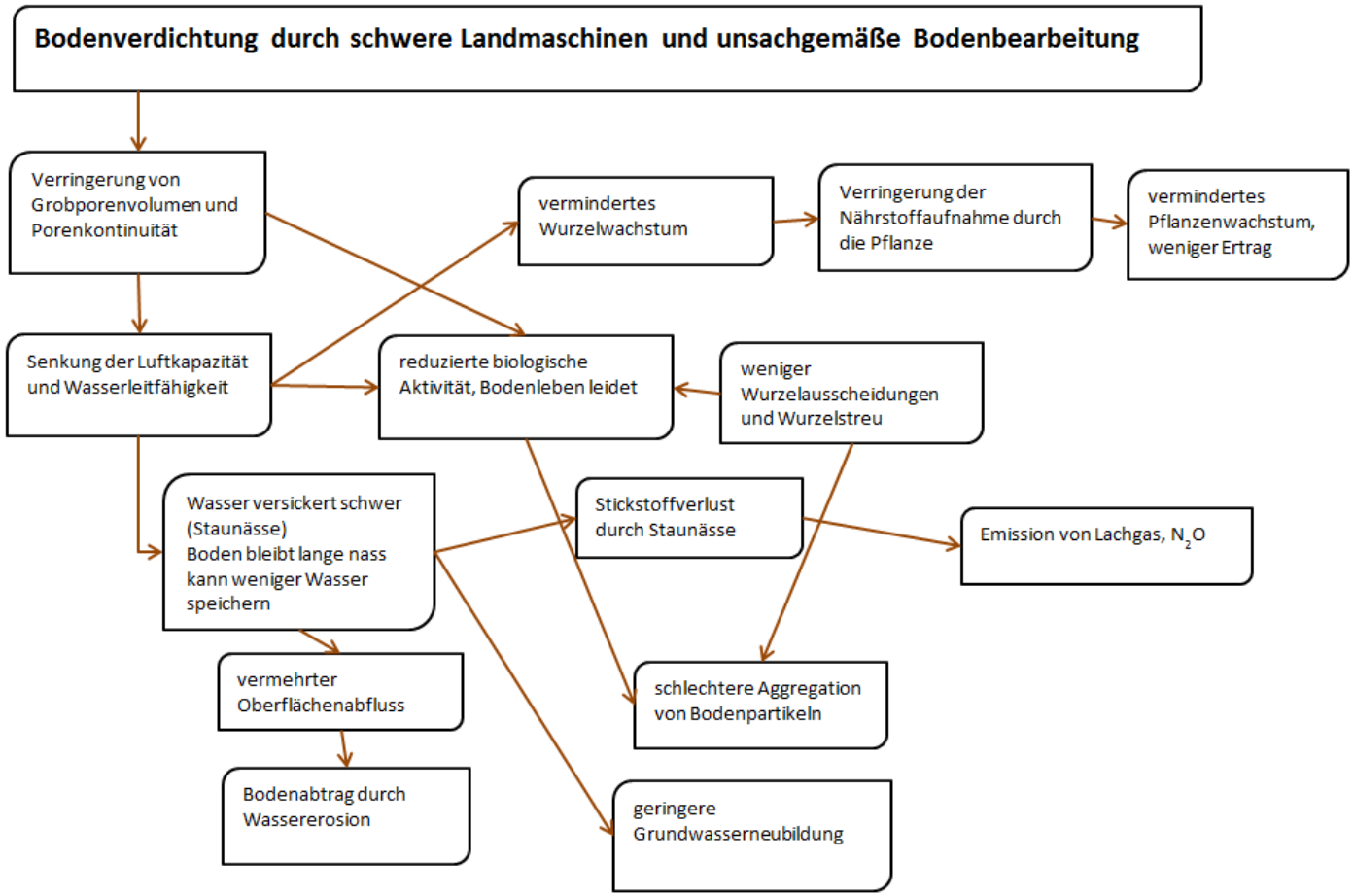


Abbildung 8: Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Bodenfunktionen und die Umwelt (eigene Darstellung)

6 Maßnahmen für bodenschonendes Befahren und Bearbeiten

Um Verdichtungen vorzubeugen gibt es mehrere Maßnahmen in den Bereichen Technik, Boden und Arbeitsverfahren die ergriffen werden können.

Technik:

- Verringerung des Kontaktflächendrucks durch Vergrößerung der Radaufstandsfläche bei hoher Gesamtlast (Breitreifen, Zwillingsbereifung, Bandlaufwerke, …)
- Verringerung der Radlast (gezogene statt angebaute Geräte, gleichmäßige Lastverteilung auf alle Achsen, …)
- Angepasster Reifeninnendruck (Richtwerte für Reifeninnendrücke: max. 1 bar bei der Bestellung auf gelockertem oder feuchten Boden und max. 2 bar bei der Ernte auf abgesetztem oder trockenen Boden – (VDI-Richtlinie 6101)
- Überrollhäufigkeit und Belastungsdauer reduzieren (Arbeitsgänge zusammenlegen bzw. auf Notwenigkeit überprüfen, Gerätekopplung)
- Verringerung des Radschlupfes
- Fahrzeugparameter an Verdichtungsempfindlichkeit anpassen

Boden:

- Bodenfeuchte: Die Bearbeitung des Bodens sollte nur bei trockenem Boden erfolgen
- Verbesserung des Bodengefüges und der allgemeinen Bodenfruchtbarkeit:
- Verbleib von Ernteresten auf der Fläche
- weite, ausgewogene Fruchtfolgen
- standortgerechte Fruchtartenwahl für verdichtungsempfindliche Standorte
- Anbau von Zwischenfrüchten
- organische statt mineralische Düngung
- Kalkung zur Anpassung des pH-Werts und Stabilisierung der Bodenstruktur

Arbeitsverfahren:

- konservierende Bodenbearbeitung (z.B.: Mulchsaat, Direktsaat), Intensität und Tiefe der Bodenbearbeitung auf das notwendigste begrenzen
- On-land-pflügen: Verhinderung von Verdichtungen im Unterboden, da alle Traktorräder auf der Bodenoberfläche fahren
- Verringerung der befahrenen Fläche durch Anlegung von Fahrgassen (Regel-Fahrspur-Verfahren/Controlled Traffic Farming)
- optimierte Einstellung der Bodenarbeitsgeräte

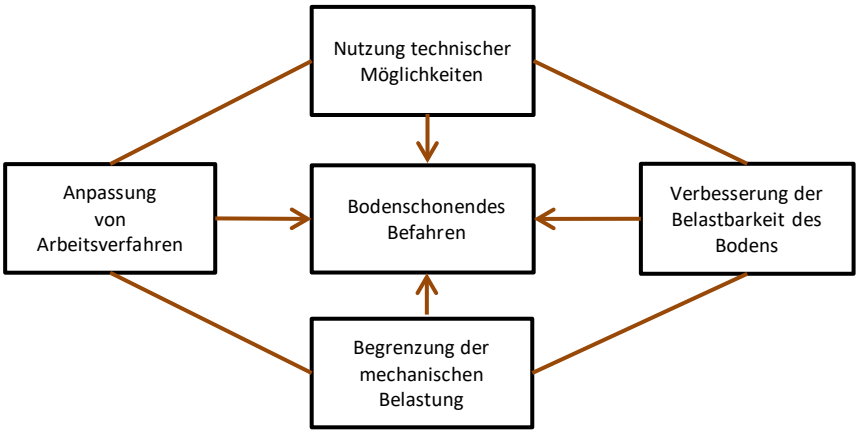


Abbildung 9: Die vier Bausteine des Konzepts für bodenschonendes Befahren (Sommer, 1998)

In Abbildung 9 sind die Bausteine für ein schonendes Befahren von Böden im Zuge der Bewirtschaftung dargestellt.

Es gibt mehrere Hilfsmittel die zur bodenschonenden Bewirtschaftung bzw. zur Bestimmung der aktuellen Verdichtungsgefährdung genutzt werden können:

- **TASC** (Tyres/Tracks and Soil Compaction): Excel Programm als Hilfsmittel für die Praxis im Ackerbau zur Vermeidung von Schadverdichtungen, das darauf abzielt, schwere reversible bis irreversible Schadverdichtungen zu vermeiden. Es beurteilt die Bodenbeanspruchung durch Rad- und Raupenfahrwerke je nach Bodeneigenschaften und Belastung (Radlasten und Kontaktflächendrücke) (Diserens und Spiess, 2005).
- **Terranimo**: Simulationsmodell für die Berechnung des Bodenverdichtungsrisikos beim Einsatz von landwirtschaftlichen Fahrzeugen (http://www.terranimo.world/CH/)
- Klima und Wetterdaten
- Bodenkennwerte (Bodentyp, Bodenart, Humusgehalt, pH-Wert, Grund-Stauwassereinfluss, Tiefgründigkeit – Datengrundlagen z.B. eBOD)
- Vorbelastung
- Bodenfeuchte/Bodenfestigkeit ermitteln (siehe Abbildungen 10 und 11)

Gute Befahrungsbedingungen | **Befahrung mit Vorsicht** | **Befahrung unterlassen**

Abbildung 10: Abschätzung der Bodenfeuchtigkeit durch eine Fühlprobe. Links: harte Erdbrocken, die nur mit Mühe auseinandergebrochen werden können - ideale Befahrungsbedingungen. Mitte: brüchige Erdbrocken, die beim Drücken zwischen den Fingern zerbröseln – Befahrung nur mit Vorsicht, hohen Bodendruck vermeiden. Rechts: knetbare, breiige Erde – eine Befahrung ist zu unterlassen (Agridea, 2014).

Bodenfestigkeit

Vorverdichtungswert in kPa

		Bodengruppen		
		Leichte Böden	Mittelschwere Böden	Schwere Böden
Feuchtestufen	nass	50	40	30
	sehr feucht	150	140	130
	feucht	160	170	180
	trocken	200	240	250

		Fühlprobe	Saugspannung [cbar]
Feuchtestufen[a]	nass	knetbar; schmierig	< 6
	sehr feucht	formbar	6–10
	feucht	brüchig	10–25
	trocken	hart	> 25

		Fühlprobe	Körnungsdiagramm[c]
Bodengruppen[b]	leichte Böden	Ton < 15 %	lrS, lS, S, uS, U, sU
	mittelschwere Böden	Ton 15–30 %	sL, L, lU
	schwere Böden	Ton > 30 %	tL, lT, tU, T

[a] Bestimmung mittels Feuchte-Fühlprobe oder Saugspannungsmessung mit einem Tensiometer erfolgt in einer Tiefe von 35 cm.
[b] Feinerde-Fühlprobe sowie Körnungsbestimmungen erfolgen in der Bodenoberschicht bis 35 cm.
[c] Bodenarten der Feinerde: S, s = Sand, sandig; U, u = Schluff, schluffig; T, t = Ton, tonig; L, l = Lehm, lehmig; lrS = lehmreicher Sand.

Abbildung 11: Abschätzung der Bodenfestigkeit mittels Fühlprobe (BAFU/BLW, 2013)

7 Lockerung und Regenerierung von Bodenschadverdichtungen

Ist es zu einer Bodenverdichtung gekommen muss als erstes das Ausmaß der Verdichtung festgestellt werden um danach Meliorationsmaßnahmen festlegen zu können. Generell sind Lockerungen von verdichteten Böden schwer zu realisieren da die Wiederherstellung einer guten Bodenstruktur ein sehr langsamer Prozess ist. Neben mechanischen Maßnahmen zur Bodenlockerung bedarf es im Anschluss einer biologischen Stabilisierung da aufgelockerter Boden aufgrund der zerstörten Bodenstruktur sehr instabil ist. Eine mechanische Bearbeitung lockert zwar verdichteten Boden auf, es werden dabei aber vor allem die Hohlräume zwischen den Bodenaggregaten vergrößert. Die Bodenaggregate selbst werden jedoch nicht gelockert, sondern möglicherweise noch weiter verdichtet. Eine biologische Stabilisierung erfolgt durch die Saat von wurzelaktiven Pflanzen, deren Wurzeln sowohl tief in den Boden eindringen als auch ein dichtes Geflecht ausbilden, das den Boden stabilisiert. Da dies einige Zeit bedarf, sollte die Fläche für mindestens drei Jahre stillgelegt werden bzw. als mehrjährige Feldfutterfläche ohne Umbruch genutzt werden (Weyer und Boeddinghaus, 2016). Die mechanische Lockerung kann somit als Starthilfe gesehen werden um Grobporen zu schaffen wodurch Stauwasser besser abfließen kann und der Boden besser durchlüftet wird, sowie Zugang für Wurzeln und strukturbildende Bodenorganismen geschaffen wird.

Bodenmeliorationen von tiefreichenden Verdichtungen sind sehr umfangreich und zeitaufwändig. Für eine Tiefenlockerung bedarf es einer großen maschinellen Zugkraft, was eine entsprechend hohe Festigkeit des Oberbodens voraussetzt. Zudem besteht das Risiko einer zusätzlichen Verschmierung und Komprimierung des Bodens durch Scharen oder Zinken des Tiefenlockerungsgerätes bei ungünstigen Wasserverhältnissen. Der Boden muss jedenfalls trocken bis zum tiefsten zu bearbeiteten Punkt sein, ansonsten richten Lockerungsversuche mehr Schaden als Nutzen an. Auch natürliche Regenerationsprozesse verlaufen mit zunehmender Tiefe immer langsamer da das Wurzelwachstum, die Aktivität von Bodentieren sowie der Einfluss von Frost stark abnehmen bzw. schließlich gar nicht mehr wirksam sind (Weyer und Boeddinghaus, 2016; Krebs et al., 2017). Ein großes Problem einer Tieflockerung ist zudem, dass die Wiederverdichtungsgefahr bei einer folgenden intensiven Nutzung sehr hoch ist. Eine nach der Lockerung ausgelöste Verdichtung ist dabei wesentlich stärker als bei einem ungelockerten Boden (BAW, 2010).

Unterbodenverdichtungen sind daher besonders prekär und in der Praxis kaum reparabel weshalb sie unbedingt vermieden werden sollten. Maßnahmen wie Tiefenlockerungen sind nicht nur energie- und kostenintensiv, auch deren Wirkung ist unsicher.

Grundsätzlich ist die Wirkung einer Lockerung von der Lockerungsfähigkeit des Bodens (Bodenart), dem Feuchtezustand während der Lockerung, der Verwendung geeigneter Bodenstabilisatoren und der Wahl eines geeigneten Lockerungsgerätes abhängig (BAW, 2010).

Verdichtung und somit Bodendegradation kann innerhalb von Sekunden passieren. Ein Bodenstrukturaufbau bzw. eine Regeneration des Oberbodens hingegen kann Jahre dauern

und eine Regeneration des Unterbodens Jahrzehnte (Keller und Weisskopf, s.a.). Aus diesem Grund ist eine Vermeidung von Bodenschadverdichtungen besonders wichtig.

8 Verdichtungsempfindlichkeit Vorarlberger Böden anhand der mechanischen Vorbelastung

Eine bodenschonende Befahrung des Bodens erfordert Kenntnisse über dessen Tragfähigkeit bzw. Verdichtungsempfindlichkeit. Zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit landwirtschaftlich genutzter Böden gibt es verschiedene Modelle. Eines davon ist die sogenannte mechanische Vorbelastung, die sich aus dem Drucksetzungsverhalten eines Bodens ableiten lässt (Stahl et al., 2005). Die mechanische Vorbelastung beschreibt den Wiederstand, den der Boden einem Zusammendrücken entgegenbringt. Bestimmt wird die Stabilität des Bodens dabei durch die Anzahl der Korn zu Korn Kontakte, der Kornstabilität und aus dem Scherwiederstand an den Kornkontakten. Da die Vorbelastung die Effekte der Gefügebildung auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Ackerbodens beschreibt welche durch geogene und pedogene Prozesse verursacht sind, ist sie vorrangig im Bereich unmittelbar unterhalb der bearbeiteten Bodenschicht einsetzbar (Lebert, 2010; Krebs et al., 2017).

Der Begriff Vorbelastung stammt daher, da damit die maximale Belastung angegeben wird, der der Boden unter gegebenen Bedingungen bereits einmal ausgesetzt war. Es wird dabei davon ausgegangen, dass bei einer Belastung des Bodens die entstehende Verformung reversibel ist (elastisches Verhalten), solange die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird. Erst bei Überschreitung der Eigenstabilität kommt es zu irreversiblen (plastischen) Verformungen und somit zu einer Bodenverdichtung (Lebert, 1989). Der Belastungswert, an dem eine Drucksetzungskurve vom elastischen (Wiederverdichtungsbereich) zum plastischen Verformungsbereich (Erstverdichtungsbereich) übergeht, wird dabei als Vorbelastung bezeichnet.

Die Messung der Vorbelastung erfolgt zumeist an ungestörten Stechzylinderproben in einem Drucksetzungsversuch. Aus der Drucksetzungskurve wird die Vorbelastung bestimmt und als metrische Größe in der Einheit kPa angegeben.

Um Aussagen für größere Flächen über die Belastbarkeit von Ackerböden machen zu können, wurden von mehreren Autoren sogenannte Pedotransferfunktionen ermittelt, die aus Bodenkennwerten die Vorbelastung schätzen (Stahl et al., 2005). Pedotransferfunktionen berechnen Bodeneigenschaften (hydraulische Leitfähigkeit, Feldkapazität, etc.) anhand von bestehenden Bodeninformationen (Textur, Kalkgehalt, etc.).

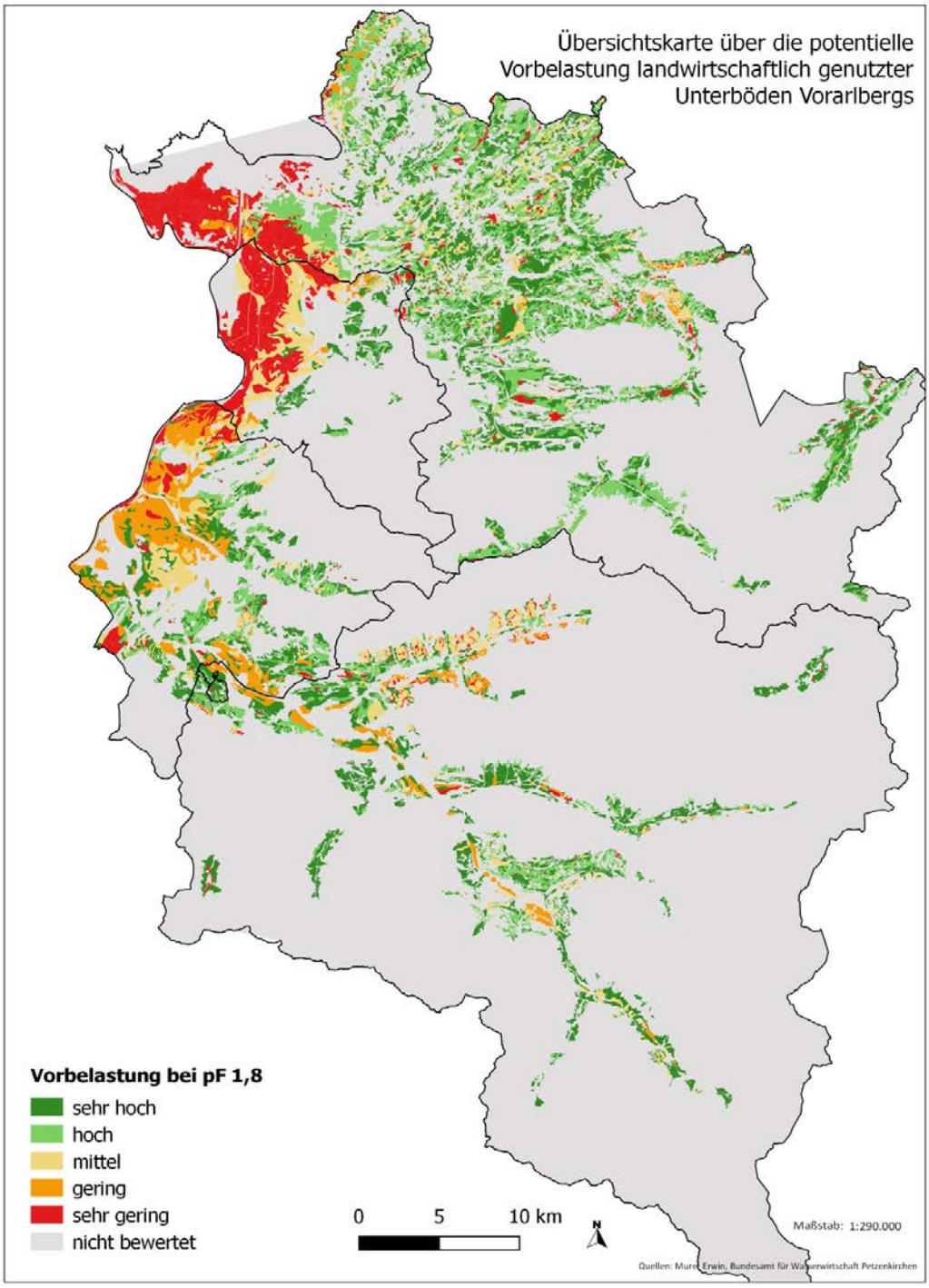
Murer (2009) bewertete die potentielle Vorbelastung im Unterboden und die damit verbundene Verdichtungsempfindlichkeit für landwirtschaftlich genutzte Flächen mineralischer Böden in Österreich. Zur Ermittlung wurden Daten der österreichischen Bodenkartierung aus einer Tiefe von 30 cm bis 35 cm herangezogen. Demnach besitzen etwas

mehr als die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Böden in Österreich eine sehr hohe bis hohe und ca. ein Drittel der Fläche eine mittlere Vorbelastung. Etwa 10 % der Fläche weisen eine geringe und 2% eine sehr geringe Vorbelastung auf und somit eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit (Verdichtungsempfindlichkeit = Kehrwert der Vorbelastung).

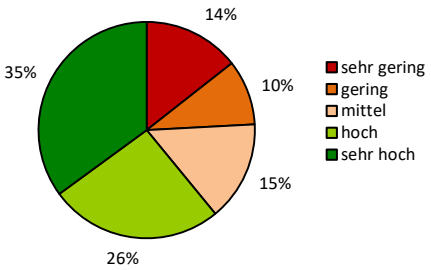
Etwas anders stellt sich die Situation in Vorarlberg dar. Obwohl auch in Vorarlberg mehr als die Hälfte der Flächen eine sehr hohe bis hohe und ca. 15 % eine mittlere Vorbelastung aufweisen, besitzen etwa 24 % eine geringe bis sehr geringe Vorbelastung und damit eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit. Das ist zum Teil auf den hohen Anteil an Au- und Moorböden sowie Gleyböden zurückzuführen. Zu bedenken ist, dass der Großteil der Verdichtungsanfälligen Böden vor allem im Rheintal zu finden ist, wo auch die landwirtschaftliche Nutzung am intensivsten ist (Abbildung 12).

Generell ist die mechanische Belastbarkeit von vielen bodeneigenen und externen Faktoren abhängig, was den Einsatz von Pedotransferfunktionen nicht unproblematisch macht. Vorderbrügge und Brunotte (2011) geben zu bedenken, dass Pedotransferfunktionen nur einen Bruchteil dieser Faktoren und die Komplexität der Größe Vorbelastung somit nur mangelhaft abbilden. Mehrere Studien zeigten einen geringen Zusammenhang zwischen modellierten und gemessenen Vorbelastungswerten (Vorderbrügge und Brunotte, 2011).

Die folgende Karte stellt das geschätzte Potential einer Bodenverdichtung bezüglich Bodenausstattung und bei einem bestimmten Wassergehaltszustand (pF 1,8) dar und erlaubt somit einen Überblick über die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden in Vorarlberg. Für die Bewertung einer tatsächlich möglichen Bodenverdichtung ist jedoch die konkrete Belastung ausschlaggebend, weshalb die reale Last der Fahrzeuge miteinbezogen werden muss. Da die Vorbelastung einem Druck in kPa entspricht, kann sie dem Druck von Fahrzeugen gegenübergestellt werden. Sind sowohl Druck durch Maschinen als auch Vorbelastung bekannt, ist es möglich eine Prognose zu erstellen, ob durch den konkreten Maschineneinsatz zusätzliche Verdichtungen zu erwarten sind oder nicht (Lebert, 2010).



Flächenanteile der potentiellen Vorbelastung



Vorbelastung		mechanische Verdichtungsempfindlichkeit	
kPa	Einstufung	Einstufung	Klasse
< 40	äußerst gering	äußerst hoch	6
40 - < 80	sehr gering	sehr hoch	5
80 - < 120	gering	hoch	4
120 - <160	mittel	mittel	3
160 - < 200	hoch	gering	2
≥ 200	sehr hoch	sehr gering	1

Abbildung 12: potentielle Vorbelastung landwirtschaftlich genutzter Unterböden in Vorarlberg (Murer, 2009). unten links: Anteil der jeweiligen Vorbelastungsklassen. unten rechts: Einstufung der Vorbelastung und Ableitung von Verdichtungs-empfindlichkeitsklassen (Lebert und Schäfer, 2005)

9 Erkennen von Bodenschadverdichtungen

Um bestehende Bodenverdichtungen im Feld erfassen und beurteilen zu können gibt es mehrere Möglichkeiten.

Flächenhafte oberirdische Indikatoren

Flächenhafte oberirdische Faktoren können als erste Hinweise dienen. Beeinträchtigungen der Vegetationsentwicklung und Auffälligkeiten im Pflanzenbestand können auf Bodenverdichtungen hindeuten (geringere Ernteergebnisse, spezielle Zeigerpflanzen, …). Auf Feldern ohne Vegetation können anhand der Beurteilung der Bodenoberfläche (Verschlämmung, Bodenabtrag, Kleinrillenerosion, Wasserstau, Pfützenbildung) Rückschlüsse auf eventuell vorliegende Verdichtungen gezogen werden. Auch Fahrspuren können als oberflächliche Indikatoren dienen.

Wurden aufgrund von flächenhaften oberirdischen Indikatoren Anzeichen für Verdichtungen gefunden wird eine genauere Feldgefügeansprache bzw. Spatenprobe durchgeführt. Dazu gibt es verschiedene Anleitungen. Diese wird im Feld anhand von oberirdischen Indikatoren vergleichend durchgeführt, das heißt an Stellen mit beispielsweise schlechter und guter Entwicklung des Pflanzbestandes.

Feldgefügeansprache

Eine Feldgefügeansprache kann mit einfachen Hilfsmitteln durchgeführt werden und ermöglicht den Nachweis der Ausprägung und Tiefenlage einer Verdichtung. Es werden dabei unter anderem die Bodenstruktur, die Durchwurzelung, sichtbare Makro-/Bioporen, sowie Farbe und Geruch bewertet. Es stehen dafür unterschiedliche Anleitungen zur Verfügung:

- *Brunotte et al. (2012): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker*
- *Weyer und Boeddinghaus (2016): Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Bodenschadverdichtungen im Feld.*
- *Diez et al. (2017): Bodenstruktur erkennen und beurteilen.*
- *Ball et al.: VESS – Visual Evaluation of Soil Structure, SubVESS – Visual Evaluation of Subsoil Structure*

Die Kombination von Feldgefügeansprache und Beurteilungen des Pflanzenwachstums bzw. der Bodenoberfläche ermöglicht es, Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen zu erkennen und Maßnahmen für bodenschonendes Befahren und bearbeiten abzuleiten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über Identifikationsmerkmale von Bodenverdichtungen.

Messung des Eindringwiederstands mittels Penetrometer

Eine weitere Möglichkeit Verdichtungen festzustellen ist durch Messung des Eindringwiederstands mittels Penetrometer. Der Eindringwiederstand ist jedoch eine eher unspezifische Eigenschaft die sich ständig ändert und somit nicht sehr aussagekräftig ist.

Jedoch kann der Eindringwiederstand zur Sondierung einer Fläche genutzt werden und somit die Wahl von Probenahmestellen erleichtern.

Tabelle 1: Merkmale zur Identifikation von Bodenverdichtungen (Brunotte et al., 2015)

Indikator	Merkmal
Pflanzenaufwuchs	unterschiedlicher Aufwuchs, verzögerte Entwicklung, lückenhafter Bestand
Bodenoberfläche	Verschlämmung, Spurrillen/tiefe Fahrspuren, Erosionsrinnen, wenige Regenwurmlosung sichtbar, unverrottete Vegetationsreste
Oberboden bzw. Ackerkrume	grobe Aggregate, die schwer zu zerdrücken sind, Strohmatratzen, wenig Regenwurmgänge, Wurzeln vorrangig auf Aggregatoberfläche und nicht in Aggregaten, Wurzelverzweigung an der Grenze zum Unterboden, gräulich-blau gefärbte Bereiche, die unangenehm riechen
Unterboden	wenig Regenwurmgänge, ungleichmäßige Verteilung der Wurzeln – nicht im gesamten Profil sichtbar; scharfkantige, plattige Aggregate

10 Bewertung von Bodenverdichtungen im Vollzug

In den meisten Bodenschutzgesetzen wird gefordert schädliche Bodenverdichtungen zu vermeiden. Jedoch gibt es dabei meist keine gesetzlich verankerten Maßnahmen oder Grenzwerte ab wann ein Boden schadverdichtet ist.

Für die Einschätzung, ob eine Verdichtung als schädlich einzustufen ist, benötigt der Bodenschutz eine belastbare Grundlage. Deshalb sind neben der Gefügeansprache im Feld auch analytische Messungen im Labor notwendig.

Bodenverdichtungen können sich je nach Schwere grundsätzlich auf alle Bodenfunktionen auswirken. Ein Kriteriensystem zur Beurteilung von Bodenverdichtungen sollte sich an den direkt betroffenen Bodenfunktionen (physikalische Ausgleichs- und Regelungsfunktionen und Produktionsfunktionen) orientieren. Als geeignete Parameter wurden aufgrund des direkten bodenfunktionalen Bezugs und der vorhandenen Standardanalytik die Luftkapazität bzw. das Grobporenvolumen und die gesättigte Wasserleitfähigkeit gewählt (Lebert et al., 2004). Es werden dabei folgende Schadschwellen vorgeschlagen:

Tabelle 2: Parameter und Schadschwellenwerte zur Beurteilung von Bodenverdichtungen (Lebert et al., 2004)

Parameter	Schadschwelle
Luftkapazität/Grobporenvolumen	5 Vol.-%
Gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm d^{-1}

Für eine eindeutige Identifikation einer Schadverdichtung müssen nach Lebert et al. (2004) jedoch nicht nur bodenphysikalische Kennwerte, sondern auch eine Feldgefügeansprache die

Kriterien einer Schadverdichtung erfüllen. Zusätzlich wird für die Feldgefügeansprache (effektive Lagerungsdichte, Packungsdichte oder Spatendiagnose) eine Schadschwelle im Bereich der Stufen 4 und 5 vorgeschlagen.

Um eine schädliche Bodenverdichtung festzustellen müssen grundsätzlich alle drei Kriterien erfüllt sein. Demnach muss das Grobporenvolumen unter 5 Vol.-% liegen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit weniger als 10 cm/d betragen und die Feldgefügeansprache mit Stufe 4 oder 5 beurteilt werden.

Die Unterschreitung des Schadschwellenwertes der Luftkapazität stellt beispielsweise noch kein sicheres Indiz für eine Bodenverdichtung dar, da diese auch substratspezifisch oder bodengenetisch bedingt als Hintergrundwerte vorkommen können. Aus pflanzenbaulicher Sicht kann auch anhand der alleinigen Betrachtung von Grobporenvolumen und gesättigter Wasserleitfähigkeit noch keine eindeutige Bewertung der Durchwurzelung getätigt werden. Eine hohe Porenkontinuität oder eine hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit können beispielsweise die negativen Effekte einer geringen Luftkapazität oder gesättigten Wasserleitfähigkeit teilweise kompensieren. Aus diesem Grund kommt der Feldgefügeansprache eine entscheidende Bedeutung im Rahmen der Bewertung von Bodenverdichtungen zu (Lebert et al., 2004).

Auch eine Erfassung von Bodenverdichtungen der Zentralschweizer Kantone hat zu der Erkenntnis geführt, dass Böden nicht nur aufgrund von Laboranalyseparametern, sondern integrativ, unter Einbeziehung von Felddaten (Bodenansprache, Vegetation, Nutzungshinweise) beurteilt werden sollen (Presler et al., 2013).

Als zusätzliche bzw. eigenständige Methode wird oft die Ermittlung des Eindringwiederstands mittels Penetrometer etc. vorgeschlagen. Mehrere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der Eindringwiederstand mittels Handsonde oder Penetrometer zwar leicht zu ermitteln ist, als eigenständige Methode zur Beurteilung von Bodenverdichtung jedoch nicht geeignet ist. Verschiedene Einflussfaktoren und die starke Abhängigkeit von Wasser- und Tongehalt resultieren in einer großen Variabilität des Eindringwiederstands was ihn zu einem sehr unspezifischen und sich ständig ändernden Parameter macht. Außerdem ist es nötig die Messungen bei 80 - 100 % Feldkapazität durchzuführen. Ohne genaue Kenntnis der Rahmenbedingungen ist die Bestimmung des Eindringwiederstands deshalb als wenig aussagekräftig anzusehen und scheidet daher als Parameter für den Bodenschutzvollzug als Identifikationskriterium aus (Lebert et al., 2004; Murer et al., 2012; Presler et al., 2013; Hartge und Horn, 2009). Die Messung des Eindringwiederstands kann jedoch als Hilfskriterium zur Eingrenzung möglicher Schadverdichtungsflächen dienen bzw. zur Wahl von Lokalitäten für die Probenahme (Lebert et al., 2004; Hartge und Horn, 2009).

11 Zusammenfassung

Bodenverdichtung zählt zu den wichtigsten Bodengefährdungen und kann die Funktionsfähigkeit des Bodens über Jahre hinweg einschränken. Es kommt dabei unter anderem zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte sowie zu einer Abnahme des Porenvolumens, der Wasserleitfähigkeit und der Nährstoffverfügbarkeit. Schadverdichtungen haben dabei nicht nur Auswirkungen auf die Ertragsfähigkeit von Böden sondern wirken sich auch negativ auf die Umwelt aus.

Durch die starke Zunahme der Radlasten während der vergangen Jahren und die steigende Intensivierung in der Landwirtschaft, entstand ein zunehmendes Risiko für Verdichtungen. Mehrere Faktoren und Entwicklungen lassen erwarten, dass es auch in Zukunft zu steigenden Bodenverdichtungen kommen kann. Die Gewichte der eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge nehmen tendenziell immer noch zu. Auch aufgrund von Ernte- und Bearbeitungszwängen bedingt durch feste Termine bei der Maschinennutzung oder der Lieferung von Agrarprodukten kommt es immer häufiger zu Bodenverdichtungen. Zusätzlich kann es durch die klimatischen Veränderungen zu einem erhöhten Verdichtungsrisiko kommen. Verstärkte Niederschläge im Winter führen zu einer erhöhten Bodenfeuchtigkeit, während geringere Niederschläge im Frühjahr und Sommer eine gute Wasserspeicherfähigkeit des Bodens voraussetzen.

Bodenschadverdichtungen sind messbare bodenphysikalische Strukturveränderungen. Messgrößen sind die Luftkapazität mittels Grobporenvolumen sowie die Wasserleitfähigkeit. Dazu gibt es sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz Grenzwerte. Da die Beurteilung von Bodenverdichtungen sehr komplex ist, sollte ein mehrstufiges Beurteilungsschema angewandt werden. Dabei spielt die bodendiagnostische Feldgefügeansprache vor Ort eine besondere Rolle.

In Vorarlberg sind 25 % aller Böden hoch bis sehr hoch verdichtungsempfindlich. Von diesen Böden befinden sich die meisten im intensiv landwirtschaftlich genutzten Rheintal. Insbesondere Intensivmähwiesen in niederschlagsreichen Gebieten können von Oberbodenverdichtung betroffen sein. Ein besonderes Augenmerk sollte bei diesen Flächen auf den Zeitpunkt des Befahrens sowie der Wahl der verwendeten Maschinen gelegt werden, da eine technische Oberbodenlockerung im Grünland nicht vorgesehen ist.

Da Schadverdichtungen, vor allem im Unterboden, nur mehr schwer rückgängig gemacht werden können und die Wiederherstellung einer guten Bodenstruktur ein sehr langsamer Prozess ist, ist die Prävention von schädlichen Bodenbelastungen in jedem Fall besser als eine Regenerierung.

Maßnahmen für bodenschonendes Befahren und Bearbeiten sind daher von besonderer Bedeutung. Hierbei bedarf es der Kombination von technischen Lösungen, Optimierungen der Arbeitsverfahren und allgemeinen Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur und der Bodenfruchtbarkeit. Somit kann die Gesundheit und Produktionsfähigkeit der Böden langfristig gesichert werden.

12 Literatur

Agridea (2014): Bodenverdichtung vermeiden – so funktioniert's! Merkblatt.

BAFU und BLW (2013): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1313.

BAFU (Hrsg.) 2017: Boden in der Schweiz. Zustand und Entwicklung (Stand 2017). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1721.

BAW Bundesamt für Wasserwirtschaft (2010): Wirksamkeit von ÖPUL – Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung.

Blume, H. P. (Hrsg.) (1992): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 2. Auflage. ecomed Verlagsgesellschaft GmbH Landsberg/Lech.

Blume, H.-P.; Brümmer, G. W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K. und Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde (16. Auflage). Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010.

BMVEL (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion.

Brunotte, J.; Busch, M.; Brandhuber, R. et al. (2015): Gute fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn. AID-Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft.

Buchter, B. und Häusler, S. (2009): Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtenstein. Kantonale Bodenschutzfachstellen (Hrsg.).

Diserens, E.; Spiess, E. und Steinmann, G. (2005): TASC – eine PC-Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. Agrarforschung Schweiz 12(1), 22-27, 2005

FiBL (2013): Grundlagen zur Bodenfruchtbarkeit. Dossier.

Diez, T., Weigelt, H. und Brandhuber, R. (2017): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. LfL-Information. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.).

Hamza, M. A. und Anderson, W. K. (2005): Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. Soil & Tillage Research 82 (2005) 121 – 145.

Harrach, T., Heyn, J., Schneider, M. und Vorderbrügge, T. (s.a.): Funktionsgerechte Bodenstruktur.

Hartge, K. H. und Horn, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung (4. vollständig überarbeitete Auflage). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart.

Keller, T. et al. (2017): Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. Vadose Zone Journal Vol. 16 No. 4.

Keller, T. und Weisskopf, P. (s. a.): Bodenstruktur – die funktionelle Architektur des Bodens.

Krebs, R., Egli, M., Schulin, R. und Tobias S. (Hg.) (2017): Bodenschutz in der Praxis. UTB-Band-Nr.: 4820. Haupt Verlag.

Lebert, M. (2010): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Herausgegeben vom Umwelt-Bundesamt, Dessau-Roßlau.

Lebert, M., Brunotte, J. und Sommer, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Moitzi, G. und Boxberger, J. (2007): Vermeidung von Bodenschadverdichtungen beim Einsatz von schweren Landmaschinen – eine aktuelle Herausforderung. Ländlicher Raum, 2007.

Murer, E. (2009): Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Bundesamt für Wasserwirtschaft.

Murer, E., Sisák, I., Baumgarten, A. und Strauss, P. (2012): Bewertung der Unterbodenverdichtung von Ackerböden im österreichischen Alpenvorland. Die Bodenkultur. 63 (1) 2012.

Presler, J., Carizzoni, M. und Widmer, D. (2013): Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone. Beprobungsrunde 2010. Bericht. Projekt II-4.1 / 5.1. Erfassung von Bodenverdichtung. Zentralschweizer Umweltdirektorenkonferenz (Auftraggeber).

Sommer, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung. Landtechnik 40 (9), S. 378 – 384.

Sommer, C. und Brunotte, J. (2003): Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. Landnutzung und Landentwicklung Vol. 44, H. 5 (2003), S. 220-228.

Stahl, H., Marschall, K. und Götze, H. (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 15 - 10. Jahrgang.

Vorderbrügge, T. und Brunotte, J. (2011): Teil II: Bewertung eines Vorschlages zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterbo-den)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen. Landbauforschung. vTI Agriculture and Forestry Research. Vol. 61 No. 1 03.2011.

Weyer, T. und Boeddinghaus, R. (2016): Bodenverdichtung vermeiden. Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

Umweltinstitut
Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg
Montfortstraße 4, 6901 Bregenz
T +43 5574 511 42099
E umweltinstitut@vorarlberg.at
www.vorarlberg.at/umweltinstitut