

Schädliche Bodenverdichtung vermeiden

Schriftenreihe, Heft 10/2016



Schädliche Bodenverdichtung bei Baumaßnahmen vermeiden – erkennen – beheben

Dr. Norbert Feldwisch, Dr. Christian Friedrich

1	Einleitung	5
2	Was ist eine schädliche Bodenverdichtung?	5
3	Erkennen einer schädlichen Bodenverdichtung	8
3.1	Einfache Gefügebeurteilung (Spatendiagnose)	8
3.2	Packungsdichte und effektive Lagerungsdichte (Bodenschurf)	17
3.3	Eindringwiderstand (Handsonde und Penetrometer/Penetrolgger)	18
3.3.1	Handsonde	19
3.3.2	Penetrometer/Penetrolgger	19
3.4	Bodenprobenahme und Laborwerte	20
3.4.1	Trockenrohdichte und effektive Lagerungsdichte	21
3.4.2	Luftkapazität und Porengrößenverteilung	22
3.4.3	Gesättigte Wasserleitfähigkeit	23
4	Bodenfeuchten und Befahrbarkeit	24
4.1	Grundlagen	24
4.2	Bodenfeuchten und Befahrbarkeit	27
4.2.1	Einschätzung anhand der Konsistenzbereiche	27
4.2.2	Einschätzung mit Hilfe eines Nomogramms	28
4.2.3	Messung der Bodenfeuchte	29
5	Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden	31
5.1	Bewertung anhand von Bodenmerkmalen	32
5.2	Bewertung der Häufigkeit von hohen Bodenfeuchten	35
6	Beim Bauen schädliche Bodenverdichtung vermeiden	38
6.1	Bauplanung	38
6.2	Bauausschreibung	47
6.3	Bauausführung und Rekultivierung	47
7	Bodenverdichtungen sanieren, rekultivieren	48
7.1	(Tief-)Lockerungen	49
7.2	Auffüllung von Sackungen	50
7.3	Bodenaustausch	51
7.4	Unterstützende Rekultivierungsmaßnahmen	52
7.5	Dränung	52
7.6	Folgebewirtschaftung	53
	Link- und Literaturverzeichnis	54
	Checklisten	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Boden als poröser Körper; Krümelgefüge im Oberboden (oben) und Aufsicht auf offene Regenwurmgänge in 40 cm Bodentiefe (unten)	6
Abbildung 2:	Extreme Verdichtungsschäden durch Befahrungen	7
Abbildung 3:	Plattengefüge als Folge einer schädlichen Verdichtung	7
Abbildung 4:	Bestimmung des Makroporenanteils am Bodenvolumen bezogen auf den Flächenanteil (nach Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 124)	16
Abbildung 5:	Beispiele von Makroporen (Regenwurmgänge); links: Aufsicht Regenwurmgänge in 40 cm Bodentiefe (Zollstock oben 60 cm); rechts: Regenwurmgänge in der Profilwand, mit Wurzeleinwachsungen (Fotos: Otto Ehrmann)	16
Abbildung 6:	Handsonde zur einfachen taktilen Erfassungen des Eindringwiderstandes	19
Abbildung 7:	Handpenetrologger bei der Rekultivierungskontrolle; Grafik des Eindringwiderstandes als Mittelwert von 10 Wiederholungen (rechts)	20
Abbildung 8:	Entnahme von ungestörten Bodenproben mit Hilfe von Stechzylindern aus einem Bodenschurf bei der Rekultivierungskontrolle.....	21
Abbildung 9:	Einfluss der effektiven Lagerungsdichte des Unterbodens auf den Kornertrag von Winterroggen (Lagerungsdichte der Ackerkrume im optimalen Bereich) (RENGER et al. 2014).....	22
Abbildung 10:	pF-Kurve (Verhältnis zwischen Wassergehalt und Wasserspannung) (nach BLUME et al. 2010, S. 228; vgl. auch Tabelle 4 auf S. 22).....	25
Abbildung 11:	Bodenartendreieck Feinboden (Ad-hoc-AG-Boden 2005, S. 142 mit freundlicher Genehmigung des Verlags; www.schweizerbart.de).....	26
Abbildung 12:	Aufbereitetes Nomogramm zur Ermittlung des maximalen Kontaktflächendrucks von Maschinen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Saugspannung) und dem Maschinengewicht	28
Abbildung 13:	Tensiometer zur Messung der Wasserspannung im Boden	29
Abbildung 14:	Bodenfeuchtemessung mit Hilfe einer TDR-Sonde	30
Abbildung 15:	Matrix zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Bodenmerkmalen	33
Abbildung 16:	Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Oberbodenmerkmalen der BK50	34
Abbildung 17:	Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Unterbodenmerkmalen der BK50	34
Abbildung 18:	Potenziell geringere Verdichtungsempfindlichkeit ohne Oberbodenabtrag nach BK50	35
Abbildung 19:	Karte der Anzahl der Monate pro Jahr mit sehr häufig hohen Bodenfeuchten	36
Abbildung 20:	Synthesekarte Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenmerkmalen und der Häufigkeit von hohen Bodenfeuchten	37
Abbildung 21:	Ungeeignetes Gerät zur Verdichtung verfüllter Leitungsgräben	41
Abbildung 22:	Schemata für die bodenschonende Anlage von Baustraßen bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen	42
Abbildung 23:	Begrünte Fahrtrasse bei einer Rohrleitungsbaustelle.....	43
Abbildung 24:	Rückwärtiges Anschütten einer temporären Baustraße auf dem A-Horizont (Foto: regioplus-Ingenieurgesellschaft).....	43
Abbildung 25:	Auswahl verschiedener Baustraßentypen	44
Abbildung 26:	Lage von Bodenmieten (nach FSK Schweiz 2001)	45
Abbildung 27:	Gefüge- und Aufwuchsschäden durch schädliche Verdichtungen mit Pfützenbildungen sowie Bodenschäden durch Substratmischung, hier Kieseinmischungen in den lössbürtigen Mutterboden	48
Abbildung 28:	Mechanische Tieflockerung; links: Abbruchlockerungsgerät („MM100“; rechts: Stechhublockerer TLG 470 (Foto: T. Weyer, Fachhochschule Südwestfalen).....	49
Abbildung 29:	links: Pfützenbildung in Sackungsbereichen; rechts: Auffüllen der Sackungen mit geeignetem Bodenmaterial bei trockenen Bodenverhältnissen.....	51
Abbildung 30:	Versackte Mähdrescher und Feldspritze nach zu früher Befahrung verfüllter Leitungsgräben.....	51
Abbildung 31:	Dränpflug im Einsatz.....	52
Abbildung 32:	Erstbegrünung zur Förderung des Rekultivierungserfolges (links: Steinklee; rechts: Luzerne)	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertungsschema einer einfachen Gefügebeurteilung	15
Tabelle 2:	Ableitung der Packungsdichte (Pd) bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld) anhand von Gefügemerkmalen und der Wurzelverteilung als Grundlage zur Beurteilung des Bodengefüges (vgl. DIN 19862-10, KA5, S. 125)	17
Tabelle 3:	Einteilung der effektiven Lagerungsdichte (Ld) nach RENGER et al. (2014) für Feinboden mit Humusgehalten < 1 Masse-%	21
Tabelle 4:	Eigenschaften bzw. Kennwerte der Porengrößen in Böden (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 343, verändert)*	22
Tabelle 5:	Luftkapazitäten in Abhängigkeit von der Bodenart und der Trockenrohichte für Feinboden mit Humusgehalten < 1 Masse-% in Anlehnung an DEHNER et al. (2015)	23
Tabelle 6:	Einteilung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 355)	24
Tabelle 7:	Gesättigte Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (Ld) in Anlehnung an RENGER et al. (2014)	24
Tabelle 8:	Druckeinheiten	25
Tabelle 9:	Bestimmung der Bodenarten-Gruppe anhand der Körnung und weiterer Merkmale (nach Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 144ff)	26
Tabelle 10:	Definitionen der Bindigkeit und Formbarkeit schwach feuchter Bodenproben (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 143)	27
Tabelle 11:	Feuchtestufen und Konsistenzbereiche der Böden nach Ad-hoc-AG Boden (2005, S. 115) sowie Befahrbarkeit nach DIN 19731 und BMLFUW (2012, S. 42)	27
Tabelle 12:	Klassifizierungsschema Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenmerkmalen und der Häufigkeit hoher Bodenfeuchten	37
Tabelle 13:	Tieflockerung – Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen verschiedener praxisüblicher Maschinen und Geräte	49

1 Einleitung

Böden sind ein zentraler Bestandteil des Naturhaushaltes. Sie sind Standort für Pflanzen- und Tierlebensgemeinschaften, speichern Wasser, regulieren den Wasserabfluss und sind Puffer sowie Filter im Stoffhaushalt. Allein diese verkürzte Aufzählung der vielfältigen Funktionen und Leistungen von Böden macht deutlich, dass der Schutz von Böden und ihrer Funktionen kein Selbstzweck, sondern für die Menschen und auch für die Natur von essenzieller Bedeutung ist.

Insbesondere bei Baumaßnahmen sowie bei der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung wirken hohe mechanische Lasten auf die Böden ein. Bei übermäßigen Lasten können Böden erheblich verdichtet und somit geschädigt werden. Die natürlichen Bodenfunktionen im Wasser- und Nährstoffhaushalt sowie die Funktionen als Pflanzenstandort werden beeinträchtigt oder gehen vollständig verloren.

Um Böden vor schädlichen Bodenverdichtungen zu schützen, werden fachliche Grundlagen und praxisbezogene Hilfestellungen benötigt. Der Schwerpunkt dieser Broschüre ist die Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen bei Baumaßnahmen. So sind Böden unterschiedlich empfindlich gegenüber mechanischen Lasteinträgen. Auch die eingesetzten Maschinen wirken unterschiedlich stark auf die Böden ein. Bei allen Arbeiten auf ungeschützten Böden sind zusätzlich noch die Witterungseinflüsse zu berücksichtigen. Nach Niederschlägen sind die Böden stark feucht oder wassergesättigt. Vernässte Böden sind besonders stark verdichtungsempfindlich.

Es wird deutlich, dass die Entscheidung, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Technik noch eine bodenschonende Befahrung durchgeführt werden kann, sehr vielschichtig ist.

2 Was ist eine schädliche Bodenverdichtung?

Böden bestehen wie ein Schwamm aus Festsubstanz und Poren (vgl. Abbildung 1). Im Porenraum verteilen sich Luft und Wasser. Wie viel Wasser oder Luft sich in den Poren befinden, ist neben der Bodenart und der Lagerungsdichte des Bodens insbesondere von der Witterung abhängig. In niederschlagsreichen Perioden füllt sich der Porenraum des Bodens mit Wasser, in trockenen Perioden entleert er sich.

Die Leistungsfähigkeit des Bodens im Naturhaushalt ist entscheidend von seinem Porensystem abhängig. Wird das Porensystem durch mechanische Belastungen (Befahrungen oder Erdarbeiten) beeinträchtigt, dann wirkt sich das sofort nachteilig auf die natürlichen Funktionen des Bodens aus. Aus diesem Grund sind Bodenverdichtungen, die zu einem Verlust an Porenvolumen und Porendurchgängigkeit führen, soweit wie möglich zu vermeiden.

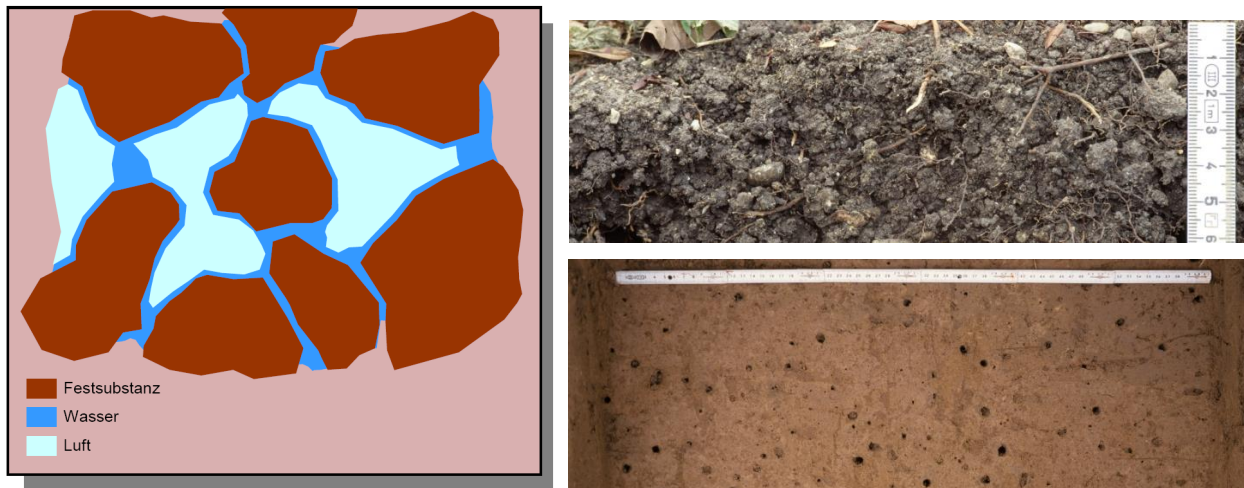


Abbildung 1: Boden als poröser Körper; Krümelgefüge im Oberboden (oben) und Aufsicht auf offene Regenwurmgänge in 40 cm Bodentiefe (unten)

(Fotos: Otto Ehrmann)

Eine schädliche Bodenverdichtung reduziert die Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie die Wasser- und Luftkapazität der Böden. Dadurch werden Staunässe, Oberflächenabfluss bei Starkregen, Bodenerosion und Hochwasserentstehung verstärkt. Neben diesen bodenhydrologischen Auswirkungen führt eine schädliche Bodenverdichtung auch zu einer reduzierten Durchwurzelbarkeit des Bodens. Die Folge sind erkennbare Aufwuchs- bzw. Ertragsschäden insbesondere bei landwirtschaftlichen Kulturen.

Aus Sicht des Bodenschutzrechtes liegt eine schädliche Bodenverdichtung vor, wenn der Bodenluft-, Bodenwasserhaushalt oder Nährstoffkreislauf derart beeinträchtigt wird, dass es zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Bodenfunktionen nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 BBodSchG kommt. Ursache sind übermäßige mechanische Belastungen des Bodens durch Befahrungen, Umlagerungen etc.

Die rechtliche Definition kann mit Hilfe bodenschutzfachlicher Kriterien untersetzt werden. Fachlich besteht Konsens, dass schädliche Bodenverdichtungen unter anderem dann vorliegen, wenn bodenphysikalische Kennwerte wie die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit erheblich beeinträchtigt werden. Ebenso können Beeinträchtigungen aus hohen bis sehr hohen Packungsdichten bzw. effektiven Lagerungsdichten des Bodens abgeleitet werden (siehe auch Kapitel 3).

Sind mit Hilfe von Boden- oder Ertragsuntersuchungen schädliche Bodenveränderungen nachgewiesen worden, dann sind diese mit geeigneten Mitteln zu beseitigen. Die zuständige Bodenschutzbehörde hat in diesem Fall die Möglichkeit, Sanierungsmaßnahmen gegen den Verursacher oder anderen Pflichtigen nach § 4 BBodSchG anzuordnen. Dabei sind die Erforderlichkeit, Geeignetheit und Verhältnismäßigkeit der angeordneten Maßnahmen zu berücksichtigen.

Insbesondere eine schädliche Bodenverdichtung des Unterbodens ist nur sehr kosten- und zeitaufwendig wieder zu beheben, weil die Bodenlockerung mit einer speziellen Landtechnik durchgeführt werden muss und der Boden anschließend eine längerfristige, zum Teil mehrjährige Bodenruhe mit einem entsprechenden Pflanzenbestand benötigt.

Geeignete Sanierungs- bzw. Rekultivierungsmaßnahmen werden in Kapitel 7 näher beschrieben.



Abbildung 2: Extreme Verdichtungsschäden durch Befahrungen



Abbildung 3: Plattengefüge als Folge einer schädlichen Verdichtung
(Foto: Bayerische LfL 2012)

3 Erkennen einer schädlichen Bodenverdichtung

Die folgenden bodenphysikalischen Untersuchungen werden am besten bei einem feuchten Bodenzustand durchgeführt. Bei nassen oder trockenen Bodenzuständen kann je nach Bodenart eine entsprechende Bodendiagnose bzw. Bodenprobenahme erschwert oder unmöglich sein.

3.1 Einfache Gefügebeurteilung (Spatendiagnose)

Der Gefüge- und Verdichtungszustand von Böden kann anhand einfacher Merkmale der Bodenoberfläche, des Pflanzenwuchses und der Spatendiagnose beurteilt werden. Diese Feldmethoden zielen darauf ab, den Gefüge- bzw. Verdichtungszustand und damit einhergehender Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen mit Hilfe von günstigen bzw. ungünstigen Merkmalseigenschaften bewerten zu können.

Die Erfassung des Bodengefüges erfolgt mit einfachen Sinneswahrnehmungen. Beispiele: Wie sieht die Bodenoberfläche aus, wie hat sich der Pflanzenbestand entwickelt, sind grobe Poren erkennbar, welche Farbe hat der Boden, wie fühlt sich der Verfestigungsgrad an oder riecht der Boden faulig?

Definition Bodengefüge und Bodenaggregate

Das **Bodengefüge** beschreibt die erkennbare räumliche Anordnung fester Bodenbestandteile einschließlich der zugehörigen Hohlräume bis hin zum Vorliegen separierter Körper (Aggregate) (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 186).

Bodenaggregate setzen sich aus Gruppen von Bodeneinzelteilchen (Sand, Schluff, Ton, Humus) zusammen. Je nach Bodenkörnung und Verdichtungszustand zeichnen sich die Bodenaggregate durch charakteristische Formen und Größen aus (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 116ff).

Bereits die Bodenoberfläche gibt wichtige Hinweise auf mögliche Gefügeschäden. Werden tiefe Fahrspuren, eine flächig zerfahrene Oberfläche, Pfützenbildung oder sogar deutliche Aufwuchsschäden beobachtet, so liegt die Vermutung einer schädlichen Bodenverdichtung vor.

Zustand der Bodenoberfläche

Hinweise auf eine schädliche Bodenverdichtung ergeben sich bereits durch folgende Beobachtungen:

Tiefe Fahrspuren > 10 cm Tiefe



Stark zerfahrene Bodenoberfläche



Pfützenbildung und Aufwuchsschäden im Getreide



Pfützenbildung und Aufwuchsschäden im Grünland



Zustand des Pflanzenbestandes (Aufwuchsbonitur)

Kümmerwuchs Getreide



Kein Auflaufen der Saat



Kümmerwuchs und gelbe Blattverfärbungen bei Zuckerrüben



Versunkene Kartoffeldämme ohne Aufwuchs



Spatendiagnose

Mit Hilfe einer Spatendiagnose können die Schäden weiter erfasst und beurteilt werden. Eine solche Spatendiagnose ist am besten vergleichend sowohl im geschädigten als auch ungeschädigten Bereich durchzuführen. So lassen sich baubedingte Beeinträchtigungen oder auch Beeinträchtigungen durch ungünstige landwirtschaftliche Bewirtschaftungsverfahren gut erfassen.

Die wichtigsten Merkmale der Gefügebeurteilung sind die Durchwurzelung, Gefügeform und Lagerung der Bodenaggregate. Dazu bedarf es einiger Erfahrung, um die Merkmale sicher zu bewerten. Das nachstehende Schema erlaubt eine Einstufung in günstige und ungünstige Merkmalseigenschaften. Übergänge dazwischen können vergeben werden.

Erläuterungen und Bildfolge zur Spatendiagnose (Bay. LfL 2012, ergänzt und verändert)¹

Gefüge- und Verdichtungsmerkmale lassen sich im Gelände gut mit einem Spaten ermitteln. Mit der Spatendiagnose kann der Verdichtungszustand des Oberbodens und des krumennahen Unterbodens gut beurteilt werden. Tiefere Schichten werden in Profilschürfen untersucht.

Zur Gefügebewertung mit dem Spaten werden folgende Merkmale erfasst und anschließend qualitativ mit Hilfe der Einstufungen nach Tabelle 1 (S. 15) beurteilt:

- Durchwurzelung des Bodens
- Grobe Poren (Makroporen)
- Gefüge und Festigkeit (ist auch von der aktuellen Bodenfeuchte abhängig)
- Farbe und Geruch
- Eindringwiderstand (ist auch von der aktuellen Bodenfeuchte abhängig)

Arbeitsschritte der Spatendiagnose

1. Bodenblock ausstechen

Einstecken des Spatens – bereits der Eindringwiderstand gibt einen ersten Eindruck zur Dichtlagerung



Der erste Spatenstich wird seitlich abgeworfen. Erste Hinweise zum Bodengefüge sind bereits zu erkennen.



Hinter dem ersten Spatenstich wird der auszuhebende Bodenblock durch seitliches Einstecken abgegrenzt.



(Fotos: Bayerische LfL 2012)

¹ Die Methode ist ausführlich in der Broschüre „Bodenstruktur erkennen und beurteilen – Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten“ aus dem Jahr 2012 erläutert (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13511>). Hier werden nur die wesentlichen Inhalte wiedergegeben.

2. Bodenblock ausheben

Ausheben des Bodenblocks: Die eine Hand betätigt den Spaten als Hebel, die andere hält den Bodenblock auf dem Spaten.



3. Gefüge beurteilen

3a. Erste Variante der Gefügebeurteilung: Vorsichtiges Zerlegen des Bodenblocks mit den Händen oder einem Messer. Weiter mit 3c.



3b. Zweite Variante der Gefügebeurteilung – Abwurfprobe: Beim Aufprall auf eine feste Unterlage (Brett) zerfällt der Bodenblock in seine Gefügestrukturen. Weiter mit 3c.



(Fotos: Bayerische LfL 2012)

3c. Erfassen der Gefügeeigenschaften:

Beim behutsamen Zerlegen des Bodenblocks werden Durchwurzelung des Bodens, Anteil an groben Poren (Makroporen), Gefüge und Festigkeit, Farbe und Geruch erfasst.



Aufbrechen des Bodenblocks mit den Händen: Der Kraftaufwand steigt mit der Dichtlagerung.



Stark verdichteter Lössboden mit Kohärentgefüge; Grobporen weitgehend verpresst



(Fotos: Bayerische LfL 2012)

Durch Zerdrücken und Kneten mit der Hand werden Festigkeit und Zerfall des Bodens geprüft. (Hinweis: Sehr stark vom Wassergehalt abhängig!)



Links Bodenblock aus unverdichtetem Bereich, rechts aus verdichtetem Bereich. Im verdichteten Bodenblock fehlen die Grobporen. Unter Luftmangel wird der Humus anaerob umgesetzt (Fäulnis), der Boden färbt sich blau-gräulich.



Lössboden in ursprünglicher, lockerer Lagerung mit vielen Grobporen



Die Durchwurzelung erfolgt nur an den Klufflächen.



Die Durchwurzelung endet abrupt am Übergang des bearbeiteten, lockeren Oberbodens hin zum stark verdichteten Unterboden.



Gehemmte Durchwurzelung durch plattiges Gefüge im unteren Krumenbereich



Beinige Rüben als Folge starker Verdichtungen. Ohne Verdichtung bildet sich nur ein Rübenkörper mit einer Pfahlwurzel, die bis über 2 m Tiefe reichen kann.



Bläulich-graue Färbung* des aufgebrochenen Oberbodens weist auf Luftabschluss durch Verdichtungen hin. Der Boden riecht nicht mehr angenehm erdig, sondern faulig.



Im verdichteten Boden fällt an einzelnen luftführenden Klüften das im Bodenwasser gelöste Eisen als Rostflecken* wieder aus.



* Nicht zu verwechseln mit entsprechenden Färbungen von natürlich vernässten Bodentypen wie Gleye und Pseudogleye.

Scharfkantiges Polyedergefüge als Folge einer Verdichtung



Plattengefüge in einem Lössboden als eindeutiger Hinweis auf eine schädliche Bodenverdichtung



Tabelle 1: Bewertungsschema einer einfachen Gefügebeurteilung

	günstige	Merkmals- eigenschaften	ungünstige
Bodenoberfläche	<ul style="list-style-type: none"> ■ ohne Beeinträchtigungen ■ Durchwurzelung des Bodens 		<ul style="list-style-type: none"> ■ tiefe Fahrspuren ■ flächig zerfahren ■ Pfützenbildung ■ Aufwuchsschäden
Wurzelwachstum	<ul style="list-style-type: none"> ■ gleichmäßige Durchwurzelung mit vielen Feinwurzeln und senkrecht im Boden verlaufenden Pfahlwurzeln ■ keine Wurzelhindernisse 		<ul style="list-style-type: none"> ■ keine oder nur sehr unregelmäßige Durchwurzelung ■ Feinwurzeln nur auf Aggregatoberflächen als Wurzelfilz ■ plattgedrückte Wurzeln ■ abgelenkte Wurzeln bzw. Beinigkeit auf der verdichteten Bodenschicht
Makroporen > 0,5 mm Durchmesser	<ul style="list-style-type: none"> ■ viele vertikal durchgängige Regenwurm- und Wurzelgänge im Ober- und Unterboden ■ Anteil deutlich > 5 % (vgl. Abbildung 4 u. Abbildung 5) 		<ul style="list-style-type: none"> ■ keine oder nicht durchgängige Grobporen ■ keine oder nur sehr geringe Regenwurmmaktivität ■ Anteil deutlich < 2 %
Gefüge und Verfestigung	<ul style="list-style-type: none"> ■ porös, locker, fein aggregiert bei Druck zwischen den Fingern zerfallend ■ zerfällt bei der Abwurfprobe in kleine Aggregate ■ Eindringwiderstand mit der Handsonde oder mit dem Messer in der Profilwand gering 		<ul style="list-style-type: none"> ■ stark verfestigt ■ mit den Fingern kaum bzw. nicht zu zerdrücken ■ zerfällt bei der Abwurfprobe kaum oder nur in grobe Blöcke ■ Eindringwiderstand mit der Handsonde oder mit dem Messer in der Profilwand sehr hoch
Farbe und Geruch	<ul style="list-style-type: none"> ■ gleichmäßig braune, braunschwarze Farbe ■ erdiger Geruch 		<ul style="list-style-type: none"> ■ bläulich-graue Farbe ■ stellenweise rostfleckig oder schwarze Manganflecken ■ fauliger Geruch

Weitere Bewertungsschemas für die Praxis u. a. bei GKB & vTI (2013) und MUNLV (2010)

Liegen schädlich verdichtete Böden vor, dann ist zu prüfen, ob die Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen mit mechanischen (Tief-)Lockerungsmaßnahmen gemindert oder gar beseitigt werden können (vgl. Kapitel 7.1 auf S. 49).

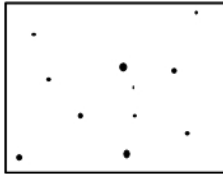
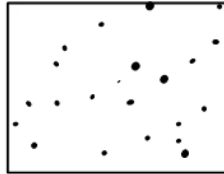
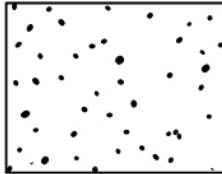
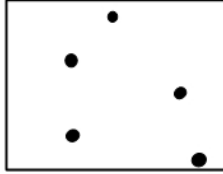
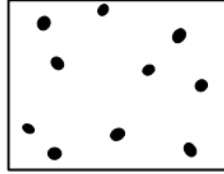
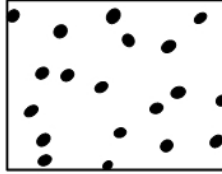
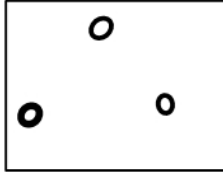
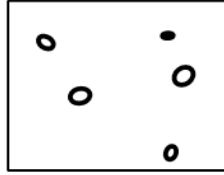
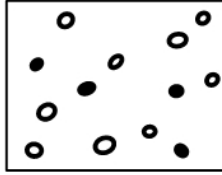
			Makroporenanteil: Anteil makroskopisch sichtbarer Poren (Pa) am Bodenvolumen			
			Vol-%	1 - < 2	2 - < 5	5 - ≤ 10
			Bezeichnung	gering	mittel	hoch
Einstufung der Porengröße			Kurzzeichen	f 2	f 3	f 4
überwiegender Ø [mm]	Bezeichnung	Kurzzeichen				
0,5 - < 1	fein	gri 2				
1 - < 2	mittel	gri 3				
2 - ≤ 5	grob	gri 4				

Abbildung 4: Bestimmung des Makroporenanteils am Bodenvolumen bezogen auf den Flächenanteil (nach Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 124)

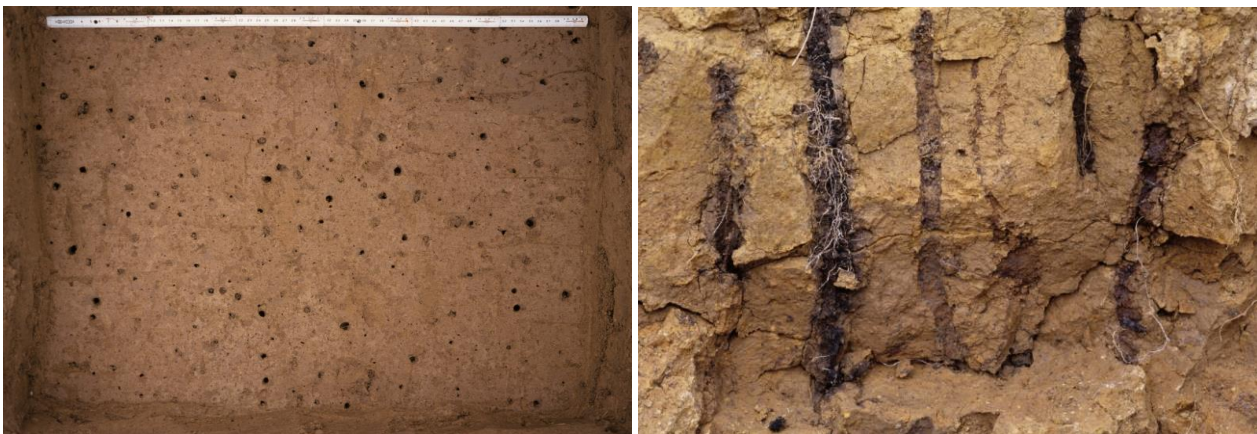


Abbildung 5: Beispiele von Makroporen (Regenwurmgänge); links: Aufsicht Regenwurmgänge in 40 cm Bodentiefe (Zollstock oben 60 cm); rechts: Regenwurmgänge in der Profilwand, mit Wurzeleinwachsungen

(Fotos: Otto Ehrmann)

3.2 Packungsdichte und effektive Lagerungsdichte (Bodenschurf)

Die Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges erfolgt mit Hilfe der im Gelände erhobenen Gefügemerkmale Aggregatgröße, Verfestigungsgrad bzw. Lagerungsart der Aggregate, Volumenanteil der Makroporen und Wurzelverteilung (vgl. DIN 19862-10). Mit Hilfe dieser Gefügemerkmale lässt sich die Packungsdichte bzw. die effektive Lagerungsdichte (KA5, S. 125) ableiten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Ableitung der Packungsdichte (Pd) bzw. der effektiven Lagerungsdichte (Ld) anhand von Gefügemerkmalen und der Wurzelverteilung als Grundlage zur Beurteilung des Bodengefüges (vgl. DIN 19862-10, KA5, S. 125)

Aggregatgröße	Gewichtung der Gefügemerkmale			Wurzelverteilung	Packungsdichte und effektive Lagerungsdichte**	
	Mittel	Hoch	Sehr hoch		Benennung	Kurzzeichen
Verfestigungsgrad*	Lagerungsart der Aggregate	Makroporen >0,5 mm **				
< 5 mm bis 5-<10 mm	Nicht verfestigt, sehr lose, zerfällt schon bei der Entnahme.	Sperrig. Aggregate sind überwiegend durch spalten- u. röhrenförmige Hohlräume getrennt oder befinden sich in regelloser Anordnung, die Oberflächen bilden keine oder nur sehr unvollständige Abdrücke.	Sehr hoch. 10 bis < 30 % Flächenanteil	Gleichmäßig. Die Wurzeln verteilen sich gleichmäßig über den ganzen Horizont.	sehr gering	Pd1 Ld1
< 5 mm bis 10-<20 mm	Schwach verfestigt, lose, zerfällt bei der Fallprobe in zahlreiche Aggregate / Bruchstücke.	Offen. Aggregate sind überwiegend durch spalten- u. röhrenförmige Hohlräume getrennt, die Oberflächen bilden keine oder nur unvollständige Abdrücke.	Hoch. 5 bis < 10 % Flächenanteil	Gleichmäßig. Die Wurzeln verteilen sich gleichmäßig über den ganzen Horizont.	gering	Pd2 Ld2
5-<10 mm bis 10-20 mm	Mittel verfestigt, zerfällt bei der Fallprobe in wenige Aggregate / Bruchstücke, die von Hand weiter aufgeteilt werden können.	Halb offen. Aggregate sind teils durch Fugen, teils durch spalten- o. röhrenförmige Hohlräume getrennt.	Mittel. 2 bis < 5 % Flächenanteil	Ungleichmäßig. Makroporen wie Regenwurmgänge oder Spalten werden als bevorzugte Wurzelbahnen genutzt.	mittel	Pd3 Ld3
10-<20 mm bis >50 mm	Stark verfestigt, zerfällt bei der Fallprobe in wenige Aggregate / Bruchstücke, die von Hand nicht oder nur schwer weiter aufgeteilt werden können.	Fast geschlossen. Aggregate sind teils durch Fugen u. wenige spalten- u. röhrenförmige Hohlräume getrennt, die Oberflächen bilden meist vollkommene Abdrücke.	Gering: 1 bis < 2 % Flächenanteil	Starke Häufung in Rissen. Die Wurzeln konzentrieren sich auf die durch Spalten getrennten Aggregatoberflächen.	hoch	Pd4 Ld4
20-<50 mm bis >50 mm	Sehr stark verfestigt, zerfällt bei der Fallprobe kaum.	Geschlossen. Aggregate sind durch Fugen getrennt, die Oberflächen bilden vollkommene Abdrücke.	Sehr gering. < 1 % Flächenanteil	Sehr starke Häufung in Rissen. Die Häufung der Wurzeln auf den Aggregatoberflächen ist besonders auffällig, teilweise kann von Wurzelfilz gesprochen werden.	sehr hoch	Pd5 Ld5

* Entspricht Zusammenhalt der Aggregate.

** Makroporen: vgl. Abbildung 1 und Abbildung 5

Die feldbodenkundliche Gefügaufnahme erfasst integral die funktionalen Beeinträchtigungen durch mechanische Auflasten. Die Beurteilung erfolgt idealerweise in Bodenschürfen bis in die Tiefenlage der vermuteten Verdichtung. An der Stirnwand des Bodenschurfs können die Gefügemerkmale je Bodenhorizont

erfasst und bewertet werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Durchwurzelung und deren etwaige Beeinträchtigung zu legen. Fehlt zum Zeitpunkt der Gefügearfassung ein Pflanzenbestand, dann kann die Beurteilung ausschließlich anhand der anderen Gefügemerkmale erfolgen.

Die effektive Lagerungsdichte kann auch auf der Grundlage von Laboranalysen abgeleitet werden (siehe Kap. 3.4.1).

Hohe bis sehr hohe Bodendichten (Pd4 und Pd5 bzw. Ld4 und Ld5) sind als konkrete Anhaltspunkte für schädliche Bodenverdichtungen einzustufen (vgl. auch UBA 2004)

3.3 Eindringwiderstand (Handsonde und Penetrometer/ Penetrologger)

Böden weisen in Abhängigkeit von ihrer Bodenart, Dichtlagerung und ihren Gefügeeigenschaften einen charakteristischen Eindringwiderstand auf.

Starken Einfluss hat die aktuelle Bodenfeuchte auf den Eindringwiderstand. Mit zunehmender Austrocknung steigt der Eindringwiderstand an. In ausgetrockneten Böden können Dichtlagerungen und Gefügebbeeinträchtigungen nicht mehr mit Hilfe des Eindringwiderstandes beurteilt werden. Aus diesem Grund beschränkt sich der optimale Erfassungszeitraum des Eindringwiderstandes im Regelfall auf den Zeitraum Oktober/November bis April/Mai; jahreszeitliche Witterungseinflüsse sind zu berücksichtigen.

Weiterhin wird der Eindringwiderstand durch den Steingehalt beeinflusst. Zur Beurteilung von Bodenverdichtungen kann der Eindringwiderstand nur bei steinfreien bzw. steinarmen Böden bis maximal 10 Volumen-% Steingehalt verwendet werden.

Aufgrund der vielfältigen Einflüsse auf den Eindringwiderstand eignet sich die Erfassung des Eindringwiderstandes vorwiegend für folgende Einsatzbereiche (vgl. DIN 19622):

- Vergleichende Messungen in Böden, die nur einem unterschiedlichen Einflussfaktor ausgesetzt waren; beispielsweise für Böden vor und nach Überfahrungen oder Böden vor dem Bodenaushub und nach der Wiederherstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht (Rekultivierung)
- Aufsuchen von bodenphysikalischen Unterschieden; beispielsweise bei der Suche nach Verdichtungsschichten, Substratwechseln etc.
- Ersteinschätzung der Befahrbarkeit feuchter Böden durch schwere Fahrzeuge im Baustellenbereich
- Qualitätsprüfung von Rekultivierungs- und Lockerungsmaßnahmen

3.3.1 Handsonde

Der Eindringwiderstand kann mit Hilfe einfacher Handsonden taktil erfasst werden. Etwaige Bodenverdichtungen lassen sich im Vergleich von unbeeinträchtigten und beeinträchtigten Böden ermitteln. Es empfiehlt sich, mit der Handsonde den Eindringwiderstand zuvor in einem baulich nicht in Anspruch genommenen Bereich – beispielsweise auf einer unbeeinflussten Bodenfläche neben der Baustelle – zu erfassen. Mit dieser taktilen Referenz kann anschließend in den zu beurteilenden Bauflächen der Eindringwiderstand der Böden verglichen werden. Ergeben sich auffällige Unterschiede im Eindringwiderstand, so können ggf. notwendige weitergehende bodenphysikalische Untersuchungen gezielt in Flächen mit hohem Eindringwiderstand gelegt werden.



Abbildung 6: Handsonde zur einfachen taktilen Erfassung des Eindringwiderstandes

3.3.2 Penetrometer/Penetrollogger

Neben der taktilen Erfassung des Eindringwiderstandes kann dieser auch messtechnisch erfasst werden. Dazu bieten sich Handpenetrometer oder Handpenetrologger an. Penetrometer verfügen über einfache Druckaufnehmer, wobei der Eindringwiderstand während des Eindringvorgangs abgelesen werden kann. Eine Zuordnung zu einzelnen Tiefenbereichen ist dadurch erschwert. Penetrologger verfügen über einen digitalen Druckaufnehmer, sodass der Eindringwiderstand über den Tiefenbereich grafisch abgebildet werden kann.

Der Einsatz der Messgeräte ist in DIN 19622 beschrieben. Die Messungen erfolgen zumeist bis zu einer Bodentiefe von 80 bis 100 cm. Der Handpenetrometer bzw. -logger wird senkrecht in möglichst ruckfreier Bewegung in den Boden gedrückt. Für eine repräsentative Erfassung werden regelmäßig 8 bis 10 Wiederholungen benötigt.

Zur bodenschutzfachlichen Bewertung der Penetrologger-Ergebnisse muss die Bodenfeuchte entweder mit Bodenproben oder mit Hilfe mobiler Bodenfeuchtemessgeräte im untersuchten Tiefenbereich erfasst werden, um Unterschiede im Eindringwiderstand, die auf unterschiedliche Bodenfeuchten zurückgehen, berücksichtigen zu können. Beispielsweise kann mit Hilfe von TDR-Sonden und einem speziellen Edelman-Bohrerset, mit dem eine glatte Bohrsohle in gewünschter Tiefe hergestellt werden kann, eine vertikale Feuchteerfassung erfolgen. In der Praxis haben sich mindestens drei Messbereiche in ca. 10 bis 30 cm Tiefe (Oberboden), 40 bis 50 cm Tiefe (krumennaher Unterboden) und 60 bis 70 cm Tiefe (unterer Messbereich der Drucksonde) bewährt.

Bei feuchten bis nassen Böden kann man nach DIN 19622 bei Eindringwiderständen ab 2 MPa (= 20 bar) von negativen Auswirkungen auf den Pflanzenbestand ausgehen, ab 3 MPa (= 30 bar) von erheblichen Auswirkungen.



Abbildung 7: Handpenetrologger bei der Rekultivierungskontrolle; Grafik des Eindringwiderstandes als Mittelwert von 10 Wiederholungen (rechts)

3.4 Bodenprobenahme und Laborwerte

Bodenuntersuchungen mit Hilfe „ungestörter“ Bodenproben² sollten speziellen bodenschutzfachlichen Fragestellungen oder Beweissicherungsverfahren vorbehalten werden. Sie sind in der Baupraxis nicht regelhaft durchzuführen, weil sie zeitlich sehr aufwendig sind und die Ergebnisse auch nur mit einer zeitlichen Verzögerung (Laborarbeiten) vorliegen. Für kurzfristige Entscheidungen im Bauablauf sind sie deshalb ungeeignet.

Die Entnahme ungestörter Bodenproben erfolgt mit Hilfe von Stechringen, die zumeist 100 oder 250 cm³ groß sind. In bodenphysikalisch ausgerichteten Laboren können anhand ungestörter Bodenproben Trockenrohdichte (DIN ISO 11272, Abschnitt 4.1), Porengrößenverteilung (DIN ISO 11274) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (DIN 19683 T9) ermittelt werden. Zu jedem Beprobungspunkt sind in etwa 15 cm und 40 cm Bodentiefe (im Einzelfall abhängig von der Fragestellung) mindestens 8 Stechringe (Wiederholungen; bei heterogenen Bodenbedingungen, wie sie in Baufeldern häufig vorliegen, besser 12 Stechringe je Probentiefe) notwendig, um einigermaßen sichere Mittelwerte zu erhalten. Die Probenahme kann nur durch geschulte Personen mit Erfahrungen in der Feldbodenkunde erfolgen.

² In der Bodenkunde zielt eine „ungestörte“ Probenahme darauf ab, dass eine Probe in ihrer zu untersuchenden Lagerung erhalten bleibt, um daran bodenphysikalische Messungen vornehmen zu können (vgl. Ad-hoc-AG Boden 2005, Kap. 4.6). Dazu wird die Probe sorgfältig aus dem zu untersuchenden Bodenverband gelöst, sodass ihr natürliches oder auch anthropogen verändertes Bodengefüge weitestgehend erhalten bleibt. Eine „ungestörte“ Probenahme kann also auch die Untersuchung gestörter Bodengefüge-merkmale zum Gegenstand haben.



Abbildung 8: Entnahme von ungestörten Bodenproben mit Hilfe von Stechzylindern aus einem Bodenschurf bei der Rekultivierungskontrolle

3.4.1 Trockenrohdichte und effektive Lagerungsdichte

Die Trockenrohdichte (TRD) einer Bodenprobe wird in g/cm^3 angegeben. Die trockene Bodenmasse (bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet) wird auf das entnommene Bodenvolumen (Stechringvolumen) bezogen. Humose Oberböden haben meist Trockenrohdichten von $1,1$ bis $1,5\text{ g/cm}^3$, wobei im Oberboden eines Ackerbodens die TRD-Werte eher im oberen Bereich liegen und im Grünland- und Wald-Oberboden die geringeren TRD-Werte anzutreffen sind. In den Unterböden erstrecken sich die Trockenrohdichten meist von $1,4$ bis $1,8\text{ g/cm}^3$.

Aus dem TRD-Wert allein lässt sich nur eingeschränkt eine Schadverdichtung ableiten. Erst in Verbindung mit der Bodenart bzw. der Korngrößenverteilung kann eine Beurteilung vorgenommen werden. Mit Hilfe der folgenden Gleichung lässt sich die effektive Lagerungsdichte (L_d) berechnen (RENGER et al. 2014; vgl. Tabelle 3), die als Kriterium für eine schädliche Bodenverdichtung genutzt werden kann:

$$L_d = \text{TRD g/cm}^3 + 0,005 * \text{Tongehalt Masse-\%} + 0,001 * \text{Schluffgehalt Masse-\%}$$

Aus Abbildung 9 wird ersichtlich, dass beginnend mit einer hohen effektiven Lagerungsdichte der Kornertrag deutlich abnimmt. Bei sehr hohen effektiven Lagerungsdichten kann es zu Totalausfällen kommen.

Tabelle 3: Einteilung der effektiven Lagerungsdichte (L_d) nach RENGER et al. (2014) für Feinboden mit Humusgehalten < 1 Masse-%

Kurzzeichen	Ld1	Ld2	Ld3	Ld4	Ld5
Bezeichnung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Kennwert L_d	$< 1,3$	$1,3 - < 1,55$	$1,55 - < 1,75$	$1,75 - < 1,95$	$\geq 1,95$

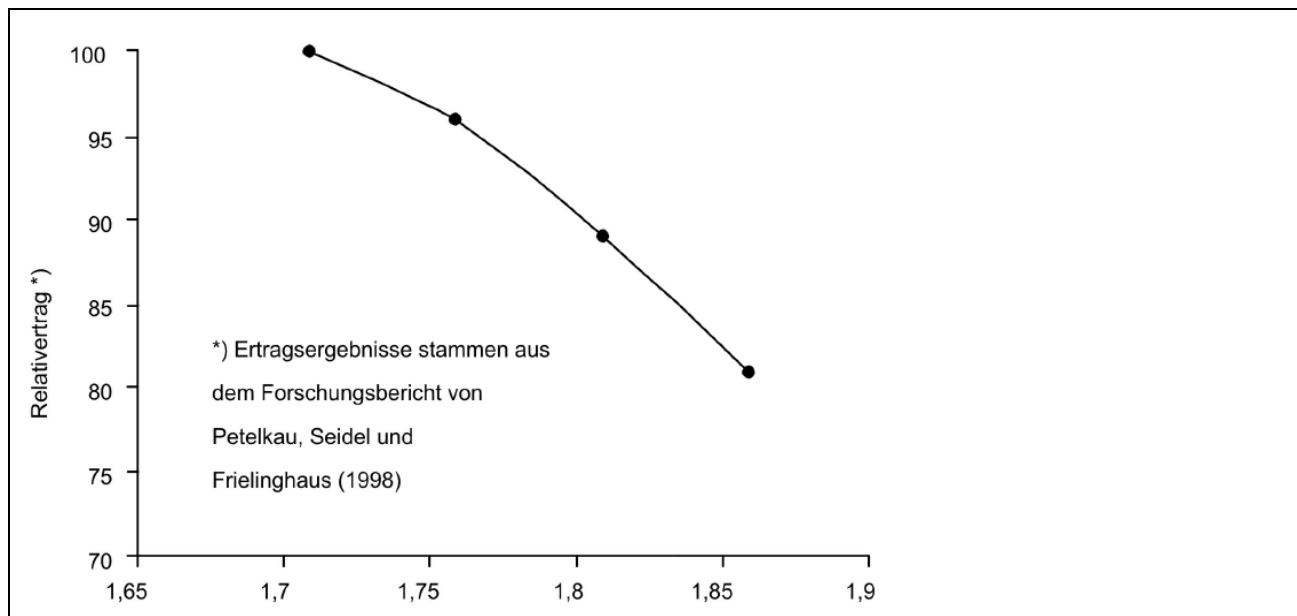


Abbildung 9: Einfluss der effektiven Lagerungsdichte des Unterbodens auf den Kornertrag von Winterroggen (Lagerungsdichte der Ackerkrume im optimalen Bereich) (RENGER et al. 2014)

3.4.2 Luftkapazität und Porengrößenverteilung

Die Erfassung der Porengrößenverteilung zielt auf die Bewertung der funktionalen Eigenschaften im Bodenwasserhaushalt ab (vgl. Tabelle 4).

Beeinträchtigungen des Gesamtporenvolumens durch Verdichtungen verursachen vor allem einen Rückgang der Grobporen und z. T. der Mittelporen. Diese beiden Porenbereiche sind für die Leistungsfähigkeit der Böden in den Wasser-, Nährstoff- und Luftkreisläufen bedeutsam. Die Grobporen stellen die Belüftung des Bodens und die schnelle Versickerung von Niederschlagswasser sicher, die Mittelporen die Wasserversorgung der Pflanzen. Verluste an Grob- und Mittelporen gehen regelmäßig mit Beeinträchtigungen ihrer natürlichen Bodenfunktionen einher; zum Beispiel wird das Pflanzenwachstum gestört und reduziert.

Tabelle 4: Eigenschaften bzw. Kennwerte der Porengrößen in Böden (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 343, verändert)*

Porenbereiche	Eigenschaften bzw. Kennwerte der Porengrößen in Böden			
	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Saugspannung in hPa	< 60	60 bis < 300	300 bis < 15.000	≥ 15.000
pF-Wert	< 1,8	1,8 bis < 2,5	2,5 bis < 4,2	≥ 4,2
Äquivalentdurchmesser in µm	> 50	50 bis > 10	10 bis > 0,2	≤ 0,2
Bodenwasser	schnell bewegliches	langsam bewegliches und pflanzenverfügbares	pflanzenverfügbares	nicht pflanzenverfügbares
	Sickerwasser		Haftwasser	
Kennwerte in Vol.-% des Bodenvolumens in seiner natürlichen Lagerung (Stechringvolumen)	Luftkapazität (LK)	nutzbare Feldkapazität (nFK)		Totwasser (TW)
		Feldkapazität (FK)		
	Gesamtporenvolumen (GPV)			

* Die Grenze der Luftkapazität zur Feldkapazität verläuft nach jüngeren Auswertungen nicht generell bei pF 1,8. Nach RENGER et al. (2008) liegt die Grenze zwischen pF 1,9 und pF 2,5 (= Feuchtigkeitsäquivalent) in Abhängigkeit von der Feinbodenart (vgl. auch DEHNER et al. 2015). Weiterhin haben der Humusgehalt und die Substratgenese einen Einfluss.

Der Bodenkennwert Luftkapazität wird im Labor bestimmt. Das Porenvolumen, das bei einer Saugspannung von 60 hPa nicht mit Wasser gefüllt ist, ergibt sich aus dem Gesamtporenvolumen abzüglich der Feldkapazität ($LK = GPV - FK$). Bei Luftkapazitäten ≤ 5 Vol.-% ist die Belüftung des Bodens nur noch sehr eingeschränkt möglich.

Aus Tabelle 5 geht hervor, dass die Schluffe und Tone bereits bei einer Trockenrohdichte von $> 1,5$ g/cm³ in den kritischen Luftkapazitätsbereich kommen. In Folge wird die gleichmäßige Durchwurzelung der Böden durch die eingeschränkte Bodendurchlüftung behindert. Im Gegensatz dazu erreichen die Sande auch bei hoher bis sehr hoher Trockenrohdichte noch Luftkapazitäten größer 5 Vol.-%. Insofern wird die Durchwurzelung bei Sanden weniger durch Luftmangel als durch stark erhöhte Eindringwiderstände beeinträchtigt.

Tabelle 5: Luftkapazitäten in Abhängigkeit von der Bodenart und der Trockenrohdichte für Feinboden mit Humusgehalten < 1 Masse-% in Anlehnung an DEHNER et al. (2015)

Bodenarten nach KA5			Bodenarten nach Bodenschätzung	Luftkapazität in Vol.-%			
Hauptgruppe	Gruppe	Kürzel		TRD 1,3	TRD 1,5	TRD 1,7	TRD 1,9
Sande	Reinsande	ss	S-SI	34-42	26-34	18-26	-
	Lehmsande ¹	ls	SI-IS	29-33	23-26	17-19	11-12
	Schluffsande	us	IS+Lö	19-23	14-18	9-13	4-8
Lehme	Sandlehme ²	sl	IS-SL	17-24	12-19	7-13	2-8
	Normallehme	ll	sL-L	13-21	9-16	5-11	1-6
	Tonlehme	tl	L	15-18	11-14	7-10	-
Schluffe	Sandschluffe	su	SL+Lö	14-17	8-12	3-7	-
	Lehmschluffe	lu	sL-L+Lö	13-15	7-10	2-5	-
	Tonschluffe	tu	L+Lö	11-13	7-8	2-4	-
Tone	Schlufftone	ut	L+Lö, u. LT	8-10	5-6	2-3	-
	Lehmtone ³	lt	T	6-13	3-8	1-6	-

¹ Lehmsande ohne SI3; ² Sandlehme mit SI3; ³ sehr selten in Sachsen

3.4.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit eines Bodens (kf-Wert in cm/Tag, mm/Stunde oder m/Sekunde) ist vor allem vom Volumen und der Kontinuität der Grobporen abhängig. Anthropogen verdichtete Böden verlieren durch die Scherwirkungen der mechanischen Belastungen die Durchgängigkeit ihrer Grobporen, sodass die Wasserleitfähigkeit abnimmt.

Liegt ein geringer kf-Wert von < 10 cm/d (ca. 4 mm/h) vor, kann der Boden kaum noch einen Starkregen aufnehmen. Staunässe im Boden und ein erhöhter Direktabfluss sind die Folge von geringen gesättigten Wasserleitfähigkeiten des Bodens.

Oberböden mit einem guten Bodengefüge haben in Abhängigkeit von der Bodenart hohe bis extrem hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten. In den Unterböden nimmt die gesättigte Wasserleitfähigkeit ab. Geringe Leitfähigkeiten in den Unterböden können durch eine schädliche Bodenverdichtung verursacht werden (anthropogen), aber auch natürlich vorhanden sein, wie beim Sd-Horizont eines ausgeprägten Pseudogley (Stauwasserboden).

Bei der Interpretation der im Labor bestimmten gesättigten Wasserleitfähigkeiten (kf-Werte) ist zu berücksichtigen, dass Parallelproben eines Probenentnahmebereiches oftmals größere Streuungen aufweisen. Eine Ursache hierfür ist die relativ kurze Fließstrecke in den Stechringen. So haben z. B. durchgehende Makroporen und feine Risse einen großen Einfluss auf das Messergebnis.

Grundsätzlich ist die Bestimmung der effektiven Lagerungsdichte und der Luftkapazität mit weniger Fehlerquellen behaftet als die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit.

Tabelle 6: Einteilung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 355)

Kurzzeichen	kf 1	kf 2	kf 3	kf 4	kf 5	kf 6
Bezeichnung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem hoch
kf in cm/d	<1	1 - <10	10 - <40	40 - < 100	100 - <300	>=300
kf in mm/h	<0,4	0,4 - <4	4 - <17	17 - <42	42 - <125	>=125
kf in m/s	<1,2 10 ⁻⁷	1,2 10 ⁻⁷ - 1,2 10 ⁻⁶	1,2 10 ⁻⁶ - 4,6 10 ⁻⁶	4,6 10 ⁻⁶ - 1,2 10 ⁻⁵	1,2 10 ⁻⁵ - 3,5 10 ⁻⁶	>= 3,5 10 ⁻⁶

Tabelle 7: Gesättigte Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (Ld) in Anlehnung an RENGER et al. (2014)

Bodenarten nach KA5			Bodenarten nach Bodenschätzung	kf-Werte in Klassen		
Hauptgruppe	Gruppe	Kürzel		Ld2 1,3 - 1,55	Ld3 1,55 - 1,75	Ld4 1,75 - 1,95
Sande	Reinsande	ss	S-SI	extrem hoch	sehr hoch	hoch
	Lehmsande ¹	ls	SI-S	sehr hoch	hoch	hoch
	Schluffsande	us	IS+Lö	hoch	hoch	mittel
Lehme	Sandlehme ²	sl	IS-SL	hoch	hoch	mittel
	Normallehme	ll	sL-L	hoch	mittel-hoch	mittel
	Tonlehme	tl	L	mittel-hoch	mittel	gering-mittel
Schluffe	Sandschluffe	su	SL+Lö	mittel-hoch	mittel	gering
	Lehmschluffe	lu	sL-L+Lö	mittel-hoch	mittel	gering-mittel
	Tonschluffe	tu	L+Lö	mittel-hoch	mittel	gering-mittel
Tone	Schlufftone	ut	L+Lö, u. LT	mittel-hoch	mittel	gering-mittel
	Lehmtone ³	lt	T	mittel-hoch	mittel	gering

¹ Lehmsande ohne SI3; ² Sandlehme mit SI3; ³ sehr selten in Sachsen

4 Bodenfeuchten und Befahrbarkeit

4.1 Grundlagen

Zur Beurteilung der aktuellen, witterungsabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit sind der Wassergehalt und die Körngrößenzusammensetzung bzw. die Bodenart des Bodens zusammen zu betrachten. Die Stärke der Wasserbindung im Boden wird z. B. in hPa, cm Wassersäule oder cbar gemessen und als Saugspannung bezeichnet; der Logarithmus der Wasserspannung in hPa bzw. cm Wassersäule entspricht dem so genannten pF-Wert, der in der Bodenkunde ebenfalls häufig verwendet wird. Das Verhältnis zwischen Wassergehalt und Wasserspannung für Böden unterschiedlicher Körnung kann mit Hilfe von pF-Kurven dargestellt werden (Abbildung 10).

In Tabelle 8 sind die verschiedenen Druckeinheiten zusammengestellt, die zur Beschreibung der Wasser-
spannung im Boden oder Druckbelastung durch Fahrzeuge verwendet werden.

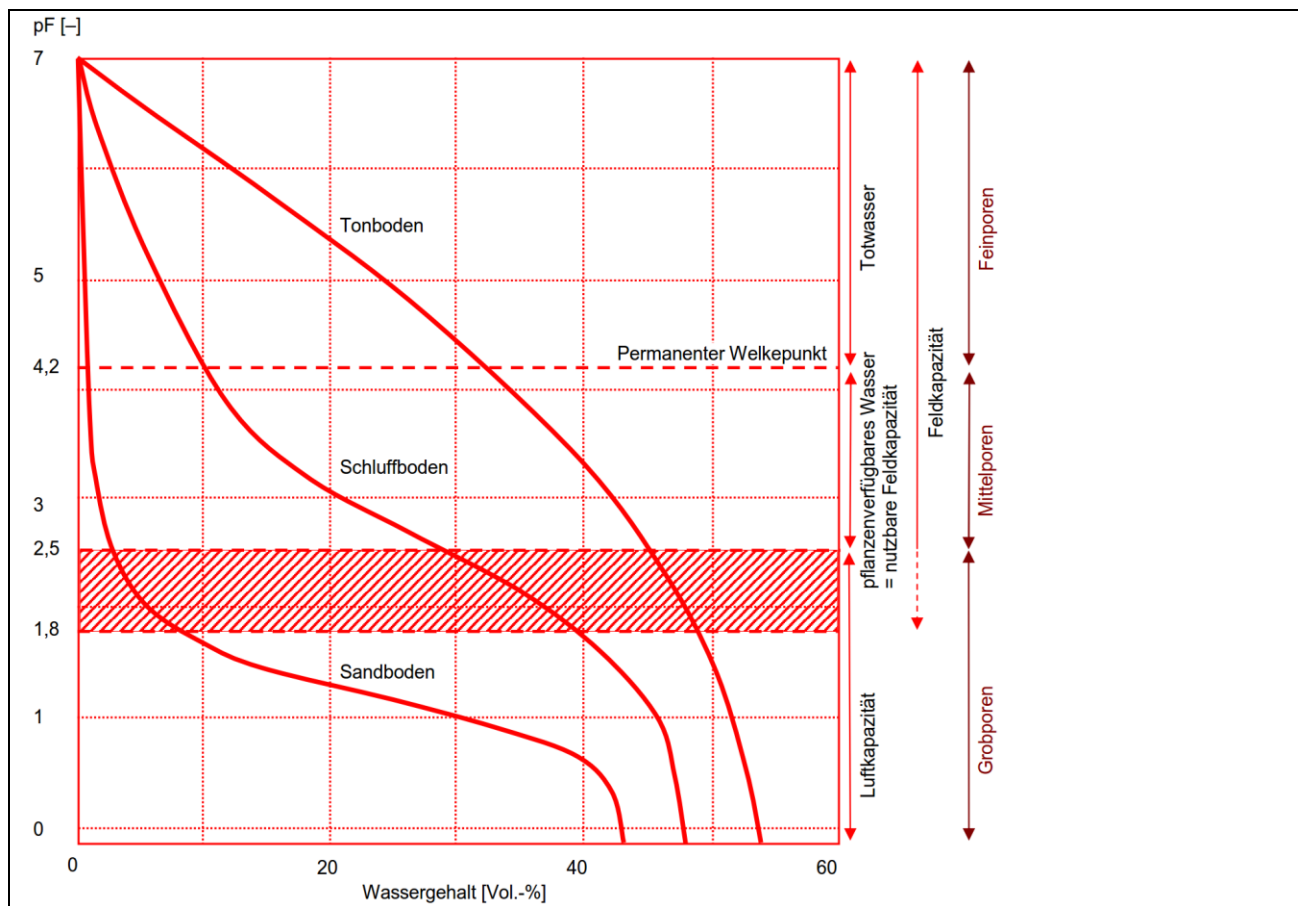


Abbildung 10: pF-Kurve (Verhältnis zwischen Wassergehalt und Wasserspannung) (nach BLUME et al. 2010, S. 228; vgl. auch Tabelle 4 auf S. 22)

Tabelle 8: Druckeinheiten

bar	cbar	mbar	hPa	kPa	N/cm ²	kg/cm ²	cm WS	pF-Wert
1	100	1.000	1.000	100	10	~1,02	~1.020	3

Das Bodenwasser wird am stärksten in den feinen Bodenporen gebunden. Mit zunehmendem Porendurchmesser nimmt die Stärke der Wasserbindung im Boden ab und der Boden erscheint feuchter. So bewirkt der gleiche Wassergehalt bei unterschiedlichen Körnungen ebenfalls unterschiedliche Saugspannungen. Das Zusammenwirken von Wassergehalt bzw. Saugspannung und Körnungszusammensetzung des Bodens kann im Gelände sowohl mit Handversuchen (vgl. Tabelle 11, S. 27) als auch messtechnisch (vgl. Abbildung 13, S. 29) erfasst werden.

Die Bodenarten können entsprechend dem Bodenartendreieck (Abbildung 11) unterschieden werden. In Tabelle 9 sind die Körnungseigenschaften und weitere Merkmale der Bodenartengruppen aufgeführt. In Tabelle 10 werden Bindigkeit und Formbarkeit zur Bestimmung der Bodenarten definiert.

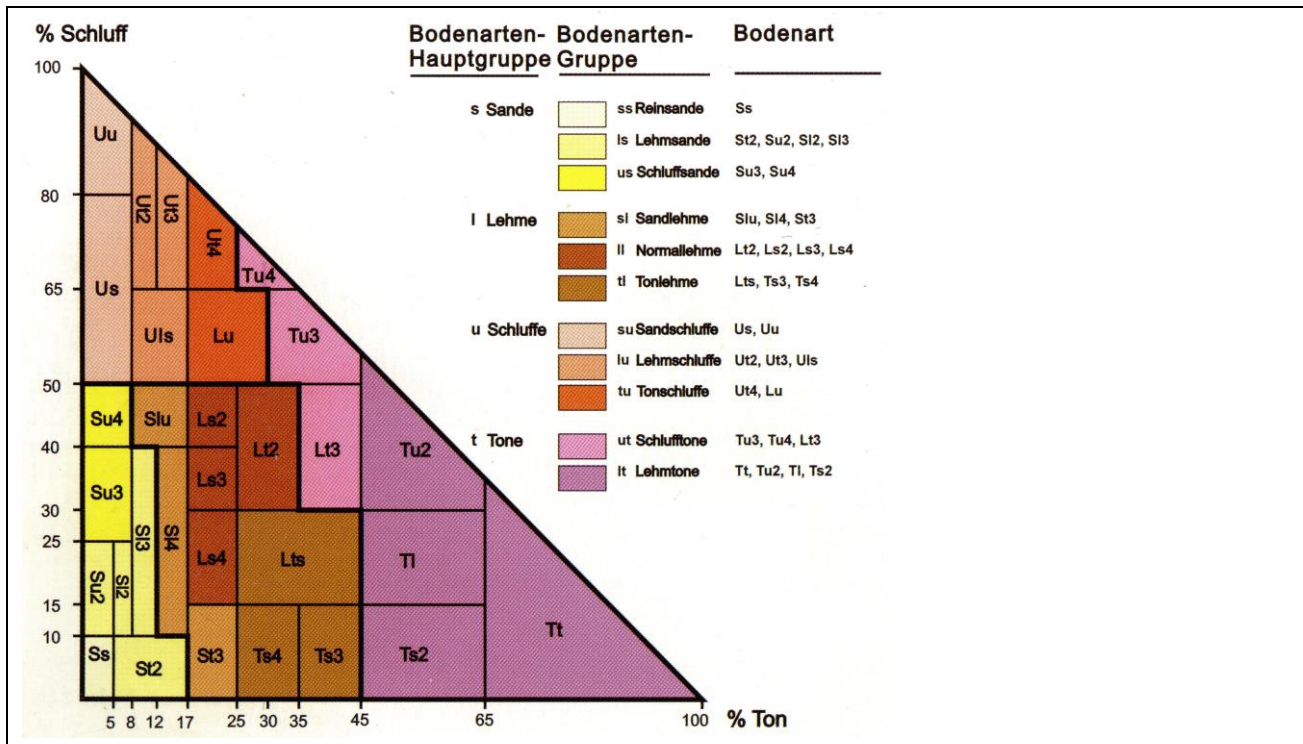


Abbildung 11: Bodenartendreieck Feinboden (Ad-hoc-AG-Boden 2005, S. 142 mit freundlicher Genehmigung des Verlags; www.schweizerbart.de)

Tabelle 9: Bestimmung der Bodenarten-Gruppe anhand der Körnung und weiterer Merkmale (nach Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 144ff)

Bodenarten nach KA5			Bodenarten nach Bodenschätzung	Masse-%			Bindigkeit ⁴	Formbarkeit ⁴	weitere Erkennungsmerkmale
Hauptgruppe	Gruppe	Kürzel		Ton	Schluff	Sand			
Sande	Reinsande	ss	S-Sl	0-5	0-10	85-100	0	0	in Fingerrillen kaum Feinsubstanz
	Lehmsande ¹	ls	Sl-IS	0-17	0-25	67-95	0-2	0-2	in Fingerrillen wenig Feinsubstanz
	Schluffsand	us	IS+Lö	0-8	25-50	42-75	0-1	0-2	in Fingerrillen mehlig-feinsubstante
Lehme	Sandlehme ²	sl	IS-SL	8-17 (25) ³	0-50	33-73 (83) ³	2-3	3	3 cm Kugel formbar, Sandkörner deutlich
	Normallehme	ll	sL-L	17-35	15-50	15-68	3-4	3-4	Sand noch deutlich sicht- und fühlbar
	Tonlehme	tl	L	25-45	0-30	25-75	4-5	4-5	glänzende Reibeflächen
Schluffe	Sandschluffe	su	SL+Lö	0-8	50-100	0-50	0	1	sehr samtig-mehlig-feinsubstante
	Lehmschluffe	lu	sL-L+Lö	8-17	50-92	0-42	1-2	2-3	sehr samtig-mehlig-feinsubstante
	Tonschluffe	tu	L+Lö	17-30	50-83	0-33	3-4	3-4	mehlig-feinsubstante, Sand nicht fühlbar
Tone	Schlufftone	ut	L+Lö, u. LT	25-45	30-75	0-35	4-5	4-5	zäh plastisch
	Lehmtone ³	lt	T	45-100	0-55	0-55	5	5	stark zäh plastisch, sehr stabile Aggregate

¹ Lehmsande ohne Sl3; ² Sandlehme mit Sl3; ³ sehr selten in Sachsen; ⁴ nach Tabelle 10

Tabelle 10: Definitionen der Bindigkeit und Formbarkeit schwach feuchter Bodenproben (Ad-hoc-AG Boden 2005, S. 143)

Bindigkeit (Klebrigkeit)		
Stufen	Zusammenhalt der Bodenprobe	zerbröckelt / zerbröselt / zerbricht
0	kein	sofort
1	sehr gering	sehr leicht
2	gering	leicht
3	mittel	wenig
4	stark	kaum
5	sehr stark	nicht

Formbarkeit (optimale Ausrollbarkeit bei Bodenfeuchten zwischen 10 und 30 cbar)	
0	nicht ausrollbar, zerbröckelt beim Versuch
1	nicht ausrollbar, weil die Probe vorher reißt und bricht
2	Ausrollen schwierig, weil die Probe starke Neigung zum Reißen und Brechen aufweist
3	ohne größere Schwierigkeiten ausrollbar, weil die Probe nur schwach reißt oder bricht
4	leicht ausrollbar, weil die Probe nicht reißt oder bricht
5	auf dünner als halbe Bleistiftstärke ausrollbar

4.2 Bodenfeuchten und Befahrbarkeit

4.2.1 Einschätzung anhand der Konsistenzbereiche

Die Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit des Bodens kann anhand von Bodenmerkmalen gemäß Tabelle 11 eingeschätzt werden. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Bodenfeuchte (abnehmender Saugspannung) die Befahrbarkeit des Bodens abnimmt.

Tabelle 11: Feuchtestufen und Konsistenzbereiche der Böden nach Ad-hoc-AG Boden (2005, S. 115) sowie Befahrbarkeit nach DIN 19731 und BMLFUW (2012, S. 42)

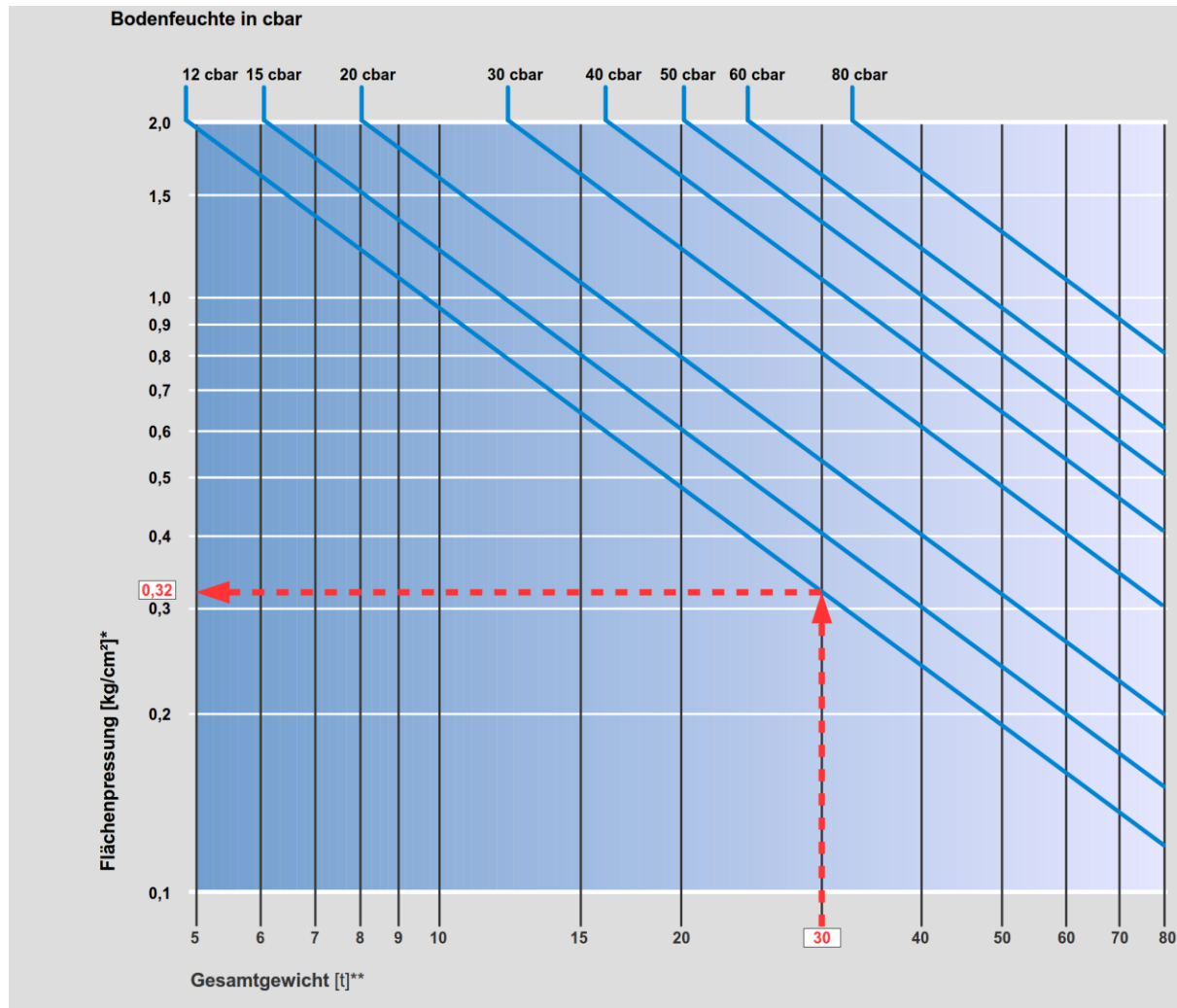
Bodenfeuchtezustand Bezeichnung	Bodenfeuchtezustand		Konsistenz/Merkmale bei geringer und mittlerer effektiver Lagerungsdichte		Befahrbarkeit ²⁾
	pF [log cm Ws]	cbar ¹⁾	Merkmale bindiger (ausrollbarer) Böden	Merkmale nicht bindiger Böden	
trocken	> 4,0	> 981	fest, nicht ausrollbar bzw. knetbar, dunkelt bei Wasserzugabe stark nach	staubig, dunkelt bei Wasserzugabe stark nach	gut
Schrumpfgrenze → Rissbildung					
schwach feucht	4,0 bis > 2,7	981 bis > 50	halbfest – bröcklig, noch ausrollbar aber bröckelnd, Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe nach	Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe noch etwas nach	gut
Ausrollgrenze					
feucht	2,7 bis > 2,1	50 bis > 12	steif, ausrollbar auf < 3 mm Dicke ohne zu zerbröckeln, dunkelt bei Wasserzugabe nicht nach	Finger werden etwas feucht, kein Wasseraustritt durch Klopfen am Bohrer, dunkelt bei Wasserzugabe nicht nach	tolerierbar
sehr feucht	2,1 bis > 1,4	12 bis > 2,5	weich, ausrollbar bis > 3 mm Dicke, sehr gut knetbar	Finger werden deutlich feucht, durch Klopfen am Bohrer Wasseraustritt aus den Poren	schädlich
nass	≤ 1,4	≤ 2,5	breiig, kaum knetbar, da zu weich	Finger werden sehr feucht, durch Klopfen am Bohrer deutlicher Wasseraustritt aus Poren	sehr schädlich
Fließgrenze					
sehr nass	0	0	zähflüssig, nicht ausrollbar und knetbar	Bohrkernverlust	sehr schädlich

¹⁾ Die Einheit Centibar wird hier in Anlehnung an das schweizer Nomogramm verwendet. Die Umrechnung in den pF-Wert erfolgt über eine Multiplikation mit 10,2 und einer anschließenden Logarithmierung zur Basis 10 (LOG10).

²⁾ Bei bindigen Böden ist die Bearbeitbarkeit (Aushub, Umlagerung, Wiedereinbau) bei sehr starker Austrocknung zum Teil nur bedingt möglich, weil starke Klutenbildung die Bearbeitungsqualität – insbesondere im Hinblick auf die Wiederherstellung durchwurzelbarer Bodenschichten – vermindert. Sehr tonreiche Böden (> 25 % Ton) sind im ausgetrockneten, festen Konsistenzzustand nicht bearbeitbar.

4.2.2 Einschätzung mit Hilfe eines Nomogramms

Zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Böden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Saugspannung) ist in der Schweiz ein Nomogramm entwickelt worden, mit dessen Hilfe die maximal zulässigen Kontaktflächendrücke (= Flächenpressung) und Maschinenmassen ermittelt werden können (BfE 1997; vgl. Abbildung 12³). Der mittlere Kontaktflächendruck⁴ eines Fahrzeuges ergibt sich aus dessen Gesamtgewicht geteilt durch die Kontaktfläche (Bodenaufstandsfläche) der Reifen bzw. Ketten. Folglich haben schmale Reifen und hohe Reifeninnendrucke bei gleicher Last eine geringere Kontaktfläche zur Bodenoberfläche und somit einen höheren Kontaktflächendruck als breite Reifen und niedrige Reifeninnendrucke.



*Flächenpressung unter den Reifen bzw. Raupen beladener Maschine (=Kontaktflächendruck); ** Gesamtgewicht beladener Maschinen

Abbildung 12: Aufbereitetes Nomogramm zur Ermittlung des maximalen Kontaktflächendrucks von Maschinen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Saugspannung) und dem Maschinengewicht (nach FaBo Zürich 2003, verändert)

Ablesebeispiel: Eine 30 t schwere Maschine soll bei einer Wasserspannung von 12 cbar eingesetzt werden. Für eine bodenschonende Befahrung muss das Fahrwerk bzw. die Aufstandsfläche so ausgelegt sein, dass ein maximaler Kontaktflächendruck von 0,32 kg/cm² eingehalten wird.

³ Das ursprüngliche Nomogramm wurde u. a. von AfU Luzern (2003) und FaBo Zürich (2003) nochmals anwenderfreundlich aufbereitet.

⁴ Insbesondere auf unebenem Gelände verteilt sich der Kontaktflächendruck nicht gleichmäßig, sodass in Teilbereichen höhere Kontaktflächendrücke entstehen können.

Die Einsatzgrenze einer Maschine kann entweder aus dem Nomogramm abgelesen oder berechnet werden. Die Berechnung des maximal tolerierbaren Kontaktflächendrucks bei bekanntem Gesamtgewicht und bekannter Bodenfeuchte (Saugspannung in cbar) erfolgt mit nachstehender Formel:

$$\text{Maximaler Kontaktflächendruck [kg/cm}^2\text{]} = \text{Saugspannung [cbar]} / \text{Maschinengesamtgewicht [t]} / 1,25$$

Durch Umformung kann auch die minimale Saugspannung berechnet werden, bis zu der eine Maschine mit bekanntem Gesamtgewicht und Kontaktflächendruck noch eingesetzt werden kann:

$$\text{Minimale Saugspannung [cbar]} = \text{Maschinengesamtgewicht [t]} \times \text{Kontaktflächendruck [kg/cm}^2\text{]} \times 1,25$$

In Deutschland ist nach DIN 19731 ab einer Saugspannung < 12 cbar (pF 2,1) jegliche Befahrung und Bodenumlagerung unzulässig⁵.

4.2.3 Messung der Bodenfeuchte

1. Saugspannung mit Hilfe eines Tensiometers

Bei Linienbaustellen oder sehr großen Baustellen sind repräsentative Messungen der Saugspannung im Boden vorzunehmen. Dazu sind Tensiometer an repräsentativen Stellen des Baufeldes einzubauen. Je zu beurteilende Bodenschicht sind mindestens 3, besser 5 Tensiometer einzubauen.



Abbildung 13: Tensiometer zur Messung der Wasserspannung im Boden

(Foto: Peter Spatz)

Zur Beurteilung der Saugspannung des Oberbodens haben sich Einbautiefen um ca. 15 cm Tiefe bewährt. Unterböden sollten regelhaft in ca. 30 bis 40 cm Tiefe beprobt werden. Die Funktionssicherheit muss durch sorgfältigen Einbau und Wartung gewährleistet werden (vgl. BfE 1997). Auffällige Abweichungen zwischen den Tensiometern einer Messtiefe müssen fachlich überprüft werden; bei Bedarf sind einzelne Tensiometer mit stark abweichenden Messwerten neu einzubauen.

⁵ In der Schweiz ist nach BfE (1997) ab einer Saugspannung < 6 cbar (pF 1,8) weder eine Befahrung noch eine Bodenbearbeitung bzw. Bodenumlagerung zulässig. Aus Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes sollte die Vorgabe der DIN 19731 verwendet werden, weil bereits bei Saugspannungen < 12 cbar schädliche Gefügebeeinträchtigungen und Verdichtungen nur sehr eingeschränkt vermieden werden können.

Geeignete Abstände zwischen einzelnen Tensiometerstationen sind anhand bodenkundlicher Kriterien auszuwählen. Insbesondere an den Grenzen zwischen deutlich unterschiedlichen Bodeneigenschaften (Bodenarten, Grobbodenanteile, Humusgehalte, Vernässungen in Folge von Grund-, Stau- oder Hangwasser) sind Tensiometerstationen einzurichten.

2. Wassergehalt mit Hilfe von Einstich-TDR- bzw. FD-Sonden

Sind Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehungen hinreichend bekannt, dann kann anstelle der vergleichsweise aufwendig zu erfassenden Saugspannung der Wassergehalt mit Einstich-TDR/FD-Sonden ermittelt werden. Der Wassergehalt ist deutlich leichter zu messen und kann bei Bedarf schnell an verschiedenen Stellen des Baufeldes erhoben werden. Der Wassergehalt wird in Vol.-% angegeben (Wasservolumen zu Gesamtbodenvolumen).



Abbildung 14: Bodenfeuchtemessung mit Hilfe einer TDR-Sonde

3. Wassergehalt mit Hilfe von Bodenproben

Der Wassergehalt kann auch mit Hilfe von Bodenproben ermittelt werden. Die Bodenprobe ist bei 105 °C zu trocknen und aus der Differenz der Ein- und Rückwaage kann der gravimetrische Wassergehalt errechnet werden. Die Angabe erfolgt in Masse-% (Wassermasse zu trockener Bodenmasse) und kann über die Trockenrohdichte (g/cm^3) des Bodens in Volumen-% Bodenwassergehalt umgerechnet werden:

$$\text{Volumetrischer Bodenwassergehalt (Volumen-\%)} = \text{Gravimetrischer Bodenwassergehalt (Masse-\%)} \times \text{Trockenrohdichte (g/cm}^3\text{)}$$

5 Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

Die spezifischen Empfindlichkeiten der Böden sind entscheidend für die Auswahl erforderlicher und geeigneter Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen. Es kann zwischen der standörtlichen von Bodenmerkmalen abhängigen und der aktuellen, witterungsabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit unterschieden werden.

Die Wahrscheinlichkeit einer erheblichen Bodenverdichtung ist besonders hoch, wenn

- die Befahrungen in Phasen hoher Bodenfeuchte (Winterhalbjahr oder nach starken Niederschlägen) durchgeführt werden,
- große Kräfte (hohe Gesamtmassen und/oder hohe spezifische Flächendrücke) auf den Boden wirken,
- häufige Befahrungen vorgesehen sind oder
- stark humose Böden oder Böden mit Grund- und Stauwassereinfluss betroffen sind. Stark humose und vernässte Böden sind generell besonders verdichtungsempfindlich.

Für die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit stehen verschiedene Bewertungsansätze zur Verfügung⁶. Jeder Bewertungsansatz hat unter praktischen Gesichtspunkten Vor- und Nachteile. Die folgenden Bodenbewertungen zur Verdichtungsempfindlichkeit der Böden berücksichtigen insbesondere Vernäsungsmerkmale der Böden und die Häufigkeit des Auftretens von hohen Bodenfeuchten.

Hinsichtlich der vorliegenden Karten ist zu berücksichtigen, dass diese auf der Grundlage der Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (BK50) abgeleitet wurden, d. h. sie sind für einen mittleren Planungsmaßstab geeignet. Bei der BK50 sind Bodeneinheiten abgegrenzt, die auf Bodengesellschaften beruhen. Demnach können in einer scheinbar homogenen Bodeneinheit verschiedene Böden vergesellschaftet sein. Bewertet und in der Karte dargestellt ist jedoch nur der am weitesten verbreitete Boden der jeweiligen Bodeneinheit, der so genannte Leitboden.

Link zu den Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden:

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/41648.htm>

⁶ Vergleiche z. B. HORN (1981); BfE (1995), PETELKAU et al. (2000); UBA (2004); HORN (2004); UBA (2010); FELDWISCH & BORKENHAGEN (2014)

5.1 Bewertung anhand von Bodenmerkmalen

Im Folgenden wird eine Bewertung mit Hilfe der wesentlichen Einflussfaktoren vorgenommen, wozu der Grobboden- und Humusanteil, Feinbodeneigenschaften sowie Vernässungsstufe zählen.

Die folgende Bewertungsmatrix greift auf Kriterien zurück, die der digitalen Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (digBK50) entnommen werden können (LfULG 2012). Bauliche bzw. physikalische Vorbelastungen können allerdings nur vor Ort für konkrete Bauvorhaben ermittelt werden.

Eine landesweite Auswertung der Bodenkarte 1 : 50.000 mit Hilfe der Bewertungskriterien nach Abbildung 15 ist in Abbildung 16 dargestellt. Diese Karte vermittelt einen Überblick über die Verdichtungsempfindlichkeit der Oberböden (Mutterböden), die im Zuge von Planungsvorhaben als Grundlage für die Festlegung von erforderlichen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen herangezogen werden kann.

Die Verdichtungsempfindlichkeit der Unterböden vermittelt Abbildung 17. Für diese Karte wurde unterstellt, dass die Oberböden entsprechend der üblichen Baupraxis im Baufeld vor der Baumaßnahme abgetragen und zwischengelagert werden, sodass die mechanischen Lasteinträge direkt auf die Unterböden wirken. Die Mächtigkeit des unterstellten Abtrags der Oberböden richtet sich dabei nach der Mächtigkeit des obersten humosen Bodenhorizonts der Kartiereinheiten der BK50. Im Regelfall schwankt die Bodenabtragsmächtigkeit zwischen 10 und 30 cm. Ausgenommen vom Abtrag der Oberböden sind die Standorte, bei denen der Oberboden bereits tragfähig ist, weil der Grobbodenanteil $\geq 75\%$ beträgt. Weiterhin sind Anmoor- und Moorböden von einem Oberbodenabtrag ausgenommen worden, weil bei diesen Böden angenommen werden kann, dass der Unterboden entsprechend humos und damit ebenso verdichtungsempfindlich ist. Rückt der durch Grund- oder Stauwasser vernässte Horizont näher an die Bodenoberfläche, weil der Oberboden für den Baubetrieb ausgehoben wird, dann wird dieser geringere Flurabstand für die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit herangezogen. Die Einstufungen der Bewertungskriterien „Grundwasserstufe“ nach Abbildung 15 werden um die Abtragsmächtigkeit korrigiert. Abbildung 17 stellt also die Verdichtungsempfindlichkeit der Unterböden unter Berücksichtigung der vorgenannten Bewertungsannahmen dar. Auf den meisten Standorten führt die Bewertung von Oberboden und Unterboden zum gleichen Ergebnis (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17).

Bei der Bauplanung empfiehlt sich die getrennte kleinräumige Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit sowohl für die Ober- als auch für die Unterböden, um deren ggf. unterschiedliche Empfindlichkeiten in die Abwägung einbeziehen zu können, ob der Oberboden vor Baubeginn besser abgetragen werden sollte oder nicht.

Für vollzugspraktische Fragestellungen werden in Abbildung 18 die Standorte hervorgehoben, auf denen der übliche Mutterbodenabtrag ggf. nicht erfolgen sollte. So sind Unterböden insbesondere dann besonders gefährdet, wenn vernässte Bodenhorizonte bzw. -schichten durch einen Oberbodenabtrag erheblich näher an die Oberfläche geraten. Bei diesen Konstellationen sollte vor Baubeginn kritisch geprüft werden, ob der übliche Oberbodenabtrag besser unterlassen wird, um den vernässten und damit verdichtungsempfindlichen Unterboden vor mechanischen Lasteinträgen besser zu schützen. Hier übernimmt der Oberboden eine gewisse Schutzfunktion für den vernässten Unterboden. Der nicht abgetragene Oberboden darf durch Befahrungen und sonstige mechanische Lasteinträge nicht in den Unterboden verpresst werden. Dazu sind geeignete Vermeidungsmaßnahmen wie das Anlegen von Baustraßen, lastverteilende Maßnahmen und die Bauzeitenplanung in den möglichst trockenen Sommermonaten etc. zu ergreifen.

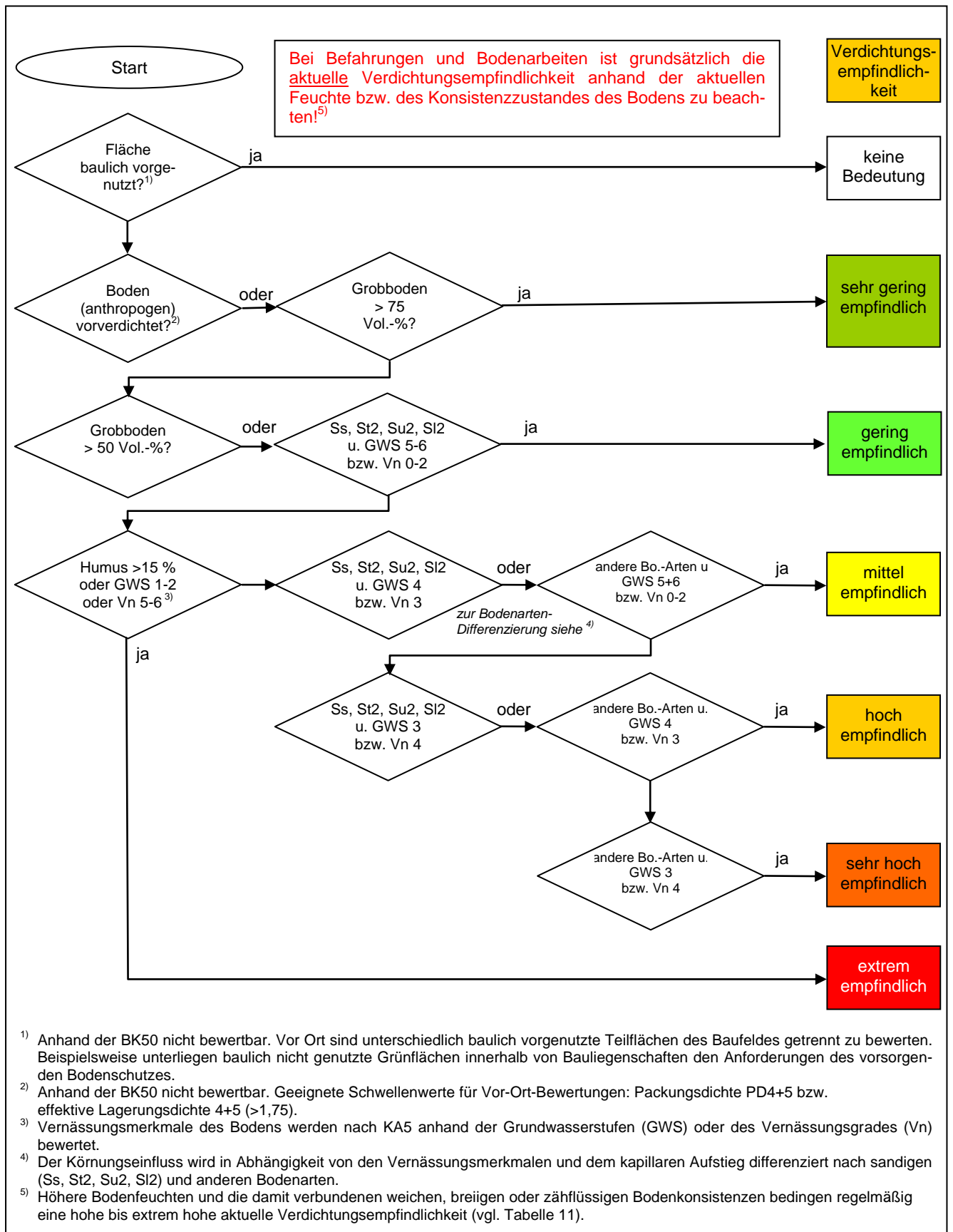


Abbildung 15: Matrix zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Bodenmerk- malen

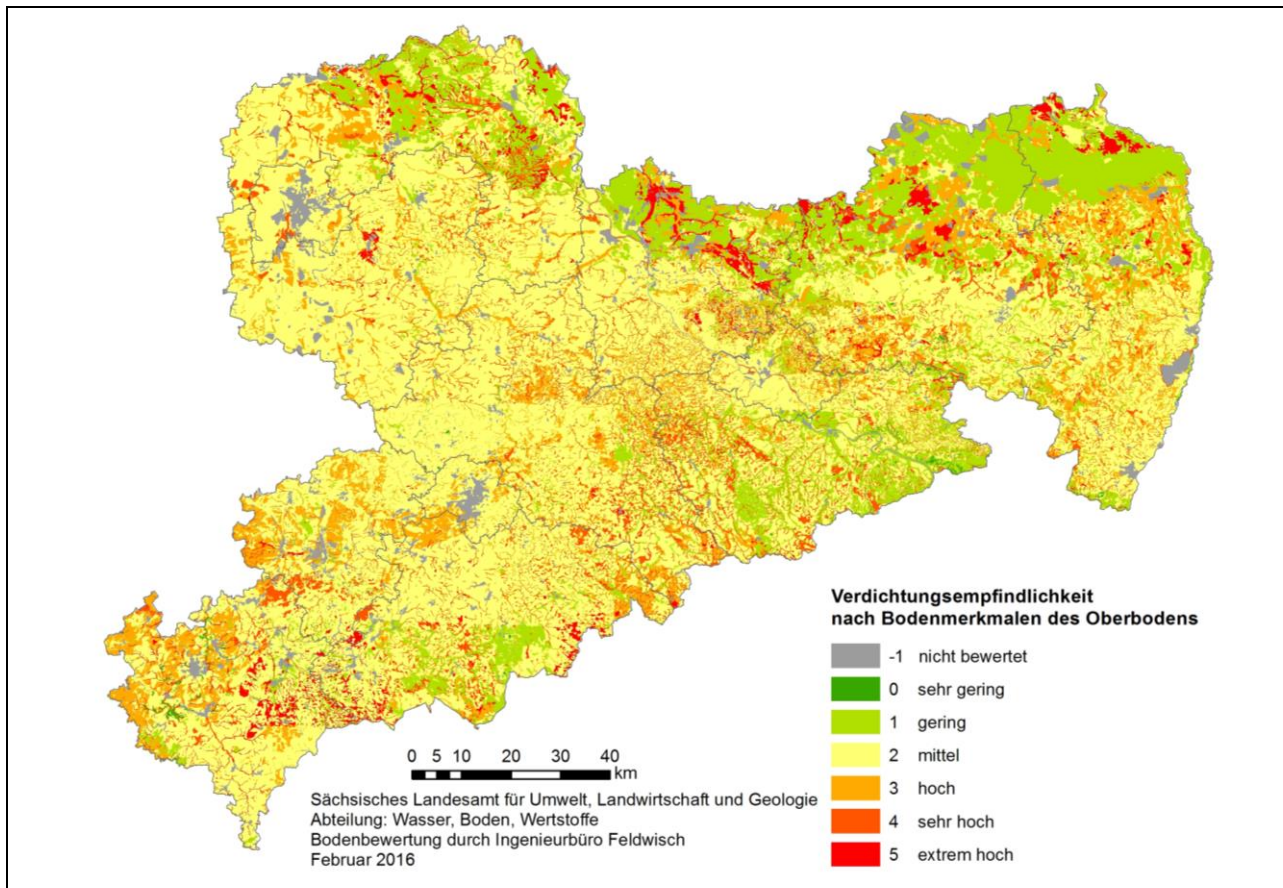


Abbildung 16: Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Oberbodenmerkmalen der BK50

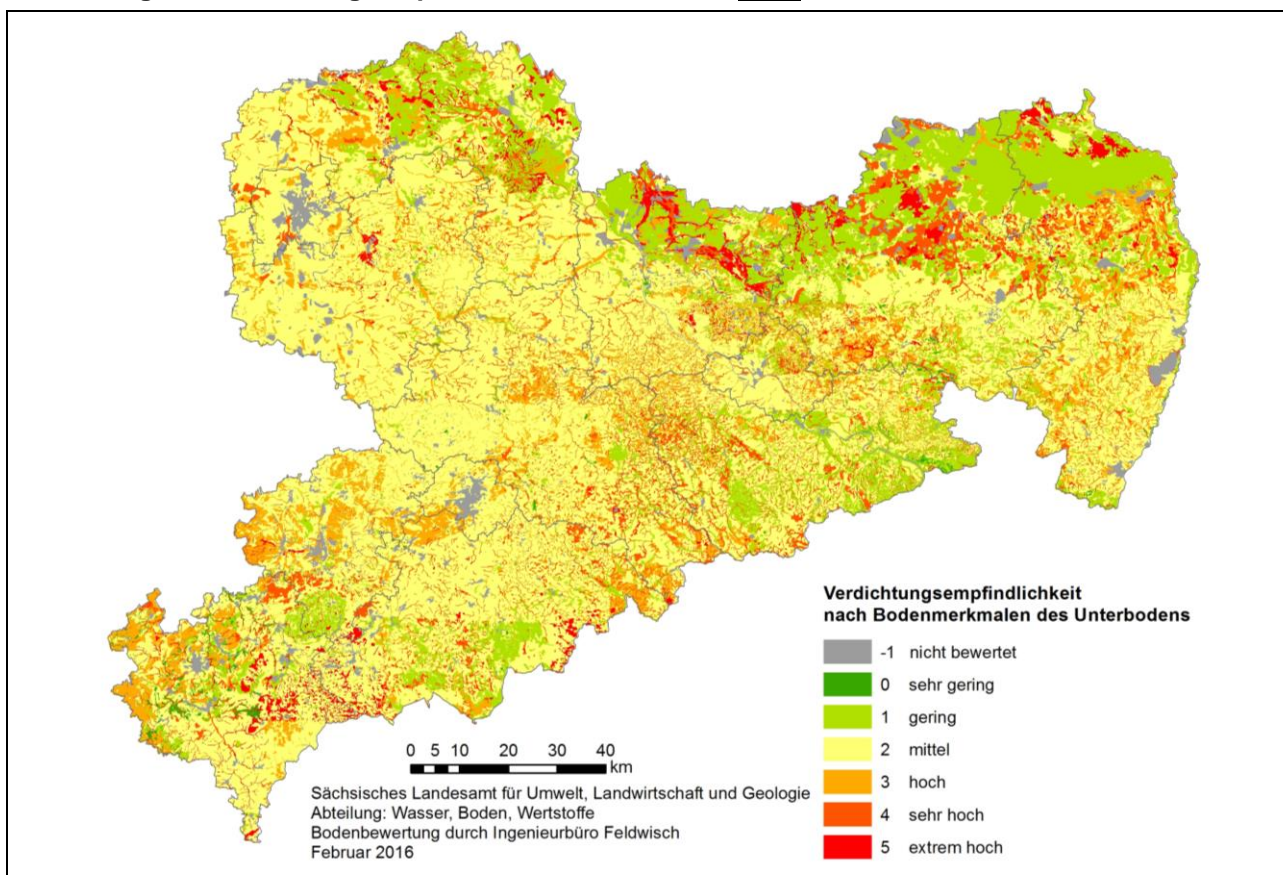


Abbildung 17: Verdichtungsempfindlichkeit anhand von Unterbodenmerkmalen der BK50

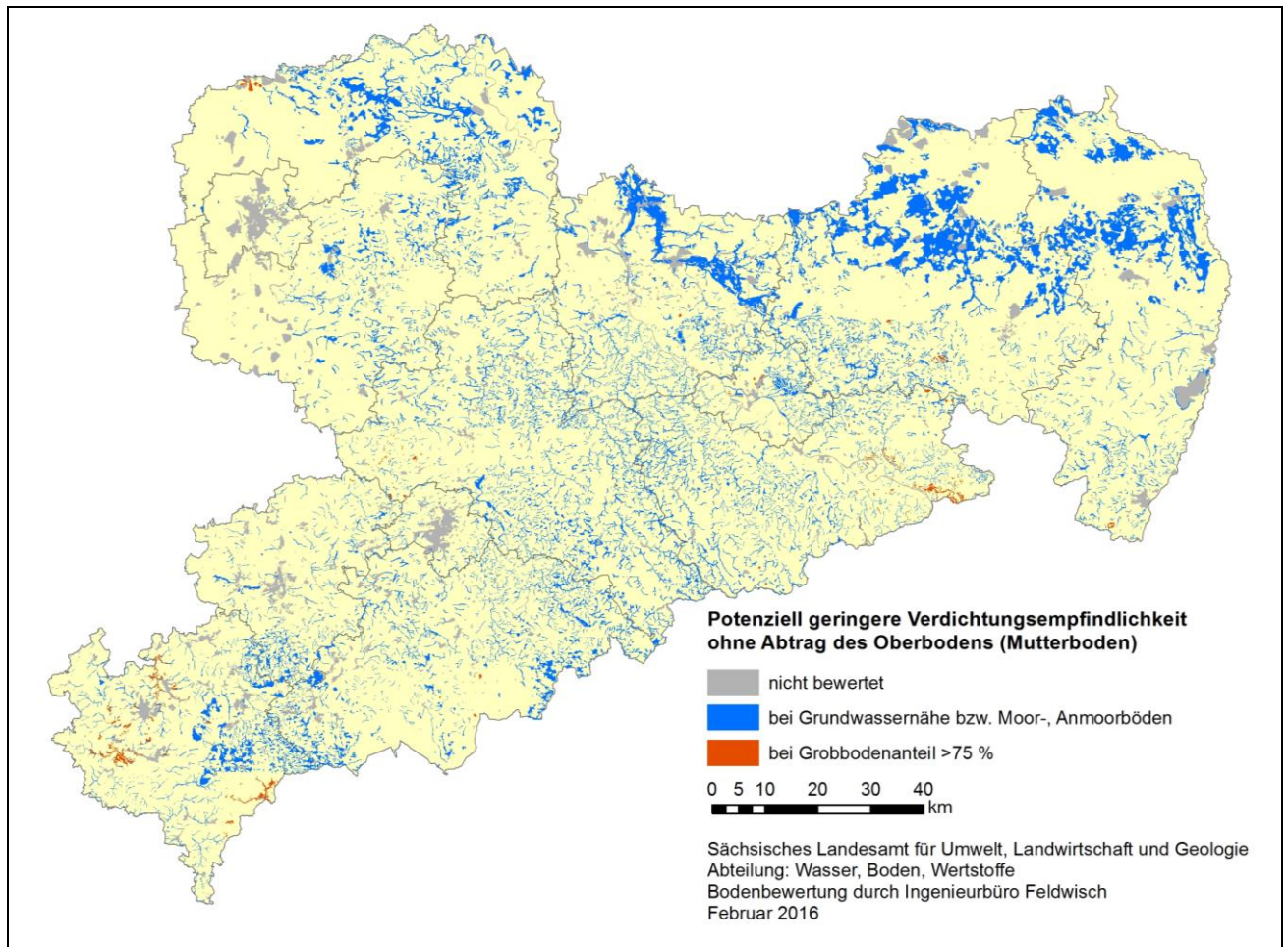


Abbildung 18: Potenziell geringere Verdichtungsempfindlichkeit ohne Oberbodenabtrag nach BK50

5.2 Bewertung der Häufigkeit von hohen Bodenfeuchten

Die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden wird entscheidend durch den witterungsabhängigen Bodenwassergehalt geprägt. Daher wird die vorgenommene Bewertung der Bodenmerkmale (Abbildung 15) erweitert um den Einfluss des Klimas. So können, die im Jahresgang wechselnden Bodenfeuchten bei der Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden berücksichtigt werden. Als Maß für den Witterungseinfluss werden mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz (KWB) und den Bodenkennwerten Feldkapazität und Totwasser Ganglinien der monatlichen Bodenfeuchten berechnet. Diese werden ausgewertet im Hinblick auf die Häufigkeit auftretender hoher Bodenfeuchten, d. h. Bodenwassergehalt liegt über 90% des Bodenwassergehaltes bei pF 1,8).⁷ Als Auswertungsergebnis liegt zu jedem Kalendermonat eine Karte vor, die zeigt, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass in dem jeweiligen Kalendermonat auf den jeweiligen Böden hohe Bodenfeuchten erreicht werden.

⁷ Hinweise zur Bilanzierung der Ganglinie monatliche Bodenwassergehalte für den Bodenspeicher 0–50 cm Bodentiefe: Eingangswerte: Ganglinie KWB Monate von 1993–2013 regionalisiert im 1-km-Raster (ReKIS 2014), Bodenparameter pF1.8 und pF4.2 abgeleitet nach DEHNER et al. (2015) von Bodenart, Grobboden- und Humusgehalt der BK50 für mittlere Lagerungsdichten. Annahmen für die vereinfachte Bilanzierung: Bodenwassergehalte können nur Werte zwischen pF1.8 und pF4.2 annehmen, eine Verdunstungsreduktion aufgrund geringer Bodenfeuchten findet nicht statt, Oberflächenabfluss ist unberücksichtigt.

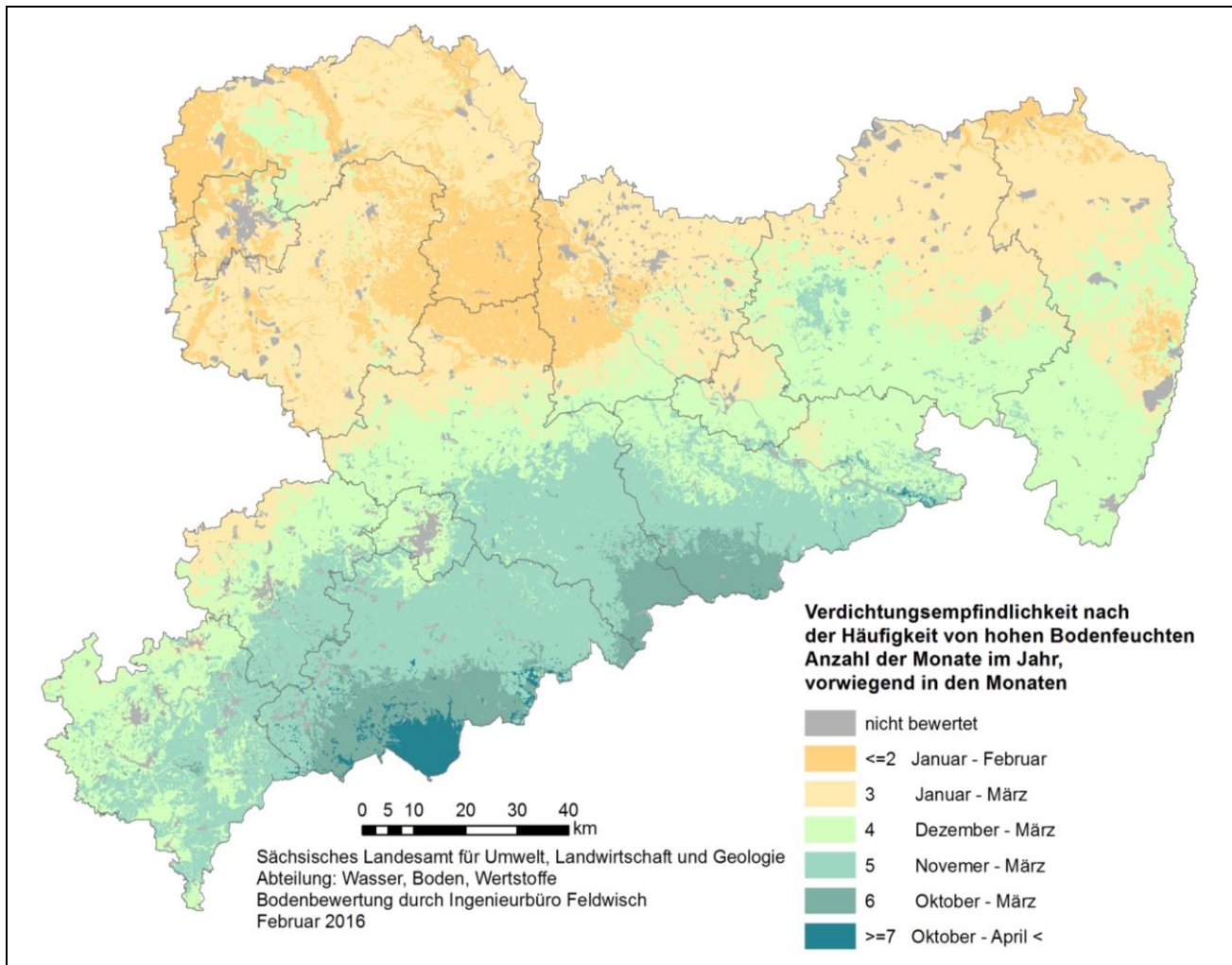


Abbildung 19: Karte der Anzahl der Monate pro Jahr mit sehr häufig hohen Bodenfeuchten

Die Einzelkarten für die 12 Monate sind wiederum in einer Karte zusammengefasst. Diese zeigt die Anzahl der Monate je Kalenderjahr, in denen sehr häufig (mehr als 80 % der Monate des jeweiligen Kalendermonats) hohe Bodenfeuchten erreicht werden (Abbildung 19). Die Auswertung ermöglicht es, für jede Bodeneinheit die Kalendermonate zu ermitteln, in denen bei einem durchschnittlichen Witterungsverlauf hohe Bodenfeuchten wahrscheinlich sind und insofern eine besondere Verdichtungsempfindlichkeit der Böden angenommen werden kann. Diese Information kann beispielsweise bei der Bauzeitenplanung berücksichtigt werden, indem Bauvorhaben soweit wie möglich in Zeitspannen hineingelegt werden, in denen bei einem durchschnittlichen Witterungsverlauf hohe Bodenfeuchten selten sind.

Diese Auswertungen geben regionale Trends im langjährigen Durchschnitt wieder und vernachlässigen insbesondere Nutzungs- und kleinräumige Bodenunterschiede, die durch die Bodenkarte 1 : 50.000 nicht wiedergegeben werden. Insofern dürfen die in den Auswertekarten dargestellten Zeitspannen der Monate mit sehr feuchten bis nassen Böden nicht für kleinräumige Fragestellungen unmittelbar herangezogen werden. Auch werden bei dieser vereinfachten Bodenfeuchteermittlung keine Stau- und Grundwassereigenschaften berücksichtigt, jedoch bei der Bewertung der Bodenmerkmale (Abbildung 15).

Die beiden Bewertungsansätze – Bodenmerkmale (Abbildung 15) und Häufigkeit von hohen Bodenfeuchten (Abbildung 19) – wurden anschließend miteinander verknüpft (Tabelle 12). Folgende Konventionen liegen dem Klassifizierungsschema zugrunde:

- a) Extrem steinige Böden bleiben unabhängig von der Klasse der klimabedingten Einflüsse unempfindlich gegen mechanische Einwirkungen (Klasse 0).
- b) Die Klassen der Verdichtungsempfindlichkeiten nach den Bodenmerkmalen können durch die Auswertung ‚Häufigkeit hoher Bodenfeuchte‘ höher gestuft, aber nicht niedriger eingestuft werden.

Die Bewertungsmatrix berücksichtigt, dass die Dauer der hohen Bodenfeuchte im Winterhalbjahr unterschiedlich lang anhält. Dadurch nimmt das Risiko der Verdichtungsempfindlichkeit entsprechend zu.

Tabelle 12: Klassifizierungsschema Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenmerkmalen und der Häufigkeit hoher Bodenfeuchten

Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenmerkmalen	Monate pro Jahr mit sehr häufig hohen Bodenfeuchten, vorwiegend in den Monaten (> 80 % des jeweiligen Kalendermonats mit Bodenwassergehalten > 0,9 pF1,8)			
	<= 3 Jan–März	4 Dez–März	5 – 6 Okt/Nov–März/April	>= 7 > Okt–April <
0	0	0	0	0
1	1	1	2	2
2	2	3	3	4
3	3	4	4	5
4	4	4	5	5
5	5	5	5	5

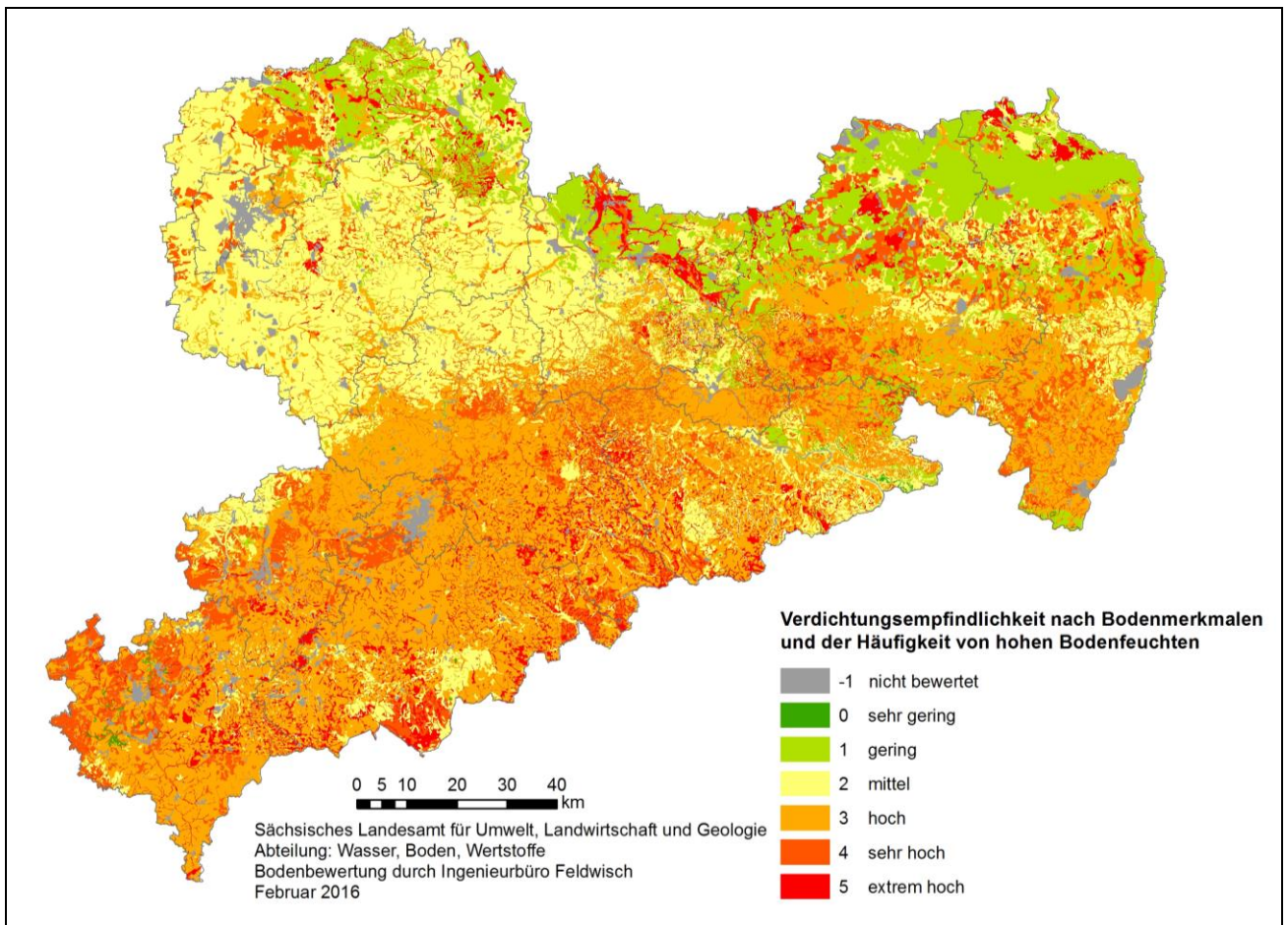


Abbildung 20: Synthesekarte Verdichtungsempfindlichkeit nach Bodenmerkmalen und der Häufigkeit von hohen Bodenfeuchten

6 Beim Bauen schädliche Bodenverdichtung vermeiden

Im Rahmen von Bauvorhaben wird Boden abgeschoben, ausgehoben, zwischengelagert, befahren und nach Bauabschluss wieder zur Herstellung durchwurzelbarer Bodenschichten eingebaut. Am häufigsten werden schädliche Bodenverdichtungen durch zu hohe Lasteinträge bei feuchtem Boden verursacht.

Die Maßnahmen des vorsorgenden Bodenschutzes sind nur für die Bodenflächen bedeutsam, die nach Bauabschluss wieder natürliche Bodenfunktionen im Naturhaushalt erbringen sollen. Böden, die durch Hoch- und Tiefbauten, Verkehrswege oder andere Bauwerke dauerhaft versiegelt werden, bedürfen keiner Schutzmaßnahmen. Sie sind dauerhaft verloren. Jedoch unterliegt Bodenaushub, der zur Realisierung von Bauwerken anfällt, den Schutzanforderungen des Bodenschutz- und Baurechtes; er ist vor Vergeudung und Vernichtung, auch vor schädlicher Verdichtung, zu schützen.

6.1 Bauplanung

Bauvorhaben unterliegen unterschiedlichen Planungsverfahren, die hier nicht im Einzelnen ausgeführt werden sollen. Anforderungen sind bereits in der Planung, bei der behördlichen Zulassung (Plangenehmigung oder Planfeststellung), bei der Bauausschreibung und der Bauphase angemessen zu berücksichtigen.

In Planungs- und Zulassungsverfahren sind nicht nur die Belange des vorsorgenden Bodenschutzes zur Vermeidung und Minderung der Verdichtung zu berücksichtigen, sondern beispielsweise auch besondere Schutzwürdigkeiten von Böden oder auch Beeinträchtigungen durch Erosion, Substratvermischungen oder stoffliche Einwirkungen. In den folgenden Ausführungen beschränken sich die Autoren auf den Aspekt der Bodenschadverdichtung.

Vorgelagerte Planungen, Linienbestimmung etc.

Auf Planungsebenen, die der Zulassungsebene vorausgehen (z. B. Raumordnungsverfahren, Linienbestimmungsverfahren, Umweltprüfung), sind generalisierende Bewertungen angemessen. Beispielsweise sind bei Umweltprüfungen generalisierende Wirkungsprognosen anhand empirischer Erkenntnisse zu Bauabläufen ausreichend, ohne dass jeder Bauprozess mit den notwendigen Maschinen im Detail abgebildet werden muss. Im Regelfall ist die Annahme zweckmäßig, dass bei Vorhaben mit Zulassungsverfahren, die zumeist Bauzeiten von mehreren Monaten bis Jahren einnehmen, die Böden im Laufe dieser langen Bauzeiten irgendwann besonders verdichtungsempfindlich sein werden, weil sie wassergesättigt sind. Auch kann auf der vorgelagerten Planungsebene der Anspruch an die zu verwendenden Bodendaten reduziert werden; so ist in vielen Fällen die bewertete Verdichtungsempfindlichkeit der Böden auf der Grundlage der mittelmaßstäbigen Bodenkarte 1 : 50.000 ausreichend für die vorgelagerte Planungsebene (Kap. 5).

Weiterhin können auf der vorgelagerten Planungsebene die Wirkintensitäten insbesondere mit Hilfe plausibler Erfahrungswerte zu mechanischen Lasteinträgen anhand von Gesamtmassen der technisch nötigen Maschinen, deren spezifischen Bodendrucke und der Wirkdauer bzw. Häufigkeit der Überrollungen klassifiziert werden. Je größer die Gesamtmassen, spezifischen Bodendrucke und die Häufigkeit der Überrollungen sind, umso größer sind die Wirkintensitäten auf den Boden. Auch hier sind stark vereinfachende

Regelannahmen zweckmäßig. So ist grundsätzlich bei jedweder Bautätigkeit mit den heute in der Baupraxis verbreiteten Maschinen und Geräten von hohen Wirkintensitäten auf das Bodengefüge auszugehen. Hilfestellungen zur Beurteilung der Befahrbarkeit und Umlagerungseignung bietet Kap. 4.2.

Die Wahrscheinlichkeit von Beeinträchtigungen des Bodengefüges steigt unter anderem auch mit zunehmendem Bodenvolumen, das baubedingt in Anspruch genommen wird. Aus diesem Grund kann es auch notwendig werden, das betroffene Bodenvolumen in die Umweltprüfung mit einzubeziehen.

Die Bedeutung des Kriteriums „betroffenes Bodenvolumen“ wird von FELDWISCH (2014, Kap. 7.1.4) am Beispiel des Vergleichs der Bodenbetroffenheit bei den beiden Vorhabentypen Freileitungsbau versus Erdkabel ausgeführt. Während bei Freileitungen lediglich für die Fundamente Boden ausgehoben und durch den Fundamentkörper verdrängt wird, sind für die Verlegung von Höchstspannungserdkabeln bei der Wechselstromtechnologie und einer Übertragungsleistung von rund 4 GW Gräben mit einer Sohlbreite von 10 und mehr Metern und einer Tiefe von ca. 2 m notwendig. Zudem wird für die Erdkabel zumeist noch ein Mantel aus Sand, Magerbeton oder Flüssigboden vorgesehen. Für den Freileitungsbau ergibt sich bei Spannfeldlängen von ca. 500 m und damit zwei Masten je Kilometer bei einer unterstellten Fundamentgröße von 100 m² je Mast (10 m x 10 m), einer Baugrubenfläche für das Fundament von 196 m² (14 m x 14 m) und einer Baugrubentiefe von 2 m ein notwendiges Aushubvolumen von 784 m³ je Kilometer Leitungslänge. Bei der Verlegung von Erdkabeln ist ein ca. 30-fach größeres Aushubvolumen nötig (Annahmen: 12 m Grabenbreite x 2 m Tiefe x 1.000 m Länge = 24.000 m³). Auch das verdrängte Bodenvolumen unterscheidet sich massiv bei den beiden Vorhabensvarianten (Annahmen je Kilometer Leitungsbau: [1] Freileitung: zwei Fundamente à 100 m² und 1 m Mächtigkeit = 200 m³ Bodenverdrängung je km; [2] Erdkabel: 12 m breiter Graben x 0,5 m Mantel aus Sand oder anderem zugeführten Material x 1.000 m Länge = 6.000 m³ Bodenverdrängung je km). Bei Gleichstrom-Höchstspannungserdkabeln reduziert sich das betroffene Bodenvolumen im Vergleich zum Wechselstrom bei gleicher Übertragungsleistung ca. um ein Drittel. Das bedeutet, dass bei der Verlegung von Gleichstrom-Erdkabeln mit einer vergleichbaren Übertragungsleistung ein temporäres Bodenaushubvolumen von ca. 16.000 m³ je Kilometer Leitungslänge anfällt.

Schutzmaßnahmen zur Vermeidung oder Minderung schädlicher Bodenverdichtungen, die bei der Bauplanung, -ausschreibung und -ausführung angemessen zu berücksichtigen sind

Baumanagement

- Flächenmanagement (z. B. befestigte Fremdflächen anmieten)
- Einsatz von Kran, Seilbagger (Dragline), Raupendumper etc. statt Radfahrzeugen zum Lastentransport, Vorgaben zu Baugeräten, Laufwerken bzw. maximalen Bodendrücken (s. angepasster Geräteeinsatz)
- Betriebsflächen möglichst klein halten, jedoch ausreichend dimensionieren, damit störungsfreier Bauablauf gesichert ist, ohne ungeschützten Boden zu beanspruchen (z. B. ausreichende Breite oder Ausweichstellen für Begegnungsverkehr auf Baustraßen)
- bauablaufabhängige Mehrfachnutzung von Flächen (z. B. Baustraßen auf später versiegelten Flächen)
- Abstecken von Tabuflächen (nach Möglichkeit stabiler Zaun unter wiederholter Kontrolle)

Bauzeitenplanung

- Eine angepasste Bauzeitenplanung beugt schädlichen Bodenverdichtungen vor. So sind bodeneingreifende Maßnahmen bevorzugt in die trockenen Jahreszeiten zu legen, weil dann die Böden im Regelfall tragfähiger und weniger verdichtungsanfällig sind.

- Tragfähigen Bodenfrost gibt es in Sachsen selten. Daher kann nur bei kurzen, zeitlich flexiblen Bautätigkeiten ein tragfähiger Bodenfrost zur Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen genutzt werden. In der Auftauphase und danach sind die Böden besonders verdichtungsempfindlich. Angesichts dieser Zusammenhänge sind Bauvorhaben nicht gezielt in die Wintermonate zu legen, weil mit tragfähigen Bodenfrösten nicht gerechnet werden kann und im Regelfall stark vernässte Bodenzustände angetroffen werden.
- Die Bauzeitenplanung sollte zur Einhaltung der Fertigstellungstermine mögliche witterungsbedingte Bauunterbrechungen einkalkulieren. Der vertragsrechtliche Umgang mit Baustillständen über das Maß der Allgemeinen Vertragsbedingungen hinaus sollte bereits mit dem Vertragsabschluss geklärt sein.

Angepasster Geräteeinsatz

- Grundsätzlich sind zur Vermeidung schädlicher Bodenschadverdichtung geeignete Baugeräte zu wählen, welche die Bodenpressung so weit begrenzen, dass nach Bauabschluss noch ein funktionstüchtiges Bodengefüge vorliegt oder mit einfachen Mitteln wiederherzustellen ist:
 - Ermittlung der Befahrbarkeit der Böden bzw. des spezifischen Flächendrucks durch die Laufwerke (in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte)
 - Zusätzlich kann vereinbart werden, ab welchem Feuchtezustand keine weiteren Befahrungen mehr durchgeführt werden.
 - Kettenbagger statt Planiertrauben für Bodenarbeiten
 - bei Maschinenmassen > 20 t Kettenlaufwerke mit einer Mindestbreite von z. B. 700 oder größer einsetzen, ggf. auch verlängerte Laufwerke, mit dem Ziel, den Kontaktflächendruck zu bodenverträglich begrenzen bzw. zu reduzieren
 - Kontaktflächendruck/Bodenpressung von maximal < ZAHLENWERT > (projektspezifisch zu bestimmen, z. B. maximal 0,4 kg/cm² bzw. 0,4 bar oder 40 kPa. Die Festlegung eines vorhabensbezogenen maximalen Kontaktflächendrucks muss neben der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden auch technische Erfordernisse berücksichtigen. Beispielsweise müssen bei der Verlegung von Rohrleitungen schwere Baumaschinen – sogenannte Seitenbäume bzw. Rohrverleger – eingesetzt werden, die technisch bedingt nicht beliebig niedrige Kontaktflächendrücke einhalten können.)
 - Radfahrwerke mit Niederdruckreifen
 - Trennung von Baustellen- und Straßenverkehr, Einsatz nur bodenschonender Fahrwerke für den Baustellenverkehr (Management)
 - Reifendruckregelungsanlagen für Radfahrzeuge, falls Baustellen- und Straßenverkehr nicht getrennt werden



Walzenzug CAT CP433E mit Stampfußschalen,
→ 7,4 t Gesamtmasse
→ Verdichtungsleistung 134 kN
→ Stampfußbodendruck: 16,5 bar ~ ca. 16 kg/cm²

Abbildung 21: Ungeeignetes Gerät zur Verdichtung verfüllter Leitungsgräben

Baustraßen, Montage- und Lagerplätze

- Für anhaltenden Fahrverkehr, für die Montage von Bauteilen oder die Lagerung von Baumaterial auf Böden sind Baustraßen und befestigte Montage- und Lagerflächen einzuplanen. Die Art der jeweils geeigneten technischen Ausführung dieser Flächen für die Baustelleninfrastruktur richtet sich zum einen nach den bauseitigen Anforderungen und Möglichkeiten, zum anderen nach den standörtlichen Bodeneigenschaften. Um die Ziele des Bodenschutzes zu erfüllen, müssen diese Einrichtungen grundsätzlich die aufgetragenen Lasten für den darunter liegenden Boden weitgehend schadlos und dauerhaft aufnehmen und dürfen weder zu einem Schadstoffeintrag noch zu einer Vermischung mit dem anstehenden Boden führen.
- Zu unterscheiden sind drei prinzipiell mögliche Herangehensweisen:
 - Einrichtung auf oder unter Einbeziehung des gewachsenen Oberbodens (A-Horizont)
 - Einrichtung auf dem gewachsenen Unterboden (B-Horizont)
 - Einrichtung mit Hilfe des Aushubs des verdichtungsunempfindlichen C-Horizonts

Die aufgeführten Beispiele zu Baustraßen bei Linienbaustellen in den nachfolgenden Abbildungen sind sinngleich auf jede andere Baufläche mit mechanischen Lasteinträgen übertragbar (vgl. auch FaBo Zürich 2007).

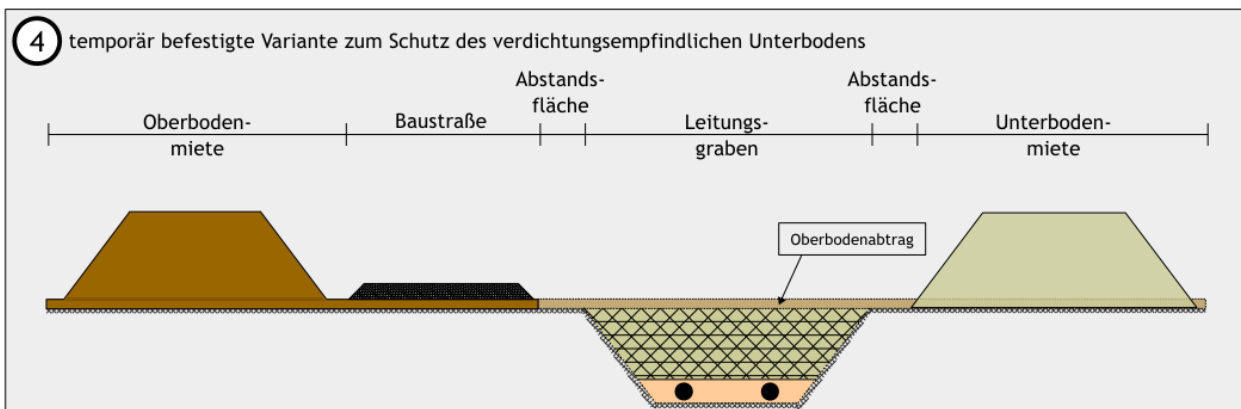
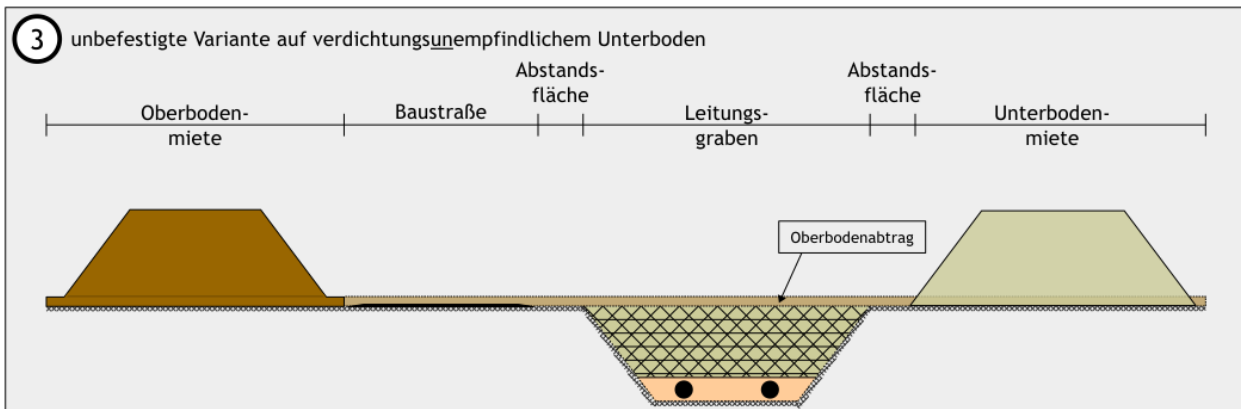
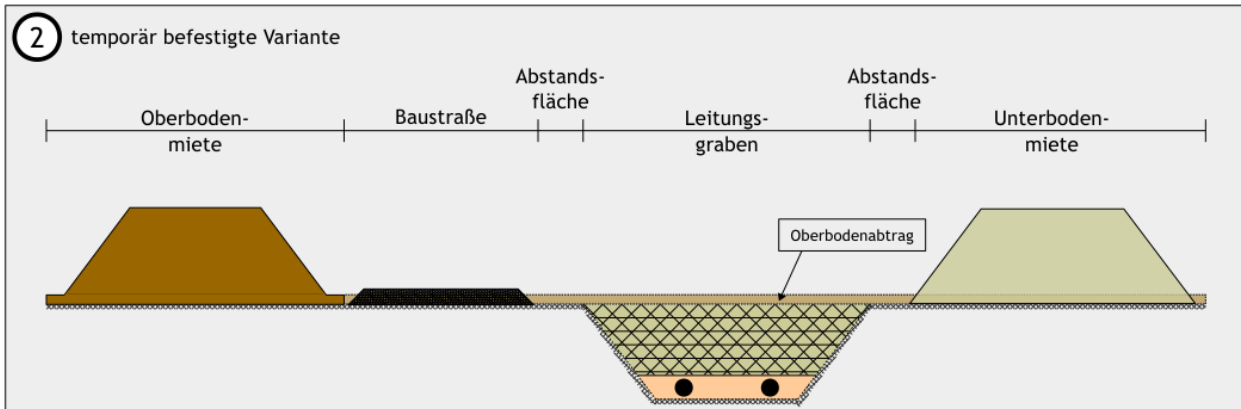
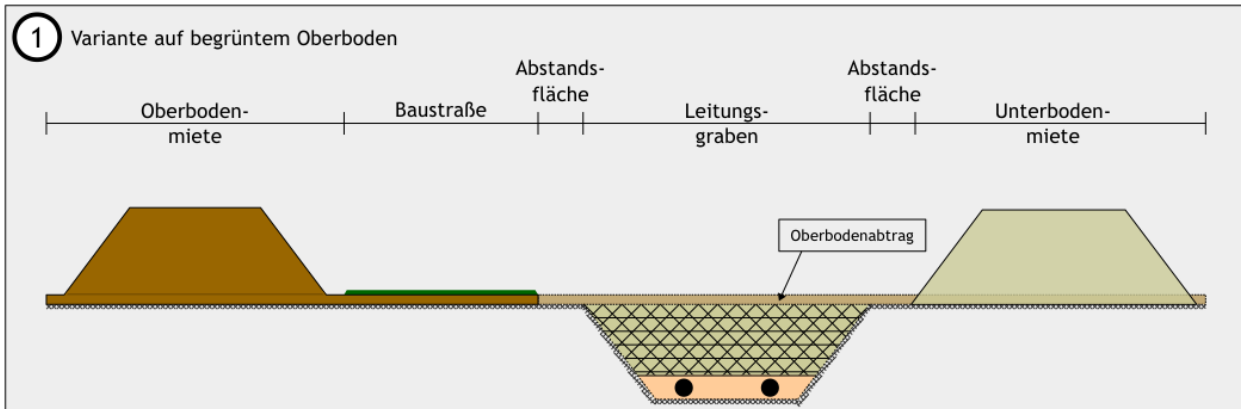


Abbildung 22: Schemata für die bodenschonende Anlage von Baustraßen bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen



Abbildung 23: Begrünte Fahrtrasse bei einer Rohrleitungsbaustelle



Abbildung 24: Rückwärtiges Anschütten einer temporären Baustraße auf dem A-Horizont
(Foto: regioplus-Ingenieurgesellschaft)



Abbildung 25: Auswahl verschiedener Baustraßentypen

Im Falle des Rohrleitungsbaus oder der Verlegung von Erdkabeln sind bei der Bemessung der Trassenbreite neben den Flächen für die Baustraßen (Fahr- und Arbeitsspur) auch Flächen für die Bodenmieten, den Graben und die Ablage des Rohrs bzw. sonstiger, parallel zum Graben zu lagernder Materialien wie z. B. Bettungssand im ausreichenden Maß vorzusehen (vgl. HILGENSTOCK et al. 2011).

Bodenaushub lagern

Prinzipiell ist es für den Boden am besten, wenn er ohne Zwischenlagerung direkt an anderer Stelle zu Rekultivierungszwecken verwendet wird. Oft passen die zeitlichen und räumlichen Ansprüche nicht zusammen, sodass eine Zwischenlagerung unvermeidbar ist.

An eine schonende Zwischenlagerung sind folgende Ansprüche zu stellen:

■ Lagerort: Ebene Lagen oder Kuppenlagen sind geeignet. In Hanglagen sind regelmäßig Fanggräben oberhalb der Mieten vorzusehen, um Wasserzufluss in die Mieten zu vermeiden. Ungeeignet sind Muldenlagen, vernässte und stauende Böden.

■ Getrennte Lagerung von Oberboden, Unterboden und Abraum. Die Mieten sind nach Bedarf – beispielsweise bei schadstoffbelastetem Bodenmaterial – zu kennzeichnen, um Verwechslungen ausschließen zu können.

■ Getrennte Lagerung von Substraten unterschiedlicher Körnung bzw. unterschiedlicher stofflicher Belastungen gemäß BBodSchV. Die Mieten sind zu kennzeichnen, damit Verwechslungen ausgeschlossen werden können.

■ Glättung und Profilierung der Mieten, damit die Menge eindringenden Wassers vermindert wird.

■ Bodenmieten dürfen nicht befahren oder als Lagerort missbraucht werden.

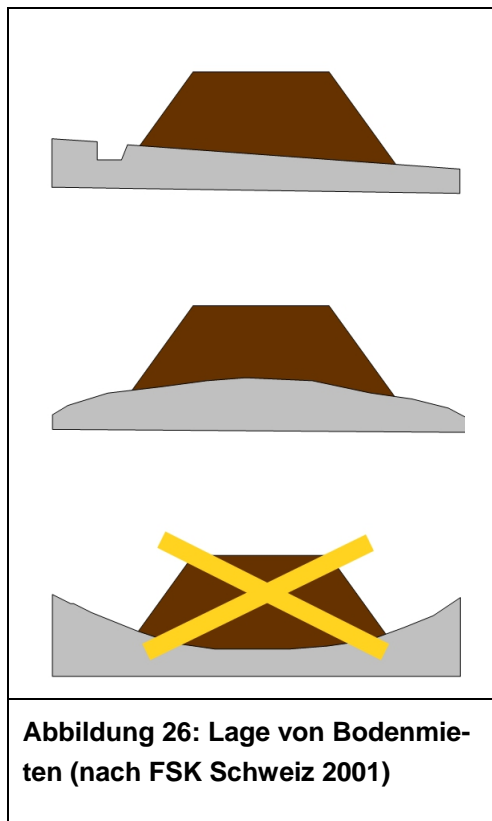
■ Mieten sind im Regelfall mittels Raupenbagger aufzusetzen. Kleine Mieten können bei trockenem bis schwach feuchtem Boden (vgl. Tabelle 11) ausnahmsweise auch mit anderen Maschinen wie z. B. Laderaupe oder Planier-
raupe angelegt werden.

■ Begrenzung der Mietenhöhe:

■ Oberboden (humoses Bodenmaterial): max. 2 m

■ Unterboden: max. 4-5 m haben sich in der Praxis bewährt; wenn trockenes Bodenmaterial (vgl. Tabelle 11) aufgemietet wird, sind bis zu 10 m möglich

■ Mieten sind bei absehbarer längerer Standzeit möglichst kurzfristig nach der Aufmietung zu begrünen. Als längere Standzeit ist in Anlehnung an DIN 18915 eine Lagerzeit von mehr als drei Monaten anzusehen. Die Begrünung soll mit stark wasserzehrenden Pflanzen erfolgen. Dazu eignen sich bei überjähriger Lagerung winterharte Zwischenfruchtgemenge; bei langjähriger Lagerung sind beispielsweise Klee-Gras-Gemenge oder Luzerne geeignet. Die Begrünung ist während der Lagerzeit nach Bedarf zu pflegen und ggf. nachzusäen. Sie hält die Miete möglichst trocken, fördert das Bodenleben, verhindert Erosion und vermeidet Bewuchs mit unerwünschter Vegetation.



Bodenaushub verfüllen

Baugruben und Leitungsgräben müssen nach Abschluss der Arbeiten verfüllt werden. Aus Sicht der Bauwirtschaft, die den schnellen Abschluss der Baumaßnahme vor Augen hat, werden Bodenverfüllungen oft mit schweren und rüttelnden Maschinen bzw. Geräten verdichtet. Sollen nach Bauabschluss wieder natür-

liche Bodenfunktionen mit durchwurzelbaren Bodenschichten realisiert werden, dann ist diese Vorgehensweise ungeeignet, weil sie dauerhaft zu schädlichen Bodenverdichtungen führt.

Eine bodenschonende Verfüllung berücksichtigt die folgenden Sachverhalte:

- Die Verfüllung hat mit angetrocknetem Bodenmaterial zu erfolgen. Werden nasse bis sehr feuchte Bodenmaterialien verfüllt, treten schadhafte Bodenverdichtungen ein. Nach DIN 19731 sind trockene bis schwach feuchte Böden zu verfüllen (vgl. Tabelle 11).
- Die Verfüllung erfolgt schichtweise mit Unterbodenmaterial. Das Rohplanum ist nach Bedarf vor dem Auftrag des Oberbodens ggf. aufzubrechen. Dazu eignen sich landwirtschaftliche Geräte wie Grubber.
- Der Oberboden wird rückschreitend mit Raupenbaggern auf das Rohplanum aufgetragen. Dabei ist die ursprüngliche Mächtigkeit gleichmäßig wiederherzustellen. Das Oberbodenplanum muss an die Oberfläche der Umgebung versatzfrei anschließen.
- Nach der Verfüllung von Baugruben oder Leitungstrassen können Sackungen auftreten. Grundsätzlich sind bodenschutzfachlich eher Sackungen zu akzeptieren als übermäßige Verdichtungen. Den unvermeidbaren Sackungen ist mit zusätzlichen Bauleistungspositionen wie Nachplanieren oder lokalen Bodenauffüllungen im folgenden trockenen Sommerhalbjahr zu begegnen (vgl. Kap. 7.2).

Die Planung muss abschließend die verbleibenden Beeinträchtigungen der Böden prognostizieren. Dieser Planungsschritt greift regelhaft auf Erfahrungswissen und begründete Annahmen zurück, weil die Auswirkungsprognose nicht mathematisch oder physikalisch exakt durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund werden vielfach auf verbal-argumentativer Weise zu erwartende verbleibende Beeinträchtigungen abgeschätzt. Dieser Planungsschritt sollte fachlich nachvollziehbar auf die Ergebnisse der Erfassung und Bewertung einschließlich der vorgesehenen Vermeidungs-, Minderungs- und Rekultivierungsmaßnahmen zurückgreifen.

Im Zuge der Planung und Zulassung ist zu entscheiden, ob nach der Wiederherstellung der Oberfläche die rekultivierten Bauflächen unmittelbar wieder in die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung übergeben werden sollen oder ob eine bodenschonende Zwischenbewirtschaftung für notwendig erachtet wird.

Eine Vollständigkeitsprüfung kann mit Hilfe von Checklisten erfolgen, wie sie beispielsweise für die Planung und Errichtung von Windenergieanlagen von Feldwisch (2014) im Auftrag des hessischen Umweltministeriums erstellt wurden. Wesentliche Teile dieser Arbeitshilfe sind nicht nur für Windenergieanlagen anwendbar, sondern lassen sich auch auf andere Verfahren übertragen. Fehlt beispielsweise eine fachlich einwandfreie Erfassung und Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit, dann sollte diese vom Vorhabensträger nachgefordert werden. Sind die in den Antragsunterlagen dargelegten Vermeidungs-, Minderungs- und Rekultivierungsmaßnahmen nicht ausreichend und zu unkonkret beschrieben, dann können derartige Lücken durch Nebenbestimmungen der Zulassung geheilt werden.

Im Anhang sind Checklisten (S. 59) zusammengestellt, die Hilfestellungen bieten ...

- beim Erkennen und Beurteilen von schädlichen Bodenverdichtungen oder Gefügeschäden,
- bei der Planung von bodenschonenden Bauvorhaben durch Vorhabensträger, Planer und/oder Bau-firmen und
- bei der Überprüfung von Antragsunterlagen durch Zulassungsbehörden.

6.2 Bauausschreibung

Die im Rahmen der Planung dargelegten Vermeidungs-, Minderungs- und Rekultivierungsmaßnahmen sowie die im Zuge der Zulassung festgelegten Nebenbestimmungen zum Schutz der Böden müssen sich im Bauleistungsverzeichnis mit entsprechenden Positionen wiederfinden. Fehlen beispielsweise Leistungspositionen mit konkreten Ausführungsvorgaben zu den Bodenschutzmaßnahmen, dann wird die Durchsetzung der Bodenschutzbelange auf der Baustelle erschwert oder gar gänzlich unmöglich.

Ein möglichst präzises Bauleistungsverzeichnis im Hinblick auf die Bodenschutzmaßnahmen auf der Baustelle ist auch im Eigeninteresse des Vorhabensträgers. Nur so lassen sich Baubehinderungs- oder Baustillstandsanzeigen und kostentreibende Nachtragsangebote vermeiden. Insofern trägt ein sorgfältig erstelltes Bauleistungsverzeichnis auch zur Verfahrenssicherheit und Konfliktvermeidung bei.

6.3 Bauausführung und Rekultivierung

Bei der Bauausführung gilt es, die vorgegebenen Maßnahmen zum Schutz der Böden – namentlich zum Schutz des Bodengefüges und zur Vermeidung von schädlichen Verdichtungen – umzusetzen. Dabei geht es nicht darum, jedwede Beeinträchtigungen der Böden zu vermeiden. Ziel des Bodenschutzes beim Bauen ist es vielmehr, vermeidbare Beeinträchtigungen zu unterlassen und unvermeidbare Beeinträchtigungen in einem Ausmaß zu halten, die eine Wiederherstellung durchwurzelbarer Bodenschichten mit ihren natürlichen Bodenfunktionen im Naturhaushalt kurzfristig und mit einfachen Mitteln ermöglicht. Aufwändige und in ihrem Erfolg zweifelhafte Sanierungsmaßnahmen sollen soweit wie möglich vermieden werden.

Wird während der Bauausführung offenkundig, dass die vorgegebenen Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen nicht ausreichen, um schädliche Bodenveränderungen – auch Bodenverdichtungen – abzuwenden, dann ist der Vorhabensträger und das von ihm beauftragte Bauunternehmen gehalten, situativ geeignete, erforderliche und verhältnismäßige Maßnahmen zur Abwendung der Entstehung schädlicher Bodenveränderungen zu ergreifen.

Ein bloßer Verweis auf die Einhaltung der Zulassungsbedingungen stellt die Pflichtigen nicht frei von der gebotenen Pflicht zur Abwehr vermeidbarer nachteiliger Einwirkungen auf den Boden, es sei denn, das Planungs- und Zulassungsverfahren hat im Abwägungsprozess derartige nachteilige Einwirkungen auf die Böden explizit als unvermeidbar eingestuft.

Insbesondere bei erkennbaren Verfahrensfehlern bei der Erfassung und Bewertung des Schutzgutes Boden und der unzureichenden Festlegung von Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen können Nachbesserungen rechtlich geboten sein. Dies unterstreicht nochmals die große Bedeutung einer fachlich validen Behandlung des Bodenschutzes in der Planung und Zulassung, um eine verfahrenssichere und möglichst störungsfreie Bauausführung zu gewährleisten.

Die Rekultivierung des Baufeldes nach Bauabschluss zielt darauf ab, Böden soweit wie möglich wieder in ihren Ausgangszustand herzustellen und etwaige baubedingte Beeinträchtigungen zu beseitigen oder abzumildern. Im Zuge von Planungsverfahren sind geeignete Rekultivierungsverfahren mit konkretisierenden Ausführungshinweisen zu benennen, welche die zu erwartenden Beeinträchtigungen durch den Bau soweit wie möglich beseitigen oder mindern können.

Ob dann alle im Rahmen der Planung genannten Rekultivierungsmaßnahmen tatsächlich realisiert werden müssen, hängt entscheidend vom Bauablauf ab. Konnte der Bau beispielsweise aufgrund besonders günstiger, das heißt trockener Witterungs- bzw. Bodenbedingungen ohne bedeutsame Beeinträchtigungen durchgeführt werden, dann kann ggf. auf einzelne eingeplante Rekultivierungsmaßnahmen (Kap. 7) verzichtet werden.

7 Bodenverdichtungen sanieren, rekultivieren

(zitiert nach: BVB 2013, Kap. 4.4.3; zum Teil verändert bzw. ergänzt)

Grundsätzlich ist die Vermeidung von Bodenschäden einer eventuell erforderlichen Rekultivierung vorzuziehen. Dennoch lassen sich nicht in jedem Fall jegliche Bodenschäden bei der Ausführung von Baumaßnahmen vermeiden. Die folgenden Ausführungen betreffen daher Rekultivierungsmaßnahmen, die im Rahmen einer Auftragserfüllung durch das Bauunternehmen vor einer Schlussabnahme durchgeführt werden müssen, aber auch Sanierungsmaßnahmen, die nach Auftragsabschluss zur Mängelbeseitigung notwendig werden.

In diesem Zusammenhang soll nochmals deutlich gemacht werden, dass eine vollständige Wiederherstellung des gewachsenen Bodengefüges grundsätzlich nicht möglich ist. Nach Rekultivierungs- und Sanierungsmaßnahmen ist dem Boden daher eine ausreichende Zeit zur Gefügeentwicklung und -stabilisierung zuzugestehen. Zu sanierende Bodenschäden entstehen insbesondere infolge Verdichtung, Vernässung, fehlerhafter Substrattrennung und ggf. durch Schadstoffeinträge (vgl. Abbildung 27).



Abbildung 27: Gefüge- und Aufwuchsschäden durch schädliche Verdichtungen mit Pfützenbildungen sowie Bodenschäden durch Substratmischung, hier Kieseinmischungen in den lössbürtigen Mutterboden

Alle Rekultivierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen sind immer nur bei ausreichend trockenen Bodenverhältnissen durchzuführen: Trockener bis schwach feuchter Boden gemäß Tabelle 11. Höhere Bodenfeuchten und die damit verbundenen weichen, breiigen oder zähflüssigen Bodenkonsistenzen führen regelmäßig zu schädlichen Bodenverdichtungen und einem mangelnden Rekultivierungs- bzw. Sanierungserfolg.

7.1 (Tief-)Lockerungen

Derartige mechanische Überlastungen des Bodengefüges bedürfen im Regelfall einer initialen, mechanischen Lockerung mit geeigneten Tieflockerungsgeräten. Im Regelfall nicht geeignet sind die starren Zinken des Heckaufreißers („Ripper“) von Raupen, weil sie keine ausreichende Lockerung des Bodens gewährleisten. Im Oberboden bis etwa 30 cm Bodentiefe können Verdichtungsschäden zumeist mit Hilfe der üblichen landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungsverfahren beseitigt werden.

Für die Lockerung des Unterbodens sind Tieflockerungsgeräte wie Abbruch-, Stechhub- oder Wippscharlockerer geeignet. Tabelle 13 gibt einen Überblick über Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen verschiedener praxisüblicher Lockerungsgeräte.

Die initiale mechanische Lockerung ist in der Regel mit einer ergänzenden Ruhephase, in der tiefwurzeln-de Pflanzen angebaut werden, abzusichern. Unterstützende Rekultivierungsmaßnahmen (Kap. 7.4) fördern die Wiederherstellung einer durchwurzelbaren und funktionstüchtigen Bodenschicht.



Abbildung 28: Mechanische Tieflockerung; links: Abbruchlockerungsgerät („MM100“; rechts: Stechhublockerer TLG 470 (Foto: T. Weyer, Fachhochschule Südwestfalen)

Tabelle 13: Tieflockerung – Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen verschiedener praxisüblicher Maschinen und Geräte

Maschine/Gerät	Verfügbarkeit *	Arbeitsverfahren	Bemerkungen	Bodenschonende Einsatzbereiche **
Alle Lockerungsarbeiten dürfen nur bei trockenen, maximal steif-plastischen Böden durchgeführt werden.				
Raupe mit Heckaufreißer	+	starr, Aufbruchprinzip	Länge der Zähne variiert zwischen 30 (meist nicht sehr hilfreich) bis 1,20 m. Zumeist nur 3 starre Zähne, sodass Lockerungsgänge zu weit auseinander für eine gute Lockerungswirkung Häufiger im Einsatz sind Heckaufreißer mit 80 cm Länge. Diese erzielen meist brauchbare Ergebnisse, wenn kreuzweise bei geringer Bodenfeuchte aufgerissen wird. Raupe sollte zwingend über ein Moorlaufwerk verfügen, wenn Rekultivierungsschicht aufgerissen wird. Großraupen mit nur einem sehr langen Zahn sind nur für Spezialfälle zu gebrauchen. Verdichtungen können nur bei ausreichend trockenem Boden aufgebrochen werden. Auf verdichtungsanfälligen Boden von Einsatz absehen.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rohplanum aufreißen ■ (Rekultivierungsschicht tieflockern nur bei geringen Verdichtungsgraden und geringen Bodenfeuchten; mindestens 4 und minimal 80 cm lange Zähne für eine akzeptable Lockerung nötig.)

Maschine/Gerät	Verfügbarkeit *	Arbeitsverfahren	Bemerkungen	Bodenschonende Einsatzbereiche **
Kettenbagger mit Aufreißzahn	o	starr, Aufbruchprinzip	Zähne sind in unterschiedlichen Längen auf dem Markt. Für Lockerungsarbeiten sind die Zahnängen den jeweiligen Erfordernissen anzupassen. Arbeit erfolgt rückwärts. Geeignetes Gerät für Kleinfächen.	■ Rohplanum auf kleinen Flächen aufreißen
Abbruchlockerer	o	beweglich, Abbruchprinzip	Lockerung durch Abbrechen oder Abstechen, kein Anheben wie beim Wippschar- und Hubschwenklockerer Lockerungen bis max.80 cm Tiefe bei steinarmen Böden Tiefenlockerung ohne großen Zugkraftaufwand, aber hohe Antriebsleistung für Tiefspatenaggregat erforderlich.	■ Unterbodenlockerung auch bei starker Verdichtung bei steinarmen Böden.
Wippscharlockerer	o	beweglich, Aufbruchprinzip	In der Regel Anbaugerät für Traktoren. Einsatz bei intensiven Verdichtungen bis ca. 120 cm Tiefe. Aufbruchprinzip ähnlich wie bei Heckaufreißern, aber mit besserem Wirkungsgrad durch beweglich gelagerte Zähne.	■ Unterbodenlockerung auch bei starker Verdichtung, weniger empfindlich bei Steinen.
Hubschwenklockerer	o	beweglich, Aufbruchprinzip	In der Regel Anbaugerät für Traktoren. Unterschiedlich lange Schare bis 120 cm. Mit der Zapfwelle angetriebene Schare, die vor und zurück pendeln. Schare und Schwerter sind fest miteinander verbunden, so dass der Lockerungseffekt etwas geringer ist als beim Wippscharlockerer.	■ Unterbodenlockerung auch bei starker Verdichtung, weniger empfindlich bei Steinen.

Erläuterungen:

* Verfügbarkeit: + = gut verfügbar; o = mittel verbreitet

** Bodenschonende Einsatzbereiche: Einstufung nach Praxiserfahrungen. Neben der grundsätzlichen Eignung einer Maschine bzw. eines Gerätes sind die richtige Bodenfeuchte während des Einsatzes und die umsichtige Arbeitsweise des Bedienpersonals von entscheidender Bedeutung für den Schutz der Böden vor schädlichen Einwirkungen.

7.2 Auffüllung von Sackungen

In Sackungen bilden sich häufig Pfützen, in deren Folge Vernässungen der Böden und Wachstumsbeeinträchtigungen der Kulturpflanzen auftreten. Aus diesem Grund sind Sackungen mit geeignetem Bodenmaterial aufzufüllen. Dabei ist dem Bodengefügeschutz Rechnung zu tragen. Insbesondere ist die Maßnahme nur bei trockenen Bodenverhältnissen durchzuführen.

Muss Bodenmaterial für bautechnische Nutzungen oder zur Wiederherstellung natürlicher Bodenfunktionen angeliefert werden, dann sind auch hier boden- und abfallrechtliche Anforderungen zu berücksichtigen. In der Baupraxis wird meist keine Beurteilung von Gefügebeeinträchtigungen des angelieferten Bodenmaterials vorgenommen. Dadurch besteht jedoch die Besorgnis empfindlicher Beeinträchtigungen der natürlichen Funktionen und damit der Pflanzenwachstumsbedingungen am Ort des Ein- oder Aufbringens des Bodenmaterials.

Weiterhin muss bei der Anlieferung von Bodenmaterial der Grundsatz „Gleiches zu Gleichem“ im Hinblick auf die Feinbodenarten, Grobbodenanteile und Humusgehalte eingehalten werden (vgl. DIN 19731).



Abbildung 29: links: Pfützenbildung in Sackungsbereichen; rechts: Auffüllen der Sackungen mit geeignetem Bodenmaterial bei trockenen Bodenverhältnissen



Abbildung 30: Versackte Mähdrescher und Feldspritze nach zu früher Befahrung verfüllter Leitungsräben

7.3 Bodenaustausch

Sind die mechanischen Beeinträchtigungen des Bodengefüges so massiv, dass sie in absehbarer Zeit nicht regenerierbar sind, oder sind stoffliche Belastungen der Böden in der Bauphase ausgelöst worden, dann ist in der Regel ein Bodenaustausch vorzunehmen. Alle notwendigen Sanierungsmaßnahmen – wie Ausbau und Abtransport des geschädigten Bodenmaterials sowie Antransport und Einbau geeigneten Bodenmaterials – sind bodenschonend durchzuführen, um erneute Schäden zu vermeiden.

Die Eignung des Bodenmaterials bestimmt sich nach folgenden Kriterien: Zu verwenden ist standorttypisches, herkunftsnahes Bodenmaterial, das nach Feinbodenart, Steingehalt, Humusgehalt und Stoffsituation dem Boden am Einbauort entspricht. Ist eine landwirtschaftliche Folgenutzung geplant, soll der Boden frei von problematischen Wildkräutern und kritischen Krankheitserregern sein.

7.4 Unterstützende Rekultivierungsmaßnahmen

Die in den vorherigen Unterkapiteln genannten Maßnahmen zur Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen werden durch Kalkung (empfehlenswert: silikatische Kalke) oder organische Düngung unterstützt, aber nicht ersetzt. Dabei sind die Bedingungen des Einzelfalls zu berücksichtigen.

Beispielsweise fördert eine Kalkung auf versauerten Böden den Rekultivierungserfolg deutlicher als auf gut gepufferten, neutralen Böden. Hierbei sind bodenartenspezifische Unterschiede im Ziel-pH-Wert zu beachten. In ähnlicher Weise bewirkt eine organische Düngung auf humusarmen Böden zumeist eine deutlich positivere Wirkung auf das Bodenleben als auf bereits humusreichen Böden.

Generell wirken alle Maßnahmen, die das Bodenleben fördern, positiv auf den angestrebten Rekultivierungserfolg.

7.5 Dränung

Bei massiver Vernässung in Folge baubedingter Verdichtungen ist häufig eine Dränung der betroffenen Bodenflächen nötig, um eine geregelte Folgebewirtschaftung zu ermöglichen. In Abhängigkeit von der Flächenbetroffenheit und dem Vernässungsausmaß sind die Dränsysteme einzelfallbezogen auszuarbeiten.

Das Dränsystem aus Saugern und Sammlern kann entweder vor der Herstellung des oberen Verfüllbereichs bzw. der Rekultivierungsschicht auf dem Rohplanum angelegt (vgl. FSK 2001) oder nach der Herstellung der Rekultivierungsschicht mit geeigneter Technik im Boden verlegt werden (siehe Abbildung 31).



Abbildung 31: Dränpflug im Einsatz

7.6 Folgebewirtschaftung

Werden rekultivierte Böden wieder landwirtschaftlich genutzt, so sind die verdichtungsempfindlichen Böden wieder mechanischen Belastungen ausgesetzt. Wegen ihrer Empfindlichkeit benötigen sie häufig eine Ruhephase, während der sie sich unter optimalen Bedingungen stabilisieren und restrukturieren können. Ziel dieser Phase muss es sein, die Böden wieder tragfähiger zu machen und vor Erosion zu schützen, bevor erneut die Belastungen einer intensiven Nutzung beginnen. Zweckmäßig ist es, die Rekultivierungsflächen unverzüglich nach der Fertigstellung anzusäen. Die erste Folgekultur soll aus mehrjährigen intensivwurzelnenden Pflanzen bestehen. Besonders geeignet sind Luzerne, diverse Kleearten oder Luzerne-Gras- oder Kleegrasmischungen. Insbesondere die tiefwurzelnenden Arten sichern den Lockerungserfolg biologisch ab (Abbildung 32). Daneben wird das Bodenleben (z. B. Regenwürmer) gefördert, was den Gefügestand verbessert (vgl. Abbildung 5 auf S. 16).



Abbildung 32: Erstbegrünung zur Förderung des Rekultivierungserfolges (links: Steinklee; rechts: Luzerne)

Anzustreben ist eine extensiv bewirtschaftete Dauerbegrünung in den ersten Standjahren. Der Aussaatzeitpunkt richtet sich nach den verwendeten Pflanzenarten. Als Spätsaat kann Grünroggen noch Mitte (Ende) Oktober gesät werden. Als Saatgutmenge sollte die 1,5-fache Menge der sonst üblichen Saatmenge verwendet werden. Für die rekultivierten Flächen wird bei den Leguminosen mit Knöllchenbakterien geimpftes Saatgut empfohlen. Unterstützend kann eine Kalkung oder die Ausbringung organischer Festdünger wirken. Keinesfalls sollten reine N-Dünger oder Gülle verwendet werden. Erstere fördern den Grasanteil in den Saatmischungen, zweitere können das Bodenleben und die Gefügestabilität beeinträchtigen.

Bei der Bewirtschaftung sind in den ersten Jahren folgende Regeln strikt zu beachten (nach DIN 19731 mit Ergänzungen):

- Jede Befahrung muss bei ausreichend abgetrocknetem Boden erfolgen.
- Bei verdichtungsempfindlichen Böden oder bei anhaltend feuchten Böden sind die Achslasten zu reduzieren bzw. bodenschonende Laufwerke zu verwenden.
- Bei Grünlandnutzung sollten maximal 2-(3) Schnitte/Jahr vorgenommen werden.
- Keine Beweidung, auch nicht Herbstbeweidung!
- Hackfrüchte und Mais sollten nicht vor dem 6. Jahr angebaut werden, besser später.
- Generell ist nach der ersten Nachsorgephase eine ganzjährige Begrünung anzustreben (Zwischenfruchtanbau).

Link- und Literaturverzeichnis

Weiterführende Links (Auswahl; letzte Aufrufe am 18.03.2016)

Karten der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden in Sachsen

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/26160.htm>

Überblick Bodenverdichtung

bodenwelten.de: Übersichtliches Internetangebot mit Erläuterungen zu Schadensbildern von Bodenverdichtungen und Vermeidungsmöglichkeiten.

<http://www.bodenwelten.de/navigation/bodenverdichtung>

Umweltbundesamt: Informationsangebot zu den Prozessen, Einflussfaktoren und Auswirkungen der Bodenverdichtung; Hinweise zur Ermittlung der Bodenverdichtung sowie der Empfindlichkeit der Böden; Beschreibung von Vermeidungsmaßnahmen.

<http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/verdichtung>

Internetangebot des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Bodengefüge, Bodenstruktur mit Ausführungen zur Bodenverdichtung und deren Ursachen sowie zu Maßnahmen des Bodengefügeschutzes:

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/12207.htm>

Bodenverdichtung bei Baumaßnahmen

Fachstelle Bodenschutz des Kanton Zürich, Schweiz: Detailliertes Internetangebot rund um das Thema Bodenschutz beim Bauen inkl. Merkblatt zu Baustraßenvarianten.

http://www.aln.zh.ch/internet/baudirektion/aln/de/fabo/bauen/bauliche_bodeneingriffe.html

http://www.aln.zh.ch/dam/baudirektion/aln/bodenschutz/bauen/pdf/lastvert/lastverteilung_Merkblaetter_alle.pdf.spooler.download.1291201316199.pdf/lastverteilung_Merkblaetteralle.pdf

Bundesamt für Energie Schweiz: Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen.

http://www.bfe.admin.ch/energie/00567/00568/00602/index.html?lang=de&dossier_id=00874

Bundesamt für Umwelt Schweiz: Umfangreicher Leitfaden mit grundlegenden bodenkundlichen Informationen und praktischen Hinweisen zu Bodenschutzmaßnahmen beim Bauen.

<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00106/index.html?lang=de>

Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich (2003): Richtlinien für Bodenrekultivierungen. Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz, Zürich.

http://www.aln.zh.ch/dam/baudirektion/aln/bodenschutz/bauen/pdf/richtlinien_fuer_bodenrekultivierungen.pdf

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Bodenschutz beim Bauen: Praxishinweise für Planer und Bauherren zum Bodenschutz beim Bauen.

http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/bodenschutz_bauen.html

Bundesverband Boden e.V.: Detailliertes Merkblatt zur Bodenkundlichen Baubegleitung. BVB-Merkblatt Band 2, Erich Schmidt Verlag

<http://www.esv.info/978-3-503-15436-4>

LABO – Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz: Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung), vom 11.9.2002, in Zusammenarbeit mit LAB, LAGA und LAWA.

<https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Vorsorgender-Bodenschutz.html>

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Umfangreiche Dokumentation zum Bodenschutz beim Bauen.

<http://www.lanuv.nrw.de/umwelt/bodenschutz-und-altlasten/bodenschutz-beim-bauen/>

Bodenverdichtung Landwirtschaft

Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Entscheidungshilfe Bodendruck für Landmaschinen der Landwirtschaft:

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/12415.htm>

Agrar Praxis Kompakt: Boden unter Druck. Schadverdichtungen vermeiden – Fruchtbarkeit sichern. Rücknagel, J. (2014) Frankfurt a. M.: DLG-Verlag:

http://www.dlg-verlag.de/shop/product_info.php/info/p2658_Boden-unter-Druck.html

AID Broschüre 2015: Gute fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz

<http://shop.aid.de/3614/gute-fachliche-praxis-bodenbewirtschaftung-und-bodenschutz>

Literatur

AfU Luzern – Amt für Umwelt des Kanton Luzern (2003): Bodenschonender Maschineneinsatz, Einsatzgrenze einer Maschine bezüglich Bodenfeuchte. Aktuell Umwelt und Energie des Kanton Luzern

AG Boden – Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Hrsg. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover, in Kommission: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

BUWAL – Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (2006): Bodenschutz beim Bauen.

BERLI, M., J. M. KIRBY, S. M. SPRINGMANN & R. SCHULIN (2003): Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. Soil & Tillage Research 73, 57 - 66.

BfE – Bundesamt für Energiewirtschaft Schweiz (1997): Bodenschutzrichtlinien – Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen.

BMLFUW – Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2012): Richtlinien für die sachgerechte Bodenrekultivierung land- und forstwirtschaftlich genutzter Flächen.

BVB – Bundesverband Boden (2013): Bodenkundliche Baubegleitung BBB. BVB-Merkblatt Band 2 ESV Berlin, 2013.

DEHNER, U., M. RENGER, A. BRÄUNIG, A. LAMPARTER, A. BAURIEGEL, B. BURBAUM, K.-J. HARTMANN, V. HENNINGS, F. IDLER, F. KRONE, W. MARTIN, K. MEYER, F. WALDMANN (2015): Neue Kennwerte für die Wasserbindung in Böden – Ergebnisse der Abstimmung zwischen dem Personenkreis Wasserhaushaltstabellen der Ad-hoc-AG Boden und dem DWA. In: Jahrestagung der DBG "Unsere Böden – Unser Leben", 5.-10.09.2015, München. <http://eprints.dbges.de/1160/> (letzter Aufruf: 18.03.2016)

DIN 19682-10 – Felduntersuchungen, Bestimmung des Makrogefüges. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

- DIN 19688, Vornorm (1998): Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. Deutsches Institut für Normung, Berlin (mittlerweile zurückgezogen).
- DIN 19731 – Bodenbeschaffenheit, Verwertung von Bodenmaterial. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DUMBECK, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation am Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung der Universität Gießen.
- DÜRR, H.-J., H. PETELKAU, C. SOMMER (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung. UBA-Texte 55/95. Berlin. UBA.
- DVGW (2014): Bodenschutz bei Planung und Errichtung von Gasleitungen. DVGW-Merkblatt G451.
- DVWK (Hrsg.) (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil I: Mechanische Belastbarkeit. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234/1995. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil II: Auflastabhängige Veränderungen von bodenphysikalischen Kennwerten. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 235/1997. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DVWK (Hrsg.) (1998): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil III: Ermittlung von Richtwerten zum Schutz des Unterbodens und Empfehlungen für eine nachhaltige Landwirtschaft aus bodenkundlicher Sicht. Merkblätter zur Wasserwirtschaft Gelbdruck, Nov. 1998. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- FaBo Zürich – Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich (2003): Richtlinien für Bodenrekultivierungen. Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz, Walcheplatz 2, Zürich
- FELDWISCH, N. (2000): Untersuchungs- und Handlungskonzepte für verdichtungsempfindliche Standorte in Sachsen. Studie für das sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie. Bosch & Partner GmbH, Bergisch Gladbach.
- FELDWISCH, N. (2014): Auswirkungen auf den Boden. In: P.-S. Storm & T. Bunge (Hrsg.): Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung. Loseblattwerk, Kennzahl 2305. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- FELDWISCH, N. & J. BORKENHAGEN (2014): Bodenschutz bei der Planung, Genehmigung und Errichtung von Windenergieanlagen. Arbeitshilfe im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden.
- FSK Schweiz – Schweizerischer Fachverband für Sand und Kies (2001): Rekultivierungsrichtlinien – Richtlinien für den fachgerechten Umgang mit Böden. Seit 2003 mit dem Verband der Schweizer Transportbetonwerke fusioniert zum Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie.
- GKB & vTI – Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e. V. & Johann Heinrich von Thünen-Institut (2013): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. 3. überarbeitete Auflage. Eigenverlag GKB, Neuenhagen.
- HILGENSTOCK, A., S. BREILMANN, A. GRAßMANN (2011): Arbeitsstreifen – Sicherheit und Bodenschutz. In: IRO – Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg (Hrsg.): Rohrleitungsbau – was wird sein in den nächsten 25 Jahren? Tagungsband zum 25. Oldenburger Rohrleitungsforum 2011. Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg, Band 35, S. 670-677.
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2010): Vorsorgender Bodenschutz bei Baumaßnahmen zur Verbesserung der Gewässerstruktur und der Durchgängigkeit. Reihe Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 10, 2010, Wiesbaden.

- HMUKLV – Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2014): Arbeitshilfe ‚Vorsorgender Bodenschutz bei der Planung, Genehmigung und Errichtung von Windenergieanlagen‘. Wiesbaden.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. - Landschaftsentwicklung und Umweltforschung, 10. Berlin.
- HORN, R. (2004): Bodenverdichtung. In: H.-P. Blume (Hrsg.): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. Landsberg a. Lech: ecomed Verlag, S. 195-219.
- KELLER, T. (2004): Soil compaction and soil tillage – studies in agricultural soil mechanics. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala, ISSN 1401 – 6249.
- LEBERT, M. & W. SCHÄFER (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz 2-2005; S. 42-46.
- LEBERT, M., R. HORN & C. SOMMER (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. Umweltbundesamt, Texte 46 / 04.
- LfL Bayern (2012): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. Mitherausgeber: LfUG Sachsen und weitere.
- LfL Sachsen – Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Heft 15 - 10. Jahrgang 2005.
- LfP – Landesanstalt für Pflanzenbau Baden-Württemberg (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung Nr. 25 Ackerbau, Bodenschutz, Grünland Dezember 2002.
- LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2012): digBK50 – Digitale Bodenkarte 1:50.000 (Blattschnittfrei). <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/26160.htm>
- LLH – Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (2014): Permanente Fahrspuren – Eine Lösung für aktuelle Probleme? Newsletter WRRL, WRRL_07_2014.
- LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein (2014): Leitfaden ‚Bodenschutz auf Linienbaustellen‘.
- LORENZ, M., J. BRUNOTTE (2014): Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Lasteinträge von landwirtschaftlichen Maschinen. Gutachten des Thünen Institut für Agrartechnologie (Entwurf).
- MAGG, M. (2011): Möglichkeiten zur Minimierung der Bodenschädigung auf Baustellen. In: IRO – Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg (Hrsg.): Rohrleitungsbau – was wird sein in den nächsten 25 Jahren? Tagungsband zum 25. Oldenburger Rohrleitungsforum 2011. Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg, Band 35, S. 678-687.
- MARSCHALL, K., H. GÖTZE, H. STAHL (o. J.): Entscheidungshilfe Bodendruck. Excel-Anwendung zur Einschätzung der mechanischen Bodenbelastung durch landwirtschaftliche Maschinen.
- MUNLV – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (2010): Broschüre „Bodenverdichtung vermeiden“, Düsseldorf.
- NISSEN, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland – bodenphysikalischer Ansatz. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Nr. 50.

- PETELKAU, H., M. DANNOWSKI, C.R. GÄTKE & K. SEIDEL (1983): Bodenbearbeitungssteuerung. FZB-Report 1983. Wissenschaftlicher Jahresbericht des Forschungszentrums für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR. Müncheberg 1983.
- PETELKAU, H., K. SEIDEL, C.-R. GÄTKE, M. DANNOWSKI (1988): Prinziplösung für die Steuerung der Bodenbearbeitung. FZB-Report, 86-93.
- PETELKAU, H., K. SEIDEL, M. FRIELINGHAUS (2000): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. Abschlussbericht zum Werkvertrag Nr. 350.214 des Instituts für Bodenlandschaftsforschung des Zentrums für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF, Müncheberg) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
- ReKIS – Regionales Klimainformationssystem Sachsen (2014): Monatliche Klimatische Wasserbilanz von 1993 bis 2013.
- RENGER, M., K. BOHNE, M. FACKLAM, T. HARRACH, W. RIEK, W. SCHÄFER, G. WESSOLEK, S. ZACHARIAS und weitere (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte.
- RENGER, M., K. BOHNE, G. WESSOLEK (2014): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II. Schriftenreihe Bodenökologie & Bodengenese Heft 43. TU Berlin, Standortkunde & Bodenschutz, Institut für Ökologie.
- RÜCKNAGEL, J. (2013): Prüfung, Anpassung und Weiterentwicklung des Moduls zur Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung im Betriebsbilanzierungsmodell REPRO. Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.
- STETTLER, M., T. KELLER, P. WEISSKOPF, M. LAMANDÉ, P. LASSEN, P. SCHJØNNING (2014): Terranimo ® – ein webbasiertes Modell zur Abschätzung des Bodenverdichtungsrisikos. Landtechnik 69(3), 2014, S. 132–138.
- THIERE, J., M. ALTERMANN, I. LIEBEROTH, D. RAU (1991): Zur Beurteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen nach technologisch wirksamen Standortbedingungen. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 35 (3): 171-183.
- UBA – Umweltbundesamt (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden - Regelungen zur Gefahrenabwehr". UBA-Texte 46/2004.
- UBA – Umweltbundesamt (2010): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. UBA-Texte 51/2010.

Checklisten

Vorbemerkungen zur Anwendung der Checklisten

Die nachfolgenden Checklisten können zu folgenden Zwecken eingesetzt werden:

- Erkennen und Beurteilen von schädlichen Bodenverdichtungen oder Gefügeschäden
- Planung von bodenschonenden Bauvorhaben durch Vorhabensträger, Planer und/oder Baufirmen
- Überprüfung von Antragsunterlagen durch Zulassungsbehörden

Die Checklisten können von bodenkundlich versierten Personen ohne weitere Hilfsmittel angewandt werden. Andere Personen sollten die Erläuterungen dieser Arbeitshilfe und nach Bedarf weitergehender bodenkundlicher Veröffentlichungen berücksichtigen, um fehlerhafte Bewertungen zu vermeiden.

Die Checklisten sollten insbesondere dann für einzelne Bauvorhaben herangezogen werden, wenn sehr schutzwürdige und bzw. oder sehr empfindliche Böden betroffen sind, die nach Bauabschluss wieder natürliche Bodenfunktionen übernehmen sollen. Als weiteres Ermessenskriterium, ob eine detaillierte Bewertung vorgenommen werden sollte, ist die Wirkintensität der Bauprozesse auf die betroffenen Böden heranzuziehen; beispielsweise die Dauer der baulichen Einwirkungen, die Anzahl der Befahrungsvorgänge, die Gesamtmasse der schwersten Baumaschine oder der höchste spezifische Bodendruck der eingesetzten Baumaschinen.

Checkliste 1: Erkennen einer schädlichen Bodenverdichtung	60
Checkliste 2: Ermitteln der Befahrbarkeit anhand der aktuellen Bodenfeuchte	61
Checkliste 3: Ermitteln der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden im Baufeld	62
Checkliste 4: Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen in der Bauplanung und -zulassung (Kap. 6, S. 38ff)	63
Checkliste 5: Bodenverdichtungen sanieren, rekultivieren (Kap. 7, S. 48ff)	64

Checkliste 1: Erkennen einer schädlichen Bodenverdichtung

Nr.	Inhalte der Prüfung	Ja/Nein
1.1	Einfache Gefügebeurteilung Spatendiagnose (Kap. 3.1, S. 8ff)	
	<p>Hinweise auf eine schädliche Verdichtung durch ...</p> <p>Zustand der Bodenoberfläche (tiefe Fahrspuren, Aufwuchsschäden, Pfützen etc.)? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>ungünstige/gestörte Gefügemerkmale? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>ungleichmäßige, gestörte Durchwurzelung? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>fauliger Geruch des Bodens? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>graue oder grau-bläuliche Verfärbungen? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Vergleiche Beschreibungen zur Spatendiagnose ab Punkt 3 auf S. 12ff, insbesondere das Bewertungsschema in Tabelle 1 auf S. 15. Es sind immer die gesamten Merkmale zur Beurteilung heranzuziehen. Je mehr Merkmale ungünstige Eigenschaften anzeigen, umso eindeutiger ist eine schädliche Verdichtung nachzuweisen.</i></p>	
1.2	Gefügebewertung nach DIN 19682-10 im Bodenschurf (Kap. 3.2, S. 17, speziell Tabelle 2)	
	<p>Packungsdichte/effektive Lagerungsdichte 1 (Pd1 bzw. Ld1) <input type="checkbox"/></p> <p>Packungsdichte/effektive Lagerungsdichte 2 (Pd2 bzw. Ld2) <input type="checkbox"/></p> <p>Packungsdichte/effektive Lagerungsdichte 3 (Pd3 bzw. Ld3) <input type="checkbox"/></p> <p>Packungsdichte/effektive Lagerungsdichte 4 (Pd4 bzw. Ld4) <input type="checkbox"/></p> <p>Packungsdichte/effektive Lagerungsdichte 5 (Pd5 bzw. Ld5) <input type="checkbox"/></p> <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Vergleiche Fotobeispiele bei den Beschreibungen zur Spatendiagnose ab Punkt 3 auf S. 12ff. Es empfiehlt sich, die gesamte DIN 19682-10 zur Beurteilung heranzuziehen und nicht ausschließlich die kurzen Auszüge, die in dieser Arbeitshilfe wiedergegeben sind.</i></p>	
1.3	Eindringwiderstand (Kap. 3.3, S. 18)	
	<p>Hinweise auf eine schädliche Verdichtung durch ...</p> <p>deutlich erhöhte Eindringwiderstände auf baulich in Anspruch genommenen Flächen im Vergleich zu Flächen außerhalb des Baufeldes? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Bei der Beurteilung ist der Einfluss der Bodenfeuchte (horizontale und vertikale Unterschiede) im Gelände zu berücksichtigen. Weiterhin sind die Erläuterungen in Kap. 3.3 zu beachten.</i></p>	
1.4	Probenahme und Laborwerte (Kap. 3.4, S. 20ff)	
	<p>Hinweise auf eine schädliche Verdichtung durch ...</p> <p>Effektive Lagerungsdichten: Klassen 4 oder 5? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>Luftkapazität kleiner als 5 Vol.-%? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p>gesättigte Wasserleitfähigkeit kleiner als 10 cm je Tag? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Typische Unterschiede der Bodenhorizonte und Bodenarten beachten.</i></p>	

Checkliste 2: Ermitteln der Befahrbarkeit anhand der aktuellen Bodenfeuchte

Nr.	Inhalte der Prüfung	Ja/Nein
2.1	Welche Methode soll zur Beurteilung der Befahrbarkeit während der Bauphase eingesetzt werden (Kap. 4, S. 24 ff)?	
	Einschätzung anhand von Konsistenzgrenzen? Einschätzung mit Hilfe der Wasserspannung und Maschinenmasse (Nomogramm)? <i>Hinweise zur Beurteilung: Neben der Methodik sollte in den Planungs- und Zulassungsunterlagen auch die Zuständigkeit (versiertes Personal), die Frequenz der Überprüfung und die Konsequenzen bei ungünstigen Bodenzuständen (angepasste Vermeidungs-/Minderungsmaßnahmen oder zeitweise Baustopp) zweifelsfrei geregelt sein.</i>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
2.2	Ist die zuständige und fachlich versierte Person für die Beurteilung benannt?	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
2.3	Ist die Frequenz der Messungen während der Bauphasen geklärt und angemessen?	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
2.4	Sind die Konsequenzen bei ungünstigen Bodenzuständen (angepasste Vermeidungs-/Minderungsmaßnahmen oder zeitweise Baustopp) zweifelsfrei geregelt (vgl. Kap. 6.1, S. 38 und Checkliste 4)?	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<i>Hinweise zur Checkliste: Die Fragen 2.2 bis 2.4 gehen über die Ausführungen im Kap. 4 hinaus. Für einen reibungsfreien und zugleich bodenschonenden Bauablauf sollten die Prüffragen positiv und zweifelsfrei beantwortet sein.</i>	

Checkliste 3: Ermitteln der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden im Baufeld

Nr.	Inhalte der Prüfung	Ja/Nein
3.1	Verdichtungsempfindlichkeit nach den Bodenmerkmalen der BK50 (Kap. 5.1, S. 32ff)	
	<p>Liegt das Bauvorhaben innerhalb eines Gebietes, in dem ...</p> <p style="padding-left: 20px;">nur Böden mit sehr geringer bis geringer Verdichtungsempfindlichkeit auftreten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p style="padding-left: 20px;">Böden mit mittlerer Verdichtungsempfindlichkeit auftreten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p style="padding-left: 20px;">Böden mit hoher bis extrem hoher Verdichtungsempfindlichkeit auftreten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Anhand des mittelmaßstäbigen Kartenwerkes BK50 kann nur eine regionale Erstbewertung vorgenommen werden.</i> <i>Bei Bauvorhaben auf hoch bis extrem hoch verdichtungsempfindlichen Böden nach BK50 sind ergänzend großmaßstäbige Bodeninformationen (Kartierungen) zur Planung und Ableitung geeigneter Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen heranzuziehen.</i> <i>In Gebieten mit ausschließlich sehr geringen bis mittleren Verdichtungsempfindlichkeiten kann auf eine Vor-Ort-Erkundung verzichtet werden.</i></p> <p><u>Vor-Ort-Erkundung erforderlich?</u> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p>	
3.2	Verdichtungsempfindlichkeit nach den Bodenmerkmalen einer großmaßstäbigen Bodenkartierung nach Abbildung 15, S. 33	
	<p>Liegt das Bauvorhaben innerhalb von Bodeneinheiten mit ...</p> <p style="padding-left: 20px;">sehr geringen bis geringen Verdichtungsempfindlichkeiten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p style="padding-left: 20px;">mittleren Verdichtungsempfindlichkeiten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p> <p style="padding-left: 20px;">hohen bis extrem hohen Verdichtungsempfindlichkeiten? <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/></p>	
3.3	Bodeneigenschaften und klimatische Wasserbilanz (Kap. 5.2, S. 35f)	
	<p>Liegt das Bauvorhaben innerhalb einer Region mit andauernden Vernässungsphasen? d. h. mehr als 4 Monate nach der Karte „Anzahl der Monate im Jahr mit sehr häufig hohen Bodenfeuchten“.</p>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<p><i>Hinweise zur Checkliste:</i> <i>Bei Bauvorhaben auf Bodeneinheiten mit <u>mittleren bis extrem hohen Verdichtungsempfindlichkeiten</u> sind entsprechend der Verdichtungsempfindlichkeit geeignete Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen zum Schutz des Bodengefüges einzuplanen. Bei <u>sehr geringen bis geringen Verdichtungsempfindlichkeiten</u> kann im Einzelfall begründet auf Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen verzichtet werden, sofern Vernässungsphasen nach 3.3 mit sehr häufig hohen Bodenfeuchten vermieden werden.</i> <i>Während des Baubetriebs sind bei ungeschütztem Boden <u>die aktuellen witterungsabhängigen Bodenfeuchten</u> in Verbindung mit dem Kontaktflächendruck der Baumaschinen Kriterium für die Befahrbarkeit der Böden. Besonders kritisch sind auch die Auftauphasen nach Frosteinwirkungen.</i></p>	

**Checkliste 4: Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen in der Bauplanung und -zulassung
(Kap. 6, S. 38ff)**

Nr.	Inhalte der Prüfung	Ja/Nein
4.1	Betroffenheit der Böden durch das Bauvorhaben (Kap. 6.1, S. 38)?	
	<p>Wird die Betroffenheit des Schutzguts Bodens durch Verdichtungswirkungen entsprechend der Planungsebene fachlich valide und angemessen detailliert dargelegt?</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Wirkfaktoren (Bodenaushub, -transport und -wiederverfüllung bzw. -verwertung; Baustellenverkehr) <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Wirkorte (Aushubbereiche, Baustraßen, Lagerflächen etc.) <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Verdichtungswirkungen entsprechend der Wirkfaktoren und -orte angesichts der geplanten Vermeidungs-/Minderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <p><i>Hinweise zur Beurteilung: Die Beurteilung der Betroffenheit des Schutzguts Boden durch Verdichtungswirkungen erfolgt vergleichbar der Systematik, wie sie in der Umweltprüfung bzw. der Landschaftspflegerischen Begleitplanung üblich ist (vgl. u. a. FELDWISCH [2014] oder FELDWISCH & BORKENHAGEN [2014]).</i></p>	
4.2	Werden geeignete und erforderliche Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen ausreichend konkret genug benannt (vgl. Aufzählungen auf S. 39ff)?	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Baumanagement <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Bauzeitenplanung <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ angepasster Geräteeinsatz <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Baustraßen <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Bodenaushub lagern <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> ■ Bodenaushub verfüllen <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <p><i>Hinweise zur Beurteilung: Unspezifische Beschreibungen wie „Es wird schonend mit Boden umgegangen.“ bieten keine Klarheit, was auf der Baustelle wann, wie und von wem umzusetzen ist. Weiterhin können eventuelle Maßnahmen nicht überwacht bzw. kontrolliert werden. Aus diesem Grund ist eine ausreichend konkrete Beschreibung mit überprüfbaren Kriterien vorzunehmen.</i></p>	
4.3	Sind die in den Planungs- und Zulassungsunterlagen genannten Vermeidungs-, Minderungs- und Rekultivierungsmaßnahmen in der Bau-Leistungsbeschreibung eindeutig beschreiben und mit eigenständigen, bepreisbaren Positionen aufgenommen (vgl. Kap. 6.2)?	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<p><i>Hinweise zur Beurteilung: Mit einem eindeutigen und fachlich umfassenden Bau-Leistungsverzeichnis lassen sich Nachträge vermeiden, die Bauvorhaben zumeist deutlich teurer machen. Weiterhin trägt ein sorgfältig erstelltes Bau-Leistungsverzeichnis zur Verfahrenssicherheit und Konfliktvermeidung bei.</i></p>	
	<p><i>Hinweise zur Checkliste: Die Vermeidung und Minderung von Verdichtungsschäden geht grundsätzlich der nachträglichen Beseitigung derartiger Bodenschäden vor. Dieser Grundsatz muss aus den Planungs- und Zulassungsunterlagen zweifelsfrei hervorgehen.</i></p>	

Checkliste 5: Bodenverdichtungen sanieren, rekultivieren (Kap. 7, S. 48ff)

Nr.	Inhalte der Prüfung	Ja/Nein
5.1	<p>Werden die obligaten Maßnahmen der Rekultivierung einschließlich der Folgebewirtschaftung, die standardmäßig ohne besondere Schädigungen im Baufeld durchgeführt werden müssen, ausreichend konkret genug dargelegt?</p>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Die Rekultivierungsplanung sollte folgende Mindestangaben enthalten:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ notwendige Arbeitsschritte der Rekultivierung wie insbesondere <ul style="list-style-type: none"> ■ Entfernung aller bauseitigen Materialien wie Baustoffe, Baustraßen etc., ■ Verfüllung von Aushubbereichen mit welchem Bodenmaterial, ■ Andecken von Oberboden/Oberflächenwiederherstellung, ■ (Tief-)Lockerung, ■ schonende Folgebewirtschaftung (mit welcher Begrünung und wie lange) ■ vorgesehener Maschineneinsatz (Maschinenliste mit Typ, Laufwerk, Gesamtmasse und spezifischer Kontaktflächendruck als Mindestangaben), ■ dem zeitlichen Ablauf der Rekultivierung mit geplantem kalendarischen Rekultivierungszeitraum ■ Umgang mit Schlechtwetter-Bedingungen während der Rekultivierung (zu hohe Bodenfeuchten – besondere Verdichtungsempfindlichkeiten; wie wird über zeitweisen Rekultivierungsstopp von wem entschieden?) 	
5.2	<p>Im Falle von Bodenschäden: Sind das Ausmaß, die räumliche Verbreitung im Baufeld und die Tiefenlage einer etwaigen Bodenverdichtung geklärt (Kap. 3, S. 8ff und Checkliste 1)?</p>	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>
	<p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Geeignete Sanierungs- bzw. Rekultivierungsmaßnahmen können nur für eindeutig ermittelte Beeinträchtigungen bzw. Schädigungen des Bodengefüges ausgewählt werden. Eine mechanische Tieflockerung sollte nur dann vorgenommen werden, wenn ein Lockerungsbedarf nachgewiesen ist.</i></p>	
5.3	<p>Welche geeignete Sanierungsmaßnahmen für etwaige schädliche Bodenverdichtungen werden detailliert benannt?</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ (Tief-)Lockerungen ■ Auffüllung von Sackungen ■ Bodenaustausch ■ Unterstützende Maßnahmen ■ Dränung ■ Art und Dauer der Folgebewirtschaftung <p><i>Hinweise zur Beurteilung:</i> <i>Schädliche Bodenverdichtungen sind nicht bei jeder Baumaßnahmen vollständig vermeidbar, sondern lediglich minimierbar. Sind schädliche Verdichtungen nicht vermeidbar, dann sind geeignete Sanierungsmaßnahmen darzulegen.</i> <i>Die Eignung ist mit Hilfe folgender Angaben zu beschreiben bzw. zu überprüfen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ vorgesehene Lockerungsgerät und Zugmaschine (Maschinen-/Geräteliste) ■ vorgesehener kalendarischer Zeitraum (außerhalb von klimatischen Vernässungszeiten) ■ Umgang mit Schlechtwetter-Bedingungen während der Sanierung (zu hohe Bodenfeuchten – besondere Verdichtungsempfindlichkeiten; wie wird über zeitweisen Sanierungsstopp von wem entschieden?) ■ Nachvollziehbare Beschreibungen <ul style="list-style-type: none"> ■ zur Auffüllung von Sackungen, ■ zum etwaigen Bodenaustausch unter welchen Bedingungen, ■ zu geplanten unterstützenden Maßnahmen wie Kalkungen oder organische Düngungen, ■ zur Art und Intensität etwaiger Dränmaßnahmen einschließlich wasserrechtlicher Abwägungen sowie ■ zur Art und Dauer der Folgebewirtschaftung (Begründung der vorgesehenen Saatgutmischung, Pflegemaßnahmen und der geplanten Dauer der Folgebewirtschaftung) 	<input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/>

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Dr. agr. Norbert Feldwisch, Dr. rer.nat. Christian Friedrich
Ingenieurbüro Feldwisch
Karl-Philipp-Straße 1, 51429 Bergisch Gladbach
Telefon: + 49 2204 4228-50
Telefax: + 49 2204 4228-51
E-Mail: info@ingenieurbuero-feldwisch.de

Redaktion:

Dr. Arnd Bräunig
LfULG; Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Boden, Altlasten
Halsbrücker Straße 31a | 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 294-2803
Telefax: + 49 3731 294-2099
E-Mail: arnd.braeunig@smul.sachsen.de

Fotos:

siehe Beschriftung;
Fotos ohne Quellenangabe: Ingenieurbüro Feldwisch

Druck:

Saxoprint

Auflage:

500 Exemplare

Redaktionsschluss:

10.04.2016

ISSN:

1867-2868

Bezug:

Diese Druckschrift kann
kostenfrei bezogen werden bei:
Zentraler Broschürenversand
der Sächsischen Staatsregierung
Hammerweg 30, 01127 Dresden
Telefon: + 49 351 2103-672
Telefax: + 49 351 2103-681
E-Mail: publikationen@sachsen.de
www.publikationen.sachsen.de

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.