



BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT
Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt



Wirksamkeit von ÖPUL- Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung

Studie

des

Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt

und des

Instituts für Bodengesundheit und Pflanzenernährung

erstellt für das

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Zahl: BMLFUW-LE.1.3.7/0032-II/5/2009

Wien, im Dezember 2010

MIT UNTERSTÜTZUNG VON BUND, LÄNDERN UND EUROPÄISCHER UNION



Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des ländlichen
Raums: Hier investiert Europa in
die ländlichen Gebiete.



lebensministerium.at

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Allgemeines	7
1.1 Auftrag	7
1.2 Einleitung	7
2 Projektgebiet	13
2.1 Gebietsabgrenzung, Geologie und Klima	13
2.2 Boden und Landnutzung	17
3 Methodik	22
3.1 Kartenbasis	22
3.2 Ausweisung der Verdichtungsgefährdung	24
3.2.1 Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (SM)	24
3.2.2 Potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklasse (SVGK)	24
3.2.3 Vorbelastung	24
3.3 Böden mit Vergleyung	25
3.4 Kriterien für die Auswahl der Standorte zur Probenahme	26
3.5 Bewertung Schadverdichtung bzw. Gefügestand	27
3.6 Standorte aus der Labordatenbank des IKT	27
4 Ergebnisse	28
4.1 Ausweisung der Verdichtungsgefährdung	28
4.1.1 Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (SM)	28
4.1.2 Potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklasse (SVGK)	30
4.1.3 Vorbelastung	33
4.1.4 Böden mit Vergleyung	34
4.2 Bewertung der Probenahmestellen auf Gefügeschäden	36
4.3 Ausgewählte Standorte aus der Labordatenbank IKT	55
4.4 Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen	56
4.5 Sanierung von Bodenverdichtungen durch Tieflockerung	57
5 Literatur	60

Zusammenfassung

Das Projekt „Wirksamkeit von ÖPUL-Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung“ wurde gemeinsam von der Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES) und dem Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW) im Auftrag des BMLFUW durchgeführt. Ziel des Projektes ist eine Bestandsaufnahme des Verdichtungsgrades verdichtungsgefährdeter Ackerstandorte bei langjähriger ÖPUL-Teilnahme an den Maßnahmen Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat sowie die Interpretation der Auswirkungen dieser ÖPUL-Maßnahmen. Als Projektgebiet wurde das Hauptproduktionsgebiet „Alpenvorland“ ausgewählt. Die Verdichtungsgefährdung als Reziprokwert der Vorbelastung wurde für den Unterboden auf der Basis der Daten der Österreichischen Bodenkartierung ermittelt. Die Vorbelastung gibt einen Richtwert für die mechanische Belastbarkeit der Unterböden an. Es wurden insgesamt 30 Betriebe mit Ackernutzung (25 in OÖ, 5 in NÖ) nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- langjähriger Teilnahme an ÖPUL-Maßnahmen (Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat) bei verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung (z.B. Mais- und Rübenanbau)
- Verdichtungsgefährdung auf Basis der Vorbelastung
- Hauptbodentyp

Die Auswahl wurde von der OÖ Wasserschutzberatung und der Landwirtschaftskammer für NÖ wesentlich unterstützt. Von jedem Betrieb wurde ein Ackerstandort beprobt. Trotz der Definition der Auswahlkriterien stellen diese 30 Probenahmestellen statistisch gesehen eine punktweise und zufällige Erhebung dar. Die Verteilung der Bodenart im Tiefenbereich der Pflugsohle der Probenahmestellen entspricht in etwa der Verteilung im Projektgebiet. Einige als pseudovergleyte Lockersediment-Braunerden beschriebene Böden wurden nach Sichtung vor Ort als Pseudogley eingestuft. Deshalb sind in Bezug auf das gesamte Projektgebiet die Lockersediment- Braunerden unterdurchschnittlich und die Pseudogleye überdurchschnittlich vertreten. Die Repräsentativität der Bewirtschaftung wurde nicht geprüft.

Bewertung des Verdichtungsgrades

Gefügeschäden entstehen insbesondere durch zu hohe Radlasten, durch mehrfaches Überrollen derselben Spur oder durch das Furchenrad beim Pflügen, wenn beim Befahren der Boden zu feucht oder zu locker ist. Ein Gefügeschaden ist gegeben, wenn folgende „Schadensgrenzen“ im Unterboden überschritten werden:

Luftkapazität	<5%
gesättigte Wasserdurchlässigkeit	<10 cm·d ⁻¹

Der Gefügeschaden ist ein zu vermeidender Zustand, so dass zu einer Bewertung der Gefügeeigenschaften eine abgestufte Klassifizierung erforderlich ist. Die Beurteilung

des Gefügestandes wurde basierend auf diesen Schadensgrenzen wie folgt festgelegt:

deutlich oberhalb der Schadensgrenze	günstiger Gefügestand
nahe der Schadensgrenze	ungünstiger Gefügestand
überwiegend oder ganz unterhalb der Schadensgrenze	kritischer Gefügestand

Von den insgesamt 30 Probenahmestellen weisen nur 12 einen günstigen Gefügestand im Bereich der Pflugsohle auf. Sieben Standorte haben einen ungünstigen und 11 einen kritischen Gefügestand, also fast 2/3 der untersuchten Probenahmestellen. In der Klasse mit günstigem Gefügestand finden sich alle Hauptbodentypen, aber vor allem die Auböden. In der Klasse ungünstiger Gefügestand dominieren die Pseudogleye. In der Klasse kritischer Gefügestand finden sich wieder sämtliche Hauptbodentypen und alle Böden mit einem Tongehalt über 30% im Bereich Pflugsohle. Ausschlaggebend für die Einstufung in die Klasse „kritischer Gefügestand“ ist meist eine sehr geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit. Langjährige bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse des Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) in Petzenkirchen sind in einer entsprechenden Datenbank zusammengefasst. Diese Standorte sind auf der „ebod“ (www.bodenkarte.at) ersichtlich. Die Auswertung von 34 zufällig gewählten Standorten aus diesem Datensatz ergab, dass ca. 20% der Unterböden als schadverdichtet eingestuft wurden. Der für die Probenahmestellen ermittelte Gefügestand kann nicht generell auf den gesamten Schlag übertragen werden. Schädliche Bodenverdichtungen betreffen häufig nicht die gesamte Fläche eines Schlages, sondern treten zumeist nur in Teilen auf. Für eine gesicherte Erhebung hinsichtlich schädlicher Verdichtungen sind umfangreiche flächenhafte spezifische Gefügestudien notwendig.

Interpretation der Auswirkungen von ÖPUL-Maßnahmen

Die Landwirte wurden hinsichtlich der Bewirtschaftung und der ÖPUL-Maßnahmen befragt. Die Direkt- und Mulchsaat, Begrünung und Minimalbodenbearbeitung, Pflugverzicht und die Anpassung des Reifeninnendrucks wurden als Bewirtschaftungsmaßnahmen, die einen Beitrag zur Gefügesteigerung leisten können, eingestuft. Eine Standardbereifung, Tierhaltung und Wirtschaftsdüngerausbringung wurden als verdichtungsneutrale Maßnahmen bewertet. Konventionelle Pflugarbeit sowie die Rübenenernte mit einem Vollernter wurden als potentiell gefügesteuernde Maßnahmen für den Unterboden eingestuft. Der Vergleich der Bewirtschaftungsmaßnahmen und ÖPUL-Maßnahmen der einzelnen Betriebe mit dem vorgefundenen Gefügestand im Unterboden ergab keinen eindeutigen Zusammenhang. Die Gefügesteuerungen schluffreicher Böden regenerieren sich nur langfristig und in geringem Ausmaß und sind dadurch auch noch nach Jahrzehnten nachweisbar. Abgesehen von temporären Veränderungen wie Quellung und Schrumpfung oder der Anlage einzelner biogener Vertikalporen treten im Unterboden kaum Regenerierungsprozesse auf. Dies kann auch ein Grund sein, warum die derzeitigen Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht mit dem festgestellten Gefügestand korrelieren. Die

Erhebungen zeigen die gesamte Spannweite, von Betrieben mit Gefüge schonenden Bewirtschaftungsmaßnahmen und dennoch kritischem Gefügestand in der Pflugsohle bis hin zu Betrieben mit konventioneller Bewirtschaftung - inklusive Rübenernte mit einem Vollernter - und günstigem Gefügestand. Diese Ergebnisse zeigen auch, dass bei fachgerechter Praxis im Hauptproduktionsgebiet Alpenvorland auf allen Bodentypen eine Bewirtschaftung ohne schädliche Auswirkungen auf das Gefüge möglich ist. Dennoch muss eine Reihe von Maßnahmen zur Vermeidung von Verdichtungen vorgeschlagen werden.

Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen

Der Schwerpunkt einer zukünftigen Tätigkeit ist die Erarbeitung von Empfehlungen zur standort- und betriebsspezifisch optimalen Intensität der Bodenbearbeitung und zur Minimierung der mechanischen Bodenbelastung. Bodengefügeschutz im Unterboden lässt sich auf gefährdeten Flächen nicht allein über eine Absenkung des Reifeninnendrucks gewährleisten. Ein geringer Reifeninnendruck schützt vorrangig den Oberboden. Die Anwendung von bodenphysikalischen Modellen zur Gefügeprognose kann konkrete, boden- und betriebsbezogene Informationen über das Verdichtungsverhalten im Unterboden liefern. Auswertungskarten helfen, den Handlungsbedarf im Bodengefügeschutz einzuschätzen. Sie können eine wichtige Hilfe für die betriebsbezogene Bodenschutzplanung sein. Der Schutz des Bodengefüges gründet auf vorsorgenden, Risiko mindernden Maßnahmen, die aufeinander aufbauen und miteinander verknüpft sind. Zur Vermeidung von Bodenverdichtungen gibt es eine Reihe wirkungsvoller und anwendbarer ackerbaulicher Maßnahmen:

Konservierende Bodenbearbeitung

Eine konservierende Bodenbearbeitung bedingt im Vergleich zur konventionell wendenden Bodenbearbeitung im Oberboden eine höhere Strukturstabilität und weist hinsichtlich mechanischer Belastungen ein erhöhtes Druckkompensationsvermögen und eine verbesserte Reduktion scherender und komprimierender Bodenverformungen mit der Tiefe auf.

ON-LAND Pflügen

Beim konventionellen Pflügen können durch das Fahren des Traktors in der Pflugfurche bei ungünstiger Bodenfeuchte und durch die Schlupfwirkung Schadverdichtungen entstehen. Der Schlupf verursacht eine seitliche Teilchenverschiebung, die zusätzlich zur Erhöhung der Lagerungsdichte und damit eine Zerstörung des Porensystems im Boden bewirkt. Beim ON-LAND Pflug fahren alle Räder auf dem ungepflügten Boden und nicht in der Furche.

Anpassung der Radlasten und des Reifeninnendrucks an den Bodenzustand

Im Kontaktbereich Rad-Boden werden Schäden am Gefüge verursacht und die Makroporen durch Aggregatzerstörung verschlossen. Eine dynamische Belastung mit schweren Radlasten bewirkt eine Zunahme der Spannungseinträge mit verstärkter Tiefenwirkung der Belastungsimpulse und eine erhöhte Gefahr der Unterboden-

verdichtung. Eine Begrenzung der Bodenbelastung auf den Wert der mechanischen Belastbarkeit (Vorbelastung) kann zusätzliche Bodenverdichtungen vermeiden.

Anpassung der Fruchtfolge an die Standorteigenschaften

Spät räumende Früchte mit termingebundenen Erntezeitpunkten (z.B. Rübe) stellen für Standorte, die zur Vernässung neigen (z.B. Pseudogleye, pseudovergleyte Braunerden, Gleye) ein hohes Risiko dar. Durch Anpassen der Fruchtfolge an den jeweiligen Standort kann dieses Risiko wesentlich vermindert werden. Bodenverdichtungen entstehen besonders durch die Schwierigkeit, den Zeitpunkt der Bearbeitung mit dem optimalen Bodenzustand zu kombinieren. Dies betrifft unter anderem Landwirte mit fixen Lieferverträgen. Aufgrund der oft irreparablen Schäden sollte verstärkt auf diese Risiko hingewiesen werden.

Sanierung von Bodenverdichtungen durch Tieflockerung

Bei einer Tieflockerung wird versucht, eine extreme und tiefreichende Verdichtung in Böden zu beseitigen und damit eine sanierende Gefügemelioration herbeizuführen. Sie wird dann angewandt, wenn die Verdichtung eines Bodens so weit vorangeschritten ist, dass eine Auflockerung durch den Pflug nicht mehr möglich ist. Sie führt somit zu einer verminderten Bodendichte und einer verbesserten Durchlässigkeit für Wasser, Luft und Wurzeln. Ein großes Problem der Tieflockerung ist jedoch, dass die Wiederverdichtungsgefahr bei einer anschließenden intensiven Nutzung sehr hoch ist. Eine solche, nach einer Lockerung ausgelöste Verdichtung ist wesentlich stärker als bei einem ungelockerten Boden. Soll eine Tieflockerung gelingen und zu dauerhaften Bodenverbesserungen führen, sind spezielle Kenntnisse und Erfahrungen unerlässlich. Um eine anhaltende Verbesserung des Wasser- und Lufthaushaltes zu erzielen, muss neben einer vorsichtigen Bodenbearbeitung (in den folgenden Jahren Bodenbearbeitung ohne Pflug) der Boden auch durch pflanzenbaulichen Maßnahmen (z.B. konservierende Bodenbearbeitung, Mulchsaat, Minimalbodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Klee, Luzerne) stabilisiert werden.

Handlungsempfehlung

Um zukünftige Gefügeschäden zu vermeiden werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

- Fortführung der oben angeführten Öpul-Maßnahmen,
- Anpassung der Fruchtfolge an die Standortgegebenheiten,
- ON-LAND Pflügen für verdichtungsgefährdete Flächen,
- landesweite Untersuchungen zum Verdichtungsstatus landwirtschaftlich genutzter Böden,
- Ausweisung, Bewertung und Sanierung schadverdichteter Standorte,
- Verfassung einer Broschüre „erkennen und vermeiden von Bodenverdichtungen“, sowie
- spezifische Schulung der Beratung hinsichtlich neuester Erkenntnisse.

1 Allgemeines

1.1 Auftrag

Diese Arbeit ist ein Gemeinschaftsprojekt zwischen der Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES) und dem Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW). Das Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) in Petzenkirchen wurde am 30. Juni 2009 vom BMLFUW, Sektion Wasserwirtschaft per Mail zur Bearbeitung des Projektes beauftragt. Ziel des Projektes ist eine Bestandsaufnahme des Verdichtungsgrades verdichtungsgefährdeter Ackerstandorte bei langjähriger ÖPUL-Teilnahme an den Maßnahmen Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat, sowie die Interpretation der Auswirkungen dieser ÖPUL-Maßnahmen. Als Projektgebiet wurde das Hauptproduktionsgebiet Alpenvorland festgelegt. Für das Projektgebiet wird die Verdichtungsgefährdung der Böden auf Basis der Österreichischen Bodenkartierung (SCHNEIDER et al., 2001) in digitaler Form ermittelt. In Abhängigkeit der Verdichtungsgefährdung werden Ackerflächen mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung ausgewählt und insgesamt an 30 Standorten Proben entnommen. Es werden insgesamt 30 Betriebe mit Ackernutzung nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- langjähriger Teilnahme an ÖPUL-Maßnahmen (Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat) bei verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung (z.B. Mais- und Rübenanbau)
- Verdichtungsgefährdung auf Basis der Vorbelastung
- Hauptbodentyp

Die Einbindung von Flächen mit reduzierter bzw. Minimalbodenbearbeitung ist beabsichtigt.

Eine saisonal bedingte Verdichtung der Ackerkrume, die durch übliche Bodenbearbeitungstechnik wieder behoben werden kann wird hier nicht behandelt. Die Betrachtung der Auswirkungen einer nutzungsbedingten Verdichtung auf die Bodenfunktionen konzentriert sich auf den Bodenbereich unterhalb der regelmäßig bearbeiteten Ackerkrume. Dies ist im Falle der Pflugbewirtschaftung der mineralische Unterbodenhorizont unterhalb des Ap-Horizontes. Im Falle flacher, konservierender Bodenbearbeitung kann das auch die nicht mehr gelockerte, ehemalige Unterkrume sein.

1.2 Einleitung

Die standortgerechte Bodennutzung und Bodenbewirtschaftung ist ein wesentliches Ziel des Boden- und Gewässerschutzes. Sie sind für die Erhaltung der entsprechenden Bodenfunktionen wichtig und durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen und zu forcieren. Die Bodenverdichtung wurde seitens der EU - Kommission (KOM(2002) 179 endgültig, 2002) als eine der 8 Hauptgefährdungen für den Boden genannt. Gemäß

der Definition des Vorschlages zur Bodenrahmenrichtlinie KOM(2006) 232 endgültig, (2006) versteht man unter Verdichtung des Bodens, eine anthropogen verursachte Verschlechterung der Bodenqualität und der Bodenfunktionen durch erhöhte Bodendichte und verminderte Bodenporosität.

Im Ackerbau sind Verdichtungen des Oberbodens und des Unterbodens zu unterscheiden. Die Sackungsverdichtung, die durch Belastung entsteht, wirkt sich besonders in einer Abnahme des Porenvolumens, insbesondere des Volumens der Grobporen aus. Ursachen für die Entstehung von Sackungsverdichtungen sind das Befahren, Bearbeiten und Betreten der Böden. Durch die Bodenverdichtung nimmt die Wasserleitfähigkeit im Boden ab und folglich wird der gesamte Wassertransport gestört (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Die Infiltration von Niederschlagswasser durch den Boden ins Grundwasser ist erschwert, der Oberflächenabfluss erhöht und die Bodenerosion verstärkt.

Verdichtungen in der Krume (Oberboden) werden meist durch die Bodenbearbeitung mechanisch rückgängig gemacht. Unterbodenverdichtungen stellen jedoch ein ernsthaftes Problem dar, eine Lockerung im Unterboden ist sehr aufwändig und meist kaum von Dauer. Aber auch durch die Verlagerung von Bodenteilchen in das Grobporensystem, hervorgerufen durch innere Erosion bzw. Mikroerosion kommt es zu Einlagerungsverdichtung. Im Vergleich zur Sackungsverdichtung nimmt hier das Volumen der Feinporen zu und das Volumengewicht steigt. Durch die Verengung bzw. Verstopfung der Hohlräume sinkt die Wasser- und Luftleitfähigkeit ebenso wie die Durchwurzelungsfähigkeit.

Ob ein Boden normal verdichtet oder schadverdichtet ist, lässt sich nur im Zusammenhang mit seiner Funktion beurteilen. Aus ökologischer Sicht ist ein Boden als schadverdichtet anzusehen, wenn ausgelöst durch technische Überlastung das Porensystem im Boden so weit reduziert ist, dass die Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktionen zeitweilig oder dauerhaft beeinträchtigt werden. Das bedeutet für die Ertragsfähigkeit sowie die Ertragssicherheit und die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen eine erhebliche Beeinträchtigung, da es zu einer Verschlechterung der Versorgung mit Luft und Wasser führt. Die Infiltration von Niederschlagswasser und das Wasserspeichervermögen sind gestört. Außerdem kommt es zu einer drastischen Verschlechterung der Lebensbedingungen für Bodentiere und Mikroorganismen. Zum Problem wird Bodenverdichtung, wenn Pflanzenwurzeln mit eingeschränktem Tiefenwachstum reagieren oder wenn Schadorganismen von den veränderten Umweltbedingungen profitieren. Nicht jede Verdichtung des Bodens wird als ökologisch negativ bewertet, da nicht jede Abnahme des Porenvolumens als schädlich bezeichnet werden kann. Böden neigen bereits wegen ihres Eigengewichts zur Verdichtung. In bestimmten Grenzen ist die Verdichtung tolerierbar und ist teilweise als Rückverfestigung erwünscht, wie z.B. zur Herstellung eines abgesetzten Saatbettes mit Bodenschluss.

Zur Bodenverdichtung im Ackerbau tragen vorwiegend landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge bei. Der vermehrte Einsatz von Großmaschinen, das Befahren von

feuchten Böden, sowie das mit steigender Leistung der Maschinen zunehmende Gewicht sind dabei wesentliche Faktoren. Darüber hinaus kann auch eine zu hohe Besatzdichte an Großvieh auf Weideflächen zu einer unerwünschten Komprimierung des Bodens führen. Bestimmende Faktoren der Bodenverdichtung sind einerseits technische Faktoren wie Kontaktflächendruck, Radlast, Schlupf und Überrollhäufigkeit, andererseits aber auch natürliche Faktoren wie Wassergehalt, Bodenart, Dichte und Bodengefügeform. Mit zunehmender Radlast reicht die Bodenverdichtung in immer größere Tiefe. Mit der Verwendung breiter Reifen wird der Boden nur dann geschont, wenn die Radlast nicht zunimmt. Bei schweren Maschinen bringt die breite Bereifung nicht den gewünschten Effekt.

Die Auswahl der in einem landwirtschaftlichen Betrieb angebauten Früchte ist u. a. abhängig von Klima, Boden, wirtschaftliche Rahmenbedingungen, sowie Umfang und Art der Viehhaltung. Die Früchte unterscheiden sich hinsichtlich der Ansprüche an den Boden, der Auswirkungen auf das Bodengefüge und der Belastungen, die beim Anbau auftreten.

Früchte und deren Anbau können die Bodenstruktur sowohl belasten als auch fördern. Humusabbau (z.B. Getreideanbau mit Strohabfuhr, Zuckerrüben mit Blattabfuhr, Silomais, Kartoffeln), ein erosionsförderndes feines Saatbett (z.B. zu Zuckerrüben, Raps, Mais, Kartoffeln) und mechanische Belastungen bei feuchtem Boden (z.B. Zuckerrüben, Mais, Grünland) können die Bodenstruktur in der Ackerkrume und im Unterboden schädigen. Humusmehrende Früchte (z.B. Körnerleguminosen, Ölfrüchte, Zwischenfrüchte) und Tiefwurzler (z.B. Körnerleguminosen, Luzerne, Lupine) wirken positiv auf die Bodenstruktur und werden deshalb auch nach Meliorationsmaßnahmen zur Stabilisierung des Unterbodens angebaut.

Im Hinblick auf die Belastung der Böden unterscheiden sich die einzelnen Früchte in Bezug auf die Zeitpunkte, zu denen der Boden befahren wird und bezüglich der Massen, die ausgebracht oder geerntet werden. Beim Pflanzenschutz und bei der Düngung gibt es auch Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der Maßnahmen.

Überwinternde Früchte (Winterfrüchte) werden in der Zeit vom Hochsommer (Raps) über den Spätsommer und Frühherbst (z.B. Wintergerste, Winterroggen, Triticale, Winterweizen) bis zum Spätherbst (Winterweizen) ausgesät. Die Bodenbearbeitung zuvor, die Aussaat und auch die Ernte im darauf folgenden Sommer können bei diesen Früchten häufig bei relativ trockenen Bodenverhältnissen durchgeführt werden.

Sommergetreide und Körnerleguminosen werden in der Regel im Monat März ausgesät. Die Grundbodenbearbeitung wird dazu im Herbst, im Winter oder direkt vor der Saat im Frühjahr durchgeführt. Hackfrüchte (z.B. Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln) werden im Zeitraum von Ende März bis Anfang Mai gesät/gepflanzt und vom Sommer (Frühkartoffeln) bis in den Spätherbst (Körpermais, Zuckerrüben) geerntet. Im Vergleich zu Getreide mit 3 t bis 12 t pro ha werden insbesondere bei

Silomais, Zuckerrüben und Kartoffeln mit etwa 40 t bis 70 t pro ha deutlich höhere Erträge erzielt, die auf dem Feld zum Feldrand transportiert werden müssen.

Im Unterschied zur Aussaat und zur Ernte erfolgen Maßnahmen zum Pflanzenschutz und zur Düngung mehrmals zu einer Frucht. Die Häufigkeit der Behandlungen steigt von Mais, Zuckerrüben und Sommergetreide, Raps und Wintergetreide bis hin zu Kartoffel, die zehn oder mehr Behandlungen benötigen. Die Mehrzahl der Behandlungen erfolgen im Zeitraum von April bis Oktober eines Jahres, wenn häufig mit abgetrockneten Böden zu rechnen ist. Bei Winterfrüchten werden auch vorher Behandlungen durchgeführt. Die ausgebrachten Mengen variieren zwischen den Früchten nur in geringem Umfang und betragen beim Pflanzenschutz und bei der mineralischen Düngung je Einzelmaßnahme etwa 100 kg bis 600 kg pro ha. Eine Ausnahme bildet das Kalken, das fruchtunabhängig im 3 bis 4 jährigen Rhythmus mit bis zu 5 t pro ha erfolgt. Diese Düngung mit relativ großen Mengen geschieht im Sommer bei meist trockenen Bodenverhältnissen. Von den Wirtschaftsdüngern Stallmist oder Gülle werden 10 t bis 40 t pro ha ausgebracht. Um der pflanzenbaulichen Forderung nach einer bedarfsgerechten Stickstoffdüngung gerecht zu werden, muss die Gülle auch im zeitigen Frühjahr ausgebracht werden.

Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Lockern, Krümeln, Mischen, Wenden, Rückverfestigen) werden durchgeführt, um günstige Voraussetzungen für das Pflanzenwachstum der Folgefrucht zu schaffen. Für die mechanische Belastung sind die benötigte Zugkraft und Zapfwellenleistung ausschlaggebend, die vor allem von dem stark variierenden spezifischen Bearbeitungswiderstand des Bodens und von gerätetypischen Parametern bestimmt wird. Es wird grob zwischen leicht, mittelschwer und schwer bearbeitbarem Boden unterschieden.

Bei vielen gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten steigt der Zugkraftbedarf mit dem Quadrat der Arbeitsgeschwindigkeit an. Daher ist es günstiger, zur Steigerung der Flächenleistung die Arbeitsbreite anstelle der Arbeitsgeschwindigkeit zu erhöhen. Zudem ergibt sich nur in relativ schmalen Geschwindigkeitsbereichen jeweils ein optimales Arbeitsergebnis. Die benötigte Zugkraft der Arbeitsgeräte und der Fahrwerkswiderstand des Zugfahrzeugs erfordern in Abhängigkeit vom Triebkraftbeiwert (Verhältnis der maximalen Triebkraft und der Radlast, inklusive Eigenlast des Rades) entsprechende Radlasten.

Beim Onland-Pflügen werden die Fahrzeugseiten nahezu gleichmäßig belastet, während beim Fahren in der Furche das Furchenrad wesentlich stärker als das Landrad belastet wird und die Last um die Arbeitstiefe unterhalb der Bodenoberfläche aufgebracht wird.

Zapfwellen getriebene Bodenbearbeitungsgeräte benötigen in der Regel geringere Zugkräfte, häufig bringen sie eine jedoch vernachlässigbare Schubkraft auf. Für den Zapfwellenleistungsbedarf kann eine lineare Abhängigkeit sowohl von der Arbeitstiefe als auch von der Arbeitsgeschwindigkeit angenommen werden. Aus dem

Leistungsbedarf für die Eigenbewegung und dem Zapfwellenleistungsbedarf können Anhaltswerte für das benötigte Fahrzeuggewicht bestimmt werden.

Bei Bestellmaschinen resultieren die benötigten Fahrzeuggewichte meist nicht aus dem Zugkraftbedarf, sondern aus den benötigten Achslasten, um die ausgehobene Maschine sicher bewegen zu können.

Feldversuche zeigen, dass konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zu herkömmlichen Pflugarbeit auf vielen Standorten ohne Ertragseinbußen möglich ist. Mit der nicht wendenden fruchtfolgespezifischen Bodenlockerung (z. B. durch Schwergrubber mit Meißelscharen) wird die Bodenstruktur geschont, und nachfolgende Mulchsaat lässt die Bodenoberfläche schützen. Die Oberflächenbedeckung mindert Verschlammung und Bodenerosion, und die stabilere Bodenstruktur hilft, Schadverdichtungen insbesondere im Unterboden vorzubeugen.

Düngungs- und Pflegemaßnahmen werden vorwiegend während der Vegetationsperiode vorgenommen, in seltenen Fällen auch auf unbestelltem Acker zur Folgefrucht. Die Zeitpunkte orientieren sich an dem Entwicklungszustand der Pflanzen, wobei es vorkommen kann, dass die Befahrbarkeit des Bodens nicht optimal ist.

Das Befahren erfolgt meist in Fahrgassen, die parallel im Abstand der Arbeitsbreite angelegt sind. Die gleiche Fahrspur wird mehrmals überrollt, sowohl im Jahresablauf als auch im Rahmen derselben Maßnahme, z. B. wenn die Transportkapazität für die Schlaglänge nicht ausreicht. Eine Kombination von Düngungs- und Pflegemaßnahmen ist möglich. Das Ausbringen von Düngemitteln ist eine Transport- und Verteilungsaufgabe. Die auf dem Feld bewegten Massen ändern sich während der Arbeit. Die verwendeten Mineraldüngerstreuer werden vorwiegend am Traktor angebaut (über 90%), oder bei hohen Radlasten besser angehängt. Selbstfahrer kommen auch als Lkw mit entsprechenden Aufbauten vorwiegend in der Großflächenlandwirtschaft oder bei Lohnunternehmern zum Einsatz. Die Aufwandmengen belaufen sich auf von 0,1 t/ha (Kopfdüngung) bis 5 t/ha (Kalk). Die Arbeitsbreiten schwanken von 12 m bis 48 m, die Behältervolumina von 600 l bis 3000 l (angebaute Geräte) bzw. bis 12000 l (angehängte Geräte, Selbstfahrer). Daraus ergeben sich beispielhafte Radlasten (Tab. 1).

Tab. 1: Unterbodenbeanspruchung in 40 cm Tiefe (in kPa) und dazugehörige Spannen für Radlasten und Reifeninnendruck für Verfahren typischer, sächsischer Ackerbaubetriebe (nach Stahl et al., 2005)

Verfahren	Spanne der Radlasten (t)	Spanne des Reifen innendruck (kPa)	Spanne des vertikalen Bodendrucks in 40 cm Tiefe (nach Söhne) (kPa)
Grundbodenbearbeitung	2,0 - 4,8	1,0 - 1,7	40 - 100
Pflanzenschutz	0,6 - 4,0	1,5 - 2,5	40 - 150
Mineraldüngung	2,0 - 4,0	2,0 - 3,0	40 - 150
Gülledüngung	3,0 - 8,4	1,0 - 2,5	100 - 220
Erntetransport	1,0 - 6,3	1,0 - 6,8	50 - 180
Mähdrusch	2,0 - 9,0	2,0 - 3,0	100 - 250
Rübenernte	8,0 - 11,0	1,5 - 2,5	180 - 250

Durch schädliche Bodenverdichtungen ergibt sich eine Reihe ökologischer Folgen:

- ✓ Gestörter Wasser- und Lufthaushalt, vermindertes Infiltrationsvermögen, Vernässung
- ✓ Erhöhte Wärmekapazität und -leitfähigkeit (langsamere Erwärmung und Abkühlung)
- ✓ Gestörter Nährstoffhaushalt (eingeschränkte Kationenverfügbarkeit)
- ✓ Erhöhter mechanischer Eindringwiderstand (erhöhter Zugkraftbedarf bei der Bearbeitung)
- ✓ Verändertes Wachstum des Bestandes (Minderertrag, größere Ertragsunsicherheit, Unkrautdruck)
- ✓ Am Hang häufigerer Oberflächenabfluss (Zunahme Hochwasserhäufigkeit, erhöhte Bodenerosion)
- ✓ Behinderung des Wurzelwachstums und Wasserausnutzung (verminderte Transpiration, Stickstoffverluste)
- ✓ Einengung de Lebensraums der meisten Bodentiere (Rückgang Individuenzahl und Artenzahl)
- ✓ Habitat von Mikroorganismen wird geringer und die Lebensbedingungen verändern sich.
- ✓ Verbreitet Sauerstoffmangel, Emission von Lachgas und Methan. (Zunahme anaerober Stoffwechselprozesse, Treibhausgase, globale Erwärmung).

2 Projektgebiet

2.1 Gebietsabgrenzung, Geologie und Klima

Als Projektgebiet wurde der oberösterreichische und niederösterreichische Teil des Hauptproduktionsgebietes Alpenvorland ausgewählt. Das Projektgebiet hat eine Fläche von 7394 km², es erstreckt sich von Norden nach Süden in einer Breite von 10-20 km und von Osten nach Westen mit einer Längsausdehnung 260 km. Die Seehöhe variiert zwischen 200 bis 300 m über Adria. Es umfasst das Flach- und Hügelland zwischen Alpennordrand und Böhmischem Massiv, es reicht von der unteren Salzach bis zum Tullnerfeld und umfasst Teile der Bundesländer Oberösterreich und Niederösterreich (Abb. 1).

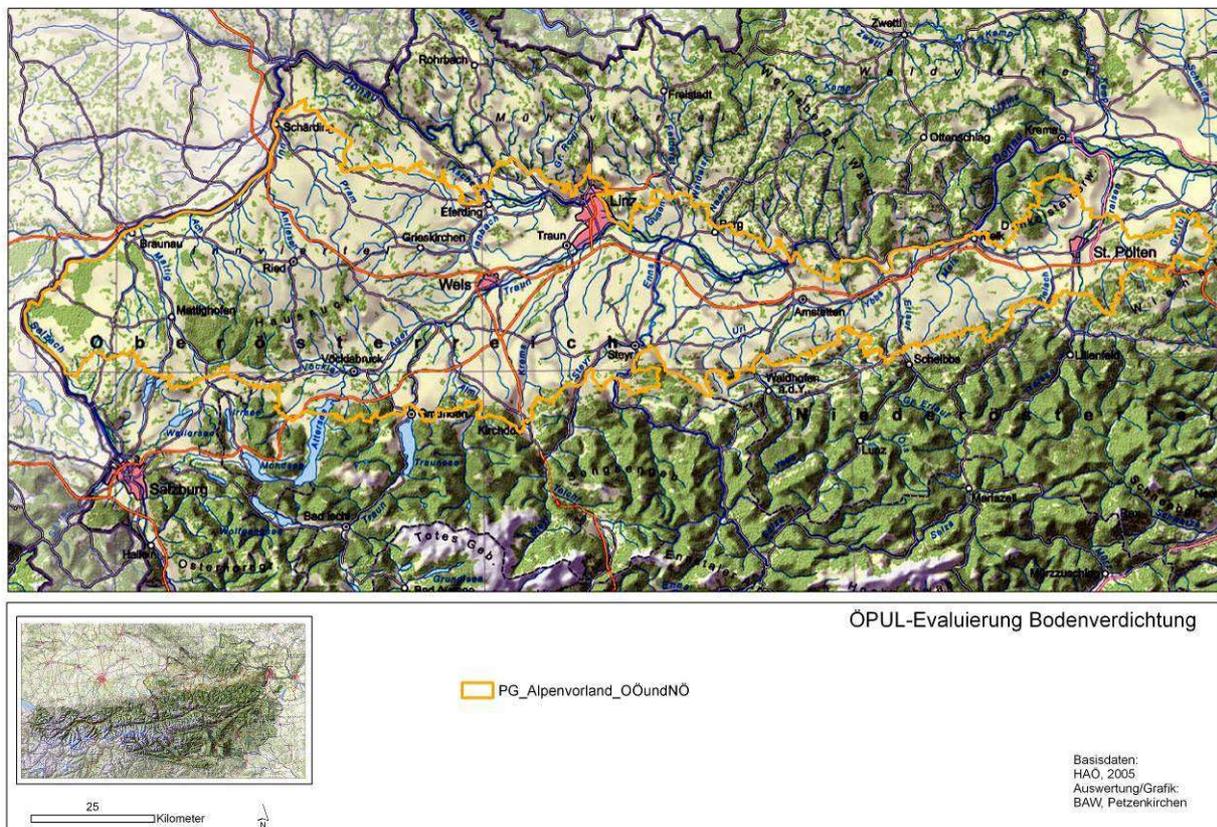


Abb. 1: Projektgebiet Alpenvorland

Geologisch ist das Alpenvorland ein randlicher Meerestrog der Alpen (Molassezone), in dem im Tertiär bis zu 5000 m mächtige Sedimente aus Ton ("Schlier", eine schiefrige, blaugraue Gesteinsart), Sand und Geröll abgelagert wurden. Die nach Norden sanft abfallende Ebene wird von Inn, Traun, Enns, Ybbs, Erlauf und Traisen durchzogen, zwischen denen sich so genannte Schotterplatten erstrecken, deren größte die Traun-Enns-Platte ist (Abb. 1 und 2). Entlang der Flüsse entstanden in der Eiszeit Terrassen.

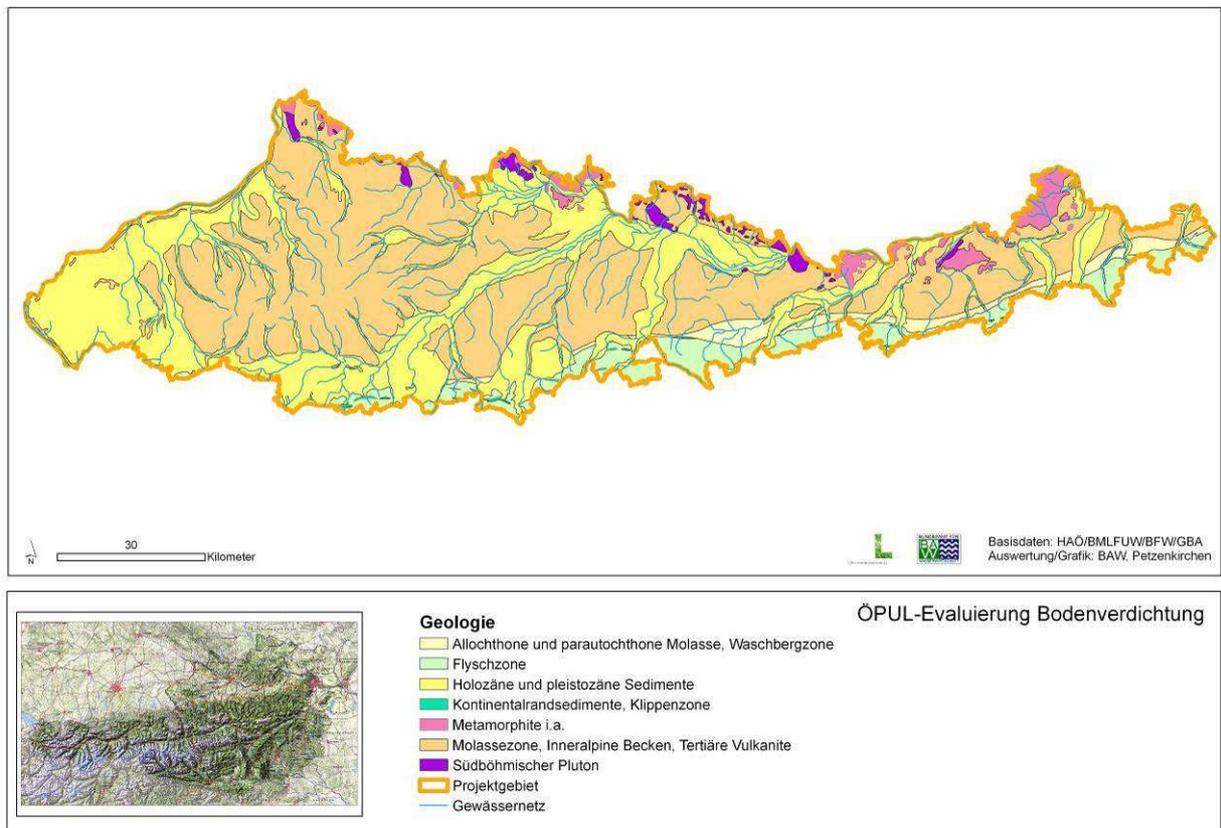


Abb. 2: Geologischer Überblick im Projektgebiet

Im Nordalpinen Bereich vermindert sich von West nach Ost der ozeanische Klimaeinfluss, doch die Staueffekte bleiben vorherrschend. Nur der Herbst zeichnet sich durch eher stabilere Wetterbedingungen aus. Das Niederschlagsregime wird bestimmt durch die Höhe und Entfernung der Gebirgskette, sowie der Orographie der Hauptströmrichtung der Luftmassen (HARLFINGER und KNEES; 1999). Das wärmste Gebiet in Oberösterreich ist das Linzer Becken mit einem Jahresmittel von rund 9°C . Mit Ausnahme der Gebirge liegen die Durchschnittstemperaturen der restlichen Landesteile wie Alpenvorland, Eferdinger Becken und Traun-Enns-Platte im Bereich von 6°C bis 8°C (Jahresmittel von 1961 bis 1990). Im Niederösterreichische Alpenvorland das wärmste Gebiet hat ein Jahresmittel von rund 10°C (Asperhofen). Die Durchschnittstemperaturen der restlichen Landesteile liegen im Bereich von 8°C bis 9°C (Jahresmittel von 1961 bis 1990) (Abb. 3).

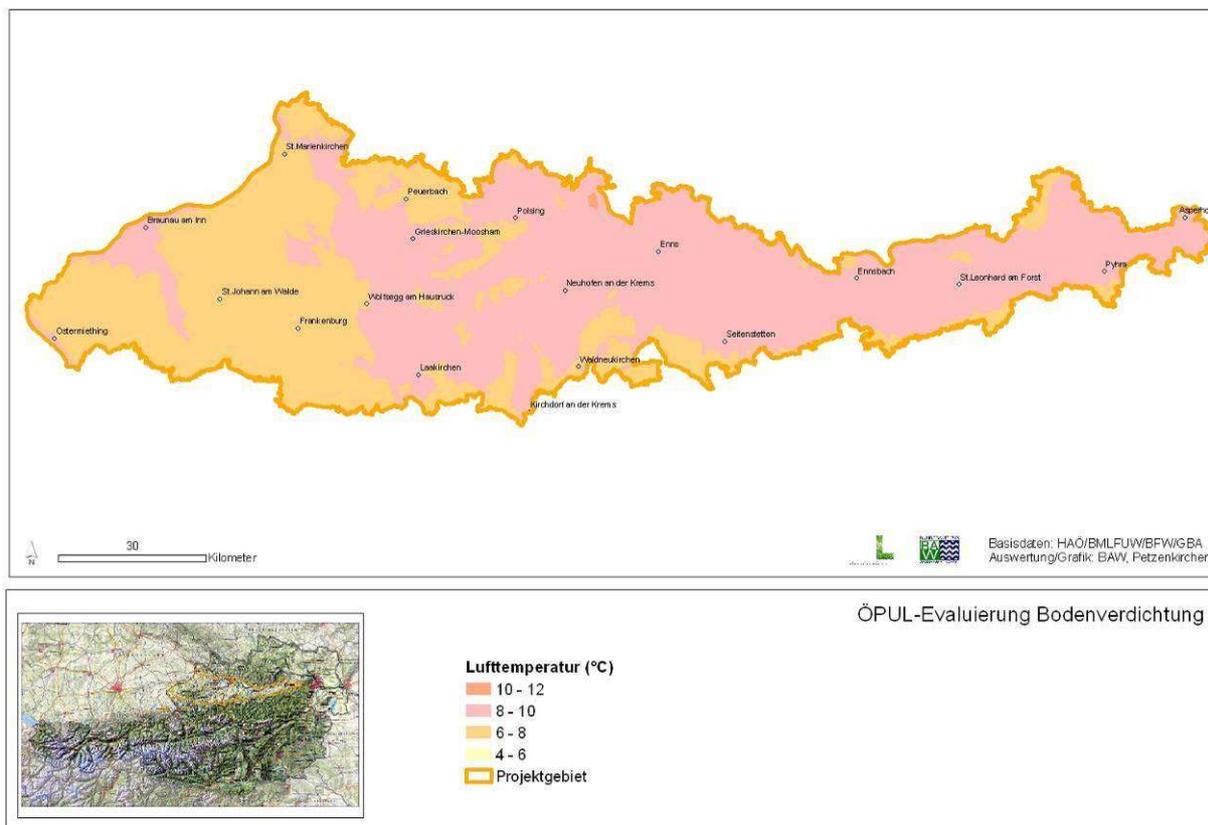


Abb. 3: Jahresmittel der Lufttemperaturen für die Periode 1961-1990 (HAÖ, 2005)

Die niederschlagsärmsten Gebiete von Oberösterreich mit Jahresniederschlagsmengen zwischen 750 mm und 800 mm liegen im östlichen Mühlviertels und im Eferdinger Becken. Die höheren Bergregionen des Mühlviertels und des Sauwaldes, sowie das Alpenvorland werden von der 1000 mm Isohyeten umschlossen. Die niederschlagsärmsten Gebiete von Niederösterreich mit Jahresniederschlagsmengen zwischen 650 mm und 800 mm liegen im östlichen Mostviertel. Die Jahresniederschläge der restlichen Landesteile liegen im Bereich von 800 mm bis 1200 mm (Jahresmittel Niederschlagssumme von 1961 bis 1990) (Abb. 4). Der Verlauf der mittleren monatlichen Niederschläge der Periode 1961-1990 der Stationen im Projektgebiet hat einheitlichen charakteristischen Verlauf, jedoch mit unterschiedlichen Niederschlagshöhen der einzelnen Stationen (Abb. 5). Die meisten Niederschläge fallen in den Sommermonaten Juni bis August, monatlich etwa 12% des Jahresniederschlages. In den Wintermonaten fallen monatlich etwa 7% des Jahresniederschlages. Die niedrigsten Niederschläge fallen in den Monaten Oktober und Februar.

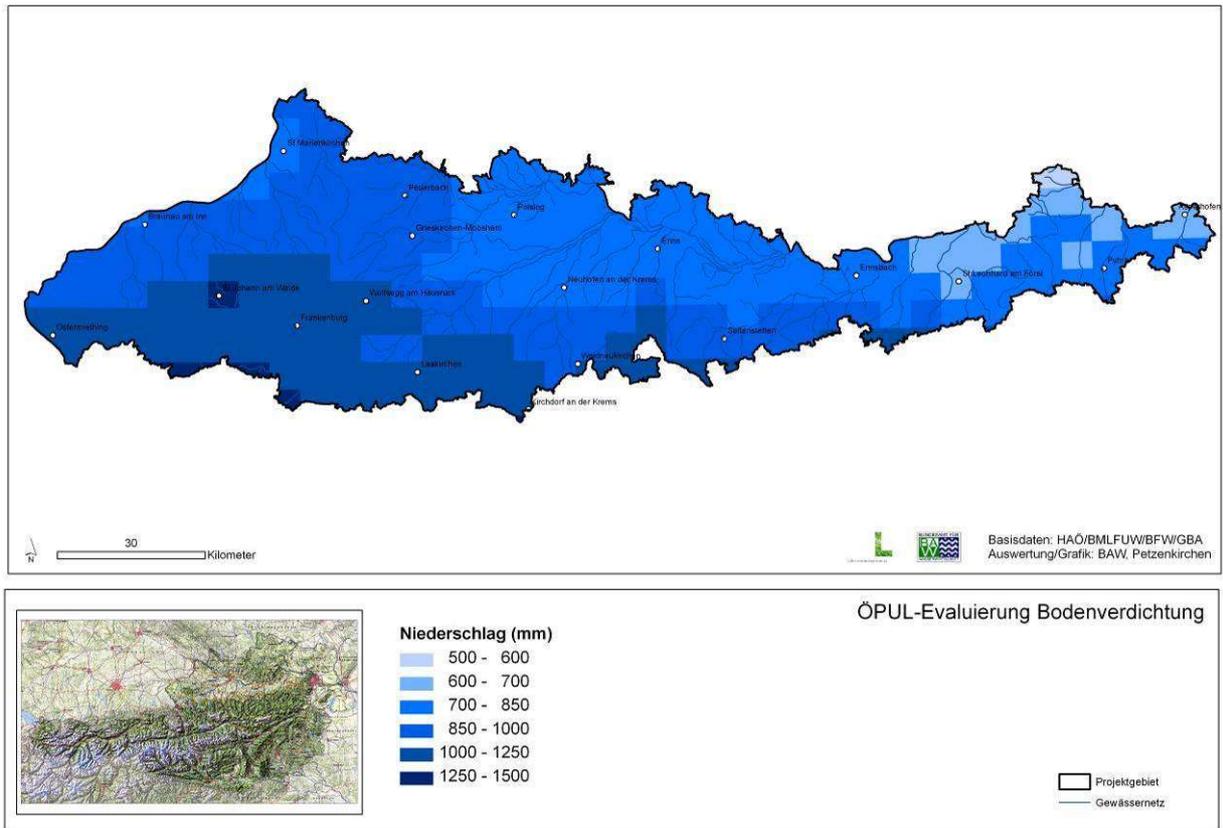


Abb. 4: Jahresmittel der Niederschläge für die Periode 1961-1990 (HAÖ, 2005)

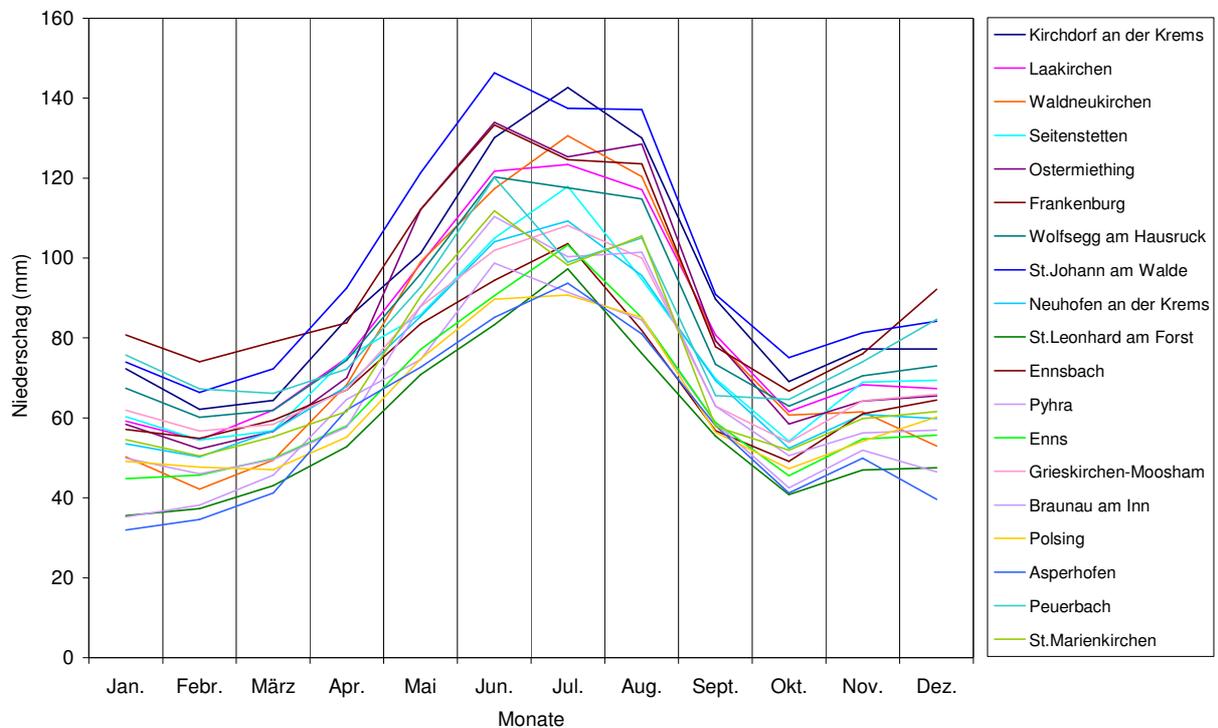


Abb. 5: Monatsmittel der Niederschläge für die Periode 1961-1990 (HAÖ, 2005)

2.2 Boden und Landnutzung

Die Auswertung der Bodentypengruppe der Bodenkartierung für das Projektgebiet zeigen, dass die Braunerden (61%) und die Pseudogleye (18%) dominieren (Abb. 6 und 7). Viele der Braunerden sind auch pseudovergleyt. Der Wechsel von Vernässungs- und Trockenphasen ist für den Wasserhaushalt des Pseudogleys charakteristisch. Mehr als 80% der Böden besitzen eine sehr geringe bis mäßige Durchlässigkeit (Abb. 8 und 9)

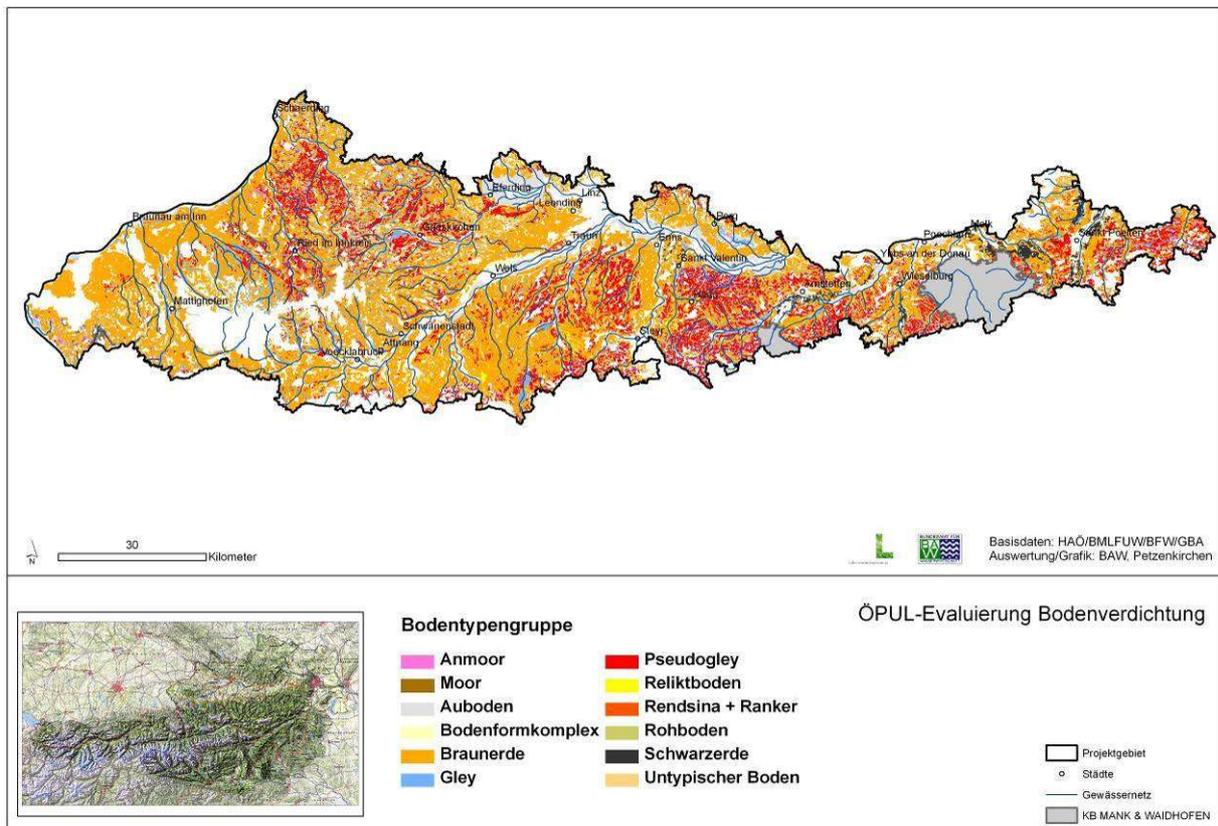


Abb. 6: Verbreitung der Bodentypen im Projektgebiet (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

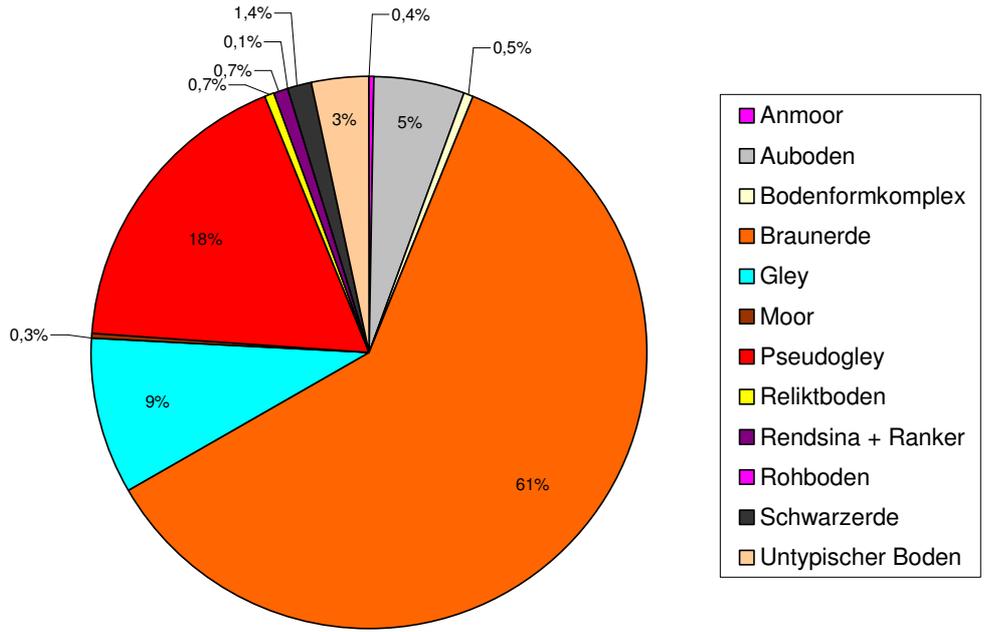


Abb. 7: Anteil der Bodentypen im Projektgebiet (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

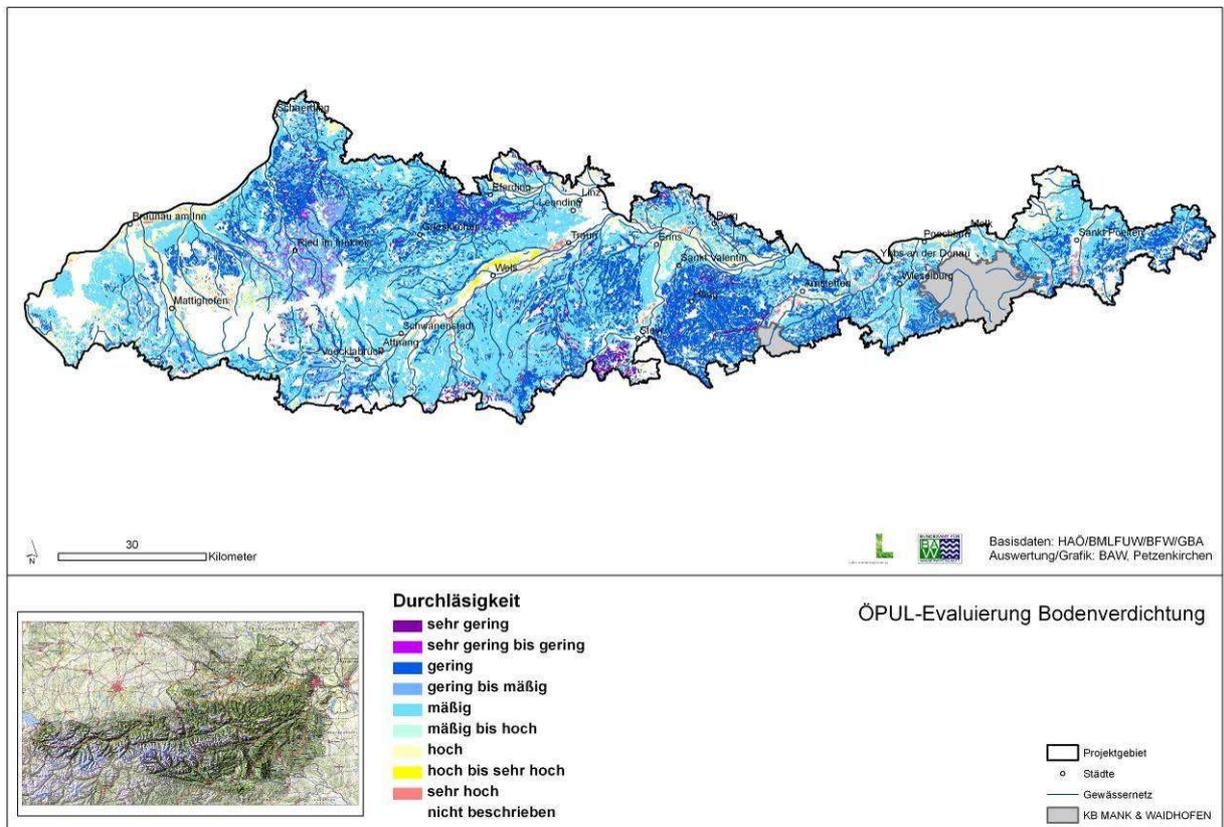


Abb. 8: Verbreitung der Durchlässigkeit (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

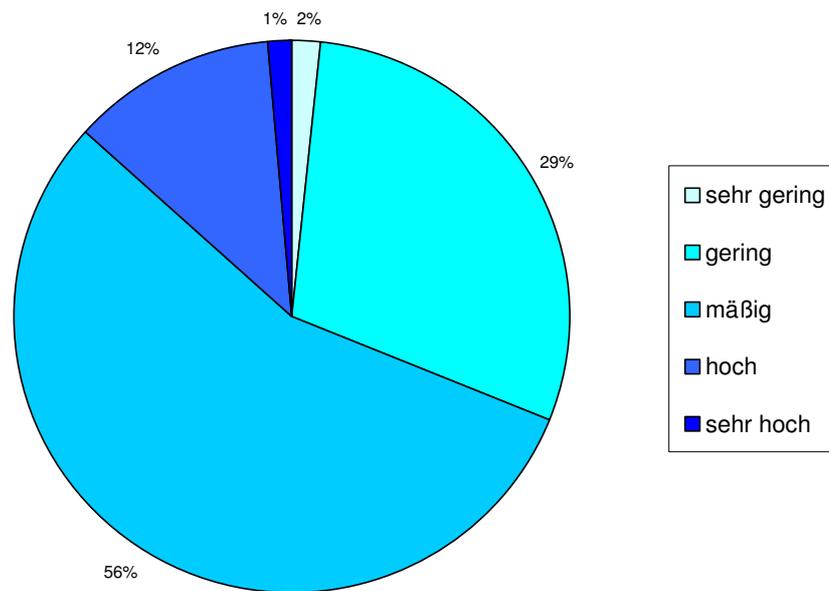


Abb. 9: Verteilung der Durchlässigkeit (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

Der Hauptanteil der Böden sind tiefgründig, nur in den größeren Flusstälern finden sich auch mittel bis seichtgründige Standorte (Abb. 10).

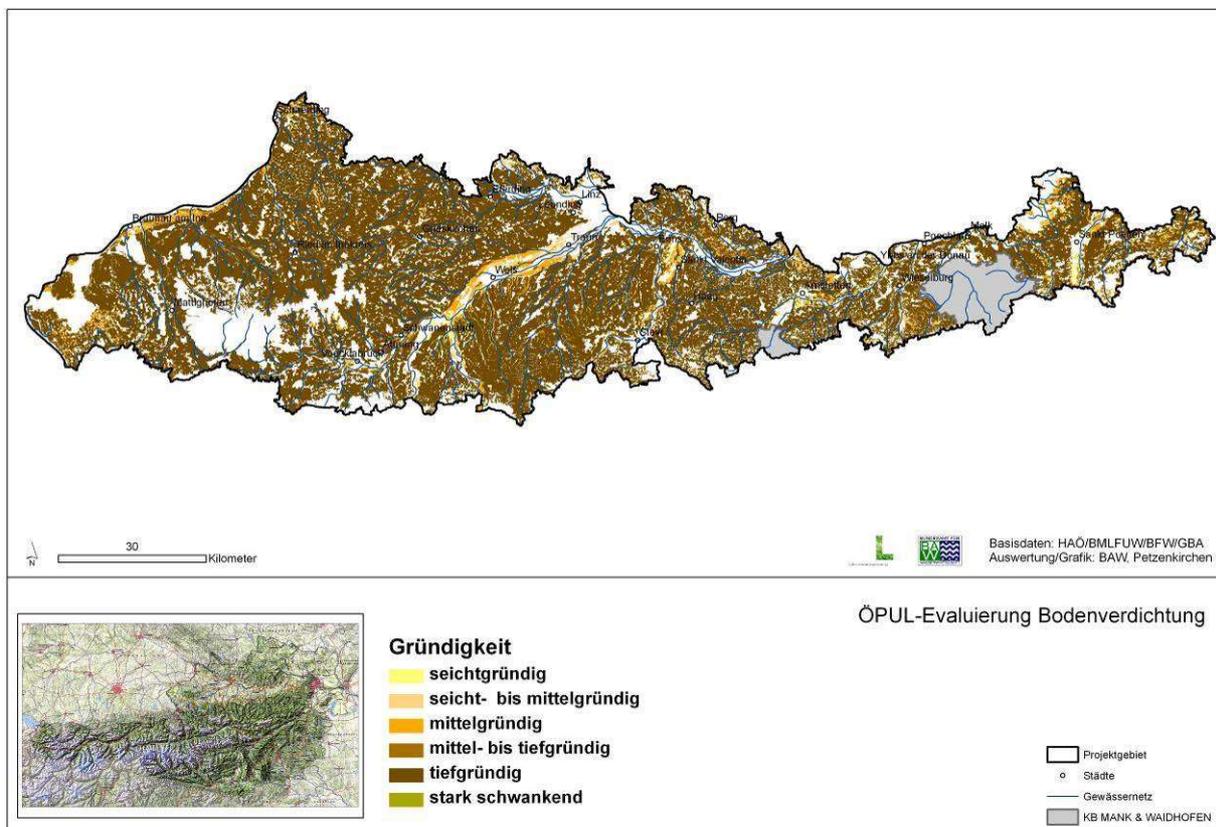


Abb. 10: Verbreitung der Gründigkeit (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

Die Abb. 11 zeigt die Verbreitung der Wasserverhältnisse für die landwirtschaftlich genutzten Böden im Projektgebiet.

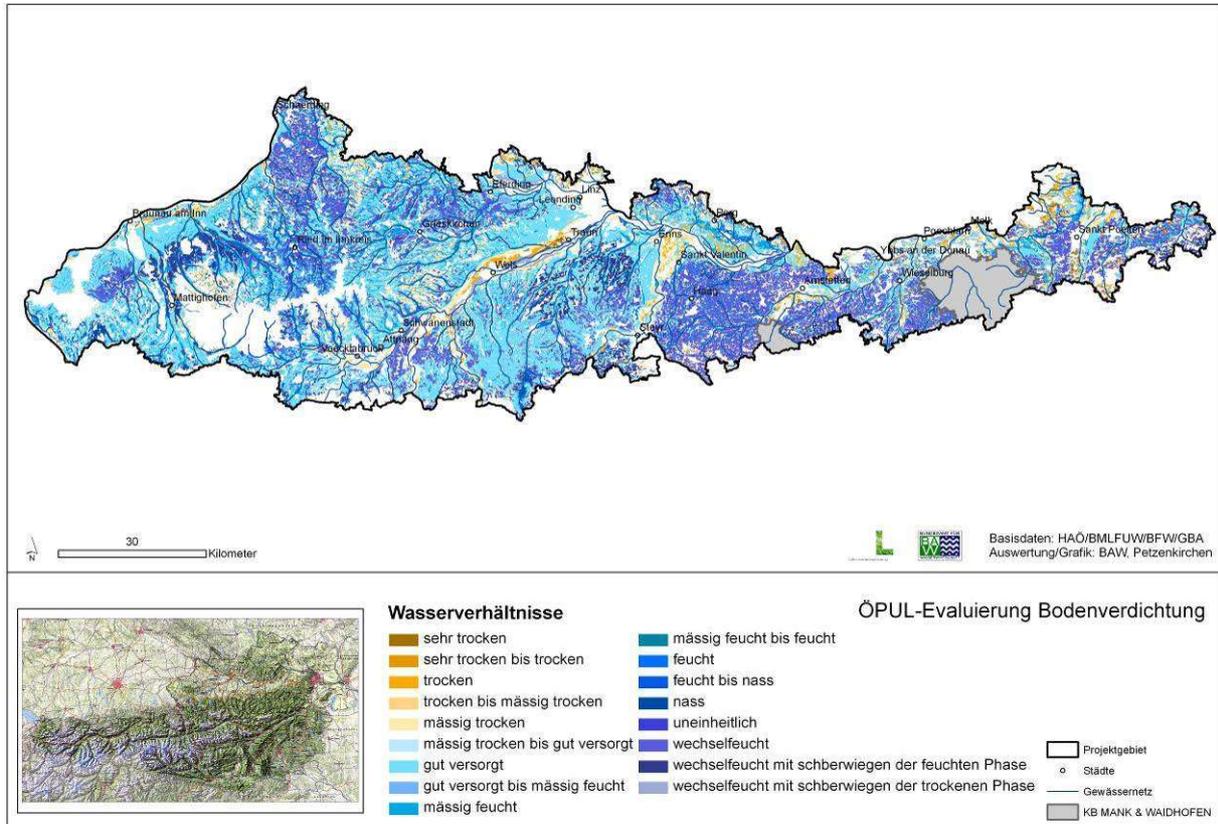


Abb. 11: Verbreitung der Wasserverhältnisse (Quelle: BFW Österreichische Bodenkartierung)

Den wesentlichen Teil des Projektgebietes (über 70%) nehmen Böden mit mittlerer nutzbarer Feldkapazität ein, etwa ein siebentel sind Böden mit geringer und hoher nutzbarer Feldkapazität (Abb. 12 und 13).

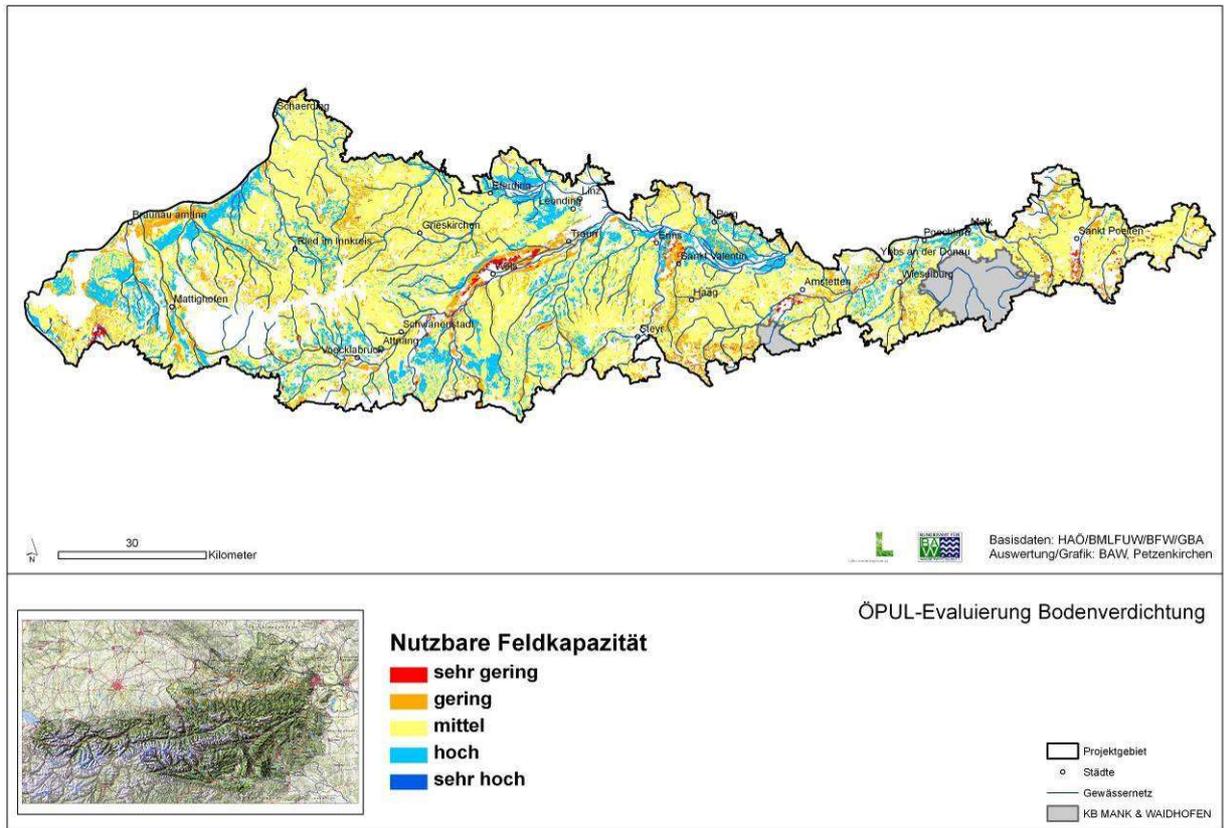


Abb. 12: Verbreitung der nutzbaren Feldkapazität im 1m Profil (MURER et. al, 2004)

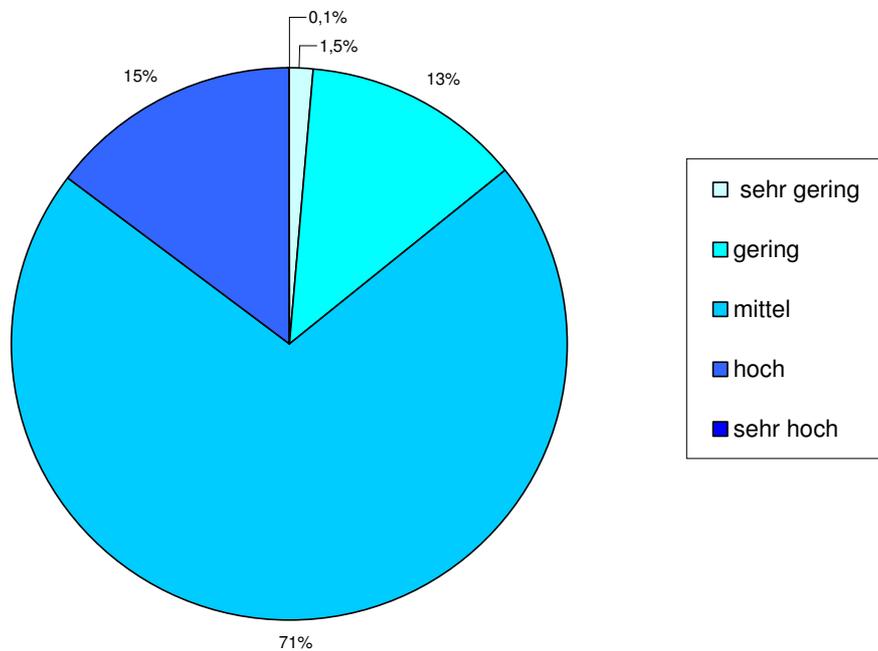


Abb. 13: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität im 1m Profil (MURER et. al, 2004)

Im Projektgebiet unterteilt sich die landwirtschaftliche Nutzfläche in zwei Drittel Ackerland und in ein Drittel Grünland (Abb. 14).

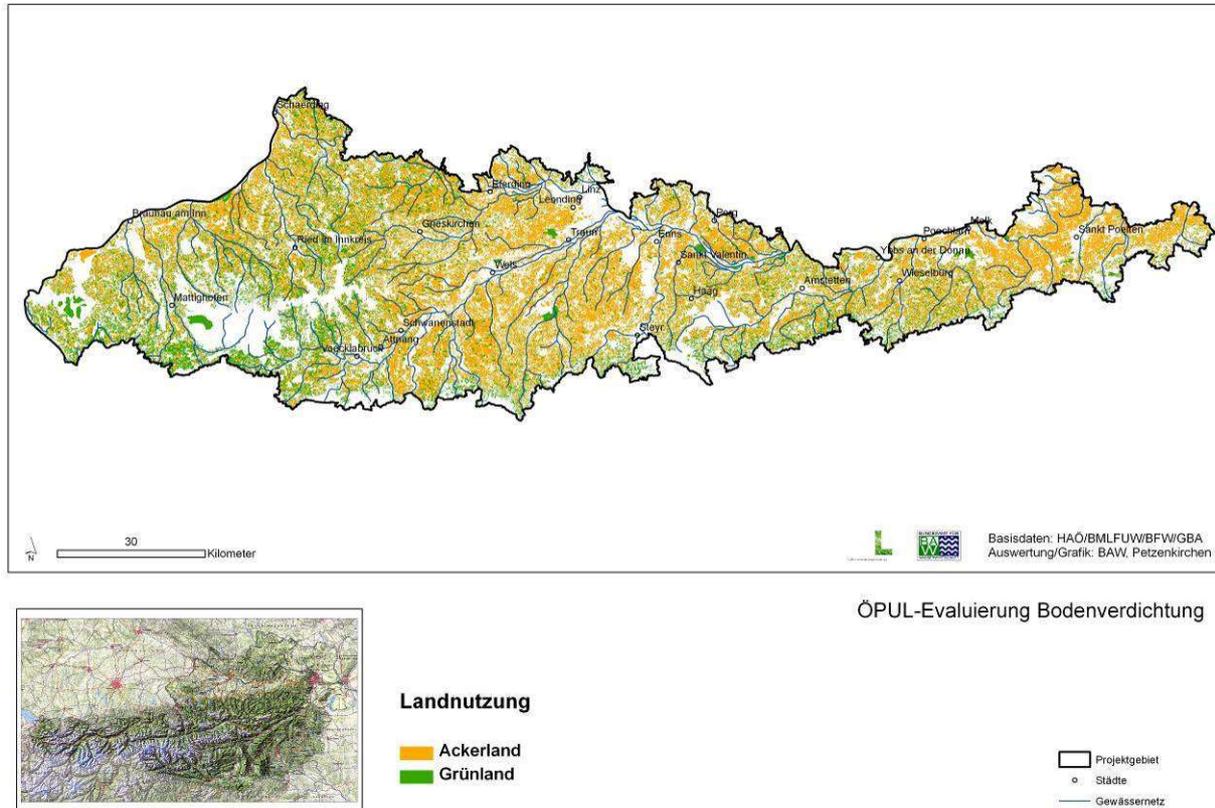


Abb. 14: Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche (DKM und INVEKOS, 2007)

3 Methodik

3.1 Kartenbasis

Zur Ermittlung und Beurteilung der Bodenverdichtung der landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die Österreichische Bodenkartierung 1:25000 in digitaler Form verwendet (www.bodenkarte.at). Das Projektgebiet umfasst insgesamt 54 Kartierungsbereiche. Die einzelnen Kartierungsbereiche sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden und wurden ab 1970 in analoger Form veröffentlicht. Aus der beiliegenden Übersichtskarte kann für jeden einzelnen Kartierungsbereich das entsprechende Erscheinungsjahr für das Projektgebiet ermittelt werden (Abb. 15). Die Daten der Kartierungsbereiche Waidhofen an der Ybbs und Mank sind noch nicht verfügbar.

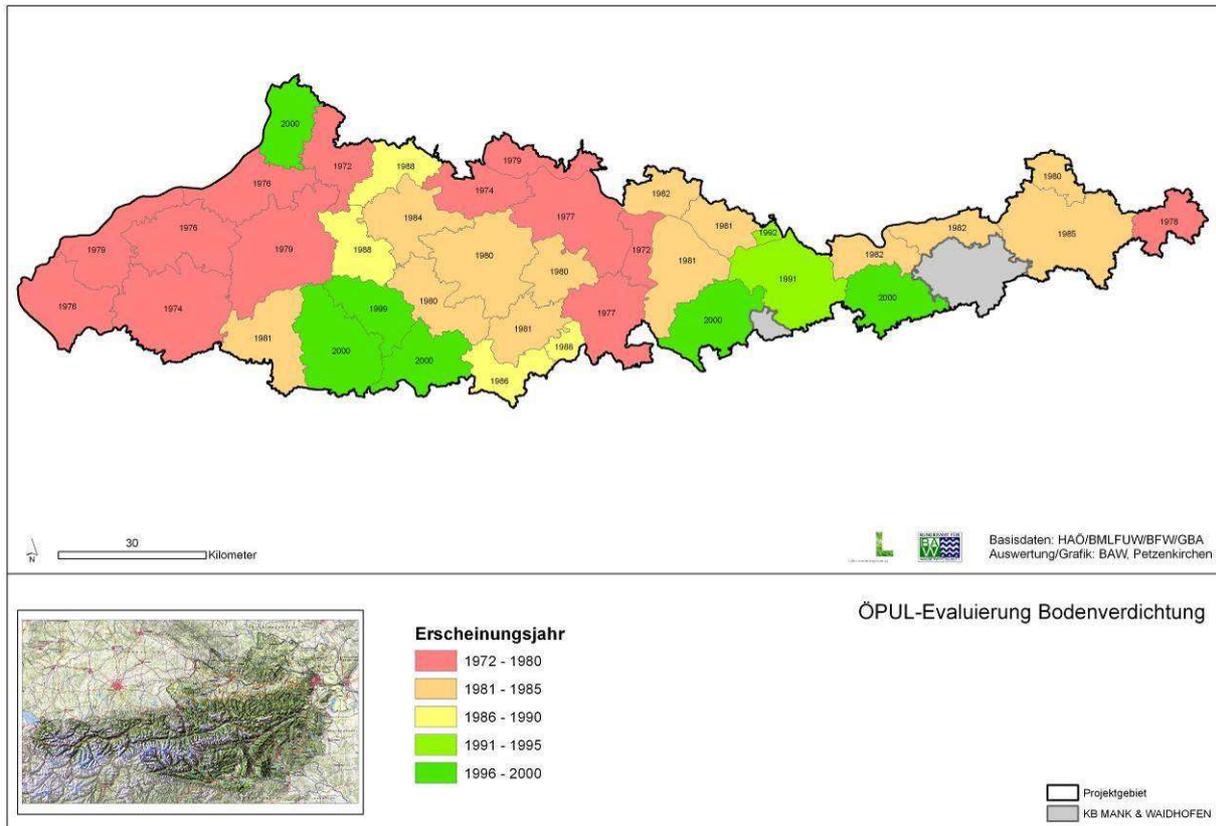


Abb.15: Kartierungsbereiche der Österreichischen Bodenkartierung nach ihrem Erscheinungsjahr

Bei der Untersuchung und Bewertung der landwirtschaftlich genutzten Böden auf Verdichtungsempfindlichkeit konnten nicht alle Kartierungsbereiche berücksichtigt werden. Es fehlen die, bereits oben angeführten, noch nicht fertig gestellten Kartierungsbereiche Mank und Waidhofen an der Ybbs.

Es wurden die Informationen der Österreichischen Bodenkartierung aus der Beschreibung der einzelnen Bodenformen, sowie auch die Analyseergebnisse der Profilstellen der zugehörigen Bodenformen verwendet. Die Bodenform stellt die kleinste flächenhaft ausgewiesene Einheit dar. Bei Unterteilung der Bodenform in mehrere Bodenformenkomplexe (Prozentmäßige Anteile an der Bodenform) wurden die Daten des größten Bodenformenkomplexes verwendet. Nicht bewertet wurden die Bodentypengruppen Moore und Anmoore. Die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen können sich seit der Kartierung verändert haben. Besonders große Auswirkungen auf die Veränderung des Gefüges bewirkt die Umstellung von Grünland auf Ackerland, sowie Meliorationsmaßnahmen zur Regelung des Wasserhaushaltes.

3.2 Ausweisung der Verdichtungsgefährdung

Zur Bewertung landwirtschaftlich genutzter Böden auf ihre Verdichtungsempfindlichkeit können im Wesentlichen drei verschiedene Modelle herangezogen werden (LEBERT, 2008). Bei der Bodenverdichtung im Acker muss zwischen der Verdichtung im Oberboden und Unterboden unterschieden werden. Für den Oberboden - unter Oberboden versteht man die oberste, ständig bearbeitete, Bodenschicht, welche in eine Tiefe von ca. 15 cm bis 35 cm reicht - eignen sich die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit nach der NIBIS-Datenbank (MÜLLER, 2004) sowie die Ermittlung von Schadverdichtungsgefährdungsklassen nach PETELKAU et al. (2000) und für den Unterboden die Methode der mechanischen Vorbelastung nach HORN et al. (1991).

3.2.1 Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (SM)

Die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit nach der NIBIS-Datenbank (MÜLLER, 2004) wird über die Bodenart und weitere fünf bodenkundliche Eigenschaften abgeleitet, insbesondere werden die bodenkundlichen Feuchtestufen berücksichtigt. Die Unterteilung der Verdichtungsempfindlichkeit nach der Bodenart entspricht der klassischen bodenkundlichen Vorstellung. Ebenso die Berücksichtigung der Feuchtestufen - z.B. dass bei Böden mit hohen Grundwasserständen oder Böden mit Stauhorizonten ein höheres Verdichtungsrisiko gegeben ist - ist ein plausibler Ansatz. Für die Bewertung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit wurde der oberste Horizont der Bodenkartierung herangezogen.

3.2.2 Potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklasse (SVGK)

Die potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklasse wird nur über die Bodenart abgeleitet. Bei diesem Modell ist die Verdichtungsempfindlichkeit speziell auf die Bewertung des Oberbodens von Ackerböden unter dem Aspekt des Ertrages ausgerichtet. Es werden vor allem die Sandböden als sehr stark verdichtungsgefährdet eingestuft, wogegen die Tonböden die größte mechanische Belastung erfahren dürfen. Die Bewertung der Druckbelastung durch landwirtschaftliche Arbeitsverfahren orientiert sich beim SVGK-Modell an der Einhaltung einer definierten Lagerungsdichte. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Parameter Lagerungsdichte beim Prognosemodell SVGK als Indikator für eine Bodenschadverdichtung herangezogen wird (CRAMER, 2006).

3.2.3 Vorbelastung

Unter dem Begriff der „Vorbelastung“ versteht man den Widerstand, den der Boden einem Zusammendrücken entgegen bringt. Abhängig ist diese Stabilität des Bodens

von der Anzahl der Korn zu Korn Kontakte, der Kornstabilität sowie dem Scherwiderstand an den Kornkontakten.

Die Vorbelastung wird in der obersten Bodenschicht - in der Bearbeitungsschicht - sehr stark von den jahreszeitlichen Schwankungen beeinflusst und wird dort primär durch den Grad der Absetzung des Gefüges bestimmt. Im Unterboden stellt sich die Vorbelastung als eine kontinuierliche Gefügeeigenschaft heraus, welche dort durch pedogene und geogene Prozesse gebildet wird. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die Vorbelastung durchaus auch durch anthropogene Einflüsse, beispielsweise durch Verdichtung, herbeigeführt werden kann.

Die Vorbelastung stellt einen Druck in kPa dar, der direkt dem Druck, verursacht durch die Auflast eines Fahrzeuges, gegenübergestellt werden kann. Aus diesem Grund kann die Vorbelastung auch als Maß für die mechanische Belastbarkeit des Bodens bei Befahrung beschrieben werden. Das Reziprok der Vorbelastung stellt hingegen die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit dar.

Die Vorbelastung bewertet die Empfindlichkeit des Bodens für zusätzliche Verdichtung und beschreibt die Effekte der Gefügebildung, verursacht durch geogene und pedogene Prozesse, auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Ackerbodens. Sie ist daher vorrangig im Unterboden, unterhalb der bearbeiteten Bodenschicht, einsetzbar. Die Verwendung der Methode der mechanischen Vorbelastung als Kenngröße zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit landwirtschaftlich genutzter Böden wird von HORN et al. (1991) und LEBERT (2008) empfohlen.

Zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit wurden die Inhalte der Österreichischen Bodenkartierung für die Tiefe von 30 cm bis 35 cm herangezogen. Die Ermittlung der mechanischen Vorbelastung und der damit verbundenen Verdichtungsempfindlichkeit der landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs erfolgte nach der DIN V 19688 (2001).

3.3 Böden mit Vergleyung

Unter dem Begriff Vergleyung werden Veränderungen des Bodens, verursacht durch den Einfluss von stehendem oder nur sehr langsam fließendem Wasser (es herrscht Wasserstau), verstanden. Dabei ist zwischen den Auswirkungen des hochstehenden Grundwassers und jenen des nur langsam absinkenden Tagwassers zu unterscheiden. Das gestaute Grundwasser bewirkt Vergleyung, das gestaute Tagwasser Pseudovergleyung.

Aufgrund des Wasserstauens bildet sich ein Mangel an Bodenluft, was wiederum zur Folge hat, dass sich das Bodenmaterial verfärbt - es entstehen Verfählungen und Fleckung. Da vergleyte beziehungsweise pseudovergleyte Standorte besonders anfällig gegenüber Bodenverdichtung sind - daher wird in diesem Bericht auch kurz darauf eingegangen - ist es notwendig, durch kulturtechnische Maßnahmen (zum

Beispiel Dränung, Lockerung) Abhilfe zu schaffen, um keine Mindererträge zu erwirtschaften.

Ursache für die Entstehung des Pseudogleys ist der wiederkehrende Wechsel von Staunässe (=Tagwasser) und Austrocknung. Die Staunässe tritt nahe der Oberfläche auf und verschwindet daher auch meist während der Vegetationsperiode wieder. Zurückgeführt wird das Stauwasser auf den örtlich eindringenden Niederschlag, dessen Versickerung in der obersten Bodenschicht stark gehemmt ist. Daher tritt Staunässe vor allem in Böden mit hohem Ton- oder Schluffanteil auf oder auch in Böden, die wasserundurchlässige Schichten oder Horizonte im Untergrund oder Unterboden aufweisen (Stauhorizonte). Der Unterschied zwischen Pseudogleyen und pseudovergleyten Böden liegt darin, dass bei pseudovergleyten Böden diese Stauhorizonte nicht so stark ausgeprägt sind, wie bei den typischen Pseudogleyen. Pseudogleye entstehen zumeist in Regionen mit hohen Niederschlägen und niederen Temperaturen während der frostfreien Zeit. Im Winter und Frühling sind diese Böden annähernd wassergesättigt, so dass auch die Grobporen über längere Zeiträume fast vollständig mit Wasser gefüllt sind. Während des Sommers und auch im Herbst trocknen sie häufig aus und verhärten sehr stark. Dieser Wechsel zwischen Austrocknung und Vernässung ist ein wesentliches Merkmal des Pseudogleys - im Gegensatz dazu steht der Gley unter ständigem Wassereinfluss - und führt zu Reduktions- und Oxidationsvorgängen und weiters auch zur Verlagerung von Eisen- und Manganverbindungen.

Aufgrund der Staunässe entstehen in den Pseudogleyen charakteristische Fleckungen und Marmorierungen, wobei der oberste Teil der Staunässehorizonte, aufgrund von intensiven Fe-, Mn- und Al-Verlagerungen, stark gebleicht sein kann. Stark ausgeprägte Pseudogleye sind durchaus gute Standorte für Wiesen und Wälder. Weniger gut eignen sie sich als Ackerstandorte, wobei sich hier Pseudogleye mit langer Feuchtphase wesentlich günstiger verhalten als Pseudogleye mit langer Nass- oder Trockenphase. Für die landwirtschaftliche Nutzungen geeignet sind Pseudogleye meist erst nach einer Dränung beziehungsweise Regulierung des Wasserhaushaltes und Lockerung (Tieflockerung, Tiefpflügen).

3.4 Kriterien für die Auswahl der Standorte zur Probenahme

In Abhängigkeit der Verdichtungsgefährdung wurden im Projektgebiet potentiell geeignete Ackerflächen mit verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung wie Mais- und Rübenanbau und langjähriger Teilnahme an ÖPUL-Maßnahmen (Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat) festgelegt. Es wurde versucht auch die wesentlichen vorkommenden Bodentypen wie Lockersediment-Braunerden und Pseudogleye, sowie auch Auböden einzubeziehen.

Über die Landwirtschaftskammer für Niederösterreich wurde für den NÖ- Teil des Projektgebietes und der Wasserschutzberatung für den Oö-Teil des Projektgebietes der Kontakt zu den Landwirten mit geeigneten Standorten hergestellt. Den

Landwirten wurde zugesagt die Ergebnisse der Untersuchungen anonym zu verarbeiten und keiner anderen Institution weiterzugeben. Als Gegenleistung für die Probenahme werden dem jeweiligen Landwirt die Untersuchungsergebnisse mit einer Bewertung auf Bodenverdichtung zur Verfügung gestellt.

3.5 Bewertung Schadverdichtung bzw. Gefügestand

Für die Bewertung der Gefügeeigenschaften können die Schadenskriterien nach LEBERT et al., (2004) dienen. Wenn gleichzeitig bei einem Bodengefüge im Unterboden eine Luftkapazität kleiner 5% und eine gesättigte Wasserdurchlässigkeit von kleiner 10 cm/Tag vorliegen und zusätzlich die Feldgefügeansprache nach einer der drei aufgeführten Verfahren die Klassen 4 oder 5 ausweist, dann kann man nach bodenkundlichen Maßstäben vom Vorliegen eines Gefügeschadens ausgehen (Tab. 2).

Tab. 2: Bewertungskriterien für den Einzelfall nach LEBERT et al., (2004)

<i>Kennwert</i>	<i>Bewertung</i>
Feldgefügeansprache (KA4, 1994; DIN V 19688, 2001; Harrach, 1984, Dietz und Weigelt, 1997)	Stufe 4 und 5
Grobporen bzw. Luftkapazität	<5%
gesättigte Wasserdurchlässigkeit	<10 cm·d ⁻¹

Der Gefügeschaden ist ein zu vermeidender Zustand, so dass zu einer Bewertung der Gefügeeigenschaften eine abgestufte Klassifizierung erforderlich ist, deren schlechteste Einstufung der Gefügeschaden ist. Die Beurteilung des Gefügestandes wurde anhand der Schadensgrenzen (Tab. 2) wie folgt festgelegt:

weit weg von den Schadensgrenzen	günstiger Gefügestand
nahe der Schadensgrenzen	ungünstiger Gefügestand
überwiegend oder ganz im Schadensbereich	kritischer Gefügestand

3.6 Standorte aus der Labordatenbank des IKT

In der Datenbank des Institutes für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt sind umfassende bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse enthalten. Die Lage aller Probenahmestellen und die untersuchten Parameter können im Internet unter www.bodenkarte.at eingesehen werden. Aus diesem Datensatz wurden Standorte mit bodenphysikalischen Analysen (gesättigte Wasserdurchlässigkeit und Porengrößenverteilung) der landwirtschaftlich genutzten Flächen ausgewählt. Die Kennwerte der gesättigten Wasserdurchlässigkeit und Luftkapazität der einzelnen Unterboden-

horizonte wurden auf Bodenschadverdichtung mit den Schwellenwerten der Tab. 2 verglichen und bewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Ausweisung der Verdichtungsgefährdung

Die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden wurde für die drei wesentlichen Methoden, die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit, die potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklassen und mechanische Vorbelastung ausgeführt. Zusätzlich wurde noch die optimale Lagerungsdichte für den Oberboden bewertet und die Verbreitung der Pseudogleye und pseudovergleyten Böden ausgewiesen. Die Bewertungen im Projektgebiet konnten in 52 von 54 Kartierungsbereichen der Österreichischen Bodenkartierung durchgeführt werden. Für zwei Kartierungsbereiche (Mank und Waidhofen/Ybbs) fehlten die notwendigen Datengrundlagen.

4.1.1 Potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (SM)

Die Verbreitung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit und deren flächenhafter Anteil für die landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden für das Projektgebiet sind in Abb. 16 und 17 ersichtlich.

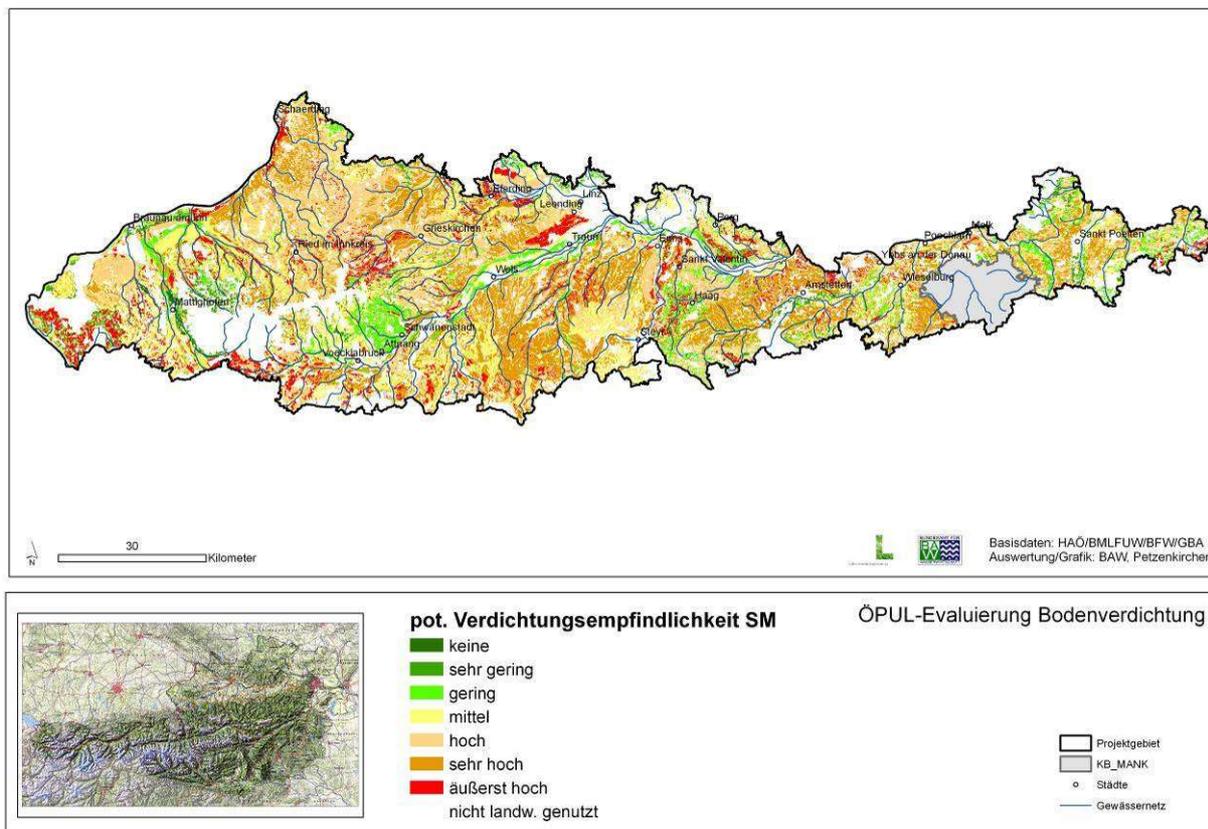


Abb. 16: Verteilung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit (SM) der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

Etwa ein Zehntel der bewerteten Fläche besitzt eine sehr hohe potentielle Verdichtungsempfindlichkeit, über die Hälfte der Fläche eine mittlere bis hohe und etwa ein Drittel der Fläche eine mittlere bis sehr geringe potentielle Verdichtungsempfindlichkeit (Abb. 16). Die Unterteilung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit nach der Bodenart entspricht der klassischen bodenkundlichen Vorstellung. Ebenso die Berücksichtigung der Feuchtestufe - z.B. dass bei Böden mit hohen Grundwasserständen oder Böden mit Stauhorizonten ein höheres Verdichtungsrisiko gegeben ist.

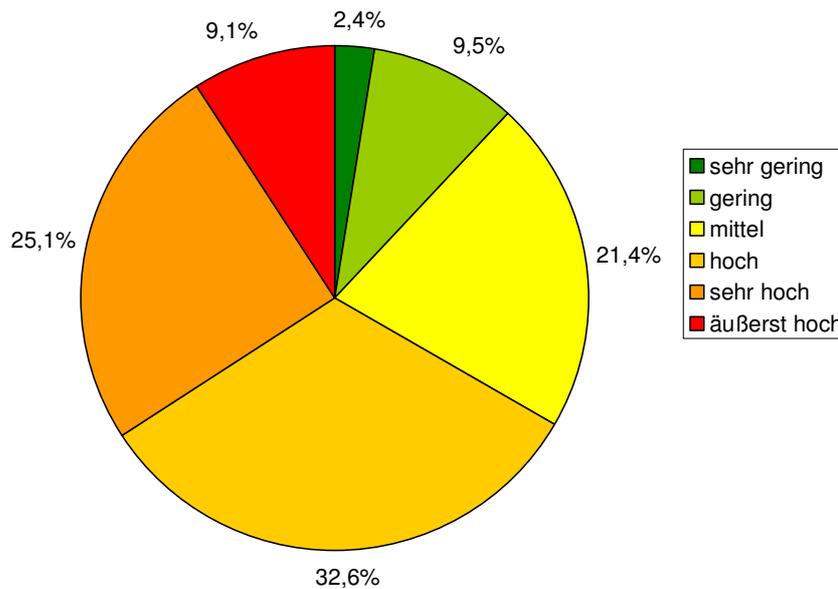


Abb. 17: Flächenanteil der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

4.1.2 Potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklasse (SVGK)

In Abb. 18 ist die Verbreitung der potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklassen der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Oberböden dargestellt. Etwa zwei Drittel der landwirtschaftlichen Nutzfläche fällt in die Klasse erhebliche potentielle Schadverdichtung und ein Drittel in die Klassen gering und mäßig. Die Klasse stark bis sehr starke potentielle Schadverdichtungsgefährdung tritt nur auf einer Fläche von kleiner 2% auf (Abb. 19).

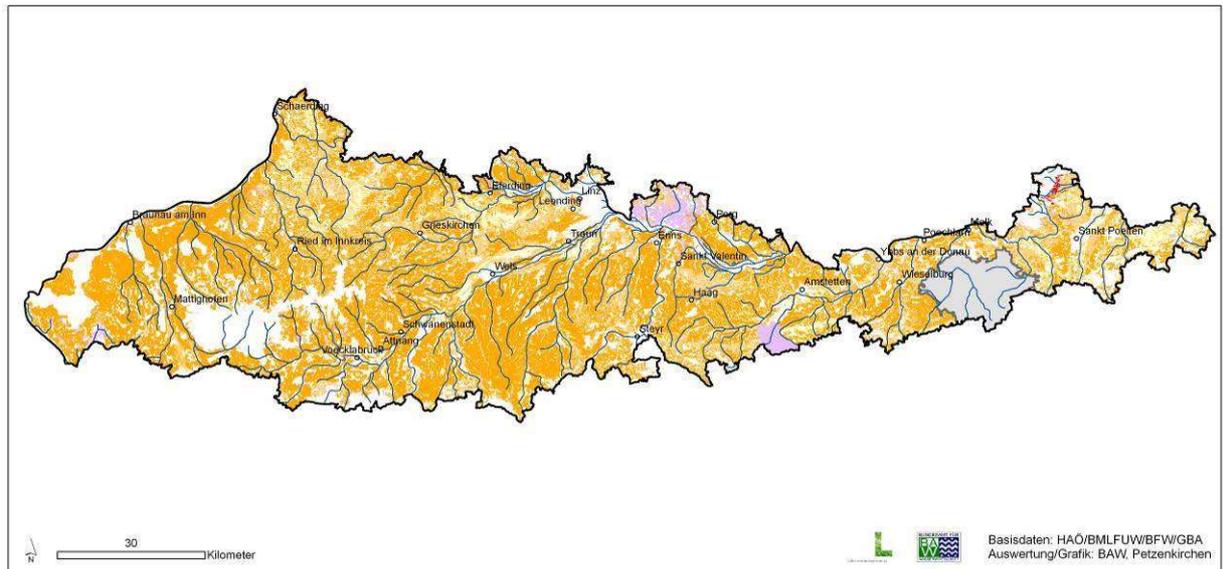


Abb. 18: Verbreitung der potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklasse des Oberbodens der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

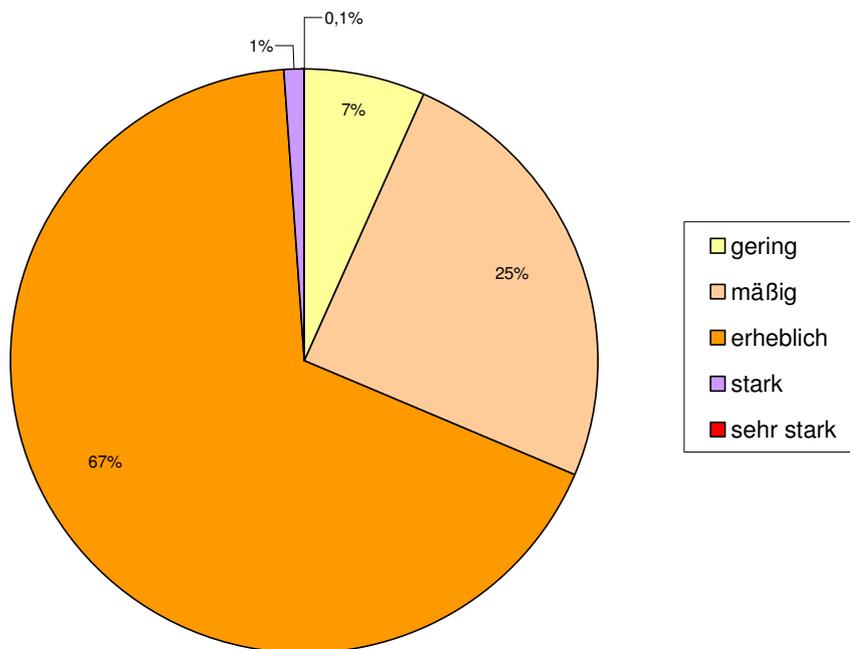


Abb. 19: Flächenanteil der potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklasse des Oberbodens für die landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

Der Parameter optimale Lagerungsdichte dient beim Prognosemodell potentielle Schadverdichtungsgefährdungsklassen als Indikator für eine Bodenschadverdichtung. Die substratspezifischen Lagerungsdichtegrenzwerte nach PETELKAU (1988) sind für den Bereich des Oberbodens und der unteren Zone des Oberbodens unterschiedlich bestimmt worden. Für den Oberboden ist dies anhand gefügeabhängiger Ertragskurven erfolgt, d.h. der optimale Lagerungsdichtebereich ist hier definiert als Lagerungsdichtewert $\pm 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ bei dem sich der Maximalertrag als Funktion der Lagerungsdichte ergibt. Grundlage für die Bestimmung der optimalen Lagerungsverhältnisse im Bereich der Oberbodenbasis sind nicht Ertragsmessungen sondern Kompressionstests an gesiebttem Bodenmaterial. Der Boden wird im Labor so lange verdichtet, dass die pneumatische Luftleitfähigkeit nach dem Verfahren nach GÄTKE (1989) noch über $1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ liegt.

Bei Überschreiten der optimalen Lagerungsdichte um $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ werden die Böden als „mäßig schadverdichtet“, bei Überschreiten um $0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ als „erheblich schadverdichtet“ beziehungsweise bei $0,20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ als „stark schadverdichtet“ eingestuft. Die Abb. 20 zeigt eine Übersicht über die optimale Lagerungsdichte des Oberbodens für die landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet.

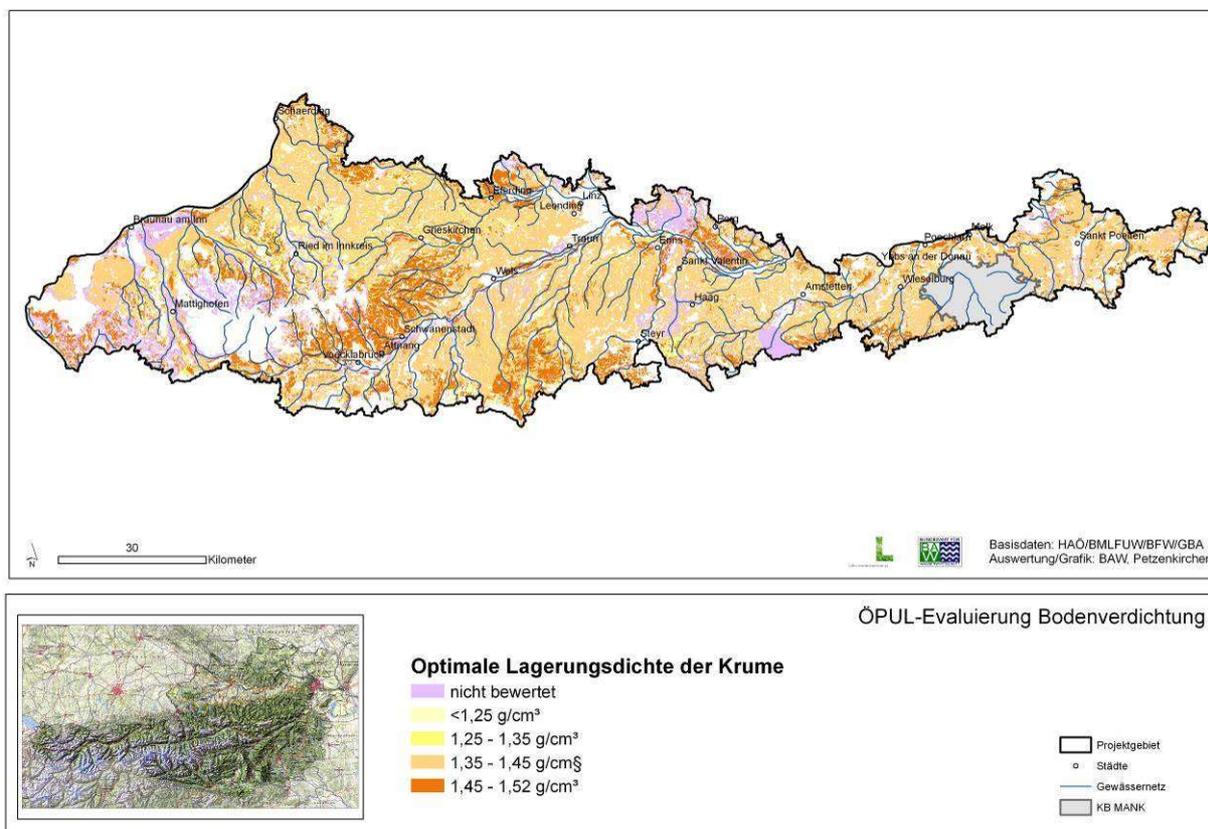


Abb. 20: Optimale Lagerungsdichte der Krume nach PETELKAU (1988)

4.1.3 Vorbelastung

Die mechanische Vorbelastung im Unterboden und deren Flächenverteilung für die landwirtschaftliche Nutzfläche der mineralischen Böden im Projektgebiet zeigt Abb. 21.

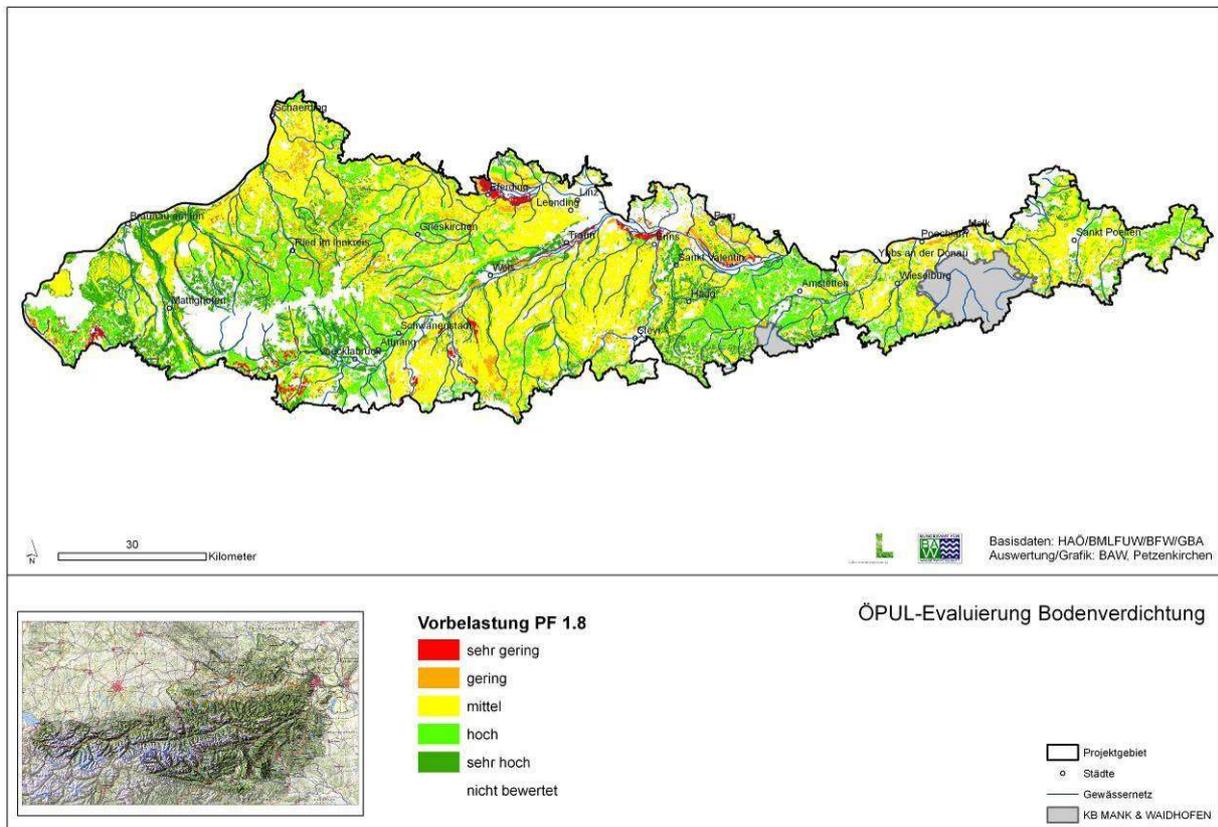


Abb. 21: Verbreitung der potentiellen Vorbelastung im Unterboden der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

Etwas mehr als die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Böden Österreichs besitzt eine sehr hohe bis hohe Vorbelastung, etwa ein Drittel der Fläche besitzt eine mittlere Vorbelastung und ca. 10 % der Ackerflächen eine geringe Vorbelastung. Nur zweieinhalb Prozent der in der Landwirtschaft genutzten Böden haben eine sehr geringe potentielle Vorbelastung (Abb. 22).

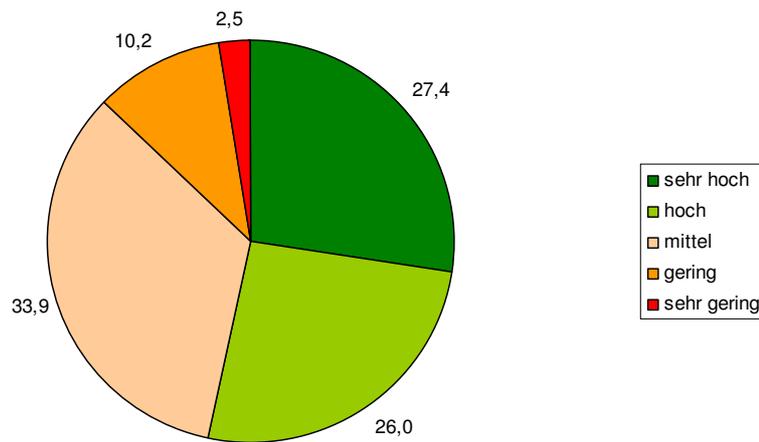


Abb. 22: Flächenanteil der potentiellen Vorbelastung im Unterboden für die landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

Die drei beschriebenen Ansätze (potentielle Verdichtungsempfindlichkeit, potentiellen Schadverdichtungsgefährdungsklassen und Vorbelastung) zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit sind für verschiedene Fragestellungen erarbeitet worden und sind deshalb nicht beliebig austauschbar. Daher müssen sich die Anwender vor der Auswahl des geeigneten Verfahrens über die Ziele des Vorhabens im Klaren sein. Die wesentlichen Ziele des Bodenschutzes, nämlich das Vermeiden von Verdichtungen, sowie das Verhindern von Schäden durch Verdichtungen lassen sich vorwiegend über die Kenngröße Vorbelastung realisieren. Diese kann direkt in Prognosemodelle für die Verdichtung des Unterbodens - in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik - eingebaut werden, welche somit als Grundlage für die landwirtschaftliche Beratung dienen können (MURER, 2009).

4.1.4 Böden mit Vergleyung

Die Verbreitung der pseudovergleyten Böden ist in der Abb. 23 ersichtlich. Im Projektgebiet sind ca. ein Sechstel der landwirtschaftlich genutzten Flächen Pseudogleye und zusätzlich ca. ein Viertel der Flächen pseudovergleyt (Abb. 24).

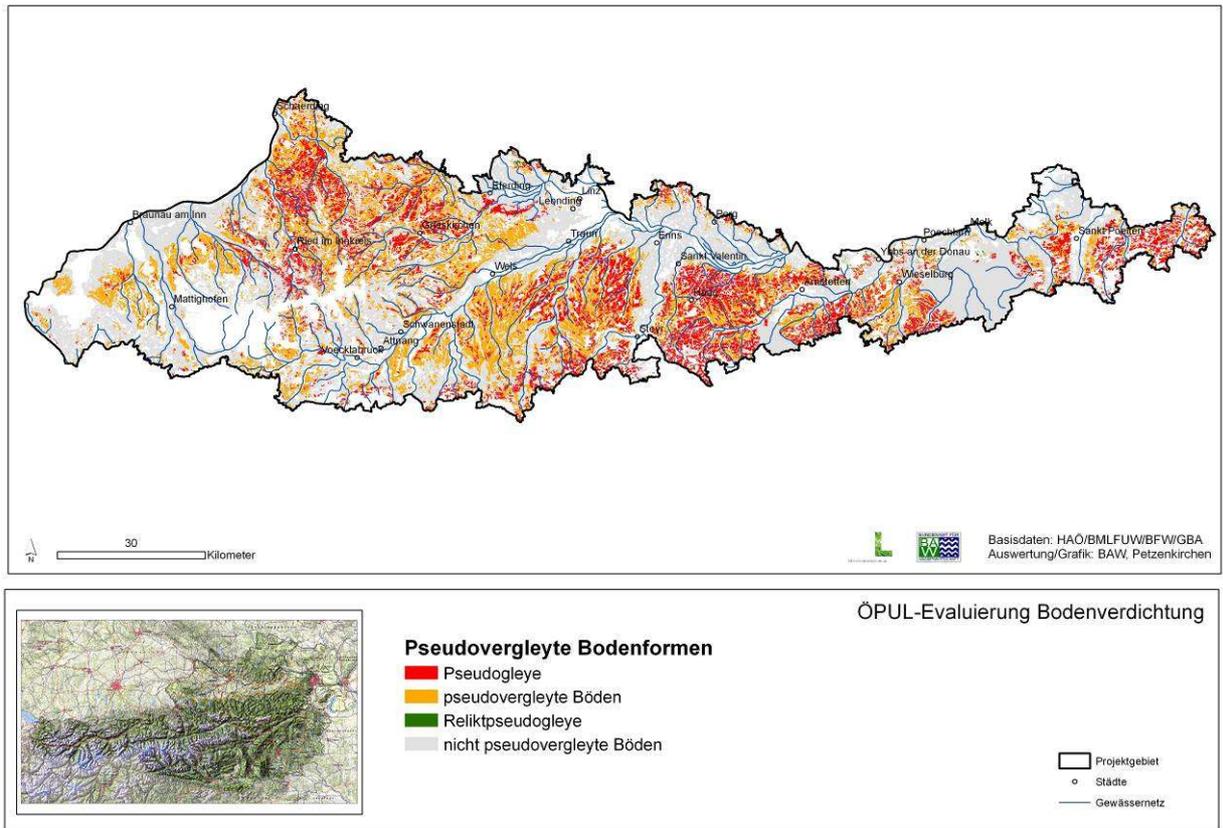


Abb. 23: Verbreitung der Pseudogleye und pseudovergleyten Böden der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden

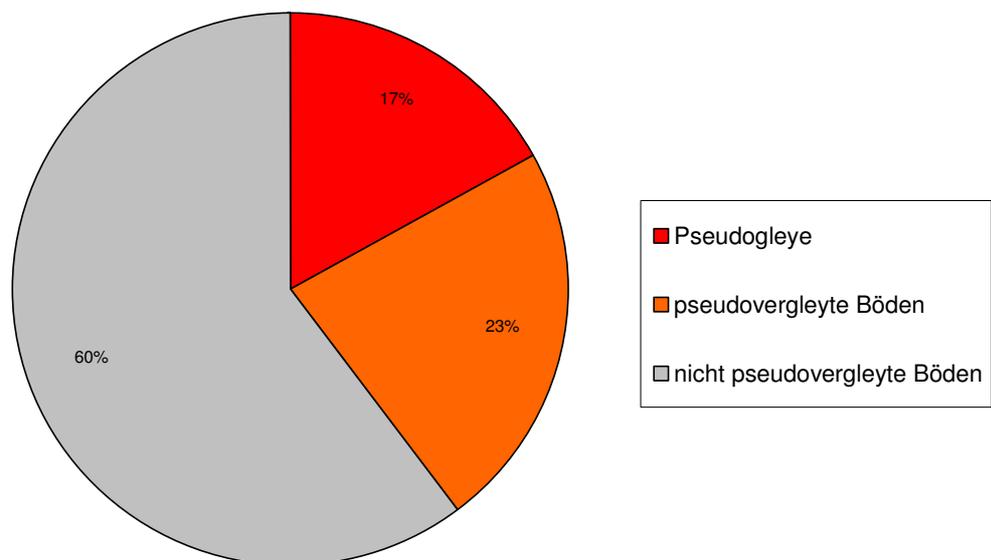


Abb. 24: Flächenanteil der Pseudogleye und pseudovergleyten Böden für die landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

4.2 Bewertung der Probenahmestellen auf Gefügeschäden

Es wurden 25 Betriebe in OÖ und 5 Betriebe in NÖ mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung nach den Kriterien der Verdichtungsgefährdung, Hauptbodentypen und langjähriger Teilnahme an ÖPUL-Maßnahmen (Begrünung bzw. Direkt- oder Mulchsaat) bei verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung (z.B. Mais- und Rübenanbau) festgelegt (Abb. 25). Ebenso erfolgte eine Einbindung von Flächen mit reduzierter bzw. Minimalbodenbearbeitung. Die Auswahl der Landwirte wurde von der OÖ Wasserschutzberatung und der Landwirtschaftskammer für NÖ wesentlich unterstützt. Von jedem Betrieb wurde ein Ackerstandort beprobt. Diese 30 Probenahmestellen stellen eine punktweise und zufällige und von vielen Faktoren beeinflusste Erhebung dar. Die Verteilung der Probenahmestellen ist im Projektgebiet nicht gleichmäßig (Abb. 25). Da jedoch in der Molassezone sowohl im östlichen als auch im westlichen Teil des Projektgebietes die Hauptbodentypen verbreitet vorkommen, wurden aus pragmatischen Gründen Landwirte bzw. Standorte aus dem östlichen Teil des OÖ Projektgebietes ausgesucht.

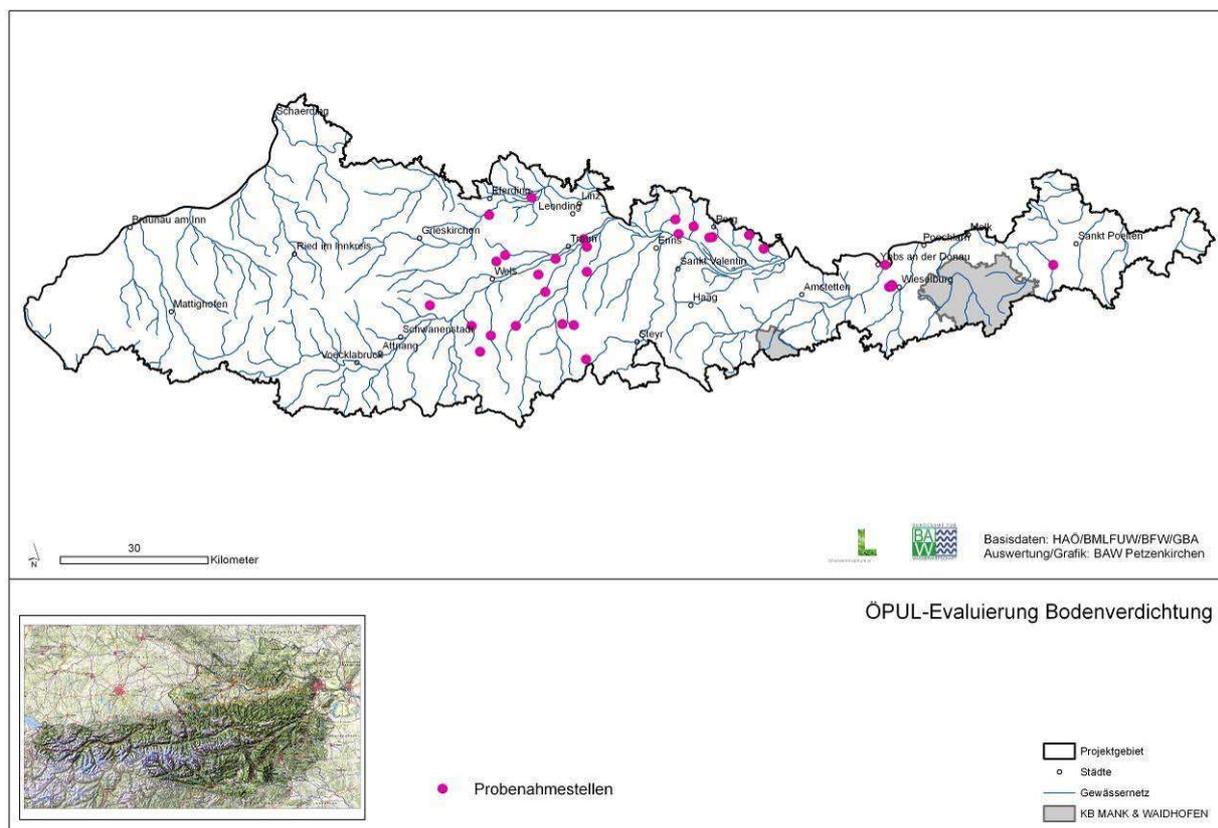


Abb. 25: Lage der Probenahmestellen

Fast 60% der Projektgebietsfläche nehmen die Bodenarten stark und mittel toniger Schluff, schluffiger Lehm und mittel toniger Lehm in der Pflugsohle ein (Abb. 26 und Tab. 3). Die Verteilung der Bodenarten in der Pflugsohle der Probenahmestellen entspricht etwa dem Verhältnis jener aus der Bodenkartierung (Tab. 3).

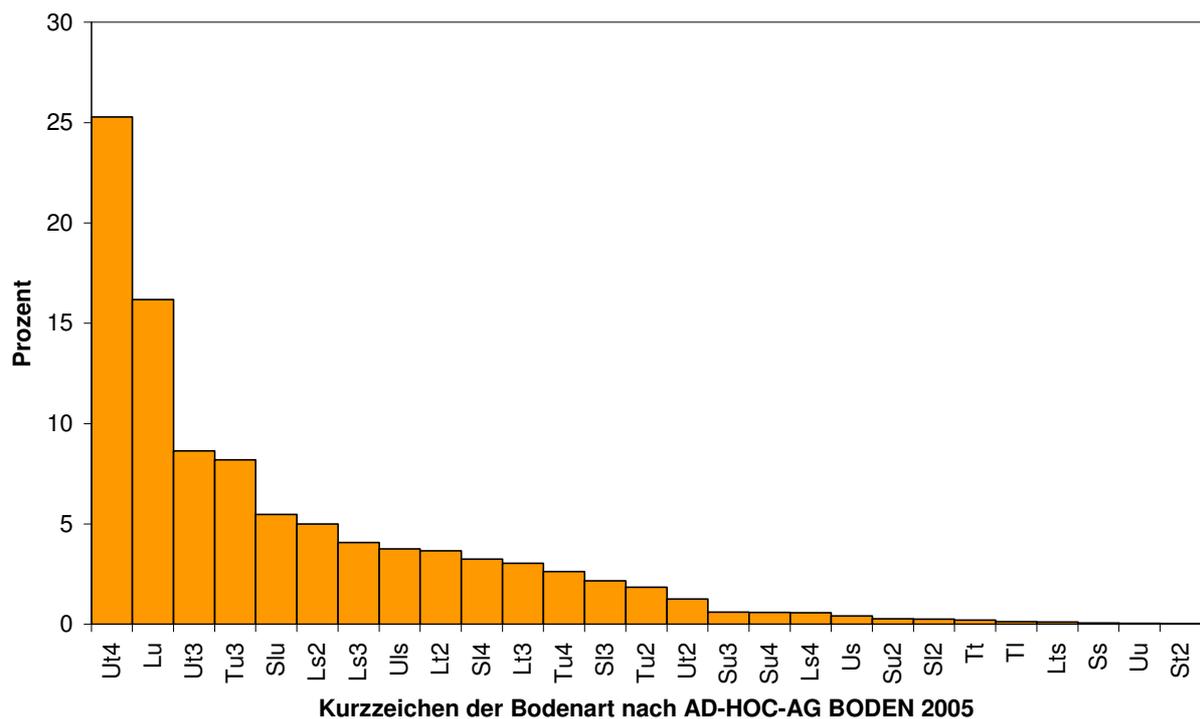


Abb. 26: Verteilung der Bodenarten des Unterbodens im Projektgebiet (Bodenkartierung)

Tab. 3: Anteil der Hauptbodenarten in der Pflugsohle aus der Bodenkartierung und der Probenahmestellen

Bodenart	Bodenkartierung (%)	Probenahmestellen Anzahl	Probenahmestellen (%)
Ut4	25	7	23
Lu	16	6	20
Ut3	9	4	13
Tu3	8	2	7
Summe	58	19	63

Bei der Auswahl der Bodentypen der Probenahmestellen sind die Lockersediment-Braunerden unterdurchschnittlich und die Pseudogleye und Auböden überdurchschnittlich gegenüber der landwirtschaftlichen Nutzfläche des gesamten Projektgebiets vertreten (Tab. 4). Einige pseudovergleyte Lockersediment-Braunerden wurden bei der Bodenansprache im Profil zu Pseudogleyen eingestuft.

Tab. 4: Anteil der Hauptbodentypen aus der Bodenkartierung und der Probenahmestellen

Hauptbodentyp	Bodenkartierung (%)	Probenahmestellen Anzahl	Probenahmestellen (%)
Lockersediment-Braunerde	61	9	30
Pseudogley	18	11	37
Gley	9	3	10
Auboden	5	6	20
Untypischer Boden	3	1	3
andere	4	0	0
Summe	100	30	100

Der Hauptbereich der Korngrößenverteilung in den Pflugsohlen der Probenahmestellen liegt zwischen 10 bis 35% Ton und 55 bis 85% Schluff (Abb. 27).

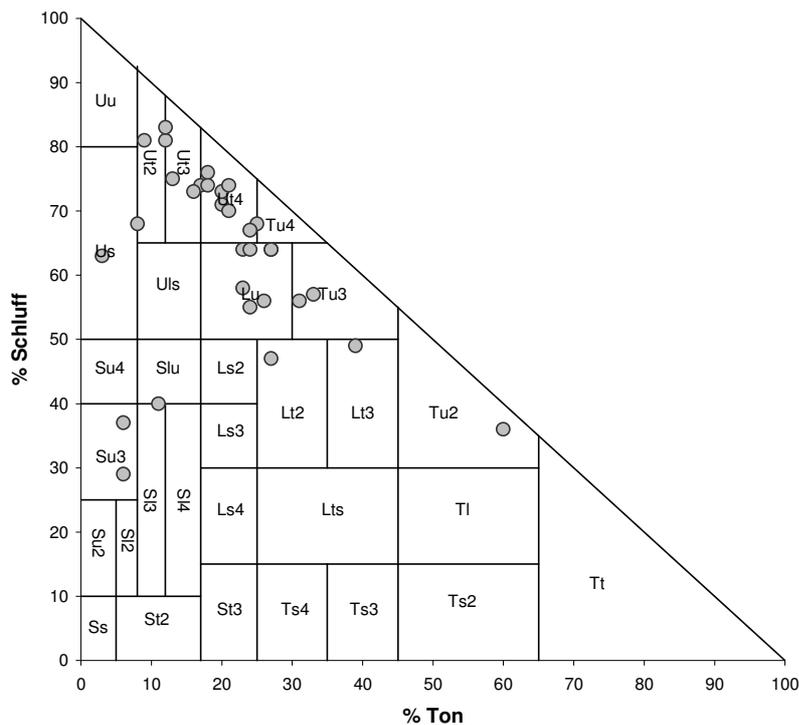


Abb. 27: Bodenartenverteilung in der Pflugsohle der Probenahmestellen

Von den 30 Probenahmestelle unterschreiten 8 Standorte sowohl den Schwellenwert für die Luftkapazität als auch für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit nach LEBERT et al. (2004). Acht Standorte hingegen besitzen eine geringere gesättigte Wasserdurchlässigkeit als der Schwellenwert, jedoch eine höhere Luftkapazität. 2 Standorte besitzen eine geringere Luftkapazität als der Schwellenwert, aber eine höhere gesättigte Wasserdurchlässigkeit. Zwölf Standorte liegen mit beiden Kennwerten über den Schwellenwert (Abb. 28). Der Schwellenwert von $10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit wird von fast zwei Drittel der 30 Probenahmestellen unterschritten, der Wert $1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ immerhin noch von über einem Viertel. Insgesamt etwas über einem Drittel der Probenahmestellen unterschreiten den Schwellenwert der Luftkapazität.

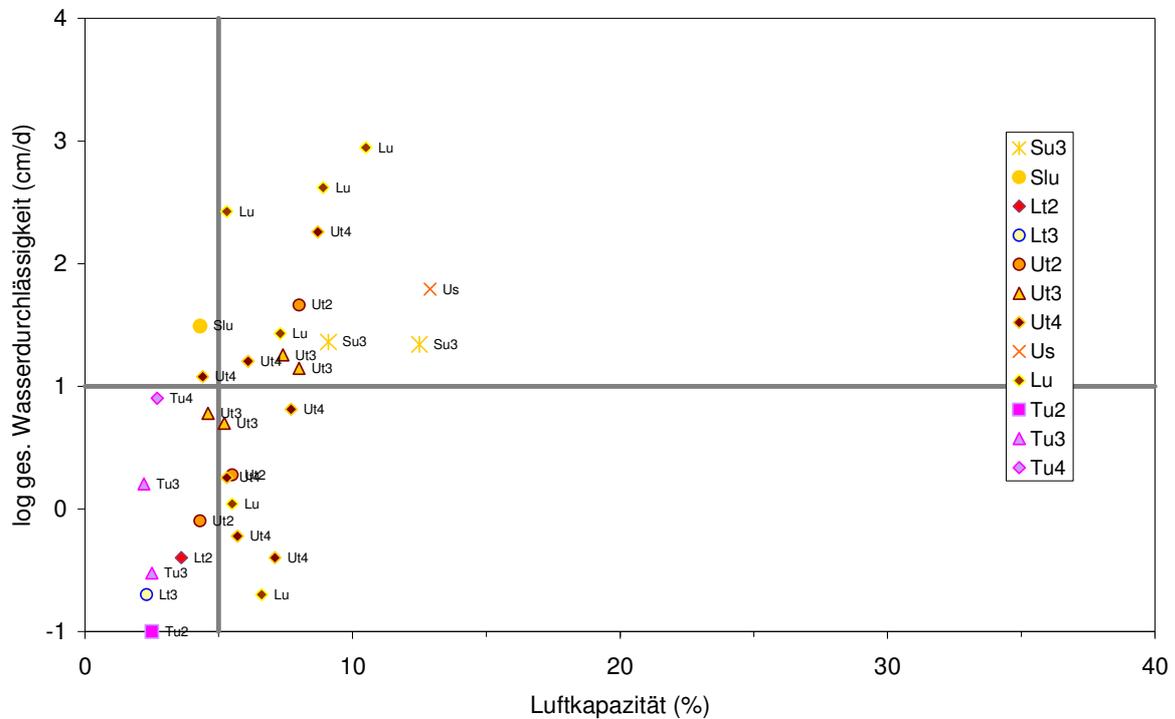


Abb. 28: Bewertung auf Bodenschadverdichtung anhand bodenphysikalischer Indikatoren mit Schwellenwerten nach LEBERT et al. (2004)

Viele Probenahmestellen liegen im Nahbereich oder auch direkt an der Bodenartgrenze. Für eine differenzierte Betrachtung und um Klassensprünge zu vermeiden wurden 7 Gruppen von Probenahmestellen mit vergleichbaren Korngrößenverteilungen des Feinbodens zusammengefasst (Abb. 29).

In den Abb. 30 bis 36 sind die Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit, sowie die Gefügestandsbeurteilung für die Pflugsohle der 7 Gruppen dargestellt. Zusätzlich wurden die entsprechenden Kennwerte aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) für die vorkommenden Bodenarten für die mittlere Lagerungsdichte mit abgebildet.

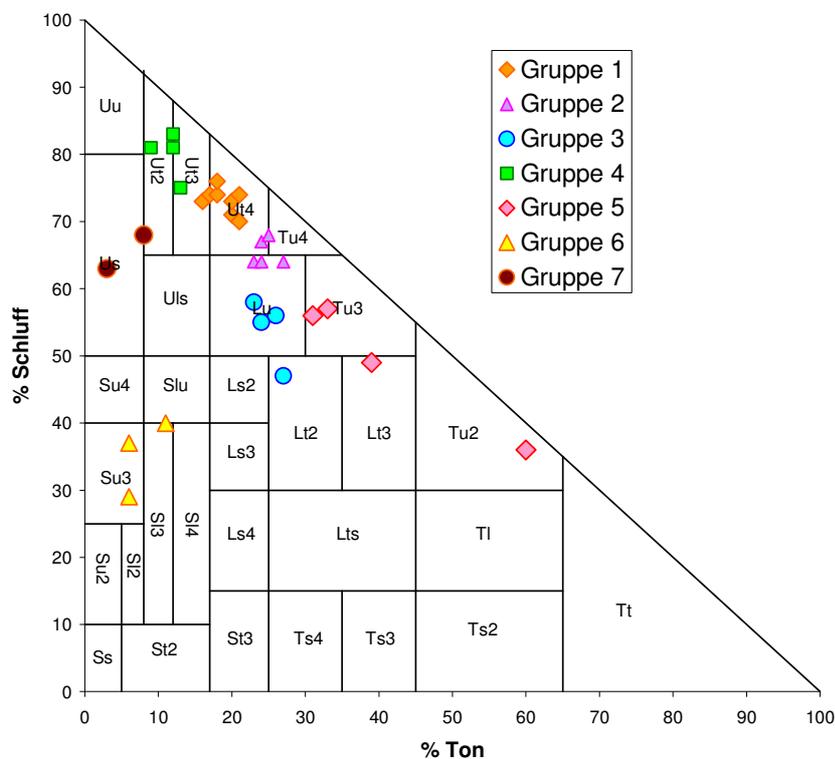


Abb. 29 Gruppierung der Bodenartenverteilung in der Pflugsohle der Probenahmestellen

In der Gruppe 2 sind fünf Probenahmestellen zusammengefasst. Sie liegen um die obere Grenze zwischen schluffigem Lehm und der unteren Grenze mittel und stark tonigem Schluff. Zwei Probenahmestellen befinden sich in einem günstigen, eine in einem ungünstigen und zwei in einem kritischen Gefügestand. Die beiden Probenahmestellen im kritischen Gefügestand besitzen eine sehr geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Abb. 31).

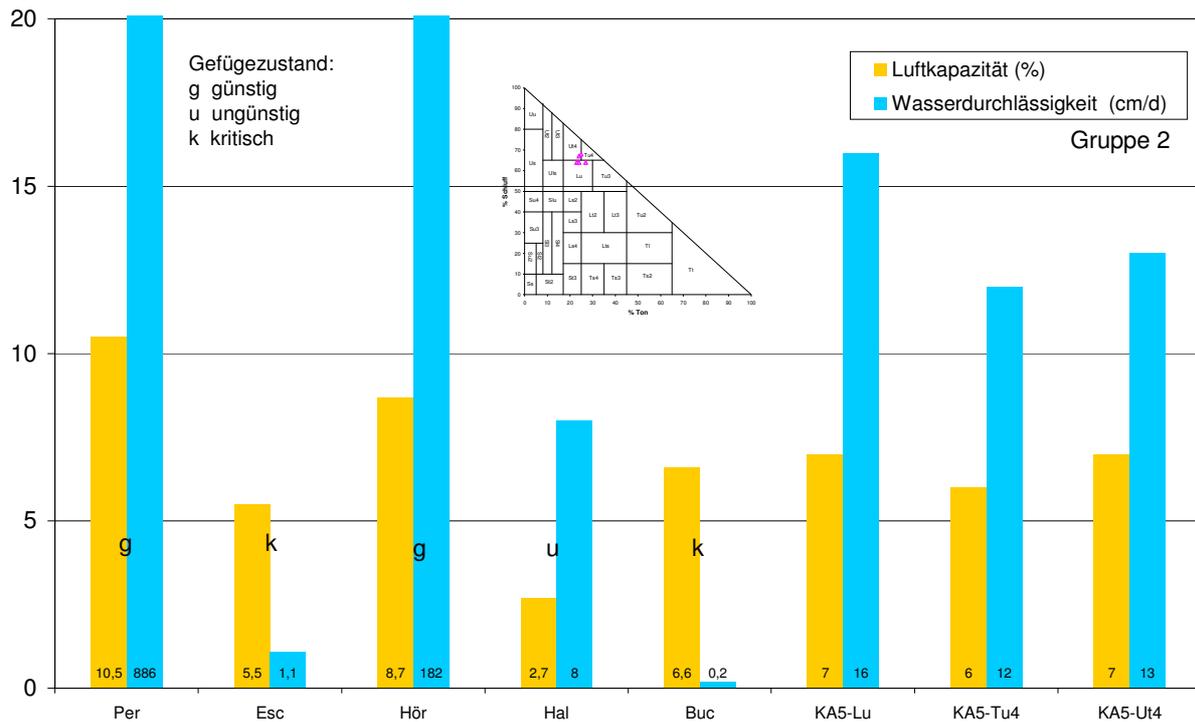


Abb. 31: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügestandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 2

In der Gruppe 3 sind vier Probenahmestellen zusammengefasst. Sie liegen in der Bodenart schluffiger Lehm und schwach toniger Lehm. Drei Probenahmestellen befinden sich in einem günstigen Gefügestand und eine Probenahmestelle in einem kritischen Gefügestand. Die Probenahmestelle mit kritischem Gefügestand besitzt eine äußerst geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Abb. 32).

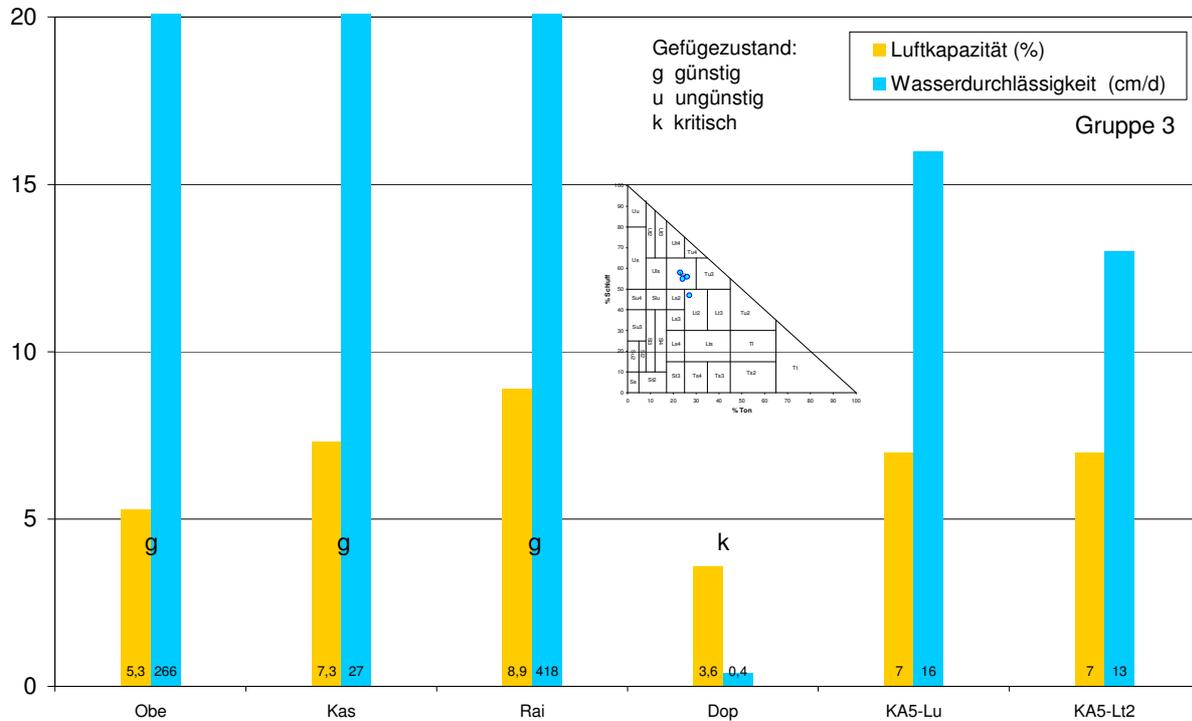


Abb. 32: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügestandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 3

In der Gruppe 4 sind vier Probenahmestellen zusammengefasst. Die Probenahmestellen liegen in der Bodenarten schwach und mittel toniger Schluff. Eine Probenahmestellen befinden sich in einem günstigen, eine in einem ungünstigen und zwei in einem kritischen Gefügestand. Die beiden Probenahmestellen mit kritischem Gefügestand besitzen eine sehr geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Abb. 33).

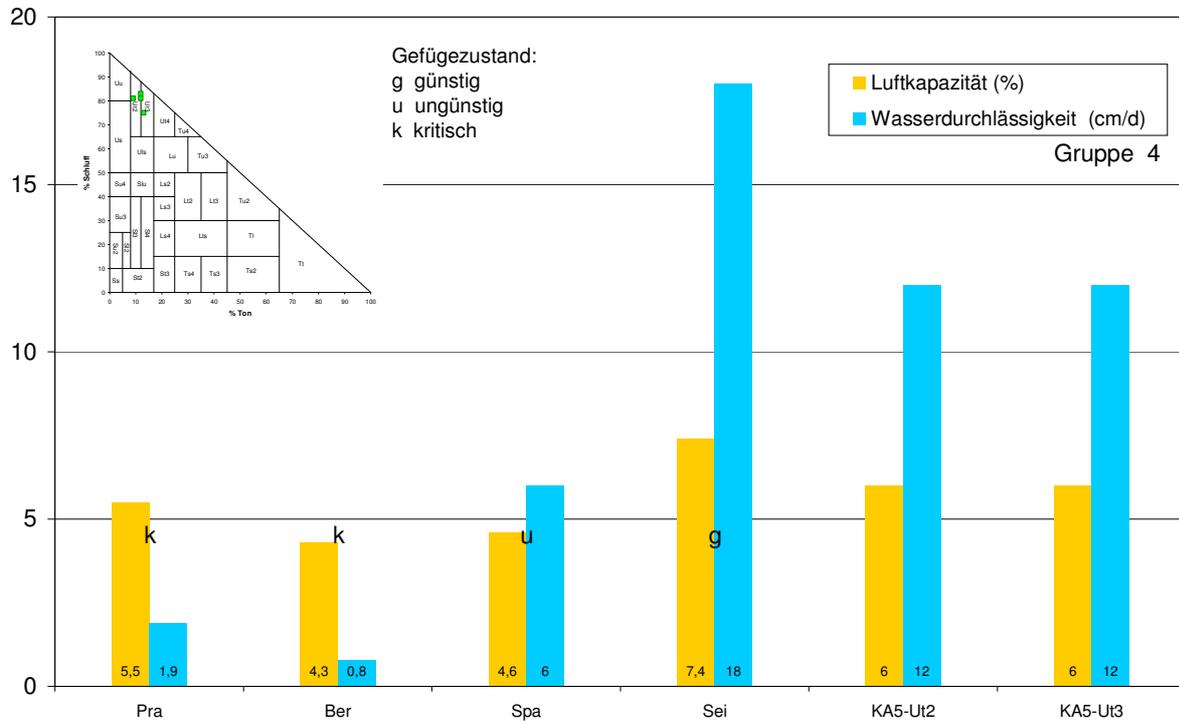


Abb. 33: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügestandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 4

In der Gruppe 5 sind vier Probenahmestellen zusammengefasst. Diese Probenahmestellen haben die höchsten Tongehalte (von 31% bis 60%) aller Probenahmestellen. Sie liegen innerhalb der Bodenarten schwach und mittel schluffiger Ton und mittel toniger Lehm. Alle vier Probenahmestellen befinden sich in einem kritischen Gefügestand; sie haben eine sehr geringe bis äußerst geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Abb. 34).

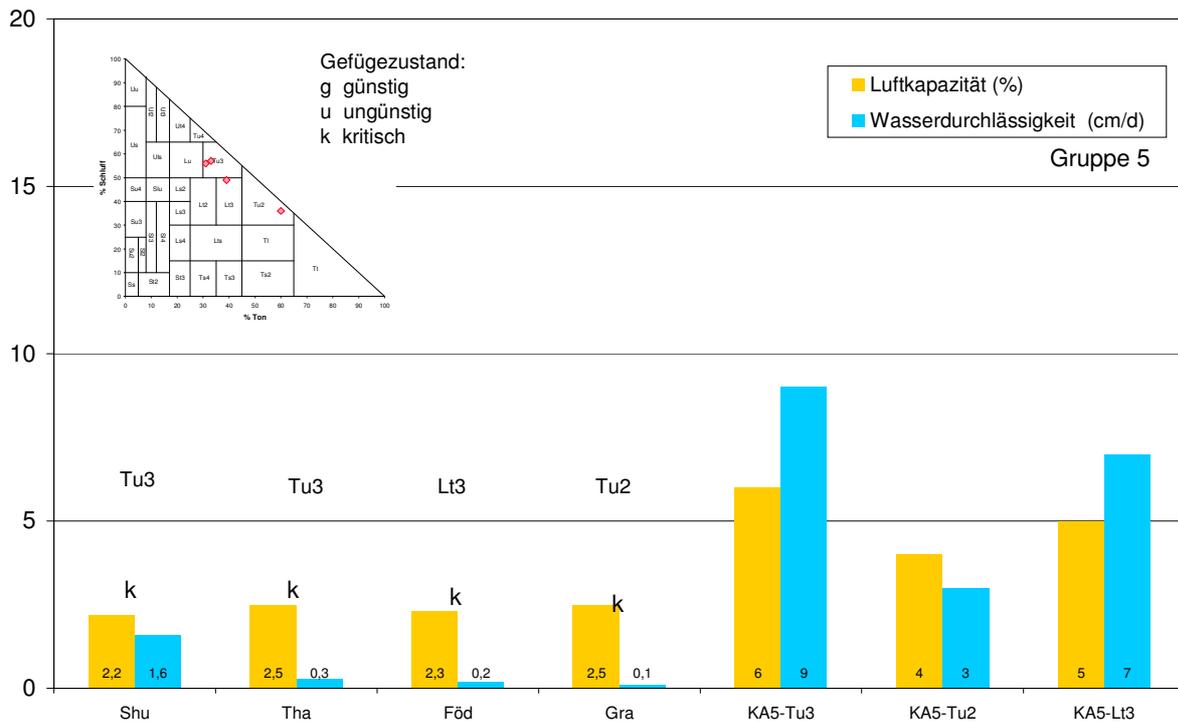


Abb. 34: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügestandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 5

In der Gruppe 6 sind vier Probenahmestellen zusammengefasst. Die Probenahmestellen liegen in den Bodenarten mittel schluffiger Sand und schluffig-lehmiger Sand. Zwei Probenahmestellen befinden sich in einem günstigen und eine in einem ungünstigen Gefügezustand. Die Probenahmestelle mit ungünstigem Gefügezustand besitzt eine geringe Luftkapazität (Abb. 35).

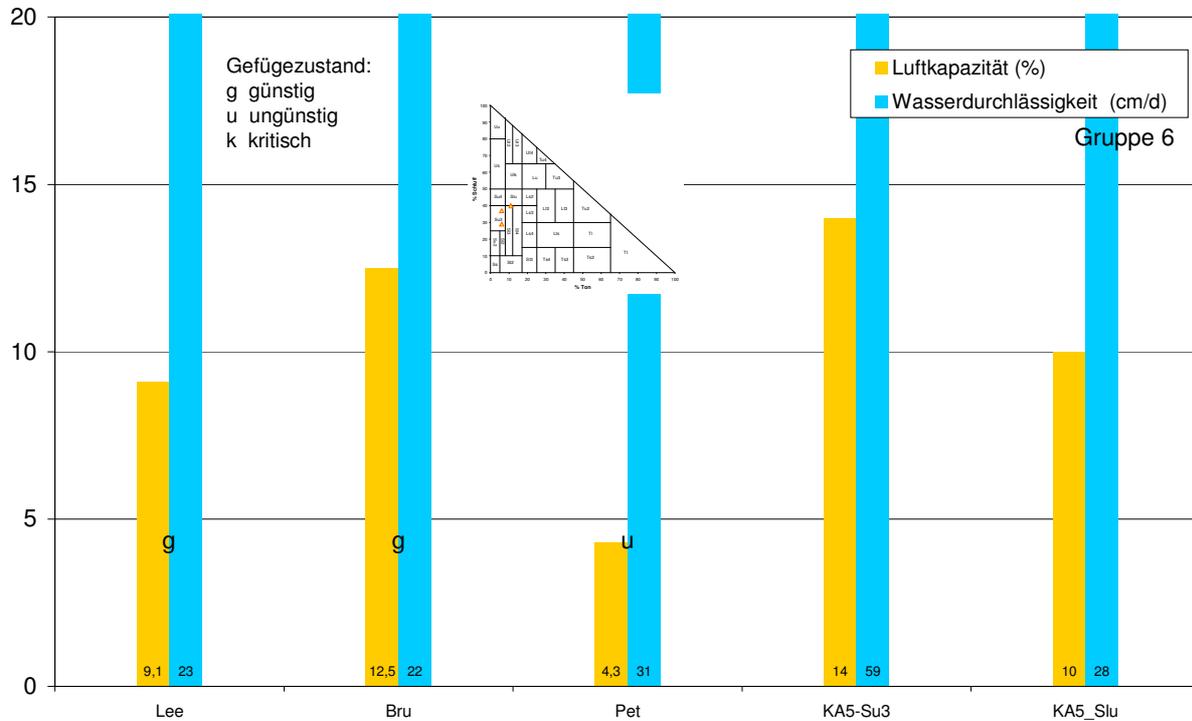


Abb. 35: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügezustandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 6

In der Gruppe 7 sind zwei Probenahmestellen zusammengefasst. Die Probenahmestellen liegen in den Bodenarten sandiger Schluff. Beide Probenahmestellen befinden sich in einem günstigen Gefügestand (Abb. 36).

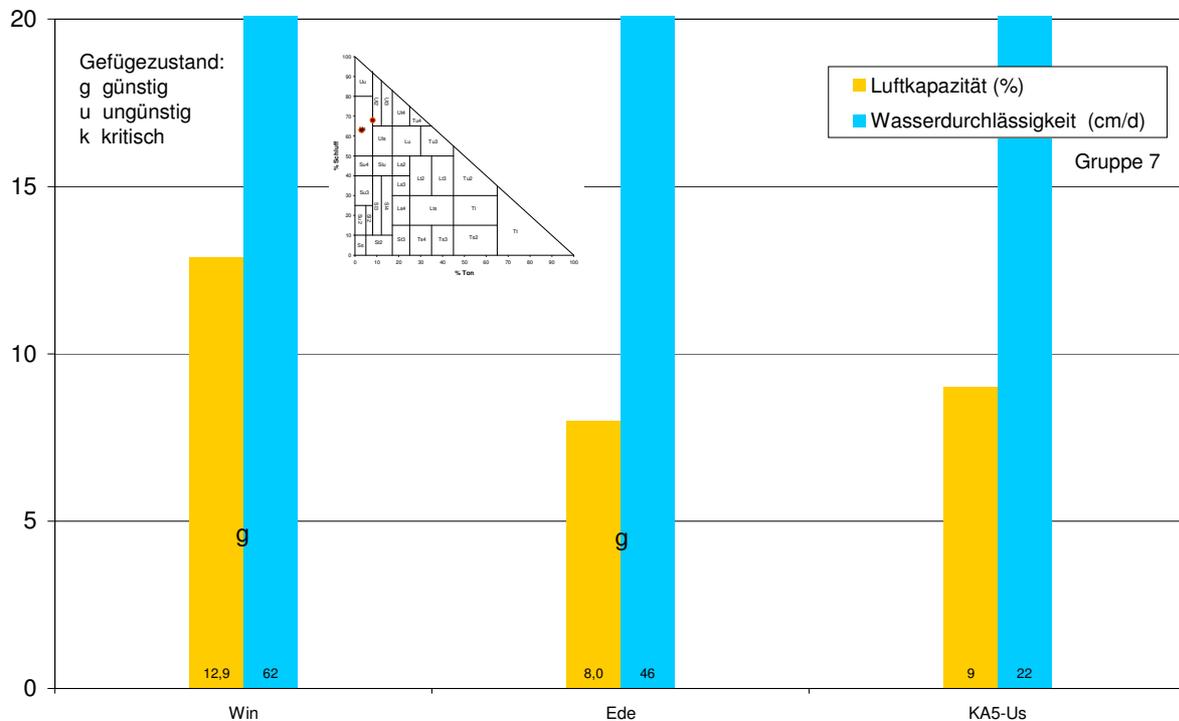


Abb. 36: Luftkapazität und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit mit Gefügestandsbeurteilung in der Pflugsohle der Gruppe 7

In der Tab. 4 sind der Bodentyp und die Bodenart, die Vorbelastung bei Feldkapazität und die physikalischen Kennwerte (Rohdichte trocken, effektive Lagerungsdichte nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005), Luftkapazität und gesättigte Wasserdurchlässigkeit), sowie die Gefügestandsbewertung für den Pflugsohlenbereich zusammengefasst. Nach KAUFMANN et al. (2010) trennt der Schwellenwert $1,70 \text{ g/cm}^3$ den optimalen Bereich der effektiven Lagerungsdichte den limitierenden Bereich für das Wurzel- und Pflanzenwachstum. Die Lagerungsdichte zeigt eine Veränderung der Dichtlagerung zuverlässig und sensibel an. Folgt man dem Konzept der Critical State Soil Mechanics nach ROSCOE et al. (1958), dass bei einem gegebenen Boden eine bestimmte Dichte durch ganz verschiedene Kombinationen der gefügebildenden Spannungen erzeugt werden kann. Je nach Belastungspfad ergibt sich dann bei gleicher Dichte eine ganz unterschiedliche Porenanordnung und Porengeometrie. Betrachtet man aber Böden aus einer geologischen Einheit, die etwa eine gleiche oder ähnliche Belastungshistorie aufweisen, dann kann man die Lagerungsdichte mit Einschränkungen doch als indirekten Indikator für Bodenfunktionen heranziehen, da zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass sich in Korrelation zur Lagerungsdichte auch viele andere bodenphysikalische Eigenschaften ändern. Es finden sich in den Probe-

nahmestellen in der Pflugsohle sowohl beim günstigen Gefügestand effektive Lagerungsdichten über $1,70 \text{ g/cm}^3$, als auch mehrmals bei kritischen Gefügestand effektive Lagerungsdichten unter dem Schwellenwert. Eine Zusammenschau zwischen der Bewertung des Gefügestandes und der Bewertung des limitierenden Bereiches der effektiven Lagerungsdichte gibt es keine Übereinstimmung.

Tab. 4: Einstufung des Gefügestandes in der Pflugsohle (Rohdichte trocken (ρ_d), effektive Lagerungsdichte (eLD), Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Kf))

Probenahme- stelle	Boden- typ ÖBK	Boden- art KA5	Vorbelastung pF 1,8	ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	eLD ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	LK (%)	Kf ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)	Gefüge zustand
Win	BA	Us	63	1,35	1,43	12,9	62	günstig
Bru	bGA	Su3	81	1,54	1,61	12,5	22	günstig
Ede	bGA	Ut2	108	1,42	1,53	8,0	46	günstig
Lee	GA	Su3	106	1,62	1,68	9,1	23	günstig
Kas	gBA	Lu	114	1,60	1,78	7,3	27	günstig
Sei	LB	Ut3	127	1,63	1,77	7,4	18	günstig
Hör	PB	Ut4	91	1,55	1,74	8,7	182	günstig
Rai	pLB	Lu	104	1,52	1,71	8,9	418	günstig
Rüh	pLB	Ut3	119	1,59	1,74	8,0	14	günstig
Obe	TG	Lu	62	1,35	1,52	5,3	266	günstig
Per	TP	Lu	105	1,51	1,69	10,5	886	günstig
Sch	TP	Ut4	97	1,61	1,77	6,1	16	günstig
Pet	pLB	Slu	154	1,66	1,76	4,3	31	ungünstig
Hal	TG	Tu4	78	1,35	1,54	2,7	8	ungünstig
Raa	TP	Ut4	98	1,61	1,78	4,4	12	ungünstig
Bra	TP	Ut4	91	1,55	1,73	7,7	7	ungünstig
Mit	TP	Ut4	93	1,61	1,78	5,3	1,8	ungünstig
Spa	TP	Ut3	131	1,53	1,67	4,6	6	ungünstig
Wal	TP	Ut3	135	1,63	1,79	5,2	5	ungünstig
Dop	EG	Lt2	85	1,64	1,82	3,6	0,4	kritisch
Ber	GA	Ut2	131	1,46	1,60	4,3	0,8	kritisch
Esc	LB	Lu	91	1,52	1,70	5,5	1,1	kritisch
Gra	pLB	Tu2	86	1,40	1,74	2,5	0,1	kritisch
Tha	LB	Tu3	92	1,62	1,84	2,5	0,3	kritisch
Föd	pLB	Lt3	83	1,44	1,68	2,3	0,2	kritisch
Buc	TP	Lu	95	1,47	1,67	6,6	0,2	kritisch
Kül	TP	Ut4	94	1,59	1,77	7,1	0,4	kritisch
Pra	TP	Ut2	127	1,53	1,65	5,5	1,9	kritisch
Sca	TP	Ut4	94	1,60	1,77	5,7	0,6	kritisch
Shu	TU	Tu3	83	1,66	1,87	2,2	1,6	kritisch

günstig = weit weg von den Schadensgrenzen

ungünstig = nahe an den Schadensgrenzen

kritisch = überwiegend oder ganz im Schadensbereich

Von den 30 Probenahmestellen besitzen 70% in der Pflugsohle einen Sandgehalt unter 13%; die übrigen 30% einen von 19% bis 65% (Abb. 37).

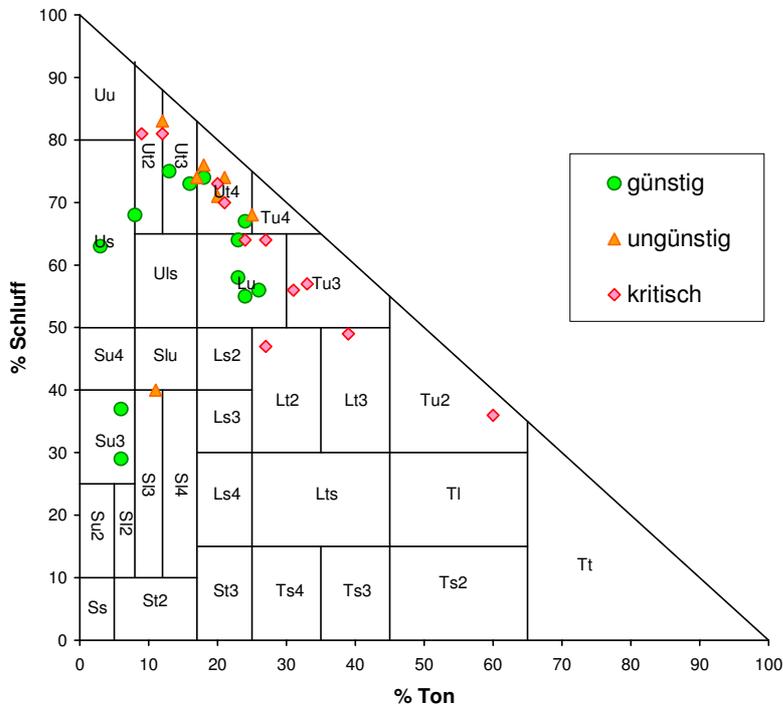


Abb. 37: Bodenartenverteilung in der Pflugsohle der Probenahmestellen in Abhängigkeit des Gefügestandes

Sämtliche Bodenarten der beprobten Pseudogleye liegen im Bereich mit zwischen 10% und 30% Ton und über 60% Schluff (Abb. 38).

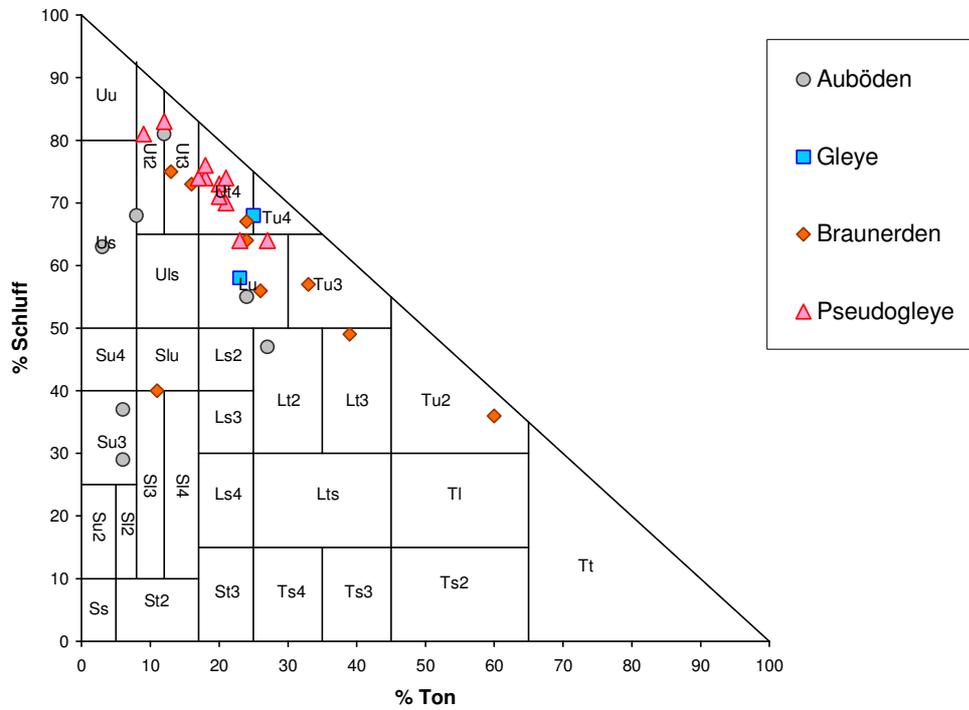


Abb. 38: Bodenartenverteilung in der Pflugsohle der Probenahmestellen in Abhängigkeit des Bodentyps

Die Abb. 39 sind der Tongehalt in steigender Reihenfolge für die einzelnen Gefügestandklassen und der Bodentyp abgebildet. Es zeigt sich, dass sich in allen drei Gefügestandklasse Tongehalte bis ca. 25% finden, nur in der Klasse mit kritischem Gefügestand finden sind Tongehalte über 25%. In der Klasse mit günstigem Gefügestand finden sind alle Hauptbodentypen, aber vor allem die Auböden. In der Klasse ungünstiger Gefügestand dominieren die Pseudogleye und in der Klasse kritischer Gefügestand finden sich wieder sämtliche vorgefundenen Hauptbodentypen (Abb. 39).

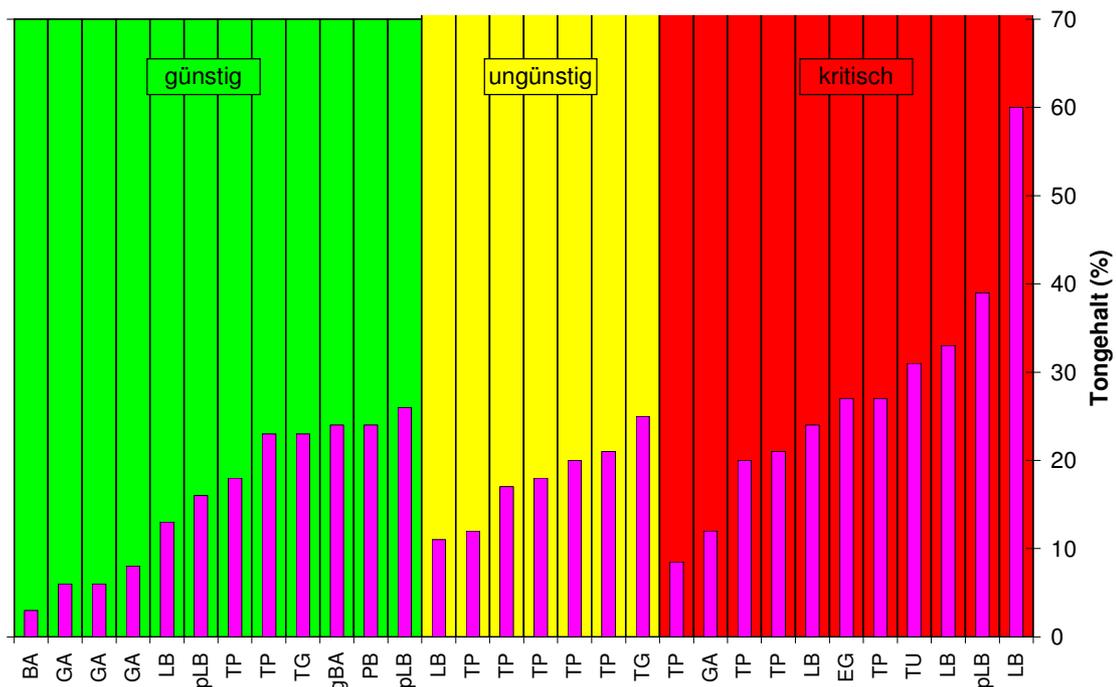


Abb. 39: Bodentyp mit Gefügestandklassen und Tongehalt (GA Grauer Auboden, BA Brauner Auboden, LB Lockersediment-Braunerde, PB Parabraunerde, TP Typischer Pseudogley, TG Typischer Gley, EG Extemer Gley, TU Untypischer Boden, g vergleht, p pseudovergleht)

Die Gegenüberstellung der gesättigten Wasserdurchlässigkeit zum Tongehalt zeigt, dass bis zu einem Tongehalt von 27% gesättigte Wasserdurchlässigkeiten sowohl über als auch unter dem Grenzwert für Schadverdichtung von $10 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ vorkommen. Bei Tongehalten über 30% (4 Standorte) liegt die gesättigte Wasserdurchlässigkeit wesentlich unter dem Schwellenwert (Abb. 40).

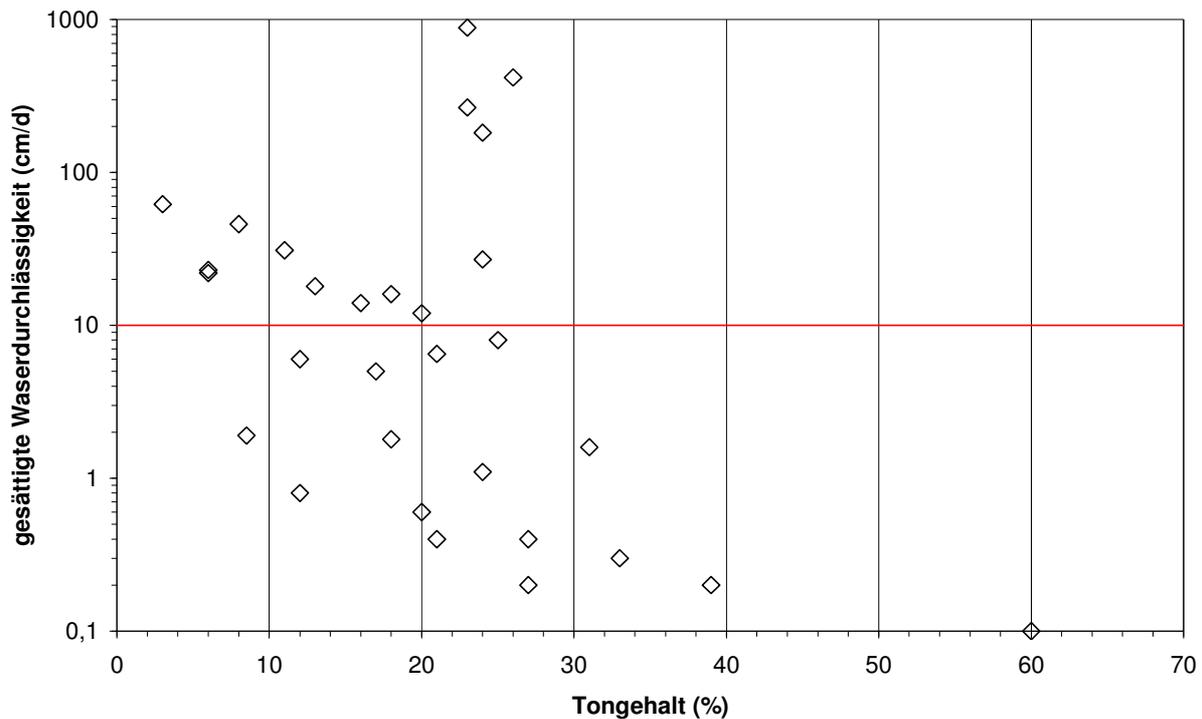


Abb. 40: Gegenüberstellung der gesättigten Wasserdurchlässigkeit zum Tongehalt

Einen Überblick über die Bewirtschaftungsmaßnahmen aus der Befragung der Landwirte gibt die Tab. 5. Die Direkt- und Mulchsaat, Begrünung und Minimalbodenbearbeitung, Pflugverzicht und die Anpassung des Reifeninnendruckes wurden als Bewirtschaftungsmaßnahmen, die einen Beitrag zur Gefügeverbesserung beitragen können eingestuft. Die Tieflockerung, eine Standardbereifung, die Tierhaltung, generell eine Wirtschaftsdüngerausbringung wurden als verdichtungsneutrale Maßnahmen bewertet. Die konventionelle Pflugarbeit sowie die Rübenernte mit einem Vollernter wurden als potentiell gefügeschädigend für den Unterboden eingestuft. Es wurden diejenigen Maßnahmen die zur Verbesserung des Gefüges beitragen können grün unterlegt, jene die sich neutral verhalten gelb und jene die das Gefüge im Unterboden schädigen können rot. Bis auf jeweils einen Betrieb legen alle Betriebe Begrünungen an und führen Mulchsaat durch. Vier der 30 Betriebe bewirtschaften zurzeit pfluglos.

Tab. 5: Gefügezustand in der Pflugsohle und aktuelle verdichtungsrelevante Bewirtschaftungsmaßnahmen der Betriebe mit Probenahmestellen (Ergebnis aus Befragung der Landwirte)

Probenahmestelle	Gefügezustand *	Direktsaat	Mulchsaat	Begrünung	Minimalbodenbearbeitung	Pflugverzicht	Tieflockerung / Tiefgrubbern	BIO Betrieb	Standardbereitung	Zwillingsbereitung	Reifeninnendruck Anpassung	Rübenroder Holmer	Tierhaltung	Wirtschaftsdüngerausbringung	Anmerkung
Bru	g	X	X	X	X				X		X	X	X		nur bei Mais pflügen
Ede	g		X	X	X	X			X		X				seit 2 Jahren pfluglos
Hör	g		X	X	X				X		X		X	X	teilweise nach Raps und Gerste kein Pflug
Kas	g		X	X					X			X	X		
Lee	g		X	X							X		X	X	
Obe	g		X	X					X		X		X	X	
Per	g		X	X			X		X		X		X	X	
Rai	g		X	X					X		X		X	X	
Rüh	g		X	X					X		X		X	X	seit 1 Jahr versuchsweise nach Raps, Soja und Weizen kein Pflug
Sch	g		X	X					X		X		X	X	
Sei	g		X												
Win	g		X	X					X		X			X	
Bra	u		X	X					X		X	X			
Hal	u		X	X	X				X	X	X		X	X	nach Mais Pflug, sonst nur Grubber seit 4 Jahren
Mit	u		X	X	X				X	X		X	X	X	nur nach Mais Pflug
Pet	u		X	X				X	X		X	X	X	X	
Raa	u			X								X	X	X	
Spal	u		X	X	X	X	X		X			X	X	X	
Wal	u		X	X					X		X		X	X	
Ber	k		X	X	X				X	X	X	X			vor Mais nur Grubber, vor Rübe Pflug
Buc	k		X	X	X		X		X	X	X			X	Nach Soja und Raps kein Pflug
Dop	k	X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	
Esc	k	X	X	X	X		X		X	X	X	X			kein Pflug vor Winterweizen und nach Rübe
Föd	k		X	X	X		X		X			X			kein Pflug vor Klee, Phacelia, W Gerste
Gra	k		X	X	X				X		X	X			wenn möglich nach Getreide & Rübe kein Pflug
Kül	k		X	X	X	X			X		X		X	X	
Pra	k		X	X	X				X					X	teilweise Versuch pfluglos
Sca	k		X	X					X						
Shu	k		X	X					X		X				Pflug nur alle 2 Jahre
Tha	k		X	X	X				X		X		X	X	Pflug nach Wintergetreide und vor Mais

* g Günstig, u ungünstig, k kritisch

Nur eine sehr geringe Anzahl der Betriebe (2 von 12) mit günstigem Gefügestand in der Pflugsohle bauen Rüben an und ernten diese mit einem Vollernter (Tab 6). Jene Betriebe mit ungünstigem Gefügestand im Unterboden wenden am häufigsten einen teilweisen Pflugverzicht an.

Drei Betriebe die Tieflockerung durchführen besitzen in der Pflugsohle der Probenahmestelle die Bodenart Lu, ein Betrieb Lt3 und ein Betrieb Ut3. Lu und Lt3 sind lockerungsfähige Bodenarten, Lt3 liegt außerhalb des lockerungsfähigen Bereichs. Die drei Betriebe mit Lu (lockerungsfähig) besitzen einen kritischen Gefügestand und ein Betrieb einen günstigen Gefügestand. Der Betrieb mit Lt3 (lockerungsfähig) in der Pflugsohle besitzt einen kritischen und jener mit Ut3 (nicht lockerungsfähig) einen ungünstigen Gefügestand.

Besonders viele der Betriebe ohne Tierhaltung finden sich in der Gruppe mit kritischem Gefügestand. Eine besonders hohe Anzahl der Betriebe mit günstigem und kritischem Gefügestand passen ihren Reifendruck an.

Tab. 6: Gegenüberstellung von ausgewählte Bewirtschaftungsmaßnahmen aus Tab. 5 dem Gefügestand in der Pflugsohle der Probenahmestelle mit der Anzahl der Betriebe

Gefügestand	Untersuchte Betriebe	Rübenanbau und Rübenvollernter	Pflugverzicht	Teilweiser Pflugverzicht	Tieflockerung	Minimalbodenbearbeitung	Tierhaltung	Reifendruck Anpassung
	Anzahl der Betriebe							
günstig	12	2	1	3	1	3	9	10
ungünstig	7	5	1	7	1	4	6	4
kritisch	11	4	2	2	3	8	2	8

Die Betrachtung der aktuellen Bewirtschaftungsmaßnahmen mit dem vorgefundenen Gefügestand im Unterboden der Probenahmestellen ergibt keine nachvollziehbare Sichtweise im Bezug auf die Vermeidung von Bodenverdichtungen bzw. deren Verursachung. Gefügeschonende Bewirtschaftungsmaßnahmen werden von der Hälfte der untersuchten Betriebe erst in den letzten Jahren angewendet.

Die Gefügeschäden dieser meist sehr schluffreichen Böden regenerieren sich nur geringfügig und langfristig. Außer temporären Veränderungen wie Quellung und Schrumpfung und die Anlage einzelner biogener Vertikalporen treten kaum Regenerierungsprozesse ein. Dies kann auch ein Grund sein, warum die derzeitigen Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht mit dem angetroffenen Gefügestand korreliert. Die Gefügeschäden können aus der Bewirtschaftungspraxis des letzten Jahrzehnts stammen.

4.3 Ausgewählte Standorte aus der Labordatenbank IKT

In der Datenbank des Institutes für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT) sind umfassende österreichweite bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse enthalten. Die Lage aller Probenahmestellen und die untersuchten Parameter können im Internet unter www.bodenkarte.at eingesehen werden. Aus diesem Datensatz wurden 34 verschiedene landwirtschaftlich genutzte Ackerstandorte ausgewählt. Es wurden die Kennwerte der gesättigten Wasserdurchlässigkeit und der Luftkapazität der einzelnen Horizonte gegenübergestellt (Abb. 41). Eine Bewertung nur nach den bodenphysikalischen Schwellenwerten (Tab. 2) ergibt 16 Standorte mit Schadverdichtung. Durch Einbeziehung bodenkundlicher Informationen (Bodentyp, Horizontbezeichnung) wurden 10 Standorte mit Verdichtungen natürlichen Ursprungs (z.B. S-Horizont eines Pseudogleys) und 6 Standorte mit Verdichtungen im Unterboden mit anthropogenem Hintergrund identifiziert (MURER und LEHNER, 2010). Das bedeutet, dass einerseits auch bei einer geringen Datenmenge von 34 Standorten Horizonte mit Gefügeschäden identifiziert werden konnten.

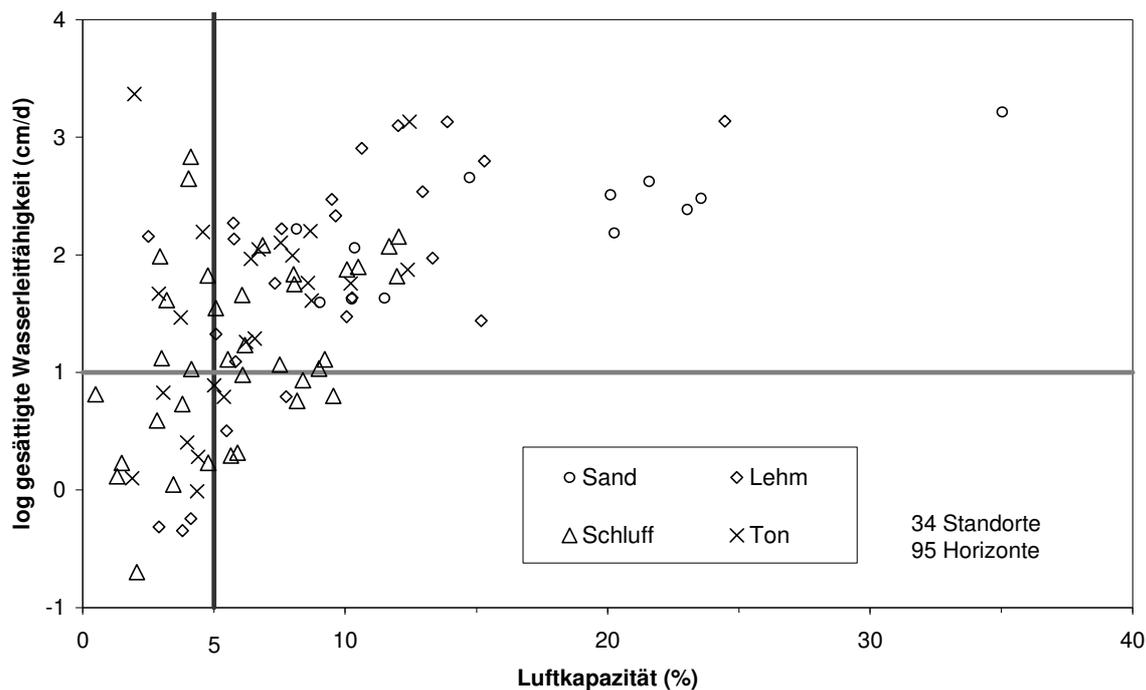


Abb. 41: Bewertung auf Bodenschadverdichtung anhand bodenphysikalischer Indikatoren mit Schwellenwerten nach LEBERT et al. (2004) für ausgewählte Standorte aus der IKT-Bodendatenbank (MURER und LEHNER, 2010).

4.4 Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen

Der Schutz des Bodengefüges gründet auf vorsorgenden, risikomindernden Maßnahmen, die aufeinander aufbauen und miteinander verknüpft sind. Zur Vermeidung von Bodenverdichtungen gibt es eine Reihe von ackerbaulichen Maßnahmen:

- pfluglose Bestellung
- Direkt- oder Mulchsaat
- Minimalbodenbearbeitung
- Pflügen im Sommer
- standortgerechte Fruchtartenwahl für verdichtungsempfindliche Standorte
- Vermeidung der Ernte bei zu nassen Bodenbedingungen, besonders in Gebieten mit hohen Niederschlägen und auf verdichtungsgefährdeten Böden (z.B. auf pseudo vergleyten Standorten)
- Verkürzung der Feldlängen und damit Verringerung der Last- und Leerfahrten
- Begrünung von stark gefährdeten Teilflächen
- gerätetechnische Maßnahmen wie z.B. Onland - Pflügen
- Umrüsten von Aufsatteltechnik auf gezogene Technik
- Umstellen auf zweistufige Ernteverfahren (z.B. bei Kartoffel Trennen von Roden und Sammeln)
- Optimierung des Reifeninnendruckes (Regelanlage)

Notwendig ist der Einsatz möglichst bodenschonend ausgelegter Landmaschinen in Arbeitsverfahren, die tragfähige und gleichzeitig funktionsfähige und damit ertragsreiche Böden zum Ziel haben.

Die wesentlichsten anwendbaren Maßnahmen sind:

Konservierende Bodenbearbeitung

Eine konservierende Bodenbearbeitung bewirkt im Oberboden eine höhere Strukturstabilität gegenüber der konventionell wendenden Bodenbearbeitung und hinsichtlich mechanischer Belastungen ein erhöhtes Druckkompensationsvermögen und eine verbesserte Reduktion scherender und komprimierender Bodenverformung mit der Tiefe auf. Tiefwurzelnde Zwischenfrüchte fördern die Ausbildung von Wurzelkanälen und damit die Durchwurzelbarkeit des Bodens ohne mechanischen Eingriff.

Bodenbearbeitungsverfahren mit reduzierter Häufigkeit, Intensität und Eingriffstiefe stärken die Tragkraft des Bodens. Dabei leistet die „Mulchsaat ohne tiefe Lockerung“ (Bearbeitungstiefe 10 bis 12 cm) aufgrund geringerer Eingriffstiefe einen größeren Beitrag zur Verbesserung der Bodentragfähigkeit als die „Mulchsaat mit Lockerung“ (Bearbeitung auf Krumentiefe). Von Bodentieren und Wurzeln geschaffenes Gefüge ist stabiler als durch Bodenbearbeitung erzeugte Gefügestrukturen.

Die oft gute Befahrbarkeit konservierend bearbeiteter Böden auch bei sehr feuchtem Zustand darf jedoch nicht dazu verleiten, unter diesen Bedingungen Feldarbeiten durchzuführen. Wird von Mulchsaat mit Lockerung dauerhaft auf Mulchsaat ohne tiefe Lockerung übergegangen, so ist darauf zu achten, dass es durch hohe Bodendrücke

nicht zu „verlassenen Krümen“ kommt und die Bodenfunktionen gestört sind. Generell ist auf eine ausreichende Kalkversorgung der Böden zu achten (DLG, 2008). Der Kalk stabilisiert das Bodengefüge. Durch die Anlagerung von Calcium-Ionen an die Tonteilchen bildet sich eine lockere Kartenhausstruktur (DLG, 1999).

ON-LAND Pflügen

Beim konventionellen Pflügen können durch das Fahren des Traktors in der Pflugfurche bei ungünstiger Bodenfeuchte und durch die Schlupfwirkung schädliche Verdichtungen entstehen. Der Schlupf verursacht eine seitliche Teilchenverschiebung, die zusätzlich zur Erhöhung der Lagerungsdichte und damit eine Zerstörung des Porensystems im Boden bewirkt. Beim ON-LAND Pflug fahren alle Räder auf dem ungepflügten Boden und nicht in der Furche, womit Bodenverdichtungen vermieden werden können.

Anpassung der Radlasten und des Reifeninnendrucks an den Bodenzustand

Im Kontaktbereich Rad-Boden werden Schäden am Gefüge verursacht und die Makroporen durch Aggregatzerstörung verschlossen. Eine dynamische Belastung mit schweren Radlasten bewirkt eine Zunahme der Spannungseinträge mit verstärkter Tiefenwirkung der Belastungsimpulse und eine erhöhte Gefahr der Unterbodenverdichtung. Eine Begrenzung der Bodenbelastung auf den Wert der mechanischen Belastbarkeit (Vorbelastung) kann zusätzliche Bodenverdichtungen vermeiden. Ermittlung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit.

Anpassung der Fruchtfolge an die Standorteigenschaften

Spät räumende Früchte mit termingebundenen Erntezeitpunkten (z.B. Rübe) stellen für Standorte die zur Vernässung neigen (z.B. Pseudogleye, pseudovergleyte Braunerden, Gleye) ein Risiko dar. Durch Anpassen der Fruchtfolge an den jeweiligen Standort kann das Risiko für Bewirtschaftungsmaßnahmen mit möglichen Gefügeschäden wesentlich vermindert werden.

4.5 Sanierung von Bodenverdichtungen durch Tieflockerung

Eine Tieflockerung ist eine Gefügemelioration, also eine Sanierungsmaßnahme welche eine extreme und tiefreichende Verdichtung in Böden zu beseitigen versucht. Sie wird dann angewendet, wenn die Verdichtung eines Bodens so weit vorangeschritten ist, dass eine Auflockerung durch den Pflug nicht mehr möglich ist. Sie führt somit zu einer verminderten Bodendichte und einer verbesserten Durchlässigkeit für Wasser, Luft und Wurzeln.

Ein großes Problem der Tieflockerung ist, dass die Wiederverdichtungsgefahr bei einer anschließenden intensiven Nutzung sehr hoch ist. Eine solche, nach einer Lockerung ausgelöste Verdichtung ist wesentlich stärker als bei einem ungelockerten Boden. Der Grund für diese erhöhte Wiederverdichtungsgefahr liegt in der durch die Tieflockerung hervorgerufenen, extremen Verringerung der natürlichen Eigenstabilität des Bodens, auch in tieferen Schichten durch die erhebliche Erhöhung des

Grobporenvolumens. Hierdurch sind die Korn-zu-Korn Kontaktflächen und somit die Scherwiderstände zwischen den Bodenteilchen stark verringert.

Soll eine Tieflockerung gelingen und zu dauerhaften Bodenverbesserungen führen, sind spezielle Kenntnisse und Erfahrungen unerlässlich. Es ist in jedem Falle zu prüfen, ob die Ziele einer Tieflockerung auch erreicht werden können. Dabei ist im Einzelnen die Lockerungsbedürftigkeit, Lockerungsfähigkeit und Lockerungswürdigkeit zu beurteilen.

Eine Lockerungsbedürftigkeit besteht bei Böden mit Stauwasser, schlechter Durchlüftung, schroffem Übergang von Nass- zur Trockenphase, geringem Speichervermögen für pflanzenverfügbares Wasser, schlechter Durchwurzelbarkeit und Bearbeitbarkeit. Derartige Böden sind lockerungsfähig, wenn der Staukörper mit hoher Lagerungsdichte und geringer Luftkapazität so hoch im Profil ansteht, dass er von dem eingesetzten Lockerungsgerät ausreichend erfasst wird und der Boden den Wassergehalt bei Ausrollgrenze beim Lockerungseinsatz erreicht hat. Schließlich ist die Lockerungswürdigkeit gegeben, wenn die Verbesserung von Durchlüftung und Durchwurzelung sowie die Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität zu einer Verbesserung der Ertragssicherheit führen.

Bei dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist die Lebensdauer der der Lockerung zu berücksichtigen. Diese hängt entscheidend von der Bodenart und von den physikalischen und chemischen Eigenschaften ab, die die Verschlammungsneigung und Dispergierungsneigung des Bodens bedingen. Aber auch acker- und pflanzenbauliche Folgemaßnahmen sind hier zu berücksichtigen.

Die Wirkung der Lockerung ist Abhängig:

- ✓ Lockerungsfähigkeit des Bodens
- ✓ Feuchtezustand während der Lockerung
- ✓ Verwendung geeigneter Bodenstabilisatoren (Kalk)
- ✓ Eignung und Wahl des Lockerungsgerätes
- ✓ fachgerechten Durchführung der Maßnahme

Die Lockerungsfähigkeit wird wesentlich von der Bodenart bestimmt (Abb. 41). Nur die Hälfte der Probenahmestellen befindet sich im lockerungsfähigen Bereich nach dem MERKBLATT ZUR KOMBINIERTEN DRÄNUNG (1976). Sieben der Probenahmestellen mit kritischem Gefügestand liegen innerhalb des lockerungsfähigen Bereiches und vier liegen außerhalb. Böden mit hohen Schluff- und Feinstsandanteilen neigen zur Verschlammung, vor allem, wenn die Böden nur geringe Tongehalte aufweisen. Solche Böden sind für Lockerungsmaßnahmen nach DVWK (1986) ungeeignet (Abb. 42).

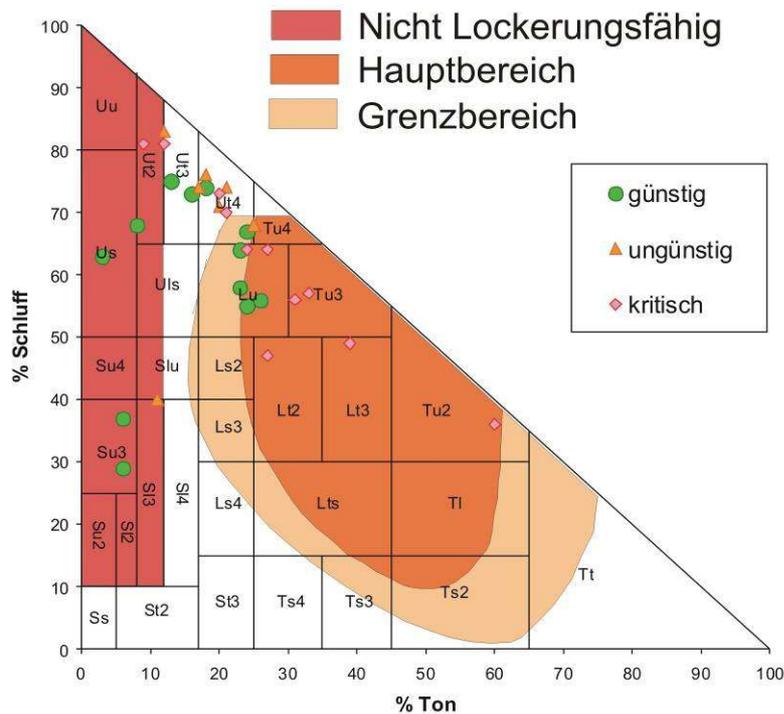


Abb. 42: Korngrößenbereiche der Lockerungsfähigkeit, Probenahmestellen mit dem Gefügestand im Unterboden

Folmaßnahmen nach einer Tieflockerung

Je intensiver die Auflockerung oder gar die Durchmischung des Bodens erfolgt, desto stärker wird das Bodenleben gestört und Bioporen des Bodens vernichtet. Ein aufgebrochenes Gefüge ist sehr stark verdichtungsgefährdet. Mit günstig wirkenden pflanzenbaulichen Maßnahmen muss daher der Boden schnell wieder belebt werden. Um eine anhaltende Verbesserung des Wasser- und Lufthaushaltes zu erzielen, muss also neben einer vorsichtigen Bodenbearbeitung - in den folgenden Jahren Bodenbearbeitung ohne Pflug - vor allem durch pflanzenbauliche Maßnahmen (konservierende Bodenbearbeitung, Mulchsaat, Minimalbodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Klee, Luzerne) der Boden stabilisiert werden.

5 Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-HOC-ARBEITSGRUPPE Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 5. verbesserte Auflage.
- CRAMER, B., 2006: Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Dissertation der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn.
- DIN V 19688, 2001: Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit von Böden aus der Vorbelastung. Deutsches Institut für Normung.
- DLG 1999: DLG Merkblatt 353: Hinweise zur Kalkdüngung. Landesanstalt für Landwirtschaft und Forsten und Gartenbau. Sachsen Anhalt Bernburg. 4. ergänzte und überarbeitete Auflage
- DLG 2008: DLG Merkblatt 344, Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen, Empfehlungen für die Praxis. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan, 1. Auflage.
- DVWK 1986: Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil III. Anwendung der Kennwerte für die Melioration, DVWK- Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 117; Bonn.
- GÄTKE, C.R., 1989: Zum Einfluss des Bodenwassergehaltes auf die pneumatische Leitfähigkeit eines Sandbodens. Arch. Acker-Pflanzenbau u. Bodenkunde 33, 437-443.
- HAÖ, 2005: Digitaler Hydrologischer Atlas Österreichs. Herausgeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- HARLFINGER O. und G. KNEES, 1999: Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung. Mitteilungen. Der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 58, Wien
- HORN, R., 1991: Unterbodenverdichtung – gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen? Wasser & Boden 51 (12), 15-18.
- KAUFMANN M., S. TOBIAS and R. SCHULIN, 2010: Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 573-583.
- KOM(2002) 179 endgültig, 2002: MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT, DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS SOWIE AN DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie
- KOM(2006) 232 endgültig, 2006: Vorschlag für eine RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG.
- LEBERT, M., 2008: Zwischenbericht aus dem UBA-Vorhaben: „Entwicklung eines Prüfkonzepts zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“. Herausgegeben vom Umwelt-Bundesamt, Dessau-Roßlau.

- LEBERT, M., BRUNOTTE, J. und C. SOMMER, 2004: Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Forschungsbericht 200 71 245, UBA-FB 000706.
- MERKBLATT ZUR KOMBINIERTEN DRÄNUNG, 1976: Merkblatt zur Kombinierten Dränung. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München und Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau Freising-München.
- MÜLLER, U., 2004: Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodendatenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). 7. Auflage, Herausgegeben vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- MURER E. J. WAGENHOFER, F. AIGNER & M. PFEFFER, 2004: Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. Schriftenreihe BAW, Band 20, 55-72.
- MURER E., 2009: Bericht über die Überprüfung der Anwendbarkeit von Modellen zur Beurteilung der Bodenverdichtung. Interner Abschlußbericht des Projektes 2291 des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen.
- MURER E. und K. ZEHNER, 2010: Bodenverdichtung und Gewässerschutz. Boden- und Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Bericht 2. Umweltökologisches Symposium. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ).
- PETELKAU, H., 1998: Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtungen. Bodenbearbeitung und Bodenschutz, KTBL - Arbeitspapier 266, 56-79.
- PETELKAU, H., SEIDEL, K. und 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. ZALF Müncheberg, 145 S.
- ROSCOE, K.H., A.N. Schofield und C.P. Wroth, 1958: On the yielding of soils. Geotechnique 8, 22-53.
- SCHEFFER F. und P. SCHACHTSCHABEL, 1998: Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHNEIDER W., NELHIEBEL P., AUST G., WANDL M., und O.H. DANNEBERG, 2001: Die landwirtschaftliche Bodenkartierung in Österreich. Bodenaufnahmesysteme in Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft Heft 62 zugleich eine Publikation des Umweltbundesamtes, Wien 2001.
- DIETZ T. & WEIGELT H., 1997: Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau. Sonderdruck dlz agrarmagazin, München, 2. geänderte Auflage.
- HARRACH T., 1984: Lockerungsbedürftige Böden einfach und sicher erkennen. In: Bodenfruchtbarkeit in Gefahr? Arbeiten der DLG 179, DLG-Verlag, Frankfurt.