

# Bewertung der Unterbodenverdichtung von Ackerböden im österreichischen Alpenvorland

E. Murer, I. Sisák, A. Baumgarten und P. Strauss

## Assessing subsoil compaction on arable land in the alpine forelands of Austria

### 1 Einleitung

Die standortgerechte Bodennutzung und Bodenbewirtschaftung ist ein wesentliches Ziel des Boden- und Gewässerschutzes. Sie ist für die Erhaltung der entsprechenden Bodenfunktionen wichtig und durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen und zu forcieren (KOM (2006) 232 endgültig, 2006; LAUBENGEIGER et al., 2006; MÜLLER, 2004). Die Sackungsverdichtung, die durch Belastung entsteht, wirkt sich besonders in einer Abnahme des Porenvo-

lumens, 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 gesättigte Wasserleitfähigkeit im Boden ab, der gesamte Wassertransport wird gestört (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Die Infiltration von Niederschlagswasser durch den Boden ins Grundwasser ist erschwert, der Oberflächenabfluss erhöht und die Bodenerosion verstärkt (STRAUSS und KLAGHOFER, 2001). Durch eine standortgerechte Ackernutzung ergeben

### Summary

The objective of this study was to assess the subsoil compaction in the Austrian region of Alpenvorland. According to data provided by the Austrian Soil Mapping, the precompression stress value was estimated. At 30 representative sites with management-influenced compaction and long-term participation in the agro-environmental program ÖPUL, soil structure was assessed (good, poor, critical) according to the threshold values of air capacity and saturated hydraulic conductivity. Beneath the plough layer, the subsoil is in critical condition at approximately 30% and in poor condition at 25% of the investigated sites. Statistical analysis showed a significant increase of penetration resistance and subsoil compaction on headland as compared to other parts of the investigated fields. This study confirms the wide range of penetration resistance variability and its dependence on the water and clay content. Without precise knowledge of these frame conditions, penetration resistance should therefore be regarded as less meaningful.

**Key words:** arable land, subsoil compaction, precompression stress value, penetration resistance, Alpenvorland.

### Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Ausmaß der Unterbodenverdichtung im österreichischen Alpenvorland bewertet. Basierend auf den Daten der Österreichischen Bodenkartierung wurde die Vorbelastung der Böden abgeschätzt. Auf 30 repräsentativen Ackerflächen mit verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung und langjähriger ÖPUL-Teilnahme erfolgte eine Beurteilung des Gefügestandes (günstig, ungünstig und kritisch) anhand von Schadensgrenzen über die Schwellenwerte Luftkapazität und gesättigte Wasserdurchlässigkeit. Etwa 30% der untersuchten Standorte weisen einen kritischen und 25% einen ungünstigen Gefügestand im Bereich der Pflugsohle auf. Das Vorgewende weist im Vergleich zur restlichen Feldfläche signifikant höhere Eindringwiderstände und eine signifikant höhere Pflugsohlenverdichtung auf. Die Studie bestätigt die große Variabilität des Eindringwiderstands und seine Abhängigkeit vom Wasser- und Tongehalt. Ohne genaue Kenntnis der Rahmenbedingungen ist die Bestimmung des Eindringwiderstands daher als wenig aussagekräftig anzusehen.

**Schlagworte:** Acker, Unterbodenverdichtung, Vorbelastung, Eindringwiderstand, Alpenvorland.

sich deutliche Verbesserungen in Bezug auf Abflussvolumen und Abflussspitzen eines Hochwassers (AKKERMANN, 2004). Verdichtungen im Oberboden können meist durch eine Bodenbearbeitung mechanisch rückgängig gemacht werden. Unterbodenverdichtungen stellen jedoch ein ernsthaftes Problem dar. Eine Lockerung des Unterbodens ist sehr aufwändig, ihre Wirkung meist kaum von Dauer und auch nicht für jede Bodenart geeignet (Merkblatt zur kombinierten Dränung, 1976; DVWK, 1986). Der Eindringwiderstand (PR) ist eine einfache und rasch auszuführende Methode, um Verdichtungen festzustellen. Als Summengröße hängt er von mehreren Bodeneigenschaften ab (MURER et al., 1991; LIEBHARD et al., 1995). Der Wassergehalt hat dabei den größten Einfluss (MURER et al., 1991; PERDOK et al., 2002; STOCK et al., 2008). So kann der PR unter speziellen Umständen auch für das Monitoring des Wassergehaltes benutzt werden (TOPP et al., 2006). Ein Zusammenhang des PRs mit anderen Bodeneigenschaften konnte nur teilweise nachgewiesen werden. PERDOK et al. (2002) ermittelten eine Korrelation des PR mit der Porosität in künstlich verdichteten Proben, JABRO et al. (2010) zeigten den räumlichen Zusammenhang zwischen PR und der Wasserleitfähigkeit und Porosität. Einige Autoren fanden eine gute Korrelation zwischen PR und der Trockenrohddichte (LOWERY & SCHULER, 1994; UNGER & JONES, 1998; FABIOLA et al., 2003). STOCK und DOWNES (2008) zeigten in einem Modellversuch den Zusammenhang zwischen PR und der organischen Substanz, GITAU et al. (2006) in Feldmessungen mit dem Tongehalt. Aufgrund der großen Variabilität des PR ist es jedoch nicht immer möglich, einen Zusammenhang mit anderen Kennwerten nachzuweisen, wie das von LOWERY und SCHULER (1994) für Wasserleitfähigkeit oder von UNGER (1996) für Wasserleitfähigkeit und Trockenrohddichte berichtet wird. Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Bestandsaufnahme des Verdichtungsgrades verdichtungsgefährdeter Ackerstandorte mit langjähriger ÖPUL-Teilnahme, basierend auf dem PR und weiterführenden Untersuchungen im Labor.

## 2 Methodik

### 2.1 Auswahl der Probenahmestellen

Als Projektgebiet wurde das Hauptproduktionsgebiet Alpenvorland gewählt (Abb. 1). Für die Probenahme wurden landwirtschaftliche Betriebe mit verdichtungsrelevanter Bewirtschaftung (Rüben- und Maisanbau) auf Basis von

INVEKOS-Daten ausgesucht. Zielvorgabe war, die wesentlichen Hauptbodentypen (Auböden, Braunerden, Gleye, Pseudogleye und Untypische Böden) im Projektgebiet zu erfassen. Aufgrund dieser Vorgaben wurden 30 Ackerstandorte ausgewählt (Abb. 1). Die Landwirte wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer verdichtungsrelevanten Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Pflugverzicht, Direktsaat, Tieflockering, Reifendruckregelanlage, Erntemaschinen, Fruchtfolge, Häufigkeit der Befahrung) befragt.

### 2.2 Bodenphysikalische Messmethoden

Die Vorbelastung (DIN V 19688, 2001) schätzt die Empfindlichkeit des Bodens für zusätzliche Verdichtung ab und beschreibt die Effekte der Gefügebildung, verursacht durch geogene und pedogene Prozesse, auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Ackerbodens. Sie ist vorrangig im Bereich unmittelbar unterhalb der bearbeiteten Bodenschicht einsetzbar (HORN, 1999 und LEBERT, 2010). Die Datengrundlage für die Bewertung der Vorbelastung lieferte die Österreichische Bodenkartierung (eBOD, 2010). Die bodenphysikalischen Kennwerte (Korn- und Porengrößenverteilung, gesättigte Wasserdurchlässigkeit sowie Feststoff- und Trockenrohddichte) wurden nach den ÖNORMEN der Serie „Boden als Pflanzenstandort“ bestimmt. Die Eindringwiderstandsmessungen (PR) wurden mit einem Penetrolger (Spitzendurchmesser 15,95 mm, Spitzenwinkel 60°) ausgeführt. Diese Eindringwiderstandsmessungen erfolgten am Feld und im Vorgewende bis zu einer Tiefe von 80 cm in Tiefenstufen von 1 cm in zwei Reihen mit jeweils 10 Messungen. Aus der Krume und dem Unterboden (Boden unterhalb der bearbeiteten Bodentiefe) wurden jeweils 6 Stechzylinderproben mit einem Volumen von 200 cm<sup>3</sup>, aus der Pflugsohle im Bereich mit dem höchsten PR 9 Stechzylinderproben pro Standort entnommen (ÖNORM L1051, 2005). Insgesamt ergab dies also eine Probezahl von 450 Stechzylinderproben.

### 2.3 Bewertung des Gefügestandes

Ein Bodengefügeschaden im Unterboden von bindigen Böden infolge nutzungsbedingter Verdichtung ist nach LEBERT et al. (2004) dann gegeben, wenn die Schwellenwerte für die Luftkapazität von 5 % und die gesättigte Wasserdurchlässigkeit von 10 cm·d<sup>-1</sup> unterschritten werden. Zur Bewertung der Gefügeeigenschaften ist eine abgestufte

Klassifizierung sinnvoll. Die Beurteilung des Gefügezustandes wurde anhand der Schadensgrenzen nach SCHÄFER (2007) wie folgt vorgenommen:

- günstig: deutlich über der Schadensgrenze
- ungünstig: nahe der Schadensgrenze
- kritisch: überwiegend oder zur Gänze im Schadensbereich

## 2.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS (SPSS inc., 2007). Die Unterschiede der Zielvariablen Bodentyp und Texturgruppe wurden mit einfaktoriel-ler ANOVA untersucht. Beim Vergleich von nur zwei Variablen (Pflugsohle – unter Pflugsohle oder Feld – Vorgewende) wurde der T-Test und bei mehreren Mittelwerten (alle untersuchten Horizonte) der F-Test und der Duncan-Test durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen den Variablen wurden mit einfacher oder multipler

schrittweiser Regression untersucht. Um die PR-Messungen mit den bodenphysikalischen Messungen vergleichen zu können, wurden die PR-Messungen auf die jeweilige Entnahmetiefe der Stechzylinder (Höhe 5 cm) gemittelt. Wenn die Tiefe der Probenahme in die statistische Analyse einbezogen wurde, wurde die mittlere Tiefe der Probenahme der Stechzylinderprobe verwendet.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vorbelastung

Etwas mehr als die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Böden des Projektgebiets besitzen eine sehr hohe bis hohe Vorbelastung, etwa ein Drittel der Fläche eine mittlere und ca. 10 % der Ackerflächen eine geringe Vorbelastung. Nur 2,5 % der landwirtschaftlich genutzten Böden sind sehr gering vorbelastet (Abb. 1).

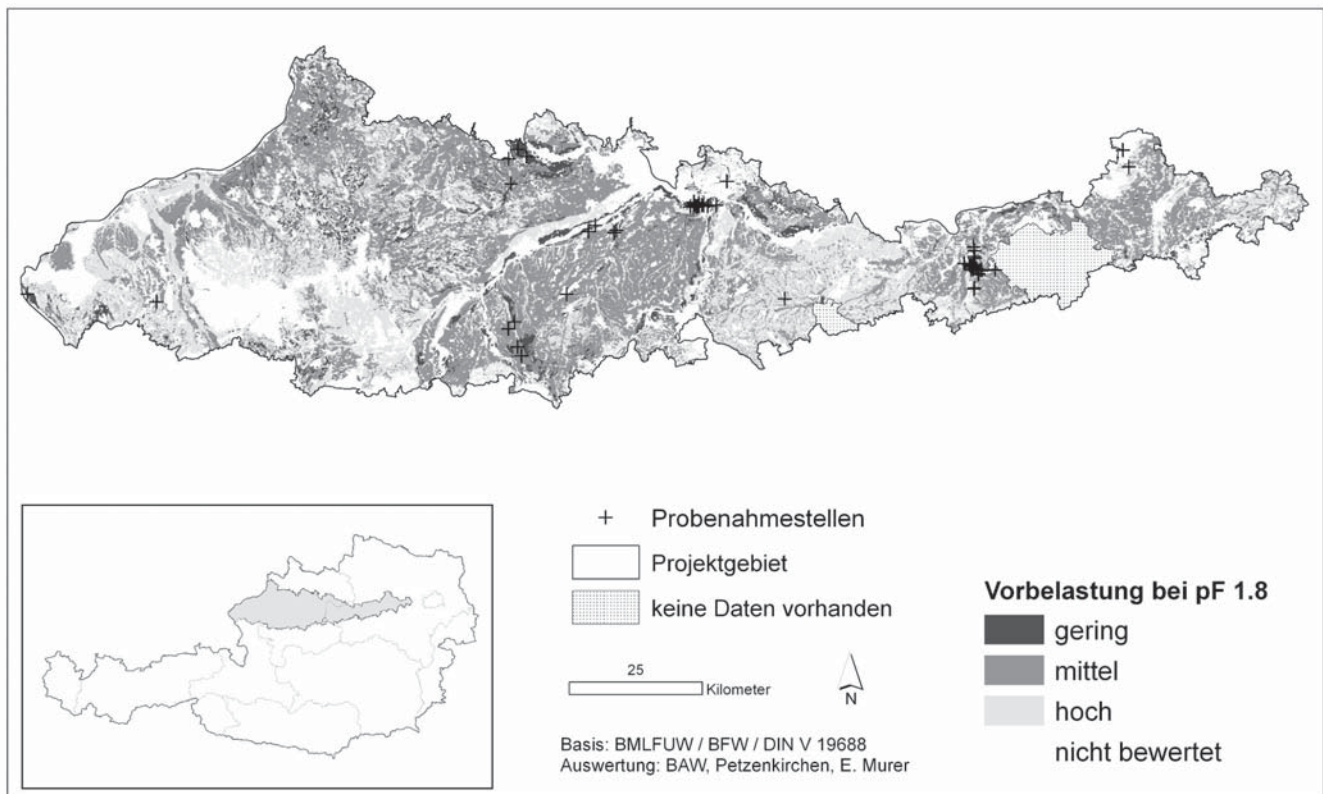


Abbildung 1: Verbreitung der geschätzten Vorbelastung bei Feldkapazität im Unterboden der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden im Projektgebiet

Figure 1: Precompression stress at field capacity in the subsoil of the mineral soils under agricultural use in the project area

### 3.2 Gefügezustand

Die 30 Probenahmestellen stellen eine punktweise und von vielen Faktoren beeinflusste Erhebung dar. Ein Vergleich der Bodenarten in der Pflugsohle der Probenahmestellen mit den Daten der Bodenkartierung zeigte allerdings, dass die Probenahmestellen eine ähnliche Verteilung der Bodenarten wie die gesamten landwirtschaftlich genutzten Böden des Projektgebietes aufwiesen (Tab. 1).

Tabelle 1: Anteil der Bodentextur in der Pflugsohle des Projektgebietes und der untersuchten Standorte

Table 1: Ratio of texture classes in the plough pan of the project area and the sampling sites

Bodenart nach AD-HOC-AG BODEN (2005)	Bodenkartierung (%)	Probenahmestellen (%)
Ut4 (stark toniger Schluff)	25	23
Lu (schluffiger Lehm)	16	20
Ut3 (mittel toniger Schluff)	9	13
Tu3 (mittel schluffiger Ton)	8	7
Summe	58	63

Von den 30 untersuchten Standorten unterschritten 8 Standorte sowohl den Schwellenwert für die Luftkapazität als auch für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit nach LEBERT et al. (2004). Acht Standorte hingegen zeigten eine gesättigte Wasserdurchlässigkeit unterhalb des Schwellenwertes, jedoch eine ausreichende Luftkapazität. An zwei Standorten lag die Luftkapazität unter dem Schwellenwert, aber die gesättigte Wasserdurchlässigkeit darüber (Abbildung 2). Der Schwellenwert von  $10 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit in der Pflugsohle wurde von 60 % der 30 Probenahmestellen, der Wert  $1 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$  immerhin noch von mehr als 25 % unterschritten.

Nach KAUFMANN et al. (2010) trennt der Schwellenwert  $1,7 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  den optimalen Bereich der effektiven Lagerungsdichte (RENGER et al., 2008) vom limitierenden Bereich für das Wurzel- und Pflanzenwachstum. Eine Zusammenschau zwischen der Bewertung des limitierenden Bereiches der effektiven Lagerungsdichte und dem Gefügezustand in der Pflugsohle der Probenahmestellen ergab keine Konformität, es traten in allen drei Gefügezuständen effektive Lagerungsdichten über dem Schwellenwert von  $1,7 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$  auf (Abb. 3).

Die Probenahmestellen mit „günstigem Gefügezustand“ in der Pflugsohle waren vor allem jene mit einem Tongehalt unter 30 % und höherem Sandgehalt (Abb. 4 und 5). In der Klasse mit günstigem Gefügezustand fanden sich alle Bo-

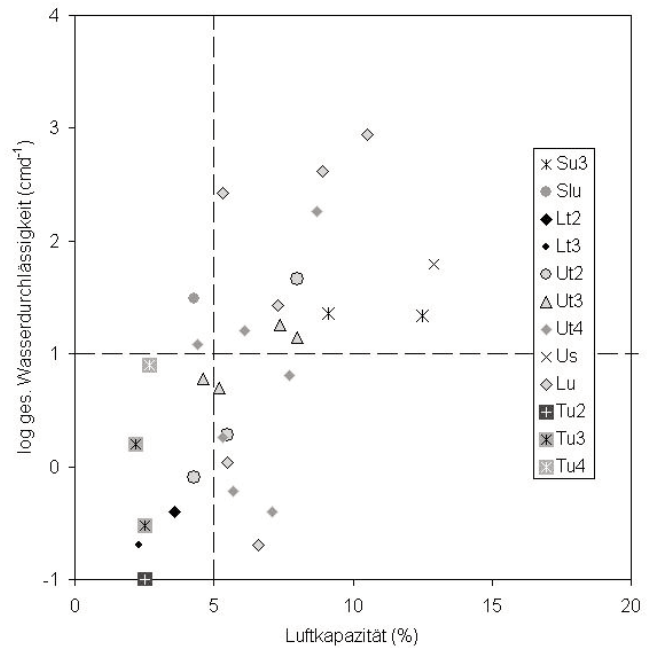


Abbildung 2: Bewertung auf Bodenschadverdichtung in der Pflugsohle anhand bodenphysikalischer Indikatoren mit Schwellenwerten nach LEBERT et al. (2004)

Figure 2: Evaluation of damaging compaction in the plough pan with threshold values of soil physical tests (LEBERT et al., 2004)

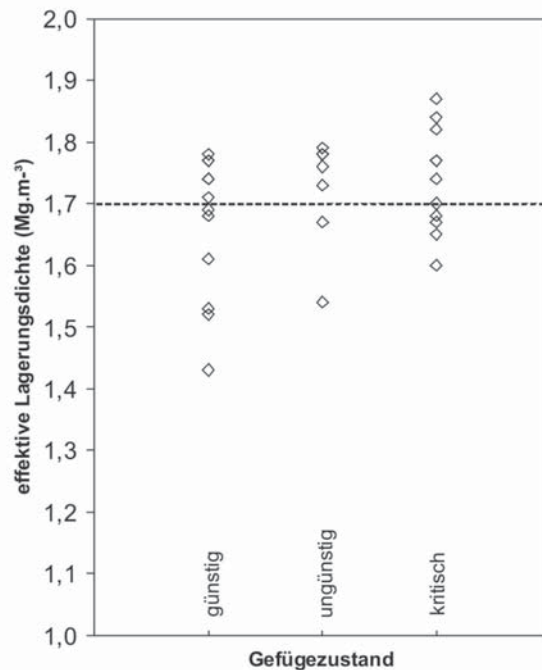


Abbildung 3: Gegenüberstellung der effektiven Lagerungsdichte zum Gefügezustand der Pflugsohlen der Probenahmestellen

Figure 3: Comparison of the effective density to the aggregate status of the samples in the plough pan

dentypen, vor allem aber die Auböden. In der Klasse „ungünstiger Gefügestand“ dominieren die Pseudogleye, in der Klasse „kritischer Gefügestand“ fanden sich wieder sämtliche vorgefundenen Bodentypen (Abb. 5).

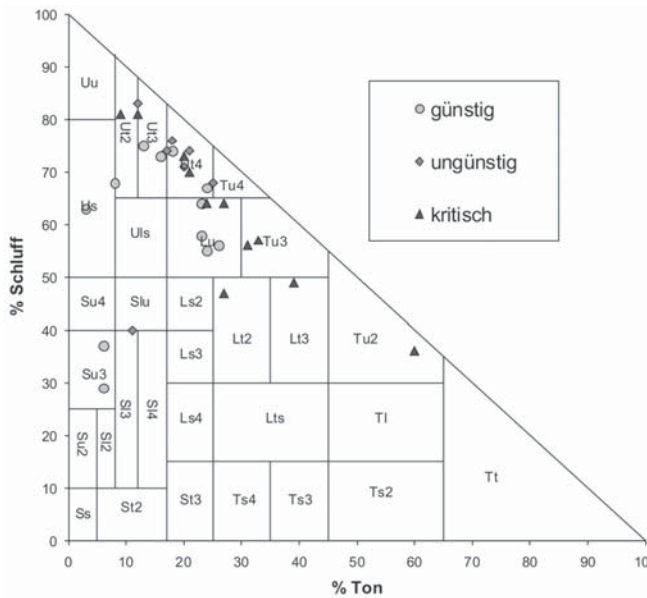


Abbildung 4: Bodenart in der Pflugschleife der Probenahmestellen mit dem Gefügestand  
 Figure 4: Soil texture classes of samples in the plough pan and their aggregate status

### 3.3 Bodenphysikalische Parameter – Bodentypen

Die Auswertung der Varianzanalyse (Tab. 2) zeigte, dass sich die Auböden von den anderen Bodentypen durch niedrige Tongehalte und die höchsten Sand- und Kalkgehalte in der Pflugschleife unterscheiden. Die Auböden sind auch lockerer gelagert, sie besitzen sowohl eine geringere Trockenrohdichte als auch effektive Lagerungsdichte. Die Pseudogleye zeigten zumeist einen höheren Schluff- und niedrigeren Sandgehalt, Parabraunerden haben einen geringeren Sandanteil als die anderen Bodentypen. Der hohe Humusgehalt der Gleye spiegelt sich in der niedrigeren Feststoffdichte wider. Durch die unterschiedliche Textur und Lagerung der Auböden ließen sich auch einige Unterschiede in der Porengrößenverteilung bei einem Matrixpotenzial von pF 1,8, 2,5 und 4,2 erklären. Die Parameter nutzbare Feldkapazität (nFK), gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Kf) und Eindringwiderstand (PR) unterschieden sich wegen der großen Streuung der Einzelwerte nicht signifikant.

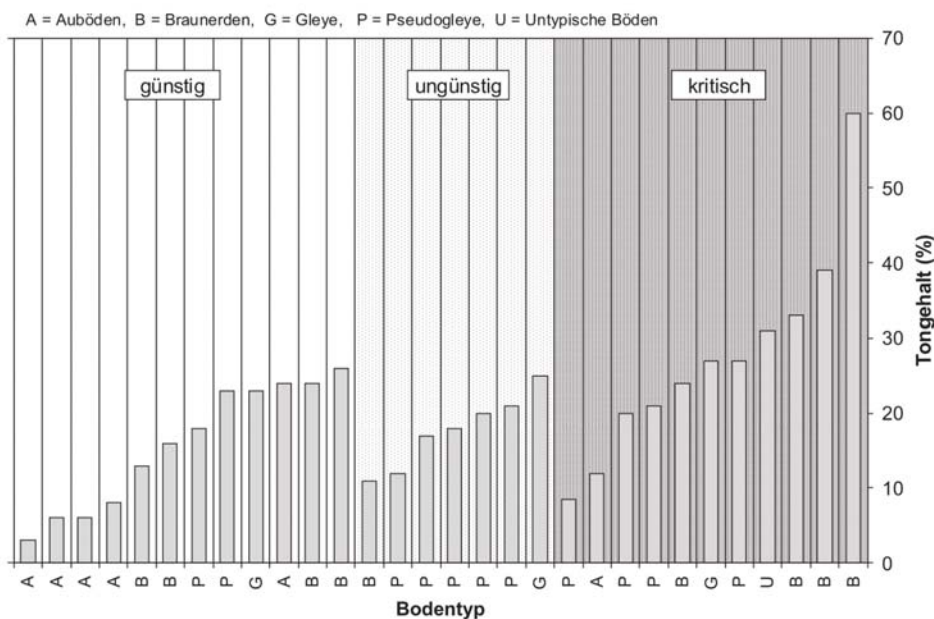


Abbildung 5: Bodentyp (EBOD, 2010) und Tongehalt (Ad-hoc-AG Boden, 2005), in der Pflugschleife und deren Gefügestand (LEBERT et al., 2004)  
 Figure 5: Soil type (EBOD, 2010) and clay content (Ad-hoc-AG Boden, 2005) of samples in the plough pan and their aggregate status (LEBERT et al., 2004)

Tabelle 2: Einfaktorielle Varianzanalyse zwischen Hauptbodentypen mit Duncan-Test,

$\rho_s$  – Feststoffdichte,  $\rho_d$  – Rohdichte trocken, eLD – effektive Lagerungsdichte, PV – Porenvolumen, WG – Wasseranteil bei pF 1,8, 2,5, 4,2, LK – Luftkapazität bei pF 1,8 und 2,5, nFK – nutzbare Feldkapazität, Kf – gesättigte Wasserleitfähigkeit, PR – Eindringwiderstand

Table 2: Analysis of variance between main soil types with Duncan test,

$\rho_s$  – particle density,  $\rho_d$  – bulk density, eLD – effective density, PV – total porosity, WG – soil-water content at pF 1,8, 2,5, 4,2, LK – air filled porosity at pF 1,8 and 2,5, nFK – plant available capacity, Kf – saturated water conductivity, PR – cone resistance

Parameter	Einheit	Auböden	Braunerden	Gleye	Parabraun- erden	Pseudo- gleye
Ton	%	10 a	26 b	23 b	26 b	22 b
Schluff	%	57 a	59 a	55 a	63 ab	70 b
Sand	%	33 c	15 ab	22 b	11 a	8 a
Humus	%	1,9 ab	1,6 a	2,5 b	1,7 ab	1,5 a
CaCO <sub>3</sub> *	%	26	2	0	0	0
$\rho_s$	Mg·m <sup>-3</sup>	2,72 c	2,71 bc	2,66 a	2,69 b	2,71 bc
$\rho_d$	Mg·m <sup>-3</sup>	1,47 a	1,51 ab	1,47 a	1,58 b	1,55 ab
eLD	Mg·m <sup>-3</sup>	1,55 a	1,75 bc	1,68 b	1,83 c	1,76 bc
PV	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	46 b	45 ab	45 ab	41 a	43 ab
WG (pF 1,8)	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	33 a	38 ab	40 b	35 ab	36 ab
WG (pF 2,5)	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	30 a	37 b	39 b	34 ab	35 ab
WG (pF 4,2)	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	11 a	18 b	20 b	17 b	18 b
LK (pF 1,8)	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	13 b	7 a	4 a	7 a	7 a
LK (pF 2,5)	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	17 b	8 a	6 a	8 a	8 a
nFK	m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup>	22 a	20 a	20 a	18 a	18 a
Kf Mittelwert	cm·d <sup>-1</sup>	264 a	122 a	406 a	267 a	120 a
Kf Median	cm·d <sup>-1</sup>	63 a	86 a	90 a	152 a	49 a
PR Feld	MPa	1,80 a	1,78 a	1,78 a	2,06 a	1,98 a
PR Vorgewende	MPa	1,84 a	1,99 a	1,92 a	2,18 a	2,17 a

pF =  $\log(-\psi)$ ; the soil water matric potential in cm H<sub>2</sub>O)

\* Duncan-Test nicht durchgeführt

### 3.4 Beziehung des Eindringwiderstandes (PR) zu anderen Parametern

Im Rahmen einer schrittweisen Regression zeigten nur der Tongehalt und der Wasseranteil einen signifikanten Zusammenhang, sodass sich letztendlich eine Funktion der Form  $PR = 3,92 + 0,02 \cdot \text{Ton} - 0,06 \cdot \text{Wasser}$  ( $R^2 = 0,33$ ) ergab. Der steigende Tongehalt erhöht den PR (vgl. auch GITAU et al., 2006), der steigende Wassergehalt verringert den PR.

Der PR im Vorgewende ist generell höher als jener im Feld (Tab. 3 und Abb. 6), allerdings ist dieser Zusammenhang nur schwach ausgeprägt.

Tabelle 3 enthält den Vergleich des mittleren PRs zwischen Feld und Vorgewende für den Krumenbereich, den Pflugsohlenbereich sowie den Bereich unterhalb der Pflugsohle. Dabei zeigen sich im Bereich unter der Pflugsohle ähnliche PR.

Unterschiede des PRs zwischen Feld und Vorgewende können durch die unterschiedliche Bewirtschaftungsintensität erklärt werden. Im Vorgewende wurden keine weiteren bodenphysikalischen Messungen durchgeführt, daher wur-

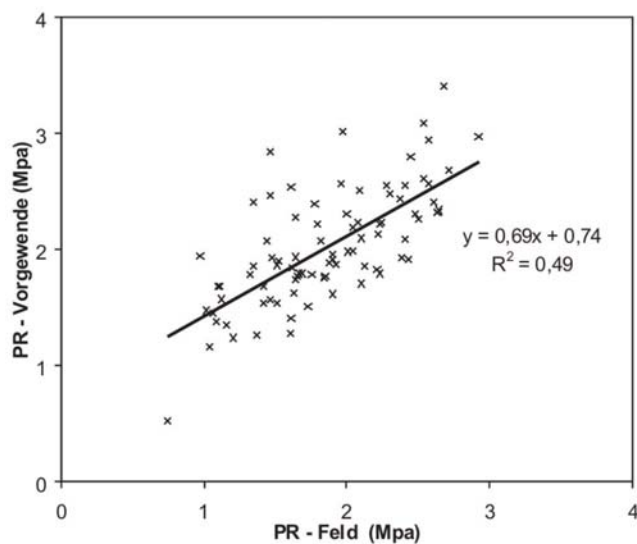


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Eindringwiderstand (PR) am Feld und im Vorgewende

Figure 6: Relationship between penetration resistance (PR) in field and headland

Tabelle 3: Eindringwiderstand (PR) in Feld und Vorgewende in verschiedenen Bodentiefen (Mittelwert und Standardabweichung)

Table 3: Penetration resistance (PR) in the field and headland in different soil depths (mean and standard deviation)

		PR Feld (MPa)	PR Vorgewende (MPa)
Mittelwert und Standard- abweichung	Krume	1,42 (± 0,45)	1,67 (± 0,53)
	Pflugsohle	2,04 (± 0,45)	2,29 (± 0,59)
	unter Pflugsohle	2,10 (± 0,35)	2,06(± 0,40)

den sie auch nicht in die Regressionsanalyse einbezogen. Mit zunehmender Tiefe vermindert sich die Differenz des PRs vom Feld und vom Vorgewende (Tab. 4). Die durchschnittliche Anzahl der Überfahrungen und der Anteil an Getreide und Raps in der Fruchtfolge erhöht die Differenz des PRs signifikant. Diese drei Variablen erklären 40 % der Variabilität der Differenzen zwischen Vorgewende und Feld.

Tabelle 4: Regressionsgleichung für die Differenzen zwischen dem Eindringwiderstand (PR) am Feld und im Vorgewende

Table 4: Regression equation predicting the difference of the penetration resistance (PR) between field and headland

$R^2 = 0,40$	Regressions- koeffizient	Standard- fehler	Signifikanz
Tiefe (m)	-0,974	0,242	0
Überfahrung	0,059	0,017	0,001
Getreide + Raps Anteil	0,006	0,002	0,003

Im nächsten Schritt wurden die Hauptbodentypen (Braunerde und Pseudogleye) und eine Gruppe nach dem Korn-

größensbereich (16–27 % Ton und 64–76 % Schluff) gebildet und die Messwerte zwischen Pflugsohle und unter der Pflugsohle innerhalb der Gruppe mit der T-Probe verglichen (Tab. 5). Die Gruppe der Hauptbodentypen ist hinsichtlich ihrer Textur inhomogen, daher ist die Differenz zwischen dem Tongehalt in und unterhalb der Pflugsohle signifikant. Die Feststoffdichte und der Humusgehalt sind negativ korreliert, dementsprechend nimmt die Feststoffdichte unterhalb der Pflugsohle zu. Das Porenvolumen ist in der Pflugsohle niedriger als im Bodenbereich darunter, was ein eindeutiger Indikator für Verdichtung ist. Für die Gruppe mit dem vordefinierten Korngrößensbereich fanden sich signifikante Unterschiede in der Luftkapazität bei einem Matrixpotenzial von pF 1,8 und 2,5. Die beobachteten Differenzen der pH-Werte lassen sich mit der Verlagerung von Kalk und Kationen in die Tiefe erklären.

Der Eindringwiderstand nimmt üblicherweise mit der Eindringtiefe zu (UNGER und JONES, 1998). Es wurden jedoch bei den Braunerden und Pseudogleyen in der Pflugsohle signifikant höhere Eindringwiderstände als unterhalb gefunden, obwohl der Tongehalt in der Pflugsohle niedriger ist. Die Streuung ist im Vorgewende in der Pflugsohle signifikant höher als darunter. Zwischen Vorgewende und Feld gibt es keine signifikanten Differenzen im Eindringwiderstand unter der Pflugsohle (Tab. 3). Allerdings waren aber der PR in der Pflugsohle erhöht (Tab. 5). Die Pflugsohle ist gegenüber dem Unterboden signifikant dichter gelagert (verringertes Porenvolumen, verringerte Luftkapazität, erhöhter PR). Diese signifikanten Unterschiede können auf die Verdichtung zurückgeführt werden.

Tabelle 5: Signifikante Unterschiede mittels T-Probe zwischen Pflugsohle und dem Horizont unter der Pflugsohle für Gruppen

Table 5: Significant differences with T-test between plough pan and under the plough pan for groups

Parameter	Einheit	Bodentypen Braunerden und Pseudogleye				Korngrößensbereich 16–27 % Ton und 64–76 % Schluff			
		n	Mw Pflugsohle	n	Mw unter Pflugsohle	n	Mw Pflugsohle	n	Mw unter Pflugsohle
Ton	(%)	21	23,00	21	29,6				
Feststoffdichte	Mg m <sup>-3</sup>	21	2,70	21	2,72	13	2,69	10	2,72
Humus	(%)	21	1,48	21	0,72	13	1,46	10	0,77
pH CaCl <sub>2</sub>	–					13	6,22	10	6,71
Porenvolumen	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	23	42,3	21	44,3				
LK (pF 1,8)	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					13	6,4	10	8,8
LK (pF 2,5)	(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					13	8,0	10	10,0
PR Mittelwert Vorgewende	MPa	23	2,38	21	2,12				
PR Stdabw Vorgewende	MPa	23	1,18	21	0,76	13	1,19	10	0,71
PR Differenz (Vorgew.-Feld)	MPa	23	0,37	21	-0,03	13	0,39	10	0,07

LK = Luftkapazität, PR = Eindringwiderstand, n = Anzahl, Mw = Mittelwert, Stdabw = Standardabweichung

Es wurde auch die Wirkung der verschiedenen Bewirtschaftungsvariablen auf die Bodenkennwerte ausgewertet. In den meisten Fällen gab es keinen signifikanten Zusammenhang, lediglich die Anwendung von Wirtschaftsdünger zeigte einen signifikanten Effekt auf die mittlere gesättigte Wasserdurchlässigkeit (mit Wirtschaftsdüngeranwendung:  $170 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; ohne Wirtschaftsdüngeranwendung:  $23 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $p = 0,031$ ).

#### 4 Schlussfolgerungen

Schädliche Unterbodenverdichtungen wurden in sämtlichen Hauptbodentypen des österreichischen Alpenvorlandes gefunden. Ausschlaggebend für die Einstufung war vor allem die sehr geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit. Die hohe Variabilität der bodenphysikalischen Messwerte und besonders der PR wurden bestätigt (Tab. 3). Nur der Wasser- und Tongehalt sind signifikante Einflussvariablen für den PR. Der Wassergehalt ist zeitlich und räumlich sehr variabel. Im Gegensatz dazu ist der Tongehalt zeitlich sehr beständig, obwohl seine räumliche Variabilität sehr groß sein kann. Die direkte Wirkung aller anderen untersuchten Kennwerte, die mit der Verdichtung in einem engen Zusammenhang stehen, war nicht nachzuweisen. Dies wurde durch die Variabilität von Wasser- und Tongehalt überlagert. IMAZ et al. (2010) haben gezeigt, dass der PR ein potenziell sensibler Indikator für die physikalische Bodenqualität sein kann. Trotz dieser Ergebnisse fanden GRUNWALD et al. (2001), dass der PR nur eingeschränkt für den Nachweis von verschiedenen geologischen Schichten wie eiszeitliche Ablagerungen oder umgesiedelten Löß benutzt werden kann. Die vorliegende Studie bestätigt die große Variabilität des PRs und seine Abhängigkeit vom Wasser- und Tongehalt. PR-Messungen ohne genaue Kenntnis der Rahmenbedingungen sind daher als wenig aussagekräftig anzusehen. Ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt sollte den Ursachen der Variabilität gewidmet werden.

#### Literaturverzeichnis

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.

- AKKERMANN, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. Dissertation der Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie.
- DIN V 19688 (2001): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit von Böden aus der Vorbelastung. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- 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.
- EBOD (2010): Österreichische Bodenkartierung in digitaler Form. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien.
- FABIOLA, N., B. GIAROLA, A.P. DA SILVA, S. IMHOFF and A.R. DEXTER (2003): Contribution of natural soil compaction on hardsetting behaviour. *Geoderma*. (13)1-2, 95–108.
- GITAU, A.N., L.O. GUMBE AND E.K. BIAMAH (2006): Influence of soil water on stress-strain behaviour of a compacting soil in semi-arid Kenya. *Soil & Tillage Research*. (89) 2, 144–154.
- GRUNWALD, S., B. LOWERY, D.J. ROONEY and K. MCSWEENEY (2001): Profile cone penetrometer data used to distinguish between soil materials. *Soil & Tillage Research* (62)1–2, 27–40.
- HORN R. (1999): Unterbodenverdichtung – gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen? *Wasser & Boden* 51, 12, 15-19.
- IMAZ, M. J., I. VIRTO, P. BESCANSÀ, A. ENRIQUE, O. FERNANDEZ-UGALDE and D.L. KARLEN (2010): Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil & Tillage Research* (107)1, 17–25.
- JABRO, J. D., W.B. STEVENS, R.G. EVANS, and W.M. IVERSEN (2010): Spatial variability and correlation of selected soil properties in the Ap horizon of a CRP grassland. *Applied Engineering in Agriculture*, (26)3, 419–428.
- 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 (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 (von der Kommission vorgelegt), Brüssel.



- LAUBENGEIGER, K., D. REIDT, K. MÜLLER (2006): Bodenverdichtung und Tieflockerung. Theorie, ökologische Relevanz, Bewertungsmethoden und Gegenmaßnahmen. Eberhard-Karls Universität Tübingen, Geographisches Institut, HS Bodenschutz SS06.
- LEBERT, M., J. BRUNOTTE und C. SOMMER (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Texte Umweltbundesamt (Hrsg.) 46/04, Berlin.
- LEBERT, M. (2010): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Texte Umweltbundesamt (Hrsg.) 52/10, Berlin.
- LIEBHARD, P., J. EITZINGER & E. KLAGHOFER (1995): Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). Die Bodenkultur, 46, 1, 1–18.
- LOWERY, B. and R.T. SCHULER (1994): Duration and effects of compaction on soil and plant-growth in Wisconsin. Soil & Tillage Research, (29) 2–3, 205–210.
- 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. Arbeitshefte Boden, Heft 2004/2, Hannover.
- MURER, E., E. KLAGHOFER und J. SCHWARZ (1991): Ein EDV-Programm zur Auswertung der Eindringwiderstände aus Penetrometermessungen. Wasser und Boden, 8, 495–499.
- ÖNORM L 1051 (2005): Physikalische Bodenuntersuchungen. Probenahme unter Beibehaltung der Bodenstruktur (Stechzylinder-methode). Austrian Standards plus GmbH, Wien.
- PERDOK, U.D., B. KROESBERGEN and W.B. HOOGMOED (2002): Possibilities for modelling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. Soil & Tillage Research (65)1, 61–75.
- RENGER, M., K. BOHNE, M. FACKLAM, T. HARRACH, W. RIEK, W. SCHÄFER, G. WESSOLEK und S. ZACHARIAS (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. www.soil-protection.de (17.08.2011)
- SCHÄFER, W. (2007): Wenn dem Boden die Luft ausgeht. Verdichtung Kriterien zur Bewertung. Landesamt für Bergbau Energie und Geologie. Persönliche Mitteilung.
- SCHEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SPSS Inc. (2007): SPSS Base 16.0 – Benutzerhandbuch. Chicago, IL 60606-6412, USA.
- STOCK, O., N.K. DOWNES and K. NIGEL (2008): Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. Soil & Tillage Research (99)2, 191–201.
- STRAUSS, P. und E. KLAGHOFER (2001): Die Wirkung von Bodenerosion auf Bodeneigenschaften und Bodenproduktivität. Die Bodenkultur. Band 52, Heft 2.
- TOPP, G.C., D.R. LAPEN, M.J. EDWARDS and G.D. YOUNG (2006): Laboratory Calibration, In-Field Validation and Use of a Soil Penetrometer Measuring Cone Resistance and Water Content. Vadose Zone Journal (2)4, 633–641.
- UNGER, P.W. (1996): Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. Soil & Tillage Research (37)1, 67–75.
- UNGER, P.W. und O.R. JONES (1998): Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. Soil & Tillage Research (45)1–2, 39–57.

## Autorenanschrift

**Dr. Andreas Baumgarten**, Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungswissenschaften GmbH, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien, Österreich

**DI Erwin Murer**, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich.

**Dr. István Sisák**, Universität für Pannonia, Georgikon Fakultät Deák F. Str. 16, 8360 Keszthely, Ungarn.

**DI Dr. Peter Strauss**, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen, Österreich.

## Corresponding author

DI Erwin Murer: erwin.murer@baw.at

Eingelangt am 24. August 2011

Angenommen am 21. Februar 2012