

Einfluss der Bewirtschaftung auf die Lagerungsdichte und den Eindringwiderstand von Dauergrünlandböden des Salzburger Flachgaaes



Masterarbeit

im Rahmen des Studiums Angewandte Pflanzenwissenschaften

vorgelegt von

Philipp Gehmacher, Bsc.

betreut durch

Mag. Dr. Andreas Bohner
Priv.-Doz. Dr. Gernot Bodner

November 2016



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, November 2016

Danksagung

Ich möchte mich in an erster Stelle in aller Form bei meinen Betreuern Priv.-Doz. Dr. Gernot Bodner und Mag. Dr. Andreas Bohner für die kompetente und hilfsbereite Betreuung bedanken. Beide haben maßgeblich zu meinem Interesse an der Thematik beigetragen.

Auch bedanke ich mich herzlich bei Uki und Anja, die mir die fachgerechte Auswertung meiner Bodenproben ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mein Studium ermöglicht haben und mich fortwährend unterstützen wo sie nur können.

Weiters gilt mein besonderer Dank meiner langjährigen Wegbegleiterin Lofi, die meine Arbeit immer wieder spitzfindig korrigiert hat und mich während meiner geistigen und körperlichen Abwesenheit auf unserem gemeinsamen Hof tatkräftig vertreten hat.

Kurzfassung

Die Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung ist mit einer häufigen Befahrung sowie dem Einsatz schwerer Maschinen und somit einer erhöhten Bodenbelastung verbunden. Dauergrünlandböden erfüllen eine Vielzahl an Funktionen, die von Schadverdichtungen beeinträchtigt werden können. Dennoch fanden sie im Bereich des Bodenschutzes bisher wenig Beachtung. Nicht zuletzt deshalb sind elementare Kenngrößen wie die Lagerungsdichte für österreichische Dauergrünlandböden weitgehend unbekannt. Diese stellt ein Maß für die Dichte des Bodens dar und gibt indirekt Auskunft über den verfügbaren Porenraum im Boden. Die Lagerungsdichte ist auch essentiell für stoffliche Berechnungen wie die des Kohlenstoffvorrats im Boden. In dieser Arbeit wurden die bodenphysikalischen Parameter *Lagerungsdichte* und *Eindringwiderstand* von 19 unterschiedlich genutzten Grünlandstandorten im Salzburger Flachgau erhoben und mit bodenchemischen Analysen (pH-Wert, organischer C-Gehalt und N-Gehalt) und Vegetationsaufnahmen ergänzt und verglichen. Die Ergebnisse zeigten signifikant erhöhte Lagerungsdichten und Eindringwiderstände unter beweidetem und stark befahrenem Grünland. Insbesondere wurden unterhalb der Hauptwurzelzone in einer Tiefe von 10 bis 20 cm bewirtschaftungsbedingte Verdichtungen festgestellt, die das Wurzelwachstum und andere Prozesse im Boden negativ beeinflussen können. Im Oberboden wiesen die untersuchten Flächen generell lockere Lagerungen auf, die vorwiegend auf die hohen Humusgehalte und die große Wurzelmasse von Dauergrünlandböden zurückzuführen sind.

Abstract

Intensification of grassland farming is associated with high field traffic intensities and the use of heavy machinery, hence it is related to an increased burden on soil. Up until now, few studies have investigated on the impacts and consequences of grassland management regimes on physical soil properties and processes, despite the fact that grassland soils are expected to fulfill various functions, that could be endangered or impeded by harmful soil compactions. Bulk density values of Austrian grassland soils are hardly known, but crucial in terms of determining soil chemical composition (e.g. organic C content). Bulk density values also provide information about the state of compaction and the available pore volume of the soil. In this study, measurement of soil physical parameters (bulk density, penetration resistance) were combined with measurements of volumetric water content and soil chemical analysis (pH, organic C and N) as well as vegetation survey. Research was conducted in the study area of pre-alpine, grassland dominated region of Salzburg (Flachgau) where various grassland management regimes can be found. Results showed significantly increased bulk densities and penetration resistances under grazed and heavily trafficked grassland, particularly underneath the main rooting zone in a depth of 10-20 cm. Topsoil bulk densities were found to be generally low, due to high organic carbon content and root mass.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
1.1 Forschungsfragen und Ziele	2
1.2 Arbeitshypothesen	2
1.4 Aktueller Forschungsstand	3
1.4.1 Bodenbelastung.....	3
1.4.2 Wirkung und Verteilung von Bodendruck.....	4
1.4.3 Verdichtungsrelevante Bodenparameter und Indikatoren.....	6
1.4.4 Auswirkungen mechanischer Belastung von Grünlandböden.....	8
1.4.5 Pflanzenbestände und -gesellschaften des Wirtschaftsgrünlandes.....	10
1.4.6 Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung.....	11
2 MATERIAL UND METHODEN	14
2.1 Untersuchungsgebiet	14
2.1.1 Klima.....	14
2.1.2 Geologie und Böden.....	15
2.1.4 Agrarstruktur.....	18
2.2 Durchgeführte Messungen und Erhebungen	20
2.2.1 Auswahl und Einteilung der Untersuchungsflächen.....	20
2.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen.....	21
2.2.2.1 Messung der Lagerungsdichte.....	21
2.2.2.2 Messung des Eindringwiderstandes.....	22
2.2.2.3 Messung der volumetrischen Bodenfeuchte.....	23
2.2.3 Bodenchemische Analysen.....	23
2.2.4 Vegetationserhebung.....	24
2.2.5 Statistische Auswertung der Daten.....	25
3 ERGEBNISSE	26
3.1 Nutzungserhebung	26
3.2 Bodenchemische Analysen	28
3.3 Lagerungsdichte der untersuchten Standorte	30
3.3.1 Korrelation der Lagerungsdichte und des organischen Kohlenstoffgehaltes.....	31

3.3.2 Nutzungsspezifische Lagerungsdichte.....	32
3.4 Eindringwiderstand der untersuchten Standorte.....	36
3.4.1 Volumetrische Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung.....	37
3.4.2 Korrelation des Eindringwiderstandes und der volumetrischen Bodenfeuchte.....	38
3.4.3 Nutzungsspezifische Eindringwiderstände.....	39
3.5 Vergleich der gemessenen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände.....	43
3.5.1 Korrelationsanalyse.....	43
3.5.2 Gegenüberstellung der nutzungsspezifischen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände.....	43
3.6 Räumliche Variabilität eines Weidestandortes.....	45
3.6.1 Lagerungsdichte der untersuchten Teilflächen.....	46
3.6.2 Eindringwiderstand der untersuchten Teilflächen.....	49
3.7 Ergebnis der Vegetationserhebung.....	52
4 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	54
4.1 Allgemeine Bewertung der bodenphysikalischen Parameter.....	54
4.2 Nutzungsspezifische Auswirkungen.....	57
4.3 Abundanz und Indikation der erhobenen Zeigerarten für Bodenverdichtung.....	61
5 LITERATURVERZEICHNIS	64
6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	68
7 TABELLENVERZEICHNIS.....	69

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

In den vergangenen Jahrzehnten fand im Bereich der Grünlandwirtschaft in vielen Gegenden eine Intensivierung statt. Als Folge werden Grünlandflächen heutzutage häufiger und mit zunehmend schwereren Maschinen befahren als in der Vergangenheit. Zudem erfolgen Befahrungen aus arbeitswirtschaftlichen und futterbaulichen Gründen oft bei feuchten Bodenbedingungen. (DIEPOLDER et al. 2005)

Welche Auswirkungen diese Mehrbelastung auf den Zustand der Böden hat, wurde bisher wenig erforscht. Allgemein besteht ein Mangel an Daten über die Entstehung und Folgewirkungen der Bodenbelastung im Dauergrünland. (DIEPOLDER et al. 2005, SCHMEER 2009, STAHL 2009)

Trotz zahlreicher Untersuchungen ist es bisher nicht gelungen den Einfluss der eingesetzten Technik auf das Bodengefüge umfassend darzustellen, da sowohl von Seiten des Bodens als auch von Seiten der angewandten Technik eine Vielzahl an Einzelfaktoren in Wechselwirkung stehen. (BRUNOTTE et al. 2004)

In der Grünlandwirtschaft gehen mechanische Bodenbelastung neben dem Einsatz der Landdtechnik auch von Weidevieh aus. Inwiefern sich diese Belastungen unter den landesüblichen Bewirtschaftungsformen und -verhältnissen in einer Veränderung der Lagerung bzw. Verdichtung der Grünlandböden zeigen wurde bisher kaum untersucht.

Nach STAHL (2009) und SCHMEER (2009) herrscht bislang die Meinung vor, Grünlandböden seien im Gegensatz zu Ackerböden widerstandsfähiger gegenüber mechanischen Belastungen. Nicht zuletzt deshalb wurde die Verdichtung von Grünlandböden im Bereich des Bodeschutzes bisher wenig thematisiert.

Grünlandböden erfüllen neben der Produktionsfunktion eine Vielzahl an weiteren Funktionen (BMLFUW 2016). Infolge mechanischer Belastung kann das Porensystem und somit die Funktionalität von Böden stark beeinträchtigt werden (BLUME et al. 2010).

Erste Studien zeigen signifikante Ertragsrückgänge und Veränderungen des Pflanzenbestandes infolge mechanischer Belastung durch Maschineneinsatz (DIEPOLDER et al. 2005). Zudem konnten erhöhte Lachgasemissionen durch die Auswirkungen intensiver Befahrung nachgewiesen werden (SCHMEER 2009).

Zur quantitativen und qualitativen Bewertung von Verdichtungszuständen gibt es eine Vielzahl an Parametern (BRUNOTTE et al. 2004). Eine Maßzahl für den Verdichtungszustand von Böden ist die Lagerungsdichte (Dichte des trockenen Bodens). Diese beschreibt, wieviel Feststoffanteil im Bodenvolumen vorhanden ist, und kann somit indirekt Auskunft über den zur Verfügung stehenden Porenraum geben (BLUME et al. 2010). Die Lagerungsdichte ist zudem eine wichtige und für österreichische Grünlandböden weitgehend unbekannt Kenngröße, um stoffliche Berechnungen durchzuführen.

1.2 Forschungsfragen und Ziele

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen ersten Überblick über die Auswirkungen unterschiedlicher landesüblicher Bewirtschaftungsformen und Bewirtschaftungsintensitäten hinsichtlich ihres Einflusses auf die Lagerungsverhältnisse von Dauergrünlandböden darzustellen und zu quantifizieren.

Mittels bodenphysikalischer sowie pflanzensoziologischer Methoden soll erhoben werden, in welchem Maße die Dauergrünlandböden und Pflanzenbestände im Untersuchungsgebiet Verdichtungserscheinungen aufweisen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen als Grundlage für weitere Arbeiten in diesem Bereich dienen.

Folgende Forschungsfragen sollen im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden:

"Welche tiefenbezogenen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände weisen Dauergrünlandböden mit landesüblicher Bewirtschaftung im Untersuchungsgebiet auf? Wie sind diese zu bewerten?"

"Gibt es signifikante Unterschiede der landesüblichen Grünlandnutzungsformen hinsichtlich der Auswirkung auf die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte und Eindringwiderstand? Wie wirken sich Beweidung und Befahrung auf die Lagerung der untersuchten Böden aus?"

"Welche Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung treten im Untersuchungsgebiet auf? In welchem Ausmaß treten diese in den verschiedenen Nutzungen auf? Welchen indikatorischen Wert besitzen die aufgefundenen Arten hinsichtlich der Gefügebeurteilung?"

1.3 Arbeitshypothesen

"Intensive Nutzung des Grünlands führt aufgrund erhöhter mechanischer Belastung zu einer Zunahme der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes."

"Die Nutzungsformen von Grünland unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Lagerung der Böden."

"Zeigerpflanzen können mit gewissen Einschränkungen als Indikatoren für den Gefügestand von Dauergrünlandböden herangezogen werden."

1.4 Aktueller Forschungsstand

1.4.1 Bodenbelastung

Eine aufgebrachte Last kann eine Verdichtung des Bodens bewirken, welche mit einer Erhöhung des Feststoffanteils des Bodenvolumens und zeitgleicher Verminderung des für Gas und Wasser zur Verfügung stehenden Porenraums einhergeht. Ob eine aufgebrachte Last zu einer Bodenverformung und somit zu einer schädlichen Veränderung im Sinne der Bodenfunktionen führen kann, hängt einerseits von den einwirkenden Kräften und andererseits von der Stabilität der Bodenhorizonte ab, auf welche die Last einwirkt. Letztere wird wiederum von Faktoren wie dem Wassergehalt, dem Gehalt an organischer Masse, der Textur, der Aggregation und anderen Eigenschaften beeinflusst. (BLUME et al. 2010)

Auch das Eigengewicht von Böden führt zu einer gewissen natürlichen Selbstverdichtung (MURER und ZEHNER 2010), jedoch führen menschliche Aktivitäten langfristig betrachtet immer zu einer weiteren Komprimierung, sprich zu einer Senkung des Bodenniveaus (BLUME et al. 2010). Diese kann aus verschiedenen Gründen auch durchaus bewusst herbeigeführt werden, wie beispielsweise bei der Saatbettbereitung im Bereich des Ackerbaus (MURER und ZEHNER 2010) oder im Bereich der Grünlandwirtschaft durch den Einsatz von Wiesenwalzen.

Ob eine Verdichtung als schädlich einzustufen ist, hängt von der Beeinträchtigung der Funktionalität des Bodens ab (BRUNOTTE et al. 2004). Aus Sicht der Ökologie sind Böden als schadverdichtet einzustufen, wenn das Porensystem durch Überlastung in seinen wesentlichen Funktionen (Produktion, Regelung, Lebensraum) temporär oder andauernd beeinträchtigt ist (MURER und ZEHNER 2010). Gefügeschädigungen wirken sich unter Einbeziehung indirekter Effekte auf sämtliche Bodenfunktionen aus (BRUNOTTE et al. 2004, HAKANSSON 2005).

Aus pflanzenbaulicher Sicht steht die Produktionsfunktion der Böden im Vordergrund. Diese kann durch die Änderung der Standortfaktoren infolge von Verdichtungen stark beeinträchtigt werden (WALTER 1973). Im Bereich der Grünlandbewirtschaftung ist von einer Schadverdichtung auszugehen, wenn der Ertrag und die Qualität des Futters negativ beeinflusst werden.

Je weniger Hohlräume zur Verfügung stehen, umso schwieriger ist es für Pflanzenwurzeln, in den Boden einzudringen. Zudem kann aufgrund der eingeschränkten Infiltrationskapazität nur eine begrenzte Menge an Niederschlagswasser aufgenommen und letztlich für das Pflanzenwachstum bereitgestellt werden, was sich in einem verminderten Ertrag sowie einer eingeschränkten Ertragssicherheit äußert. (MURER und ZEHNER 2010)

Da landwirtschaftlich genutzten Böden neben der Produktionsfunktion eine Reihe weiterer ökologischer Funktionen zukommt sind auch diese im Hinblick auf Schädwirkungen einzubeziehen.

Bis vor wenigen Jahrzehnten konnten Gefügeveränderungen bzw. -schädigungen im Rahmen landwirtschaftlicher Aktivitäten durch Bodenbearbeitung wieder behoben werden (BLUME et al. 2010), da die Last der eingesetzten Landmaschinen, Zug- bzw. Weidetiere lediglich Einfluss auf die oberen Bodenschichten nehmen konnte.

Die heutzutage in der Landwirtschaft eingesetzten Maschinen können aufgrund hoher Radlasten ausgeprägte Tiefenwirkung entfalten und zu Unterbodenverdichtungen führen, welche teilweise irreversibel sind oder nur mit hohem Energieaufwand und oft mit einhergehender Schädigung des Porensystems rückgängig gemacht werden können (HAKANSSON 2005). Im Bereich der Grünlandbewirtschaftung sind Lockerungen des Unterbodens in der Praxis nicht üblich, beziehungsweise aufgrund der Geländeverhältnisse mancher Flächen vermutlich nur schwer realisierbar.

1.4.2 Wirkung und Verteilung von Bodendruck

Auflasten wirken nicht nur in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung auf den Boden ein. Die räumliche Verteilung der Kräfte im Boden erfolgt dreidimensional. (BLUME et al. 2010). Der Bodendruck von Fahrzeugen geht von verschiedenen Kräften aus, welche über die Kontaktfläche des Reifens auf den Boden übertragen werden. Dabei kann zwischen Gewichts-, Trieb-, Brems-, Zug- und Lenkkraft unterschieden werden (BRANDHUBER 2006).

Über die Verteilung des Drucks entscheidet die Stabilität der betroffenen Bodenschichten, welche von verschiedenen Eigenschaften wie der Textur, dem Wassergehalt und dem Gehalt an organischer Masse abhängig ist (BLUME et al. 2010).

Als empirisches Maß für die Stabilität kann die so genannte Vorbelastung einer Bodenschicht herangezogen werden. Die Vorbelastung beschreibt die Widerstandsfähigkeit (Druckstabilität) gegenüber einwirkenden Kräften (BOXBERGER und MOITZI 2007). Durch Einwirkung von Kräften, welche sich im Bereich der Vorbelastung befinden, kann es zu einer elastischen Verformung kommen, welche zumindest teilweise reversibel ist und nach der Einwirkung des Drucks weitgehend wieder den Ausgangszustand erreichen kann. Wird die Vorbelastung jedoch überschritten, kann es zu einer plastischen Verformung und infolgedessen zur irreversiblen Verdichtung kommen. (BRANDHUBER 2006, BLUME et al. 2010)

Generell gilt, je weicher ein Boden ist, desto mehr Tiefenwirkung kann eine Auflast entfalten. Je härter ein Boden ist, umso mehr Spannung wird in horizontaler

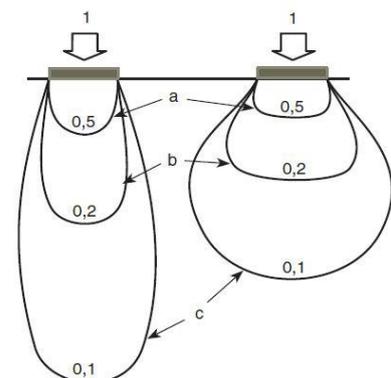


Abb.1: Druckwiebeln, Verteilung der Spannung in einem weichen (links) und einem harten Boden (rechts) (BLUME et al. 2010)

Richtung abgegeben (BLUME et al. 2010). Die Distribution in vertikaler sowie horizontaler Richtung lässt sich durch so genannte Druckzwiebeln veranschaulichen.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Verteilung und Tiefenwirkung ist das Verhältnis von aufgebrachtener Last zum Flächenausmaß, mit dem diese auf den Boden aufgebracht wird. Dieses Verhältnis wird als Kontaktflächendruck (bar) bezeichnet. Nach BOXBERGER und MOITZI (2007) wird der Kontaktflächendruck durch die Faktoren Radlast, Reifendimension (Bauart, Breite, Durchmesser) sowie Reifeninnendruck beeinflusst. Wird Letzterer vermindert, vergrößert sich die Aufstandsfläche und der Kontaktflächendruck sinkt. Dieser hängt aber wiederum von den Eigenschaften des Bodens ab, da beispielsweise lockere Böden einer Auflast mehr Fläche bieten können als feste Böden (HAKANSSON 2005).

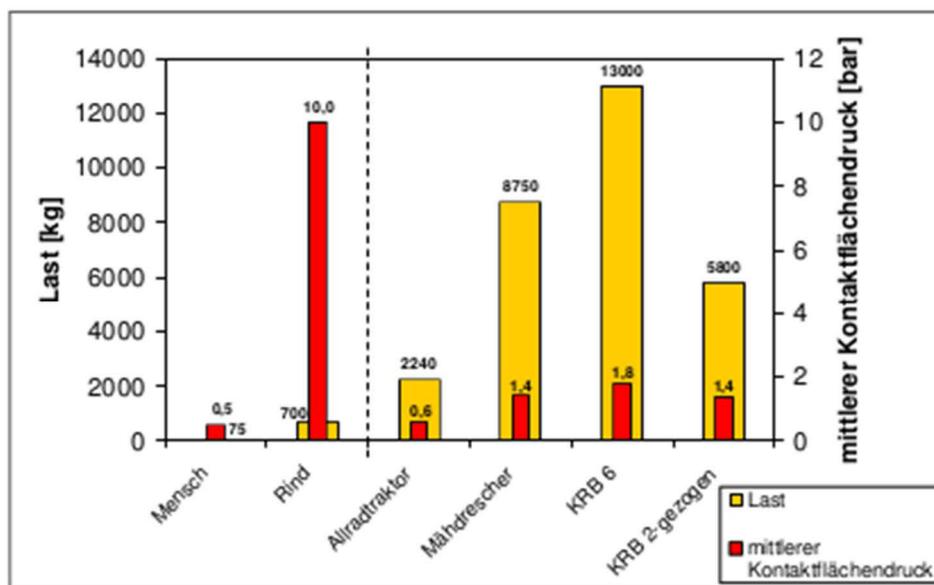


Abb.2: Mittlerer Kontaktflächendruck und abzustütze Lasten im Vergleich
KRB=Köpfrodebunker (BOXBERGER und MOITZI 2007)

Abbildung 2 zeigt, dass der mittlere Kontaktflächendruck stark an die Auflastfläche gebunden ist. Mensch und Rind können, trotz ihres im Verhältnis zu Landmaschinen geringen Gewichts, hohe Kontaktflächendrucke erzeugen.

Mit zunehmender Radlast nimmt die Tiefenwirkung zu. Dieser Tatsache kann durch Vergrößerung der Aufstandsfläche, beispielsweise durch den Einsatz breiterer Reifen oder der Erhöhung der Reifenanzahl, entgegengewirkt werden. Zur Vermeidung von hohen Bodendrücken im Bereich des Unterbodens müssen bei Einwirkung hoher Radlasten überproportional große Aufstandsflächen erzeugt werden. Durch Vergrößerung der Aufstandsfläche bei gleicher Radlast wird zwar insgesamt ein größeres Bodenvolumen Druck ausgesetzt, jedoch können die verhältnismäßig geringeren Spannungen weniger Schaden bewirken. (BRANDHUBER et al. 2006)

Ein weiterer entscheidender Faktor der mechanischen Belastung von Böden durch Fahrwerke ist die Befahrungshäufigkeit. Nach BRANDHUBER (2006) steigt mit der

Zahl an Überfahrten das Risiko einer plastischen Verformung, da mit jeder Überfahrt erneut Druck auf eine Bodenschicht ausgeübt wird. Zusätzlich kann die Tiefenwirkung auch bei konstanter Radlast zunehmen. (DRAGHI und JORAJURIA 1997, HAKANSSON 2005)

1.4.3 Verdichtungsrelevante Bodenparameter und Indikatoren

Zur Identifikation von Verdichtungen bzw. Schadverdichtungen können nach BRUNOTTE et al. (2004) verschiedene einzelne und aggregierte bodenphysikalische Parameter herangezogen werden. Da in dieser Arbeit lediglich Einzelparameter erhoben wurden, sind nur diese in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

Bodenfunktion	Teilfunktion	Einzelparameter
Luftkreislauf	Luftspeicherung	Luftkapazität Lagerungsdichte
	Luftleitung	Luftleitfähigkeit O ₂ -Diffusion Lagerungsdichte
Wasserkreislauf	Wasserspeicherung	nutzbare Feldkapazität Lagerungsdichte
	Wasserleitung	gesättigte/ungesättigte Wasserleitfähigkeit Lagerungsdichte
Ertragsfähigkeit	Durchwurzelbarkeit	Wurzellängendichte Lagerungsdichte Eindringwiderstand

Tab.1: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger (modifiziert nach BRUNOTTE et al. 2004)

Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte (ρ_B) des Bodens gibt an, wieviel Feststoffanteil in einer Volumeneinheit vorhanden ist. Durch Kenntnis der Lagerungsdichte können als Gewichtsanteile bestimmte Wasser- oder Nährstoffgehalte auf das Volumen des Bodens bezogen werden (HARTGE und HORN 2014). Aus diesem Grund ist die Lagerungsdichte ein wichtiger Parameter, um stoffliche Berechnungen durchzuführen. Beispielsweise wird die Lagerungsdichte benötigt, um Kohlenstoff-Vorräte von Böden zu berechnen (CARLIER et al. 2006).

In der Literatur wird die Lagerungsdichte (engl. *„Bulk Density“*) auch als Trockenrohndichte, Schüttdichte oder als Raumgewicht bezeichnet (HARTGE und HORN 2014). Zur Ermittlung der Lagerungsdichte können unterschiedliche Verfahren herangezogen werden. In der Regel wird jedoch mittels genormter Stechzylinder eine

definierte Volumeneinheit an Boden entnommen und bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Lagerungsdichte ρ_B (g/cm³) kann anschließend durch die Bildung des Quotienten aus der getrockneten Masse des Stechzylinderinhalts (g) und des Volumens (cm³) errechnet werden.

$$\rho_B = \frac{m_f}{V_g}$$

m_f Masse des trockenen Bodens (g)
 V_g Gesamtvolumen (cm³)

Mittels der Kenntnis der Lagerungsdichte können Veränderungen der Lagerung verlässlich beschrieben werden. Jedoch hat die Lagerungsdichte keinen direkten bodenfunktionalen Bezug. Die Lagerungsdichte kann daher nur indirekt als Indikator für Veränderungen der Bodenfunktionalität herangezogen werden, wenn Böden derselben geologischen Einheit entstammen und in der Vergangenheit mit derselben bzw. ähnlichen Belastung konfrontiert wurden. (BRUNOTTE et al. 2004) Tabelle 2 zeigt eine Einteilung der Lagerungsdichte von Mineralböden.

LD (g/cm ³)	Stufe	DV-Zeichen
<0.8	sehr gering	pb1
0.8-1.25	gering	pb2
1.25-1.50	mittel	pb3
1.50-1.75	hoch	pb4
>1.75	sehr hoch	pb5

Tab. 2: Kennzeichnung der Lagerungsdichte (g/cm³) von Mineralböden (modifiziert nach BLUME et al. 1995)

Eindringwiderstand

Ein weiterer Parameter zur Identifikation von Verdichtungen bzw. Detektion von verdichteten Bereichen ist der Eindringwiderstand.

Der Eindringwiderstand gibt jenen Widerstand bzw. Druck (MPa) wieder, welcher einer Messspitze beim Eindringen in den Boden entgegengebracht wird (BRUNOTTE et al. 2004). Nach FELDWISCH UND FRIEDRICH (2016) kann der Eindringwiderstand nur bei steinarmen Böden (maximal 10% des Bodenvolumens) und ausreichender Bodenfeuchte zur Identifikation von Verdichtungen eingesetzt werden.

Der Eindringwiderstand wird dabei maßgeblich von verschiedenen Bodeneigenschaften wie der Textur, dem Wassergehalt, dem Gehalt an organischer Substanz und dem Steingehalt beeinflusst (EIJKELKAMP 2013).

Um aus dem Eindringwiderstand allgemeine Aussagen über schädliche Beeinträchtigungen herzuleiten, müssten diese Faktoren standardisiert werden. Eine

direkte Herleitung bzw. Identifikation einer schädlichen Verdichtung ist mittels des Eindringwiderstandes nicht möglich, da keine umfassende Theorie existiert, die den Zusammenhang zwischen Bodenfunktion und Eindringwiderstand erklärt. (BRUNOTTE et al. 2004)

Zur Messung des Eindringwiderstandes gibt es zahlreiche feldbodenkundliche Geräte unterschiedlicher Ausführungen und Tiefenreichweite.

Einteilung und Grenzwerte des Eindringwiderstandes

In der Literatur findet man unterschiedliche und teils widersprüchliche Angaben für kritische Grenzwerte des Eindringwiderstandes, welche auf ein eingeschränktes Pflanzen- bzw. Wurzelwachstum hinweisen. Ein in der Literatur häufig genannter und weitgehend akzeptierter Grenzwert des Eindringwiderstandes, bei dessen Überschreitung von einer Einschränkung des Wurzelwachstums auszugehen ist, befindet sich in einem Bereich von 2 Megapascal (CARLESSO et al. 2014, CHANASYK und NAETH 1995, FELDWISCH und FREIDRICH 2016).

DE BAKKER und LOCHER (1990) geben folgende, auf das Wurzelwachstum bezogene Grenzbereiche an:

	Eindringwiderstand
ungestörtes Wurzelwachstum	< 1.5MPa
eingeschränktes Wurzelwachstum	1.5-3Mpa
Grenzwert für Wurzelwachstum	> 3Mpa

Tab.3: Grenzbereiche des Eindringwiderstandes hinsichtlich des Wurzelwachstums nach DE BAKKER und LOCHER (1990)

1.4.4 Auswirkungen mechanischer Belastung von Grünlandböden

Allgemein besteht ein Mangel an Untersuchungen über die Auswirkungen mechanischer Bodenbelastung von Dauergrünlandböden. Im Folgenden sind einige Arbeiten angeführt, welche unterschiedliche Faktoren und Auswirkungen der mechanischen Bodenbelastung im Grünland behandeln.

Im Rahmen eines Exaktversuchs verglichen DIEPOLDER et al. (2005) mechanisch unbelastete sowie unterschiedlich stark belastete Dauergrünlandflächen hinsichtlich Ertrag, Futterqualität und Bestandszusammensetzung. Dabei konnten durch erhöhte Belastung Ertragsrückgänge von 10 bis 14 % verzeichnet werden. Auf den stärker belasteten Parzellen konnte gegenüber der Kontrollvariante eine signifikante Zunahme des Weißkleeanteils (>20%) festgestellt werden. Entgegen den Erwartungen nahm der Anteil an Kräutern, im Speziellen der Anteil an *Ranunculus repens*, welcher als Verdichtungs- bzw. Wechselfeuchtezeiger genannt wird, in den unbefahrenen Kontrollvarianten zu. Die Autoren vermuten, dass sich *Ranunculus repens* durch seine oberirdischen Kriechtriebe in dem als "lückig" beschriebenen Bestand der unbefahrenen Variante besser ausbreiten konnte.

CARLIER et al. (2006) untersuchten die Kohlenstoffgehalte von unterschiedlich bewirtschafteten Grünlandflächen. Dabei wurde die Bewirtschaftung in gemähtes,

beweidetes, bzw. gemähtes und beweidetes Grünland unterteilt. Zur Berechnung der Kohlenstoffgehalte wurde die Lagerungsdichte der beprobten Flächen erhoben. Ergebnisse zeigten, dass die Lagerungsdichte von Mähwiesen im Vergleich zu Weiden höher lag. Die Lagerungsdichte der Mähweiden lag zwischen den Werten der Weiden und der Mähwiesen. CARLIER et al. (2006) stellten zudem fest, dass die Lagerungsdichte mit steigendem Gehalt an organischer Masse abnahm. HASSINK und NEETESON (1991) fanden wiederum höhere Lagerungsdichten unter beweidetem Grünland gegenüber gemähtem Grünland.

STAHL et al. (2009) verglichen die Erträge von unbefahrenen Flächen mit den Erträgen innerhalb von Fahrspuren, welche durch landesübliche Landmaschinen verursacht wurden. Es konnte beim zweiten Aufwuchs ein Ertragsrückgang von 50% innerhalb der Fahrspur nachgewiesen werden. Im Ertrag des ersten Schnittes des Folgejahres konnte jedoch kein Ertragsunterschied mehr festgestellt werden. Die Autoren nehmen an, dass der Grund des Ertragsrückganges weniger in der Schädigung des Bodengefüges als in der Schädigung der Pflanzen und deren Wurzeln liegt. Ergebnisse der Studie zeigten, dass erhöhte mechanische Belastung zur Verminderung der Wurzellängendichte in den ersten 5 cm des Oberbodens führte.

STAHL et al. (2009) untersuchten die Bodendrucke, die von Maschinen zur Grünlandbewirtschaftung ausgehen. Diese wurden vor allem im Bereich der Oberkrume zum Teil als sehr hoch eingestuft. Die verursachten Drücke nahmen im Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen auf Ackerstandorten bis hin zur Unterkrume signifikant schneller ab und bewegten sich im Bereich der Vorbelastung der Böden. Extrem schwere Maschinen, wie sie zur Gülleausbringung eingesetzt werden, führten jedoch zu Belastungen jenseits der Vorbelastung. Die Autoren sind der Meinung, dass tendenziell eher der Krumbereich einer schleichenden Verdichtung unterliegt als der Unterboden.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen DIEPOLDER et al. (2005), als sie bei unterschiedlichen Belastungsintensitäten Zunahmen in der Lagerungsdichte vor allem in einer Tiefe von 5-10cm vorfinden konnten. Eine tendenzielle, jedoch weniger ausgeprägte Zunahme der Lagerungsdichte wurde im Bereich von 15-20cm beobachtet.

SCHMEER et al. (2009) konnten bei einem Feldversuch nach künstlicher Verdichtung mit einer Radlast von 6 Tonnen einen signifikanten Ertragsrückgang von 11% auf einer 3-Schnittfläche, sowie von 7,7% auf einer 5-Schnittfläche feststellen. Auch der Stickstoffertrag nahm in beiden Varianten um 12 bis 13% ab.

DRAGHI und JORAJURIA (1997) untersuchten die Ertragseinbußen, die durch die Befahrung durch einen leichten (37 KW) und einen schweren Traktor (72 KW) in drei verschiedenen Befahrungshäufigkeiten verursacht wurden. Dabei konnten innerhalb der Fahrspuren Ertragseinbußen im Ausmaß von 52 bis 76 % nachgewiesen werden. Auch außerhalb der Fahrspuren wurden Ertragseinbußen von 7 bis 25 % ermittelt. Dieses Ergebnis zeigt, dass nicht nur die überfahrenen Bereiche von

Ertragseinbußen betroffen sind. Durch die höhere Zahl an Überfahrten wurden durch den leichten Traktor gleiche oder höhere Ertragseinbußen verursacht, als durch den schweren Traktor mit weniger Überfahrten. Gleichzeitig waren durch den leichten Traktor zehn Überfahrten notwendig, um dieselben Ertragseinbußen wie durch die einmalige Befahrung mit dem schweren Traktor zu erreichen. Bei einmaliger Überfahrt verursachte der schwere Traktor höhere Ertragseinbußen als der leichtere. Es wurde festgestellt, dass trotz der niedrigen Achslast des leichten Traktors bei häufigerer Überfahrt die Lagerungsdichte zwischen den Befahrungsvarianten *einmalige Befahrung* und *zehnmalige Befahrung* signifikant zunahm. Außerdem wurde eine signifikante Zunahme der Lagerungsdichte im Unterboden mit steigender Achslast und Überrollhäufigkeit ermittelt.

SCHMEER et al. (2009) untersuchten die Lachgasemissionen von unverdichteten und bei feuchten sowie bei trockenen Bodenbedingungen künstlich verdichteten Grünlandstandorten in einer gedüngten und einer ungedüngten Variante. Durch die Verdichtung bei feuchten Bodenbedingungen konnten signifikante Erhöhungen der Lachgasemissionen festgestellt werden. Bei trockenen Bodenbedingungen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

1.4.5 Pflanzenbestände und -gesellschaften des Wirtschaftsgrünlandes

Dauergrünland setzt sich in der Regel aus verschiedenen Arten zusammen, man spricht in diesem Zusammenhang von Pflanzengesellschaften. WITTMANN (1998) beschreibt die Pflanzengesellschaften des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes als Gesellschaften, die vorwiegend aus Gräsern und zweikeimblättrigen Kräutern zusammengesetzt sind. Als weitere Merkmale des landwirtschaftlich genutzten Grünlandes werden eine hohe Mahd- und Weidetoleranz der Arten sowie das Fehlen von Gehölzen genannt.

Nach BUCHGRABER und GINDL (1994) besteht ein optimaler Pflanzenbestand aus futterbaulicher Sicht aus etwa 50 bis 60 % Gräsern. Der restliche Bestand sollte von Leguminosen und Kräutern gebildet werden. Außerdem sollten nach BUCHGRABER und GINDL (1994) die Anteile an giftigen, schädlichen, minderwertigen und/oder schmarotzenden Beikräutern möglichst gering sein.

Die floristische Zusammensetzung von Pflanzengesellschaften ist kein Produkt des Zufalls. In der Regel kommen nur Pflanzenarten mit weitgehend übereinstimmenden Standorteigenschaften gemeinsam vor. Die Zusammensetzung von Pflanzenbeständen wird einerseits maßgeblich durch natürliche Standortfaktoren bestimmt. Diese sind neben dem Wärme-, Wasser-, Luft-, und Nährstoffhaushalt der Steingehalt und die Gründigkeit des Bodens. (BOHNER 2015)

Nach BUCHGRABER und GINDL (1994) werden Grünlandbestände in ihrer Zusammensetzung neben den natürlichen Standortfaktoren vor allem durch Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst. Darunter fallen die Art und Häufigkeit der Nutzungen und der Nutzungszeitpunkt (Schnittzeitpunkt) sowie Art, Menge und Verteilung der Düngung, Bestandspflegemaßnahmen, außerdem

Unkrautbekämpfung und Nach- bzw. Übersaat von Grünlandbeständen. Ein weiterer Einflussfaktor liegt in der mechanischen Belastung von Boden und Grasnarbe durch Landmaschinen und Weidetiere.

1.4.6 Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung

Durch Verdichtung des Bodens ändern sich die Standortfaktoren (WALTER 1973), da durch Beeinträchtigungen des Porensystems beispielsweise der Gas- und Wasser- sowie letztlich auch der Wärmehaushalt eines Bodens verändert werden.

Da manche Arten durch ihre Lebensweise sensibel auf Veränderungen der natürlichen Standortfaktoren bzw. der Bewirtschaftungsfaktoren reagieren, zeigen diese bei geänderten Bedingungen beispielsweise eine starke Zunahme oder Abnahme. Durch die Reaktion dieser Arten lassen sich Rückschlüsse auf die Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren ziehen. So können sie innerhalb gewisser Grenzen als Bioindikatoren fungieren. (BOHNER 2010)

Viele Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung werden aus Sicht der Pflanzensoziologie der Klasse der Tritt- und Flutrasen zugeordnet. Nach WITTMANN (1998) charakterisiert der Faktor ‚Tritt‘ im Wesentlichen die mechanische Schädigung der Sprosse durch Reifendruck bzw. Vertritt durch Mensch und Tier sowie die Dichtlagerung des Bodens.

Nach WALTER (1973) erreichen die Arten der Trittgemeinschaften Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Schädigung durch verschiedene Eigenschaften und Strategien wie der Speicherung von Assimilaten unter der Bodenoberfläche, der Verbreitung durch ausgeprägte vegetative Vermehrung bzw. kurzen Entwicklungszeiten bis zur Samenreife. Zudem verfügen die Arten über hohe Regenerationsfähigkeit und bilden widerstandsfähige und stabile Gewebe aus.

Nach BOHNER (2010) sind Zeigerarten für Bodenverdichtung vorwiegend Rosettenpflanzen bzw. Arten mit kriechender Wuchsform. Sie zeichnen sich durch ihre Trittresistenz aus und weisen eine niedrige Wuchsform mit vorwiegend bodennahen Blättern auf.

Folgende Arten können im Grünland bei starkem Auftreten auf einen mittelmäßig bis gut mit Nährstoffen versorgten und verdichteten Oberboden hinweisen (BOHNER 2010):

Art	Merkmale (DIETL und JORQUERA 2012)	Standort und Verbreitung (DIETL und JORQUERA 2012)
<i>Agrostis stolonifera</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 20 bis 80 cm. Verfügt über kurze unterirdische und lange oberirdische Kriechtriebe, welche eine Länge von bis zu zwei Metern erreichen können.	Vom Tiefland bis ins untere Almgebiet weit verbreitet. Gehäuftes Auftreten auf feuchten, überschwemmten und verdichteten Böden. Entwickelt sich auf übernutzten Dauerweiden zum Hauptbestandsbildner.
<i>Bellis perennis</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 3-15 cm. Blattrosetten entwickeln sich an Verzweigungen des flachgründig liegenden Rhizoms.	Häufige Art. Vom Tiefland bis ins untere Almgebiet weit verbreitet, besonders auf mäßig trockenen bis feuchten meist nährstoffreichen verdichteten Böden, sowie auf kurzrasigen übernutzten Dauerweiden und lückenhaften Mähwiesen.
<i>Leontodon autumnalis</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 15-50cm. Bildet Blattrosetten und verfügt über ein kurzes und dickes Rhizom sowie über ein flachgründiges Sprosswurzelgeflecht.	Weit verbreitet. Kommt vom Tiefland bis ins obere Almgebiet auf frischen nährstoffreichen und verdichteten Böden vor. Häufig auf Trittrasen, Weiden aber auch an Straßenrändern und Feldwegen zu finden.
<i>Matricaria discoidea</i>	Einjährig. Wuchshöhe: 5-30 cm. (HOLZNER 1981)	Tritt auf nährstoffreichen und vernässten Äckern (HOLZNER 1981) sowie in Trittrasen auf.
<i>Poa annua</i>	Ein- bzw. auch mehrjährig. Wuchshöhe: 5-30cm. Wurzelt an den unteren Halmknoten und bildet Rasen aus. Blüht beinahe das ganze Jahr über und benötigt von der Keimung bis zur Samenreife nur wenige Wochen.	Weit verbreitet. Kommt vom Tiefland bis ins untere Almgebiet häufig auf frischen, nährstoffreichen und verdichteten Böden vor. Häufig auf übernutzten Weiden, Feldwegen und Trittrasen.
<i>Poa supina</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 5-30cm. Bildet im Gegensatz zu <i>Poa annua</i> einzelne Rispenäste aus.	Tritt in höheren Lagen anstelle von <i>Poa annua</i> auf und kommt dort bis zu einer Seehöhe von 3000 Meter insbesondere auf Dauerweiden und Viehlägerstellen vor. Im Tiefland bis in Lagen unter 400 Meter Seehöhe zerstreut verbreitet.
<i>Plantago major ssp. major</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 10-30cm. Verfügt über breite, trittfeste Rosettenblätter.	Kommt gehäuft auf nährstoffreichen und verdichteten Standorten wie Weiden und teilweise auch Wiesen und Trittrasen und Wegen, oft gemeinsam mit <i>Poa annua</i> und <i>Agrostis stolonifera</i> vor
<i>Polygonum aviculare</i>	Einjährig. Wuchshöhe: 5-50cm. Bildet ausgeprägte Pfahlwurzel aus. Rasenbildend.	Vom Tiefland bis ins Berggebiet weit verbreitet. Tritt auf nährstoffreichen Böden im Grünland vorzugsweise in lückigen Beständen auf.
<i>Ranunculus repens</i>	Ausdauernd. Wuchshöhe: 20-40 cm. Bildet lange oberirdische Kriechtriebe zur vegetativen Vermehrung aus. Geringe Samenproduktion. Ist aufgrund eines speziellen Durchlüftungsgewebes im Bereich der Wurzeln weitgehend resistent gegenüber Sauerstoffarmut, welche infolge von Verdichtung oder Vernässung auftritt (HOLZNER 1981).	Vom Tiefland bis ins Almgebiet weit verbreitet. Tritt in intensiv genutzten Mähwiesen bestandesbildend und seltener auf Mähweiden, Äckern und Wegrändern auf.

Tab.4: Merkmale, Standort und Verbreitung der Zeigerarten für Bodenverdichtung

Zeigerwerte der untersuchten Arten

Die ökologischen Zeigerwerte nach ELLENBERG (1992) geben Auskunft über die Standortbedingungen und beschreiben das Verhalten bzw. die Reaktion einzelner Arten gegenüber bestimmten Standortfaktoren. Dabei spiegeln die Zahlen die Affinität gegenüber bestimmter Standortfaktoren wieder.

Art	Zeigerwerte (ELLENBERG 1992)									Mahd- und Trittverträglichkeit (BRIEMLE und DIERSCHKE 2002)	
	L	T	K	F	R	N	S	LF	LF B	M	TV
<i>Agrostis stolonifera</i>	8	x	5	~7	x	5	0	H	W	9	9
<i>Bellis perennis</i>	8	x	2	5	x	6	0	H	W	9	8
<i>Leontodon autumnalis</i>	7	x	3	5	5	5	0	H	W	7	7
<i>Matricaria discoidea</i>	8	5	3	5	7	8	0	T	W	6	9
<i>Poa annua</i>	7	x	5	6	x	8	1	T,H	W	9	9
<i>Poa supina</i>	8	3	4	5	7	7	0	H	W	9	9
<i>Plantago major</i> <i>ssp. major</i>	8	x	x	5	x	6	0	H	S	5	9
<i>Polygonum aviculare</i>	7	6	x	4	x	6	1	T	S	4	9
<i>Ranunculus repens</i>	6	x	x	~7	x	7	1	H	W	8	7

Tab.5: Zeigerwerte, Mahd und Trittverträglichkeit der Zeigerarten

Zeigerwerte: L=Lichtzahl (1=Tiefschattenpflanze;9=Vollichtpflanze), T=Temperaturzahl (1=Kältezeiger; 9=extremer Wärmezeiger), K=Kontinentalitätszahl (1=eurozeanisch; 9=eukontinental), F=Feuchtezahl (1=Starktrockniszeiger; 12=Unterwasserpflanze,~=Zeiger für starken Wechsel), R=Reaktionszahl (1=Starksäurezeiger, 9=Basen- und Kalkzeiger), N=Stickstoffzahl (1=Zeiger für stickstoffärmste Standorte, 9=Zeiger für übermäßig stickstoffreiche Standorte), S=Salzzahl (0=nicht salzertragend, 9=Zeiger für extrem hohen Salzgehalt), LF=Lebensform (H=Hemikryptophyt, T=Therophyt), LF B= Blattausdauer (W=überwinternd grün, S=sommergrün), x=indifferentes Verhalten

Mahd- und Trittverträglichkeit: M=Mahdverträglich (1=unverträglich;9=überaus verträglich), TV=Trittverträglichkeit (1=unverträglich;9=überaus verträglich)

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im nördlichen Salzburger Flachgau. Alle Erhebungen wurden im Bereich des Haunsbergs in den Gemeindegebieten der drei Gemeinden Obertrum am See, Anthering und Seekirchen, in einem Umkreis von ca. 3,5 Kilometern durchgeführt.

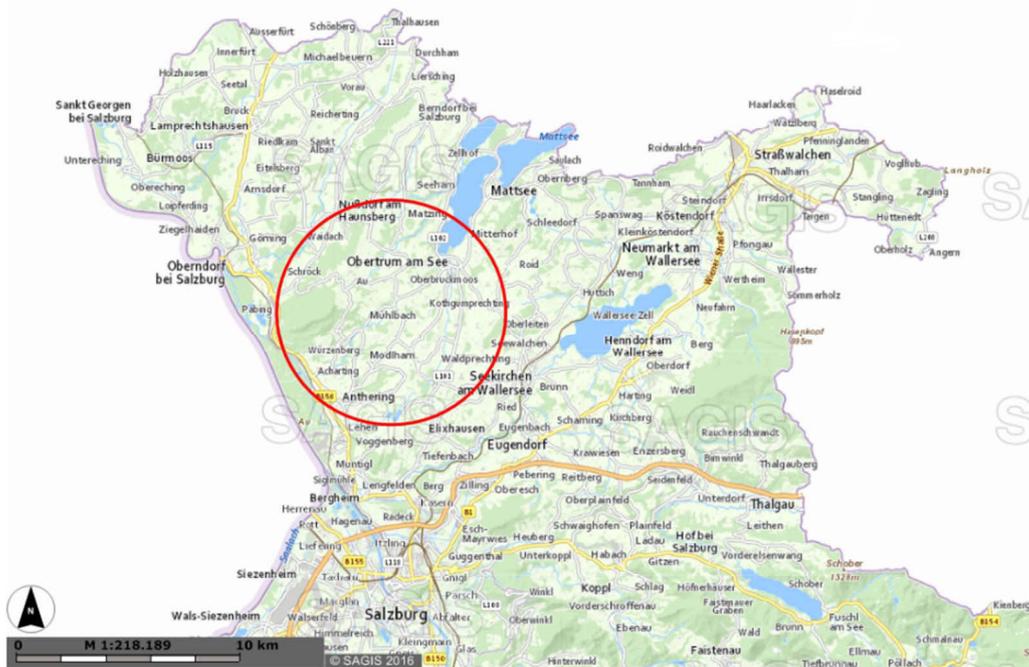


Abb.3: Lage des Untersuchungsgebiets (SAGIS 2016)

2.1.1 Klima

Folgende Daten wurden von der Wetterstation am Standort Mattsee (504 m Seehöhe) der ZAMG gemessen bzw. ermittelt. Es handelt sich hierbei um Daten aus dem Zeitraum 1971 bis 2000. Die ermittelte Jahresdurchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet beträgt $8,5\text{ C}^\circ$, wobei die höchste gemessene Temperatur $36,2\text{ C}^\circ$ und die tiefste $-25,3\text{ C}^\circ$ im Zeitraum der Aufzeichnungen betrug. Die Anzahl an Frosttagen ($<0\text{ C}^\circ$) betrug im Mittel 96,5 Tage im Jahr. Die Jahresniederschlagsmenge beläuft sich auf rund 1333 mm, mit deutlichen Höchstwerten in den Sommermonaten Juni, Juli und August. Nach DAXNER et al. (2008) kann im Bereich des Salzburger Flachgaves mit einer Vegetationsperiode von 7 bis 7,5 Monaten gerechnet werden. Die durchschnittlichen maximalen Schneehöhen im Gebiet liegen bei 30 cm, können jedoch auch bis zu 60 cm erreichen.

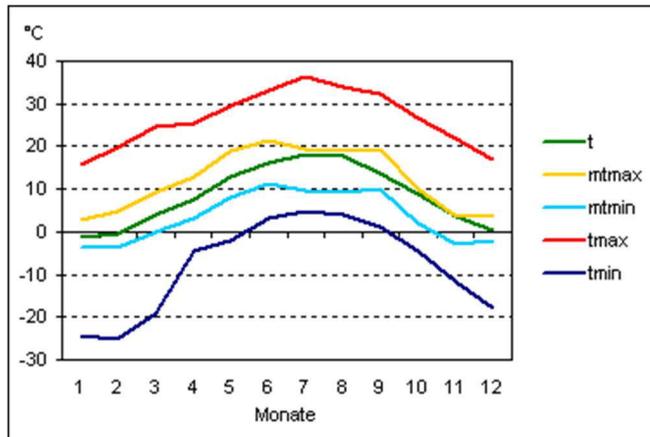


Abb.4: Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2016)

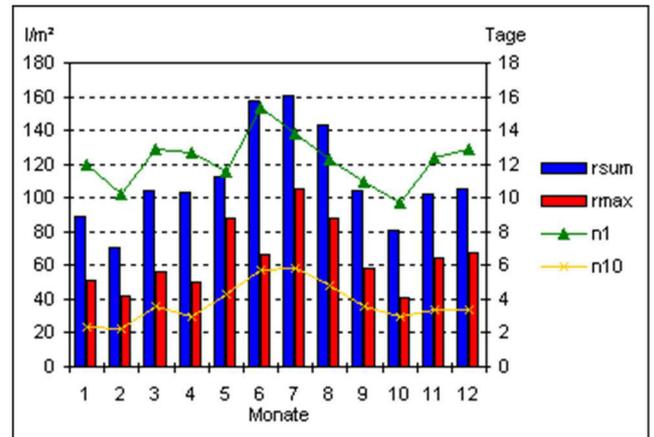


Abb.5: Niederschläge im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2016)

2.1.2 Geologie und Böden

Der Salzburger Haunsberg befindet sich in der Flyschzone, welche sich im Gebiet in südlicher Richtung bis zu den Kalkalpen ausdehnt. Vorwiegend handelt es sich bei den Flyschgesteinen im Bereich des Haunsbergs um Sandsteine und Zementmergel (EGGER 1980). Nach der Österreichischen Bodenkartierung sind die vorherrschenden Bodentypen im Untersuchungsgebiet vorwiegend Lockersediment-Braunerden sowie Pseudogleye und Gleye (BFW 2016).

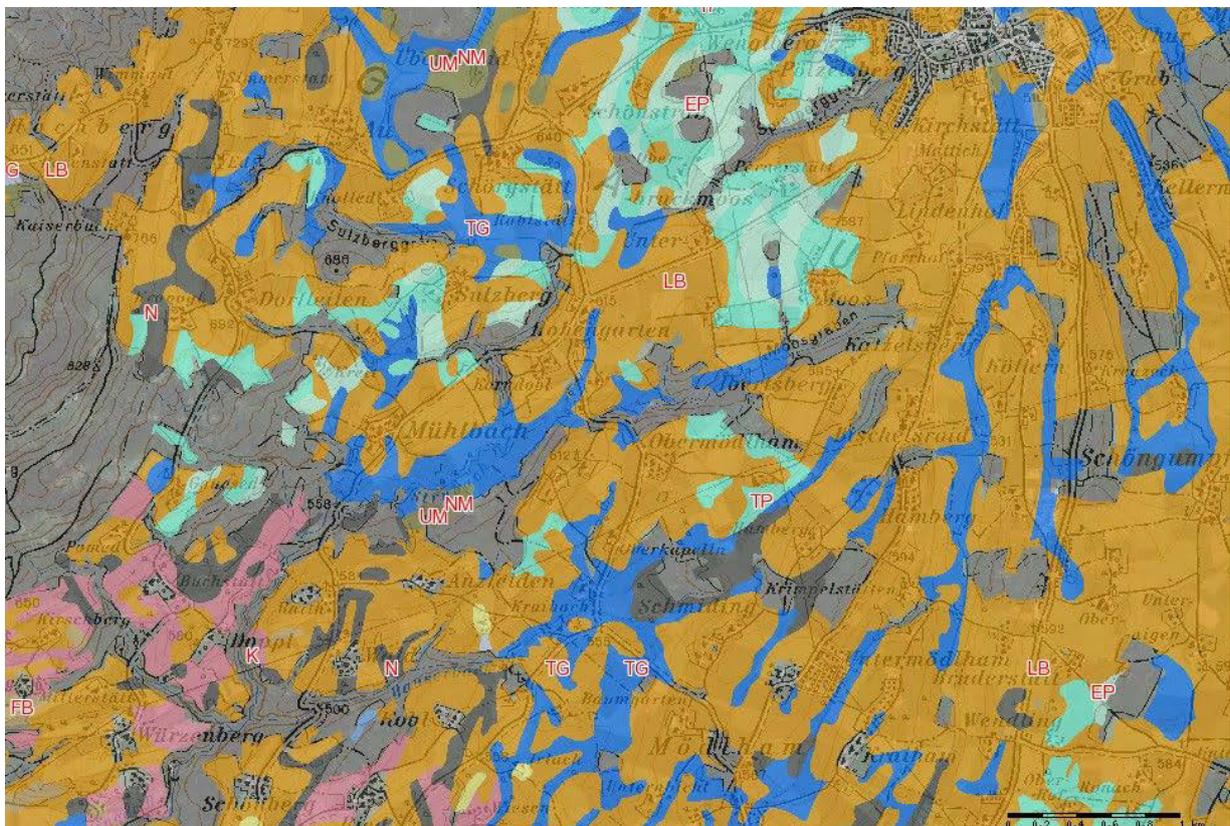


Abb.6: Bodentypen im Untersuchungsgebiet (BFW 2016)

- | | | |
|------------------------------|--------------------|---------------------|
| LB= Lockersediment-Braunerde | FB= Felsbraunerde | NM= Niedermoor |
| EP= extremer Pseudogley | TG= typischer Gley | N= Anmoor |
| TP= typischer Pseudogley | UM= Übergangsmoor | K= Bodenformkomplex |

Die am meisten verbreiteten Bodenarten im Untersuchungsgebiet sind lehmiger Sand (IS), sandiger Lehm (sL) sowie lehmiger Schluff (IZ) (BFW 2016). In dieser Arbeit wurden nur Braunerden, Pseudogleye und Gleye untersucht.

Im Folgenden werden die Charakteristika dieser drei Hauptbodentypen des Untersuchungsgebietes nach der Systematik der österreichischen Böden (NESTROY et al. 2011) kurz beschrieben.

Braunerde

Böden der Typengruppe *Braunerde* werden in die Ordnung der terrestrischen Böden eingegliedert. Nach BLUME et al. (2010) geht der humusreiche A-Horizont meist fließend in einen durch Silikatverwitterung verbrauchten und für Braunerden charakteristischen B-Horizont über. Im Untersuchungsgebiet handelt sich um Böden des Typs Lockersediment-Braunerde. Die untersuchten Böden wiesen im Unterboden meist mehr oder weniger grobes Lockermaterial auf und sind dem carbonatfreien Subtyp zuzuordnen. Viele der untersuchten Braunerden wiesen im Krumbereich Merkmale der Pseudovergleyung auf.

Pseudogley

Böden des Typs *Pseudogley* werden den hydromorphen Böden zugeordnet. Hydromorphe Böden sind in ihrer Entstehung wesentlich durch den Einfluss von Stau- bzw. Grundwasser geprägt. Im Falle des Pseudogleys entstammt dieser Einfluss aus dem Stauwasser durch Niederschlag (BLUME et al. 2010). Pseudogleye kommen im untersuchten Gebiet in den Ausprägungen *typischer Pseudogley* (TP) sowie *extremer Pseudogley* (EP) vor (BFW 2016).

Pseudogleye weisen redoximorphe Eigenschaften auf und stehen unter dem Einfluss zeitweiliger Vernässung und Austrocknung. Typisch für Pseudogleyböden ist die Ausbildung eines so genannten Staukörpers, einer Bodenschicht mit geringer Wasserleitfähigkeit welche das Niederschlagswasser am Abfließen in tiefere Schichten hindert. Durch die periodischen Schwankungen der Wasserversorgung entstehen charakteristische Rostflecken und Konkretionen, welche deutlich im Profil erkennbar sind. (BLUME et al., 2010)

Gley

Gleyböden werden ebenfalls den hydromorphen Böden zugeteilt. Im untersuchten Gebiet kommt vorwiegend der Bodentyp *typischer Gley* vor (BFW 2016). Gleyböden weisen einen starken Einfluss durch Grundwasser auf, welcher sich durch die Ausbildung eines Oxidations- sowie eines darunterliegenden Reduktionshorizontes manifestiert.

Anaerobe Verhältnisse im stets wassergesättigten und meist tonreichen Unterboden führen zur Lösung von mangan- und eisenhaltigen Verbindungen, welche durch den kapillaren Aufstieg im darüber liegenden Horizont einer Oxidation unterliegen. Im Profil ist dies durch eine ausgeprägte Rostfärbung zu erkennen. Auf Gleyböden sind oft feuchteliebende Pflanzenarten anzutreffen, welche durch die gute

Wasserversorgung aus dem Unterboden einen optimalen Lebensraum finden.
(BLUME et al. 2010)



Abb.7: Typischer und weit verbreiteter Bodentyp im Untersuchungsgebiet: pseudovergleyte Lockersediment- Braunerde (P.Gehmacher)

Bodenprofilstellen im Untersuchungsgebiet

Für zwei Untersuchungsstandorte lag in unmittelbarer Nähe eine Profilstelle der Österreichischen Bodenschätzung (BFW 2016) vor. Dabei wurden folgende Bodenkennwerte horizontbezogen ermittelt.

1) Bodentyp: *kalkfreie Lockersediment - Braunerde*

Ausgangsmaterial: feines und grobes Lockermaterial über aufgemürbtem Gestein
(flyschbetontes Moränenmaterial über Flysch)

Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Grobanteil	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Humusmenge	Humusart	Kalkgehalt	pH	Struktur	Porosität	Durchwurzelung
A	0-20	lehmiger Sand	gering (Kies)	35	51	14	mittelhumos	Mull	kalkfrei	4.9	deutlich mittelkrümelig	mittel- und stark feinporös	stark
ABv	20-40	sandiger Lehm	gering (Kies)	33	50	17	schwach humos	Mull	kalkfrei	4.9	deutlich feinblockig/ Kanten gerundet	mittel- und feinporös	gut
Bv	40-60	sandiger Lehm	gering (Kies, Steine, 5 cm Ø)	25	55	20			kalkfrei	4.9	deutlich mittelblockig/ Kanten gerundet	mittel- und feinporös	wenig
Bvg	60-200	sandiger Lehm	gering (Steine, 5 cm Ø)	36	48	16			kalkfrei	4	deutlich feinblockig/ Kanten gerundet	mittel- und feinporös	keine

Tab.6: Profilstelleninformation eines Untersuchungsstandortes I (BFW 2016)

Abb.8: Profilzeichnung eines Untersuchungsstandortes I (BFW 2016)

2) Bodentyp: *pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment - Braunerde*

Ausgangsmaterial: feines und grobes Lockermaterial
(flyschbetontes Moränenmaterial)

Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Grobanteil	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Humusmenge	Humusart	Kalkgehalt	pH	Struktur	Porosität	Durchwurzelung
A	0-20	sandiger Lehm	geringer Grobanteil (Kies, Schotter, 3 cm Ø)	33	49	18	stark humos	Mull	kalkarm	6.3	deutlich mittelkrümelig	mittel- und feinporös	stark
ABv	20-40	sandiger Lehm	mäßiger Grobanteil (Kies, Schotter, 3 cm Ø)	31	45	23	schwach humos	Mull	kalkfrei	5.6	deutlich mittelblockig/ Kanten gerundet	mittel- und feinporös	gut
ABvg	40-60	Lehm	mäßiger Grobanteil (wenig Kies, Steine, 5 cm Ø)	27	46	28	schwach humos	Mull	kalkfrei	5.7	deutlich mittelblockig/ Kanten gerundet	mittel- und stark feinporös	wenig
Bvg	60-200	sandiger Lehm	hoher Grobanteil (wenig Kies, Grobsteine, 30 cm Ø)	33	43	24			kalkfrei	5.7	deutlich mittelblockig/ Kanten gerundet	schwach mittel- und schwach feinporös	keine

Tab.7: Profilstelleninformation eines Untersuchungsstandortes II (BFW 2016)

Abb.9: Profilzeichnung eines Untersuchungsstandortes II (BFW 2016)

2.1.4 Agrarstruktur

Das Ausmaß der österreichischen Grünlandfläche beträgt nach den INVEKOS-Daten rund 1,36 Mio. ha, wovon etwa 53 % als intensives Wirtschaftsgrünland und etwa 47 % als extensives Grünland genutzt werden. Dem Intensivgrünland werden dabei die Nutzungsformen Kulturweide, Mähweide und Mähwiese mit drei und mehr Nutzungen pro Jahr sowie Feldfutterflächen zugerechnet. Extensives Grünland umfasst die Nutzungen Mähwiese und -weide mit zwei jährlichen Nutzungen, Streuwiesen, einmähdige Wiesen und Grünlandbrachen sowie Almen, Bergmähder und Hutweiden. (BMLFUW 2015)

An der gesamten produktiven Fläche (land- und forstwirtschaftliche Nutzfläche) des Bundeslandes Salzburg (195.154 Hektar) nimmt die Dauergrünlandfläche mit 188.740 Hektar etwa 40 % ein. Die verbleibende Fläche gliedert sich in 59 % forstwirtschaftliche Fläche und rund ein % Ackerland.

Bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche nimmt das Grünland im Bundesland Salzburg einen Anteil von 97% ein. Rund zwei Drittel des Dauergrünlandes werden extensiv bewirtschaftet. Die verbleibende Grünlandfläche entfällt auf Mehrschnittwiesen und Kulturweiden. Der durchschnittliche Viehbesatz im Land Salzburg beträgt 1 GVE pro Hektar, wobei dieser im Flachgau wesentlich höher ist als in den anderen Bezirken.

Die Entwicklung der Nutzungsformen des Dauergrünlands im Zeitraum von 1983 bis 2010 im Bundesland Salzburg zeigt einen deutlichen Rückgang von Einschnittwiesen

von 14.877 ha auf 1.804 ha, sowie einen Rückgang von Streuwiesen von 1.932 ha auf 1.058 ha, während Mehrschnittwiesen von 74.469 ha auf 82.864 ha zugenommen haben.

	1983	1990	1999	2003	2005	2007	2010
Ackerland	13.012	7.746	6.869	6.755	6.638	6.327	6.236
Obst- Gartenbau	831	823	269	323	158	174	179
Einschnittwiesen	14.877	11.598	6.799	6.512	3.908	3.324	1.804
Mehrschnittwiesen	74.469	80.946	83.349	82.666	83.278	84.234	82.864
Kulturweiden	772	720	1.633	4.590	6.200	2.675	3.157
Hutweiden	22.584	23.750	18.536	17.447	18.294	15.010	14.540
Streuwiesen	1.932	1.507	1.270	1.180	1.129	1.206	1.058
Almen, Bergmähder	177.432	172.830	183.251	152.340	147.356	123.541	85.296
LN	305.909	299.920	302.011	271.871	267.103	236.551	195.154

Abb.10: Kulturartenverteilung (in ha) im Bundesland Salzburg (AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG 2012)

Insgesamt wird das Grünland in Salzburg von rund 8.923 Betrieben, annähernd zu gleichen Teilen im Haupt- sowie im Nebenerwerb bewirtschaftet. 92 % der Betriebe sind bäuerliche Familienbetriebe.

Die Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben nahm im Zeitraum von 1999 bis 2010 von 10751 auf 9785 Betrieb ab. Dies entspricht einer Abnahme von 9 %. Der Großteil der Betriebe bewirtschaftete im Jahr 2010 eine Nutzfläche von 10 bis 20 Hektar.

Im Bundesland Salzburg gibt es 6.663 rinderhaltende Betriebe mit einem durchschnittlichen Bestand von 25,2 Rindern pro Betrieb. Der überwiegende Teil der rinderhaltenden Betriebe betreibt Milchviehhaltung (5.069 Betriebe) mit einem durchschnittlichen Bestand von 15,8 Milchkühen pro Betrieb. Die übrigen Rinder werden vorwiegend in Mutterkuhhaltung gehalten. Die Zahl der Mutterkühe nahm im Zeitraum von 1999 bis 2010 in einem Ausmaß von 71,2 % stark zu, während im selben Zeitraum die Anzahl an Milchkühen um 16 % abnahm. Mehr als die Hälfte der Milchkühe des Bundeslandes Salzburg wird im Flachgau gehalten.

Betrachtet man die langfristige Entwicklung des Rinderbestandes im Bundesland Salzburg, so zeigt sich eine Zunahme der durchschnittlichen Viehzahl pro Betrieb.

Im Jahr 1953 wurden rund 10 Rinder pro Betrieb gehalten, im Jahr 1985 waren es bereits 19,1 Stück und im Jahr 2010 25,2 Stück.

Die Ergebnisse der Milchleistungsprüfung (durchgeführt vom Landeskontrollverband Salzburg) zeigen, dass die durchschnittliche Herdengröße im Flachgau (rund 29,2 Tiere) sowie in der Stadt Salzburg deutlich höher ist als in den anderen Bezirken.

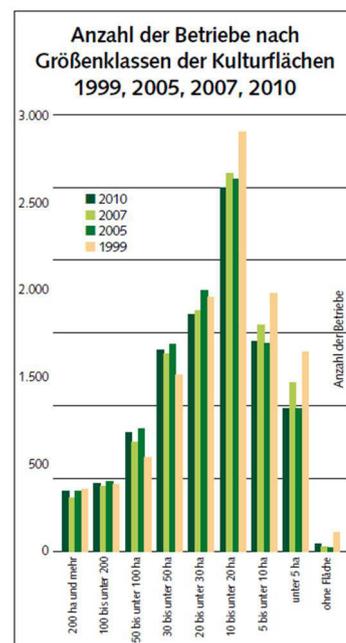


Abb.11: Anzahl der Betriebe nach Größenklassen (AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG 2012)

2.2 Durchgeführte Messungen und Erhebungen

2.2.1 Auswahl und Einteilung der Untersuchungsflächen

In einem ersten Schritt wurden Flächen mit bekannter und landesüblicher Bewirtschaftungshistorie der vergangenen 10 Jahre im Untersuchungsgebiet identifiziert. Dabei wurden ausschließlich Flächen mit praxisüblicher und weitgehend konstanter Nutzung selektiert. Bei den untersuchten Flächen handelt es sich ausschließlich um Dauergrünland rinderhaltender Betriebe. Die aktuellen Bewirtschafter¹ der Flächen wurden über die Nutzungsintensität (Anzahl der durchschnittlichen jährlichen Schnittnutzungen) sowie die Befahrungshäufigkeit (geschätzte Zahl an jährlichen Überfahrten) der Flächen befragt.

Die Erhebungen wurden insgesamt auf 19 verschiedenen Grünlandstandorten durchgeführt. Auf einem der untersuchten Weidestandorte wurde zudem eine Untersuchung der räumlichen Variabilität der untersuchten Parameter anhand von vier Teilmessungen durchgeführt.

Die Untersuchungsflächen wurden nach ihrer Nutzungsform gegliedert. Dabei wurden folgende Kriterien eingehalten:

Mähwiese

Auf Mähwiesen erfolgte in der Vergangenheit ausschließlich eine Nutzung durch Mahd zur Futtergewinnung und keine Bestoßung durch Weidevieh. Mähwiesen wurden weiters nach ihrer Schnitthäufigkeit in 1-2 Schnittwiesen (*Mähwiese extensiv*) und 3- oder Mehrschnittwiesen (*Mähwiese intensiv*) unterteilt.

Weide

Auf diesen Flächen erfolgte keine Mahd zum Zweck der Futtergewinnung. Es erfolgte ausschließlich Beweidung. Alle untersuchten Weiden wurden laut Angaben der Bewirtschafter dennoch mehr oder weniger häufig mit dem Traktor überfahren. Gründe für die Befahrung der Weiden waren die Durchführung von Reinigungsschnitten zwischen den Weidegängen sowie die Wasserversorgung der Weidetiere, Reparaturarbeiten an Zäunen etc.

Mähweide

Mähweiden stellen die Übergangsform zwischen Mähwiesen und Weiden dar. Diese Flächen wurden in der Vergangenheit sowohl beweidet als auch gemäht.

Üblich ist im Untersuchungsgebiet eine alternierende Nutzung von Mahd und Beweidung, sowie eine Beweidung im Frühjahr mit anschließenden Schnittnutzungen. Außerdem eine Bestoßung der Flächen im Herbst nach der Mähnutzung des letzten Aufwuchses.

¹ Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Referenzfläche

Als Referenzflächen für die natürlichen Lagerungsverhältnisse der Böden im Untersuchungsgebiet wurden zwei Flächen herangezogen, die im Laufe der vergangenen 10 Jahren weder durch Rinder beweidet, noch durch schwere Maschinen befahren wurden. Die Mahd auf den Referenzflächen erfolgte mittels Motormäher (s1) bzw. mit der Sense (s7).

2.2.2 Bodenphysikalische Untersuchungen

2.2.2.1 Messung der Lagerungsdichte

Die Messung der Lagerungsdichte folgte im Wesentlichen dem Verfahren von HARTGE und HORN (2009) und wurde nach ÖNORM L 1068 ausgewertet.

Die Messung der Lagerungsdichte erfolgte insgesamt auf 22 Standorten. Dabei wurden je Tiefenstufe sechs Messwiederholungen durchgeführt. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit 792 Stechzylinderproben ausgewertet.

Für die Messungen an den Versuchsstandorten wurden Stellen gewählt, welche hinsichtlich des Geländes und des Pflanzenbestandes möglichst repräsentativ erschienen. Um auszuschließen, dass die beprobten Flächen durch Erdarbeiten wie Geländekorrekturen beeinträchtigt wurden, wurde im Vorhinein mit dem Bewirtschafter der Fläche Rücksprache gehalten. Die Messungen der Lagerungsdichte erfolgten bei gemäßigten Bodenfeuchtebedingungen.

Zur Probennahme wurden genormte und nummerierte Stechzylinder mit einem Volumen von 100 cm³ verwendet. Die Messungen der Lagerungsdichte erfolgte bis in eine Tiefe von 30 cm und wurde in sechs Tiefenstufen erhoben (0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-25cm, 25-30cm). Die Messung jeder Tiefenstufe erfolgte in sechsfacher Wiederholung, um mögliche Messfehler gering zu halten.

Nach Eintreiben der Stechzylinder mit Hilfe eines Probennehmers sowie eines Schonhammers in die gewünschte Tiefenstufe wurden diese möglichst schonend mit Hilfe eines Spatens sowie einer kleineren Schaufel ausgegraben, um den Zylinderinhalt nicht zu beeinflussen. Über den Zylinderrand hinausragende Erdreste oder Wurzeln wurden mit Hilfe eines scharfen Messers mit Wellenschliff plan abgeschnitten. Falls bei der Entnahme festgestellt wurde, dass sich größere Steine im Zylinderinhalt befanden, welche über den Zylinderinhalt hinausragten, wurde die Probe verworfen und erneut durchgeführt. Unmittelbar an die Beprobung anschließend wurden die Stechzylinder verschlossen. Im Labor wurden die Stechzylinder bis zur Gewichtskonstanz bei 105 C° in einem Trockenschrank (*Heraeus* UT20) getrocknet. In allen Fällen waren hierfür eine Trocknungszeit von 24 Stunden ausreichend. Anschließend wurde der Zylinderinhalt mithilfe einer Laborwaage (*Sartorius*) mit einer Messgenauigkeit von 0,01 Gramm verwogen.

Vom erhaltenen Gewichtswert (Inhalt und Stechzylinder) wurde das individuelle Gewicht des verwendeten Stechzylinders abgezogen. Vor Versuchsbeginn wurden

alle verwendeten Stechzylinder ausgewogen und die individuellen Gewichte in eine Wiegelliste eingetragen.



Abb.12: Verwiegung der Stechzylinder



Abb.13: Trocknung der Bodenproben

2.2.2.2 Messung des Eindringwiderstandes

Unter Zuhilfenahme eines Penetrologgers (*Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Art.Nr. 06.15.01*) wurde auf sämtlichen Erhebungsstandorten eine Messung des Eindringwiderstandes durchgeführt.

Mit einem Penetrologger lässt sich der Eindringwiderstand von Böden bis in eine Tiefe von 80 cm messen. Auf den untersuchten Standorten wurden jedoch Messungen bis in eine Tiefe von 30 cm durchgeführt, da ein hoher Skelettgehalt der Böden keine vergleichbaren Messungen zuließ. Die gemessenen Eindringwiderstände der unterschiedlichen Tiefen werden pro Zentimeter in Megapascal (MPa) bzw. Newton pro Quadratmeter (N/m²) gemessen und im Gerät abgespeichert. Anschließend können die Daten sowohl grafisch als auch numerisch auf den PC übertragen und weiterverarbeitet werden. Zur Übertragung und Aufbereitung der Daten wurde die zum Gerät mitgelieferte Software *Penetroviewer* (Version 4.25) verwendet. Die numerische Weiterverarbeitung der Daten erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft Excel 2007*.



Abb.14: Messung des Eindringwiderstandes mittels Penetrologger

Für die Messungen des Eindringwiderstandes wurde eine Messspitze mit einem Durchmesser von 2 cm und einem Winkel von 60° verwendet. Auf jedem Standort wurden zehn Penetrationen durchgeführt.

Laut Angaben des Herstellers wird der Eindringwiderstand maßgeblich von der Dichte, der Textur und Struktur des Bodens determiniert. Weitere Einflussfaktoren sind der Gehalt an organischer Masse sowie der Wassergehalt (EIJKELKAMP 2013).

2.2.2.3 Messung der volumetrischen Bodenfeuchte

Um den Einfluss des Wassergehalts in die Messungen einzubeziehen, wurde zeitgleich zu den Penetrationsmessungen die Bodenfeuchte erhoben. Dazu diente der Bodenfeuchtesensor SM150 (*Delta-T Devices Ltd*) in Kombination mit dem Anzeigegerät HH150 (*Delta-T Devices Ltd*). Die Bodenfeuchtemessung erfolgte je Standort in dreifacher Messwiederholung mit anschließender Mittelwertbildung.

2.2.3 Bodenchemische Analysen

Auf den untersuchten Flächen wurden sowohl aus dem A-, als auch aus dem B-Horizont fünf Einzelproben entnommen und zu horizontbezogenen Mischproben vereinigt. Anschließend wurden die Bodenproben luftgetrocknet und bei einer Maschenweite von 2mm gesiebt.

Im Zuge der bodenchemischen Analysen erfolgte eine Bestimmung des pH-Wertes (ÖNORM L 1083) in einer 0,01 M CaCl₂-Lösung. Weiters wurden der Gehalt an organischem Kohlenstoff durch trockene Verbrennung (ÖNORM L 1080) und der Gesamt-Stickstoffgehalt durch trockene Verbrennung (ÖNORM L 1095) bestimmt.

2.2.4 Vegetationserhebung

Die Vegetationserhebungen der Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung erfolgten nach der Methode von BRAUN-BLANQUET nach der Beschreibung von WILLMANNNS (1998).

Dazu wurde an den Messstellen in einem Bereich von 10 mal 10 Metern zunächst die durchschnittliche allgemeine Vegetationsdeckung eingeschätzt. Anschließend wurde in einem Flächenausmaß von 5 mal 5 Metern die Abundanz (Deckungsgrad und Soziabilität) der Zeigerarten für Bodenverdichtung erhoben. Zur Identifikation der Zeigerarten wurde die Literatur von DIETL und JORQUERA (2012) und DEUTSCH (2014) verwendet. Sämtliche Vegetationsaufnahmen wurden in einem Zeitraum von Anfang Juli bis Ende August durchgeführt.

Schätzung der Artmächtigkeit (Menge)		Ø Deckung (%)
r	1 Individuum in der Aufnahme­fläche, außerhalb im Bestand nur sehr sporadisch	-
+	2-5 Individuen in der Aufnahme­fläche, Deckung geringer als 5%	1
1	6-50 Individuen in der Aufnahme­fläche, Deck. geringer als 5%	2
2m	mehr als 50 Individuen in Aufnahme­fläche, Deck. geringer als 5%	3
2a	Individuenzahl beliebig, Deck. 5-15 %	10
2b	Individuenzahl beliebig, Deck 16-25 %	20
3	Individuenzahl beliebig, Deck. 26-50 %	37.5
4	Individuenzahl beliebig, Deck. 51-75 %	62.5
5	Individuenzahl beliebig, Deck. 76-100%	87.5

Soziabilität (Geselligkeit, Häufungsweise)

1	einzeln wachsend
2	gruppen- oder horstweise wachsend
3	trupweise wachsend (kleine Flecken oder Polster bildend)
4	in kleinen Kolonien wachsend oder größere Flecken oder Teppiche bildend
5	in großen Herden wachsend

Tab. 8: BRAUN-BLANQUET-Skala, modifiziert nach WILLMANNNS (1998)

2.2.5 Statistische Auswertung der Daten

Die Eingabe und Sammlung der Daten erfolgte mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistiksoftware *R* (Commander Version 2.2-1) sowie *SAS* (Version 9.4.). Grafische Darstellungen wurden mit allen drei Programmen erstellt.

Als generelles Signifikanzniveau wurde eine Grenze von 5 % ($\alpha=0,05$) festgesetzt.

Zur Überprüfung der Normalverteilung der Daten wurde der Shapiro-Wilk-Test herangezogen. Die Überprüfung der Varianzhomogenität erfolgte durch den Levene-Test.

Zur Auswertung der Daten wurden nicht-parametrische Testverfahren angewandt. Zur Unterscheidung zentraler Tendenzen wurde der Kruskal-Wallis Test angewandt. Anschließende post-hoc Tests wurden durch die Prozedur NPAR1WAY (SAS) mittels Wilcoxon-Rangsummentests durchgeführt. Es erfolgte eine Alpha-Adjustierung nach der Methode von BONFERRONI-HOLM.

Zur Analyse von Korrelationen wurden Rangkorrelationen nach SPEARMAN durchgeführt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Nutzungserhebung

Von den Bewirtschaftern wurde die Befahrungshäufigkeit und die Nutzungsintensität der Flächen erfragt. Die genannten Befahrungshäufigkeiten wurden in folgende Kategorien eingeteilt:

- *nicht befahren*
- *selten befahren* (<5 Überfahrten / Jahr)
- *wenig befahren* (5 bis 10 Überfahrten/Jahr)
- *häufig befahren* (10 bis 30 Überfahrten /Jahr)
- *sehr häufig befahren* (> 30 Überfahrten / Jahr).

Nutzung	Standort Nr.	jährliche Schnittnutzungen	Befahrungshäufigkeit (geschätzte Ø Zahl an jährlichen Traktorüberfahrten)
M(R)	s1	1-2	nicht befahren
M(R)	s7	1-2	nicht befahren
Mext	s6	1-2	wenig (5-10)
Mext	s8	2	wenig (5-10)
Mext	s14	1-2	wenig (5-10)
Mext	s15	1-2	wenig (5-10)
Mint	s2	5-6	sehr häufig(>30)
Mint	s3	3	häufig (10-30)
Mint	s10	5-6	sehr häufig(>30)
Mint	s12	5-6	sehr häufig(>30)
Mint	s13	5-6	sehr häufig(>30)
Mint	s16	3	häufig (10-30)
MW	s4	1-2	häufig (10-30)
MW	s5	1-2	häufig (10-30)
MW	s19	3	häufig (10-30)
W	s11	-	wenig (5-10)
W	s17	-	wenig (5-10)
W	s18	-	wenig (5-10)
W	s9	-	wenig (5-10)
W*	s9.2	-	sehr häufig(>30)
W*	s9.3	-	nicht befahren
Mext*	s9.4	1-2	selten(<5)

MW= *Mähweide*

Mext= *Mähwiese extensiv*

*= Teilfläche der Messung auf Standort 9

Mint= *Mähwiese intensiv*

W= *Weide*

M(R)= *Referenzfläche*

Tab. 9: Nutzungsform und Befahrungsintensität der untersuchten Standorte

Die Erhebungen zeigten, dass auf den untersuchten Mähwiesen eine bis sechs jährliche Schnittnutzungen durchgeführt wurden. Anhand der unter 2.2.1 erwähnten Gliederung wurden die Mähwiesen in *intensive Mähwiesen* (>2 Schnittnutzungen) und *extensive Mähwiesen* (maximal 2 Schnittnutzungen) unterteilt. Auf den Mähweiden erfolgten zusätzlich zur Beweidung ein bis drei jährliche Schnittnutzungen.

Die Erhebung der Befahrungshäufigkeit zeigte, dass die untersuchten extensiven Mähwiesen eine geringere Zahl an jährlichen Überfahrten (5-10) aufwiesen als intensive Mähwiesen. Intensive Mähwiesen wurden entweder *häufig* (2 Nennungen) oder *sehr häufig* (4 Nennungen) befahren.

Weiden wurden zur Durchführung von Reinigungsschnitten sowie zur Ausbringung organischer Düngung und Bestandspflege durchschnittlich 5 bis 10 Mal jährlich befahren, was in etwa der Befahrungshäufigkeit der untersuchten extensiven Mähwiesen entspricht.

Mähweiden liegen in Bezug auf die Befahrungshäufigkeit zwischen extensiv und intensiv genutzten Mähwiesen und wurden im Durchschnitt 10 bis 30 Mal jährlich überfahren, wobei die Anzahl der Überfahrten, nach Auskunft der Bewirtschafter, je nach der Zahl an Weidegängen bzw. Schnittnutzungen sehr stark variieren kann.

3.2 Bodenchemische Analysen

Folgende Werte wurden mittels bodenchemischer Analysen horizontbezogen für die einzelnen Untersuchungsstandorte ermittelt:

Nutzung	Nr.	Horizont	pH	Corg (%)	Nges (%)	Corg / Nges
M(R)	s1	A	4.13	2.88	0.26	11.08
		B	4.02	2.30	0.19	12.11
M(R)	s7	A	5.18	3.10	0.28	11.07
		B	5.27	1.74	0.17	10.24
Mext	s6	A	4.95	7.01	0.74	9.47
		B	4.67	2.64	0.25	10.56
Mext	s8	A	4.83	4.72	0.48	9.83
		B	4.97	1.48	0.13	11.38
Mext	s14	A	4.47	4.07	0.35	11.63
		B	4.83	1.19	0.09	13.22
Mext	s15	A	5.18	4.07	0.37	11.00
		B	5.24	1.27	0.12	10.58
Mint	s2	A	5.30	2.85	0.28	10.18
		B	5.45	1.57	0.14	11.21
Mint	s3	A	4.62	4.50	0.46	9.78
		B	4.97	1.21	0.11	11.00
Mint	s10	A	5.03	4.62	0.49	9.43
		B	5.11	1.52	0.12	12.67
Mint	s12	A	5.34	4.80	0.47	10.21
		B	5.81	1.54	0.13	11.85
Mint	s13	A	4.55	2.88	0.27	10.67
		B	4.94	1.15	0.10	11.50
Mint	s16	A	5.03	2.89	0.28	10.32
		B	5.30	1.28	0.11	11.64
MW	s4	A	4.66	3.61	0.37	9.76
		B	4.85	1.14	0.11	10.36
MW	s5	A	5.04	7.29	0.77	9.47
		B	5.40	2.22	0.24	9.25
MW	s19	A	5.52	4.59	0.48	9.56
		B	5.74	1.46	0.13	11.23
W	s11	A	5.25	5.14	0.51	10.08
		B	5.40	1.22	0.10	12.20
W	s17	A	5.54	3.94	0.41	9.61
		B	5.20	1.39	0.13	10.69
W	s18	A	6.34	4.28	0.42	10.19
		B	5.92	1.77	0.16	11.06
W	s9	A	5.52	4.29	0.40	10.73
		B	5.74	1.09	0.09	12.11

pH= pH-Wert, Corg= Gehalt an organischem Kohlenstoff (%), Nges=Gesamtstickstoffgehalt (%)

Tab.10: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse der einzelnen Untersuchungsstandorte

Tabelle 11 zeigt die Gesamtmittelwerte und Standardabweichungen der erhobenen Parameter aller Untersuchungsstandorte

Horizont	pH	Corg (%)	Nges (%)	Corg / Nges	n
A	5.08 ± 0.49	4.29 ± 1.25	0.43 ± 0.14	10.21 ± 0.65	19
B	5.20 ± 0.46	1.54 ± 0.43	0.14 ± 0.05	11.31 ± 0.94	19

Tab.11: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse, Gesamtmittelwert und Standardabweichung

Die untersuchten Grünlandböden sind nach der Einteilung von BLUME et al. (2010) im A-, sowie im B-Horizont als *stark* (pH 4-4,9) bzw. *mäßig sauer* (pH 5-5,9) einzustufen. Einer der Untersuchungsstandorte (s18) wies im A-Horizont einen pH-Wert von 6,34 auf und ist somit als *schwach sauer* (pH 6,0-6,9) einzustufen.

Im Mittel wiesen die untersuchten Standorte im A-Horizont einen pH-Wert von 5,08 und im darunterliegenden B-Horizont einen pH-Wert von 5,2 auf.

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff (Corg) lagen im A-Horizont zwischen 2,85 und 7,29 % und im Mittel aller Standorte bei 4,29 %.

Im B-Horizont wurden deutlich niedrigere organische Kohlenstoffgehalte von 1,09 bis 2,64 % gemessen. Der Mittelwert aller untersuchten Böden lag im B-Horizont bei 1,54 %.

Da die untersuchten Böden karbonatfrei und sauer sind, ist davon auszugehen, dass der Gehalt an organischem Kohlenstoff dem Gesamtkohlenstoffgehalt entspricht.

Die Gesamtstickstoffgehalte (Nges) bewegten sich zwischen 0,26 und 0,77 % im A-Horizont (Mittelwert=0,43) und zwischen 0,09 und 0,25 % im B-Horizont (Mittelwert=0,14).

Das C/N Verhältnis der untersuchten Grünlandböden lag im Durchschnitt bei 10,21 im A Horizont und bei 11,31 im B-Horizont. Im A-Horizont wurden Werte zwischen 9,43 und 11,63 gemessen, im B-Horizont zwischen 9,25 und 13,22.

Zum Zweck der Vergleichbarkeit wurden die Analysewerte für die untersuchten Nutzungen gruppiert:

Nutzung	Horizont	pH	Corg (%)	Nges (%)	Corg / Nges
M(R)	A	4.66 ± 0.74	2.99 ± 0.16	0.27 ± 0.01	11.07 ± 0.00
	B	4.65 ± 0.88	2.02 ± 0.40	0.18 ± 0.01	11.17 ± 1.32
Mext	A	4.86 ± 0.30	4.97 ± 1.40	0.49 ± 0.18	10.48 ± 1.00
	B	4.93 ± 0.24	1.65 ± 0.67	0.15 ± 0.07	11.44 ± 1.25
Mint	A	4.98 ± 0.33	3.76 ± 0.97	0.38 ± 0.11	10.10 ± 0.43
	B	5.26 ± 0.33	1.38 ± 0.19	0.12 ± 0.01	11.64 ± 0.58
MW	A	5.07 ± 0.43	5.16 ± 1.91	0.54 ± 0.21	9.60 ± 0.15
	B	5.33 ± 0.45	1.61 ± 0.55	0.16 ± 0.07	10.28 ± 0.99
W	A	5.66 ± 0.47	4.41 ± 0.51	0.44 ± 0.05	10.15 ± 0.46
	B	5.57 ± 0.33	1.37 ± 0.30	0.12 ± 0.03	11.52 ± 0.75

Tab.12: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse nach Nutzungen, Mittelwert und Standardabweichung

Die untersuchten Parameter zeigten nutzungsabhängige Unterschiede. Die Nutzungen *Weide*, *Mähweide* und *Mähwiese intensiv* wiesen gegenüber der Nutzung *Mähwiese extensiv* und den Referenzflächen erhöhte pH-Werte auf, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den erhöhten Baseneintrag über die Düngung zurückzuführen ist. Auch das engere C/N-Verhältnis der genannten Nutzungen, das auf einen erhöhten Abbaugrad der organischen Substanz schließen lässt, ist vermutlich auf die erhöhten N-Einträge durch die Düngung und die allgemein höhere Bewirtschaftungsintensität zurückzuführen.

3.3 Lagerungsdichte der untersuchten Standorte

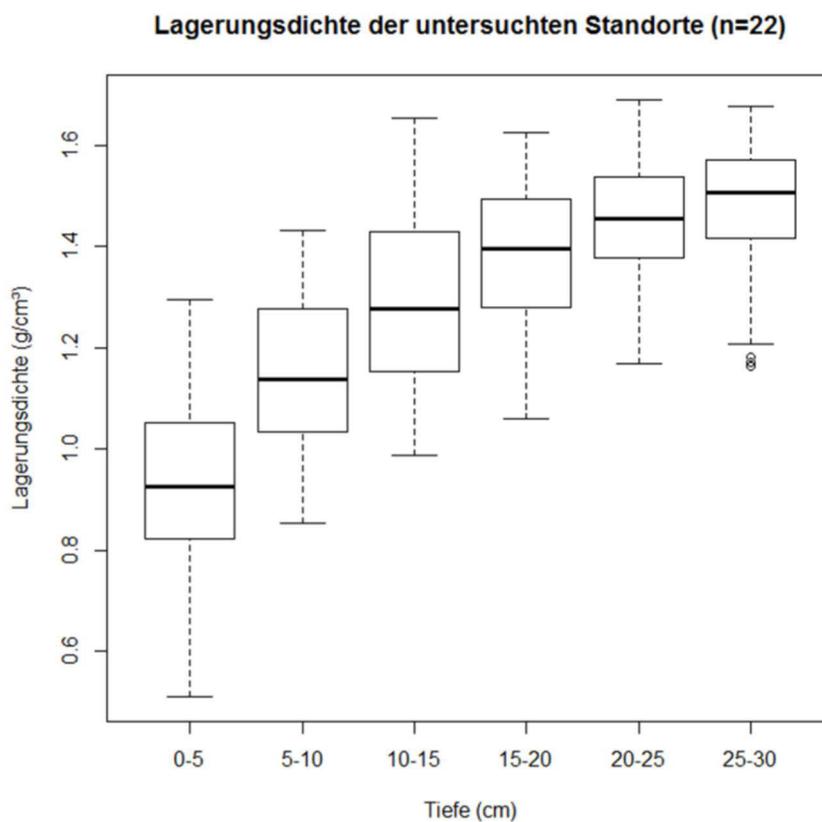


Abb.15: Boxplot-Diagramm, Lagerungsdichte (g/cm^3) der untersuchten Standorte

Tiefe (cm)	pB		sd	median	min	max	n
0-5	0.93	±	0.16	0.93	0.51	1.30	132
5-10	1.14	±	0.15	1.14	0.85	1.43	132
10-15	1.29	±	0.17	1.28	0.99	1.65	132
15-20	1.38	±	0.14	1.40	1.06	1.63	132
20-25	1.46	±	0.11	1.45	1.17	1.69	132
23-30	1.48	±	0.11	1.51	1.16	1.68	132

Tab.13: Lagerungsdichte (g/cm^3) der untersuchten Standorte

Abbildung 15 und Tabelle 13 zeigen die gemessenen Lagerungsdichten der untersuchten Standorte in den verschiedenen Tiefenstufen. Die Werte zeigen eine kontinuierliche Zunahme der Lagerungsdichte mit steigender Bodentiefe und tendenziell höhere Standardabweichungen im Bereich des Oberbodens. Der niedrigste gemessene Wert der Lagerungsdichte ($0,51 \text{ g/cm}^3$) wurde im Oberboden (Tiefenstufe 0-5cm) einer extensiven Mähwiese gemessen. Der höchste Messwert der Lagerungsdichte lag bei $1,69 \text{ g/cm}^3$ und wurde in der Tiefenstufe 20-25cm einer Weide gemessen.

Tabelle 14 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Lagerungsdichte der untersuchten Dauergrünlandböden.

Nutzung	Standort Nr.	0-5cm			5-10cm			10-15cm			15-20cm			20-25cm			25-30cm		
		ρ_B	\pm	sd															
M(R)	s1	0.83	\pm	0.06	0.90	\pm	0.05	1.11	\pm	0.07	1.27	\pm	0.04	1.38	\pm	0.03	1.32	\pm	0.11
M(R)	s7	0.86	\pm	0.08	0.99	\pm	0.08	1.11	\pm	0.06	1.22	\pm	0.03	1.34	\pm	0.03	1.36	\pm	0.04
Mext	s6	0.70	\pm	0.05	0.94	\pm	0.05	1.13	\pm	0.04	1.21	\pm	0.02	1.21	\pm	0.03	1.20	\pm	0.04
Mext	s8	0.86	\pm	0.06	1.09	\pm	0.07	1.14	\pm	0.03	1.29	\pm	0.05	1.35	\pm	0.03	1.34	\pm	0.03
Mext	s14	0.64	\pm	0.10	0.95	\pm	0.03	1.06	\pm	0.05	1.13	\pm	0.05	1.39	\pm	0.07	1.50	\pm	0.02
Mext	s15	0.91	\pm	0.07	1.09	\pm	0.06	1.18	\pm	0.05	1.21	\pm	0.06	1.37	\pm	0.03	1.40	\pm	0.04
Mint	s2	0.92	\pm	0.05	1.06	\pm	0.04	1.22	\pm	0.04	1.41	\pm	0.03	1.44	\pm	0.02	1.56	\pm	0.04
Mint	s3	0.76	\pm	0.09	1.04	\pm	0.04	1.34	\pm	0.06	1.50	\pm	0.02	1.53	\pm	0.04	1.54	\pm	0.03
Mint	s10	0.84	\pm	0.03	0.97	\pm	0.03	1.11	\pm	0.05	1.23	\pm	0.07	1.44	\pm	0.05	1.57	\pm	0.04
Mint	s12	0.99	\pm	0.06	1.15	\pm	0.03	1.20	\pm	0.04	1.38	\pm	0.05	1.45	\pm	0.03	1.63	\pm	0.02
Mint	s13	1.07	\pm	0.09	1.14	\pm	0.05	1.38	\pm	0.05	1.49	\pm	0.03	1.53	\pm	0.06	1.49	\pm	0.05
Mint	s16	0.82	\pm	0.06	1.25	\pm	0.04	1.46	\pm	0.06	1.49	\pm	0.05	1.53	\pm	0.04	1.51	\pm	0.03
Mw	s4	1.04	\pm	0.11	1.27	\pm	0.08	1.42	\pm	0.05	1.57	\pm	0.01	1.63	\pm	0.03	1.62	\pm	0.02
Mw	s5	0.91	\pm	0.11	1.07	\pm	0.06	1.18	\pm	0.03	1.40	\pm	0.02	1.45	\pm	0.05	1.45	\pm	0.04
Mw	s19	1.07	\pm	0.05	1.36	\pm	0.03	1.50	\pm	0.04	1.58	\pm	0.02	1.57	\pm	0.04	1.53	\pm	0.02
W	s11	1.12	\pm	0.07	1.28	\pm	0.05	1.58	\pm	0.04	1.60	\pm	0.03	1.67	\pm	0.02	1.59	\pm	0.02
W	s17	0.87	\pm	0.07	1.27	\pm	0.03	1.46	\pm	0.04	1.38	\pm	0.03	1.49	\pm	0.05	1.50	\pm	0.04
W	s18	1.03	\pm	0.10	1.31	\pm	0.03	1.40	\pm	0.06	1.37	\pm	0.04	1.42	\pm	0.04	1.48	\pm	0.02
W	s9	1.06	\pm	0.05	1.30	\pm	0.06	1.40	\pm	0.04	1.40	\pm	0.03	1.47	\pm	0.05	1.58	\pm	0.02
W*	s9.2	1.20	\pm	0.07	1.36	\pm	0.05	1.52	\pm	0.11	1.54	\pm	0.03	1.60	\pm	0.04	1.64	\pm	0.02
W*	s9.3	1.12	\pm	0.06	1.28	\pm	0.07	1.41	\pm	0.04	1.41	\pm	0.03	1.48	\pm	0.02	1.40	\pm	0.03
Mext*	s9.4	0.83	\pm	0.03	1.02	\pm	0.07	1.16	\pm	0.10	1.38	\pm	0.04	1.34	\pm	0.07	1.44	\pm	0.04

Mext= Mähwiese extensiv

Mint= Mähwiese intensiv

Mw= Mähweide

W= Weide

M(R)= Referenzfläche

* Teilfläche der Messung auf s9

Tab.14: Einzelergebnisse der Lagerungsdichte (g/cm^3) der untersuchten Standorte, Mittelwert und Standardabweichung der Tiefenstufen

3.3.1 Korrelation der Lagerungsdichte und des organischen Kohlenstoffgehalts

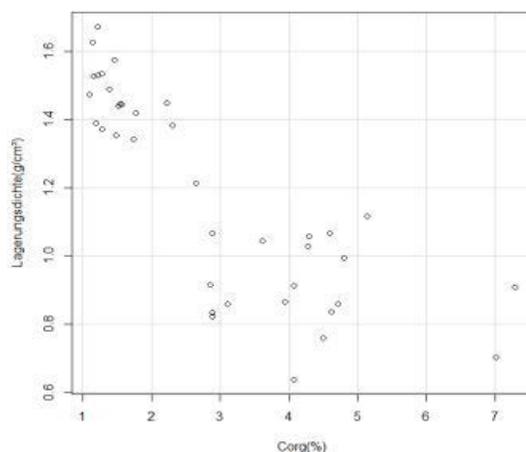


Abb.16: Scatter-Plot der Parameter Lagerungsdichte (g/cm^3) und Corg-Gehalt (%)

	n	mw	sd	Spearman'scher Rangkorrelationskoeffizient	p
Lagerungsdichte	38	1.827	0.30137	-0.8231561	<0.0001
Corg-Gehalt	38	2.913	1.671		

Tab.15: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte (g/cm³) und Corg-Gehalt (%)

Ein aus Voruntersuchungen bekannter Zusammenhang der Parameter Lagerungsdichte und organischem Kohlenstoff wurde ebenfalls mittels Korrelationsanalyse nach SPEARMAN überprüft. Das Ergebnis zeigte eine statistisch signifikante ($p < 0,0001$) stark negative Korrelation mit einem *Spearman'schen* Korrelationskoeffizienten von -0,8231.

3.3.2 Nutzungsspezifische Lagerungsdichte

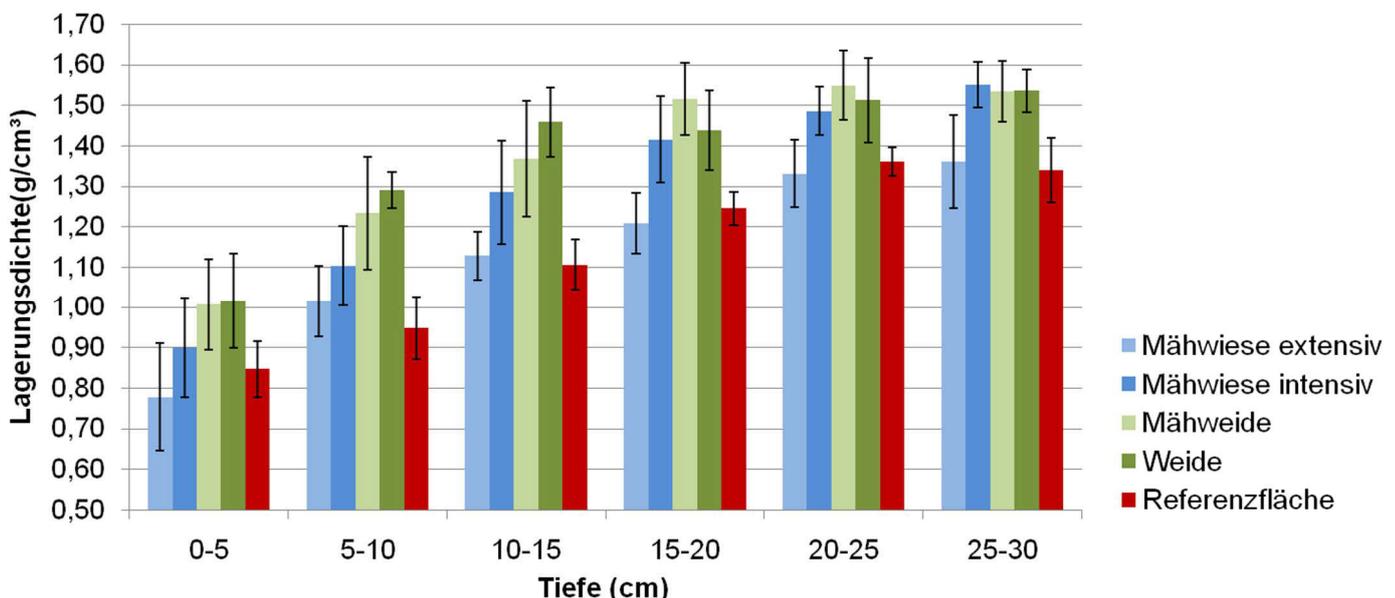


Abb.17: Lagerungsdichte (g/cm³) der Nutzungen im Vergleich

Die untersuchten Standorte wurden nach den unter 2.2.1 erwähnten Kriterien nach ihrer Nutzung gruppiert. Für die unterschiedlichen Nutzungen und Referenzflächen wurden folgende Lagerungsdichten ermittelt.

<i>Referenzfläche</i>							
Tiefe	mw	±	sd	med	min	max	n
0-5cm	0.85	±	0.07	0.85	0.71	0.94	12
5-10cm	0.95	±	0.08	0.95	0.85	1.05	12
10-15cm	1.11	±	0.06	1.10	1.02	1.20	12
15-20cm	1.24	±	0.04	1.24	1.19	1.31	12
20-25cm	1.36	±	0.04	1.36	1.30	1.41	12
25-30cm	1.34	±	0.08	1.36	1.17	1.42	12

Tab.16: Lagerungsdichte(g/cm³) der Referenzflächen

(mw=arithmetischer Mittelwert, sd=Standardabweichung, med=median, min=kleinster Messwert, max=höchster Messwert, n=Stichprobenanzahl)

Weide

Tiefe	mw	±	sd	med	min	max	n
0-5cm	1.02	±	0.12	1.02	0.74	1.20	24
5-10cm	1.29	±	0.04	1.28	1.19	1.36	24
10-15cm	1.46	±	0.08	1.44	1.34	1.63	24
15-20cm	1.44	±	0.10	1.40	1.33	1.63	24
20-25cm	1.51	±	0.10	1.48	1.38	1.69	24
25-30cm	1.54	±	0.05	1.55	1.44	1.61	24

Tab.17: Lagerungsdichte(g/cm³) der Nutzung *Weide*

Mähwiese intensiv

Tiefe	mw	±	sd	med	min	max	n
0-5cm	0.90	±	0.12	0.89	0.65	1.17	36
5-10cm	1.10	±	0.10	1.09	0.93	1.29	36
10-15cm	1.28	±	0.13	1.27	1.04	1.55	36
15-20cm	1.42	±	0.11	1.44	1.13	1.55	36
20-25cm	1.49	±	0.06	1.47	1.37	1.63	36
25-30cm	1.55	±	0.06	1.55	1.44	1.68	36

Tab.18: Lagerungsdichte (g/cm³) der Nutzung *Mähwiese intensiv*

Mähwiese extensiv

Tiefe	mw	±	sd	med	min	max	n
0-5cm	0.78	±	0.13	0.79	0.51	0.99	24
5-10cm	1.02	±	0.09	1.01	0.90	1.16	24
10-15cm	1.13	±	0.06	1.13	0.99	1.24	24
15-20cm	1.21	±	0.08	1.21	1.06	1.35	24
20-25cm	1.33	±	0.08	1.35	1.17	1.49	24
25-30cm	1.36	±	0.11	1.36	1.16	1.52	24

Tab.19: Lagerungsdichte (g/cm³) der Nutzung *Mähwiese extensiv*

Mähweide

Tiefe	mw	±	sd	med	min	max	n
0-5cm	1.01	±	0.11	1.04	0.74	1.15	18
5-10cm	1.23	±	0.14	1.26	0.98	1.40	18
10-15cm	1.37	±	0.14	1.42	1.14	1.54	18
15-20cm	1.52	±	0.09	1.56	1.36	1.61	18
20-25cm	1.55	±	0.09	1.58	1.36	1.66	18
25-30cm	1.53	±	0.07	1.52	1.40	1.64	18

Tab.20: Lagerungsdichte (g/cm³) der Nutzung *Mähweide*

Der Vergleich der Lagerungsdichte der untersuchten Grünlandböden zeigte in allen Tiefenstufen nutzungsspezifische signifikante Unterschiede ($p < 0,0001$).

Die untersuchten unbefahrenen und unbeweideten Referenzflächen wiesen in der Tiefe von 0-5cm eine mittlere Lagerungsdichte von $0,85 \text{ g/cm}^3$ auf. In der Tiefe von 20-30cm lagen die Werte bei etwa $1,35 \text{ g/cm}^3$.

Beweidete Flächen (Nutzungen *Mähweide* und *Weide*) wiesen gegenüber unbeweideten Flächen (*Mähwiese extensiv*, *Mähwiese intensiv*, *Referenzfläche*) eine signifikant höhere Lagerungsdichte bis in eine Tiefe von 10 cm auf.

In der Tiefenstufe 10-15cm wiesen die Böden der Nutzung *Weide*, gegenüber den unbeweideten Standorten, signifikant erhöhte Lagerungsdichte auf.

Der Vergleich der Nutzungen *Mähweide* und *Weide* zeigte in keiner der untersuchten Tiefenstufen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Lagerungsdichte. In der obersten Tiefenstufe (0-5cm) wiesen Böden, die unter Einfluss von Beweidung standen, eine mittlere Lagerungsdichte von etwa 1 g/cm^3 auf. In der Tiefe von 20-30cm wurden auf den untersuchten Weiden und Mähweiden im Mittel Lagerungsdichten von rund $1,5 \text{ g/cm}^3$ gemessen.

Zwischen der Lagerungsdichte der Böden extensiv und intensiv bewirtschafteter Mähwiesen wurden in allen untersuchten Tiefenstufen signifikante Unterschiede festgestellt. Extensiv bewirtschaftete Mähwiesen zeigten sowohl im Oberboden als auch in den unteren Tiefenstufen eine signifikant niedrigere Lagerungsdichte.

Die Lagerungsdichte der Böden der Nutzung *Mähwiese intensiv* lag in der Tiefenstufe 0-5cm im Durchschnitt bei $0,9 \text{ g/cm}^3$ und zeigte im Tiefenverlauf eine stetige Zunahme auf $1,55 \text{ g/cm}^3$ (25-30cm). Signifikant erhöhte Lagerungsdichten gegenüber den Referenzflächen zeigten sich ab der Tiefenstufe 0-5cm. In Tiefenstufe 0-5cm wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt ($p = 0,1747$).

Die Nutzungen *Mähwiese extensiv* und die Referenzflächen unterschieden sich hinsichtlich der Lagerungsdichte lediglich in der Tiefenstufe 5-10cm signifikant. Hier lagen die Messwerte der *extensiven Mähwiesen* signifikant höher ($p = 0,0235$). In der obersten Tiefenstufe (0-5cm) lag die mittlere Lagerungsdichte der Böden der Nutzung *Mähwiese extensiv* mit $0,78 \text{ g/cm}^3$, unter der der Referenzflächen (Unterschiede nicht signifikant, $p = 0,1227$). In der Tiefe von 20-30cm lagen die gemessenen Werte im Mittel, im Bereich der Messwerte der Referenzflächen, bei etwa $1,35 \text{ g/cm}^3$ (keine signifikanten Unterschiede).

Tiefenstufe (cm)		df	X ²	p	Bonferroni-Holm Korrektur	Signifikanz	
0-5	Kruskal-Wallis-Test		4	41.5499	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	19.5581	<.0001	p < 0.05/9	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	8.6195	0.0033	p < 0.05/4	*
	Mähweide	Referenz	1	11.4695	0.0007	p < 0.05/6	*
	Mähweide	Weide	1	0.0646	0.7994	p > 0.05/1	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	9.2905	0.0023	p < 0.05/5	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	2.3829	0.1227	p > 0.05/3	
	Mähwiese ext	Weide	1	23.6803	<.0001	p < 0.05/10	*
	Mähwiese int	Referenz	1	1.8418	0.1747	p > 0.05/2	
Mähwiese int	Weide	1	11.5266	0.0007	p < 0.05/7	*	
Referenz	Weide	1	14.893	0.0001	p < 0.05/8	*	
5-10	Kruskal-Wallis-Test		4	68.4621	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	17.1634	<.0001	p < 0.05/6	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	10.1934	0.0014	p < 0.05/4	*
	Mähweide	Referenz	1	17.5645	<.0001	p < 0.05/7	*
	Mähweide	Weide	1	0.5433	0.4611	p > 0.05/1	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	10.0413	0.0015	p < 0.05/3	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	5.1316	0.0235	p < 0.05/2	*
	Mähwiese ext	Weide	1	35.2672	<.0001	p < 0.05/9	*
	Mähwiese int	Referenz	1	16.5774	<.0001	p < 0.05/5	*
Mähwiese int	Weide	1	35.7069	<.0001	p < 0.05/10	*	
Referenz	Weide	1	23.3544	<.0001	p < 0.05/8	*	
10-15	Kruskal-Wallis-Test		4	67.4317	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	22.1092	<.0001	p < 0.05/7	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	4.0003	0.0455	p > 0.05/3	
	Mähweide	Referenz	1	16.5161	<.0001	p < 0.05/4	*
	Mähweide	Weide	1	2.4832	0.1151	p > 0.05/2	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	23.0246	<.0001	p < 0.05/8	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	1.4595	0.227	p > 0.05/1	
	Mähwiese ext	Weide	1	35.2653	<.0001	p < 0.05/10	*
	Mähwiese int	Referenz	1	16.9666	<.0001	p < 0.05/5	*
Mähwiese int	Weide	1	22.0221	<.0001	p < 0.05/6	*	
Referenz	Weide	1	23.3514	<.0001	p < 0.05/9	*	
15-20	Kruskal-Wallis-Test		4	67.6472	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	30.1395	<.0001	p < 0.05/9	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	10.9095	0.001	p < 0.05/4	*
	Mähweide	Referenz	1	20.9032	<.0001	p < 0.05/6	*
	Mähweide	Weide	1	4.3437	0.0371	p > 0.05/3	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	29.8378	<.0001	p < 0.05/8	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	2.7038	0.1001	p > 0.05/2	
	Mähwiese ext	Weide	1	34.2925	<.0001	p < 0.05/10	*
	Mähwiese int	Referenz	1	17.1642	<.0001	p < 0.05/5	*
Mähwiese int	Weide	1	0.0385	0.8445	p > 0.05/1		
Referenz	Weide	1	23.3514	<.0001	p < 0.05/7	*	
20-25	Kruskal-Wallis-Test		4	64.4852	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	25.582	<.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	8.0895	0.0045	p < 0.05/4	*
	Mähweide	Referenz	1	19.0168	<.0001	p < 0.05/5	*
	Mähweide	Weide	1	1.3081	0.2527	p > 0.05/3	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	34.3672	<.0001	p < 0.05/10	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	1.0823	0.2982	p > 0.05/2	
	Mähwiese ext	Weide	1	27.8639	<.0001	p < 0.05/9	*
	Mähwiese int	Referenz	1	24.5287	<.0001	p < 0.05/7	*
Mähwiese int	Weide	1	0.1053	0.7456	p > 0.05/1		
Referenz	Weide	1	19.6214	<.0001	p < 0.05/6	*	
25-30	Kruskal-Wallis-Test		4	60.3769	<.0001	-	*
	post-hoc						
	Mähweide	Mähwiese ext	1	19.0017	<.0001	p < 0.05/5	*
	Mähweide	Mähwiese int	1	0.4125	0.5207	p > 0.05/3	
	Mähweide	Referenz	1	19.3835	<.0001	p < 0.05/6	*
	Mähweide	Weide	1	0.0058	0.9392	p > 0.05/1	
	Mähwiese ext	Mähwiese int	1	33.8375	<.0001	p < 0.05/10	*
	Mähwiese ext	Referenz	1	0.3649	0.5458	p > 0.05/2	
	Mähwiese ext	Weide	1	25.1059	<.0001	p < 0.05/8	*
	Mähwiese int	Referenz	1	26.449	<.0001	p < 0.05/9	*
Mähwiese int	Weide	1	0.766	0.3815	p > 0.05/4		
Referenz	Weide	1	23.3514	<.0001	p < 0.05/7	*	

Tab. 21: statistische Auswertung der Lagerungsdichte der Nutzungen

3.4 Eindringwiderstand der untersuchten Standorte

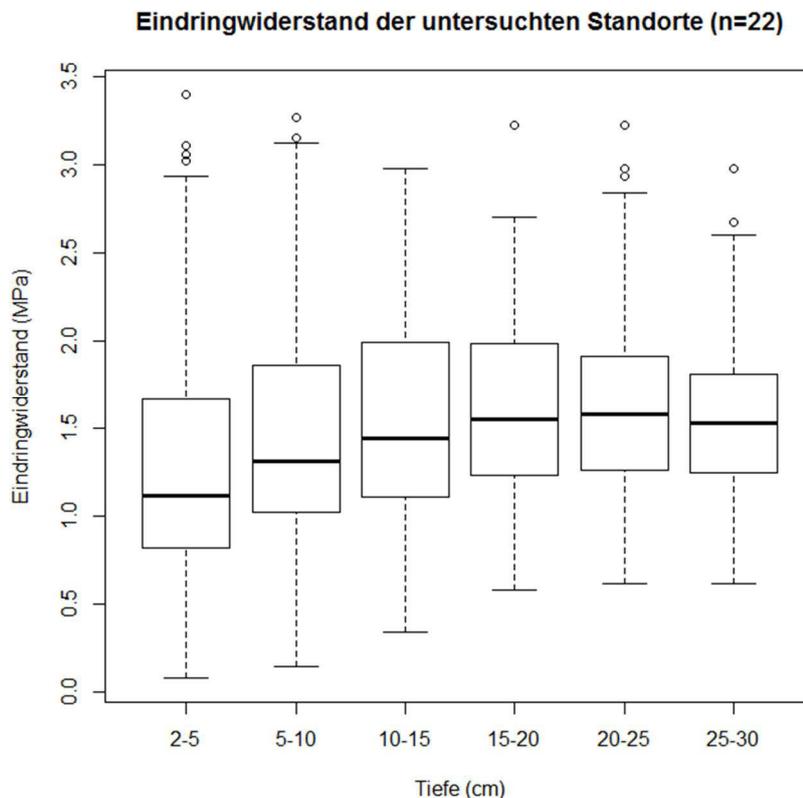


Abb. 18: Boxplot-Diagramm, Eindringwiderstände (MPa) der untersuchten Standorte

Tiefe (cm)	EW		sd	median	min	max	n
2-5	1.25	±	0.61	1.12	0.08	3.4	220
5-10	1.43	±	0.57	1.31	0.15	3.27	220
10-15	1.55	±	0.53	1.44	0.34	2.98	220
15-20	1.6	±	0.46	1.55	0.58	3.22	220
20-25	1.59	±	0.42	1.58	0.62	3.22	220
25-30	1.56	±	0.38	1.53	0.62	2.98	220

Tab. 22: Eindringwiderstände (MPa) der untersuchten Standorte

Die Messwerte des Eindringwiderstandes wurden zum Zweck der Vergleichbarkeit mit den Messungen der Lagerungsdichte in Tiefenstufen gruppiert. Dabei wurden die erhobenen Messwerte den Tiefenstufen 2-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-25 cm und 25-30 cm zugeordnet. Da der Eindringwiderstand in den obersten 2 cm sehr stark von der oberflächlichen Abtrocknung sowie der Vegetationsdeckung am Messstandort abhängig war, wurde anstatt der Tiefenstufe 0-5 cm (wie bei der Lagerungsdichtemessung angewandt) die Tiefenstufe 2-5 cm gewählt.

Die Eindringwiderstände der untersuchten Standorte wiesen vor allem im Bereich des Oberbodens hohe Variabilität auf, welche mit zunehmender Tiefe tendenziell abnahm.

3.4.1 Volumetrische Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung

Im Zuge der Messung des Eindringwiderstands auf den Untersuchungsstandorten wurde zeitgleich eine Messung der volumetrischen Bodenfeuchte (%) in dreifacher Messwiederholung durchgeführt. Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der drei Teilmessungen, sowie Mittelwert und Standardabweichung.

Standort	Nr.	Volumetrische Bodenfeuchte (%)			mw	±	sd
		Messung 1	Messung 2	Messung 3			
M(R)	s1	14.8	14.4	14.4	14.5	±	0.23
M(R)	s7	23.4	23	23.6	23.3	±	0.31
Mext	s6	35.6	36	36.1	35.9	±	0.26
Mext	s8	31	31.9	32	31.6	±	0.55
Mext	s14	46.2	46.4	44.3	45.6	±	1.16
Mext	s15	42.2	41.7	41.4	41.8	±	0.40
Mint	s2	37.8	38	36.5	37.4	±	0.81
Mint	s3	43.8	44.9	44.8	44.5	±	0.61
Mint	s10	37.4	35.7	36.3	36.5	±	0.86
Mint	s12	39.4	38.6	37.8	38.6	±	0.80
Mint	s13	40.1	42.7	42.3	41.7	±	1.40
Mint	s16	29.4	30	32.8	30.7	±	1.81
MW	s4	43.6	44.4	43.5	43.8	±	0.49
MW	s5	39.4	40	38.6	39.3	±	0.70
MW	s19	34.6	35	33.5	34.4	±	0.78
W	s11	42.6	43.8	42.1	42.8	±	0.87
W	s17	40	41.8	40.3	40.7	±	0.96
W	s18	37	37.5	36.8	37.1	±	0.36
W	s9	32.4	31.6	32	32.0	±	0.40
W*	s9.2	52	50.8	51.6	51.5	±	0.61
W*	s9.3	25.8	27.6	27.5	27.0	±	1.01
Mext*	s9.4	30.5	29.7	29.4	29.9	±	0.57

Mext= Mähwiese extensiv MW= Mähweide M(R)= Referenzfläche
 Mint= Mähwiese intensiv W= Weide * Teilfläche der Messung auf s9

Tab. 23: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der Untersuchungsstandorte zum Zeitpunkt der Messung des Eindringwiderstandes

Nutzung	Volumetrische Bodenfeuchte (%)		
	mw	±	sd
M(R)	18.93	±	4.83
Mext	38.73	±	5.64
Mint	38.24	±	4.54
MW	39.18	±	4.14
W	38.16	±	4.33

Tab. 24: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der einzelnen Nutzungen

Das Ergebnis der Bodenfeuchtemessung zeigt, dass die Messungen der unterschiedlichen Nutzungen bei annähernd gleicher Bodenfeuchte erfolgten. Zu beachten und in die Interpretation der Eindringwiderstände einzubeziehen ist jedoch, dass die untersuchten Referenzflächen zum Zeitpunkt der Messung geringere volumetrische Bodenfeuchte gegenüber den anderen Nutzungen aufwiesen.

3.4.3 Korrelation des Eindringwiderstandes und der volumetrischen Bodenfeuchte

Ein Zusammenhang der Parameter Eindringwiderstand und volumetrische Bodenfeuchte wurde mittels Korrelationsanalyse überprüft konnte jedoch nicht nachgewiesen werden ($p=0,4837$).

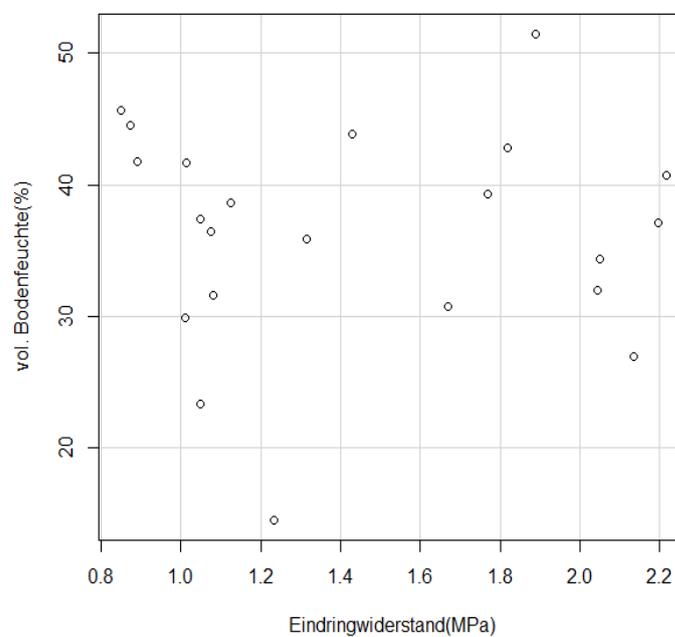


Abb. 19: Scatter-Plot der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und volumetrische Bodenfeuchte (%)

	n	mw	sd	Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient	p
Eindringwiderstand	22	1.445	0.48596	-0.1575826	0.4837
vol. Bodenfeuchte	22	36.3955	8.23476		

Tab. 25: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und volumetrische Bodenfeuchte (%)

3.4.4 Nutzungsspezifische Eindringwiderstände

Abbildung 20 zeigt eine Gegenüberstellung der Eindringwiderstände der Böden der untersuchten Nutzungen und Referenzflächen.

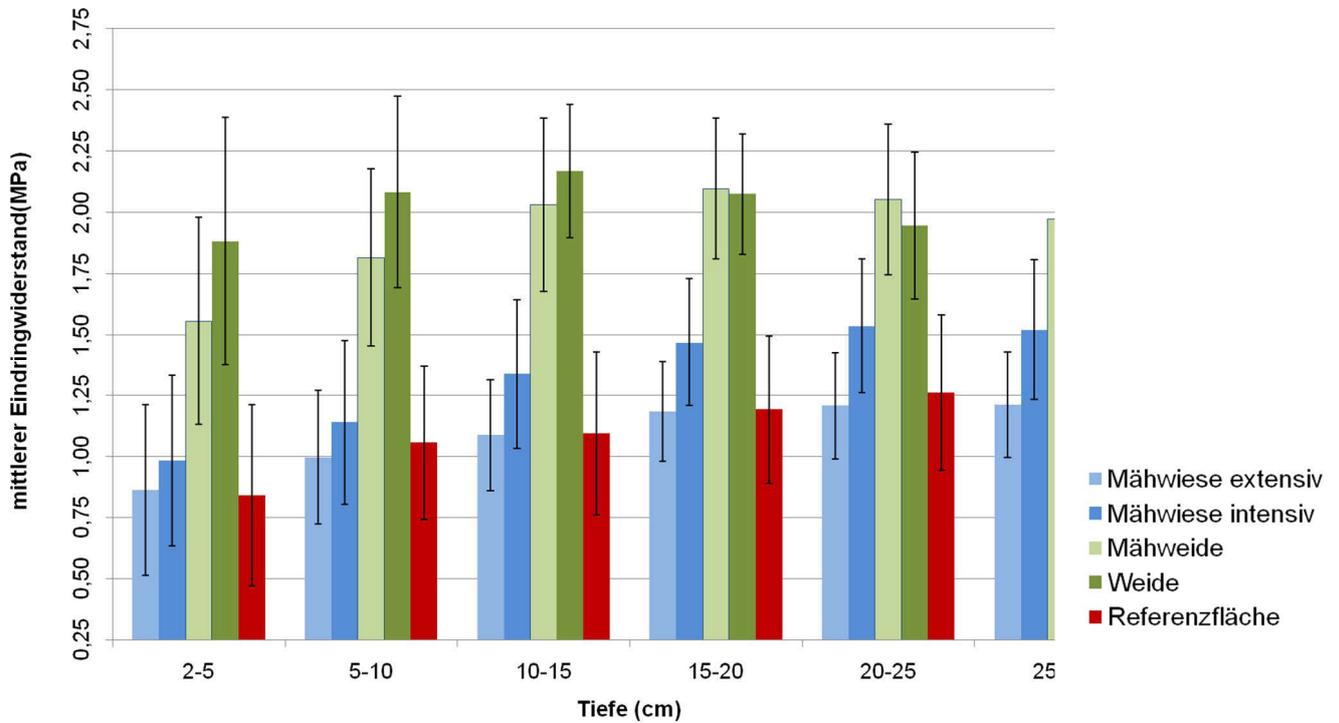


Abb.20: Diagramm Eindringwiderstand (MPa) der Nutzungen und der Referenzflächen im Vergleich, Mittelwert und Standardabweichung

<i>Referenzfläche</i>				
Tiefe	mw	±	sd	n
2-5cm	0.84	±	0.37	20
5-10cm	1.06	±	0.31	20
10-15cm	1.09	±	0.33	20
15-20cm	1.19	±	0.30	20
20-25cm	1.26	±	0.32	20
25-30cm	1.33	±	0.35	20

Tab. 26: Eindringwiderstand (MPa) der Referenzflächen

<i>Mähwiese extensiv</i>				
Tiefe	mw	±	sd	n
2-5cm	0.86	±	0.35	40
5-10cm	1.00	±	0.27	40
10-15cm	1.09	±	0.23	40
15-20cm	1.18	±	0.20	40
20-25cm	1.21	±	0.22	40
25-30cm	1.21	±	0.22	40

Tab. 27: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung *Mähwiese extensiv*

<i>Mähwiese intensiv</i>				
Tiefe	mw	±	sd	n
2-5cm	0.98	±	0.35	60
5-10cm	1.14	±	0.34	60
10-15cm	1.34	±	0.31	60
15-20cm	1.47	±	0.26	60
20-25cm	1.54	±	0.27	60
25-30cm	1.52	±	0.29	60

Tab. 28: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung *Mähwiese intensiv*

<i>Mähweide</i>				
Tiefe	mw	±	sd	n
2-5cm	1.56	±	0.42	30
5-10cm	1.82	±	0.36	30
10-15cm	2.03	±	0.35	30
15-20cm	2.10	±	0.29	30
20-25cm	2.05	±	0.31	30
25-30cm	1.97	±	0.29	30

Tab. 29: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung *Mähweide*

<i>Weide</i>				
Tiefe	mw	±	sd	n
2-5cm	1.88	±	0.51	40
5-10cm	2.08	±	0.39	40
10-15cm	2.17	±	0.27	40
15-20cm	2.07	±	0.25	40
20-25cm	1.95	±	0.30	40
25-30cm	1.82	±	0.35	40

Tab. 30: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung *Weide*

Die Eindringwiderstände der Referenzflächen (vol. Bodenfeuchte=18,9%) lagen im Bereich des Oberbodens in Tiefenstufe 2-5 cm im Mittel bei 0,84 MPa und zeigten im Tiefenverlauf eine konstante Zunahme auf 1,33 Mpa (25-30cm).

Im Vergleich der Nutzungen wiesen Böden der Nutzungen *Mähweide* und *Weide* bis in eine Tiefe von 30 cm signifikant höhere Eindringwiderstände als die übrigen Nutzungen *Mähwiese extensiv* (vol. Bodenfeuchte=38,7%), *Mähwiese intensiv* (vol. Bodenfeuchte=38,2%) und die Referenzflächen auf.

Die Eindringwiderstände der *Weiden* (vol. Bodenfeuchte=38,2%) lagen in der Tiefe von 2-5cm im Mittel bei 1,88 Mpa und zeigten eine Zunahme bis in Tiefenstufe 10-15cm. Hier wurden durchschnittlich 2,17 MPa gemessen. Im weiteren Tiefenverlauf

zeigten die Werte eine tendenzielle Abnahme und lagen in Tiefenstufe 25-30cm bei etwa 1,8 MPa.

Die Untersuchten Mähweiden (vol. Bodenfeuchte=39,2%) wiesen gegenüber den Weiden in der Tiefe 2-5 cm signifikant geringere Eindringwiderstände von 1,56 Mpa auf. Auch in den Tiefenstufen 5-10cm sowie 10-15cm lagen die gemessenen Eindringwiderstände signifikant unter denen der Weiden. In der Tiefenstufe 15-20cm konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Nutzungen festgestellt werden ($p=0,7788$). In der Tiefe von 20-30cm wiesen die Böden der Mähweiden wiederum signifikant höhere Eindringwiderstände im Bereich von 2MPa auf.

Die Eindringwiderstände der Böden, extensiv bewirtschafteter Mähwiesen lagen etwa auf dem Niveau der Referenzflächen. Ein geringer, jedoch statistisch signifikanter Unterschied ($p=0,0059$) zu den Referenzflächen konnte lediglich in der Tiefenstufe 5-10cm festgestellt werden. Hier lagen die Eindringwiderstände der extensiven Mähwiesen sogar geringfügig unter jenen der Referenzflächen.

Eindringwiderstände der untersuchten intensiven Mähwiesen lagen im Bereich der Oberkrume bei etwa 1MPa und nahmen bis in die Tiefe von 30 cm konstant auf etwa 1,5 MPa zu. Damit lagen die Eindringwiderstände in allen Tiefenstufen, ausgenommen Tiefenstufe 5-10cm (kein signifikanter Unterschied, $p=0,8311$) höher als auf den Referenzflächen.

Im Vergleich der Eindringwiderstände der Mähwiesen zeigten sich in allen untersuchten Tiefenstufen signifikante Unterschiede. Die Eindringwiderstände intensiv bewirtschafteter Mähwiesen lagen in allen untersuchten Tiefenstufen über den Eindringwiderständen extensiv bewirtschafteter Mähwiesen.

Tiefenstufe (cm)		df	X ²	p	Bonferroni-Holm Korrektur	Signifikanz
2-5	Kruskal-Wallis-Test	4	381.8104	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	35.1159	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mähweide Mäh int	1	126.7223	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Mähweide Mäh ext	1	135.52	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Referenz	1	91.59	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh int	1	208.5727	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Weide Mäh ext	1	196.8123	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Weide Referenz	1	129.632	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Mäh int Mäh ext	1	5.8611	0.0155	p < 0.05/2	*
	Mäh int Referenz	1	6.255	0.0124	p < 0.05/3	*
Mäh ext Referenz	1	0.1572	0.6917	p > 0.05/1		
5-10	Kruskal-Wallis-Test	4	582.2698	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	40.0499	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mähweide Mäh int	1	203.4615	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Mähweide Mäh ext	1	213.1105	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Referenz	1	154.4029	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh int	1	301.15	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Weide Mäh ext	1	292.8749	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Weide Referenz	1	192.4541	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Mäh int Mäh ext	1	14.7329	< 0.0001	p < 0.05/3	*
	Mäh int Referenz	1	0.0455	0.8311	p > 0.05/1	
Mäh ext Referenz	1	7.5849	0.0059	p < 0.05/2	*	
10-15	Kruskal-Wallis-Test	4	644.9819	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	12.3131	0.0004	p < 0.05/2	*
	Mähweide Mäh int	1	217.3202	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Mähweide Mäh ext	1	246.6899	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Referenz	1	164.1622	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh int	1	327.5399	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Weide Mäh ext	1	298.7891	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Weide Referenz	1	197.6448	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Mäh int Mäh ext	1	83.0356	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mäh int Referenz	1	33.8173	< 0.0001	p < 0.05/3	*
Mäh ext Referenz	1	1.848	0.174	p > 0.05/1		
15-20	Kruskal-Wallis-Test	4	652.6025	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	0.0789	0.7788	p > 0.05/2	
	Mähweide Mäh int	1	235.8289	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Mähweide Mäh ext	1	248.7801	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Referenz	1	167.7646	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh int	1	288.6921	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Weide Mäh ext	1	296.3936	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Weide Referenz	1	187.7075	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Mäh int Mäh ext	1	130.7165	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mäh int Referenz	1	56.2903	< 0.0001	p < 0.05/3	*
Mäh ext Referenz	1	0.0005	0.9825	p > 0.05/1		
20-25	Kruskal-Wallis-Test	4	562.5071	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	10.7936	0.001	p < 0.05/2	*
	Mähweide Mäh int	1	191.918	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Mäh ext	1	241.7478	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Mähweide Referenz	1	150.4319	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh int	1	177.0536	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Weide Mäh ext	1	270.26	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Weide Referenz	1	151.6153	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Mäh int Mäh ext	1	150.2665	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mäh int Referenz	1	53.7363	< 0.0001	p < 0.05/3	*
Mäh ext Referenz	1	0.9199	0.3375	p > 0.05/1		
25-30	Kruskal-Wallis-Test	4	454.8683	< 0.0001	-	*
	post-hoc					
	Mähweide Weide	1	28.3171	< 0.0001	p < 0.05/3	*
	Mähweide Mäh int	1	166.767	< 0.0001	p < 0.05/8	*
	Mähweide Mäh ext	1	235.881	< 0.0001	p < 0.05/10	*
	Mähweide Referenz	1	118.0281	< 0.0001	p < 0.05/6	*
	Weide Mäh int	1	98.3277	< 0.0001	p < 0.05/5	*
	Weide Mäh ext	1	234.0117	< 0.0001	p < 0.05/9	*
	Weide Referenz	1	88.7369	< 0.0001	p < 0.05/4	*
	Mäh int Mäh ext	1	127.163	< 0.0001	p < 0.05/7	*
	Mäh int Referenz	1	27.0641	< 0.0001	p < 0.05/2	*
Mäh ext Referenz	1	3.6946	0.0546	p > 0.05/1		

Tab. 31: Statistische Auswertung der Eindringwiderstände der Nutzungen

3.5 Vergleich der gemessenen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände

3.5.1 Korrelation der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes

Um einen Zusammenhang zwischen den erhobenen bodenphysikalische Parametern Lagerungsdichte und Eindringwiderstand zu untersuchen, wurde eine Korrelationsanalyse nach SPEARMAN durchgeführt. Das Ergebnis zeigte eine statistisch signifikante ($p < 0,0001$) positive Korrelation der beiden Parameter mit einem *Spearman'schen* Korrelationskoeffizienten von 0,60489.

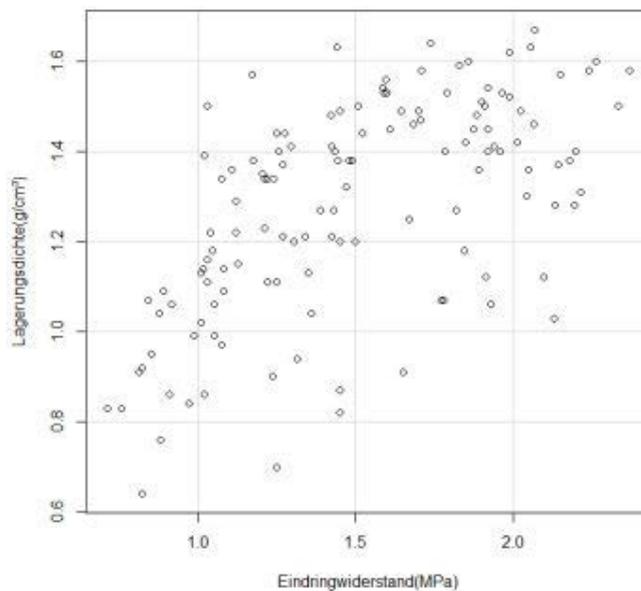


Abb. 21: Scatter-Plot der Parameter Lagerungsdichte (g/cm^3) und Eindringwiderstand (MPa)

	n	mw	sd	Spearman'scher Rangkorrelationskoeffizient	p
Eindringwiderstand	132	1.50659	0.43004	0.60489	<0.0001
Lagerungsdichte	132	1.28182	0.23682		

Tab. 32: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und Lagerungsdichte (g/cm^3)

3.5.2 Gegenüberstellung der nutzungsspezifischen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände

Die folgenden Abbildungen 22 bis 28 zeigen Gegenüberstellungen der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes in den untersuchten Tiefenstufen der einzelnen Grünlandnutzungen.

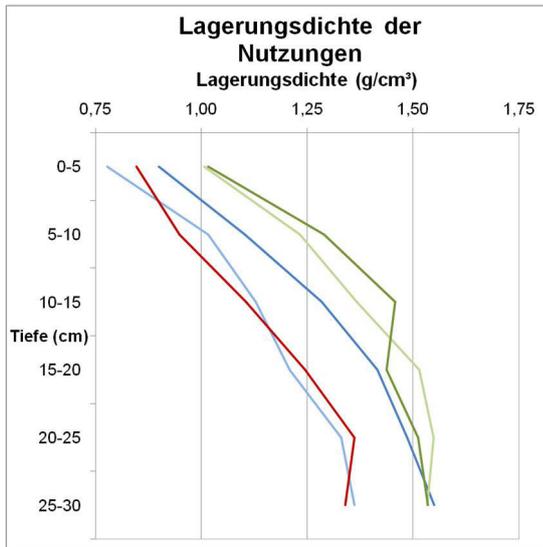


Abb. 22: Lagerungsdichte der Nutzungen

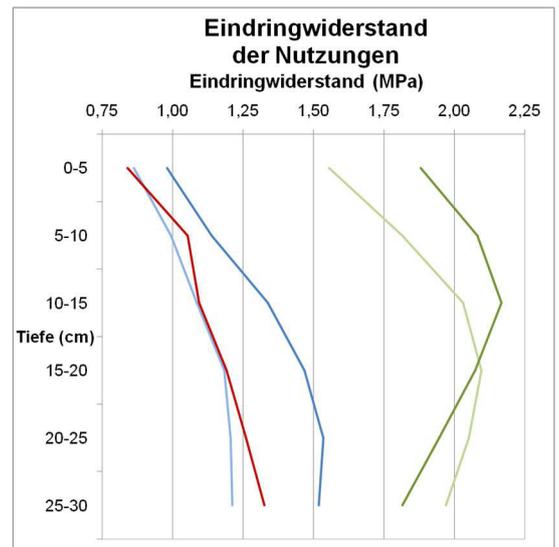


Abb. 23: Eindringwiderstand der Nutzungen

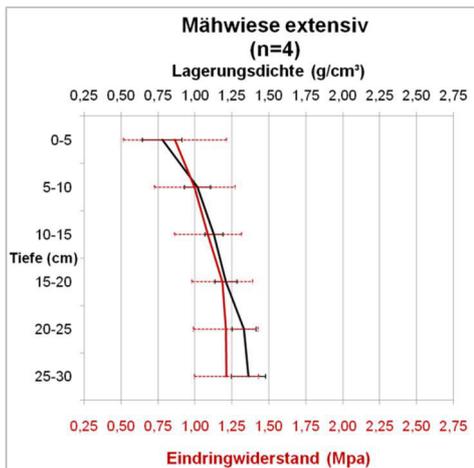


Abb. 25: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung *Mähwiese extensiv*

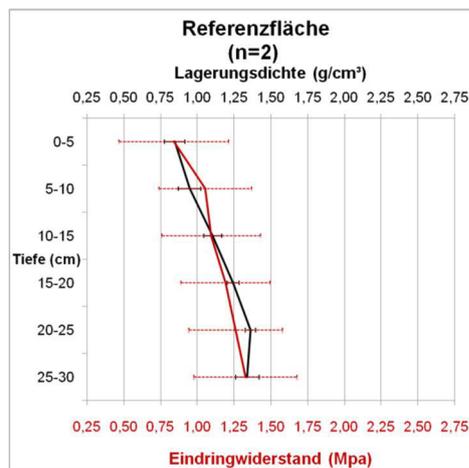


Abb. 24: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Referenzflächen

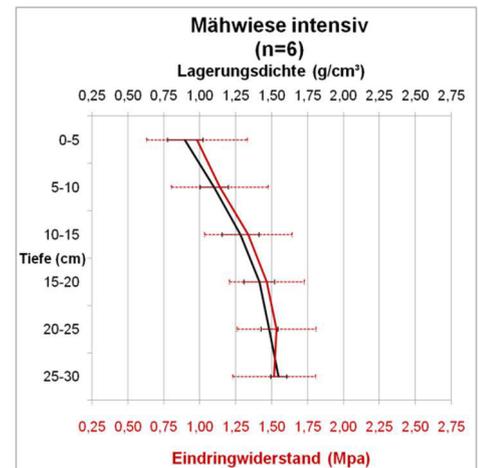


Abb. 26: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung *Mähwiese intensiv*

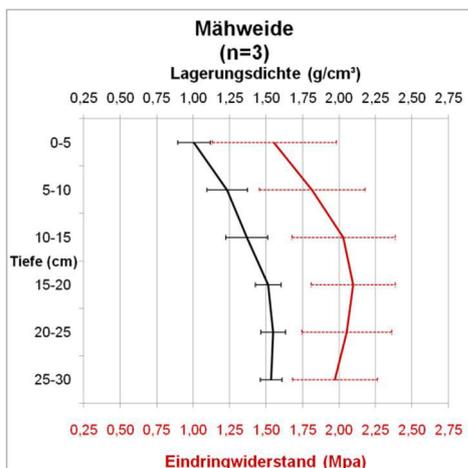


Abb. 27: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung *Mähweide*

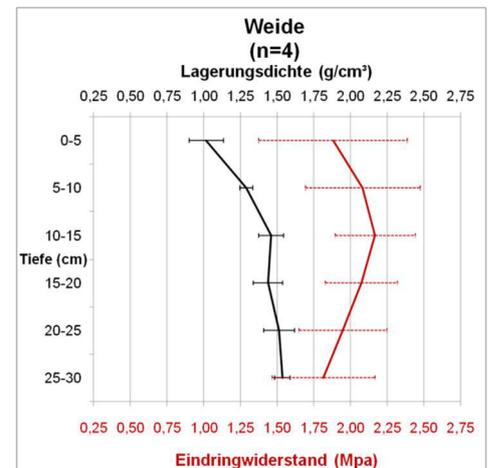


Abb. 28: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung *Weide*

3.6 Räumliche Variabilität eines Weidestandortes

Auf einem der untersuchten Weidestandorte (s9) wurden kleinräumige Messungen der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes auf Teilflächen durchgeführt, welche sich in ihrer mechanischen Belastung infolge von Beweidung und Befahrung unterschieden:

- *Mitte* (s9)

In zentralen Bereichen der Weide wurden Messungen durchgeführt, die hinsichtlich des Pflanzenbestandes und der Geländebeziehungen möglichst repräsentativ erschienen. Die Fläche wurde in der Vergangenheit sowohl beweidet, als auch zum Zweck der Ausbringung organischer Düngung sowie der Durchführung von Reinigungsschnitten befahren.

- *Eingangsbereich* (s9.2)

Der Eingangsbereich der Weide unterliegt nach Angaben des Bewirtschafters einer häufigen Befahrung (>30 jährliche Befahrungen) mit dem Traktor zum Zweck der Weidepflege (Reinigungsschnitt) sowie zur Ausbringung organischer Düngung. Zusätzlich wurde die Fläche durch den Vertritt der Rinder (insbesondere beim Versammeln der Tiere bei Weideabtrieb) starker mechanischer Belastung ausgesetzt.

- *Steilbereich* (s9.3)

Eine weitere Teilmessung erfolgte in einem steileren Bereich der Weide, welcher nach Angaben des Bewirtschafters aufgrund der Geländebeziehungen bislang nicht befahren, sondern ausschließlich beweidet wurde.

- *ausgezäunter Bereich* (s9.4)

Eine weitere Messung wurde in einem *ausgezäunten Bereich* durchgeführt, welcher nach Angaben des Bewirtschafters in der Vergangenheit nur selten überfahren und nicht beweidet wurde.

3.6.1 Lagerungsdichte der untersuchten Teilflächen

Abbildung 29 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Lagerungsdichten der untersuchten Teilflächen.

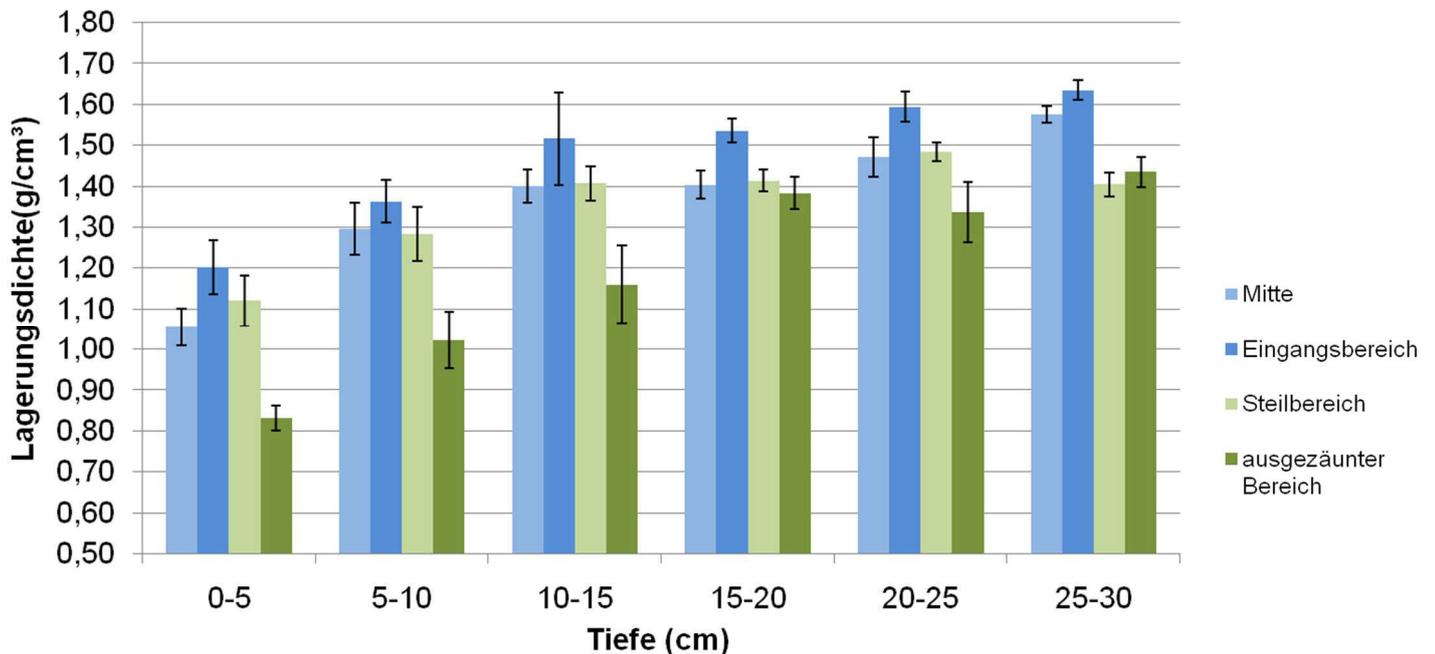


Abb. 29: Lagerungsdichte (g/m³) der Teilflächen auf einem untersuchten Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung

Tiefe	<i>Mitte</i>				<i>Eingangsbereich</i>				<i>Steilbereich</i>				<i>ausgezäunter Bereich</i>			
	ρB	±	sd	n	ρB	±	sd	n	ρB	±	sd	n	ρB	±	sd	n
0-5cm	1.06	±	0.05	6	1.20	±	0.07	6	1.12	±	0.06	6	0.83	±	0.03	6
5-10cm	1.30	±	0.06	6	1.36	±	0.05	6	1.28	±	0.07	6	1.02	±	0.07	6
10-15cm	1.40	±	0.04	6	1.52	±	0.11	6	1.41	±	0.04	6	1.16	±	0.10	6
15-20cm	1.40	±	0.03	6	1.54	±	0.03	6	1.41	±	0.03	6	1.38	±	0.04	6
20-25cm	1.47	±	0.05	6	1.60	±	0.04	6	1.48	±	0.02	6	1.34	±	0.07	6
25-30cm	1.58	±	0.02	6	1.64	±	0.02	6	1.40	±	0.03	6	1.44	±	0.04	6

Tab. 33: Lagerungsdichte (g/m³) der Teilflächen auf einem untersuchten Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung

In allen untersuchten Tiefenstufen wurden signifikante Unterschiede der Lagerungsdichte der einzelnen Teilflächen festgestellt.

Die mittlere Lagerungsdichte des ausgezäunten Bereichs lag im Oberboden bei etwa 0,8g/cm³ und nahm im Tiefenverlauf auf etwa 1,4 g/cm³ zu. Bis in Tiefenstufe 10-15 cm wurden auf der unbeweideten Fläche signifikant niedrigere Lagerungsdichtewerte als auf den übrigen Teilflächen gemessen. In der Tiefenstufe 15-20cm unterschied sich die unbeweidete Teilfläche lediglich vom Eingangsbereich der Weide signifikant

($p=0,0039$). In Tiefenstufe 20-25 cm lagen die Messwerte wieder signifikant unter denen der anderen Teilflächen.

In Tiefenstufe 25-30 cm wiesen die beiden Teilflächen *ausgezäunter Bereich* und *Steilbereich* keine signifikanten Unterschiede in der Lagerungsdichte auf, jedoch lagen die Werte der beiden Teilflächen signifikant unter den beiden befahrenen Teilflächen *Eingangsbereich* und *Mitte*.

Der zentrale Bereich der Weide sowie der unbefahrene, steilere Bereich zeigten im Tiefenverlauf bis 25 cm annähernd dieselben Werte (keine signifikanten Unterschiede) und tiefenabhängige Zunahmen der Lagerungsdichte.

In Tiefenstufe 0-5cm wurden auf beiden Teilflächen eine durchschnittliche Lagerungsdichte von etwa $1,1\text{g/cm}^3$ gemessen. Im weiteren Verlauf zeigten beide Teilflächen eine im Verhältnis zum ausgezäunten Bereich, verhältnismäßig starke Zunahme der Lagerungsdichte. In der Tiefe von 10-20 cm wiesen sie eine Lagerungsdichte von rund $1,4\text{g/cm}^3$ auf, in Tiefenstufe 20-25cm etwa $1,5\text{g/cm}^3$.

In der Tiefenstufe 25-30cm zeigten sich signifikante Unterschiede der beiden Teilflächen ($p=0,0039$) während in der Tiefe von 25-30cm die Messwerte der Steilfläche tendenziell wieder abnahmen ($1,4\text{g/cm}^3$), zeigten sich im zentralen Bereich der Weide weitere Zunahmen der Lagerungsdichte auf $1,58\text{g/cm}^3$.

In der am stärksten mechanisch belasteten Teilfläche *Eingangsbereich* wurden im Oberboden mittlere Lagerungsdichten von $1,2\text{g/cm}^3$ (0-5cm) gemessen. Im Tiefenverlauf zeichnete sich ein tendenziell stärkerer Anstieg der Lagerungsdichte als auf den restlichen Teilflächen ab. Ab einer Tiefe von 15 cm wies der Eingangsbereich signifikant erhöhte Lagerungsdichte gegenüber allen anderen Teilflächen auf. In Tiefenstufe 25-30cm wurden im Eingangsbereich die höchsten mittleren Lagerungsdichten von $1,64\text{g/cm}^3$ gemessen.

Der Vergleich der befahrenen Teilflächen *Eingangsbereich* und *Mitte* zeigte keine signifikanten Unterschiede in den Tiefenstufen 5-10cm($p=0,1495$) und 10-15cm ($p=0,0782$). In allen weiteren untersuchten Tiefenstufen wurden im Eingangsbereich signifikant höhere Werte gemessen.

Tiefenstufe (cm)		df	X ²	p	Bonferroni-Holm Korrektur	Signifikanz	
0-5	Kruskal-Wallis-Test	3	18.38	0.0004	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/3	*
	Eingang	Steilbereich	1	3.1026	0.0782	p > 0.05/2	
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Mitte	Steilbereich	1	2.5641	0.1093	p > 0.05/1	
	Mitte	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Steilbereich	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
5-10	Kruskal-Wallis-Test	3	14.9867	0.0018	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	2.0769	0.1495	p > 0.05/2	
	Eingang	Steilbereich	1	3.1026	0.0782	p > 0.05/3	
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Mitte	Steilbereich	1	0.0256	0.8728	p > 0.05/1	
	Mitte	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Steilbereich	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
10-15	Kruskal-Wallis-Test	3	15.44	0.0015	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	3.1026	0.0782	p > 0.05/2	
	Eingang	Steilbereich	1	3.1026	0.0782	p > 0.05/3	
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Mitte	Steilbereich	1	0.2308	0.631	p > 0.05/1	
	Mitte	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Steilbereich	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
15-20	Kruskal-Wallis-Test	3	14.2867	0.0025	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Eingang	Steilbereich	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
	Mitte	Steilbereich	1	0.2308	0.631	p > 0.05/1	
	Mitte	Außen	1	0.641	0.4233	p > 0.05/2	
	Steilbereich	Außen	1	2.5641	0.1093	p > 0.05/3	
20-25	Kruskal-Wallis-Test	3	19.1667	0.0003	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/3	*
	Eingang	Steilbereich	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Mitte	Steilbereich	1	0.2308	0.631	p > 0.05/1	
	Mitte	Außen	1	7.4103	0.0065	p < 0.05/2	*
	Steilbereich	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
25-30	Kruskal-Wallis-Test	3	19.7467	0.0002	-	*	
	post-hoc						
	Eingang	Mitte	1	7.4103	0.0065	p < 0.05/2	*
	Eingang	Steilbereich	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/3	*
	Eingang	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/4	*
	Mitte	Steilbereich	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/5	*
	Mitte	Außen	1	8.3077	0.0039	p < 0.05/6	*
	Steilbereich	Außen	1	2.0769	0.1495	p > 0.05/1	

Tab. 34: statistische Auswertung der Untersuchung der räumlichen Variabilität der Lagerungsdichte auf einem Weidestandort

3.6.2 Eindringwiderstand der untersuchten Teilflächen

Die Abbildung 30 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Eindringwiderstände auf den untersuchten Teilflächen.

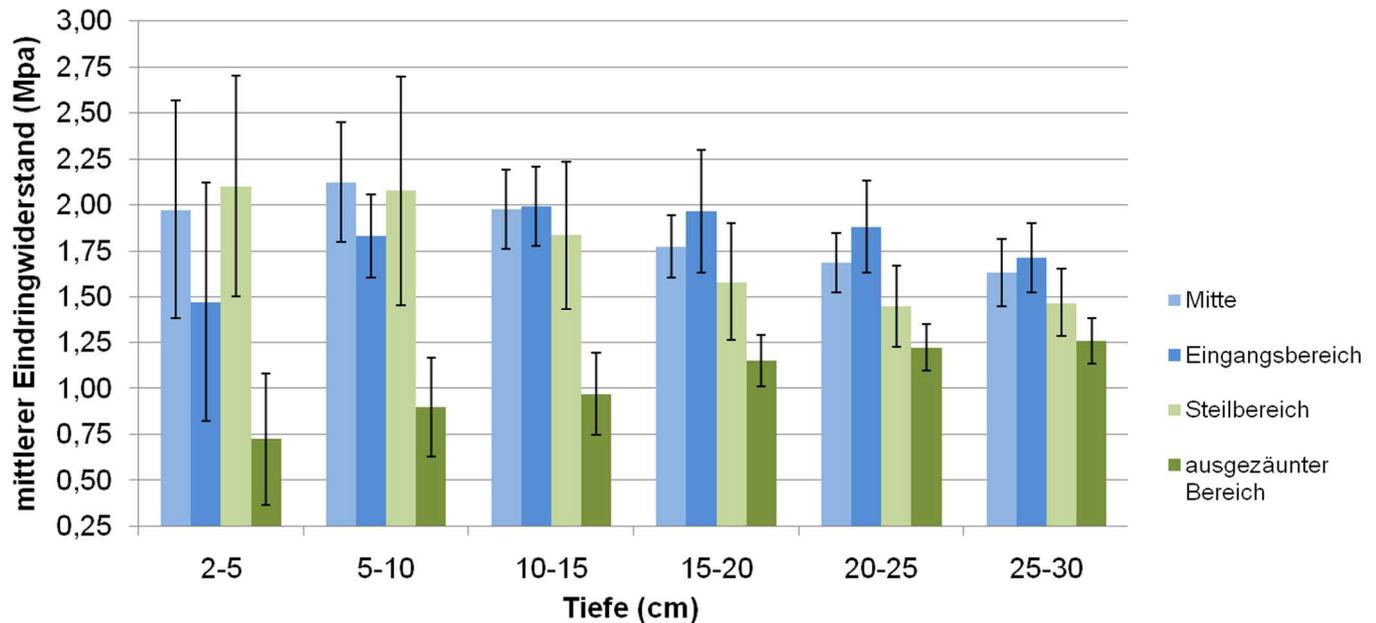


Abb. 30: Eindringwiderstand (MPa) der untersuchten Teilflächen auf einem Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung

Tiefe	<i>Mitte</i>				<i>Eingangsbereich</i>				<i>Steilbereich</i>				<i>ausgezäunter Bereich</i>			
	EW	±	sd	n	EW	±	sd	n	EW	±	sd	n	EW	±	sd	n
2-5cm	1.98	±	0.59	10	1.47	±	0.65	10	2.10	±	0.60	10	0.73	±	0.36	10
5-10cm	2.12	±	0.32	10	1.83	±	0.23	10	2.08	±	0.62	10	0.90	±	0.27	10
10-15cm	1.98	±	0.21	10	1.99	±	0.22	10	1.84	±	0.40	10	0.97	±	0.22	10
15-20cm	1.77	±	0.17	10	1.97	±	0.33	10	1.58	±	0.32	10	1.15	±	0.14	10
20-25cm	1.69	±	0.16	10	1.88	±	0.25	10	1.45	±	0.22	10	1.22	±	0.13	10
25-30cm	1.63	±	0.18	10	1.71	±	0.19	10	1.47	±	0.19	10	1.26	±	0.12	10

Tab. 35: Eindringwiderstand (MPa) der untersuchten Teilflächen auf einem Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung

Teilfläche	Volumetrische Bodenfeuchte (%)		
	mw	±	sd
<i>Mitte</i>	32.0	±	0.4
<i>Eingang</i>	51.5	±	0.6
<i>Steilbereich</i>	27.0	±	1.0
<i>ausgezäunter Bereich</i>	29.9	±	0.6

Tab. 36: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der untersuchten Teilflächen, Mittelwert und Standardabweichung

Die Eindringwiderstände des *ausgezäunten Bereichs* (vol. Bodenfeuchte=29,9%) zeigten im Tiefenverlauf eine stetige Zunahme von 0,73MPa (2-5 cm) auf 1,26 Mpa (25-30cm). Gegenüber den anderen Teilflächen der Weide lagen die Eindringwiderstände hier somit in allen untersuchten Tiefenstufen signifikant niedriger.

Die Teilflächen *Mitte* (vol. Bodenfeuchte=32%) und *Steilbereich* (vol. Bodenfeuchte=27%) wiesen hinsichtlich des Eindringwiderstandes bis in Tiefenstufe 15-20 cm keine signifikanten Unterschiede auf. Die Höchstwerte der beiden Flächen lagen im Oberboden (2-10 cm) und betragen im Durchschnitt etwa 2 bis 2,1 Mpa. Im weiteren Tiefenverlauf zeigten beide Teilflächen tendenzielle Abnahmen der Eindringwiderstände, welche im Bereich der Steilfläche jedoch ausgeprägter waren als auf der Teilfläche *Mitte*. Ab einer Tiefe von 15 cm wurden im Steilbereich signifikant niedrigere Eindringwiderstände gemessen. In Tiefenstufe 25-30cm wies die *Steilfläche* mittlere Eindringwiderstände von 1,47 MPa, die Teilfläche *Mitte* hingegen 1,63 MPa auf.

Im *Eingangsbereich* (vol. Bodenfeuchte 51,5%) der Weide lagen die Eindringwiderstände des Oberbodens bei rund 1,5 MPa (2-5cm) und somit signifikant unter denen der Teilflächen *Mitte* und *Steilbereich*. Höchstwerte von 2MPa zeigten sich in der Tiefe von 10 bis 20 cm. Mit zunehmender Tiefe nahmen die Eindringwiderstände auf etwa 1,7 Mpa (25-30cm) ab.

In Tiefenstufe 10-15cm zeigte sich kein signifikanter Unterschied der Eindringwiderstände zu den Teilflächen *Mitte* und *Steilbereich*. In den Tiefenstufen 15-20 cm und 20-25 cm zeigten die Eindringwiderstände des Eingangsbereichs jedoch signifikant höhere Werte. In Tiefenstufe 25-30 cm lagen die Werte bei rund 1,7 MPa (kein signifikanter Unterschied zu *Mitte* ($p=0,1075$) und somit signifikant über den Eindringwiderständen derselben Tiefenstufe des *Steilbereichs* ($p<0,0001$) und des *ausgezäunten Bereichs* ($p<0,0001$)).

Tiefenstufe (cm)			df	X ²	p	Bonferroni-Holm Korrektur	Signifikanz	
2-5	Kruskal-Wallis-Test		3	77.9802	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	10.7822	0.001	p < 0.05/2	*	
	Eingang	Steilbereich	1	14.7307	0.0001	p < 0.05/3	*	
	Eingang	Außerhalb	1	26.8296	< 0.0001	p < 0.05/4	*	
	Mitte	Steilbereich	1	0.6858	0.4076	p > 0.05/1		
	Mitte	Außerhalb	1	45.5003	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
5-10	Kruskal-Wallis-Test		3	117.5226	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	16.0507	< 0.0001	p < 0.05/3	*	
	Eingang	Steilbereich	1	4.1561	0.0415	p > 0.05/2		
	Eingang	Außerhalb	1	73.7925	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
	Mitte	Steilbereich	1	0.1262	0.7224	p > 0.05/1		
	Mitte	Außerhalb	1	74.3761	< 0.0001	p < 0.05/6	*	
10-15	Kruskal-Wallis-Test		3	112.5419	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	1.0219	0.3121	p > 0.05/1		
	Eingang	Steilbereich	1	3.2304	0.0723	p > 0.05/3		
	Eingang	Außerhalb	1	74.3623	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
	Mitte	Steilbereich	1	2.346	0.1256	p > 0.05/2		
	Mitte	Außerhalb	1	74.3636	< 0.0001	p < 0.05/6	*	
15-20	Kruskal-Wallis-Test		3	117.7461	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	11.2039	0.0008	p < 0.05/2	*	
	Eingang	Steilbereich	1	22.0632	< 0.0001	p < 0.05/3	*	
	Eingang	Außerhalb	1	74.1513	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
	Mitte	Steilbereich	1	10.5534	0.0012	p < 0.05/1	*	
	Mitte	Außerhalb	1	74.3197	< 0.0001	p < 0.05/6	*	
20-25	Kruskal-Wallis-Test		3	129.4646	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	13.0707	0.0003	p < 0.05/1	*	
	Eingang	Steilbereich	1	46.0911	< 0.0001	p < 0.05/4	*	
	Eingang	Außerhalb	1	74.4061	< 0.0001	p < 0.05/6	*	
	Mitte	Steilbereich	1	31.3496	< 0.0001	p < 0.05/3	*	
	Mitte	Außerhalb	1	73.3451	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
25-30	Kruskal-Wallis-Test		3	107.0675	< 0.0001	-	*	
	post-hoc							
	Eingang	Mitte	1	2.5904	0.1075	p > 0.05/1		
	Eingang	Steilbereich	1	30.5186	< 0.0001	p < 0.05/3	*	
	Eingang	Außerhalb	1	72.8955	< 0.0001	p < 0.05/6	*	
	Mitte	Steilbereich	1	16.4736	< 0.0001	p < 0.05/2	*	
	Mitte	Außerhalb	1	60.3535	< 0.0001	p < 0.05/5	*	
25-30	Steilbereich		Außerhalb	1	34.1571	< 0.0001	p < 0.05/4	*

Tab. 37: statistische Auswertung der Untersuchung der räumlichen Variabilität des Eindringwiderstandes auf einem Weidestandort

3.7 Ergebnis der Vegetationserhebung

Nutzung	Nr.	AVD(%)	Agrostis stolonifera BB-Skala			Bellis perennis BB-Skala			Leontodon autumnalis BB-Skala			Matricaria discoidea BB-Skala			Plantago major BB-Skala			Poa annua / Poa supina BB-Skala			Polygonum aviculare BB-Skala			Ranunculus repens BB-Skala			Σ D(%)	
			D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S	D(%)	M	S		
M(R)	s1	90-95																								0.0		
M(R)	s7	90-95																								0.0		
Mext	s6	85-90																						1	+	1	1.0	
Mext	s8	85-90																								0.0		
Mext	s14	90-95																								0.0		
Mext	s15	85-90																								0.0		
Mint	s2	90-95																							r	2	0.0	
Mint	s3	90-95							1	+	1													3	2m	2	4.0	
Mint	s10	90-95																						2	1	1	2.0	
Mint	s12	90-95																						3	2m	2	3.0	
Mint	s13	90-95																						3	2m	2	3.0	
Mint	s16	85-90																						2	1	1	2.0	
MW	s4	85-90				2	1	1	2	1	1			2	1	1	3	2m	2					3	2m	3	12.0	
MW	s5	80-85	3	2m	2	3	2m	2	1	+	1			2	1	1	20	2b	4	1	+	1	3	2m	3	33.0		
MW	s19	90-95																						10	2a	2	10.0	
W	s11	90-95							2	1	1			2	1	1	10	2a	3					3	2m	1	17.0	
W	s17	85-90												2	1	1	10	2a	3	1	+	1	10	2a	1	23.0		
W	s18	80-85	2	1	2				2	1	1	1	+	1	10	2a	1	37.5	3	3	2	1	2	3	2m	2	57.5	
W	s9	80-85	2	1	1	3	2m	2	2	1	1			3	2m	1	37.5	3	3	1	+	1	3	2m	1	51.5		
W*	s9.2	70-75	10	2a	3	2	1	2						2	1	1	37.5	3	4	2	1	1	20	2b	3	73.5		
W*	s9.3	75-80	10	2a	2	3	2m	2				2	1	1	2	1	1	10	2a	3			r	1	20	2b	3	47.0
Mext*	s9.4	90-95																									0.0	

Tab. 38: Ergebnis der Vegetationserhebung der Zeigerarten für Bodenverdichtung nach BRAUN-BLANQUET der untersuchten Standorte

Tabelle 38 zeigt die erhobenen Zeigerarten für Bodenverdichtung auf den untersuchten Standorten.

Auf den Untersuchungsstandorten wurden folgende acht Zeigerarten für Bodenverdichtung aufgefunden: *Agrostis stolonifera*, *Bellis perennis*, *Leontodon autumnalis*, *Matricaria discoidea*, *Plantago major*, *Poa annua*, *Poa supina*, *Polygonum aviculare* sowie *Ranunculus repens*.

Die Arten *Poa annua* und *Poa supina* wurden im Zuge der Vegetationsaufnahme gemeinsam erfasst, da eine klare Abgrenzung des Deckungsgrades der einzelnen Arten aufgrund des gemeinsamen Vorkommens nicht immer eindeutig möglich und für die Auswertung nicht von Belang war.

Auf den untersuchten Referenzflächen kamen keine Zeigerarten für Bodenverdichtung vor.

Auf den extensiv bewirtschafteten Mähwiesen trat auf einem Standort (s6) die Art *Ranunculus repens* mit geringem mittleren Deckungsgrad, vereinzelt auf. Ansonsten wurden keine der genannten Zeigerarten aufgefunden.

R. repens trat auf allen untersuchten Flächen der Nutzung *Mähwiese intensiv*, mit stets geringen Deckungsgraden auf. Zudem wurde auf einem Standort (s3) vereinzelt die Art *Leontodon autumnalis* vorgefunden. Ansonsten zeigten sich keine Zeigerarten für Bodenverdichtung.

Die beweideten Flächen (*Weide* und *Mähweide*) wiesen gegenüber den unbeweideten Flächen eine höhere Diversität sowie höhere Deckungsgrade von Bodenverdichtungszeigern auf.

Auf allen Standorten der Nutzungen *Weide* und *Mähweide* kam *Ranunculus repens* vor. Auf zwei der untersuchten beweideten Flächenerreichte *R. repens* eine mittlere Deckung von 10 %. Auf den anderen beweideten Flächen wurden mittlere Deckungen von 2 bis 3 % erhoben.

Die Arten *Agrostis stolonifera* und *Bellis perennis* kamen jeweils auf drei von sieben beweideten Standorten stets mit geringer Deckung (<5%) vor. Auf zwei der ausschließlich beweideten Flächen wurde *Matricaria discoidea* mit sehr geringer Deckung vorgefunden. *Plantago major* wurde bis auf eine Ausnahme (s19), auf allen beweideten Flächen vorgefunden. Auf drei Standorten trat *P. major* nur vereinzelt auf. Auf einem Standort wurden über 50 Individuen in der Aufnahmefläche gezählt, diese erreichten jedoch eine geringe mittlere Gesamtdeckung von 3 %. Auf Standort 18 erreichte *P. major* eine mittlere Deckung von zehn % der Aufnahmefläche.

Poa annua und *Poa supina* erreichten die höchsten mittleren Deckungsgrade der vorgefundenen Zeigerarten. Die beiden Arten traten auf allen beweideten Standorten, ausgenommen Standort 19 (*Mähweide*) in unterschiedlicher Häufungsweise auf (Soziabilität 2-4). Auf zwei der untersuchten Weiden erreichten *Poa annua* bzw. *Poa supina* eine mittlere Deckung von 37,5 %.

Polygonum aviculare trat ausschließlich auf beweideten Standorten (4 von 7 Standorten) mit sehr geringen Deckungsgraden auf.

Die höchste mittlere Gesamtdeckung (73,5%) der Verdichtungszeigerarten wies die Teilfläche s9.2 (*Weideeingangsbereich*) auf. Hier zeigte sich ein starkes Auftreten der Arten *P. annua* bzw. *supina*, *Ranunculus repens* und *Agrostis stolonifera*, sowie ein vereinzelt Auftreten der Arten *B. perennis*, *P. major* und *P. aviculare*, die in diesem Bereich der *Weide* beinahe die gesamte Vegetationsdeckung darstellten.

Im zentralen Bereich der *Weide* (s9) erreichten die Zeigerarten eine mittlere Deckung von 51,5 %. Hier traten die im Eingangsbereich der *Weide* vorgefundenen Zeigerarten auf, jedoch in veränderter Zusammensetzung. Die Deckungsgrade der Arten *R. repens* und *A. stolonifera* waren deutlich niedriger als im Eingangsbereich der *Weide*. Zudem wurde die Art *Leontodon autumnalis* mit sehr hoher Individuenzahl, jedoch geringer Deckung (2%) aufgefunden.

Im *Steilbereich* (s9.3) lag die mittlere Deckung der Bodenverdichtungszeiger bei 47 %. Auch auf dieser Teilfläche wurden die selben Zeigerarten, in einem ähnlichen Ausmaß wie im *Eingangsbereich* aufgefunden. Die Arten *P. annua* und *supina* kamen mit geringerer mittlerer Deckung (10%) vor. Weiters wurde ein vereinzelt Vorkommen von *Matricaria discoidea*, mit sehr geringer Deckung erhoben. In der ausgezäunten Teilfläche (9.4) wurden keine Verdichtungszeigerarten vorgefunden.

4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Allgemeine Bewertung der bodenphysikalischen Parameter

"Welche tiefenbezogenen Lagerungsdichten und Eindringwiderstände weisen Dauergrünlandböden mit landesüblicher Bewirtschaftung im Untersuchungsgebiet auf? Wie sind diese zu bewerten?"

Die mittlere Lagerungsdichte aller Untersuchungsstandorte zeigt eine große Schwankungsbreite in Bereichen von etwa 0,5 bis 0,8 g/cm³ innerhalb sowie zwischen den Tiefenstufen. Die Lagerung der untersuchten Grünlandböden ist also keineswegs einheitlich. Die Auswertungen der Messungen zeigten, dass die Lagerung der Böden sowohl bewirtschaftungsbedingt als auch räumlich und tiefenabhängig signifikante Unterschiede aufweist.

Auch jahreszeitliche Schwankungen der Lagerungsdichte konnten sowohl von LIEBHARD (1994) im Bereich des Ackerbaues, sowie von CHANASYK und NAETH (1995) im Bereich des Grünlandes beobachtet werden. Demnach scheint es sinnvoll, die erhobenen Werte durch mehrmalige Messungen im Jahresverlauf zu verifizieren.

Eine hohe nutzungsbedingte Variabilität der Lagerungsdichte von Grünlandböden ist auch in den Ergebnissen von CARLIER et al. (2006) ersichtlich. Auf nutzungsspezifische Unterschiede wird unter 4.2 näher eingegangen.

Beurteilt man die Mittelwerte der Lagerungsdichte aller Standorte in den untersuchten Tiefenstufen anhand der Einstufung von BLUME et al. (1995), so zeigt sich, dass die Lagerungsdichte der untersuchten Dauergrünlandböden im Durchschnitt bis in eine Tiefe von 10cm als *gering* (0,8 bis 1,25 g /cm³) einzustufen ist.

Auf den untersuchten Böden des Wirtschaftsgrünlandes wurden im Oberboden als *sehr gering* (<0,8 g/cm³) einzustufende, ab der Tiefenstufe 10-15cm auch als *hoch* (1,5-1,75 g/cm³) einzustufende Lagerungsdichten gemessen. In der Tiefe von 10 bis 30 cm ist die durchschnittliche Lagerungsdichte aller untersuchten Flächen als *mittel* (1,25-1,50 g/cm³) zu bewerten.

Ähnlich der Lagerungsdichte zeigte der Eindringwiderstand der untersuchten Flächen eine hohe Schwankungsbreite. Die mittleren Eindringwiderstände lagen bis in eine Tiefe von 30cm in Bereichen von 1,25 und 1,6 MPa und zeigten ebenfalls bewirtschaftungsbedingt signifikante Unterschiede.

In der Literatur findet man unterschiedliche und teils widersprüchliche Angaben für kritische Grenzwerte des Eindringwiderstandes, welche ein eingeschränktes Pflanzen- bzw. Wurzelwachstum indizieren. Ein häufig genannter Grenzwert, bei dessen Überschreitung von einer Einschränkung des Wurzelwachstums auszugehen ist, befindet sich im Bereich von 2 MPa. (CARLESSO et al. 2014, CHANASYK und NAETH 1995, FELDWISCH und FRIEDRICH 2016). Nach DE BAKKER und LOCHER (1990) ist bei Eindringwiderständen unter 1,5 MPa von einem ungestörten und ab 3 MPa von einem stark beeinträchtigten Wurzelwachstum auszugehen. Vor allem auf beweideten und stark befahrenen Flächen wurden

erhöhte Eindringwiderstände gemessen, die auf ein eingeschränktes Wurzelwachstum hinweisen können.

Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass die untersuchten Dauergrünlandböden im Oberboden eine verhältnismäßig lockere Lagerung aufweisen. Diese ist nach BOHNER und HERNDL (2011) vor allem auf die intensive Durchwurzelung und den hohen Humusgehalt von zurückzuführen. Zudem sorgen die hohen Mengen an Wurzelrückständen, welche die Aktivität der Bodenmikroorganismen anregen, sowie die ganzjährige Bodenbedeckung und das Ausbleiben von Bodenbearbeitungen im Dauergrünland grundsätzlich für ein krümeliges und lockeres Gefüge im Oberboden (BLUME et al. 2010).

Im A-Horizont der untersuchten Böden wurden mittels bodenchemischer Analysen mittlere organische Kohlenstoffgehalte von 4,29 % festgestellt, Höchstwerte lagen bei etwa 7 %. Die durchgeführten Rangkorrelationsanalysen bestätigen einen negativen Zusammenhang der Parameter Lagerungsdichte und C_{org}-Gehalt. Diesen Zusammenhang konnten auch CARLIER et al. (2006) in ihren Untersuchungen der Lagerungsdichte im Grünland nachweisen.

Die Anreicherung von Kohlenstoff ist im Grünland in erster Linie auf die Zersetzung unterirdischer Phytomasse (vorwiegend Wurzeln) zurückzuführen. Der Wurzeltiefgang variiert je nach Standort zwischen 50 und 100 cm und sorgt auch in den unteren Bodenschichten für eine Anreicherung von Kohlenstoff. (BOHNER und SCHINK 2011).

Da sich im Dauergrünland 90 % der Wurzelmasse in den obersten 10 cm befinden (BLUME et al. 2010), nehmen die Kohlenstoffgehalte im Tiefenverlauf rasch ab. Dies erklärt unter anderem die weit geringeren Kohlenstoffgehalte im B-Horizont, welche im Mittel aller untersuchten Standorte bei 1,54 % lagen.

Nach BLUME et al. (2010) sind Böden mit hohem Gehalt an organischer Substanz allgemein strukturstabiler und daher weniger anfällig gegenüber mechanischen Belastungen. Die hohen Humusgehalte von Dauergrünlandböden bewirken eine ausgeprägte Stabilität der Aggregate (BMLFUW 2015). Weiters wirkt die große Wurzelmasse im Grünland einer stärkeren Verdichtung entgegen (BOHNER und HERNDL 2011). Dies könnte die verhältnismäßig geringen Lagerungsdichten in der obersten Bodenschicht erklären. Auch die hohen Kontaktflächendrücke, die infolge der Beweidung auf die Böden einwirken, scheinen im stark durchwurzelten und humosen Oberboden (Tiefenstufe 0-5cm) nur relativ geringen Anstieg der Lagerungsdichte zu bewirken.

Mitverantwortlich für die lockere Lagerung des Oberbodens kann auch die gegenüber tieferen Bodenschichten erhöhte Gefügeregenerationsfähigkeit sein. Nach BRANDHUBER (2006) nimmt diese im Tiefenverlauf tendenziell ab, da sie maßgeblich von biologischen Prozessen (Durchwurzelung, lockernde Tätigkeiten von Bodenlebewesen), sowie physikalischen Prozessen (Frosteinwirkung, Quellung und Schrumpfung) abhängt, welche überwiegend in den oberen Bodenschichten wirksam werden können.

Ab einer Tiefe von 5 cm zeigten sich nutzungsspezifisch deutlich erhöhte Lagerungsdichten. In Bereichen unterhalb der Hauptwurzelzone wurden auf beweideten sowie auf stark befahrenen Flächen in einer Tiefe von 15 bis 30 cm *hohe* Lagerungsdichten gemessen. Die maximalen Abweichungen gegenüber den Referenzflächen lagen bei 36 %. Die untersuchten Grünlandböden zeigten also deutliche bewirtschaftungsbedingte Verdichtungen. Inwiefern den festgestellten Verdichtungen jedoch ein schädlicher Effekt beigemessen werden kann, ist anhand der erhobenen Messdaten nicht eindeutig zu beantworten. Die Parameter Lagerungsdichte und Eindringwiderstand weisen nach BRUNOTTE et al. (2004) keinen direkten bodenfunktionalen Bezug auf, jedoch ist aus Voruntersuchungen bekannt, dass beispielsweise die Lagerungsdichte stark mit anderen bodenphysikalischen und funktionsrelevanten Parametern korreliert. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die festgestellten Veränderungen der Lagerung wesentliche Bodenfunktionen negativ beeinträchtigen können.

Vor allem auf beweideten Flächen nahmen die Eindringwiderstände meist unterhalb der Hauptwurzelzone in einer Tiefe von 10 bis 20 cm Höchstwerte von über 2 MPa an. Diese waren damit etwa doppelt so hoch wie auf den Referenzflächen. Eine Beeinträchtigung des Wurzelwachstums und des Wurzeltiefgangs ist also durchaus wahrscheinlich.

Zahlreiche Studien belegen die Auswirkungen mechanischer Bodenbelastung auf die Wurzelmorphologie. BOHNER und HERNDL (2011) konnten eine durch Beweidung bedingte Verlagerung der unterirdischen Phytomasse in den Bereich der obersten 5 cm beobachten. Die Auswirkungen starker Befahrung konnten STAHL et al. (2009) in einer Reduktion der Wurzellängendichte in den obersten 5 cm, sowie GLAB (2013) in einer veränderten Wurzelmorphologie im Oberboden feststellen.

Die untersuchten Flächen werden je nach Nutzung unterschiedlichen Befahrungsintensitäten ausgesetzt. Vor allem intensiv genutzte Mähwiesen mit fünf bis sechs jährlichen Schnittnutzungen werden nach Angaben der Bewirtschafter im Zuge der Futtergewinnung sowie der Düngung und der Bestandspflege öfter als 30 Mal jährlich mit dem Traktor befahren. Nach DIEPOLDER et al. (2005) bringt die starke und oft witterungsunabhängige Befahrung intensiv genutzter Grünlandflächen ein erhöhtes Risiko für Gefüge- und Narbenschädigungen mit sich. Die hohen jährlichen Niederschläge im Untersuchungsgebiet während der Vegetationsperiode begünstigen mit hoher Wahrscheinlichkeit Gefügeschädigungen infolge mechanischer Belastung durch Beweidung oder Befahrung.

Da die bodenphysikalischen Messungen in der vorliegenden Arbeit lediglich bis in eine Tiefe von 30 cm durchgeführt wurden, konnten Auswirkungen in tieferen Bereichen nicht erfasst werden. DRAGHI und JORAJURIA (1997) haben jedoch in Zusammenhang mit der aufgebrachten Last und der Befahrungshäufigkeit Erhöhungen der Lagerungsdichte von Grünlandböden noch in der Tiefenstufe 30-60cm nachgewiesen. Um festzustellen, ob es unter landesüblicher Bewirtschaftung und den hiesigen Bodenbedingungen ebenfalls zu Verdichtungen im Bereich des Unterbodens kommt, sind weitere Untersuchungen notwendig. Nach BLUME et al.

(2010) und HAKANSSON (2005) wurden im Bereich des Ackerbaues mechanische Belastungen bis in Tiefen von 50 cm registriert.

STAHL et al. (2009) stellten jedoch fest, dass Bodendrücke in Grünlandböden im Vergleich zu Ackerböden im Tiefenverlauf verhältnismäßig stärker abgebaut werden und vermuten, dass die Unterkrume von Grünlandböden daher unempfindlicher gegenüber Verdichtungen ist. Problematisch sehen die Autoren eher eine zunehmende, jedoch latente Verdichtung des Krumenbereichs, die langfristig das Pflanzenwachstum beeinträchtigen kann.

Auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigten deutliche Zunahmen der Lagerungsdichte im Bereich der Krume. Signifikante Ertragsrückgänge im Dauergrünland von bis zu 14 % infolge der mechanischen Belastung durch Befahrung konnten von DIEPOLDER et al. (2005) bereits nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen unter Einbeziehung ertragsrelevanter Auswirkungen von bewirtschaftungsbedingten Gefügeschädigungen sind dringend notwendig.

4.2 Nutzungsspezifische Auswirkungen

"Gibt es signifikante Unterschiede der landesüblichen Grünlandnutzungsformen hinsichtlich der Auswirkung auf die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte und Eindringwiderstand? Wie wirken sich Beweidung und Befahrung auf die Lagerung der untersuchten Böden aus?"

Die Ergebnisse der Messung der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes der untersuchten Grünlandflächen zeigten tiefenabhängig signifikante Unterschiede hinsichtlich der Nutzung. Auffällig ist zunächst ein Unterschied zwischen beweideten und unbeweideten Flächen.

Beweidung

Weiden wiesen gegenüber den Mähwiesen eine signifikant höhere Lagerungsdichte im Oberboden bis in eine Tiefe von 15 cm auf, Mähweiden bis in eine Tiefe von 10 cm. Zu gegenteiligen Ergebnissen kamen CARLIER et al. (2006) in der Untersuchung der Lagerungsdichte von flämischem Grünland. In ihren Untersuchungen zeigten gemähte Grünlandflächen allgemein höhere Lagerungsdichten als Weiden. CARLIER et al. (2006) verweisen jedoch auf HASSINK und NETEESON (1991) - ihren Ergebnissen zufolge war die Lagerungsdichte auf beweidetem höher als auf gemähtem Grünland.

Die größten relativen Unterschiede zu den untersuchten Referenzflächen wurden auf Weiden und Mähweiden (MW) festgestellt. In der Tiefenstufe 0-5 cm war die mittlere Lagerungsdichte der Weiden gegenüber den Referenzflächen um 20% (MW+19%), in einer Tiefe von 5-10cm um 36% (MW+30%) und in Tiefenstufe 10-15cm um 32 % (MW+24%) erhöht. In Tiefenstufe 15-20cm lagen die Abweichungen nur mehr bei rund 16 % (MW+22%). Dies legt die Vermutung nahe, dass die Trittwirkung der Rinder vor allem in den obersten 15 cm Auswirkungen zeigt.

Auch die Ergebnisse der Untersuchung der kleinräumigen Variabilität der Lagerungsdichte auf einem Weidestandort zeigten, dass diese auf unbeweideten und weitgehend unbefahrenen Teilflächen in den obersten 15 cm signifikant geringer war als auf den beweideten Teilflächen.

Eine Zunahme der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes infolge der Beweidung konnten auch CHANASYK und NAETH (1995) nachweisen. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen von O'RILEY et al. (2015) BOHNER und HERNDL (2011) sowie VERHONIG (2013) überein, die in ihren Untersuchungen ebenfalls eine Zunahme der Lagerungsdichte im Oberboden infolge der Beweidung durch Rinder feststellen konnten.

Die Lagerungsdichte der untersuchten Mähweiden lag in den Untersuchungen von CARLIER et al. (2006) zwischen der der Weiden und der Mähwiesen. Dies trifft für die untersuchten Mähweiden der vorliegenden Arbeit in der Tiefe von 5 bis 15 cm zu, hier lagen die Mittelwerte der Lagerungsdichte zwischen denen der Weiden und der intensiv genutzten Mähwiesen.

Die mittlere Lagerungsdichte der untersuchten Weiden ist trotz der signifikant erhöhten Werte gegenüber den Referenzflächen nach der Einstufung von BLUME et al. (1995) in Tiefenstufe 0-5cm als *gering*, in einer Tiefe von 5 bis 20 cm als *mittel einzustufen*. Erst in einer Tiefe von 20 bis 30 cm sind die gemessenen Werte als *hoch* einzustufen. Die untersuchten Mähweiden wiesen im Oberboden (0 bis 10 cm) eine *geringe*, in Tiefenstufe 10-15cm eine *mittlere*, und im Gegensatz zu den Weiden bereits in einer Tiefe von 15 bis 30 cm eine *hohe* Lagerungsdichte auf.

Die Ergebnisse der Messungen der Eindringwiderstände zeigen ein ähnliches Bild wie die der Lagerungsdichte. Hier wiesen jedoch beweidete Grünlandböden bis in eine Tiefe von 30 cm signifikant höhere Eindringwiderstände auf als unbeweidete Flächen. Die mittleren Eindringwiderstände der Weiden lagen zwischen 1,82 MPa (2-5cm) und 2,17 MPa mit Höchstwerten in der Tiefenstufe 10-15cm.

Zur Tiefenwirkung der mechanischen 'Bodenbelastung durch Rinder werden in der Literatur verschiedene Werte angegeben. GREENWOOD und Mc KENZIE (2001) ermittelten Einwirkungen durch Beweidung in Tiefen von 5 bis 15 cm. JACOB und VOIGTLÄNDER (1987) zit. nach SCHLIMBACH (2006) konnten Tiefenwirkungen bis zu 20 cm feststellen.

Hinsichtlich der Lagerungsdichte zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Nutzungen Weide und Mähweide. Jedoch war die Lagerungsdichte der Weiden bis in eine Tiefe von 15 cm tendenziell höher und in der Tiefe von 15 bis 25 cm niedriger als die der Mähweiden. Eindringwiderstände der untersuchten Mähweiden waren im Oberboden signifikant niedriger als die der Weiden und reichten von 1,56 MPa (2-5cm) bis 2,1 Mpa. In dieser Nutzung wurden Höchstwerte in Tiefenstufe 15-20cm gemessen.

Die Erhebung der Befahrungshäufigkeit zeigte, dass Mähweiden (10 bis 30 jährliche Überfahrten) wesentlich öfter befahren wurden als Weiden (5 bis 10 jährliche Überfahrten). Anzunehmen wäre daher, dass sich die häufigere Befahrung der

Mähweiden infolge der wiederkehrend aufgebrauchten Radlasten in einer Zunahme der Lagerungsdichte und der Eindringwiderstände vor allem in den unteren Tiefenstufen manifestiert. Nach HAKANSSON (2005) hängt die Tiefenwirkung maßgeblich von der aufgebrauchten Radlast ab. Dies könnte die gegenüber den Weiden leicht erhöhten Eindringwiderstände der Mähweiden in der Tiefe von 20 bis 30 cm erklären. Im Oberboden, bis in eine Tiefe von 15 bis 20 cm lagen die Eindringwiderstände der Weiden signifikant über jenen der Mähweiden. Dies kann wiederum auf die höhere Trittbelastung durch intensivere Beweidung zurückzuführen sein. Es ist denkbar, dass sich eine alternierende Mäh- und Weidenutzung infolge längerer Regenerationszeiten gegenüber der Trittbelastung positiv auf die Gefügeregeneration auswirkt. Entsprechende Untersuchungen fehlen bis dato.

Zusammenfassend wurde eine vor allem oberbodenverdichtende Wirkung der Beweidung festgestellt, die sich in einer erhöhten Lagerungsdichte und im erhöhten Eindringwiderstand äußert. Sowohl auf Weiden als auch auf Mähweiden wurden im Bereich der Hauptwurzelzone erhöhte und ab einer Tiefe von 10cm kritisch zu bewertende Eindringwiderstände von über 2 MPa gemessen.

Verdichtungen des Oberbodens sind vor allem auf die Einwirkung von hohem Kontaktflächendruck zurückzuführen. Rinder verursachen unter der Annahme von 700 kg Lebendgewicht mittlere Kontaktflächendrücke von etwa 10 bar. Im Vergleich dazu verursacht ein Allradtraktor mit einem Eigengewicht von 2240 kg lediglich einen mittleren Kontaktflächendruck von 0,6 bar (BOXBERGER und MOITZI 2007). Dieser Umstand kann die im Verhältnis zu den Mähwiesen erhöhten Lagerungsdichten und Eindringwiderstände im Oberboden der beweideten Flächen erklären.

Mähnutzung

Weniger deutlich, jedoch ebenso feststellbar ist der Einfluss der Bewirtschaftungsintensität der Mähwiesen auf die untersuchten Parameter. Im Vergleich der Nutzungen *Mähwiese intensiv* und *Mähwiese extensiv* unterscheiden sich Lagerungsdichte und Eindringwiderstand in allen untersuchten Tiefenstufen signifikant voneinander. Intensiv bewirtschaftete Mähwiesen wiesen bis eine Tiefe von 30cm eine signifikant höhere Lagerungsdichte und einen signifikant höheren Eindringwiderstand auf als extensiv bewirtschaftete Mähwiesen.

Die mittlere Lagerungsdichte der untersuchten extensiven Mähwiesen ist nach BLUME et al. (1995) in Tiefenstufe 0-5cm als *sehr gering*, in Tiefenstufe 5-20 cm als *gering* und in Tiefenstufe 20-30cm als *mittel* einzustufen. Signifikante Abweichungen zu den untersuchten Referenzflächen konnten nur in Tiefenstufe 5-10cm beobachtet werden, hier zeigten die untersuchten extensiv genutzten Mähwiesen eine um 7 % erhöhte mittlere Lagerungsdichte. Auch der Vergleich der Eindringwiderstände zeigte lediglich in Tiefenstufe 5-10cm signifikante Unterschiede zu den Referenzflächen. Hier wiesen die Referenzflächen sogar höhere Eindringwiderstände auf, was jedoch vermutlich auf die deutlich niedrigere Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messung zurückgeführt werden kann.

Die mittleren Eindringwiderstände der untersuchten extensiven Mähwiesen lagen zwischen 0,86 und 1,21 MPa. Den oben erwähnten Grenzwerten folgend, ist daher von keiner Beeinträchtigung des Wurzelwachstums auszugehen.

Den Ergebnissen zufolge hat die extensive und mit wenigen Befahrungen verbundene Nutzung der untersuchten Flächen nur sehr geringen Einfluss auf die Lagerung der untersuchten Böden. Neben der Befahrungshäufigkeit kann die festgestellte lockere Lagerung selbstverständlich auch andere Gründe haben, beispielsweise die im Verhältnis zu den Referenzflächen und den intensiv genutzten Mähwiesen höheren Gehalte an organischem Kohlenstoff im A- Horizont.

Die mittlere Lagerungsdichte der Nutzung *Mähwiese intensiv* ist bis in eine Tiefe von 10 cm als *gering* einzustufen, in Tiefenstufe 10-25cm als *mittel* und in Tiefenstufe 25-30cm als *hoch* einzustufen. Die Abweichungen der mittleren Lagerungsdichte zur Referenzfläche waren in der Tiefenstufe 0-5cm relativ niedrig (+6%). Die höchsten Abweichungen von rund 16% wurden in den Tiefenstufen 5-10cm, 10-15cm und 25-30cm gemessen. Die mittleren Eindringwiderstände bewegten sich in dem Bereich von 0,98 MPa bis 1,52 Mpa. Werte im Bereich von 1,5 MPa wurden ab einer Tiefe von 15-20 cm gemessen. Mögliche Beeinträchtigungen des Wurzelwachstums sind daher auch in dieser Nutzungsform nicht auszuschließen.

Die erhöhte Lagerungsdichte und der erhöhte Eindringwiderstand der untersuchten intensiv genutzten Mähwiesen sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf die höhere Befahrungsintensität der Flächen zurückzuführen. Die Mehrzahl der intensiv genutzten Mähwiesen wurde in der Vergangenheit öfter als 30 Mal jährlich mit dem Traktor überfahren. Die untersuchten extensiven Mähwiesen wurden nach Angaben der Bewirtschafter durchschnittlich nur fünf bis zehn Mal jährlich befahren. Eine Zunahme des Eindringwiderstandes und der Lagerungsdichte infolge starker Befahrung wird auch durch die Ergebnisse von DRAGHI und JORAJURIA (1996) bestätigt. Auch DIEPOLDER et al. (2005) konnten in ihren Untersuchungen eine tendenzielle Zunahme der Lagerungsdichte von Dauergrünlandböden, in den Tiefenstufen 5-10cm und 15-20cm nachweisen.

Widersprüchlich ist jedoch, dass in der Tiefenstufe 25-30cm die Nutzungen *Weide*, *Mähweide* und *Mähwiese intensiv* eine ähnlich hohe und gegenüber den Referenzflächen um 15 bis 16 % erhöhte Lagerungsdichte aufwiesen, obwohl die Flächen unterschiedlichen Befahrungshäufigkeiten ausgesetzt waren. Man könnte annehmen, dass die häufige Befahrung der intensiv bewirtschafteten Mähwiesen zu einer deutlicheren Steigerung der Lagerungsdichte in größerer Tiefe führt, da die aufgebrachten Lasten infolge der Befahrung wesentlich höher sind als die der weidenden Rinder, und daher größere Tiefenwirkung entfalten können (HAKANSSON 2005).

Dieser Effekt konnte zumindest bis in die untersuchte Tiefe von 30 cm nicht festgestellt werden. Wiederum zeigten jedoch extensiv bewirtschaftete Mähwiesen, die eine mit den untersuchten Weiden vergleichbare Befahrungsintensität aufwiesen, niedrigere Lagerungsdichte in den tieferen Bereichen. Die individuellen

Auswirkungen von Beweidung und Befahrung konnten nicht restlos geklärt werden, auch eine mögliche aggregierte Wirkung der beiden Belastungsfaktoren ist nicht auszuschließen und wäre im Rahmen von Exaktversuchen zu bestimmen.

4.3 Abundanz und Indikation der erhobenen Zeigerarten für Bodenverdichtung

"Welche Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung treten im Untersuchungsgebiet auf? In welchem Ausmaß treten diese in den verschiedenen Nutzungen auf? Welchen indikatorischen Wert besitzen die aufgefundenen Arten hinsichtlich der Gefügebeurteilung?"

Insgesamt wurden im Zuge der Vegetationsaufnahmen auf den untersuchten Flächen acht Zeigerarten für Bodenverdichtung aufgefunden. Auf den Referenzflächen wurden keine Zeigerarten für Bodenverdichtung identifiziert. Auch auf den extensiv bewirtschafteten Mähwiesen trat lediglich auf einem Standort vereinzelt *Ranunculus repens* mit nicht erwähnenswerter Deckung auf. Auf diesen Flächen zeigten die Ergebnisse der bodenphysikalischen Messungen geringe Lagerungsdichten und Eindringwiderstände im Oberboden. Nach BOHNER (2010) fehlen Zeigerarten für Bodenverdichtung im extensiv genutzten Grünland fast zur Gänze. Das trifft für die untersuchten Standorte durchaus zu.

Auch auf den intensiv bewirtschafteten Mähwiesen wurden keine hohen Deckungsgrade der Verdichtungszeiger erhoben, wenngleich auf allen Standorten dieser Nutzung die Art *Ranunculus repens* mit geringer mittlerer Deckung auftrat. Auf einem Standort wurde zusätzlich ein vereinzelt Vorkommen von *Leontodon autumnalis*, ebenfalls mit geringer Deckung, festgestellt.

Nach BOHNER (2010) geben Zeigerpflanzen lediglich Auskunft über die Verhältnisse im Bereich des Wurzelraums. Veränderungen der Lagerung unterhalb der Hauptwurzelzone (10 cm) können daher umso weniger über das Auftreten von Zeigerpflanzen identifiziert werden. Daraus kann man schließen, dass die festgestellten Lagerungsdichten und Eindringwiderstände im Hauptwurzelbereich der intensiv genutzten Mähwiesen zu gering waren, um ein verstärktes Auftreten der Zeigerarten zu verursachen. Es zeigten sich zwar gegenüber den Referenzflächen erhöhte Lagerungsdichten, in Tiefenstufe 0-5cm lagen die Werte jedoch im Bereich der unbefahrenen Referenzflächen. Die Eindringwiderstände zeigten vor allem ab der Tiefenstufe 10-15cm stark erhöhte Abweichungen zu den Referenzflächen.

Hinsichtlich der Abundanz der Zeigerarten für Bodenverdichtung trat wiederum ein deutlicher Unterschied zwischen beweideten und unbeweideten Flächen hervor. Beweidete Flächen wiesen generell eine höhere Diversität und Deckung der Zeigerarten auf. Die höchsten mittleren Deckungen der Verdichtungszeiger wurden auf beweideten Standorten mit stark erhöhten Lagerungsdichten und Eindringwiderständen im Oberboden festgestellt.

Für die hohen Deckungen auf den beweideten Standorten waren vorwiegend die nach BRIEMLE und DIERSCHKE (2002) ausgesprochen trittverträglichen Arten *Poa annua* bzw. *Poa supina*, *Agrostis stolonifera*, *Ranunculus repens* und *Plantago major* verantwortlich. Das gehäufte Auftreten der genannten Arten auf den beweideten Standorten ist bestimmt nicht allein auf die Dichtlagerung des Oberbodens zurückzuführen. Nach WILLMANNNS (1998) unterliegen Pflanzen auf beweideten Flächen generell einer höheren Stressbelastung als auf Mähwiesen. Ursachen sind der häufige Verbiss, die direkte Wirkung des Tritts durch mechanische Schädigung, sowie die indirekte Wirkung über die Änderung der Standortfaktoren infolge der Bodenverdichtung.

Viele der auf den beweideten Flächen erhobenen Arten sind Vertreter der Trittgesellschaften. Nach WALTER (1973) ist das Auftreten der Trittpflanzen vielfach auf deren Robustheit gegenüber mechanischen Belastungen und der daraus resultierenden Überlegenheit gegenüber anderen Arten zurückzuführen. Dass der Zeigerwert einer Art maßgeblich von der Konkurrenz durch andere Arten bestimmt wird, beschreibt auch WILLMANNNS (1998). Unter Berücksichtigung der relativen Standortskonstanz (WILLMANNNS 1998) und der Theorie, dass bestimmte Standortfaktoren durch andere kompensiert werden und somit weitgehend stabil gehalten werden können, hängt die Abundanz der Zeigerarten und somit deren Indikationsfähigkeit womöglich stark von Einflüssen aus der Bewirtschaftung, wie der Schnitthäufigkeit, der Düngung etc. ab.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass auf vielen der untersuchten Standorte im Zuge der Bewirtschaftung eine regelmäßige Nach- bzw. Übersaat erfolgt. Die Zusammensetzung der Bestände zeigte vor allem bei den intensiv genutzten Mähwiesen hohe Anteile an Raygras (*Lolium perenne*) und Weißklee (*Trifolium repens*). Ein gewisser Verdrängungseffekt durch "künstliche" Bestandsveränderung ist daher nicht auszuschließen.

Die maximale mittlere Deckung der Zeigerarten wurde im Zuge der kleinräumigen Untersuchungen im Eingangsbereich einer Weide erfasst. Hier wurde eine mittlere Deckung der Zeigerarten von 73,5% erhoben und gleichzeitig die höchste Lagerungsdichte in der Tiefenstufe 0-5cm gemessen. Auch in den darunterliegenden Tiefenstufen zeigten sich stark erhöhte Lagerungsdichten und Eindringwiderstände. Nach BOHNER (2010) weist ein Massenaufreten der genannten Zeigerarten auf einen verdichteten Oberboden hin. Auf der untersuchten Teilfläche wurde die Oberbodenverdichtung zuverlässig durch die Abundanz der Arten indiziert.

Nach BOHNER (2010) haben einige Zeigerarten Indikatorfunktionen für mehrere Standortfaktoren. So sind manche Zeigerarten für Oberbodenverdichtung gleichzeitig Indikatoren für Krumenwechselfeuchtigkeit, wie z.B. *Ranunculus repens* (ELLENBERG 1992). Da viele der untersuchten Böden Merkmale der Pseudovergleyung infolge des Tagwasserstauens aufwiesen, könnte das Auftreten von *R. repens* auch durch die natürlichen Standortfaktoren im Untersuchungsgebiet begünstigt werden, und nicht zwingend auf die Verdichtung zurückzuführen sein.

Zu erwähnen ist, dass die durchgeführten Vegetationsaufnahmen lediglich eine Momentaufnahme einer dynamischen und sich im Jahresverlauf ändernden Zusammensetzung einer Pflanzengesellschaft sind. Da manche Arten aufgrund ihrer Lebensform nur in gewissen Jahreszeiten auftreten und die Abundanz innerhalb der Vegetationsperiode schwankt (BOHNER 2015), wäre für eine umfassende Beurteilung eine mehrmalige Erhebung des Pflanzenbestandes erforderlich.

Fazit

Auf den untersuchten Dauergrünlandböden konnten nutzungsspezifische Auswirkungen auf die Lagerungsdichte, den Eindringwiderstand sowie auf die Abundanz von Zeigerarten für Bodenverdichtung festgestellt werden. Im Allgemeinen wiesen die untersuchten Flächen vor allem im Oberboden eine relativ geringe Lagerungsdichte auf, die vor allem auf den hohen Humusgehalt und den erheblichen Anteil an Wurzelmasse im Bodenvolumen zurückzuführen ist. Ausgeprägte Verdichtungen konnten im Bereich unterhalb der Hauptwurzelzone in einer Tiefe von 10 bis 20 cm erfasst werden.

In dieser Tiefenstufe zeigten insbesondere beweidete Flächen sowie intensiv genutzte Mähwiesen erhöhte Lagerungsdichten und Eindringwiderstände, die ein eingeschränktes Wurzel- bzw. Pflanzenwachstum indizieren können.

Bewirtschaftungsbedingte Zunahmen der Lagerungsdichte konnten in geringerem Maße bis in die untersuchte Tiefe von 30 cm beobachtet werden. Inwiefern sich die festgestellte Veränderung der Lagerung infolge der Bewirtschaftung schädlich auf die Funktionalität der untersuchten Böden auswirkt, konnte nicht restlos geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

5 LITERATURVERZEICHNIS

AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG (2014): Grüner Bericht - Bericht über die wirtschaftliche und soziale Lage der Salzburger Land- und Forstwirtschaft in den Jahren 2010 bis 2012. Amt der Salzburger Landesregierung. Salzburg.

BLUME, H.P., SCHLICHTING, E., STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte 81. Blackwell Wissenschafts-verlag. 2. Auflage. Berlin/Wien.

BLUME, H.P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETCHMAR, R., STAHR, K., WILKE, B.M. (2010): Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde. 6. Auflage. Spektrum. Heidelberg.

BMLFUW (2015): Grüner Bericht. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft im Jahr 2014. 56. Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

BOHNER, A. (2015): Zur Bedeutung von Zeigerpflanzen im Grünland. In: 20. Alpenländisches Expertenforum 2015: 39-44.

BOHNER, A. (2010): Zeigerpflanzen für die Beurteilung des Bodenzustandes im Wirtschaftsgrünland. In: 2. Umweltökologisches Symposium 2010: 111-120.

BOHNER, A., HERNDL, M. (2011): Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden. In: Tagungsband der 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung 2011: 35-44.

BOHNER, A., SCHINK, M. (2011): Humusgehalte in Grünlandböden. Vortrag. Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft. Wien.

http://oebg.boku.ac.at/files/bohner_humusgehalte_in_gruenlandboeden.pdf

(15.10.2016)

BOXBERGER, J. MOITZI, G. (2007): Vermeidung von Bodenschadverdichtungen beim Einsatz von schweren Landmaschinen – eine aktuelle Herausforderung. In: Ländlicher Raum - Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2007: 1-27.

https://www.bmlfuw.gv.at/land/laendl_entwicklung/Online-Fachzeitschrift-Laendlicher-Raum/archiv/2007/Moitz.html (17.10.2016)

BRANDHUBER, R. (2006): Bodenbelastung durch Landmaschinen - Wirkungsmechanismen und Risikobeurteilung. In: Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 21: 53-74.

BRUNOTTE, J., LEBERT, M., SOMMER, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr Umweltbundesamt (Hrsg.): Forschungsbericht 200 71 245 des Instituts für Betriebstechnik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), UBA-Texte 46/04. Berlin.

- BUCHGRABER, K., GINDL, G. (1994): Zeitgemässe Grünlandbewirtschaftung. Leopold Stocker Verlag. Graz.
- BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD (2016): Digitale Bodenkarte Österreichs. <https://www.gis.lebensministerium.at/ebod> (29.10.2016)
- CARLESSO, R., DEBIASI, H., FRANCHINI, J.C., MORAES, M.T., SILVA, V.R. (2014): Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. In: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 38/1: 288-298.
- CARLIER L., LOOTENS, P., MESTDAGH, I., VAN CLEEMPUT, O. (2006): Variation in organic-carbon concentration and bulk density in Flemish grassland soils. In: Journal for Plant Nutrition and Soil Science, 169: 616-622.
- CHANASYK, D.S., NAETH, M.A. (1995): Grazing impacts on bulk density and soil strength in the tobthills fescue grasslands of Alberta, Canada. In: Canadian Journal of soil science, 75/4: 551-557.
- DAXNER, P., MITTER, M. (2008): Waldentwicklungsplan Salzburg. Teilplan Salzburg-Umgebung und Stadt Salzburg, Amt der Salzburger Landesregierung Referat 4/02: Landesforstdirektion. https://www.salzburg.gv.at/agrarwald/ Documents/wep_flachgau_textteil.pdf (21.09.2016)
- DE BAKKER, H., LOCHER, W.P. (1990): Bodemkunde van Nederland, Deel 1. Malmberg. Den Bosch. zit. nach EIJKELKAMP (2013): Penetrologger Gebrauchsanweisung. Eijkelkamp Agrisearch Equipment. Giesbeek.
- DEUTSCH, A. (2014): Bestimmungsschlüssel für Grünlandpflanzen während der ganzen Vegetationszeit. Cadmos Verlag. Schwarzenbek.
- DIEPOLDER, M., SCHRÖPEL, R., BRANDHUBER, R., BAUCHHENß, J., JAKOB, B. (2005): Wie wirkt sich zunehmende mechanische Belastung im Intensivgrünland aus? Erste Versuchsergebnisse aus Bayern. In: Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Heft 8-9: 6-10.
- DIERSCHKE, H., BRIEMLE, G. (2002): Kulturgrasland. Ulmer Verlag. Stuttgart.
- DIETL, W., JORQUERA, M. (2012): Wiesen- und Alpenpflanzen. Österreichischer Agrarverlag. Wien.
- DRAGHI, L., JORAJURIA, D. (1997): The Distribution of Soil Compaction with Depth and the Response of a Perennial Forage Crop. In: Journal of Agricultural Engineering Research, 66: 261 – 265.
- EGGER, H. (1989): Zur Geologie der Flyschzone im Bundesland Salzburg. In: Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, 132/2: 375-395.
- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., PAULIßEN, D. (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. In: Scripta Geobotanica 18, 2. Auflage. Online-Abfrage: <http://statedv.boku.ac.at/zeigerwerte/> (2.9.2016)

EIJKELKAMP (2013): Penetrologger Gebrauchsanweisung. Eijkelkamp Agrisearch Equipment. Giesbeek.

<https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/DU/m1-0615sadpenetrologger.pdf> (4.10.2016)

GLAB, T. (2013): Impact of soil compaction on root development and yield of meadow-grass. In: International Agrophysics. The Journal of Institute of Agrophysics of Polish Academy of Sciences, 27: 7-13.

GREENWOOD, K., Mc KENZIE, B.M. (2001): Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. In: Australian Journal of Experimental Agriculture, 41/8: 1231-1250.

HAKANSSON, I. (2005): Machinery-induced compaction of arable soils. Incidence-Consequences-Counter Measures. In: Reports from the Division of Soil Sciences, 109: 7-110.

HARTGE, K.H., HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.

HARTGE, K.H., HORN, R. (2014): Einführung in die Bodenphysik. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart.

HASSINK, J., NEETESON, J.J. (1991): Effect of grassland management on the amounts of soil organic N and C. In: Netherlands Journal of Agricultural Science, 39: 225-236.

JACOB, H., VOIGTLÄNDER, G. (1987) : Grünlandwirtschaft und Futterbau. Ulmer Verlag. Stuttgart. zit. nach SCHLIMBACH (2006): Validierung von Winterweidesystemen mit Fleischrindern und tierartübergreifende Effekte auf bodenphysikalische Merkmale. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

LIEBHARD, P. (1994): Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Lagerungsdichte, Porenvolumen und Porengrößenverteilung von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum. In: Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment, 45/1: 125-138.

MURER, E., ZEHNER, K. (2010): Bodenverdichtung und Gewässerschutz. In: 2. Umweltökologisches Symposium 2010: 65-68.

NESTROY, O., AUST, G., BLUM, W., ENGLISCH, M., HAGER, H., HERZBERGER, E., KILIAN, W., NELHIEBEL, P., ORTNER, G., PECINA, E., PEHAMBERGER, A., SCHNEIDER, W., WAGNER, J. (2011): Systematische Gliederung der Böden Österreichs - Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. In: Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, 79:1-98.

O'RILLEY, C.D., KURZ, I., TUNNEY, H. (2005): Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. In: Agriculture, Ecosystems & Environment, 113/1-4: 378-390.

SCHMEER, M., LOGES, R., SENBAYRAM, M., TAUBE, F. (2009): Einfluss von Bodenverdichtung, Nutzungshäufigkeit, Stickstoff- und Kalidüngung auf Lachgasemissionen, botanische Zusammensetzung und Ertrag von intensiv genutzten Grünlandbeständen. In: Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 21: 79-87.

STAHL, H., MARSCHALL, K., GÖTZE, H., FREYTAG, A. (2009): Bodendruck im Grünland. In: Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 3: 1-57.

VERHONIG, P. (2013): Einfluss einer mehrjährigen intensiven Kurzrasenbeweidung auf den Oberboden und die Grasnarbe. Diplomarbeit. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein. Irnding.

WALTER, H. (1973): Allgemeine Geobotanik. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.

WILLMANN, O. (1998): Ökologische Pflanzensoziologie. Eine Einführung in die Vegetation Mitteleuropas, 6. Auflage. UTB für Wissenschaft. Wiesbaden.

ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2016): Klimadaten von Österreich 1971 - 2000.

http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe7100/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (14.10.2016)

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.1: Druckzwiebeln, Verteilung der Spannung in einem weichen und einem harten Boden (BLUME et al. 2010).....	4
Abb.2: Mittlerer Kontaktflächendruck und abzustütze Lasten im Vergleich (BOXBERGER und MOITZI 2007).....	5
Abb.3: Lage des Untersuchungsgebiets (SAGIS 2016).....	14
Abb.4: Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2016).....	15
Abb.5: Niederschläge im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2016).....	15
Abb.6: Bodentypen im Untersuchungsgebiet (BFW 2016).....	15
Abb.7: Typischer und weit verbreiteter Bodentyp im Untersuchungsgebiet: pseudovergleyte Lockersediment- Braunerde (P.Gehmacher).....	17
Abb.8: Profilzeichnung eines Untersuchungsstandortes I (BFW 2016).....	17
Abb.9: Profilzeichnung eines Untersuchungsstandortes II (BFW 2016).....	18
Abb.10: Kulturartenverteilung (in ha) im Bundesland Salzburg (AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG 2012).....	19
Abb.11: Anzahl der Betriebe nach Größenklassen (AMT DER SALZBURGER LANDESREGIERUNG 2012)	19
Abb.12: Verwiegung der Stechzylinder.....	22
Abb.13: Trocknung der Bodenproben.....	22
Abb.14: Messung des Eindringwiderstandes mittels Penetrologger.....	23
Abb.15: Boxplot-Diagramm, Lagerungsdichte (g/cm^3) der untersuchten Standorte...30	
Abb.16: Scatter-Plot der Parameter Lagerungsdichte (g/cm^3) und Corg-Gehalt(%)..31	
Abb.17: Lagerungsdichte (g/cm^3) der Nutzungen im Vergleich.....32	
Abb.18: Boxplot-Diagramm, Eindringwiderstände(MPa) der untersuchten Standorte.....36	
Abb.19: Scatter-Plot der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und volumetrische Bodenfeuchte (%).....38	
Abb.20: Diagramm Eindringwiderstand (MPa) der Nutzungen und der Referenzflächen im Vergleich, Mittelwert und Standardabweichung.....39	
Abb.21: Scatter-Plot der Parameter Lagerungsdichte (g/cm^3) und Eindringwiderstand (MPa).....43	
Abb.22: Lagerungsdichte der Nutzungen.....44	
Abb.23: Eindringwiderstand der Nutzungen.....44	
Abb.24: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Referenzflächen.....44	
Abb.25: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung <i>Mähwiese extensiv</i>44	

Abb. 26: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung <i>Mähwiese intensiv</i>	44
Abb.27: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung <i>Mähweide</i>	44
Abb.28: Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der Nutzung <i>Weide</i>	44
Abb.29: Lagerungsdichte (g/cm ³) der Teilflächen auf einem untersuchten Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung.....	46
Abb.30: Eindringwiderstand (MPa) der untersuchten Teilflächen auf einem Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung.....	49

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tab.1: Von Bodenschadverdichtung direkt betroffene Bodenfunktionen und mögliche Parameter als Anzeiger (modifiziert nach BRUNOTTE et al. 2004).....	6
Tab.2: Kennzeichnung der Lagerungsdichte (g/cm ³) von Mineralböden (modifiziert nach BLUME et al. 1995)	7
Tab.3: Grenzbereiche des Eindringwiderstandes hinsichtlich des Wurzelwachstums nach DE BAKKER und LOCHER (1990).....	8
Tab.4: Merkmale, Standort und Verbreitung der Zeigerarten für Bodenverdichtung..	12
Tab.5: Zeigerwerte, Mahd und Trittverträglichkeit der Zeigerarten.....	13
Tab.6: Profilstelleninformation eines Untersuchungsstandortes I (BFW 2016).....	17
Tab.7: Profilstelleninformation eines Untersuchungsstandortes II (BFW 2016).....	18
Tab.8: BRAUN-BLANQUET-Skala, modifiziert nach WILLMANN (1998).....	24
Tab.9: Nutzungsform und Befahrungintensität der untersuchten Standorte.....	26
Tab.10: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse der einzelnen Untersuchungsstandorte.....	28
Tab.11: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse, Gesamtmittelwert und Standardabweichung.....	29
Tab.12: Ergebnis der horizontbezogenen bodenchemischen Analyse nach Nutzungen, Mittelwert und Standardabweichung.....	29
Tab.13: Lagerungsdichte (g/cm ³) der untersuchten Standorte.....	30
Tab.14: Einzelergebnisse der Lagerungsdichte (g/cm ³) der untersuchten Standorte, Mittelwert und Standardabweichung der Tiefenstufen.....	31
Tab.15: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte (g/cm ³) und Corg-Gehalt (%).....	32
Tab.16: Lagerungsdichte(g/cm ³) der Referenzflächen.....	32
Tab.17: Lagerungsdichte(g/cm ³) der Nutzung <i>Weide</i>	33
Tab.18: Lagerungsdichte (g/cm ³) der Nutzung <i>Mähwiese intensiv</i>	33

Tab.19: Lagerungsdichte (g/cm ³) der Nutzung <i>Mähwiese extensiv</i>	33
Tab.20: Lagerungsdichte (g/cm ³) der Nutzung <i>Mähweide</i>	33
Tab.21: Statistische Auswertung der Lagerungsdichte der Nutzungen.....	35
Tab.22: Eindringwiderstände (MPa) der untersuchten Standorte.....	36
Tab.23: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der Untersuchungsstandorte zum Zeitpunkt der Messung des Eindringwiderstandes.....	37
Tab. 24: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der einzelnen Nutzungen.....	37
Tab. 25: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und volumetrische Bodenfeuchte (%)......	38
Tab. 26: Eindringwiderstand (MPa) der Referenzflächen.....	39
Tab. 27: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung <i>Mähwiese extensiv</i>	39
Tab. 28: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung <i>Mähwiese intensiv</i>	40
Tab. 29: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung <i>Mähweide</i>	40
Tab. 30: Eindringwiderstand (MPa) der Nutzung <i>Weide</i>	40
Tab. 31: Statistische Auswertung der Eindringwiderstände der Nutzungen.....	42
Tab. 32: Ergebnis der Rangkorrelationsanalyse nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand (MPa) und Lagerungsdichte (g/cm ³)......	43
Tab. 33: Lagerungsdichte (g/m ³) der Teilflächen auf einem untersuchten Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung.....	46
Tab. 34: statistische Auswertung der Untersuchung der räumlichen Variabilität der Lagerungsdichte auf einem Weidestandort.....	48
Tab. 35: Eindringwiderstand (MPa) der untersuchten Teilflächen auf einem Weidestandort, Mittelwert und Standardabweichung.....	49
Tab. 36: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der untersuchten Teilflächen, Mittelwert und Standardabweichung.....	49
Tab. 37: statistische Auswertung der Untersuchung der räumlichen Variabilität des Eindringwiderstandes auf einem Weidestandort.....	51
Tab. 38: Ergebnis der Vegetationserhebung der Zeigerarten für Bodenverdichtung nach BRAUN-BLANQUET der untersuchten Standorte.....	52