



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Nutzpflanzen-
wissenschaften

 HBLFA
Raumberg-Gumpenstein
Landwirtschaft

Einfluss verschiedener Bewirtschaftungsformen von Dauergrünland auf Lagerungsdichte, Eindringwiderstand und den Pflanzenbestand im steirischen Murtal

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

an der

Universität für Bodenkultur, Wien

betreut von

Mag. Dr. Andreas Bohner

Priv.-Doz. Dr. Gernot Bodner

vorgelegt von

Daniel Kranz, BSc

Matrikelnummer 01340168

Wien, November 2020

Vorwort

Zu Beginn möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Mag. Dr. Bohner Andreas und Priv.-Doz. Dr. Bodner Gernot bedanken. Ihre freundliche und kompetente Betreuung war mir eine große Hilfe bei der Erstellung meiner Arbeit.

Weiters möchte ich mich bei den Murtaler Landwirten und Landwirtinnen bedanken, welche Ihre Grünlandflächen für meine Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben.

Ebenfalls will ich mich bei meinen Studienkollegen und Studienkolleginnen und vor allem bei meinen „Raumberger“ Kollegen für die schöne und vielseitige Studienzeit an der Universität für Bodenkultur bedanken, dank euch kam vor allem der Spaß nie zu kurz.

Der größte Dank jedoch gilt meinen Eltern, ihre liebevolle Unterstützung war mir stets die wichtigste Stütze bei der Beschreitung meines Weges.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst 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, am

Kurzzusammenfassung

Eine Bewirtschaftung von Dauergrünlandstandorten, durch Mahd oder Beweidung, hat Auswirkungen auf den Verdichtungszustand von Dauergrünlandböden. Ziel dieser Arbeit ist es, Erkenntnisse über den Verdichtungszustand verschiedener Grünlandböden zu erhalten. Dazu wurden bodenphysikalische Daten über die Bodentextur, die Lagerungsdichte und den Eindringwiderstand von 20 verschiedenen Grünlandstandorten im Steirischen Murtal erhoben. Ebenfalls wurden bodenchemische Untersuchungen über organischen Kohlenstoffgehalt, Gesamtstickstoffgehalt und pH-Wert durchgeführt sowie das Vorkommen und der Deckungsgrad von Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung erhoben. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Untersuchungsstandorte im Oberboden geringere Lagerungsdichten und Eindringwiderstände aufwiesen als in tieferen Bodenschichten. Generell konnte ein hoher organischer Kohlenstoffgehalt zu signifikant niedrigeren Lagerungsdichte- und Eindringwiderstandswerten führen. Die höchste Bodendichte wurde bei der Nutzungsform Pferdeweide ermittelt. Vor allem in einer Tiefe von 0-15 cm konnten signifikant höhere Bodendichten ermittelt werden als bei allen anderen Nutzungsformen. Ebenfalls wiesen Nutzungsformen mit intensiver Beweidung, wie Weiden, Mähweiden und Pferdeweiden, die höchsten Deckungsgrade von Bodenverdichtungszeigerpflanzen auf.

Abstract

Management of permanent grassland sites, through mowing or grazing, has an impact on the compaction status of permanent grassland soils. The aim of this thesis is to obtain knowledge about the compaction state of different grassland soils. For this purpose, soil physical data of soil texture, bulk density and penetration resistance of 20 different grassland sites in the Styrian Murtal were collected. Soil chemical investigations of organic carbon content, total nitrogen content and pH-value were investigated. Also, the occurrence and the coverage of indicator plants for soil compaction were determined. The results showed that all investigation sites show lower bulk densities and penetration resistances in the topsoil than in deeper soil layers. In general, a high organic carbon content could lead to significantly lower bulk density and penetration resistance values. The highest soil compaction was found in horse pastures. Especially in a depth of 0-15 cm significantly higher soil compactions could be found than in all other forms of use. Additionally, intensively used pastures, mowing pastures and horse pastures, could show the highest coverage of indicator plants for soil compaction.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Abbildungsverzeichnis | X |
| Tabellenverzeichnis | XIII |
| 1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 1.1 Ziele und Forschungsfragen | 2 |
| 1.2 Boden | 2 |
| 1.2.1 Definitionen „Boden“ | 2 |
| 1.2.2 Funktionen des Bodens..... | 3 |
| 1.2.3 Bodensystematik..... | 5 |
| 1.3 Agrarstruktur | 6 |
| 1.3.1 Land- und forstwirtschaftliche Betriebe | 6 |
| 1.3.2 Das Grünland | 7 |
| 2. AKTUELLER FORSCHUNGSSTAND | 9 |
| 2.1 Bodenfruchtbarkeit, Bodenstruktur, Bodenluft und Bodenporen | 9 |
| 2.2 Bodenverdichtung..... | 10 |
| 2.3 Effekte des Bodendruckes | 13 |
| 2.3.1 Auswirkung von Bodenverdichtungen auf Grünlandböden..... | 14 |
| 2.3.2 Bodenverdichtungen durch Weidetiere | 16 |
| 2.4 Lagerungsdichte | 17 |
| 2.5 Eindringwiderstand | 19 |
| 2.6 Pflanzenzusammensetzung im Grünland | 20 |
| 2.7 Zeigerpflanzen | 21 |
| 2.7.1 Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung..... | 22 |
| 2.7.2 Zeigerwert der untersuchten Arten nach Ellenberg | 25 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3. | MATERIAL UND METHODEN | 26 |
| 3.1 | Untersuchungsgebiet..... | 26 |
| 3.2 | Klima..... | 28 |
| 3.3 | Geologie | 29 |
| 3.4 | Der Boden im Untersuchungsgebiet..... | 29 |
| 3.4.1 | Bodenprofilstellen im Untersuchungsgebiet | 32 |
| 3.5 | Grünland-Pflanzengesellschaften im Untersuchungsgebiet | 34 |
| 3.6 | Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsflächen und Einteilung in unterschiedliche Bewirtschaftungsformen | 34 |
| 3.7 | Bodenphysikalische Untersuchungen..... | 36 |
| 3.7.1 | Erhebung der Lagerungsdichte | 36 |
| 3.7.2 | Erhebung des Eindringwiderstandes..... | 38 |
| 3.7.3 | Erhebung der volumetrischen Bodenfeuchte | 39 |
| 3.7.4 | Erhebung Bodenchemische Parameter..... | 40 |
| 3.7.5 | Analyse der Bodentextur | 40 |
| 3.7.6 | Erhebung der Vegetationszusammensetzung..... | 40 |
| 4. | ERGEBNISSE UND DISKUSSION | 42 |
| 4.1 | Nutzungserhebungen | 42 |
| 4.2 | Bodenchemische Analysen | 43 |
| 4.2.1 | Organischer Kohlenstoffgehalt | 45 |
| 4.2.2 | Gesamtstickstoffgehalt | 45 |
| 4.2.3 | C/N – Verhältnis | 46 |
| 4.2.4 | pH – Wert | 46 |
| 4.2.5 | Vergleich nach unterschiedlicher Nutzungsform | 48 |
| 4.3 | Bodentextur | 49 |

| | |
|--|-----|
| 4.4 Bodenwassergehalt | 51 |
| 4.5 Lagerungsdichte | 54 |
| 4.5.1 Lagerungsdichten der untersuchten Standorte | 54 |
| 4.5.2 Korrelation Lagerungsdichte und errechneter Bodenwassergehalt..... | 59 |
| 4.5.3 Korrelation Lagerungsdichte und Gehalt an organischem Kohlenstoff.... | 60 |
| 4.5.4 Korrelation Lagerungsdichte und Bodentextur | 61 |
| 4.5.5 Nutzungsspezifische Lagerungsdichten | 65 |
| 4.6 Eindringwiderstand | 71 |
| 4.6.1 Eindringwiderstand der untersuchten Standorte | 71 |
| 4.6.2 Volumetrische Bodenfeuchte bei der Messung des Eindringwiderstands | 73 |
| 4.6.3 Korrelation Eindringwiderstand und volumetrische Bodenfeuchte | 75 |
| 4.6.4 Korrelation Eindringwiderstand und errechneter Bodenwassergehalt | 76 |
| 4.6.5 Korrelation Eindringwiderstand und organischer Kohlenstoffgehalt | 78 |
| 4.6.6 Korrelation Eindringwiderstand und Bodentextur | 79 |
| 4.6.7 Nutzungsspezifische Eindringwiderstände | 82 |
| 4.7 Korrelation Lagerungsdichte und Eindringwiderstand..... | 88 |
| 4.7.1 Grafischer Vergleich von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand | 89 |
| 4.8 Vegetationsanalyse | 93 |
| 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 98 |
| 6. LITERATURVERZEICHNIS | 101 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Veränderung der Landwirtschaft zwischen 1970 und 2017 (Statistik Austria o.J.) | 7 |
| Abbildung 2: Verteilung der Grünfutterflächen in Österreich 2018 (BMNT 2019) | 8 |
| Abbildung 3: Auswirkung von Bodenverdichtung auf Bodenpartikel (Boxberger und Moitzi 2007)..... | 11 |
| Abbildung 4: Druckzwiebeln: Verteilung von Spannungen im Boden bei weichen (links) und harten (rechts) Bodenverhältnissen (Amelung et al. 2018)..... | 13 |
| Abbildung 5: Breitere Reifen verringern den Bodendruck und schmalere Reifen erhöhen den Bodendruck (Brandhuber et al. 2010)..... | 14 |
| Abbildung 6: Mittlerer Kontaktflächendruck im Vergleich zwischen Menschen, Tieren und verschiedenen Landmaschinen (KRB=Köpfrodebunker für die Zuckerrübenenernte) (Boxberger und Moitzi 2007). | 14 |
| Abbildung 7: Formel zur Lagerungsdichteberechnung nach (Amelung et al. 2018) . | 18 |
| Abbildung 8: Untersuchungsgebiet mit eingezeichneten Probefeldern (GIS 2020).. | 26 |
| Abbildung 9: Besondere Tage im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020) | 28 |
| Abbildung 10: Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020) | 28 |
| Abbildung 11: Niederschläge im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020)..... | 28 |
| Abbildung 12: Bodentypen des Untersuchungsgebietes (BFW 2020) | 30 |
| Abbildung 13: Bodentypen des Untersuchungsgebietes inklusive Auböden (BFW 2020) | 30 |
| Abbildung 14: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 1 (BFW, 2020). | 32 |
| Abbildung 15: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 2 (BFW, 2020) | 33 |
| Abbildung 16: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 3 (BFW, 2020). | 33 |
| Abbildung 17: Stechzylinder mit aufgesetztem Schlageisen (eigene Aufnahme) | 37 |
| Abbildung 18: Stechzylinder eingeschlagen in den Boden (eigene Aufnahme)..... | 37 |
| Abbildung 19: Messung des Eindringwiderstandes mit dem Penetrologger (eigene Aufnahme)..... | 39 |
| Abbildung 20: Korngrößenverteilung im A-Horizont..... | 51 |
| Abbildung 21: Korngrößenverteilung im B-Horizont..... | 51 |
| Abbildung 22: Boxplot-Diagramm des errechneten gravimetrischen Bodenwassergehaltes (%) in den unterschiedlichen Tiefenstufen aller Untersuchungsstandorte..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 23: Boxplot-Diagramm der Lagerungsdichte in g/cm^3 in den unterschiedlichen Tiefenstufen der Untersuchungsstandorte | 54 |
| Abbildung 24: Vergleich der Lagerungsdichten unterschiedlicher Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau (Gehmacher 2016). | 58 |
| Abbildung 25: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und errechnetem gravimetrischen Wassergehalt in % | 59 |
| Abbildung 26: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und organischem Kohlenstoffgehalt in %..... | 60 |
| Abbildung 27: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Tongehalt in % | 61 |
| Abbildung 28: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Schluffgehalt in % | 63 |
| Abbildung 29: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Sandgehalt in % | 64 |
| Abbildung 30: Lagerungsdichte in g/cm^3 der unterschiedlichen Tiefenstufen und Nutzungsformen | 65 |
| Abbildung 31: Boxplot-Diagramm des Eindringwiderstandes in MPa in den unterschiedlichen Tiefenstufen der Untersuchungsstandorte | 71 |
| Abbildung 32: Vergleich des Eindringwiderstandes unterschiedlicher Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau (Gehmacher 2016). | 73 |
| Abbildung 33: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und volumetrischer Bodenfeuchte in % | 75 |
| Abbildung 34: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und errechnetem Wassergehalt in %..... | 76 |
| Abbildung 35: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und organischem Kohlenstoffgehalt in %..... | 78 |
| Abbildung 36: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Tongehalt in % | 79 |
| Abbildung 37: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Schluffgehalt in % | 80 |
| Abbildung 38: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Sandgehalt in % | 81 |
| Abbildung 39: Eindringwiderstand in MPa der unterschiedlichen Tiefenstufen und Nutzungsformen | 82 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 40: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Lagerungsdichte in g/cm ³ | 88 |
| Abbildung 41: Grafischer Vergleich von Lagerungsdichten der unterschiedlichen Nutzungstypen..... | 90 |
| Abbildung 42: Grafischer Vergleich von Eindringwiderständen der unterschiedlichen Nutzungstypen..... | 91 |
| Abbildung 43: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese intensiv | 92 |
| Abbildung 44: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese extensiv | 92 |
| Abbildung 45: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähweide | 92 |
| Abbildung 46: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung..... | 92 |
| Abbildung 47: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Weide .. | 92 |
| Abbildung 48: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Pferdeweide..... | 92 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Schwankungsbreiten der Lagerungsdichte (g/cm^3) und Porenvolumen (%) bei unterschiedlichen Bodenarten (Amelung et al. 2018) | 18 |
| Tabelle 2: Einteilung der Lagerungsdichte von Mineralböden in g/cm^3 (AD-HOC-AG BODEN 2005)..... | 19 |
| Tabelle 3: Merkmale und Auftreten von häufigen Bodenverdichtungszeigern nach (Dietl et al. 2012) | 24 |
| Tabelle 4: Zeigerwert sowie Tritt- und Mahdverträglichkeit von häufigen Bodenverdichtungszeigern nach (Ellenberg et al. 1991) und (Dierschke und Briemle 2008) | 25 |
| Tabelle 5: Flächennamen, Nutzungsarten, Längengrade, Breitengrade und Seehöhe der Probestandorte | 27 |
| Tabelle 6: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 1 (BFW 2020). | 32 |
| Tabelle 7: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 2 (BFW 2020). | 33 |
| Tabelle 8: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 3 (BFW 2020). | 33 |
| Tabelle 9: BRAUN-BLANQUET Skala nach (Wilmanns 1998) | 41 |
| Tabelle 10: Art und Häufigkeit der Nutzung sowie Befahrungshäufigkeit der Untersuchungsstandorte..... | 42 |
| Tabelle 11: Ergebnisse der horizontbezogenen, bodenchemischen Analysen von Corg (%), Nges(%) und Corg/Nges | 44 |
| Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung der horizontbezogenen, bodenchemischen Analysen..... | 45 |
| Tabelle 13: Ergebnis der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes aus einer Mischprobe des A- und B-Horizontes | 47 |
| Tabelle 14: Mittelwert und Standardabweichung der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes aus einer Mischprobe vom A- und B- Horizont | 47 |
| Tabelle 15: Mittelwert und Standardabweichung der bodenchemischen Analysen unterteilt in die verschiedenen Nutzungstypen | 48 |
| Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichung der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes unterteilt in die verschiedenen Nutzungstypen | 48 |
| Tabelle 17: Bodentextur und Bodenart der einzelnen Untersuchungsstandorte | 50 |
| Tabelle 18: Mittelwerte des gravimetrischen Wassergehaltes (%) aller untersuchten Standorte | 52 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 19: Lagerungsdichte aller untersuchten Standorte in g/cm ³ | 54 |
| Tabelle 20: Ergebnisse der Lagerungsdichte in g/cm ³ der einzelnen Standorte, zu sehen sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der jeweiligen Tiefenstufen. | 56 |
| Tabelle 21: Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichung der Lagerungsdichte (g/cm ³) verschiedener Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau (Gehmacher 2016)..... | 57 |
| Tabelle 22: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm ³ und errechnetem gravimetrischen Wassergehalt in % | 59 |
| Tabelle 23: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm ³ und organischem Kohlenstoffgehalt in %..... | 60 |
| Tabelle 24: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm ³ und Tongehalt in %..... | 62 |
| Tabelle 25: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm ³ und Schluffgehalt in % | 63 |
| Tabelle 26: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm ³ und Sandgehalt in %..... | 64 |
| Tabelle 27: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Mähwiese extensiv (Referenzfläche)..... | 67 |
| Tabelle 28: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung..... | 67 |
| Tabelle 29: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Mähwiese intensiv | 68 |
| Tabelle 30: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Mähweide | 68 |
| Tabelle 31: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Weide | 68 |
| Tabelle 32: Lagerungsdichte in g/cm ³ der Nutzung Weide (Pferd) | 68 |
| Tabelle 33: Statistischer Vergleich von Lagerungsdichten der unterschiedlichen Nutzungsformen untereinander | 70 |
| Tabelle 34: Eindringwiderstand aller untersuchten Standorte in MPa | 71 |
| Tabelle 35: Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichung des Eindringwiderstandes (MPa) verschiedener Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau (Gehmacher 2016)..... | 72 |
| Tabelle 36: Volumetrische Bodenfeuchte in % vor der Eindringwiderstandsmessung der einzelnen Untersuchungsstandorte | 74 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 37: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und volumetrischer Bodenfeuchte in % | 75 |
| Tabelle 38: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und errechnetem Wassergehalt in %..... | 76 |
| Tabelle 39: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und organischem Kohlenstoffgehalt in % | 78 |
| Tabelle 40: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Tongehalt in %..... | 79 |
| Tabelle 41: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Schluffgehalt in %..... | 80 |
| Tabelle 42: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Sandgehalt in % | 81 |
| Tabelle 43: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese extensiv (Referenzfläche)..... | 85 |
| Tabelle 44: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung..... | 85 |
| Tabelle 45: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese intensiv..... | 85 |
| Tabelle 46: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähweide..... | 85 |
| Tabelle 47: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Weide..... | 86 |
| Tabelle 48: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Weide (Pferd)..... | 86 |
| Tabelle 49: Statistischer Vergleich vom Eindringwiderstand der unterschiedlichen Nutzungsformen untereinander | 87 |
| Tabelle 50: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Lagerungsdichte in g/cm ³ | 88 |
| Tabelle 51: Auflistung der erhobenen Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung aller untersuchten Standorte nach BRAUN-BLANQUET..... | 93 |

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Der Bodenverdichtung im Dauergrünland wurde bislang eher weniger Aufmerksamkeit geschenkt als der Bodenverdichtung am Acker. Auch grünlandbewirtschaftende Betriebe bleiben von der immer weiter voranschreitenden Rationalisierung und Effizienzsteigerung nicht verschont. Sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht wird es für Grünlandbetriebe immer wichtiger, durch intensivere Bewirtschaftung ihrer Flächen, wertvolles und qualitativ hochwertiges Grundfutter am eigenen Betrieb zu erzeugen und dadurch auch den Kraftfutterzukauf zu reduzieren. Diese Intensivierung geht oft mit einer Nutzungssteigerung von Grünlandflächen einher. Durch die Steigerung der Schnittnutzung und Düngung werden Grünlandflächen mittlerweile zum Teil sehr häufig befahren. Um enge Zeitfenster für Futterkonservierung und Düngung nutzen zu können, wird auch die Landtechnik immer größer, schwerer und effizienter. Auch Betriebe mit Weidehaltung nutzen Weiden zum Teil sehr intensiv. Vor allem intensive Weidesysteme, wie zum Beispiel Kurzrasenweiden, können einen großen Einfluss auf den Boden und seine Pflanzenvegetation haben. Laut Brandhuber et al. (2010) und Boxberger und Moitzi (2007) darf der Tritt von Tieren nicht unterschätzt werden, da hier das Gewicht der Tiere eher auf einer kleineren Oberfläche aufliegt und hohe punktuelle Bodendrücke erzeugt werden. Durch eine größere Aufstandsfläche von Reifen moderner Landtechnik wird der Bodendruck wiederum eher auf eine größere Bodenoberfläche verteilt.

Diese Arbeit versucht Auswirkungen, verschiedener Grünlandnutzungsformen, auf die Bodendichte im Steirischen Murtal zu erfassen. Es wurden Mähwiesen extensiv, Mähwiesen intensiv, Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung, Mähweiden, Weiden und Pferdeweiden beprobt und untereinander verglichen. Dazu wurden Lagerungsdichten und Eindringwiderstände in verschiedenen Grünlandnutzungsformen im steirischen Murtal erhoben und ausgewertet. Es wurden bodenchemische Analysen und Bodentexturanalysen durchgeführt, um einen Zusammenhang mit der Dichte des Bodens zu erkennen. Auf den Untersuchungsflächen wurde auch die Vegetationszusammensetzung erhoben und das Vorkommen sowie der Deckungsgrad von Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung untersucht.

1.1 Ziele und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, in welchem Zustand sich verschiedene Grünlandböden im steirischen Murtal, in Hinblick auf Bodenverdichtung, befinden. Es sollen Erkenntnisse über Lagerungsdichten, Eindringwiderstände, Pflanzenbestände und andere bodenphysikalische Parameter generiert werden, um diese Ergebnisse mit der Verdichtungssituation an anderen Grünlandstandorten in Österreich vergleichen zu können. Ein weiteres Ziel ist es herauszufinden, wie sich verschiedene Bewirtschaftungsarten und Intensitäten auf den Verdichtungszustand von Dauergrünlandböden auswirken können.

Forschungsfragen:

- Welche bodenverdichtende Wirkung haben die verschiedenen Bewirtschaftungsarten und Intensitäten und bis in welche Tiefen reichen die Verdichtungen?
- Welche Lagerungsdichten und Eindringwiderstände weisen die untersuchten Grünlandstandorte auf und wie können diese Werte interpretiert werden?
- Welche Auswirkung haben unterschiedliche Bewirtschaftungsarten und Intensitäten, sowie unterschiedliche Bodendichten auf das Vorkommen von Verdichtungszeigerpflanzen?

1.2 Boden

1.2.1 Definitionen „Boden“

„Boden ist das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte, unter dem Einfluss der Umweltfaktoren an der Erdoberfläche entstandene und im Ablauf der Zeit sich weiterentwickelnde Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen mit eigener morphologischer Organisation, das in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen und die Lebensgrundlage

für Tiere und Menschen bildet. Als Raum-Zeit-Struktur ist der Boden ein vierdimensionales System (Schroeder und Blum 1992).“

"Wenn wir von Boden sprechen, meinen wir damit eine dünne Schicht zwischen dem unbelebten Material des Erdinneren und der Atmosphäre. Die Umwandlung der Erdkruste unseres Planeten in fruchtbare Böden, die Pflanzen und damit auch Tieren und Menschen die Lebensgrundlage bilden, verdanken wir in erster Linie der Aktivität von Lebewesen. Böden sind lebendige Systeme, Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen, die wir möglichst vorsichtig und umsichtig behandeln sollten (Schmid und Schelske 1997)."

„Böden sind der belebte Teil der obersten Erdkruste. Sie besitzen eine Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Zehnermetern bei einer Dicke der Erdkruste von meist 5–40 km (Amelung et al. 2018).“

„Die Bodenkunde (Bodenwissenschaft) oder Pedologie ist die Wissenschaft von der Entwicklung und Verbreitung von Böden sowie deren Eigenschaften und Funktionen. Sie befasst sich mit den Möglichkeiten der Nutzung von Böden, deren Verbesserung und mit den Gefahren, die mit Fehlnutzung durch den Menschen zusammenhängen sowie mit der Vermeidung und der Behebung von Bodenbelastungen (Amelung et al. 2018).“

1.2.2 Funktionen des Bodens

Der Boden übernimmt vielfältige Funktionen in unserem Ökosystem und ist Grundlage für das Leben, wie wir es kennen.

- **Lebensraum für Bodenorganismen:**

Bodenorganismen spielen eine wichtige Rolle im Naturhaushalt und beeinflussen viele weitere Bodenfunktionen. Ohne Bodenorganismen gäbe es keine Mineralisierung von organischer Substanz, Nährstoffkreisläufe wären dadurch nicht geschlossen und die Nährstoffversorgung von Pflanzen wäre nicht möglich. Bodenorganismen beeinflussen die Struktur des Bodens und somit auch seinen Luft- und

Wasserhaushalt. Das Bodenleben ist die Grundlage für gesunde Böden und somit unersetzlich.

- **Standortpotenzial für natürliche Pflanzengesellschaften:**

Der Boden bietet, je nach Wasser- und Nährstoffhaushalt, klimatischen- und geomorphologischen Bedingungen, das Fundament für die Etablierung einer bestimmten Pflanzengesellschaft. Gerade Feucht- und Trockenstandorte sowie sehr nährstoffarme Standorte, bieten Platz für den Schutz von verschiedenen Arten und Biotopen.

- **Natürliche Bodenfruchtbarkeit:**

Die Nahrungsmittelproduktion ist die Bedingung für das weitere Bestehen unserer menschlichen Gesellschaften. Gerade in Zeiten von Lebensmittelknappheit wurde die natürliche Bodenfruchtbarkeit als wichtigste Bodenfunktion angesehen. Um auf Böden mit niedriger natürlicher Bodenfruchtbarkeit hohe Erträge zu erzielen, müssen mehr Düngemittel und natürliche Bewässerung eingesetzt werden als auf Böden mit hoher natürlicher Bodenfruchtbarkeit. Gerade deswegen ist eine hohe natürliche Bodenfruchtbarkeit auch aus ökologischer Sicht von großer Bedeutung.

- **Abflussregulierung:**

Böden gleichen den Wasserhaushalt aus und wirken der Entstehung von Hochwässern entgegen. Böden nehmen Niederschläge auf und speichern sie. Nach einer gewissen Zeit geben die Böden das gespeicherte Wasser langsam wieder an Atmosphäre, Vegetation, Oberflächengewässer und an das Grundwasser ab. Infiltration von Wasser sowie die Grundwasserneubildung ist bei verdichteten und versiegelten Böden nicht mehr möglich. Dies führt zu einem erhöhten Erosionsrisiko, da das Niederschlagswasser vermehrt oberflächlich abfließt. Damit einher geht auch ein gesteigerter Stoffeintrag in Oberflächengewässer (Gewässereutrophierung) und ein gesteigertes Hochwasserrisiko. Gerade deswegen ist es wichtig, Böden mit hoher Infiltrations-, Versickerungs- und Speicherfähigkeit zu erhalten und zu schützen.

- **Filter und Puffer für anorganische und organische (Schad-)Stoffe sowie Puffer für saure Einträge:**

Um (Schad-)Stoffe zurückzuhalten, aus dem Stoffkreislauf zu entfernen oder abzubauen, laufen im Boden verschiedene Prozesse ab. Die Böden wirken hier in

mechanischer Art und Weise als Filter, in physio-chemischer Art und Weise als Puffer von Säure-Einträgen und in biologischer Art und Weise zum Abbau von organischen Stoffen. Böden weisen eine enorm hohe Leistung als Filter und Puffer für Schadstoffe auf. Sie können Schadstoffe entfernen, zurückhalten, abbauen und Säuren neutralisieren (BMLFUW 2013).

1.2.3 Bodensystematik

Böden werden durch ihren unterschiedlichen Wassereinfluss in Ordnungen eingeteilt. Es gibt Terrestrische Böden und Hydromorphe Böden.

➤ **Terrestrische Böden (= Landböden)**

Die Entstehung dieser Böden ist nicht besonders vom Wassereinfluss abhängig. Die Verlagerung von Wasser und Stoffen geschieht in diesen Böden von oben nach unten, also oft durch Niederschläge. Die meisten österreichischen Böden gehören zur Ordnung der Terrestrischen Böden, wie zum Beispiel die Braunerden, Podsole, Rendzinen, Ranker und Tschernoseme.

➤ **Hydromorphe Böden (= Stauwasser- und Grundwasserböden)**

Die Entstehung hydromorpher Böden ist besonders vom Wassereinfluss abhängig und ihre Erscheinung wird durch Wasser geformt. Es können reduktomorphe (in sauerstoffarmen oder sauerstofffreien Böden) oder redoximorphe (in Böden mit wechselnden Sauerstoffverhältnissen) Merkmale auftreten. Diese können aber auch teilweise oder ganz fehlen. Dies kann von den Grundwasserschwankungen und von abwechselnden Überflutungen und Überstauungen ausgehen sowie auch von den chemischen Inhaltsstoffen des Wassers.

Stauwassergeprägte Böden, auch Stauwasser- oder Staunässeböden genannt, zeigen durch zeitweises oberflächennah aufgestautes Niederschlagswasser und Schmelzwasser, redoximorphe Merkmale. Auf diesen Böden erfolgt ein stetiger Wechsel von Vernässung und Austrocknung. In Österreich werden diese Böden Pseudogleye genannt.

Zu grundwassergeprägten Böden werden jene Böden gezählt, welche fast immer unter Grundwassereinfluss stehen. Dazu gehören Unterwasserböden, Moore und Anmoore

sowie periodisch von Grund- und Überflutungswasser beeinflusste Auböden. Gleye und Salzböden gehören auch zu dieser Bodengruppe, da an deren Oberboden lange Zeit aerobe Verhältnisse herrschen und deren Unterboden lange Zeit unter Grundwasserbeeinflussung stehen (Nestroy et al. 2011).

1.3 Agrarstruktur

1.3.1 Land- und forstwirtschaftliche Betriebe

Laut dem Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus BMNT (2019) gab es nach der letzten Agrarstrukturerhebung im Jahr 2016, in Österreich 162.018 land- und forstwirtschaftliche Betriebe. Bei der letzten Agrarstrukturerhebung im Jahr 2010, wurden noch 173.317 Betriebe erhoben. Das bedeutet einen Rückgang von ca. 6,5%. Der Betriebsrückgang geht weiter, verlangsamt sich aber seit den letzten Jahren. In der Steiermark gingen die Betriebszahlen zwischen 2010 und 2016 um ca. 7,5%, von 39.388 auf 36.534 Betriebe, zurück. Die Landwirtschaft in Österreich ist im weltweiten Vergleich eher kleinstrukturiert, nichtsdestotrotz werden aber auch die Betriebe in Österreich immer größer. 1951 bewirtschaftete ein durchschnittlicher Betrieb eine landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF) von 9,6 ha, im Jahr 2016 jedoch schon eine Fläche von 19,8 ha. Ein Aufwärtstrend ist ebenfalls in der Tierhaltung zu beobachten. Im Jahr 1995 wurden im Durchschnitt 20 Rinder auf einem land- und forstwirtschaftlichen Betrieb gehalten. Heute sind es rund 32 Rinder pro Betrieb. Im Bereich der Schweinehaltung fand seit 1995 sogar eine Verdreifachung der Tierzahlen pro Betrieb, von 35 auf 109 Tiere, statt. Auch bei der Schaf- und Ziegenhaltung stiegen die Tierzahlen pro Betrieb.

Von den 162.018 land- und forstwirtschaftlichen Betrieben im Jahr 2016 wurden 36% (ca. 58.300 Betriebe) im Haupterwerb und 55% (ca. 89.100 Betriebe) im Nebenerwerb geführt. Weiters wurden 4% (ca. 6500 Betriebe) als Personengemeinschaften und 5% (ca. 8100 Betriebe) als juristische Personen geführt. Die land- und forstwirtschaftlichen Betriebe haben unterschiedliche Schwerpunkte. Bei 57.997 Betrieben ist der Betriebsschwerpunkt die Haltung von Rindern, Schafen oder Ziegen. 49.913 Betriebe haben ihren Schwerpunkt in der Forstwirtschaft und 20.841 Betriebe werden als Marktfruchtbetriebe eingeteilt (BMNT 2019).

Landwirtschaft – damals und heute

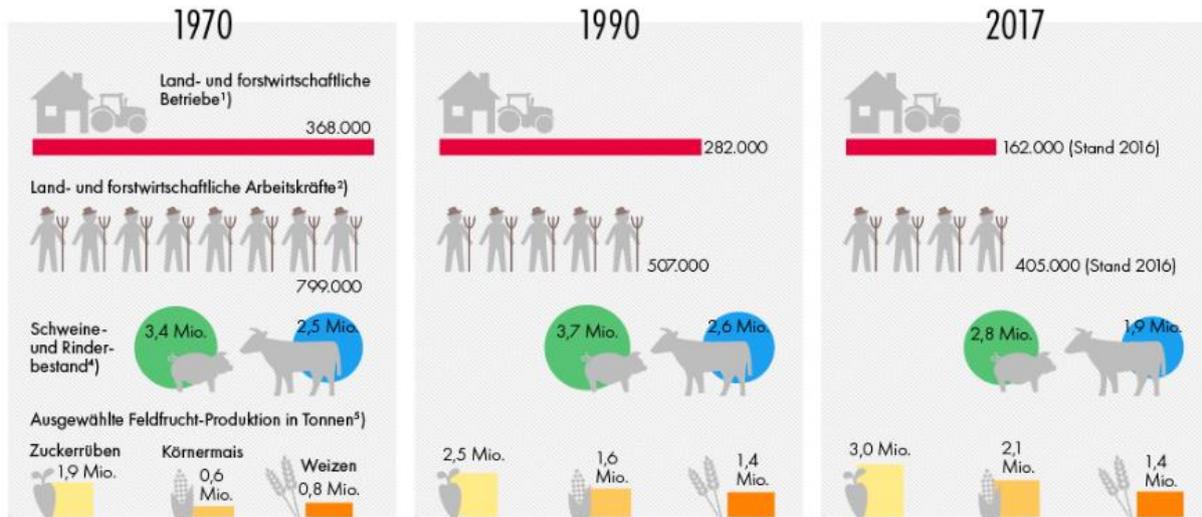


Abbildung 1: Veränderung der Landwirtschaft zwischen 1970 und 2017 (Statistik Austria o.J.)

1.3.2 Das Grünland

„Grünland erfüllt neben der Produktion von wertvollem Grundfutter vor allem bei extensiver Nutzung eine Vielzahl an ökologischen Funktionen und hat eine ganz besondere Bedeutung für die Landschafts-, Habitat- und Artenvielfalt in Österreich [...] (BMNT 2019).“

Das Grünland ist vielfältig im Hinblick auf die verschiedenen Nutzungstypen sowie Pflanzengesellschaften. Es ist die flächenmäßig wichtigste Kulturart und somit die Grundlage für eine offene und gut gepflegte Kulturlandschaft. Laut INVEKOS-Daten besitzt Österreich eine Dauergrünlandfläche von 1,19 Mio. ha. 46% davon ist intensiv genutztes Grünland wie Dauerweiden, Mähweiden und -wiesen mit drei Nutzungen pro Jahr und mehr. 54% der österreichischen Grünlandflächen werden extensiv genutzt. Dazu zählen auch Almfutterflächen und Bergmähder. Einen weiteren wichtigen Beitrag zur Grundfutterproduktion leisten die 148.500 ha Feldfutterflächen, auf denen Leguminosen und Gräser wachsen (BMNT 2019).

Laut Buchgraber und Schaumberger (2006) sind 55% aller Futterflächen in Österreich Wirtschaftsgrünland, also Kulturweiden und mehrmähdige Wiesen. Diese 55% liefern jedoch 75% des jährlichen Futteraufkommens für raufutterverzehrende Tiere in

Österreich. Extensives Grünland liefert rund 10% des jährlichen Futteraufkommens. Dieser Anteil wird in Zukunft weiter sinken, womit auch naturschutzfachlich wertvolles Grünland weiter verloren gehen wird. Der Feldfutterbau liefert rund 15% des jährlichen Grünlandertrages, wobei der Feldfutterbau mit Kleegräsern, Wechselwiesen, Luzerne- und Rotkleebeständen in letzter Zeit wieder vermehrt durchgeführt wird. Vor allem in von Trockenheit betroffenen Grünlandregionen, wird der kurz- und mittelfristige Anbau von Gräser-, Luzerne- und Kleearten zunehmen, um hohe Erträge und Qualitäten zu erzielen.

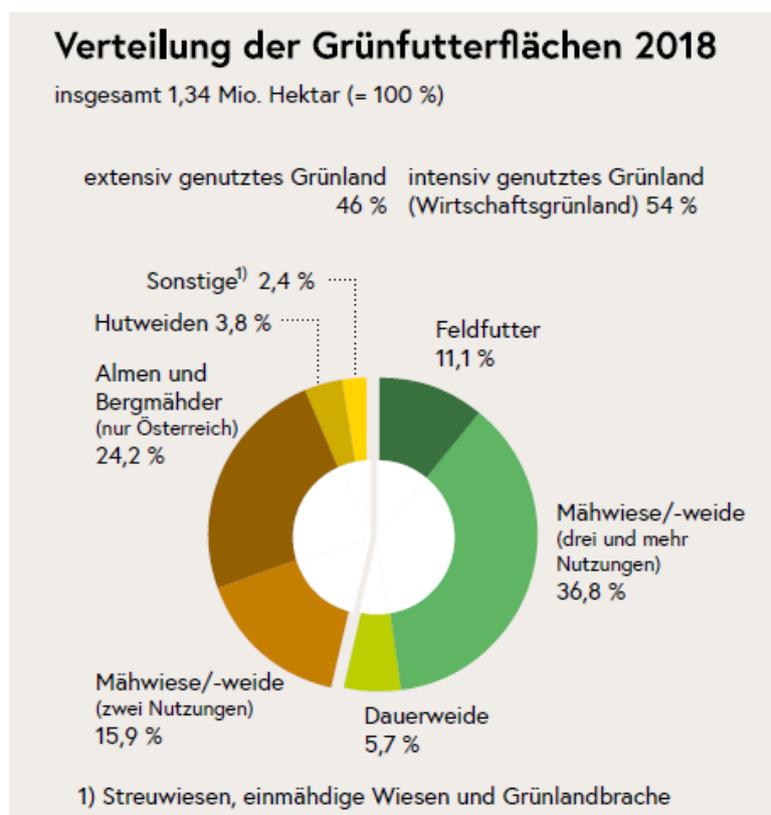


Abbildung 2: Verteilung der Grünfutterflächen in Österreich 2018 (BMNT 2019)

2. AKTUELLER FORSCHUNGSSTAND

2.1 Bodenfruchtbarkeit, Bodenstruktur, Bodenluft und Bodenporen

Ein fruchtbarer Boden ist das Fundament für nachhaltige Erträge und gesunde Pflanzen. Vor allem eine hohe Aktivität des Bodenlebens beeinflusst die Bodenfruchtbarkeit auf positive Weise. Nachhaltige Bodenfruchtbarkeit entsteht durch eine Kombination und Interaktion von Bodenleben, Humushaushalt, Krümelstruktur und Pflanzenwurzeln. Diese Elemente stehen in einer engen Wechselwirkung zueinander und bilden die Säulen der Bodenfruchtbarkeit im System von Boden und Pflanze. Grünlandbewirtschaftungsmaßnahmen sollten so durchgeführt werden, dass das Bodenleben aktiviert, die Krümelstruktur gefördert und eine intensive und vielfältige Durchwurzelung ermöglicht wird. Die Bodenstruktur oder das Bodengefüge, ist die räumliche Anordnung von Bodenteilchen in einem Boden. Sie lässt sich durch intensive oder extensive Bewirtschaftung verändern und beeinflusst dadurch die Struktur im Oberboden auf positive oder negative Weise. Die vorteilhafteste Strukturform im Oberboden ist die Krümelstruktur. Sie kommt auf nicht verdichteten Grünlandböden vor und entspricht dem Idealzustand im Hinblick auf die Aufnahme, Speicherung und Versickerung von Niederschlags- und Schmelzwasser. Ebenfalls ermöglicht die Krümelstruktur eine sehr gute Bodendurchlüftung und Durchwurzelung (BIO AUSTRIA 2009).

Das Vorhandensein von ausreichend Bodenluft ist essenziell für die Atmung und somit auch für die Energiegewinnung von Bodenorganismen. Grünlandböden sollten genügend luftgefüllte Grobporen mit ausreichend Stabilität und Häufigkeit besitzen, da Bodentiere, Pflanzenwurzeln und die meisten Bodenmikroorganismen Sauerstoff für die aerobe Atmung benötigen. Diese luftgefüllten Grobporen sind für den Gastransport zwischen Boden und Atmosphäre hauptverantwortlich (Bohner et al. 2019).

Die Bodenporen sind ein wichtiges Element im Wasser- und Lufthaushalt im Boden. Die Primärporen sind körnungsbedingte Poren, ihre Größe wird durch die Form und Anordnung mineralischer Bodenteilchen determiniert. Die Sekundärporen sind größer als die Primärporen und entstehen durch Schrumpfungsrisse, Wurzelwachstum, Lockerungs- und Wühltätigkeiten von Tieren sowie durch Bearbeitungsmaßnahmen. Sekundärporen haben durch ihr häufiges Vorkommen sowie durch ihre Größe und

Länge, einen wichtigen Einfluss auf den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens, sie können aber auch leichter zerstört werden als die Primärporen. Ihr Vorkommen nimmt in tieferen Bodenschichten ab, was sich auch auf die Wasserleitfähigkeit auswirken kann. Weiters können Bodenporen in Fein-, Mittel- und Grobporen eingeteilt werden. In den Feinporen ist das Bodenwasser so fest gebunden, dass es in der Regel für Pflanzen nicht verfügbar ist. Die Feinporen sind auch für Mikroorganismen nicht zugänglich. Die Mittelporen enthalten das pflanzenverfügbare Wasser, aber auch Pilzmyzele und Bakterien können darin leben. Die Grobporen sind meist frei von Wasser und haben eine dominierende Aufgabe für die Belüftung des Bodens. Auch Wurzelhaare brauchen die Grobporen, um wachsen zu können (Amelung et al. 2018).

Der Erhalt der vielfältigen Bodenfunktionen ist essenziell. Gerade deswegen ist es wichtig Bodenverdichtungen auf Grünlandböden zu vermeiden, da dadurch die natürliche Ertragsfähigkeit und Bodenfruchtbarkeit zerstört werden kann.

2.2 Bodenverdichtung

Laut Amelung et al. (2018) besteht der Boden aus drei Phasen, der organischen oder mineralischen Festsubstanz, dem Bodenwasser und der Bodenluft. Unter Bodenverdichtung versteht man die Veränderung dieses Dreiphasensystems des Bodens, durch Scherung. Dadurch wird der Porenanteil des Bodens, welcher mit Wasser und Luft gefüllt ist, vermindert. In weiterer Folge sinkt auch das Gesamtporenvolumen des Bodens und das Volumen der festen Bodensubstanz nimmt zu. Der erwähnte Schervorgang kommt in der Land- und Forstwirtschaft häufig vor, zum Beispiel durch Schlupf an angetriebenen Rädern von Landmaschinen sowie durch Tiere, welche den Boden durch Tritt beanspruchen. Dies kann bei feuchten Bodenbedingungen zu erheblichen Strukturzerstörungen führen.

Wenn das Bodenvolumen, und damit auch die Porosität des Bodens, langfristig herabgesetzt wird, kann man laut Hammel (1993) von einer Bodenverdichtung sprechen.

Jene Bodenverdichtungen, welche durch die Veränderung des Bodengefüges einen negativen Einfluss auf die Produktionsfunktion des Bodens haben, können als Bodenschadverdichtungen bezeichnet werden. Vor allem, wenn die Bodeninfiltration,

Bodenstoffverlagerung sowie der Lebensraum von Bodentieren beeinflusst wird. Folgende Faktoren beeinflussen Bodenschadverdichtungen:

- Verwendete Maschinen bzw. Tierarten
- Standortfaktoren wie die vorherrschende Bodenfeuchte oder Bodenart
- Befahrungszeitpunkt oder Beweidungszeitpunkt
- Verfahren der Bodenbearbeitung bzw. der Beweidung (Boxberger und Moitzi 2007).

Kräfte durch Landmaschinenräder oder Weidetiere wirken am Boden als Bodendruck. Die Gegenkraft dazu wird im Boden durch Reibungsspannung zwischen Bodenpartikeln aber auch durch die Wasserspannung im Bodenwasser erzeugt. Luft und Wasser, welche während eines Belastungsimpulses nicht aus den Bodenporen gedrückt werden, bringen eine gewisse Gegenkraft auf. Wenn diese Gegenkraft des Bodens zu gering ist, verformt der Bodendruck den Boden. Diese Zerstörung von luft- und wasserführenden Grobporen geht mit einer Erhöhung der Bodentragfähigkeit einher. Die Art und Höhe der Belastung durch Landmaschinen oder Weidetiere sowie die Tragfähigkeit des Bodens, beeinflussen, ob es zu einer Verformung des Bodens kommt und wo diese stattfindet (Brandhuber et al. 2010).

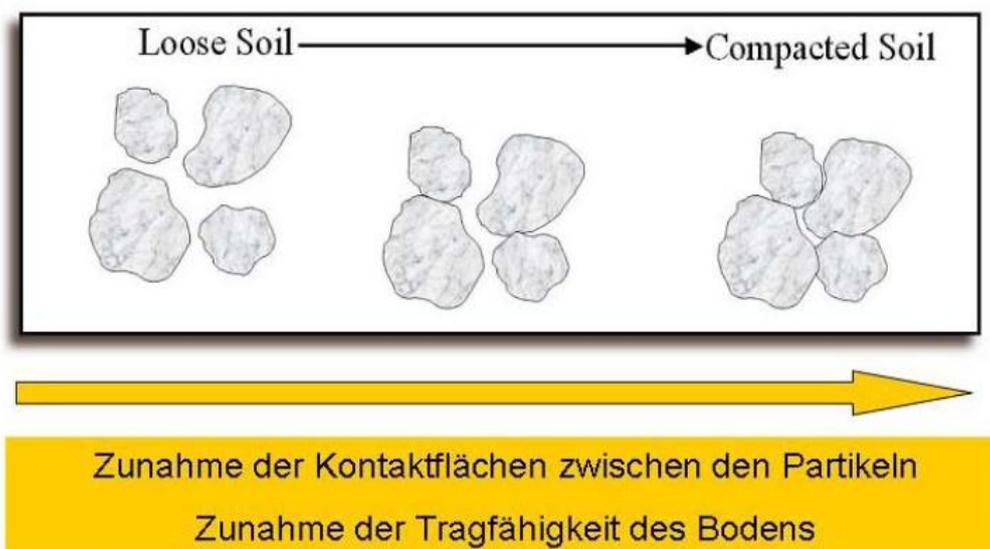


Abbildung 3: Auswirkung von Bodenverdichtung auf Bodenpartikel (Boxberger und Moitzi 2007).

Laut Boxberger und Moitzi (2007) wird die Tragfähigkeit des Bodens durch die Bodenfeuchte, die Bodenart und den Bodenlockerungsgrad determiniert. Bei Wassersättigung (Feldkapazität) ist ein tonreicher Boden weniger tragfähig als ein leichter Boden. Nach Brandhuber et al. (2010) ist die Bodenfeuchte der Hauptfaktor,

der die Bodentragfähigkeit beeinflusst. Das Bodenwasser wirkt als Gleitmittel bei der Verformung der Bodenpartikel. Durch Erhöhung der Bodenfeuchte sinkt der Reibungswiderstand der Bodenpartikel und die Tragfähigkeit der Bodenstruktur wird negativ beeinflusst. Nach Amelung et al. (2018) verringert sich die Festigkeit eines Bodens, wenn bei wassergesättigten Bodenverhältnissen Reifen oder Hufe von Tieren den Boden schierend verformen. Durch dieses Einsinken werden der Boden und das Porensystem darin, homogenisiert und verknetet.

Laut Rücknagel (2014) beeinflussen Bodenverdichtungen alle essenziellen Bodenfunktionen sowie die Lebensgrundlage für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen:

- Verdichtete Bodengefüge verringern die Wasserinfiltrationsleistung und steigern Oberflächenabfluss und Erosion.
- Bodentiere finden in verdichteten Böden nur beschränkte Lebensbedingungen vor.
- Die Entwicklung von Pflanzenwurzeln verringert und verzögert sich, dies kann mit deutlichen Ertragseinbußen einher gehen.
- Vor allem in Jahren mit Trocken- oder Nässestress können Bodenschadverdichtungen den Ertrag beeinflussen. Somit kann das natürliche Ertragspotenzial der Böden nicht vollständig ausgenutzt werden.
- Die Effizienz und Wirksamkeit eingesetzter Betriebsmittel, wie Dünger und Pflanzenschutzmittel, kann beeinflusst werden. Dies kann ökologische und ökonomische Probleme verursachen.

2.3 Effekte des Bodendruckes

Laut Amelung et al. (2018) erzeugen Trittlasten von Menschen und Tieren sowie Fahrlasten Spannungen, welche den Bodenkörper belasten. Je größer diese Lasten werden, desto mehr Kontaktpunkte zwischen den Bodenkörnern müssen gegeneinander wirken, um die benötigte Tragkraft aufzubauen. Entweder wird die einwirkende Last auf einen größeren Raum im Boden verteilt oder lokale Bodenverdichtungen erhöhen den Widerstand und somit die Tragkraft des Bodens. Druckzwiebeln können die Verteilung sowie den Abbau einer Spannung im Boden, unter einer Last verdeutlichen. Diese Linien gleichen Druckes zeigen die Stabilität

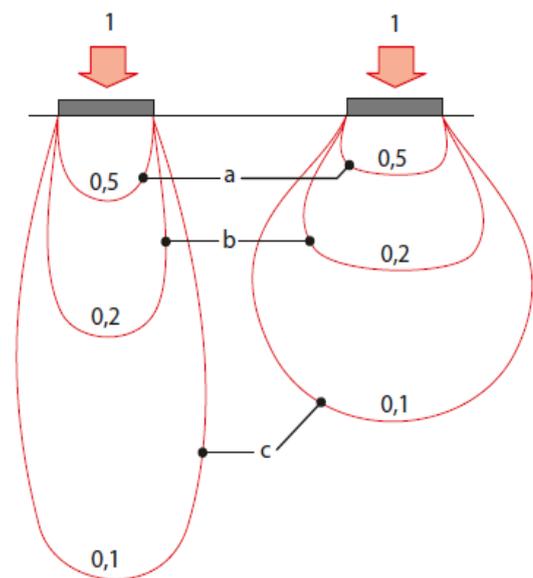


Abbildung 4: Druckzwiebeln: Verteilung von Spannungen im Boden bei weichen (links) und harten (rechts) Bodenverhältnissen (Amelung et al. 2018).

einer Bodenschicht an. Wie in *Abbildung 4* ersichtlich, reichen die Spannungen bei weichen Böden tiefer und werden bei harten Böden näher an der Last gebündelt.

Die Beanspruchung des Bodens nimmt mit niedrigem Kontaktflächendruck ab. Der Kontaktflächendruck wird umso kleiner, je größer die Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden ist. Das bedeutet, dass mit der Wahl des bestmöglichen Reifens, in Verbindung mit einem niedrigen Reifeninnendruck, die Aufstandsfläche eines Reifens erhöht werden kann. Wie in *Abbildung 5* ersichtlich, wird dadurch der Bodendruck auf eine größere Fläche verteilt und die Bodenbelastung wird verringert (Brandhuber et al. 2010). In *Abbildung 6* kann man erkennen, dass durch eine große Aufstandsfläche der Reifen, der mittlere Kontaktflächendruck relativ geringgehalten werden kann. Ebenfalls fällt auf, dass Rinder einen sehr hohen mittleren Kontaktflächendruck erzeugen, da sie ihr Gewicht nur auf eine sehr kleine Aufstandsfläche verteilen können. Dies kann punktuell zu sehr hohen Bodenbelastungen führen, welche aber eher in höheren Bodenschichten zu Verdichtungen beitragen (Boxberger und Moitzi 2007).

Breiter Reifen – Schmäler Reifen

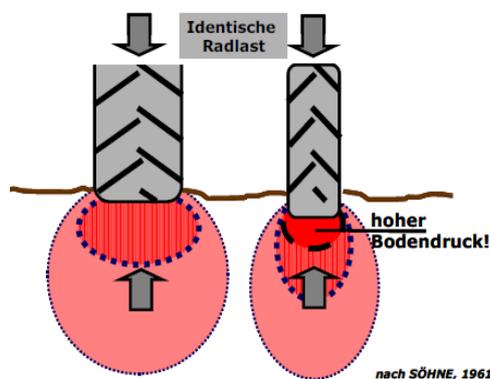


Abbildung 5: Breitere Reifen verringern den Bodendruck und schmalere Reifen erhöhen den Bodendruck (Brandhuber et al. 2010).

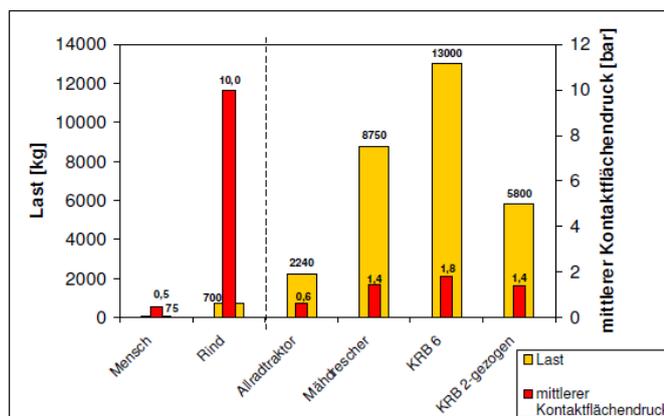


Abbildung 6: Mittlerer Kontaktflächendruck im Vergleich zwischen Menschen, Tieren und verschiedenen Landmaschinen (KRB=Köpfrodebunker für die Zuckerrübenerte) (Boxberger und Moitzi 2007).

2.3.1 Auswirkung von Bodenverdichtungen auf Grünlandböden

Bodenverdichtungen können umfangreiche Auswirkungen auf den Boden und seine Funktionen haben. Vor allem der Gas- und Wasserhaushalt und dessen Ausgleichs- und Regelungsfunktionen können beeinträchtigt werden. Bodenverdichtungen können das Porenvolumen des Bodens verringern, und dadurch zu Sauerstoffmangel, Vernässung und Wasserstau im Boden führen. Die Infiltration von Wasser in den Boden kann verhindert werden, was wiederum mit Oberflächenabfluss und Erosion einhergeht. Durch Bodenverdichtung kann die biologische Aktivität des Bodens und somit das Bodenleben beeinträchtigt werden. Aufgrund von Beeinträchtigungen des Wurzelwachstums kann auch der Ertrag von Grünlandbeständen negativ beeinflusst werden (Lebert et al. 2004).

Ein Dauergrünlandboden hat einen sehr hohen Wurzelmasseanteil. Mehr als 75% der Pflanzenwurzeln befinden sich in den obersten 10cm des Bodens. Diese starke Durchwurzelung fördert das Bodenleben, da durch das Dickenwachstum der Wurzeln die Entstehung von Grobporen gefördert wird. Diese Grobporen schaffen Lebensräume und erhöhen somit das Nahrungsangebot für die Bodenorganismen. Lebende sowie tote Wurzeln von Pflanzen sind die wichtigste Energie- und Kohlenstoffquelle für die Bodenorganismen (Bohner et al. 2019). Auch Stahl et al. (2009) konnte eine starke Verminderung der Durchwurzelung von der Oberkrume zur Unterkrume im Grünland feststellen. Seine Untersuchungen zeigten einen Rückgang der Durchwurzelung, in einer Tiefe von 5cm, durch das Befahren des Grünlandbodens.

Ist ein Boden verdichtet verringert sich sein Porenraum. Im Oberboden entsteht eine Plattenstruktur, welche den meisten Bodenorganismen keinen passenden Lebensraum mehr bietet. Um Bodenverdichtung auf Dauergrünlandstandorten zu reduzieren, sollten entweder die Radlasten von Traktoren und Anbaugeräten reduziert oder die Befahrungshäufigkeit der Flächen verringert werden (Bohner et al. 2019).

Laut Stahl et al. (2009) kann in der Oberkrume von Grünlandböden hoher Bodendruck durch die Belastung von Maschinen und Geräten entstehen. Im Vergleich zum Bodendruck auf Ackerflächen breitet sich der Bodendruck auf Grünlandflächen nicht so weit in die Unterkrume aus. Dies könnte damit zusammenhängen, dass Grünlandböden viel intensiver durchwurzelt sind als Ackerböden.

Die Intensität der Bodenverdichtung im Dauergrünland kann unterschiedlich sein. Laut Bohner et al. (2017) gibt es daher auf extensiv genutzten Mähwiesen eher keine nutzungsbedingten Bodenverdichtungsprobleme. Auf, über Jahre hinweg, intensiv genutzten Mähwiesen, mit mehr als drei Nutzungen pro Jahr, können Grünlandböden jedoch schon mäßig überverdichtet sein.

Es laufen auf Dauergrünlandböden jedoch auch natürliche Bodenlockerungsprozesse ab. Natürliche Bodenlockerung geschieht aufgrund wühlender und grabender Bodentiere. Diese tierischen Lockerungstätigkeiten nehmen aber mit steigender Bodentiefe ab, daher ist eine natürliche Bodenlockerung von verdichteten Unterböden eher minimal (Bohner et al. 2019).

Laut Diepolder et al. (2009) konnten auf häufig befahrenen Grünlandstandorten geringere Trockenmasse- sowie Energie- und Rohproteinerträge des Erntegutes gemessen werden, als auf nicht befahrenen Grünlandstandorten. Es wurde jedoch angemerkt, dass dieser Ertragsrückgang auch durch eine mechanische Schädigung der oberirdischen Pflanzenmasse sowie der Wurzelmasse entstehen könnte. Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass es durch das Befahren von Grünlandstandorten zu einer nachteiligen Entwicklung im System Boden-Pflanze kommt.

Nach Lebert et al. (2004) können Bodenverdichtungen auch Stoffumsetzungsprozesse in Gang bringen, welche die Auswaschung und die Ausgasung klimarelevanter Gase bewirken können.

Es besteht laut Diepolder et al. (2009) eine Wahrscheinlichkeit, dass die unterschiedlich starken Bodenbelastungen des Grünlandes deutliche Auswirkungen auf die Regenwurmpopulationen im Boden haben. Nach ersten Untersuchungen war sowohl die Biomasse als auch die Individuenzahl von Regenwürmern auf dem unbefahrenen Grünland höher als auf dem befahrenen.

2.3.2 Bodenverdichtungen durch Weidetiere

Die Pflanzenzusammensetzung auf Wirtschaftsweiden ist aufgrund unterschiedlicher Stressfaktoren anders als auf Mähwiesen. Weidepflanzen werden häufig und kontinuierlich verbissen, durch den Tritt von Hufen mechanisch verletzt sowie durch Bodenverdichtungen beeinträchtigt. Durch den regelmäßigen Verbiss bleibt wenig assimilationsfähiges Gewebe übrig, wodurch die Wurzelmasse geringer wird und sich auch die Tiefe der Bewurzelung verringert. Gegenüber Trockenheit und Dürre sind diese gering bewurzelten Weidepflanzen ebenfalls anfälliger (Wilmanns 1998).

Laut Bohner et al. (2019) kann durch diese flache Bewurzelung und der damit einhergehenden Verringerung des wurzelbürtigen Nahrungsangebotes, auch das Bodenleben negativ beeinflusst werden, da es in weiterer Folge keine Nahrung mehr vorfindet. Um diesen Effekt und, damit einhergehend, die Weideintensität zu verringern, könnte entweder auf längere Weideruhephasen gesetzt oder eine Schnittnutzung in die Weideperiode integriert werden. Ebenfalls würde eine Beweidung mit leichteren Tieren einer zu starken Bodenverdichtung entgegenwirken. Laut Lebert et al. (2004) kann durch Bodenverdichtung das Wurzelwachstum auf dieselbe Weise eingeschränkt werden, wie durch Sauerstoffmangel im Boden. In beiden Fällen kann das Pflanzenwachstum beeinträchtigt werden. Laut Amelung et al. (2018) bilden Gräser von Intensivweiden in den obersten 10-20cm ihre Hauptwurzelmasse aus. Auf Intensivwiesen wird der Hauptwurzelraum jedoch bis in einer Tiefe von 50cm gebildet.

Laut Bohner et al. (2017) weisen intensiv genutzte Weideböden einen höheren Verdichtungsgrad auf, als intensiv genutzte Wiesenböden. Durch intensive Beweidung wird vor allem der Oberboden in einer Tiefe zwischen 5-15cm verdichtet. Nach ersten Untersuchungen konnten die höchsten Bodenverdichtungen auf intensiv genutzten Rinderweiden festgestellt werden. Auch Amelung et al. (2018) merkt an, dass auf

Grünlandflächen, die nicht beweidet werden, ein stabiles Krümelgefüge entstehen kann, da hier die ersten 7cm des Oberbodens sehr intensiv durchwurzelt werden. Auf intensiven Weideflächen kann sich Beweidung bei zu nassen Bodenverhältnissen jedoch negativ auswirken. Der Tritteinfluss der Tiere kann dieses, für den Boden positive Krümelgefüge, zerstören. Laut Buchgraber (2018) führt vor allem das Beweiden bei zu feuchten Bodenverhältnissen, zu Bodenverdichtungen. Ebenfalls fallen dadurch wenig trittfeste Pflanzen aus, was wiederum zu einer Ausbreitung von Lücken besiedelnder Pflanzenarten führt.

Vor allem Pferdeweiden, die das ganze Jahr über mit Pferden bestoßen werden, können ohne ausreichende Ruhepausen sowie ohne andauernde Pflegemaßnahmen nicht in gutem Zustand gehalten werden. Durch intensive Beweidung verändert sich der Pflanzenbestand hier rasch zum Schlechten. Der intensive Tritt des Pferdes sowie der scharfe und tiefe Verbiss, beeinflusst die Grasnarbe sehr negativ (Grone 1991). Die schnellen und intensiven Bewegungen des schweren Tieres Pferd, können auf Pferdeweiden eine große Bodenverdichtung verursachen. Es wird daher in dieser Arbeit versucht herauszufinden, wie sich der Pferdtritt auf den Boden auswirkt. Auch laut Buchgraber (2018) wird die Grasnarbe und der Boden bei der Beweidung mit Pferden sehr stark strapaziert. Vor allem der starke Bewegungsdrang, der harte Huf sowie das häufige und zu tiefe Abbeißen des Pflanzenbestandes kann zu Narbenschäden führen.

2.4 Lagerungsdichte

Das Verhältnis zwischen Masse des Bodens und Volumen des Bodens wird als Bodendichte bezeichnet. Die Lagerungsdichte ist keine Materialkonstante, sondern kennzeichnet einen veränderlichen Zustand des Bodengefüges (Hartge und Horn 2009).

Laut Lebert et al. (2004) muss zur Lagerungsdichtebestimmung eine Bodenprobe mit einem einheitlichen Bodenvolumen (zum Beispiel der Bodinhalt eines 100cm³ Stechzylinders) gewogen werden. Bei der Wägung darf die Bodenprobe jedoch kein freies Wasser mehr enthalten, weshalb sie zuerst mindestens 16 Stunden bei mindestens 105° C getrocknet werden muss.

Laut Amelung et al. (2018) kann bei einer getrockneten Bodenprobe auch direkt auf die Lagerungsdichte geschlossen werden, wenn man die Masse des getrockneten Bodens auf das Gesamtvolumen bezieht.

$$pB = \frac{mf}{Vg}$$

Abbildung 7: Formel zur Lagerungsdichteberechnung nach Amelung et al. (2018)

Die *Abbildung 7* zeigt, dass die bei 105° C getrocknete Masse der Festsubstanz (mf) in g, bezogen auf das Gesamtvolumen (Vg) in cm^3 , die Lagerungsdichte (pB) in g/cm^3 ergibt.

Laut Amelung et al. (2018) ist das Porenvolumen und damit auch die Lagerungsdichte von der Körnung und Kornform der Mineralböden abhängig, aber auch der Gehalt an organischer Substanz sowie die Bodenentwicklung spielen eine Rolle. Die Unterschiede der einzelnen Bodenarten kann man in *Tabelle 1* ablesen. Es lässt sich erkennen, dass mit steigender Lagerungsdichte das Porenvolumen abnimmt.

Tabelle 1: Schwankungsbreiten der Lagerungsdichte (g/cm^3) und Porenvolumen (%) bei unterschiedlichen Bodenarten (Amelung et al. 2018)

| | Lagerungsdichte in g/cm^3 | Porenvolumen in % |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| Sande | 1.16 – 1.70 | 56-36 |
| Schluffe | 1.17 – 1.63 | 56-38 |
| Lehme | 1.20 – 2.00 | 55-30 |
| Tone | 0.93 – 1.72 | 65-35 |

Tabelle 2 zeigt eine Einteilung der Lagerungsdichte von Mineralböden. Lagerungsdichten von $< 1 g/cm^3$ werden als „extrem gering“ bezeichnet und Lagerungsdichten $\geq 1.8 g/cm^3$ werden als „sehr hoch“ bezeichnet.

Tabelle 2: Einteilung der Lagerungsdichte von Mineralböden in g/cm³ (AD-HOC-AG BODEN 2005).

| pB in g/cm³ | Stufe |
|-------------------------------|---------------|
| <1.0 | extrem gering |
| 1.0 – 1.2 | sehr gering |
| 1.2 – 1.4 | gering |
| 1.4 – 1.6 | mittel |
| 1.6 – 1.8 | hoch |
| ≥ 1.8 | sehr hoch |

2.5 Eindringwiderstand

Der Widerstand des Bodens gegen Penetrationskräfte, kann durch den Eindringwiderstand dargestellt werden. Dabei wird die Kraft gemessen, welche auf eine Oberflächeneinheit wirkt. Diese Kraft wird mit den Einheiten (N/m²) oder (MPa) wiedergegeben (EIJKELKAMP 2013).

Laut Hartge und Horn (2009) ist der Eindringwiderstand eine unspezifische, sich ständig ändernde Eigenschaft, da der Widerstand des Bodens gegen eine Messsonde von verschiedenen Umständen beeinflusst wird. Die wichtigsten Faktoren, welche die Eindringwiderstandsmessung beeinflussen, sind das Porenvolumen, der Wassergehalt und der Scherwiderstand des Bodens. Auch Lebert et al. (2004) konnte feststellen, dass der Bodenwassergehalt, die Porengröße sowie die Korngrößenverteilung den Eindringwiderstand beeinflussen. Um daher die Eindringwiderstandsmessungen der Untersuchungsflächen so genau wie möglich durchzuführen, wurden die Messungen innerhalb kurzer Zeit und bei ähnlichen Bodenbedingungen durchgeführt.

Laut Lebert et al. (2004) und EIJKELKAMP (2013) kann durch die Messung des Eindringwiderstandes auf Bodenverdichtungen geschlossen werden, da Bodenverdichtungen Einfluss auf den Spannungszustand des Bodens haben.

Der Eindringwiderstand beeinflusst das Wurzelwachstum von Pflanzen und somit auch die Wasser- und Nährstoffaufnahme durch die Wurzeln. Je kleiner der Eindringwiderstand des Bodens ist, desto leichter und tiefer kann der Boden durchwurzelt werden. Aber auch Bodenart, Bodendichte, Wurzelform,

Nährstoffverteilung und Witterung beeinflussen die Durchwurzelung des Bodens (Amelung et al. 2018). Laut Blume et al. (2011) wird die Durchwurzelbarkeit des Bodens auch vom Porenanteil, der Lagerungsdichte, der Bodenaggregatform und dem Steingehalt beeinflusst. Ein lockeres Krümelgefüge im Boden ist daher die am besten durchwurzelbare Aggregatform. Nach EIJKELKAMP (2013) kann eine wachsende Pflanzenwurzel eine Kraft von ca. 1 MPa auf den Boden ausüben. Die Pflanzenwurzeln nutzen dafür im Boden bestehende Grobporen und Risse und können auch an Steinen vorbeiwachsen. Diese Fähigkeiten besitzen Messsonden für die Eindringwiderstandsmessung jedoch nicht, weswegen die Grenze des Wurzelwachstums bei den Messungen meist höher als bei 1 MPa liegt.

2.6 Pflanzenzusammensetzung im Grünland

Laut Ellmayer (1996) gibt es eine sehr starke Korrelation zwischen Artenreichtum von Wiesengesellschaften und deren Bewirtschaftungsintensität. An vergleichbaren Standorten sind intensiv genutzte Wiesen artenärmer als extensiv genutzte Wiesen, da einige wenige Arten in intensiven Wiesen über die restlichen Arten dominieren. In extensiven Wiesen wiederum kommen sehr viele Arten vor, aber keine von ihnen in einer großen Anzahl.

Es gibt in der freien Natur keine Reinkulturen, sondern nur Lebensgemeinschaften, die sich einen Lebensraum teilen, wie es zum Beispiel bei einem naturnahen Grünlandbestand der Fall ist. Es gibt daher auch keine Organismen, Individuen, Populationen und Arten, welche solitär in freier Natur leben. Kein Organismus kommt ohne fördernde oder hemmende Beziehungen zu anderen Organismen aus. Diese Interaktionen werden jedoch auch von äußeren Faktoren, wie der Umwelt, beeinflusst (Wilmanns 1998).

Durch die unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen und Nutzungshäufigkeiten haben Pflanzenbestände im Dauergrünland eine hohe Vielfalt an Vegetationstypen und Pflanzenarten. Dauergrünlandflächen sind dadurch aus Sicht des Naturschutzes ein wichtiger Bestandteil in der Kulturlandschaft. Die verschiedenen Pflanzengesellschaften und deren individuelle Artenzusammensetzung sind an spezifische Umweltbedingungen gebunden. Daher können Pflanzengesellschaften

wertvolle Informationen über Standort, Ertragspotenzial und Nutzungsmöglichkeit preisgeben (Bohner et al. 2011).

Grünlandpflanzen stehen dauernd in Konkurrenz zueinander, vor allem die Konkurrenz um Licht spielt im Wirtschaftsgrünland eine große Rolle. Im extensiven Grünland ist es vor allem der Kampf um Wasser und Nährstoffe, welcher die Pflanzenzusammensetzung reguliert. Denn nur jene Arten, welche am besten an die herrschenden Standortbedingungen angepasst sind, können sich durchsetzen und somit andere Arten verdrängen. Durch intensivere oder extensivere Düngung und Schnittnutzung oder durch sich verändernde Klimabedingungen, kann die Konkurrenzkraft einzelner Arten gestärkt oder geschwächt werden. Dies wirkt sich wiederum auf den Pflanzenbestand aus, wo verstärkt jene Arten vorkommen, die mit den herrschenden Bedingungen am besten zurechtkommen (BIO AUSTRIA 2009).

Laut Buchgraber (2018) sollte der Grünlandbestand auf Dauerwiesen aus futterbaulicher Sicht zu 60% aus Gräsern und zu jeweils 20% aus Kräutern und Leguminosen bestehen. Bei Kulturweiden können die Gräser im Pflanzenbestand bis zu 80% ausmachen. Ebenso sollte der Anteil an giftigen, minderwertigen sowie schmarotzenden Pflanzenarten nur minimal sein.

2.7 Zeigerpflanzen

Die Vegetation und Artenzusammensetzung eines Grünlandstandortes ist abhängig von natürlichen Standorteigenschaften sowie von unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen. Jede Pflanzenart hat verschiedene Anforderungen an Faktoren wie Düngung, Nutzung und Bodenverhältnisse. Wenn einer oder mehrere dieser Faktoren verändert werden, reagieren darauf gewisse Pflanzenarten sehr empfindlich. Daher können diese Pflanzenarten als Bioindikatoren verwendet werden, um wertvolle Erkenntnisse über die vorherrschenden Bodenverhältnisse zu erhalten. Durch das Vorkommen oder Fehlen sowie durch die Zu- oder Abnahme von Zeigerpflanzen in einem Pflanzenbestand, kann auf verschiedene Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen geschlossen werden (Bohner und Starz 2011).

Laut Englisch und Karrer (2001) bestimmen biologische Faktoren der Pflanzen und die Konkurrenzsituation zu anderen Arten, das Vorkommen von Zeigerarten auf unterschiedlichen Standorten.

Um Rückschlüsse auf die, am Standort vorherrschenden Umweltbedingungen, zu bekommen, müssen laut Bohner (2015) entweder mehrere Arten mit demselben Zeigerwert vorhanden sein oder eine Zeigerart muss mit einer großer Individuenzahl und hohem Deckungsgrad auftreten.

Zeigerpflanzen können verschiedenste Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren anzeigen wie:

- „Nährstoffhaushalt (Nährstoffzeiger, Magerkeitszeiger)
- Säuregrad des Bodens (Säurezeiger, Carbonatzeiger)
- Bodenwasserhaushalt (Trockenheitszeiger, Wechselfeuchte-, Feuchte- und Nässezeiger)
- Wärmehaushalt (Wärmezeiger, Kältezeiger)
- Bodenstruktur (Bodenverdichtungszeiger)
- Nutzungsintensität (Übernutzungszeiger, Unternutzungszeiger)
- Vegetationsdeckungsgrad (Lückenbüßer)“ (Bohner und Starz 2011)

2.7.1 Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung

Bodenverdichtungs- und Übernutzungszeigerpflanzen können bei massenhaftem Auftreten einen mäßig bis gut mit Nährstoffen versorgten verdichteten Oberboden sowie übernutzten Pflanzenbestand anzeigen. Mit hohem Deckungsgrad und großer Individuenzahl treten sie vorrangig auf intensiv genutzten Mäh- und Dauerweiden, Vielschnittwiesen sowie Trittrassen auf. Auf extensiv genutzten Grünlandflächen treten sie meist nicht auf. Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung sind überwiegend durch ihr niedriges Wachstum charakterisiert, sie sind trittresistent und reich an Bodenblättern. Meist sind es früh- und vielschnittverträgliche Kriech- und Rosettenpflanzen (Bohner und Starz 2011).

Wilmanns (1998) bezeichnet die mechanische Schädigung empfindlicher Sprosse durch Reifendruck und die Belastung durch Menschen und Tiere als „Tritt“. Der Boden wird dadurch dichter gelagert, was sich wiederum auf den Porenraum, die Wasser-

und Sauerstoffaufnahme sowie auf die Durchwurzelung des Bodens auswirkt. Sich verändernder Sauerstoff- und Wassergehalt sowie mechanische Pflanzenverletzungen sind ausschlaggebend für eine Selektion des vorherrschenden Pflanzenbestandes. Nur jene Arten, die unter diesen gestörten Bedingungen überleben können, kommen auf diesen verdichteten Standorten vor.

Die pflanzensoziologische Klasse der Tritt- und Flutrasen nach Wilmanns (1998) beinhaltet einige Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung. Diese Pflanzen können mit den Verhältnissen auf verdichteten Böden besser zurechtkommen, was wiederum ihren Zeigerwert unterstreicht.

Laut Bohner und Starz (2011) sind die Pflanzenarten in der *Tabelle 3*, die am weitesten verbreiteten und häufigsten Zeigerpflanzen für Oberbodenverdichtungen im Dauergrünland.

Tabelle 3: Merkmale und Auftreten von häufigen Bodenverdichtungszeigern nach Dietl et al. (2012)

| Pflanze | Merkmale | Auftreten |
|---|--|---|
| Ranunculus repens (Kriechender Hahnenfuß) | Wuchshöhe 20-40cm, goldgelbe Blüten blühen vom späten Frühling bis Herbst, tiefgehendes kräftiges Wurzelwerk sowie oberirdische Kriechtriebe möglich | Nährstoffreiche, meist verdichtete Böden, in lückenhaften Vielschnittwiesen sowie in übernutzten Kriechrasenflächen vom Tiefland bis ins Almgebiet, selten in Mähweiden, Äckern und Wegrändern |
| Poa annua (Einjähriges Rispengras) | Wuchshöhe 5-30 cm, ohne unterirdische Kriechtriebe, rasenbildend, blüht fast das ganze Jahr | Auf frisch-feuchten, nährstoffreichen und meist verdichteten Böden vom Tiefland bis ins untere Almgebiet sowie auf Feldwegen, Trittrassen und übernutzten kurzrasigen Dauerweiden |
| Plantago major (Breitwegerich) | Wuchshöhe 10-30 cm, Breite Rosettenblätter, blüht im Sommer, besitzt ein kurzes Rhizom mit vielen zähen Sprosswurzeln | Auf frisch-feuchten, lehmig-tonigen, verdichteten und nährstoffreichen Böden vom Tiefland bis ins Almgebiet, häufig in stark gedüngten, übernutzten, kurzrasigen Dauerweiden |
| Bellis perennis (Gänseblümchen) | Wuchshöhe 3-15 cm, blattloser Stängel, alle Blätter rosettenbildend, Blüte das ganze Jahr möglich, flach im Boden liegendes Rhizom, Sprosswurzeln bilden dichtes wenig tiefreichendes Wurzelwerk | Auf mäßig trockenen bis feuchten, nährstoffreichen und verdichteten Böden vom Tiefland bis ins Almgebiet, häufig in kurzrasigen übernutzten Fettweiden sowie in Trittrassen und lückenhaften Mähwiesen, ist sehr lichtbedürftig |
| Leontodon autumnalis (Herbstlöwenzahn) | Wuchshöhe 15-50 cm, gelbe Blüten blühen im Sommer und im Herbst, kurzes und dickes Rhizom, wenig tiefreichendes Sprosswurzelgeflecht | Auf frischen nährstoffreichen meist verdichteten Böden vom Tiefland bis ins hohe Almgebiet, in Trittrassen, Feldwegen und Straßenrändern |
| Agrostis stolonifera (Ausläufer-Straußgras) | Wuchshöhe 20-80 cm, unterirdische Kriechtriebe sind kurz, oberirdische Kriechtriebe bis 2m lang, bildet an Knoten Wurzeln und neue Triebe, blüht im Sommer | Auf feuchten oft überschwemmten verdichteten Böden vom Tiefland bis ins untere Almgebiet, an Bach- und Seeufern und Feldwegen, in übernutzten kurzrasigen Dauerweiden häufig bestandsbildend |
| Polygonum aviculare (Vogelknöterich) | Wuchshöhe 5-50 cm, rasenbildend, kräftige Pfahlwurzel mit zahlreichen feinen Seitenwurzeln, Stängel bis zur Spitze geblättert, gerbstoffreich und scharf schmeckend | Auf nährstoffreichen Böden in lückigen Trittrassen vom Tiefland bis ins Almgebiet |
| Matricaria discoidea (Strahlenlose Kamille) | Wuchshöhe 5-40 cm, grünlichgelbe Blütenköpfe, blüht von Juni bis August (Münker 1982) | Kommt an Schuttplätzen sowie auf Trittrassen vor (Münker 1982) |

2.7.2 Zeigerwert der untersuchten Arten nach Ellenberg

Zeigerwerte sind Kurzbeschreibungen des ökologischen Verhaltens von Pflanzen. Es werden die Standortsbeziehungen von Pflanzen im Zusammenspiel mit zahlreichen Konkurrenten dargestellt. Zeigerwerte haben heuristischen Charakter, sie sind hilfreich bei Standortansprachen, können aber auf keinen Fall ökologische Messungen ersetzen (Ellenberg et al. 1991).

Tabelle 4: Zeigerwert sowie Tritt- und Mahdverträglichkeit von häufigen Bodenverdichtungszeigern nach Ellenberg et al. (1991) und Dierschke und Briemle (2008)

| Art | L | T | K | F | R | N | S | LF | B. | M | TV |
|----------------------|---|---|---|----|---|---|---|-----|----|---|----|
| Ranunculus repens | 6 | x | x | ~7 | x | x | 1 | H | W | 8 | 7 |
| Poa annua | 7 | x | 5 | 6 | x | 8 | 1 | T,H | W | 9 | 9 |
| Plantago major | 8 | x | x | 5 | x | 6 | 0 | H | S | 5 | 9 |
| Bellis perennis | 8 | x | 2 | 5 | x | 6 | 0 | H | W | 9 | 8 |
| Leontodon autumnalis | 7 | x | 3 | 5 | 5 | 5 | 0 | H | W | 7 | 7 |
| Agrostis stolonifera | 8 | x | 5 | x= | x | 5 | 0 | H | W | 9 | 9 |
| Polygonum aviculare | 7 | 6 | x | 4 | x | 6 | 1 | T | S | 4 | 9 |
| Matricaria discoidea | 8 | 5 | 3 | 5 | 7 | 8 | 0 | T | W | 6 | 9 |

Zeigerwerte:

L=Lichtzahl (1=Tiefschattenpflanze, 9=Volllichtpflanze), **T**=Temperaturzahl (1=Kältezeiger, 9=extremer Wärmezeiger), **K**=Kontinentalitätszahl (1=eurozeanisch, 9=eukontinental), **F**=Feuchtezahl (1=Starktrockniszeiger, 12=Unterwasserpflanze, ~Zeiger für starken Wechsel, =Zeiger für Überschwemmung), **R**=Reaktionszahl (1=Starksäurezeiger, 9=Basen- und Kalkzeiger), **N**=Stickstoffzahl (1=stickstoffärmste Standorte, 9=übermäßig stickstoffreiche Standorte), **S**=Salzzahl (0=nicht salztragend, 9=euphalin bis hypersalin), **LF**=Lebensform (T=Therophyt, H=Hemikryptophyt), **B.**=Blattausdauer (W=überwinternd Grün, S=sommergrün), x=indifferentes Verhalten in verschiedenen Gegenden

Tritt- und Mahdverträglichkeit:

M=Mahdverträglichkeitszahl (1=unverträglich, 9=überaus verträglich), **TV**=Trittverträglichkeitszahl (1=unverträglich, 9=überaus verträglich)

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden auf ausgewählten Flächen des steirischen Murtales, in den Gemeinden Seckau, Kobenz und Sankt Margarethen bei Knittelfeld durchgeführt. Dabei wurden Flächen im Umkreis von ca. 9 Kilometern beprobt. Alle Untersuchungsflächen lagen zwischen 610m und 940m Seehöhe.

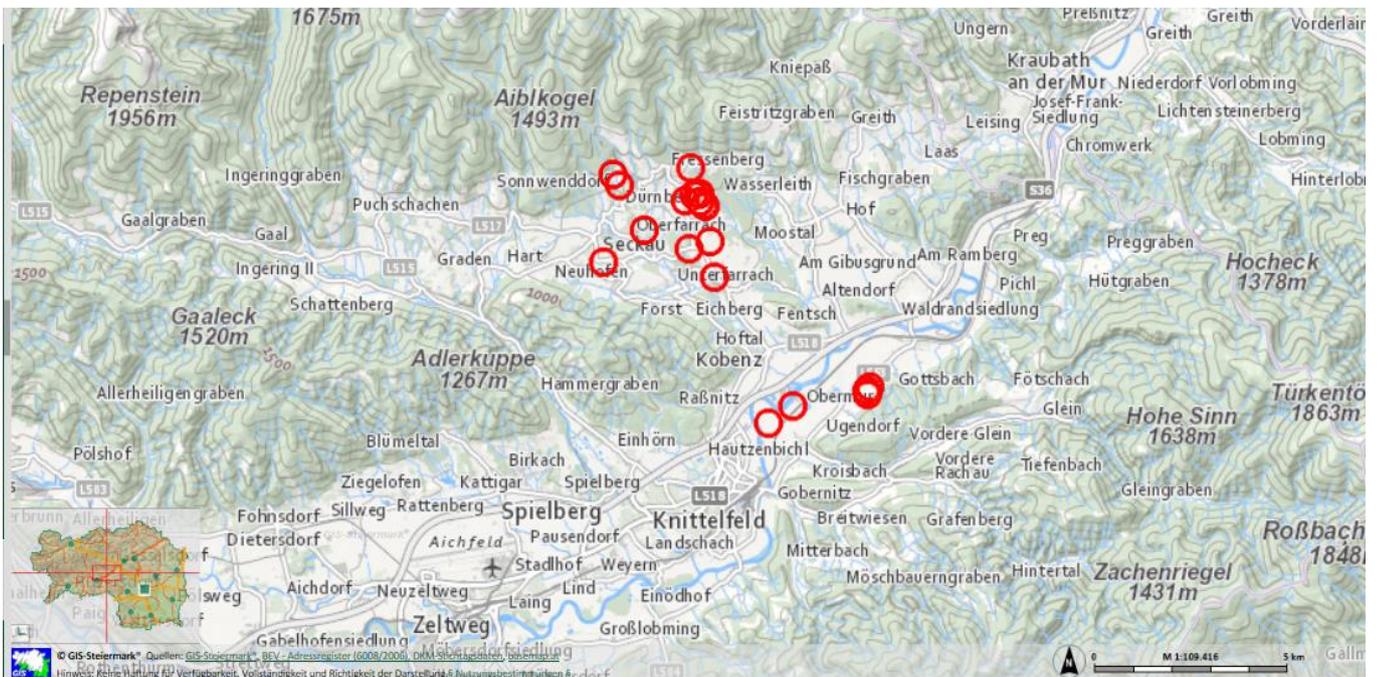


Abbildung 8: Untersuchungsgebiet mit eingezeichneten Probefeldern (GIS 2020).

Tabelle 5: Flächennamen, Nutzungsarten, Längengrade, Breitengrade und Seehöhe der Probestandorte

| Flächenname | Nutzung | Standort | Längengrad | Breitengrad | Seehöhe |
|-----------------------------|-------------|----------|--------------|--------------|---------|
| Referenzfläche | Mext (R) | s1 | 14°49,3540´O | 47°17,0600´N | 838,4 |
| Hauswiese | Mint Herbst | s2 | 14°49,3210´O | 47°17,0490´O | 852,4 |
| Feldweide Oben | W(Pferd) | s3.1 | 14°49,4390´O | 47°16,9140´N | 824,4 |
| Feldweide Unten | W(Pferd) | s3.2 | 14°49,4660´O | 47°16,8830´N | 812,4 |
| Friedelwiese | Mint Herbst | s4 | 14°49,2490´O | 47°17,0480´N | 855,4 |
| Tulli Hauswiese | Mint Herbst | s5 | 14°49,0500´O | 47°16,9850´N | 847,4 |
| Tulli Hausweide | W | s6 | 14°49,3670´O | 47°16,9590´N | 833,4 |
| Ballmörtel Wiese | Mint Herbst | s7 | 14°48,2230´O | 47°16,5650´N | 770,4 |
| Hausberger Hutweide | W | s8 | 14°49,1560´O | 47°17,4130´N | 902,4 |
| Putz Weide unter Stall | W | s9 | 14°49,6640´O | 47°15,9120´N | 720,4 |
| Maier zu Hof Weide | W(Pferd) | s10 | 14°51,2800´O | 47°14,1630´N | 630,5 |
| Maier zu Hof Wiese | Mint | s11 | 14°50,7480´O | 47°13,9070´N | 625,5 |
| Weiermoar Hofwiese | MW | s12 | 14°47,5640´O | 47°17,3060´N | 936,5 |
| Weiermoar Steiffläche | MW | s13 | 14°47,7040´O | 47°17,1780´N | 935,4 |
| Klob Weide unter Stall | W | s14 | 14°52,8560´O | 47°14,4140´N | 613,5 |
| Klob Steiffläche | W | s15 | 14°52,7990´O | 47°14,3610´N | 630,5 |
| Klob Mähboden | MW | s16 | 14°52,8130´O | 47°14,3100´N | 647,4 |
| Obererwirt Neuhofenwiese | Mint | s17 | 14°47,3830´O | 47°16,1190´N | 831,4 |
| Rudorfer Farrachwiese | Mint | s18 | 14°49,6190´O | 47°16,3760´N | 768,4 |
| Okamp Oberreiterwiese | Mint | s19 | 14°49,1860´O | 47°16,3080´N | 759,4 |

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

3.2 Klima

Laut der Klimadaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2020) am Messstandort Seckau, auf 874m Seehöhe, wurden folgende Daten ermittelt. Die gemessenen Klimadaten wurden in einem Zeitraum von 1971 bis 2000 erhoben. Die Tagesdurchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet lag bei 6,4 C°, wobei die höchste gemessene Temperatur bei 35,4 C° lag und die tiefste gemessene Temperatur bei -24,4 C° lag. Die Anzahl der Frosttage, das sind die Tage an denen das Minimum der Lufttemperatur bei kleiner als 0 C° liegt, beläuft sich auf 144 Tage. Die Zahl der Sommertage, das sind jene Tage, an denen die Tageshöchsttemperatur 25 C° überschreitet, beläuft sich auf 21,5 Tage. Die jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 811 mm, wobei die höchste Niederschlagsmenge in den Monaten von Juni bis August zu verzeichnen ist. Die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke ≥ 1 cm lag bei 95,7 Tagen und die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke ≥ 20 cm lag bei 27,7 Tagen. Die Daten für das Untersuchungsgebiet zeigen eine Vegetationsperiode von ca. 220 Tagen.

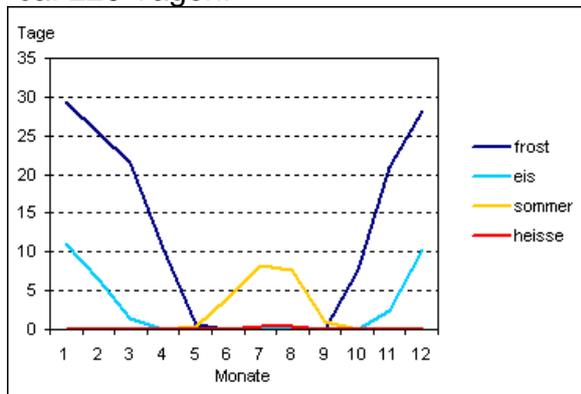


Abbildung 9: Besondere Tage im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020)

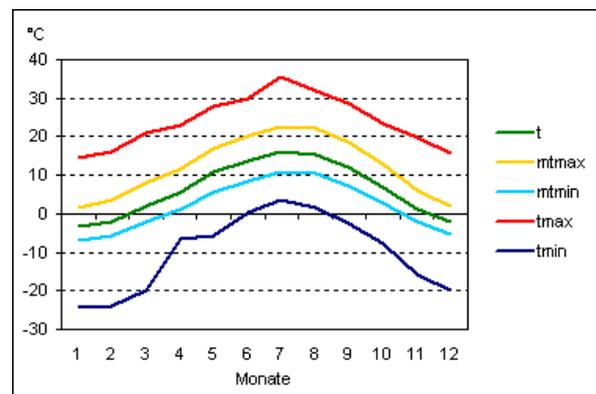


Abbildung 10: Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020)

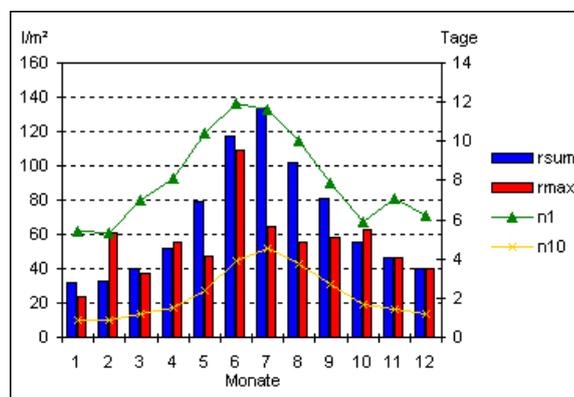


Abbildung 11: Niederschläge im Untersuchungsgebiet (ZAMG 2020)

Ertragsfähiges Grünland benötigt 800 mm Jahresniederschlag in guter Verteilung. Bei weniger als 600 mm Jahresniederschlag kann es in Grünlandbeständen, bei seichtgründigen Böden schon zwischen 600 und 800mm, zu Versorgungsproblemen kommen. Hohe Jahresniederschläge in Verbindung mit vielen Regentagen können wiederum Probleme bei der qualitativen Futterkonservierung bewirken (Buchgraber und Schaumberger 2006).

3.3 Geologie

Das Untersuchungsgebiet im Murtal wird geologisch zum Mittelostalpin gezählt. Es treten hauptsächlich Umwandlungsgesteine wie die Kristallingesteine Glimmerschiefer, Marmor, Amphibolit und Gneis auf (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2012). Das Murtal besteht aus Hochgebirgsgipffluren mit über 2000 m Seehöhe, weiten offenen Tälern und mäßig steilen Hängen. Meist besteht das Gelände jedoch aus flachen Bergrücken und Kuppen. Im Gesamten Untersuchungsgebiet kommt fast ausschließlich silikatisches Gestein vor (Kilian et al. 1994).

Der Teilbereich Aichfeld-Murboden, auf dem die meisten Untersuchungen durchgeführt wurden, bildet mit seinen angeschlossenen Seitentälern das zweitgrößte inneralpine Einbruchsbecken der Ostalpen. Das Hochgebirgsmassiv der Niederen Tauern sowie die Seckauer Alpen begrenzen das Murtal im Norden. Im Süden wird das Murtal durch die Stubalpe und die Gleinalpe begrenzt und im Westen durch die Seetaler Alpen (LAG 2015).

3.4 Der Boden im Untersuchungsgebiet

Laut der österreichischen Bodenkartierung sind die, im Untersuchungsgebiet am meisten vorkommenden Bodentypen, Lockersediment-Braunerde, Hanggley und Gley. Auf zwei Aubodenstandorten in der Nähe der Mur kommen noch der Braune Auboden und der Graue Auboden vor (BFW 2020).

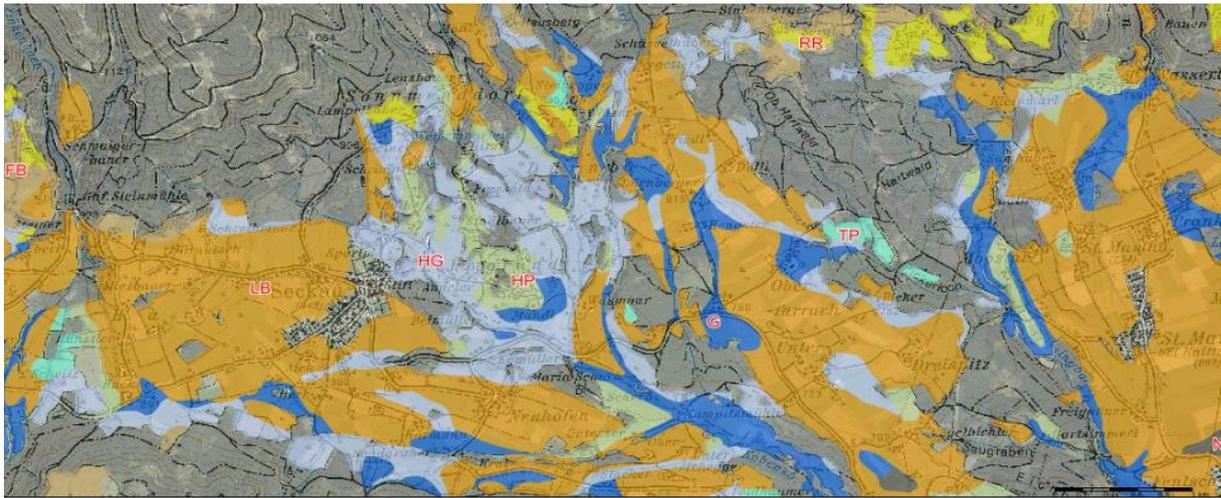


Abbildung 12: Bodentypen des Untersuchungsgebietes (BFW 2020)

LB = Lockersediment Braunerde

HG = Hangley

G = Gley

HP = Hangpseudogley

TP = Typischer Pseudogley

FB = Felsbraunerde

RR = Ranker

N = Anmoor

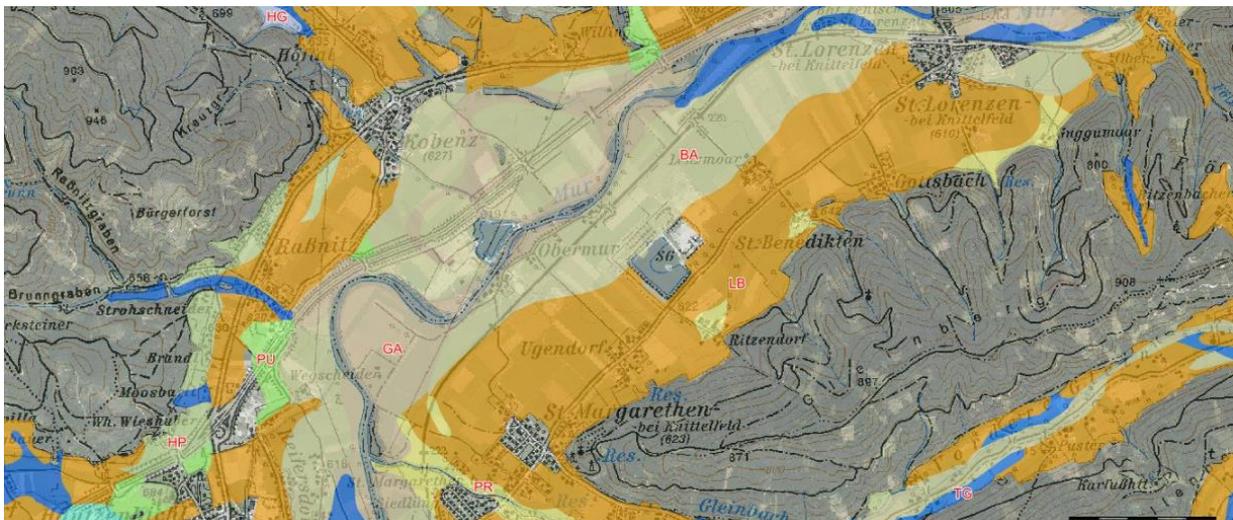


Abbildung 13: Bodentypen des Untersuchungsgebietes inklusive Auböden (BFW 2020)

BA = Brauner Auboden

GA = Grauer Auboden

PR = Pararendsina

PU = Planieböden

Die am häufigsten vorkommenden Bodenarten im Untersuchungsgebiet sind sandiger Schluff (sZ), schluffiger Sand (zS), lehmiger Sand (IS), lehmiger Schluff (IZ) und Schluff (Z) (BFW 2020).

Im Anschluss werden die drei, in der Arbeit behandelten, Hauptbodentypen Braunerde, Gley und Auböden anhand ihrer Charakteristika kurz beschrieben.

Braunerde

Braunerdeböden gehören zu den terrestrischen Böden, was bedeutet, dass diese Böden nicht vom Grundwasser beeinflusst werden (Amelung et al. 2018). Nach Amelung et al. (2018) weisen Braunerden einen humusreichen Ah-Horizont auf. Dieser geht dann fließend zu einem, durch Silicatverwitterung hervorgerufenen, braun gefärbten Bv-Horizont über, welcher dann vom C-Horizont gefolgt wird. Die Verwitterungshorizonte waren zum Teil aus feinem und grobem Lockermaterial aufgebaut und sind dem carbonatfreien Subtyp zuzuordnen.

Der Bodentyp im Untersuchungsgebiet ist Lockersediment-Braunerde (BFW 2020).

Gley

Gleye gehören zu den semiterrestrischen Böden, was bedeutet, dass diese Böden durch Grundwassereinfluss bzw. durch Grundwasseraufstieg entstanden sind. Gleye weisen einen humusreichen und nicht vom Grundwasser beeinflussten Ah-Horizont, gefolgt von einem durch Oxidation verrosteten Go-Horizont auf. Im Anschluss darauf folgt der, dauernd durch Nässe geprägte, fahlgraue bis graugrüne oder blauschwarze, durch Sauerstoffmangel reduzierte, Gr-Horizont. Gleye können der Vegetation aus dem Unterboden ausreichend Wasser anbieten, dadurch kommen oft feuchtliebende Pflanzenarten darauf vor. Die Bodenreaktion der meisten Gleye ist schwach bis mäßig sauer. Meist sind sie auch nährstoffreicher, da sie gelöste Stoffe über das Grundwasser erhalten. Jedoch ist die Verfügbarkeit dieser Nährstoffe oft nur gering (Amelung et al. 2018).

Im Untersuchungsgebiet kommt als häufigster Bodentyp der Hanggley vor (BFW 2020).

Auböden

Auböden gehören zu den semiterrestrischen Böden. Sie werden von Fließgewässern periodisch überflutet oder überschwemmt sowie durch das Grundwasser beeinflusst. Man kann sie als Böden der Flusstäler beschreiben. Durch periodische Überflutung werden feste und gelöste Stoffe geschichtet, wodurch ein humoser Oberboden aus

mehreren Lagen mit wechselnden Humusgehalten entsteht. Auböden haben einen relativ hohen Sauerstoffgehalt, da das flussbegleitende Grundwasser, aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeit sowie der kurzen Stillstandsphasen, viel Sauerstoff enthält. Aus diesem Grund weisen Auböden selten redoximorphe Merkmale auf (Amelung et al. 2018).

Auf den beiden Aubodenstandorten im Untersuchungsgebiet kommen der Graue Auboden sowie der Braune Auboden vor (BFW 2020).

3.4.1 Bodenprofilstellen im Untersuchungsgebiet

In der Nähe von drei Untersuchungsstandorten lagen jeweils Profilstellen der österreichischen Bodenkartierung und Geoinformation (BFW 2020). Folgende Bodenkenwerte wurden daraus ermittelt.

➤ Bodenprofilstelle 1

Bodentyp: kalkfreie Lockersediment-Braunerde

Ausgangsmaterial: feine und grobe Terrassensedimente

Tabelle 6: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 1 (BFW 2020).

| Horizont | Tiefe (cm) | Bodenart | Grobanteil | Sand (%) | Schluff (%) | Ton (%) | Humusgehalt (%) | Kalkgehalt | pH-Wert | Struktur | Durchwurzelung |
|---|------------|---------------|--|----------|-------------|---------|---------------------|------------|---------|---------------------------------------|----------------|
|  | 0-25 | lehmiger Sand | (gering) Kies, Schotter 2-10cmØ | 42 | 49 | 9 | mittelhumos (3,5 %) | kalkfrei | 5,2 | deutlich mittelkrümelig | stark |
| | 25-60 | lehmiger Sand | (gering) Kies, Schotter 2-10cmØ | 46 | 41 | 13 | (0,6 %) | kalkfrei | 5,8 | deutlich feinblockig/ Kanten gerundet | gut |
| | 60-200 | lehmiger Sand | (sehr hoch) Kies, Schotter, Grobschotter 2-30cmØ | - | - | - | - | kalkfrei | - | - | auslaufend |

Abbildung 14: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 1 (BFW, 2020).

➤ **Bodenprofilstelle 2**

Bodentyp: verbraunter, kalkfreier Grauer Auboden

Ausgangsmaterial: feines über grobem Schwemmmaterial

Tabelle 7: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 2 (BFW 2020).

| Horizont | Tiefe (cm) | Bodenart | Grobanteil | Sand (%) | Schluff (%) | Ton (%) | Humusgehalt (%) | Kalkgehalt | pH-Wert | Struktur | Durchwurzelung |
|----------|------------|----------------------------|--|----------|-------------|---------|---------------------|------------|---------|--|----------------|
| A | 0-30 | schluffiger /lehmiger Sand | (gering) Kies, Schotter 2-5cmØ | 60 | 35 | 5 | mittelhumos (2,1 %) | kalkfrei | 5,6 | undeutlich mittelkrümelig | gut |
| BC | 30-55 | schluffiger Sand | (gering) Kies, Schotter 2-5cmØ | 59 | 37 | 4 | (1,1 %) | kalkfrei | 6,6 | undeutlich fein-blockig/ Kanten gerundet | wenig |
| D | 55-200 | - | (vorherrschend) Kies, Schotter, Grobschotter 2-20cmØ | - | - | - | - | kalkfrei | - | - | nicht |

Abbildung 15: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 2 (BFW, 2020).

➤ **Bodenprofilstelle 3**

Bodentyp: kalkfreier Gley

Ausgangsmaterial: feines Schwemmmaterial

Tabelle 8: Profilstellenbeschreibung der Bodenprofilstelle 3 (BFW 2020).

| Horizont | Tiefe (cm) | Bodenart | Grobanteil | Sand (%) | Schluff (%) | Ton (%) | Humusgehalt (%) | Kalkgehalt | pH-Wert | Struktur | Durchwurzelung |
|----------|------------|------------------|------------|----------|-------------|---------|--------------------|------------|---------|--|----------------|
| Ag | 0-25 | sandiger Schluff | - | 26 | 64 | 10 | starkhumos (4,6 %) | kalkfrei | 5,8 | deutlich feinkörnig | gut |
| Gorel | 25-60 | sandiger Schluff | - | 18 | 72 | 10 | (2 %) | kalkfrei | 5,2 | undeutlich mittelblockig Kanten gerundet | wenig |
| Gorrel | 60-80 | sandiger Schluff | - | 19 | 70 | 11 | (1,4 %) | kalkfrei | 6,4 | undeutlich grobblockig Kanten gerundet | wenig |
| Gr | 80-200 | lehmiger Sand | - | 43 | 48 | 9 | (0,6 %) | kalkfrei | 4,2 | massiv | nicht |

Abbildung 16: Bodenprofilzeichnung der Bodenprofilstelle 3 (BFW, 2020).

3.5 Grünland-Pflanzengesellschaften im Untersuchungsgebiet

Eine Pflanzengesellschaft im Dauergrünland setzt sich aus verschiedenen Gräsern, Kräutern und Leguminosen zu jeweils unterschiedlichen Anteilen zusammen. Herrschende Standortbedingungen wie Klima, Boden und geografische Lage beeinflussen die Pflanzenzusammensetzung von Grünlandbeständen. Ebenfalls beeinflussen Art, Intensität und Zeitpunkt von Nutzung und Düngung die Pflanzengesellschaft (BIO AUSTRIA 2009).

Die Nutzung der Grünlandflächen im Untersuchungsgebiet erfolgte eher intensiver. Die meisten Flächen wurden drei- bis viermal gemäht oder intensiv beweidet. Die Pflanzengesellschaften, die im Untersuchungsgebiet am häufigsten vorkamen, konnten den Vielschnittwiesen, den Weidelgrasweiden und den Trittrasen zugeordnet werden.

3.6 Kriterien für die Auswahl der Untersuchungsflächen und Einteilung in unterschiedliche Bewirtschaftungsformen

Es wurden Untersuchungsstandorte ausgewählt, die eine regionsübliche Bewirtschaftungsgeschichte haben. Die Flächen der Untersuchungsstandorte mussten mindestens zehn Jahre lang auf die gleiche, gebiets- und praxisübliche Weise bewirtschaftet werden. Ebenfalls musste der Horizontaufbau durch die natürliche Bodenbildung entstanden sein, d.h. der Boden der Untersuchungsstandorte durfte nicht planiert oder anderwärtig verändert worden sein. Es wurden ausschließlich Böden, die als Dauergrünland genutzt wurden, untersucht. Die Untersuchungen fanden zum Großteil auf Flächen von rinderhaltenden Betrieben und einigen Flächen von pferdehaltenden Betrieben statt. Vor der Beprobung der Untersuchungsstandorte wurden die Bewirtschafter*innen der Flächen über die Art der Nutzung, die Schnitt- bzw. Nutzungshäufigkeit sowie die Befahrungshäufigkeit befragt.

Die Erhebungen fanden auf 20 ausgewählten Grünlandstandorten statt. Diese Untersuchungsstandorte wurden in unterschiedliche Bewirtschaftungsformen eingeteilt, welche im Anschluss erläutert werden.

Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Auf dieser Fläche erfolgte ausschließlich eine zweimalige Mahd zur Futternutzung, mittels Motormäher oder Sense. Die Fläche wurde nie mit einem Traktor oder größeren Maschinen befahren und es fand keine Weidenutzung statt.

Mähwiese intensiv

Diese Bewirtschaftungsform kennzeichnet eine drei- bis viermalige Mahd zur Futternutzung, mittels moderner Erntemaschinen. Diese Flächen wurden nicht mit Weidevieh bestoßen. Eine steigende Intensität der Nutzung und Düngung beeinflusst die Befahrungshäufigkeit mit Maschinen.

Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

Diese Bewirtschaftungsform kennzeichnet ebenfalls eine drei- bis viermalige Mahd zur Futternutzung, mittels moderner Erntemaschinen. Ebenfalls erfolgt eine Herbstbeweidung durch Weidevieh. Diese Flächen kommen im Murtal häufiger vor. Vor allem Flächen im Umkreis des Hofes werden dadurch im Herbst noch einmal mit Weidevieh bestoßen.

Weide

Weiden werden die ganze Vegetationsperiode mit Rindern bestoßen. Es erfolgt keine Mahd zur Futternutzung. Die Überfahrten durch die Landwirte*innen können variieren, je nach Häufigkeit der Düngung, Weidepflege bzw. Nachmahd oder Instandhaltungsarbeiten auf der Weide.

Pferdeweide

Auf diesen Flächen erfolgt ausschließlich eine Beweidung durch Pferde. Es erfolgt keine Mahd zur Futternutzung. Die Intensivität der Beweidung kann unterschiedlich sein. Wenn die Tiere das ganze Jahr über die Weide benutzen, also auch im Winter, ist die Intensität höher, als wenn sie nur stundenweise auf die Weide können. Die Landwirte*innen wurden hier ebenfalls befragt, wie oft sie die Flächen befahren. Je nach Häufigkeit der Weidepflege bzw. Nachmahd, Fütterung und Instandhaltungsarbeiten auf der Weide, wurden die Flächen mehr oder weniger oft mit Maschinen befahren.

Mähweide

Mähweiden nehmen eine Mittelstellung zwischen Mähwiesen und Weiden ein. Sie werden abwechselnd beweidet oder mittels Mahd zur Futternutzung verwendet. Sie können im Frühjahr beweidet und danach gemäht oder in verschiedener Reihenfolge gemäht und beweidet werden. Je intensiver die Nutzung, desto häufiger werden die Flächen beweidet oder befahren.

3.7 Bodenphysikalische Untersuchungen

3.7.1 Erhebung der Lagerungsdichte

Die Erhebungen der Lagerungsdichte erfolgten nach der Stechzylindermethode. Die Probenentnahme wurde nach Hartge und Horn (2009) strukturiert und durchgeführt. Die Proben der Lagerungsdichteerhebungen wurden im Anschluss nach ÖNORM L 1068 analysiert.

Die Messung der Lagerungsdichte wurde auf 20 ausgewählten Flächen durchgeführt. Die Durchführung dieser Erhebungen wird im Anschluss beschrieben.

Die Flächen wurden ausgewählt und im Anschluss mit den Landwirten*innen die Bewirtschaftungshistorie besprochen. Wenn die Flächen mindestens zehn Jahre lang auf dieselbe Weise bewirtschaftet und nicht planiert oder anderwärtig verändert worden waren, wurden die Flächen abgegangen, um eine möglichst repräsentative Stelle für die Probenentnahmen zu finden. Nach dem Auswählen einer repräsentativen Stelle wurde eine Untersuchungsfläche mit 5x5 m ausgesteckt. In dieser 25m² großen Fläche wurden die weiteren Untersuchungen durchgeführt.

Zu Beginn wurde eine Erhebung der Vegetationszusammensetzung durchgeführt. Es wurde nach der BRAUN-BLANQUET Methode der Deckungsgrad von verdichtungszeigenden Pflanzen erhoben (*siehe Kapitel 3.6.6*).

Danach wurde die Lagerungsdichte mithilfe von genormten Stechzylindern, mit einem Volumen von 100 cm³, erhoben. Dazu wurden die 5cm hohen Stechzylinder mithilfe eines Schlageisens und eines Hammers in den Boden geschlagen. Um Erkenntnisse über die Lagerungsdichte in den verschiedenen Tiefenstufen zu erlangen, wurden

6 Stechzylinder pro Probeloch, in den Tiefenstufen 0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-25cm, 25-30cm in den Boden geschlagen. Dies wurde in 6-facher Wiederholung pro Untersuchungsfläche durchgeführt. Pro Untersuchungsfläche wurden 36 Stechzylinderproben geborgen. Auf allen 20 Untersuchungsstandorten wurden gesamt 720 Stechzylinderproben untersucht.

Die Stechzylinder wurden mit Hilfe eines kleinen Spatens ausgegraben, und überstehende Erde mit einem Messer mit Wellenschliff abgeschnitten. Proben die Steine enthielten, waren nicht aussagekräftig, da sie das Gewicht der Stechzylinderproben verfälschten. Deswegen wurden alle Stechzylinderproben, die Steine enthielten, verworfen und die Probennahme auf dieser Tiefenstufe noch einmal durchgeführt.



Abbildung 17: Stechzylinder mit aufgesetztem Schlageisen (eigene Aufnahme)



Abbildung 18: Stechzylinder eingeschlagen in den Boden (eigene Aufnahme)

Im Anschluss wurde der genormte Inhalt der Stechzylinder in Papiersäcke gefüllt und mit einer Waage (0,1g Messgenauigkeit) verwogen, um das Feuchtgewicht der Stechzylinderproben zu ermitteln.

Da in weiterer Folge auch der pH-Wert, die Bodentextur, der Gesamtstickstoffgehalt und der organische Kohlenstoffgehalt ermittelt werden sollte, wurden Bodenproben

vom A-Horizont und vom B-Horizont des Bodens gesammelt. Diese wurden jeweils in sechsfacher Wiederholung entnommen und pro Untersuchungsfläche, zu einer Mischprobe vom A-Horizont und einer Mischprobe vom B-Horizont vermengt (*siehe Kapitel 3.6.4 und 3.6.5*). Im Anschluss wurden die Untersuchungsflächen mit einem Holzpfehl markiert, damit sie bei der folgenden Untersuchung des Eindringwiderstandes gefunden werden konnten.

Am Ende der Lagerungsdichteerhebung wurden im Labor die Inhalte der 720 Stechzylinder, bei 105° C für 24 Stunden in einem Trockenschrank getrocknet. Nach der Trocknung wurden die Stechzylinderinhalte mit einer Laborwaage (0,01 g Messgenauigkeit) verwogen. Diese Werte wurden bei der Errechnung der Lagerungsdichten benötigt.

3.7.2 Erhebung des Eindringwiderstandes

Mit einem Penetrologger von Eijkelkamp Agrisearch Equipment (Art.-Nr.: 06.15.31) wurde der Eindringwiderstand des Bodens, auf den 20 Untersuchungsstandorten erhoben. Dafür wurde eine 80cm lange Sondierstange, die am Penetrologger befestigt war, in den Boden geschoben. Der Eindringwiderstand bis in 80cm Tiefe wurde so erhoben. Die Spitze der Sondierstange hatte einen Durchmesser von 2cm und einen Winkel von 60°. Der Penetrologger misst den Eindringwiderstand der aufgebracht werden muss um die Sondierstange in den Boden zu drücken, in Megapascal (MPa) bzw. in Newton pro Quadratmeter (N/m²). Auf jedem der Untersuchungsstandorte erfolgten Messungen des Eindringwiderstandes in 10-facher Wiederholung. Die erhobenen Daten wurden am Penetrologger zwischengespeichert und mit der Software Eijkelkamp PenetroViewer (Version 6.08) in numerischer und grafischer Form auf den Computer hochgeladen. Die Daten wurden in weiterer Folge mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel analysiert und für die statistische Weiterverarbeitung aufbereitet.



Abbildung 19: Messung des Eindringwiderstandes mit dem Penetrologger (eigene Aufnahme)

Laut EIJKELKAMP (2013) lässt sich mit der Eindringwiderstandsmessung durch den Penetrologger das Maß der Bodenverdichtung bzw. die Tragfähigkeit des Bodens messen. Ein zu hoher Eindringwiderstand landwirtschaftlicher Böden, zum Beispiel durch Bodenverdichtungen, kann zu Problemen bei der Wurzelbildung von Pflanzen führen. Auch die Sauerstoffversorgung der Wurzeln kann dadurch beeinträchtigt werden.

Der Eindringwiderstand kann von der Textur, Struktur sowie dem Gehalt an organischen Inhaltsstoffen beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund sollten mehrere Messwiederholungen durchgeführt werden (EIJKELKAMP 2013).

3.7.3 Erhebung der volumetrischen Bodenfeuchte

Die Messungen des Eindringwiderstandes wurden, aufgrund der Vergleichbarkeit, bei annähernd gleicher Bodenfeuchte und innerhalb kurzer Zeit durchgeführt. Um die Daten der Eindringwiderstände untereinander vergleichen zu können, wurden auf jeder Untersuchungsfläche Messungen der volumetrischen Bodenfeuchte durchgeführt. Dazu wurde der Bodenfeuchtesensor SM150 In Verbindung mit dem

Moisture Meter HH150 von Delta-T Devices Ltd. verwendet. Es wurde damit die volumetrische Bodenfeuchte (V%) gemessen. Die Messungen der volumetrischen Bodenfeuchte erfolgten pro Untersuchungsstandort in 10-facher Wiederholung. Die Ergebnisse dieser Messungen flossen in spätere Berechnungen ein.

3.7.4 Erhebung Bodenchemische Parameter

Die luftgetrockneten Mischproben des A- und B- Horizontes wurden in weiterer Folge im Labor auf eine Maschenweite von 2mm gesiebt. Der pH-Wert der Proben wurde nach ÖNORM L 1083 ermittelt. Dafür wurde den gesiebten Proben eine 0,01 Molare CaCl_2 – Lösung beigegeben. Im Anschluss erfolgte die Homogenisierung durch einen Laborschüttler und die Messung der pH-Werte mit dem Multimesgerät WTW Multi 3420. Ebenfalls wurde durch trockene Verbrennung (ÖNORM L 1080) der organische Kohlenstoffgehalt und durch trockene Verbrennung (ÖNORM L 1095) der Gesamtstickstoffgehalt der Proben ermittelt.

3.7.5 Analyse der Bodentextur

Die Korngrößenverteilungen sowie die Bodenarten der Untersuchungsstandorte wurden ebenfalls erhoben. Dafür wurden Proben des A-Horizontes (5-10cm) sowie Proben des B-Horizontes (10-25cm) entnommen und an das Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen gesendet. Die Korngröße wurde nach ÖNORM L1061-2 und die Textur wurde nach ÖNORM L1050 ermittelt. Durch die unterschiedliche prozentuelle Verteilung von Ton, Schluff und Sand konnte auf die Bodenart geschlossen werden.

3.7.6 Erhebung der Vegetationszusammensetzung

Die Erhebung der Vegetationszusammensetzung erfolgte nach der BRAUN-BLANQUET Methode wie nach Wilmanns (1998) beschrieben (*siehe Tabelle 9*).

Die Untersuchungen wurden durchgeführt, um das mengenmäßige Vorkommen sowie die Soziabilität von verdichtungszeigenden Pflanzenarten, in der 5x5m großen Untersuchungsfläche zu erheben. Ebenfalls wurde auch auf den Pflanzenbestand

außerhalb der Untersuchungsfläche eingegangen, um Erkenntnisse über die Gesamtvegetation zu bekommen. Die Zeigerarten wurden mithilfe des Bestimmungsschlüssels für Grünlandpflanzen nach Deutsch (2002) und der Literatur von Dietl et al. (2012) bestimmt. Die Erhebung der Zeigerpflanzen wurde im August 2018 durchgeführt.

Tabelle 9: BRAUN-BLANQUET Skala nach Wilmanns (1998)

| Schätzung der Artmächtigkeit (Menge) | |
|---|---|
| r | 1 Individuum in der Aufnahme­fläche, außerhalb im Bestand nur sehr sporadisch |
| + | 2-5 Individuen in der Aufnahme­fläche, Deckung geringer als 5% |
| 1 | 6-50 Individuen in der Aufnahme­fläche, Deckung geringer als 5% |
| 2m | Mehr als 50 Individuen in der Aufnahme­fläche, Deckung geringer als 5% |
| 2a | Individuenzahl beliebig, Deckung 5-15% |
| 2b | Individuenzahl beliebig, Deckung 16-25% |
| 3 | Individuenzahl beliebig, Deckung 26-50% |
| 4 | Individuenzahl beliebig, Deckung 51-75% |
| 5 | Individuenzahl beliebig, Deckung 76-100% |
| Soziabilität (Geselligkeit, Häufungsweise) | |
| 1 | einzel­n wachsend |
| 2 | gruppen- oder horstweise wachsend |
| 3 | trup­pweise wachsend (kleine Polster oder Flecken bildend) |
| 4 | in kleinen Kolonien wachsend oder größere Flecken oder Teppiche bildend |
| 5 | in großen Herden wachsend |

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Nutzungserhebungen

Um die Befahrungshäufigkeit auf einer Fläche zu eruieren, wurden die Besitzer der Untersuchungsflächen über die Nutzungshäufigkeit und über die Anzahl der jährlichen Überfahrten befragt. Aufgrund der Angaben wurden die Flächen in unterschiedliche Kategorien unterteilt:

- nicht befahren
- selten befahren (< 5x befahren im Jahr)
- wenig befahren (5-10x befahren im Jahr)
- häufig befahren (10-30x befahren im Jahr)
- sehr häufig befahren (> 30x befahren im Jahr)

Tabelle 10: Art und Häufigkeit der Nutzung sowie Befahrungshäufigkeit der Untersuchungsstandorte

| Nutzung | Standort | Schnittnutzungen pro Jahr | Befahrungshäufigkeit (geschätzte Überfahrten mit Traktor pro Jahr) | Überfahrten |
|----------------|-----------------|----------------------------------|---|--------------------|
| Mext (R) | s1 | 1-2 | nicht befahren | 0 |
| Mint (Herbst) | s2 | 3 | häufig befahren | 25 |
| Mint (Herbst) | s4 | 3 | häufig befahren | 15 |
| Mint (Herbst) | s5 | 4 | sehr häufig befahren | 33 |
| Mint (Herbst) | s7 | 3 | häufig befahren | 25 |
| Mint | s11 | 4 | sehr häufig befahren | 30 |
| Mint | s17 | 3 | häufig befahren | 15 |
| Mint | s18 | 4 | sehr häufig befahren | 30 |
| Mint | s19 | 4 | sehr häufig befahren | 33 |
| MW | s12 | 2 | häufig befahren | 20 |
| MW | s13 | 1-2 | wenig befahren | 8 |
| MW | s16 | 2 | häufig befahren | 15 |
| W | s6 | - | wenig befahren | 10 |
| W | s8 | - | selten befahren | 4 |
| W | s9 | - | wenig befahren | 8 |
| W | s14 | - | wenig befahren | 8 |
| W | s15 | - | nicht befahren | 0 |
| W(Pferd) | s3.1 | - | sehr häufig befahren | 30 |
| W(Pferd) | s3.2 | - | häufig befahren | 12 |
| W(Pferd) | s10 | - | selten befahren | 4 |

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

Die Flächen wurden, wie in *Kapitel 3.5* erläutert, in verschiedene Nutzungsformen unterteilt. Es zeigte sich, dass die Mähwiesen intensiv sowie die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung „häufig“ bis „sehr häufig“ befahren wurden. Meist zwischen 15 und 33 Mal im Jahr. Bei den Mähweiden, Weiden und Pferdeweiden variierte die Befahrungshäufigkeit zwischen „nicht befahren“ auf Standort s15 und „sehr häufig befahren“ auf Standort s3.1. Das Befahren von Weidestandorten erfolgte im Zuge von Zaunsanierungs-, Weidepflege- und Tierkontrollmaßnahmen.

Anzumerken ist, dass die Pferdeweidefläche s3.1, eine sehr intensiv geführte Weide ist, welche das ganze Jahr, im Sommer und Winter, mit Pferden bestoßen und sehr häufig befahren wird.

4.2 Bodenchemische Analysen

Die folgenden Tabellen stellen die Ergebnisse der bodenchemischen Analysen dar. Wie in *Kapitel 3.6.4* beschrieben, wurde der organische Kohlenstoffgehalt, Gesamtstickstoffgehalt sowie der pH-Wert im Labor ermittelt. Die Analyse des organischen Kohlenstoffgehaltes sowie des Gesamtstickstoffgehaltes wurde im A- und B- Horizont durchgeführt, der pH-Wert wurde in einer Mischprobe aus A- und B Horizont ermittelt.

Tabelle 11: Ergebnisse der horizontbezogenen, bodenchemischen Analysen von Corg (%), Nges(%) und Corg/Nges

| Nutzung | Standort | Horizont | Corg (%) | Nges (%) | Corg/Nges |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Mext (R) | s1 | A | 4.21 | 0.4 | 10.53 |
| | | B | 1.78 | 0.18 | 9.89 |
| Mint (Herbst) | s2 | A | 4.67 | 0.48 | 9.73 |
| | | B | 2.6 | 0.28 | 9.29 |
| Mint (Herbst) | s4 | A | 5 | 0.56 | 8.93 |
| | | B | 2.03 | 0.21 | 9.67 |
| Mint (Herbst) | s5 | A | 5.97 | 0.63 | 9.48 |
| | | B | 2.64 | 0.29 | 9.10 |
| Mint (Herbst) | s7 | A | 9.06 | 1.08 | 8.39 |
| | | B | 1.47 | 0.2 | 7.35 |
| Mint | s11 | A | 3.25 | 0.32 | 10.16 |
| | | B | 1.24 | 0.14 | 8.86 |
| Mint | s17 | A | 6.42 | 0.64 | 10.03 |
| | | B | 3.59 | 0.37 | 9.70 |
| Mint | s18 | A | 4.24 | 0.41 | 10.34 |
| | | B | 3.11 | 0.32 | 9.72 |
| Mint | s19 | A | 6.2 | 0.63 | 9.84 |
| | | B | 4.35 | 0.45 | 9.67 |
| MW | s12 | A | 5.23 | 0.6 | 8.72 |
| | | B | 2.66 | 0.33 | 8.06 |
| MW | s13 | A | 4.22 | 0.47 | 8.98 |
| | | B | 2.05 | 0.24 | 8.54 |
| MW | s16 | A | 4.49 | 0.48 | 9.35 |
| | | B | 1.58 | 0.18 | 8.78 |
| W | s6 | A | 6.78 | 0.76 | 8.92 |
| | | B | 2.36 | 0.25 | 9.44 |
| W | s8 | A | 5.21 | 0.53 | 9.83 |
| | | B | 1.12 | 0.14 | 8.00 |
| W | s9 | A | 5.11 | 0.59 | 8.66 |
| | | B | 2.06 | 0.22 | 9.36 |
| W | s14 | A | 5.08 | 0.56 | 9.07 |
| | | B | 2.22 | 0.25 | 8.88 |
| W | s15 | A | 2.77 | 0.29 | 9.55 |
| | | B | 1.21 | 0.15 | 8.07 |
| W(Pferd) | s3.1 | A | 3.76 | 0.4 | 9.40 |
| | | B | 1.25 | 0.15 | 8.33 |
| W(Pferd) | s3.2 | A | 8.11 | 0.85 | 9.54 |
| | | B | 2.32 | 0.27 | 8.59 |
| W(Pferd) | s10 | A | 2.23 | 0.25 | 8.92 |
| | | B | 1.41 | 0.16 | 8.81 |

Corg = Gehalt an organischem Kohlenstoff in %

Corg/Nges = C/N Verhältnis

Nges = Gesamtstickstoffgehalt in %

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung der horizontbezogenen, bodenchemischen Analysen

| Horizont | Corg (%) | Nges (%) | Corg/Nges | n |
|----------|-------------|-------------|-------------|----|
| A | 5.10 ± 1.67 | 0.54 ± 0.20 | 9.42 ± 0.59 | 20 |
| B | 2.15 ± 0.85 | 0.24 ± 0.08 | 8.91 ± 0.70 | 20 |

4.2.1 Organischer Kohlenstoffgehalt

Die organische Substanz im Boden ist essenziell für die Entstehung einer stabilen Bodenstruktur sowie für die Bildung des Bodengefüges. Sie ist Kohlenstoffquelle und Energiequelle für die Bodenfauna und Bodenmikroflora. Die terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf teilnehmen, sind zu 80% in Böden und nur zu 20% in der Vegetation gebunden (Amelung et al. 2018).

Durch Photosynthese und Wurzelwachstum wird Kohlenstoff im Boden gebunden. Gerade Grünlandböden haben aufgrund ihrer großen Wurzelmassen hohe Kohlenstoffgehalte. Durch Wirtschaftsdünger und am Feld verbleibende Pflanzenreste wird Kohlenstoff in den Kreislauf gebracht (Steinwider et al. 2019).

Der Mittelwert des organischen Kohlenstoffgehaltes lag im A-Horizont bei 5.10% und im B-Horizont bei 2.15%. Der höchste Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde im A-Horizont auf Standort s7, mit 9.06% gemessen. Den niedrigsten Wert mit 2.23% erzielte Standort s10. Im B-Horizont wies Standort s19 mit 4.35% den höchsten Gehalt und Standort s8 mit 1.12% den niedrigsten organischen Kohlenstoffgehalt auf.

4.2.2 Gesamtstickstoffgehalt

Stickstoff ist essenziell für Mikroorganismen und höhere Lebensformen, da er am Aufbau von DNA, RNA, Aminosäuren und Proteinen beteiligt ist. Auch die Photosynthese benötigt Stickstoff. Großteils ist Stickstoff organisch im Boden gebunden. Erst durch die Mineralisierung wird organisch gebundener Stickstoff pflanzenverfügbar. Der Gesamtstickstoffgehalt von Böden steht daher in einem engen Verhältnis zum organischem Kohlenstoffgehalt. Die Ausbringung von Festmist und Kompost kann den Humusgehalt positiv beeinflussen und den Gesamtstickstoffgehalt sowie den organischen Kohlenstoffgehalt steigern (Amelung et al. 2018).

Die Mittelwerte des Gesamtstickstoffgehaltes lagen im A-Horizont bei 0.54% und im B-Horizont bei 0.24%. Im A-Horizont wies Standort s7 den höchsten Gesamtstickstoffgehalt mit 1.08% auf und Standort s10 den niedrigsten Gehalt mit 0.25% auf. Im B-Horizont wiesen Standort s19 mit 0.45% den höchsten und Standort s8 und s11 mit 0.14% den niedrigsten Gesamtstickstoffgehalt auf.

4.2.3 C/N – Verhältnis

Das C/N – Verhältnis im Oberboden liegt bei guten Acker- und Grünlandböden zwischen <10 und 15. Auf Waldböden, die eine saure Bodenreaktion und eine dicke, nicht zersetzte Streuschicht vorweisen, können weite C/N – Verhältnisse zwischen 25 und 30 herrschen. Bei engen C/N – Verhältnissen, kleiner 25, steht der freigesetzte Stickstoff den Pflanzen zur Verfügung. Bei weiten C/N – Verhältnissen, größer 25, kann Stickstoff vorübergehend gebunden sein und ist somit nicht unmittelbar pflanzenverfügbar (Amelung et al. 2018).

Der Mittelwert der C/N – Verhältnisse lag im A-Horizont bei 9.42 und im B-Horizont bei 8.91. Im A- Horizont wies Standort s7 mit 8.39 das engste C/N – Verhältnis auf und Standort s1 mit 10.53 das weiteste. Im B-Horizont wies Standort s8 mit 8.00 das engste und Standort s1 das weiteste C/N – Verhältnis auf. Somit hatte der Standort s1 das weiteste C/N-Verhältnis. Es ist ein extensiver Standort, der nicht gedüngt und 2-mal im Jahr genutzt wird.

Bei der Auswertung der bodenchemischen Analysen ist aufgefallen, dass Standort s7 im A-Horizont den höchsten Gesamtstickstoffgehalt und organischen Kohlenstoffgehalt, sowie das engste C/N-Verhältnis aufweist. Diese Zusammenhänge der Bodenchemischen Werte auf Standort s7, konnten auch in der Theorie bestätigt werden. Da es laut (Amelung et al. 2018) eine enge Beziehung zwischen dem Gesamtstickstoffgehalt und dem organischen Kohlenstoffgehalt im Boden gibt.

4.2.4 pH – Wert

Der Boden pH-Wert hat Einfluss auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsfähigkeit von Pflanzen. Durch steigende pH-Werte werden Mikroorganismen aktiviert, welche Huminstoffe abbauen und Stickstoff freisetzen (Amelung et al. 2018).

Sinkt der pH-Wert unter 5 spricht man von einer starken Bodenversauerung. Unter diesem pH-Wert kann die Bodenstruktur im Oberboden (Plattengefüge statt Krümelgefüge) sowie die Menge, Vielfalt und Aktivität von Bodenorganismen negativ beeinflusst werden. Der optimale pH-Wert eines Grünlandbodens sollte zwischen 5 und 6,2 liegen. Mineralische Nährelemente sind in diesem Bereich für Bodenorganismen und Grünlandpflanzen sehr gut verfügbar (Bohner et al. 2019).

Der Eintrag von Säuren in den Boden entsteht bei der Atmung von Mikroorganismen und Pflanzenwurzeln, da hier Kohlensäure gebildet wird. Durch Kationenaufnahme von Pflanzenwurzeln und durch den Abbau von organischer Substanz kann der pH-Wert sinken. Auch externe Faktoren wie saurer Regen oder der Einsatz von sauer wirkenden Düngemitteln können den pH-Wert verringern. Der Nährstoffentzug durch die Ernte von Grünland führt ebenfalls zu einer natürlichen Bodenversauerung (Bohner et al. 2002).

Tabelle 13: Ergebnis der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes aus einer Mischprobe des A- und B-Horizontes

| Nutzung | Standort | pH-Wert |
|----------------|-----------------|----------------|
| Mext (R) | s1 | 4.80 |
| Mint (Herbst) | s2 | 5.10 |
| Mint (Herbst) | s4 | 5.50 |
| Mint (Herbst) | s5 | 5.50 |
| Mint (Herbst) | s7 | 5.50 |
| Mint | s11 | 5.30 |
| Mint | s17 | 4.90 |
| Mint | s18 | 5.00 |
| Mint | s19 | 5.30 |
| MW | s12 | 4.70 |
| MW | s13 | 4.90 |
| MW | s16 | 4.80 |
| W | s6 | 5.60 |
| W | s8 | 5.00 |
| W | s9 | 5.10 |
| W | s14 | 5.30 |
| W | s15 | 4.70 |
| W(Pferd) | s3.1 | 5.80 |
| W(Pferd) | s3.2 | 5.70 |
| W(Pferd) | s10 | 5.30 |

Tabelle 14: Mittelwert und Standardabweichung der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes aus einer Mischprobe vom A- und B- Horizont

| Horizont | pH-Wert | n |
|-----------------|----------------|----------|
| A und B | 5.19 ± 0.34 | 20 |

Der Mittelwert des pH-Wertes aus der Mischprobe von A- und B-Horizont ergab 5.19. Der höchste pH-Wert mit 5.70 wurde auf Standort s3.2 erhoben, der niedrigste pH-Wert von 4.70 wurde auf den Standorten s15 und s12 erhoben.

4.2.5 Vergleich nach unterschiedlicher Nutzungsform

In diesem Kapitel werden die Mittelwerte vom organischen Kohlenstoff, Gesamtstickstoff, C/N – Verhältnis und pH-Wert der unterschiedlichen Nutzungsformen untereinander verglichen.

Tabelle 15: Mittelwert und Standardabweichung der bodenchemischen Analysen unterteilt in die verschiedenen Nutzungstypen

| Nutzung | Horizont | Corg (%) | Nges (%) | Corg/Nges |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Mext (R) | A | 4.21 ± --- | 0.40 ± --- | 10.53 ± --- |
| | B | 1.78 ± --- | 0.18 ± --- | 9.89 ± --- |
| Mint (Herbst) | A | 6.18 ± 2.00 | 0.69 ± 0.27 | 9.13 ± 0.60 |
| | B | 2.19 ± 0.55 | 0.25 ± 0.05 | 8.85 ± 1.03 |
| Mint | A | 5.03 ± 1.54 | 0.50 ± 0.16 | 10.09 ± 0.21 |
| | B | 3.07 ± 1.32 | 0.32 ± 0.13 | 9.49 ± 0.42 |
| MW | A | 4.65 ± 0.52 | 0.52 ± 0.07 | 9.02 ± 0.32 |
| | B | 2.10 ± 0.54 | 0.25 ± 0.08 | 8.46 ± 0.37 |
| W | A | 4.99 ± 1.43 | 0.55 ± 0.17 | 9.21 ± 0.48 |
| | B | 1.79 ± 0.58 | 0.20 ± 0.05 | 8.75 ± 0.69 |
| W(Pferd) | A | 4.70 ± 3.05 | 0.50 ± 0.31 | 9.29 ± 0.33 |
| | B | 1.66 ± 0.58 | 0.19 ± 0.07 | 8.58 ± 0.24 |

Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichung der bodenchemischen Analyse des pH-Wertes unterteilt in die verschiedenen Nutzungstypen

| Nutzung | Horizont | pH-Wert |
|----------------|-----------------|----------------|
| Mext (R) | A und B | 4.80 ± --- |
| Mint (Herbst) | A und B | 5.40 ± 0.20 |
| Mint | A und B | 5.13 ± 0.21 |
| MW | A und B | 4.80 ± 0.10 |
| W | A und B | 5.14 ± 0.34 |
| W(Pferd) | A und B | 5.60 ± 0.26 |

Corg = Gehalt an organischem Kohlenstoff in %

Corg/Nges = C/N Verhältnis

Nges = Gesamtstickstoffgehalt in %

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

In *Tabelle 15* kann man erkennen, dass die Nutzungsform Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung im A-Horizont die höchsten Werte an organischen Kohlenstoff (6.18%) und Gesamtstickstoff (0.69%), sowie das zweitengste C/N – Verhältnis (9.13) aufweisen konnte. Das weiteste C/N – Verhältnis (10.53) im A- Horizont wies die extensive Mähwiese auf.

Im B-Horizont wies die Nutzungsform Mähwiese intensiv die höchsten Werte an organischem Kohlenstoff (3.07%) und Gesamtstickstoff (0.32%) auf. Das engste C/N – Verhältnis (8.46) wies die Nutzungsform Mähweide auf. Das weiteste C/N – Verhältnis (9.89) konnte auf der extensiven Mähwiese festgestellt werden.

Es lässt sich erkennen, dass die intensiv genutzten Mähwiesen und die intensiv genutzten Mähwiesen mit Herbstbeweidung eher höhere Nges- und Corg- Werte aufwiesen als die restlichen Nutzungsformen. Dies könnte sich durch eine intensivere Düngung auf den intensiven Mähwiesen mit und ohne Herbstbeweidung erklären lassen. Auf der extensiven Mähwiese lässt sich durch fehlende Düngung das Gegenteil erkennen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass es bei dieser Nutzungsform nur einen Untersuchungsstandort gegeben hat, wodurch nur wenige Daten dieser Nutzungsform vorhanden gewesen sind.

In *Tabelle 16* sieht man, dass die intensiven Mähwiesen mit Herbstbeweidung, mit einem pH-Wert von 5.40, den zweithöchsten pH-Wert aller Nutzungen aufwiesen. Die Pferdeweide hatte mit 5.60 den höchsten und die Mähwiese extensiv sowie die Mähweide mit 4.80 den niedrigsten pH-Wert auf.

4.3 Bodentextur

In *Tabelle 17* wird anhand der prozentuellen Verteilung von Ton, Schluff und Sand die Bodenart der Untersuchungsstandorte beschrieben. Dazu wurden Bodenproben aus dem A- und B-Horizont auf ihre Korngrößenverteilung im Feinboden untersucht (*Siehe Kapitel 3.6.5*).

Bei Standort s7 war im A-Horizont die Bestimmung der Bodenart nicht möglich, da die Bodenprobe einen Humusgehalt von >15% hatte.

Tabelle 17: Bodentextur und Bodenart der einzelnen Untersuchungsstandorte

| Standort | Nutzung | Horizont | % Ton | %Schluff | %Sand | Bodenart |
|----------|-------------|----------|----------------------------|----------|-------|----------|
| S1 | Mext (R) | A | 5.7 | 48.3 | 46.0 | IS |
| S1 | Mext (R) | B | 2.8 | 49.3 | 47.9 | uS |
| S2 | Mint Herbst | A | 17.1 | 39.3 | 43.6 | sL |
| S2 | Mint Herbst | B | 13.7 | 39.1 | 47.2 | IS |
| S3.1 | W(Pferd) | A | 16.2 | 33.9 | 49.9 | sL |
| S3.1 | W(Pferd) | B | 11.5 | 40.6 | 47.9 | IS |
| S3.2 | W(Pferd) | A | 16.3 | 49.2 | 34.5 | sL |
| S3.2 | W(Pferd) | B | 14.9 | 34.5 | 50.6 | IS/sL |
| S4 | Mint Herbst | A | 20.9 | 39.9 | 39.2 | sL |
| S4 | Mint Herbst | B | 13.3 | 38.4 | 48.3 | IS |
| S5 | Mint Herbst | A | 16.1 | 44.4 | 39.5 | sL |
| S5 | Mint Herbst | B | 11.4 | 41.1 | 47.5 | IS |
| S6 | W | A | 18.1 | 53.2 | 28.7 | sL |
| S6 | W | B | 14.1 | 39.1 | 46.7 | IS |
| S7 | Mint Herbst | A | Humusgehalt > 15% d. Masse | | | |
| S7 | Mint Herbst | B | 30.1 | 53.8 | 16.2 | L |
| S8 | W | A | 18.1 | 43.6 | 38.4 | sL |
| S8 | W | B | 18.8 | 39.3 | 41.9 | sL |
| S9 | W | A | 18.3 | 44.5 | 37.2 | sL |
| S9 | W | B | 16.2 | 43.3 | 40.5 | sL |
| S10 | W(Pferd) | A | 8.0 | 38.3 | 53.7 | IS |
| S10 | W(Pferd) | B | 9.8 | 46.9 | 43.3 | IS |
| S11 | Mint | A | 8.8 | 31.2 | 60.0 | IS |
| S11 | Mint | B | 7.7 | 42.6 | 49.7 | IS |
| S12 | MW | A | 27.0 | 46.5 | 26.5 | L |
| S12 | MW | B | 26.7 | 47.0 | 26.3 | L |
| S13 | MW | A | 15.0 | 35.8 | 49.2 | IS/sL |
| S13 | MW | B | 12.2 | 34.1 | 53.7 | IS |
| S14 | W | A | 17.3 | 51.2 | 31.6 | sL |
| S14 | W | B | 12.6 | 52.9 | 34.4 | IS |
| S15 | W | A | 12.3 | 55.0 | 32.6 | Is/sU |
| S15 | W | B | 10.2 | 56.2 | 33.7 | sU |
| S16 | MW | A | 12.1 | 61.7 | 26.3 | sU |
| S16 | MW | B | 11.8 | 60.5 | 27.7 | sU |
| S17 | Mint | A | 20.5 | 44.6 | 34.8 | sL |
| S17 | Mint | B | 16.0 | 47.7 | 36.3 | sL |
| S18 | Mint | A | 19.3 | 42.7 | 38.0 | sL |
| S18 | Mint | B | 15.7 | 43.1 | 41.2 | sL |
| S19 | Mint | A | 24.0 | 47.2 | 28.9 | sL |
| S19 | Mint | B | 19.2 | 46.1 | 34.6 | sL |

T = Ton, U = Schluff, S = Sand, L = Lehm, t = tonig

u = schluffig, s = sandig, l = lehmig

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

Durch die Zusammensetzung der Korngrößenverteilung von Ton, Schluff und Sand lässt sich die Bodenart ableiten. Die Korngrößen einer Bodenart werden durch das Ausgangsmaterial sowie durch dessen Entstehung und Verwitterung bestimmt (Amelung et al. 2018).

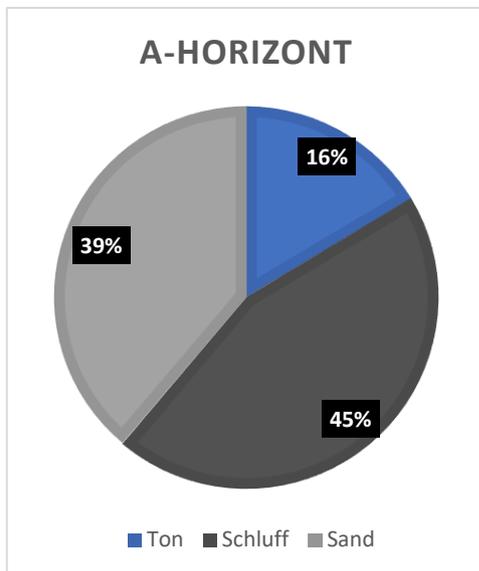


Abbildung 20: Korngrößenverteilung im A-Horizont

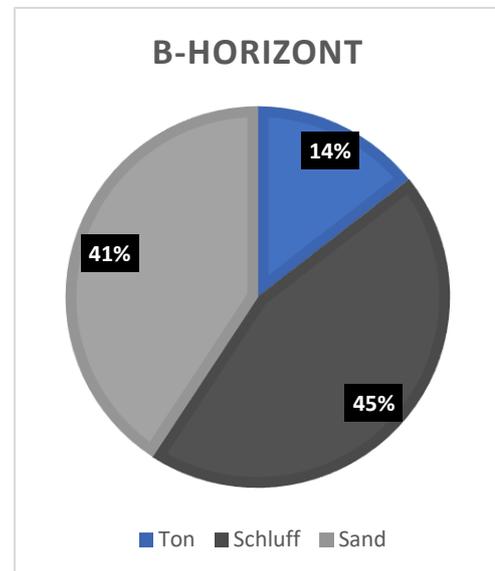


Abbildung 21: Korngrößenverteilung im B-Horizont

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen die Korngrößenverteilung im A- und im B-Horizont. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der unterschiedlichen Horizonte erkennen. Im B-Horizont ist der Tongehalt mit 14% etwas geringer als im A-Horizont mit 16%. Der Sandanteil ist im B-Horizont mit 41% um 2% höher als im A-Horizont.

4.4 Bodenwassergehalt

Laut Amelung et al. (2018) enthält jeder Boden, unter natürlichen Bedingungen, Wasser. Um dieses Bodenwasser aus dem Boden zu entfernen, muss der Boden bei 105 °C für 16 Stunden getrocknet werden. Grobporen sind wichtig für die Belüftung des Bodens, Mittelporen sind wiederum wichtig für den Wasservorrat im Boden und die Leitfähigkeit des Wassers.

Für die Ermittlung des Wassergehaltes in den Stechzylinderinhalten, wurden diese im feuchten Zustand sowie im trockenen Zustand, nach einer 24 - stündigen Trocknung

bei 105 °C, gewogen. Durch die Differenz der beiden Wiegunen konnte auf den Bodenwassergehalt geschlossen werden. Da die Erhebungen mehrere Wochen gedauert haben, kann die Bodenfeuchte der unterschiedlichen Standorte jedoch variieren, da in diesem Zeitraum unterschiedliche Niederschlagsbedingungen herrschten.

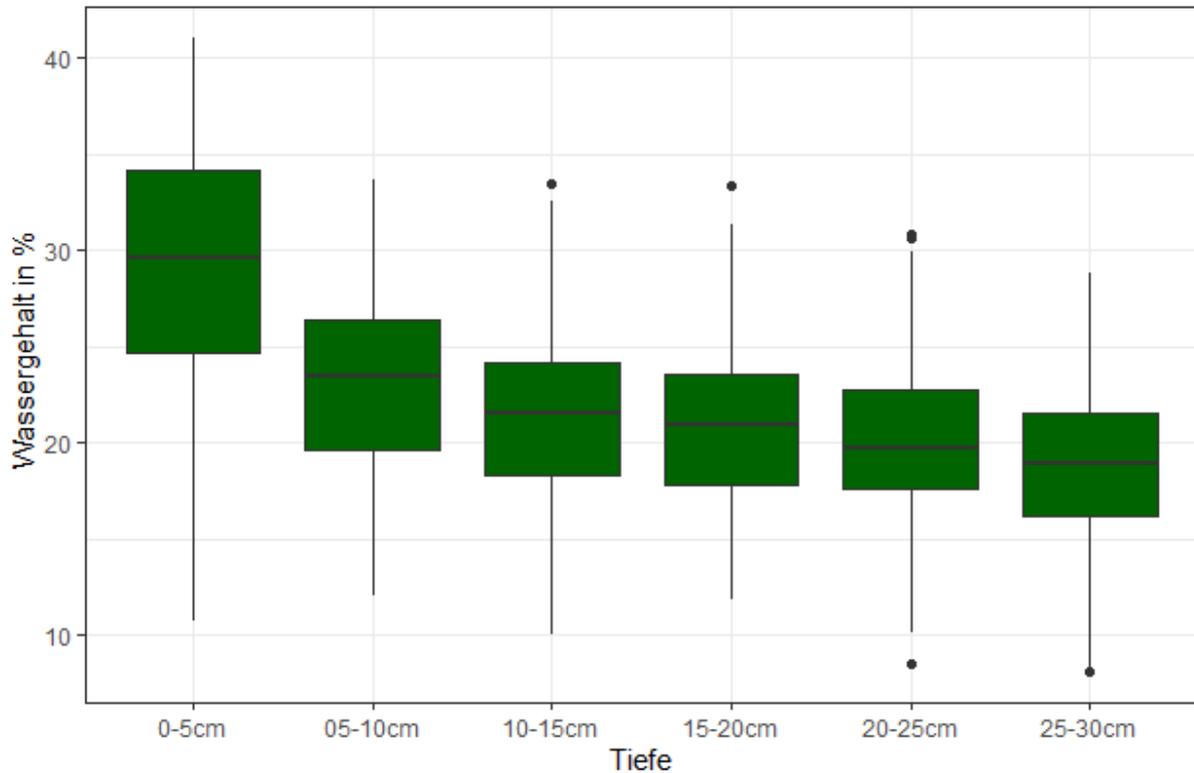


Abbildung 22: Boxplot-Diagramm des errechneten gravimetrischen Bodenwassergehaltes (%) in den unterschiedlichen Tiefenstufen aller Untersuchungsstandorte

Tabelle 18: Mittelwerte des gravimetrischen Wassergehaltes (%) aller untersuchten Standorte

| Tiefe in cm | MW | | sd | median | min | max | n |
|-------------|-------|---|------|--------|-------|-------|-----|
| 0-5 | 28.97 | ± | 7.12 | 29.64 | 10.69 | 41.05 | 120 |
| 5-10 | 23.11 | ± | 5.08 | 23.45 | 12 | 33.63 | 120 |
| 10-15 | 21.51 | ± | 4.79 | 21.50 | 9.95 | 33.52 | 120 |
| 15-20 | 20.99 | ± | 4.44 | 20.88 | 11.78 | 33.33 | 120 |
| 20-25 | 20.24 | ± | 4.49 | 19.70 | 8.44 | 30.81 | 120 |
| 25-30 | 18.98 | ± | 4.36 | 18.94 | 8.11 | 28.77 | 120 |

MW = Mittelwert, sd = Standardabweichung, min = Minimum, max = Maximum, n = Grundgesamtheit

In *Abbildung 22* sowie in *Tabelle 18* lässt sich erkennen das auf allen Untersuchungsstandorten, die obersten Bodenschichten von 0-5cm die höchsten

mittleren Wassergehalte besitzen (28.97%). Diese Wassergehalte nehmen kontinuierlich mit steigender Bodentiefe ab bis sie in der Bodentiefe von 25-30cm einen mittleren Wassergehalt von 18.98% erreichen.

Es kann vermutet werden, dass die hohen Wassergehalte der oberen Bodenschicht durch den Niederschlag stärker beeinflusst werden als die Wassergehalte in den tieferen Bodenschichten. Ebenfalls könnten auch die höheren Lagerungsdichten in den tieferen Bodenschichten (*siehe Abbildung 23*) den Wassergehalt im Boden mitbeeinflussen, da dadurch auch die Porenverteilung im Boden beeinflusst werden könnte. Um herauszufinden, wie sich die Bodenporenverteilung im Boden auf den Bodenwassergehalt auswirkt, würde es jedoch weitere Untersuchungen zu diesem Thema benötigen.

Laut Amelung et al. (2018) kann der Porenanteil eines Bodens abnehmen, wenn die Bodenoberfläche belastet wird und die Berührungspunkte zwischen den Primärteilchen im Boden mehr werden. Ebenfalls wird angemerkt das höhere Bodendichten und damit weniger Porenanteile in tieferen Bodenschichten, durch eine verminderte Bioturbation und Kryoturbation entstehen können.

4.5 Lagerungsdichte

4.5.1 Lagerungsdichten der untersuchten Standorte

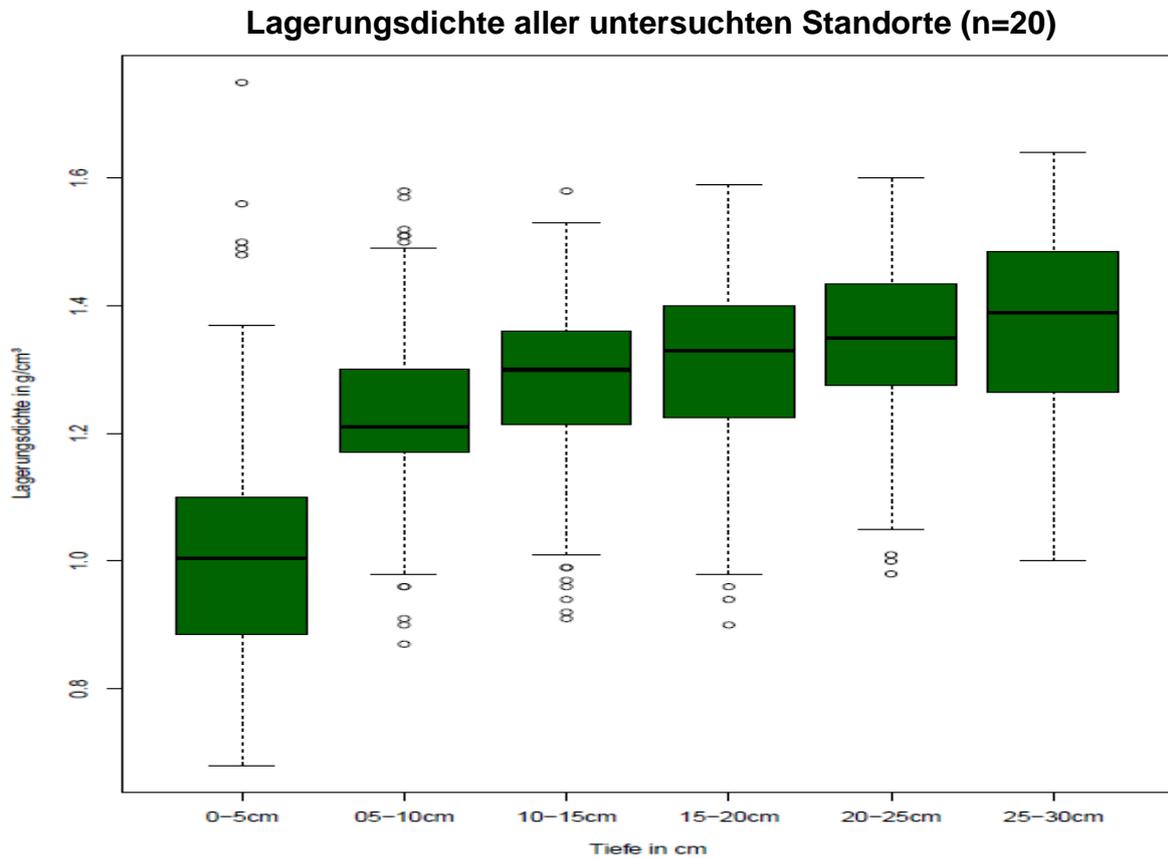


Abbildung 23: Boxplot-Diagramm der Lagerungsdichte in g/cm^3 in den unterschiedlichen Tiefenstufen der Untersuchungsstandorte

Tabelle 19: Lagerungsdichte aller untersuchten Standorte in g/cm^3

| Tiefe in cm | pB | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|-----|
| 0-5 | 1.01 | ± | 0.18 | 1.01 | 0.68 | 1.75 | 120 |
| 5-10 | 1.23 | ± | 0.13 | 1.21 | 0.87 | 1.58 | 120 |
| 10-15 | 1.28 | ± | 0.14 | 1.30 | 0.91 | 1.58 | 120 |
| 15-20 | 1.30 | ± | 0.15 | 1.33 | 0.90 | 1.59 | 120 |
| 20-25 | 1.34 | ± | 0.13 | 1.35 | 0.98 | 1.60 | 120 |
| 25-30 | 1.37 | ± | 0.14 | 1.39 | 1.00 | 1.64 | 120 |

pB = Lagerungsdichte, sd = Standardabweichung, min = Minimum, max = Maximum, n = Grundgesamtheit

In *Abbildung 23* und *Tabelle 19* kann man erkennen, dass sich die Lagerungsdichte mit steigender Messtiefe erhöht. Die Lagerungsdichte ist in der Tiefenstufe 0-5 cm mit 1.01 g/cm^3 am geringsten. Die höchste Lagerungsdichte liegt in der Tiefenstufe 25-30cm mit 1.37 g/cm^3 .

Laut *Tabelle 20* wies der Mähweide Standort s12 in der Tiefenstufe 0-5 cm mit 0.78 g/cm^3 die geringste Lagerungsdichte auf. Die höchste Lagerungsdichte mit 1.51 g/cm^3 wies der Standort s3.1 in der Tiefenstufe von 0-5 cm auf. Generell konnten am Standort s3.1 die höchsten Lagerungsdichten in den Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-15 und 15-20 cm erhoben werden. Diese hohen Lagerungsdichten werden wahrscheinlich erreicht, weil der Standort S3.1 eine sehr intensiv bestoßene (Sommer und Winter) sowie auch befahrene Pferdeweide ist. Die höchste Lagerungsdichte in der Tiefenstufe 20-25 und 25-30 cm, mit 1.51 g/cm^3 und 1.54 g/cm^3 , konnte ebenfalls auf einer Pferdeweide (Standort s10) erhoben werden. Der Pferdeweidestandort s10 wird ebenfalls, im Winter und im Sommer, intensiv beweidet. Die niedrigste Lagerungsdichte in der Tiefenstufe 25-30 cm hatte der intensive Mähwiesenstandort s17, mit 1.12 g/cm^3 .

Laut Diepolder et al. (2009) weisen Grünlandböden im Oberboden meist eine Lagerungsdichte von $0,9 - 1,2 \text{ g/cm}^3$ auf. Diese Annahme lässt sich bei den erhobenen Werten grundsätzlich bestätigen, wobei die Lagerungsdichten in einer Tiefe ab 15cm eher eine Lagerungsdichte von $>1,3 \text{ g/cm}^3$ aufweisen.

Nach der Einstufung der Lagerungsdichten von Mineralböden in *Tabelle 2* laut AD-HOC-AG BODEN (2005), weisen die Mittelwerte der Tiefenstufen 0 – 5 cm „sehr geringe“ Lagerungsdichten und die Tiefenstufen von 5 – 30 cm „geringe“ Lagerungsdichten auf.

Nach Amelung et al. (2018) erzielen die obersten Bodenschichten im Grünland niedrige Lagerungsdichten, da durch die intensive Durchwurzelung des Oberbodens, zwischen 0 und 7 cm, sowie durch die dauerhafte Bodendeckung und der damit einhergehenden gesteigerten Mikroorganismenaktivität, ein stabiles Krümelgefüge entstehen kann. Durch die intensive Durchwurzelung entstehen erhöhte Rissbildungen sowie eine erhöhte Intensität von Quellung und Schrumpfung. Der Wurzelbereich auf einem intensiven Grünlandstandort kann bis über 50 cm tief in den Boden reichen. Auf intensiven Weiden, die bei zu feuchten Wetterbedingungen von Weidetieren bestoßen werden, kann sich das Krümelgefüge zu einem Plattengefüge mit geringerem

Scherwiderstand verändern. Auf solchen intensiven Weidestandorten reicht der Wurzelbereich nur mehr 10-20 cm tief.

Eine Intensivierung von Mahd und Beweidung im Grünland fördert Flachwurzler mit geringer Wurzelmächtigkeit. In diesem Fall werden die ersten 5 cm im Boden am intensivsten bewurzelt. Dadurch wird eine gleichmäßige Wurzelverteilung im Boden verhindert, was wiederum negative Auswirkungen auf das Bodengefüge haben kann (Bohner und Herndl 2011). Laut Starz (2007) können Verdichtungen Teile des Bodengefüges so verkleben, dass diese keine Hohlräume mehr besitzen und die Wurzeln an diesen Verdichtungen vorbeiwachsen müssen.

Tabelle 20: Ergebnisse der Lagerungsdichte in g/cm³ der einzelnen Standorte, zu sehen sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der jeweiligen Tiefenstufen.

| Nutzung | Standort Nr. | 0-5cm | | | 5-10cm | | | 10-15cm | | | 15-20cm | | | 20-25cm | | | 25-30cm | | |
|---------------|-----------------|-------|---|------|--------|---|------|---------|---|------|---------|---|------|---------|---|------|---------|---|------|
| | | pB | ± | sd | pB | ± | sd | pB | ± | sd | pB | ± | sd | pB | ± | sd | pB | ± | sd |
| Mext (R) | s1 | 0.94 | ± | 0.09 | 1.18 | ± | 0.18 | 1.16 | ± | 0.21 | 1.14 | ± | 0.19 | 1.27 | ± | 0.13 | 1.30 | ± | 0.17 |
| Mint (Herbst) | s2 | 1.15 | ± | 0.07 | 1.27 | ± | 0.03 | 1.22 | ± | 0.11 | 1.28 | ± | 0.09 | 1.33 | ± | 0.05 | 1.29 | ± | 0.07 |
| Mint (Herbst) | s4 | 0.92 | ± | 0.07 | 1.23 | ± | 0.13 | 1.31 | ± | 0.04 | 1.31 | ± | 0.05 | 1.36 | ± | 0.02 | 1.39 | ± | 0.15 |
| Mint (Herbst) | s5 | 1.08 | ± | 0.02 | 1.20 | ± | 0.02 | 1.28 | ± | 0.06 | 1.28 | ± | 0.07 | 1.33 | ± | 0.05 | 1.40 | ± | 0.12 |
| Mint (Herbst) | s7 | 0.79 | ± | 0.03 | 1.18 | ± | 0.07 | 1.29 | ± | 0.05 | 1.36 | ± | 0.08 | 1.39 | ± | 0.06 | 1.32 | ± | 0.07 |
| Mint | s11 | 1.02 | ± | 0.08 | 1.22 | ± | 0.07 | 1.30 | ± | 0.08 | 1.38 | ± | 0.03 | 1.35 | ± | 0.05 | 1.41 | ± | 0.02 |
| Mint | s17 | 0.91 | ± | 0.08 | 1.08 | ± | 0.10 | 1.10 | ± | 0.08 | 1.11 | ± | 0.10 | 1.09 | ± | 0.05 | 1.12 | ± | 0.04 |
| Mint | s18 | 1.01 | ± | 0.11 | 1.22 | ± | 0.05 | 1.23 | ± | 0.04 | 1.24 | ± | 0.08 | 1.32 | ± | 0.08 | 1.33 | ± | 0.05 |
| Mint | s19 | 0.81 | ± | 0.04 | 0.97 | ± | 0.04 | 0.98 | ± | 0.05 | 1.00 | ± | 0.03 | 1.07 | ± | 0.08 | 1.18 | ± | 0.11 |
| MW | s12 | 0.78 | ± | 0.07 | 1.18 | ± | 0.06 | 1.20 | ± | 0.11 | 1.19 | ± | 0.10 | 1.34 | ± | 0.14 | 1.39 | ± | 0.15 |
| MW | s13 | 1.03 | ± | 0.07 | 1.26 | ± | 0.10 | 1.28 | ± | 0.05 | 1.28 | ± | 0.10 | 1.25 | ± | 0.10 | 1.28 | ± | 0.16 |
| MW | s16 | 0.91 | ± | 0.08 | 1.23 | ± | 0.08 | 1.34 | ± | 0.07 | 1.47 | ± | 0.04 | 1.49 | ± | 0.04 | 1.46 | ± | 0.01 |
| W | s6 | 0.91 | ± | 0.05 | 1.31 | ± | 0.07 | 1.33 | ± | 0.07 | 1.36 | ± | 0.04 | 1.35 | ± | 0.09 | 1.40 | ± | 0.14 |
| W | s8 | 0.94 | ± | 0.06 | 1.24 | ± | 0.06 | 1.37 | ± | 0.05 | 1.42 | ± | 0.05 | 1.44 | ± | 0.06 | 1.50 | ± | 0.08 |
| W | s9 | 1.01 | ± | 0.04 | 1.17 | ± | 0.02 | 1.26 | ± | 0.06 | 1.25 | ± | 0.09 | 1.25 | ± | 0.09 | 1.28 | ± | 0.03 |
| W | s14 | 1.06 | ± | 0.05 | 1.20 | ± | 0.04 | 1.30 | ± | 0.03 | 1.39 | ± | 0.04 | 1.46 | ± | 0.03 | 1.51 | ± | 0.02 |
| W | s15 | 1.16 | ± | 1.14 | 1.24 | ± | 0.10 | 1.31 | ± | 0.07 | 1.29 | ± | 0.12 | 1.34 | ± | 0.07 | 1.39 | ± | 0.09 |
| W (Pferd) | s3.1 | 1.51 | ± | 0.15 | 1.52 | ± | 0.05 | 1.51 | ± | 0.05 | 1.51 | ± | 0.05 | 1.50 | ± | 0.06 | 1.50 | ± | 0.09 |
| W (Pferd) | s3.2 | 1.08 | ± | 0.06 | 1.37 | ± | 0.07 | 1.37 | ± | 0.07 | 1.33 | ± | 0.07 | 1.38 | ± | 0.08 | 1.40 | ± | 0.07 |
| W (Pferd) | s10 | 1.27 | ± | 0.08 | 1.42 | ± | 0.08 | 1.47 | ± | 0.05 | 1.48 | ± | 0.05 | 1.51 | ± | 0.06 | 1.54 | ± | 0.08 |

pB = Lagerungsdichte

sd = Standardabweichung

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

Beim Vergleich der Lagerungsdichtedaten (*siehe Tabelle 21*) des Steirischen Murtales mit dem Salzburger Flachgau von Gehmacher (2016) fiel auf, dass die Böden in Bezug auf die Tiefenstufen, ähnliche Lagerungsdichten aufweisen. Auffallend ist, dass auch hier die oberste Tiefenstufe (0-5 cm) mit 0.93 g/cm³ die niedrigste Lagerungsdichte besitzt. Die Tiefenstufe 25-30 cm besitzt mit 1.48 g/cm³ die höchste Lagerungsdichte.

Tabelle 21: Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichung der Lagerungsdichte (g/cm³) verschiedener Tiefenstufen des Steirischen Murtales und des Salzburger Flachgaus nach Gehmacher (2016).

| Tiefe in cm | Steirisches Murtal | | | | Salzburger Flachgau | | | |
|----------------|--------------------|---|------|-----|---------------------|---|------|-----|
| | pB | | sd | n | pB | | sd | n |
| 0-5 | 1.01 | ± | 0.18 | 120 | 0.93 | ± | 0.16 | 132 |
| 5-10 | 1.23 | ± | 0.13 | 120 | 1.14 | ± | 0.15 | 132 |
| 10-15 | 1.28 | ± | 0.14 | 120 | 1.29 | ± | 0.17 | 132 |
| 15-20 | 1.30 | ± | 0.15 | 120 | 1.38 | ± | 0.14 | 132 |
| 20-25 | 1.34 | ± | 0.13 | 120 | 1.46 | ± | 0.11 | 132 |
| 25-30 | 1.37 | ± | 0.14 | 120 | 1.48 | ± | 0.11 | 132 |

Die Grünlandnutzungen der untersuchten Standorte im Murtal und im Flachgau sind ähnlich. Es wurden intensive und extensive Mähwiesen sowie Weiden und Mähweiden untersucht. Im Murtal wurden auch Pferdeweidestandorte und Mähwiesenstandorte mit Herbstbeweidung untersucht. In der *Abbildung 24* kann man erkennen, dass die Lagerungsdichten in den ersten beiden Tiefenstufen zwischen 0 und 10 cm im Flachgau geringer sind und im Tiefenbereich von 10-15 cm nahezu gleich sind. In den Tiefenstufen zwischen 15 und 30 cm sind die Lagerungsdichten im Salzburger Flachgau höher als die Lagerungsdichten im Steirischen Murtal.

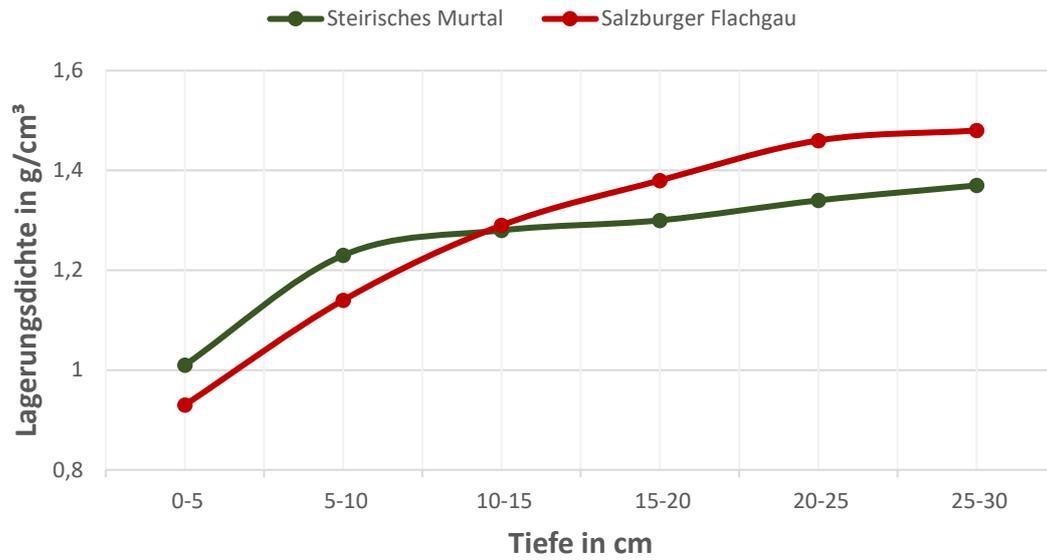


Abbildung 24: Vergleich der Lagerungsdichten unterschiedlicher Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau nach Gehmacher (2016).

4.5.2 Korrelation Lagerungsdichte und errechneter Bodenwassergehalt

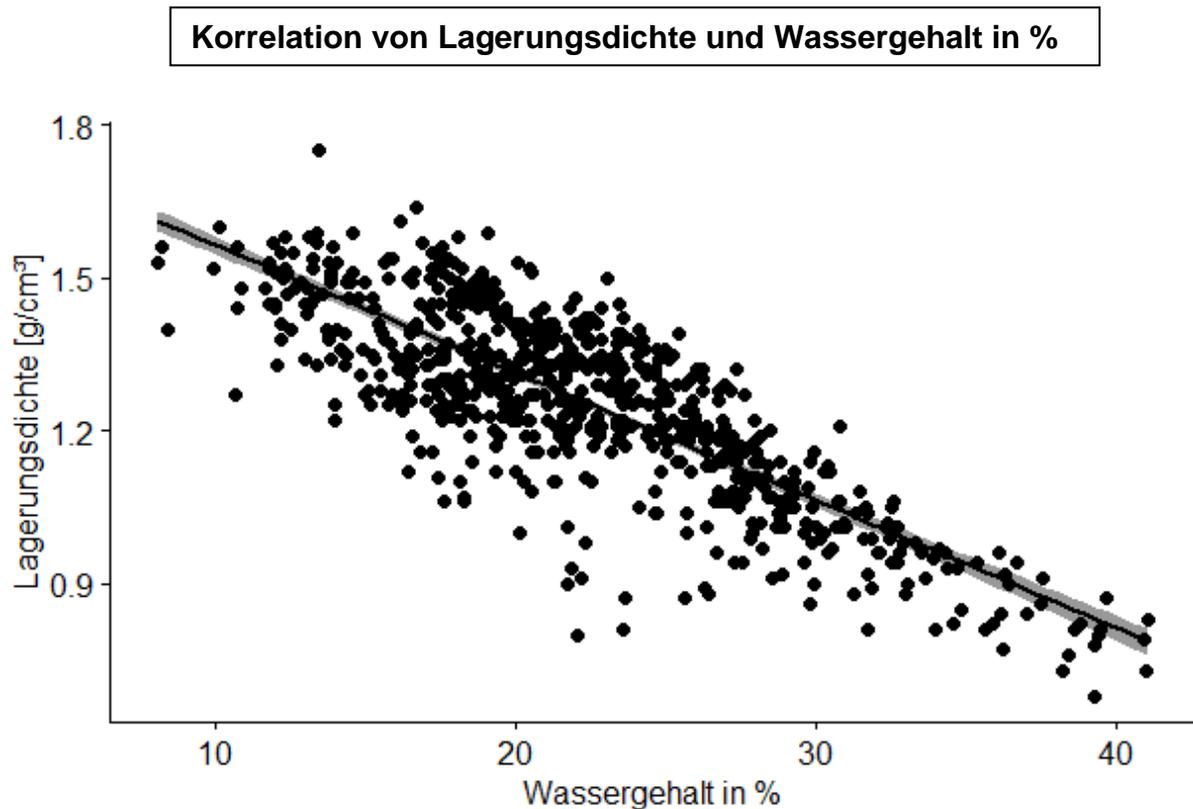


Abbildung 25: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und errechnetem gravimetrischen Wassergehalt in %

Tabelle 22: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und errechnetem gravimetrischen Wassergehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|-----------------|-----|--|----------------|
| Lagerungsdichte | 120 | -0.76 | < 0.0001 ** |
| Wassergehalt | 120 | | |

In *Abbildung 25* und *Tabelle 22* kann man eine gegenseitige Beeinflussung von Lagerungsdichte und Bodenwassergehalt erkennen. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine hoch signifikante ($p < 0.0001$) stark negative Korrelation zwischen Lagerungsdichte und Bodenwassergehalt. Dies bedeutet, dass die Lagerungsdichte mit steigendem Wassergehalt sinkt. Der Spearmanische Rangkorrelationskoeffizient ergibt -0.76.

Der Porenanteil des Bodens könnte hier einen großen Einfluss auf den Wassergehalt haben, da laut Blume et al. (2011) die Anzahl sowie die Größe der Bodenporen von

der Bodenart, der Lagerungsdichte, dem Bodengefüge und dem Humusgehalt abhängt. Besitzt ein Boden also eine höhere Lagerungsdichte, so hat er auch weniger luft- und wassergefüllte Bodenporen, vor allem Grobporen.

4.5.3 Korrelation Lagerungsdichte und Gehalt an organischem Kohlenstoff

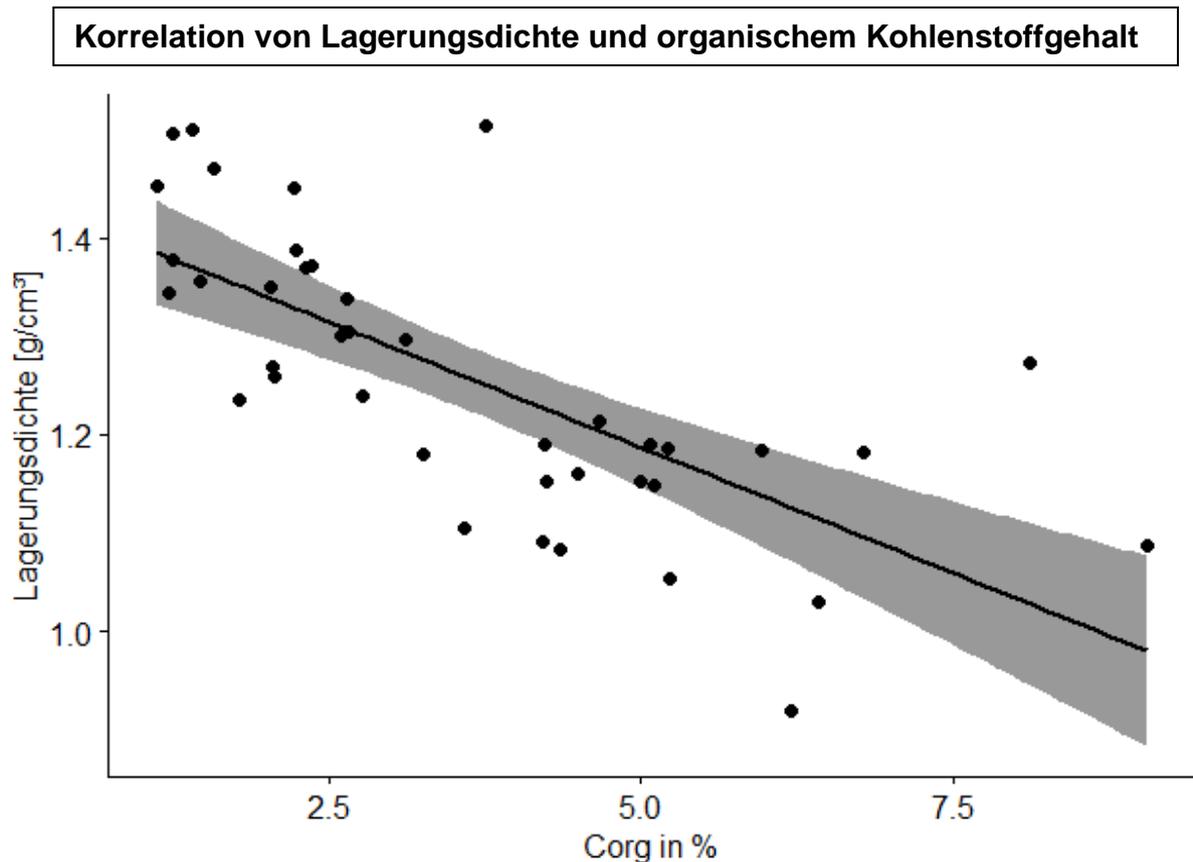


Abbildung 26: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und organischem Kohlenstoffgehalt in %

Tabelle 23: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und organischem Kohlenstoffgehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|-----------------|----|--|----------------|
| Lagerungsdichte | 40 | -0.77 | < 0.0001 ** |
| Corg | 40 | | |

Laut der Spearmanschen Rangkorrelationsauswertung (Tabelle 23) liegt eine statistisch hoch signifikante ($p = <0.0001$) stark negative Korrelation zwischen Lagerungsdichte und organischem Kohlenstoffgehalt vor. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.77. In Abbildung 26 erkennt man diese negative

Korrelation. Je höher der Wert an organischem Kohlenstoff im Boden ist, desto niedriger ist die Lagerungsdichte im Boden. Da im stark durchwurzelten und gut mit Nährstoffen, Luft und Bodenorganismen versorgten Oberboden höhere Humusgehalte vorzufinden sind, kann im Boden leichter eine Krümelstruktur entstehen, da Wurzeln und Humus den Boden lockern. Eine höhere Lagerungsdichte in tieferen Bodenschichten könnte auf die weniger starke Durchwurzelung, und den damit einhergehenden geringeren Humusgehalt, zurückzuführen sein.

Laut Bohner et al. (2019) kennzeichnet eine krümelige Struktur einen belebten und lockeren Boden. Eine plattige Bodenstruktur wiederum kann Verdichtungen anzeigen und ist arm an Bodenporen und Bodenlebewesen.

4.5.4 Korrelation Lagerungsdichte und Bodentextur

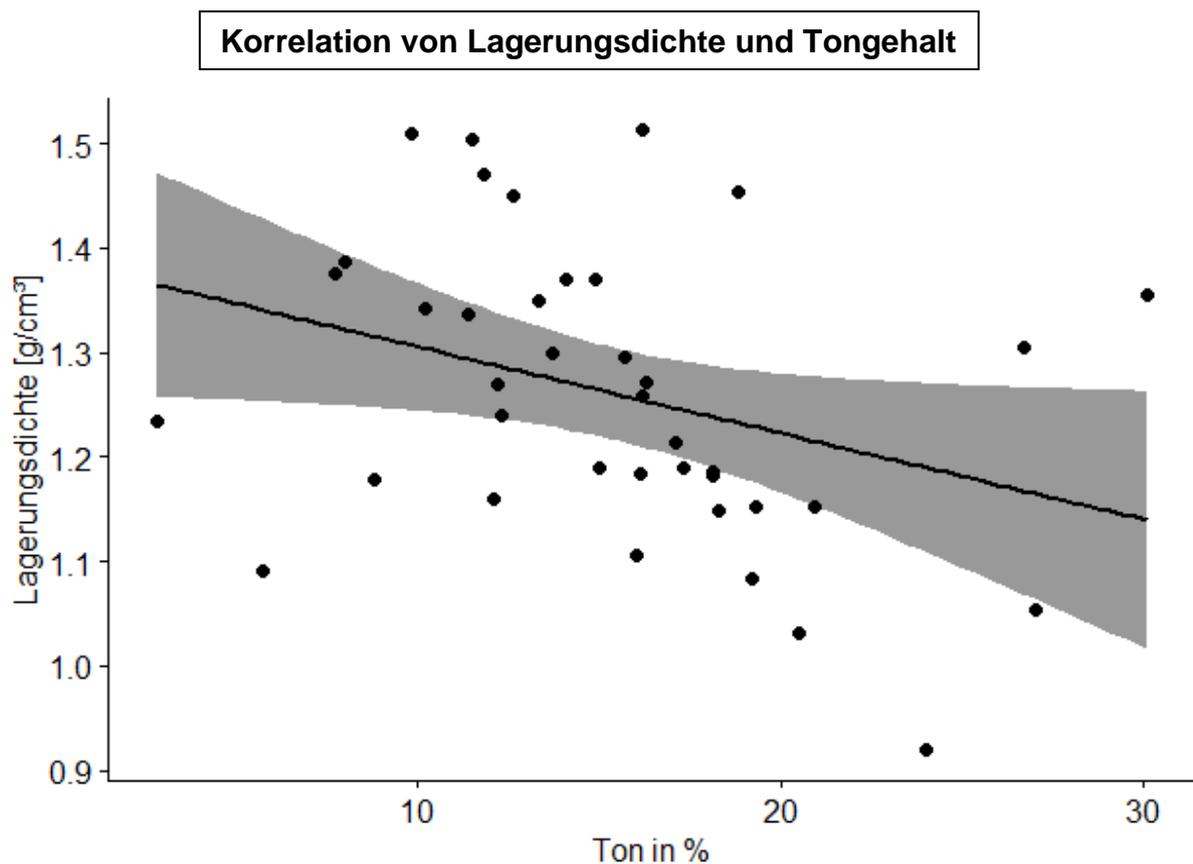


Abbildung 27: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm³ und Tongehalt in %

Tabelle 24: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Tongehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|-----------------|----|--|----------|
| Lagerungsdichte | 40 | -0.41 | < 0.01 * |
| Ton | 39 | | |

In *Abbildung 27* und *Tabelle 24* wurde der Zusammenhang von Lagerungsdichte und Tongehalt dargestellt. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine signifikante ($p < 0.01$) negative Korrelation zwischen Lagerungsdichte und Tongehalt. Der Spearmanische Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.41. Dies bedeutet, dass bei steigendem Tongehalt die Lagerungsdichte geringer wird. Das könnte damit zusammenhängen, dass Böden mit einem hohen Tongehalt, bei Wassereinfluss aufquellen und bei Trockenheit zusammenschrumpfen. Dieses Quellen und Schrumpfen lockert den Boden und könnte somit für einen höheren Porenanteil im Boden sorgen.

Laut Amelung et al. (2018) und Blume et al. (2011) haben Tonteilchen die kleinsten Korngrößen gefolgt von Schluff- und Sandteilchen. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Korngrößen sind, desto größer ist das Porenvolumen im Boden. Man kann hier also erkennen, dass das größere Porenvolumen von Tonböden einen positiven Einfluss auf die Lagerungsdichte haben könnte.

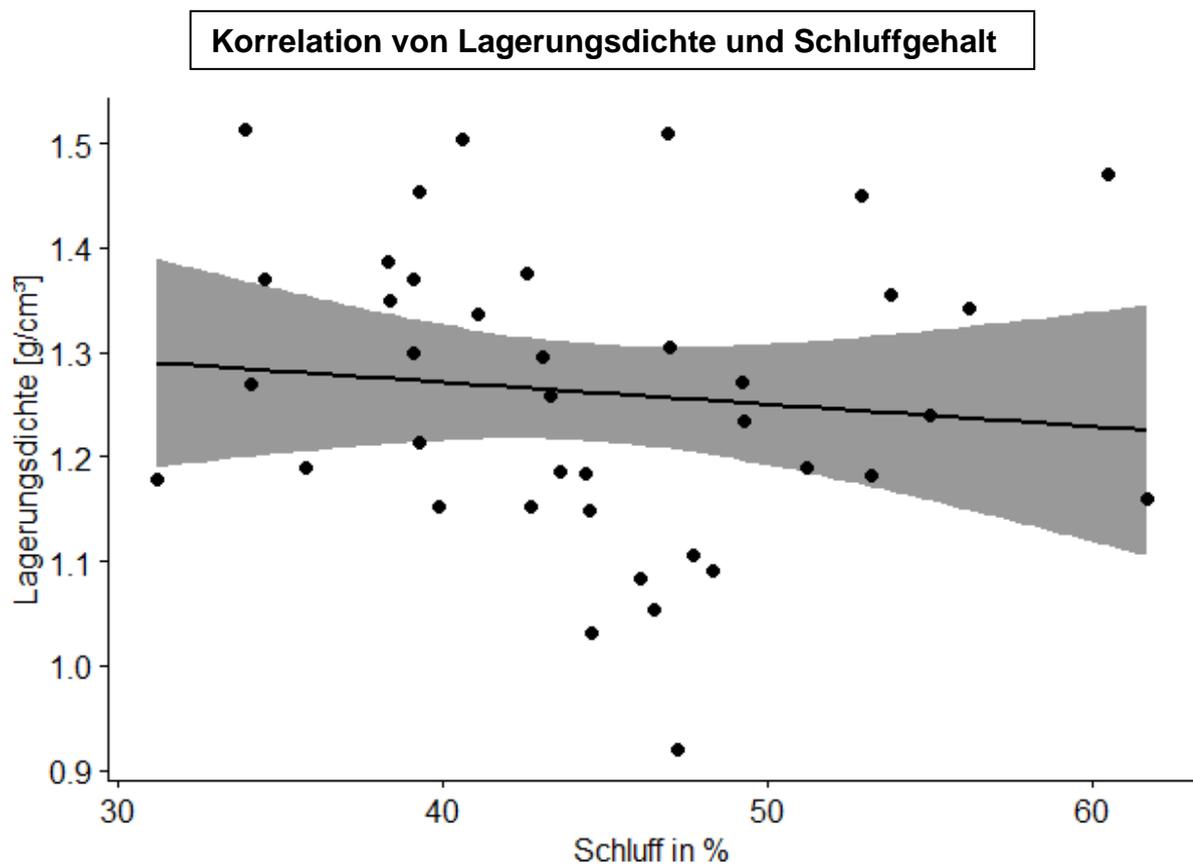


Abbildung 28: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Schluffgehalt in %

Tabelle 25: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Schluffgehalt in %

| | n | Spearmanscher Rangkorrelationskoeffizient | p |
|-----------------|----|---|---------|
| Lagerungsdichte | 40 | | >0.05 |
| Schluff | 39 | -0.20 | n.s. |

In *Abbildung 28* und *Tabelle 25* wurde der Zusammenhang zwischen Schluffgehalt und Lagerungsdichte dargestellt. Die Rangkorrelationsauswertung ergab eine nicht signifikante ($p > 0.05$) negative Korrelation von Lagerungsdichte und Schluffgehalt im Boden. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.20. Dies bedeutet, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Schluffgehalt erkannt wurde.

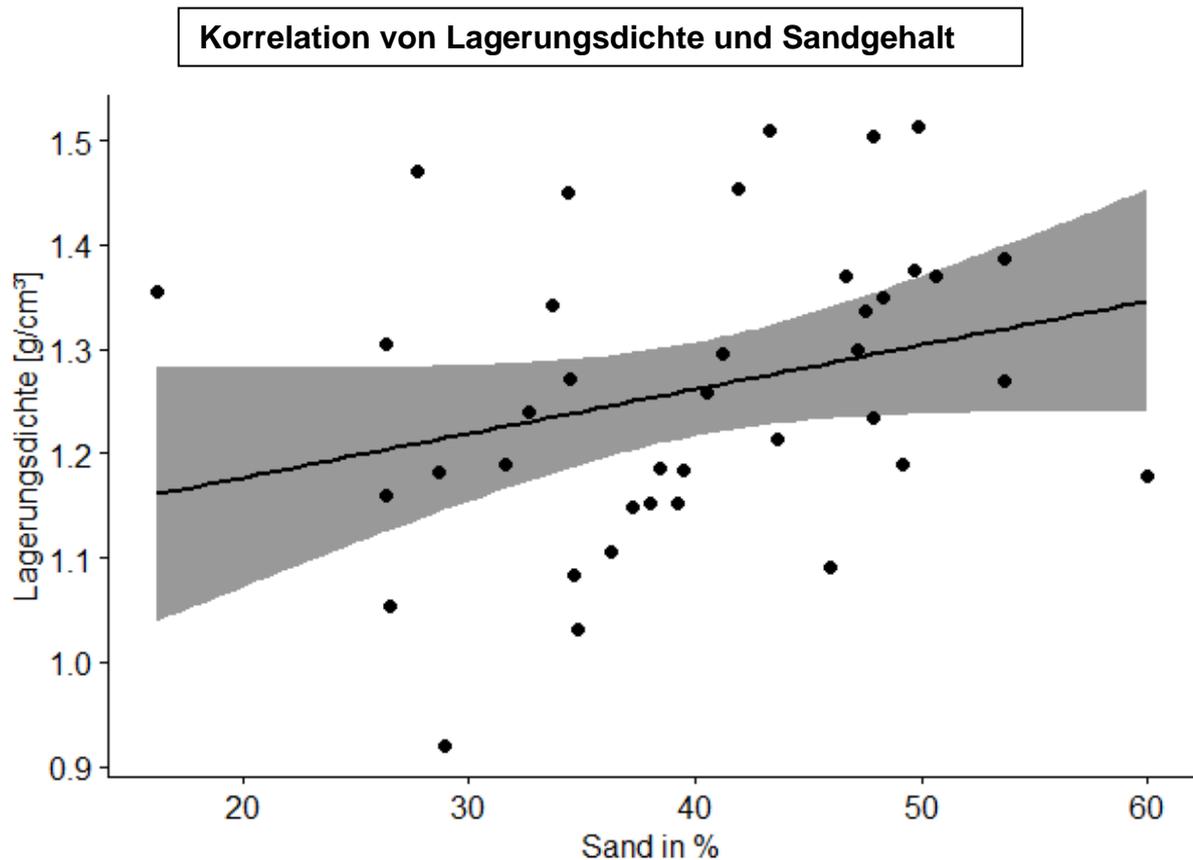


Abbildung 29: Korrelation der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Sandgehalt in %

Tabelle 26: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Lagerungsdichte in g/cm^3 und Sandgehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|-----------------|----|--|-----------|
| Lagerungsdichte | 40 | 0.33 | <0.05 * |
| Sand | 39 | | |

In *Abbildung 29* und *Tabelle 26* wurde der Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und dem Sandgehalt im Boden dargestellt. Die Rangkorrelationsauswertung nach Spearman ergab eine signifikante ($p < 0,05$) positive Korrelation zwischen Lagerungsdichte und Sandgehalt im Boden. Der Spearmanische Rangkorrelationskoeffizient lautet 0.33. Dies bedeutet, dass bei steigendem Sandgehalt die Lagerungsdichte ebenfalls höher wird. Dieses Ergebnis könnte die Aussagen von Amelung et al. (2018) und Blume et al. (2011) bestätigen, laut denen das Porenvolumen im Boden mit steigender Korngröße abnimmt, und Sandteilchen generell die größten Korngrößen aufweisen. Es könnte somit auch hier ein Zusammenhang zwischen dem kleineren Porenvolumen von Sandböden und der Lagerungsdichte bestehen.

4.5.5 Nutzungsspezifische Lagerungsdichten

In *Abbildung 30* sind die Lagerungsdichten der unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen grafisch dargestellt. Die Einteilung der unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen erfolgte, wie in *Kapitel 3.5* beschrieben.

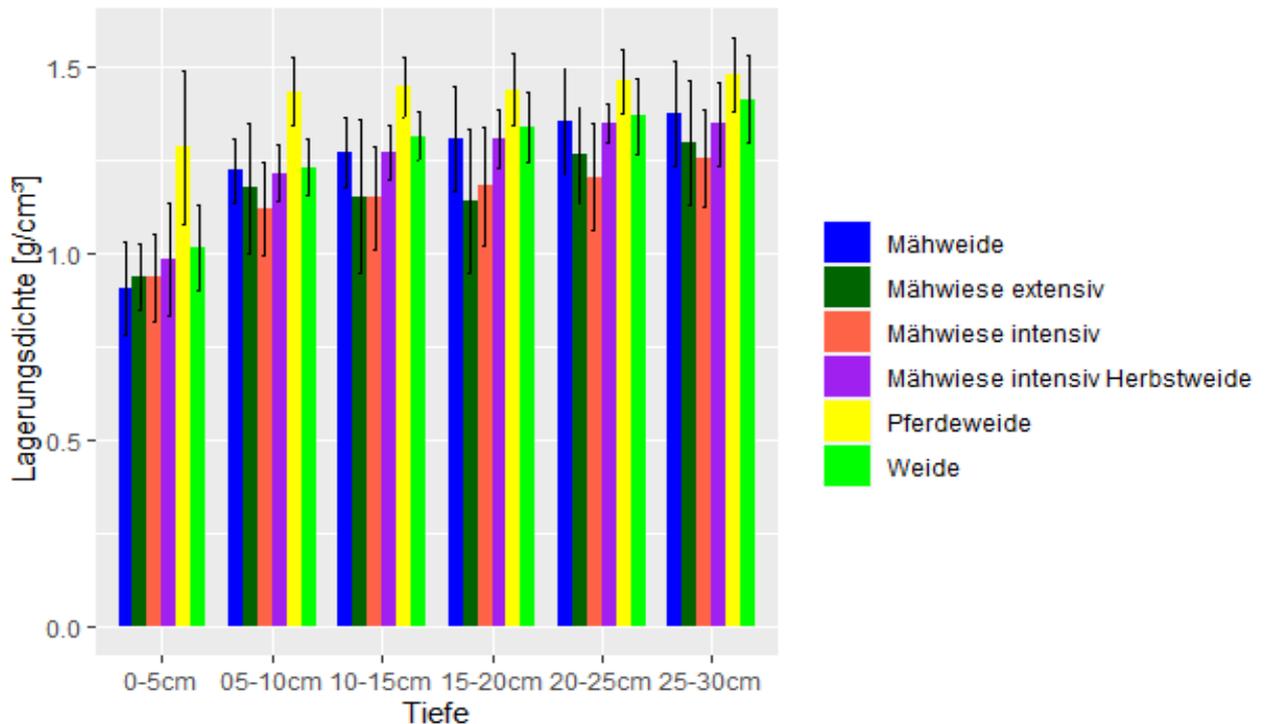


Abbildung 30: Lagerungsdichte in g/cm³ der unterschiedlichen Tiefenstufen und Nutzungsformen

Wie in *Tabelle 33* abgebildet wurden mithilfe des Kruskal Wallis Tests, signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen Lagerungsdichte und Nutzungsform in den verschiedenen Tiefenstufen untersucht.

In der Tiefenstufe 0 – 5 cm haben alle Nutzungsformen die niedrigsten Lagerungsdichten ($0.91 - 1.29 \text{ g/cm}^3$). Auffallend ist, dass die reinen Mähwiesen (intensiv und extensiv) in allen Tiefenstufen, außer der ersten (0-5 cm), die niedrigsten Lagerungsdichten aufweisen. Es konnte jedoch in keiner Tiefenstufe ein signifikanter ($p < 0.05$) Unterschied der Lagerungsdichte zwischen der Nutzungsform Mähwiese extensiv und Mähwiese intensiv gefunden werden.

Die Weide wies in allen Tiefenstufen, außer der ersten (0-5 cm), signifikant ($p < 0.05$) höhere Lagerungsdichten auf als die Mähwiese intensiv. In allen Tiefenstufen konnten

jedoch keine signifikanten ($p < 0.05$) Unterschiede zwischen Weiden, Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung und Mähweiden gefunden werden.

Die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung weisen überall höhere Lagerungsdichten auf als die Mähwiesen ohne Herbstbeweidung. Dies könnte durch die intensivere Nutzung der Flächen durch Herbstbeweidung erklärt werden. In den Tiefenstufen 10-15 und 20-25 wiesen die intensiven Mähwiesen mit Herbstbeweidung signifikant ($p < 0.05$) höhere Lagerungsdichten auf als die intensiven Mähwiesen.

Ebenfalls fällt auf, dass die Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung und die Mähweiden in allen Tiefenstufen, außer der ersten (0-5 cm), nahezu gleiche Lagerungsdichten aufweisen. Es konnte in keiner Tiefenstufe ein signifikanter ($p < 0.05$) Unterschied zwischen Mähweiden und Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung gefunden werden. Anscheinend reagiert der Boden auf eine Herbstbeweidung ähnlich wie auf einen, über das ganze Jahr verteilten, Wechsel von Weidenutzung und Mähnutzung.

Die Mähweiden weisen in der obersten Tiefenstufe die geringsten Lagerungsdichten auf (0.91 g/cm^3). In den restlichen Tiefenstufen zwischen 5 und 30 cm nehmen sie, gemeinsam mit den Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung, eher eine Mittelstellung zwischen Mähwiesen und Weiden ein. Dies könnte durch die abwechselnde Mäh- und Weidenutzung erklärt werden. Auch bei den Untersuchungen von Bohner et al. (2017) konnten ähnliche Ergebnisse bei den Mähweiden festgestellt werden.

Die höchsten Lagerungsdichten in allen Tiefenstufen zwischen 0 und 30 cm werden von den Weiden ($1.02 - 1.42 \text{ g/cm}^3$) und Pferdeweiden ($1.29 - 1.48 \text{ g/cm}^3$) erzielt. Vor allem die Pferdeweiden weisen in allen Tiefenstufen sehr hohe Lagerungsdichten auf. Diese hohen Lagerungsdichten könnten durch die sehr intensive Nutzung sowie die, zum Teil ganzjährige, Bestoßung der Weidestandorte erklärt werden. In den ersten drei Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-15 cm wiesen die Pferdeweiden signifikant ($p < 0.05$) höhere Lagerungsdichten auf als alle anderen Nutzungsformen. Ebenfalls fällt auf, dass in allen Tiefenstufen, außer der letzten (25-30 cm), die Pferdeweiden signifikant ($p < 0.05$) höhere Lagerungsdichten aufweisen als die Weidestandorte.

Laut der Einteilung der Lagerungsdichte von Mineralböden aus *Tabelle 2 (Kapitel 2.4)* nach AD-HOC-AG BODEN (2005) findet man in allen Nutzungstypen, außer auf den Weiden und Pferdeweiden, in der Tiefenstufe von 0-5 cm „extrem geringe“ ($< 1 \text{ g/cm}^3$)

Lagerungsdichten. In der Tiefenstufe 25-30 cm der Weiden und in den Tiefenstufen 5-30 cm der Pferdeweiden findet man „mittlere“ (1.4 - 1.6 g/cm³) Lagerungsdichten. In den restlichen Nutzungsarten wurden „sehr geringe“ (1 – 1.2 g/cm³) und „geringe“ (1.2 – 1.4 g/cm³) Lagerungsdichten gefunden. Nach dieser Einteilung könnte man die Tendenz ableiten, dass die Weiden und Pferdeweiden auf den Untersuchungsstandorten erhöhte Lagerungsdichten besitzen.

In den *Tabellen 27 bis 32* werden Mittelwert, Standardabweichung, Median, Minimum und Maximum der erhobenen Lagerungsdichten, sowie die Grundgesamtheit der verschiedenen Nutzungsformen dargestellt.

Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|---|
| 0-5 | 0.94 | ± | 0.09 | 0.95 | 0.81 | 1.04 | 6 |
| 5-10 | 1.18 | ± | 0.18 | 1.20 | 0.87 | 1.37 | 6 |
| 10-15 | 1.16 | ± | 0.21 | 1.10 | 0.91 | 1.40 | 6 |
| 15-20 | 1.14 | ± | 0.19 | 1.11 | 0.90 | 1.49 | 6 |
| 20-25 | 1.27 | ± | 0.13 | 1.27 | 0.98 | 1.43 | 6 |
| 25-30 | 1.30 | ± | 0.17 | 1.32 | 1.01 | 1.50 | 6 |

Tabelle 27: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

mw = Mittelwert

sd = Standardabweichung

min = Minimum

max = Maximum

n = Grundgesamtheit

Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 0-5 | 0.98 | ± | 0.15 | 1.03 | 0.73 | 1.25 | 24 |
| 5-10 | 1.22 | ± | 0.08 | 1.22 | 0.90 | 1.33 | 24 |
| 10-15 | 1.28 | ± | 0.07 | 1.29 | 1.06 | 1.36 | 24 |
| 15-20 | 1.31 | ± | 0.08 | 1.31 | 1.11 | 1.50 | 24 |
| 20-25 | 1.35 | ± | 0.05 | 1.35 | 1.26 | 1.46 | 24 |
| 25-30 | 1.35 | ± | 0.11 | 1.34 | 1.16 | 1.57 | 24 |

Tabelle 28: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

Mähwiese intensiv

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 0-5 | 0.94 | ± | 0.12 | 0.94 | 0.76 | 1.20 | 24 |
| 5-10 | 1.12 | ± | 0.12 | 1.15 | 0.90 | 1.33 | 24 |
| 10-15 | 1.15 | ± | 0.14 | 1.18 | 0.92 | 1.36 | 24 |
| 15-20 | 1.18 | ± | 0.16 | 1.19 | 0.94 | 1.41 | 24 |
| 20-25 | 1.21 | ± | 0.14 | 1.22 | 0.98 | 1.43 | 24 |
| 25-30 | 1.26 | ± | 0.13 | 1.27 | 1.04 | 1.44 | 24 |

Tabelle 29: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Mähwiese intensiv

Mähweide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 0-5 | 0.91 | ± | 0.13 | 0.90 | 0.68 | 1.14 | 18 |
| 5-10 | 1.22 | ± | 0.09 | 1.21 | 1.10 | 1.45 | 18 |
| 10-15 | 1.27 | ± | 0.10 | 1.28 | 1.01 | 1.40 | 18 |
| 15-20 | 1.31 | ± | 0.14 | 1.28 | 1.06 | 1.53 | 18 |
| 20-25 | 1.36 | ± | 0.14 | 1.36 | 1.08 | 1.54 | 18 |
| 25-30 | 1.38 | ± | 0.14 | 1.44 | 1.00 | 1.53 | 18 |

Tabelle 30: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Mähweide

Weide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 0-5 | 1.02 | ± | 0.11 | 1.01 | 0.83 | 1.37 | 30 |
| 5-10 | 1.23 | ± | 0.08 | 1.21 | 1.09 | 1.41 | 30 |
| 10-15 | 1.32 | ± | 0.07 | 1.33 | 1.18 | 1.46 | 30 |
| 15-20 | 1.34 | ± | 0.09 | 1.36 | 1.08 | 1.49 | 30 |
| 20-25 | 1.37 | ± | 0.10 | 1.40 | 1.12 | 1.54 | 30 |
| 25-30 | 1.42 | ± | 0.12 | 1.45 | 1.20 | 1.59 | 30 |

Tabelle 31: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Weide

Pferdeweide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 0-5 | 1.29 | ± | 0.21 | 1.26 | 1.01 | 1.75 | 18 |
| 5-10 | 1.44 | ± | 0.09 | 1.45 | 1.29 | 1.58 | 18 |
| 10-15 | 1.45 | ± | 0.08 | 1.47 | 1.27 | 1.58 | 18 |
| 15-20 | 1.44 | ± | 0.10 | 1.45 | 1.24 | 1.59 | 18 |
| 20-25 | 1.46 | ± | 0.09 | 1.48 | 1.28 | 1.60 | 18 |
| 25-30 | 1.48 | ± | 0.10 | 1.47 | 1.33 | 1.64 | 18 |

Tabelle 32: Lagerungsdichte in g/cm³ der Nutzung Weide (Pferd)

In der Tiefenstufe 0-5 cm unterscheidet sich die Pferdeweide von allen anderen Nutzungsarten signifikant. Sie wies mit 1.29 g/cm^3 in dieser Tiefenstufe die höchste Lagerungsdichte auf.

In der Tiefenstufe 5-10 cm zeigt die Mähwiese intensiv (1.12 g/cm^3) eine signifikant niedrigere Lagerungsdichte als die Pferdeweiden (1.44 g/cm^3) und die Weiden (1.23 g/cm^3). Weiters konnten die Pferdeweiden signifikant höhere Lagerungsdichten als alle anderen Nutzungsformen aufweisen.

In der Tiefenstufe 10-15 cm zeigten die Pferdeweiden (1.45 g/cm^3) wieder signifikant höhere Lagerungsdichten an als alle anderen Nutzungsformen. Weiters konnten die Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung (1.28 g/cm^3) und die Weide (1.32 g/cm^3) signifikant höhere Lagerungsdichten als die Mähwiesen intensiv (1.15 g/cm^3) aufweisen.

In der Tiefenstufe 15-20 cm zeigte die Weide (1.34 g/cm^3) signifikant höhere Lagerungsdichten an als die Mähwiese intensiv (1.18 g/cm^3). Weiters konnte die Pferdeweide (1.44 g/cm^3) signifikant höhere Werte aufweisen als die Mähwiese intensiv, die Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung und die Weide.

In der Tiefenstufe 20-25 cm zeigte die Mähwiese intensiv (1.21 g/cm^3) signifikant geringere Lagerungsdichten als alle anderen Nutzungsformen, mit Ausnahme der Mähwiesen extensiv. Weiters wies die Pferdeweide (1.46 g/cm^3) signifikant höhere Lagerungsdichten auf als alle anderen Nutzungsformen, mit Ausnahme der Mähweide.

In der Tiefenstufe 25-30 cm zeigte die Pferdeweide (1.48 g/cm^3) eine signifikant höhere Lagerungsdichte an als die Mähwiese intensiv (1.26 g/cm^3) und die Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung (1.35 g/cm^3). Weiters unterscheidet sich die Weide (1.42 g/cm^3) durch signifikant höhere Lagerungsdichten von der Mähwiese intensiv (1.26 g/cm^3).

Tabelle 33: Statistischer Vergleich von Lagerungsdichten der unterschiedlichen Nutzungsformen untereinander

| | | p<0.05 | mw | sd | median | min | max | n |
|-------------------------|---------------------------------------|------------|-------------|------|--------|------|-----|---|
| Tiefenstufe 0-5 cm | Mähweide | b | 0.91 ± 0.13 | 0.9 | 0.68 | 1.14 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | b | 0.94 ± 0.09 | 0.95 | 0.81 | 1.04 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | b | 0.94 ± 0.12 | 0.94 | 0.76 | 1.2 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | b | 0.98 ± 0.15 | 1.03 | 0.73 | 1.25 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.29 ± 0.21 | 1.26 | 1.01 | 1.75 | 18 | |
| | Weide | b | 1.02 ± 0.11 | 1.01 | 0.83 | 1.37 | 30 | |
| Tiefenstufe 5-10 cm | Mähweide | bc | 1.22 ± 0.09 | 1.21 | 1.1 | 1.45 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | bc | 1.18 ± 0.18 | 1.2 | 0.87 | 1.37 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.12 ± 0.12 | 1.15 | 0.9 | 1.33 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | bc | 1.22 ± 0.08 | 1.22 | 0.9 | 1.33 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.44 ± 0.09 | 1.45 | 1.29 | 1.58 | 18 | |
| | Weide | b | 1.23 ± 0.08 | 1.21 | 1.09 | 1.41 | 30 | |
| Tiefenstufe 10-15 cm | Mähweide | bc | 1.27 ± 0.1 | 1.28 | 1.01 | 1.4 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | bc | 1.16 ± 0.21 | 1.1 | 0.91 | 1.4 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.15 ± 0.14 | 1.18 | 0.92 | 1.36 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | b | 1.28 ± 0.07 | 1.29 | 1.06 | 1.36 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.45 ± 0.08 | 1.47 | 1.27 | 1.58 | 18 | |
| | Weide | b | 1.32 ± 0.07 | 1.33 | 1.18 | 1.46 | 30 | |
| Tiefenstufe 15-20 cm | Mähweide | abc | 1.31 ± 0.14 | 1.28 | 1.06 | 1.53 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | abc | 1.14 ± 0.19 | 1.11 | 0.9 | 1.49 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.18 ± 0.16 | 1.19 | 0.94 | 1.41 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | bc | 1.31 ± 0.08 | 1.31 | 1.11 | 1.5 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.44 ± 0.1 | 1.45 | 1.24 | 1.59 | 18 | |
| | Weide | b | 1.34 ± 0.09 | 1.36 | 1.08 | 1.49 | 30 | |
| Tiefenstufe 20-25 cm | Mähweide | ab | 1.36 ± 0.14 | 1.36 | 1.08 | 1.54 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | bc | 1.27 ± 0.13 | 1.27 | 0.98 | 1.43 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.21 ± 0.14 | 1.22 | 0.98 | 1.43 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | b | 1.35 ± 0.05 | 1.35 | 1.26 | 1.46 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.46 ± 0.09 | 1.48 | 1.28 | 1.6 | 18 | |
| | Weide | b | 1.37 ± 0.1 | 1.4 | 1.12 | 1.54 | 30 | |
| Tiefenstufe 25-30 cm | Mähweide | abc | 1.38 ± 0.14 | 1.44 | 1 | 1.53 | 18 | |
| | Mähwiese extensiv | abc | 1.3 ± 0.17 | 1.32 | 1.01 | 1.5 | 6 | |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.26 ± 0.13 | 1.27 | 1.04 | 1.44 | 24 | |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | bc | 1.35 ± 0.11 | 1.34 | 1.16 | 1.57 | 24 | |
| | Pferdeweide | a | 1.48 ± 0.1 | 1.47 | 1.33 | 1.64 | 18 | |
| | Weide | ab | 1.42 ± 0.12 | 1.45 | 1.2 | 1.59 | 30 | |

mw = Mittelwert

min = Minimum

n = Grundgesamtheit

sd = Standardabweichung

max = Maximum

p = Signifikanzwert

4.6 Eindringwiderstand

4.6.1 Eindringwiderstand der untersuchten Standorte

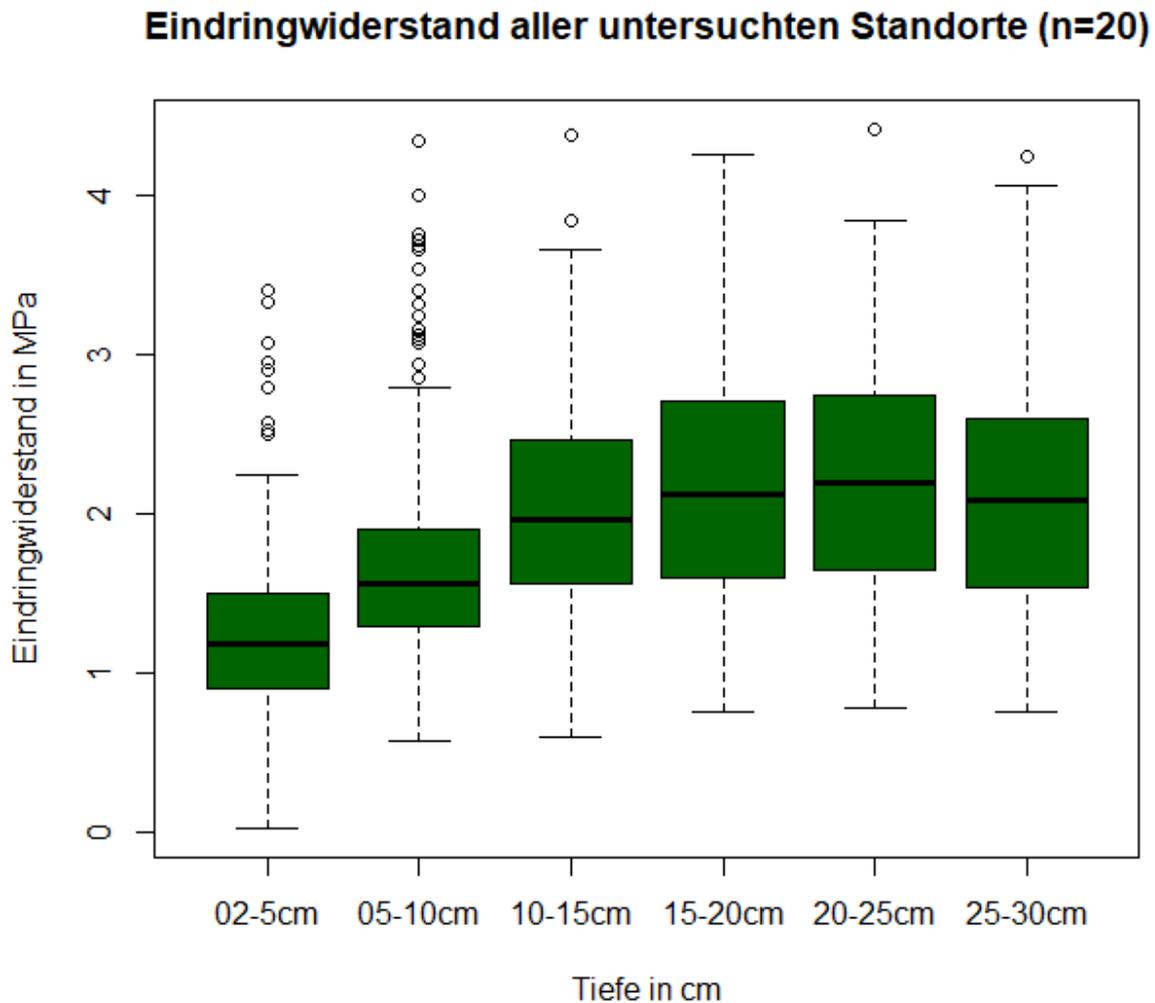


Abbildung 31: Boxplot-Diagramm des Eindringwiderstandes in MPa in den unterschiedlichen Tiefenstufen der Untersuchungsstandorte

Tabelle 34: Eindringwiderstand aller untersuchten Standorte in MPa

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|-----|
| 2-5 | 1.24 | ± | 0.57 | 1.88 | 0.03 | 3.4 | 200 |
| 5-10 | 1.73 | ± | 0.73 | 1.56 | 0.58 | 4.34 | 200 |
| 10-15 | 2.03 | ± | 0.69 | 1.97 | 0.60 | 4.38 | 200 |
| 15-20 | 2.18 | ± | 0.72 | 2.12 | 0.76 | 4.26 | 200 |
| 20-25 | 2.22 | ± | 0.72 | 2.20 | 0.78 | 4.42 | 200 |
| 25-30 | 2.16 | ± | 0.76 | 2.09 | 0.76 | 4.24 | 200 |

In *Abbildung 31* und *Tabelle 34* kann man erkennen, welche Eindringwiderstände die Böden der Untersuchungsstandorte laut der Messung mit dem Penetrologger (*siehe Kapitel 3.6.2*) aufweisen.

Die Mittelwerte der Eindringwiderstände aller untersuchten Standorte sind in der ersten Tiefenstufe (2-5cm) mit 1.24 MPa am geringsten. Diese niedrigen Werte könnten mit der starken Durchwurzelung und der dadurch lockeren Lagerung der obersten Bodenschicht einhergehen, da auch bei den Erhebungen der Lagerungsdichte die obersten 0-5 cm die geringsten Werte aufwiesen. Danach steigen die Eindringwiderstände kontinuierlich an, bis sie in der Tiefenstufe 20-25 cm, mit 2.22 MPa, den Höhepunkt erreichen. Zwischen 25 und 30 cm Bodentiefe fallen die Eindringwiderstände aller Untersuchungsflächen wieder leicht auf 2.16 MPa ab.

Ein genauer Grenzwert, ab wann ein erhöhter Eindringwiderstand das Wurzelwachstum verschiedener Pflanzenarten negativ beeinträchtigt, lässt sich in der Literatur nur beschränkt finden. Laut Materechera et al. (1991) und Houlbrooke et al. (1997) kann ab einem Eindringwiderstand von 2 MPa das Wurzelwachstum beeinträchtigt werden.

Tabelle 35: Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichung des Eindringwiderstandes (MPa) verschiedener Tiefenstufen des Steirischen Murtales und des Salzburger Flachgaus (Gehmacher 2016).

| Tiefe in cm | Steirisches Murtal | | | | Salzburger Flachgau | | | |
|----------------|--------------------|---|------|-----|---------------------|---|------|-----|
| | mw | ± | sd | n | mw | ± | sd | n |
| 2-5 | 1.24 | ± | 0.18 | 200 | 1.25 | ± | 0.61 | 220 |
| 5-10 | 1.72 | ± | 0.13 | 200 | 1.43 | ± | 0.57 | 220 |
| 10-15 | 2.03 | ± | 0.14 | 200 | 1.55 | ± | 0.53 | 220 |
| 15-20 | 2.18 | ± | 0.15 | 200 | 1.60 | ± | 0.46 | 220 |
| 20-25 | 2.22 | ± | 0.13 | 200 | 1.59 | ± | 0.42 | 220 |
| 25-30 | 2.16 | ± | 0.14 | 200 | 1.56 | ± | 0.38 | 220 |

Beim Vergleich der mittleren Eindringwiderstände aller Untersuchungsstandorte des Steirischen Murtales und des Salzburger Flachgaus, nach Gehmacher (2016), gibt es Unterschiede. In *Tabelle 35* sowie in *Abbildung 32* erkennt man, dass die erste Tiefenstufe (2-5 cm) im Murtal mit einem Eindringwiderstand von 1.24 MPa und im Flachgau mit 1.25 MPa ähnlich hoch ist. Dies könnte durch die stärkere

Durchwurzelung sowie durch den höheren Feuchtigkeitsgehalt in der obersten Bodenschicht von Grünlandböden erreicht werden. In den weiteren Tiefenstufen, zwischen 5 und 30 cm, wurden auf den Untersuchungsstandorten im Murtal um ca. 0.30 – 0.60 MPa höhere Eindringwiderstandswerte als im Flachgau gemessen.

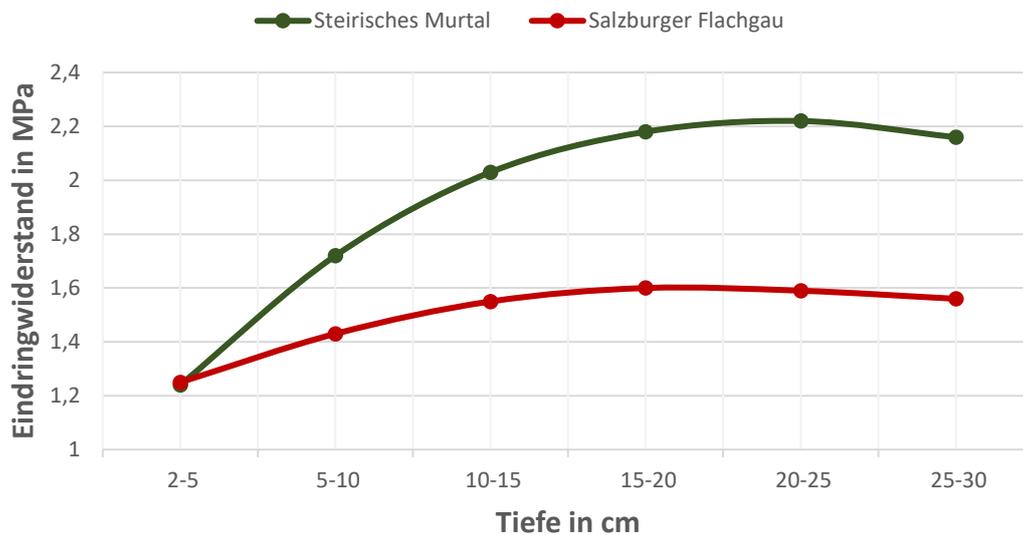


Abbildung 32: Vergleich des Eindringwiderstandes unterschiedlicher Tiefenstufen des Steirischen Murtal und des Salzburger Flachgau nach Gehmacher (2016).

4.6.2 Volumetrische Bodenfeuchte bei der Messung des Eindringwiderstands

Vor der Eindringwiderstandsmessung wurde mithilfe eines Bodenfeuchtemessgerätes (siehe Kapitel 3.6.3) die volumetrische Bodenfeuchte aller Untersuchungsstandorte gemessen. In Tabelle 36 werden die einzelnen Messergebnisse der Untersuchungsflächen dargestellt. Die Genauigkeit der Eindringwiderstandsmessung ist von vielen Faktoren abhängig (siehe Kapitel 2.5). Unter anderem auch von der Bodenfeuchtigkeit. Daher wurde versucht die Messungen in kurzer Zeit und bei ähnlicher Bodenfeuchtigkeit durchzuführen. Aufgrund unterschiedlicher Bodenbedingungen schwankten die Mittelwerte der einzelnen Standorte jedoch zwischen 31,4 % Bodenfeuchte auf dem Mähweidestandort s13 und 61,2 % Bodenfeuchte auf dem Weidestandort s6.

Tabelle 36: Volumetrische Bodenfeuchte in % vor der Eindringwiderstandsmessung der einzelnen Untersuchungsstandorte

| Messung der Volumetrischen Bodenfeuchte in % | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Nutzung | Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 19 | mw | sd |
| Mext (R) | s1 | 47.1 | 33.9 | 40.6 | 23.4 | 23.6 | 34.8 | 42.8 | 32.8 | 48.2 | 38 | 36.5 | ± 8.2 |
| Mint (Herbst) | s2 | 40.6 | 43.4 | 42.4 | 44.6 | 40.4 | 44.8 | 50.6 | 47.6 | 42.3 | 39.2 | 43.6 | ± 3.3 |
| Mint (Herbst) | s4 | 53 | 61 | 57.4 | 59.8 | 58.9 | 60.6 | 51.2 | 46.6 | 56 | 54.5 | 55.9 | ± 4.4 |
| Mint (Herbst) | s5 | 52.8 | 51.6 | 42.9 | 51.1 | 47.2 | 45.6 | 41.3 | 50.6 | 52 | 58.5 | 49.4 | ± 4.9 |
| Mint (Herbst) | s7 | 61.6 | 58.9 | 61.1 | 57.8 | 59.5 | 66.4 | 54.3 | 58.8 | 54.2 | 57.3 | 59 | ± 3.4 |
| Mint | s11 | 52.7 | 47.4 | 41.4 | 40.2 | 48.2 | 50.1 | 49.4 | 44.4 | 45.3 | 45.2 | 46.4 | ± 3.7 |
| Mint | s17 | 51.6 | 56 | 49.3 | 53.4 | 53.2 | 51.9 | 46.2 | 50.9 | 50.8 | 47.4 | 51.1 | ± 2.8 |
| Mint | s18 | 44.6 | 43.4 | 38.1 | 41.3 | 46.6 | 42 | 47 | 41.3 | 42.9 | 42.7 | 43 | ± 2.5 |
| Mint | s19 | 44.2 | 46.1 | 50 | 53.4 | 45.4 | 55.6 | 43.1 | 51.2 | 47.6 | 42.6 | 47.9 | ± 4.2 |
| MW | s12 | 47.6 | 34.7 | 49.2 | 40.9 | 52.6 | 51 | 40.8 | 40.4 | 42.2 | 43 | 44.2 | ± 5.3 |
| MW | s13 | 29.6 | 34.4 | 31 | 33.8 | 27.1 | 28.6 | 37 | 32.8 | 30.2 | 29.6 | 31.4 | ± 2.9 |
| MW | s16 | 46.6 | 48.8 | 49.4 | 45.2 | 45.6 | 49.5 | 47.2 | 52 | 54.4 | 49.8 | 48.9 | ± 2.7 |
| W | s6 | 59.8 | 61.2 | 57.8 | 65.1 | 59.8 | 63.6 | 57 | 61.4 | 62.9 | 63 | 61.2 | ± 2.5 |
| W | s8 | 44.5 | 46 | 32.7 | 47.2 | 55 | 57.2 | 47.8 | 47.8 | 39.6 | 55.6 | 47.3 | ± 7.1 |
| W | s9 | 48.8 | 49.1 | 45.8 | 50.4 | 48.2 | 51.5 | 54.1 | 48.3 | 44.6 | 46.4 | 48.7 | ± 2.7 |
| W | s14 | 52.6 | 45.4 | 53.1 | 55 | 51 | 57.8 | 58 | 54.8 | 50.6 | 53.9 | 53.2 | ± 3.5 |
| W | s15 | 41.6 | 41.4 | 50.8 | 57.1 | 55.1 | 46.7 | 50.8 | 54.6 | 51.2 | 47.6 | 49.7 | ± 5.1 |
| W (Pferd) | s3.1 | 38.8 | 35.6 | 37.4 | 42.2 | 29.4 | 40.6 | 45.1 | 43.3 | 38.6 | 34.6 | 38.6 | ± 4.4 |
| W (Pferd) | s3.2 | 56.2 | 57 | 53.8 | 48.2 | 51.3 | 49 | 51.6 | 54.7 | 50.7 | 55.8 | 52.8 | ± 2.9 |
| W (Pferd) | s10 | 36.2 | 35.1 | 36.6 | 33.6 | 35.6 | 29.8 | 31.4 | 28.7 | 34.8 | 32.2 | 33.4 | ± 2.6 |

mw = Mittelwert

sd = Standardabweichung

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint Herbst = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

4.6.3 Korrelation Eindringwiderstand und volumetrische Bodenfeuchte

Korrelation von Eindringwiderstand und volumetrischer Bodenfeuchte in %

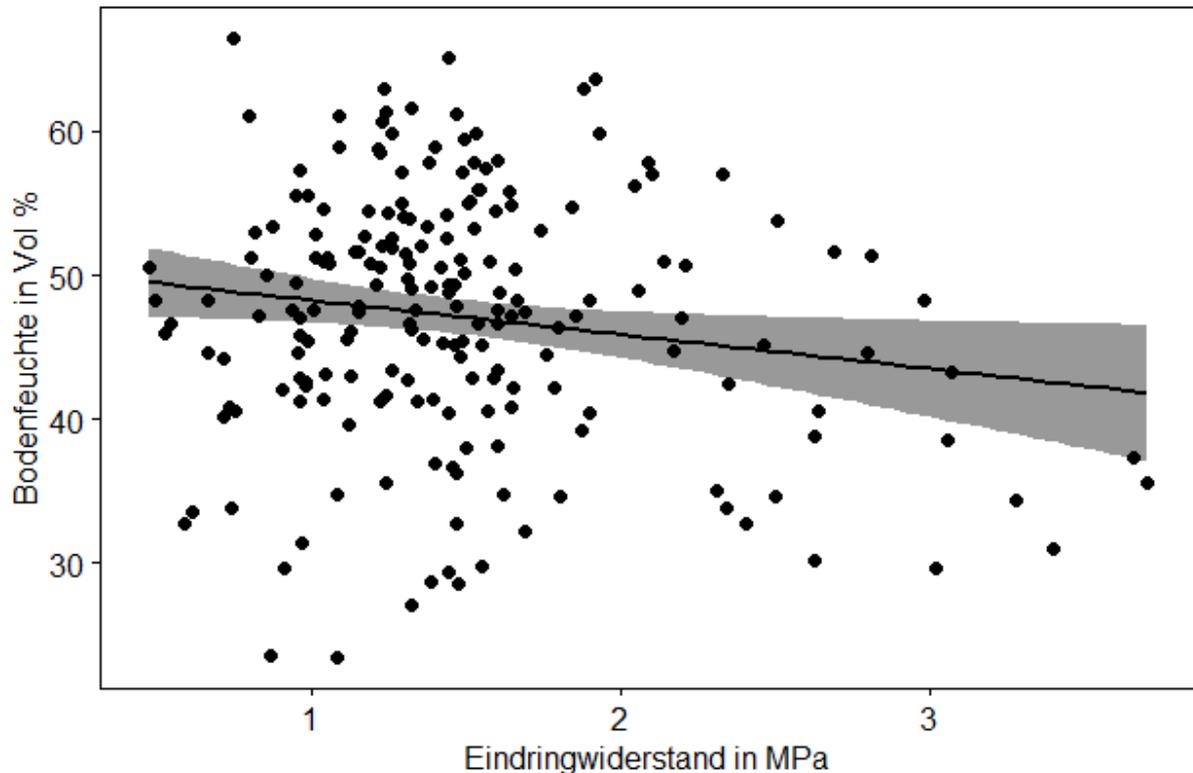


Abbildung 33: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und volumetrischer Bodenfeuchte in %

Tabelle 37: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und volumetrischer Bodenfeuchte in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|----|---|-------|
| Eindringwiderstand | 10 | - 0.07 | >0.05 |
| Vol. Bodenfeuchte | 10 | | n.s |

Wie in *Abbildung 33* und *Tabelle 37* erkenntlich, wurde versucht einen Zusammenhang zwischen dem Eindringwiderstand und der volumetrischen Bodenfeuchte darzustellen. Die Messungen der volumetrischen Bodenfeuchte erfolgten jedoch nur in den ersten 10 cm des Bodens. Aus diesem Grund konnte eine Korrelationsauswertung des Eindringwiderstandes und der volumetrischen Bodenfeuchte nur in den ersten 10 cm des Bodens durchgeführt werden. Leider kann dadurch nicht auf eine Korrelation von volumetrischer Bodenfeuchte und Eindringwiderstand auf den Tiefenstufen 10-15, 15-20, 20-25 und 25-30 cm geschlossen werden. Bei zukünftigen Versuchen sollten daher

auch die volumetrischen Bodenfeuchten der einzelnen Tiefenstufen gemessen werden, um richtige Untersuchungsergebnisse zu erhalten.

Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine nicht signifikante ($p > 0.05$) negative Korrelation zwischen Eindringwiderstand und volumetrischer Bodenfeuchte auf den ersten 10 cm des Oberbodens. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient ergibt -0.07.

4.6.4 Korrelation Eindringwiderstand und errechneter Bodenwassergehalt

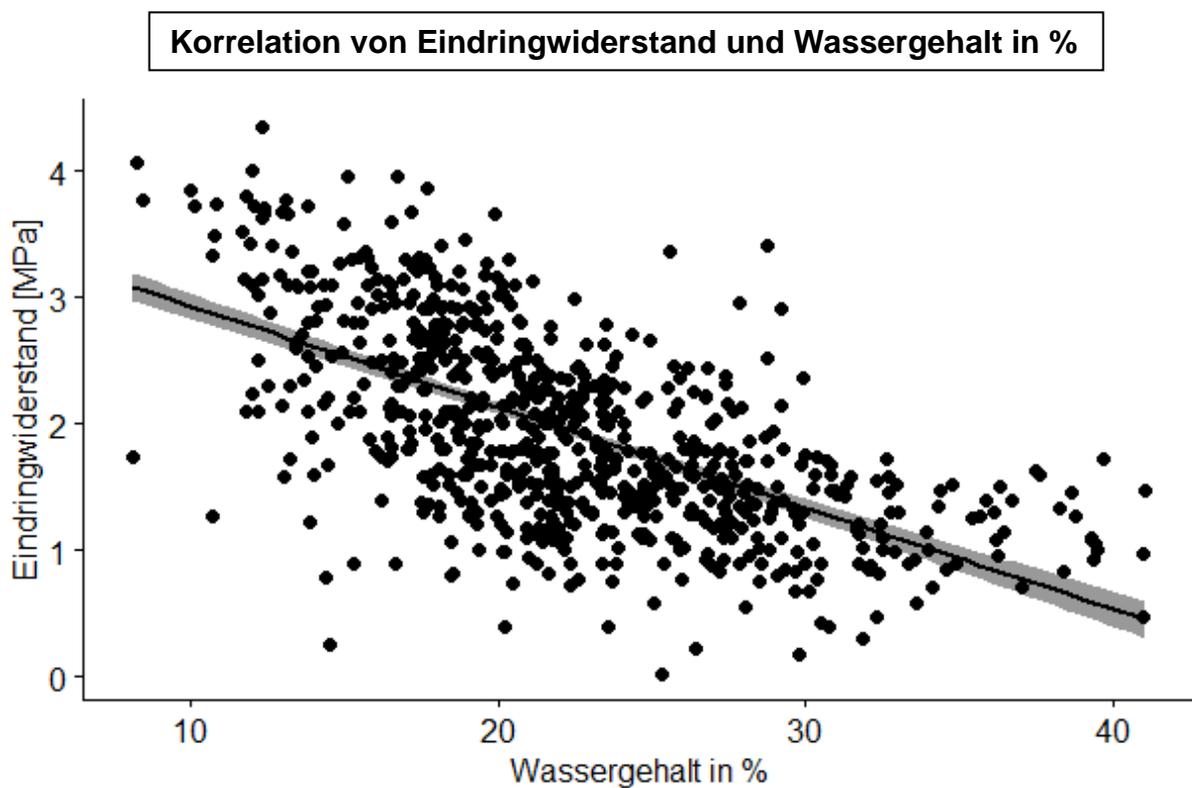


Abbildung 34: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und errechnetem Wassergehalt in %

Tabelle 38: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und errechnetem Wassergehalt in %

| | n | Spearmanscher Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|-----|--|----------------|
| Eindringwiderstand | 120 | | |
| Wassergehalt | 120 | -0.63 | < 0.0001 ** |

In *Abbildung 34* und *Tabelle 38* wurde versucht einen Zusammenhang zwischen dem Eindringwiderstand und dem Bodenwassergehalt herzustellen. Wie in *Kapitel 4.4* beschrieben, wurde dafür der errechnete Bodenwassergehalt verwendet.

Es könnte vermutet werden das das Bodenwasser wie ein Gleitmittel, für die Eindringwiderstandsmessung mit dem Penetrologger, fungiert. Eine höhere Bodenfeuchte, eine erhöhte Durchwurzelung sowie ein erhöhter Humusgehalt im Oberboden könnte den Eindringwiderstand im Oberboden verringern. Auch laut EIJKELKAMP (2013) kann eine niedrige Bodenfeuchte den Eindringwiderstand erhöhen.

Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine hoch signifikante ($p < 0.0001$) negative Korrelation zwischen Eindringwiderstand und dem errechnetem Bodenwassergehalt. Dies bedeutet, dass der Eindringwiderstand mit steigendem Bodenwassergehalt sinkt. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient ergibt -0.63.

4.6.5 Korrelation Eindringwiderstand und organischer Kohlenstoffgehalt

Korrelation von Eindringwiderstand und organischem Kohlenstoffgehalt in %

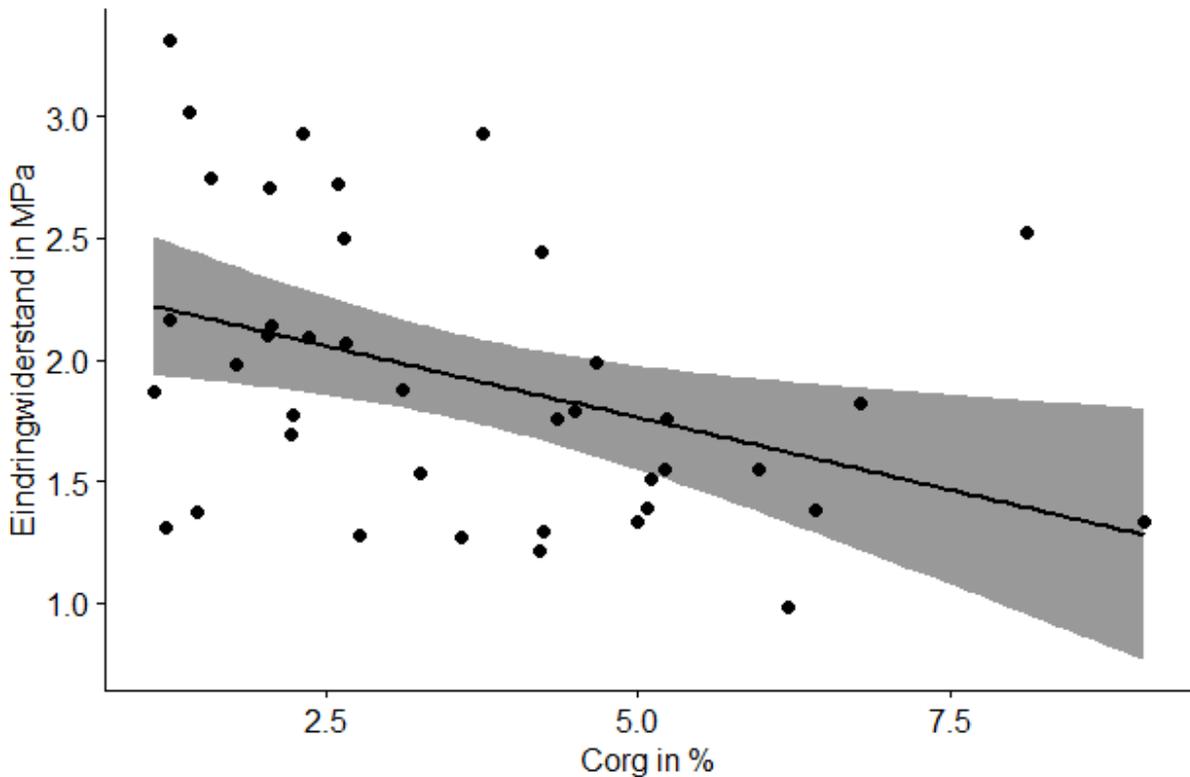


Abbildung 35: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und organischem Kohlenstoffgehalt in %

Tabelle 39: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und organischem Kohlenstoffgehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|----|---|-----------|
| Eindringwiderstand | 40 | -0.41 | < 0.01 ** |
| Corg | 40 | | |

In *Abbildung 35* und *Tabelle 39* wurde versucht einen Zusammenhang zwischen Eindringwiderstand und dem organischen Kohlenstoffgehalt zu erkennen. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine signifikante ($p < 0.01$) negative Korrelation zwischen Eindringwiderstand und organischem Kohlenstoffgehalt. Dies bedeutet, dass mit steigendem organischem Kohlenstoff- oder Humusgehalt der Eindringwiderstand geringer wird. Der Spearmanische Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.41.

Dieses Ergebnis überrascht nicht, da ein hoher Humusgehalt meist mit guter Bodendurchwurzelung, aktivem Bodenleben sowie einem lockeren Krümelgefüge einhergeht. Auch EIJKELKAMP (2013) bestätigt eine Auswirkung von organischen Inhaltstoffen auf den Eindringwiderstand im Boden.

4.6.6 Korrelation Eindringwiderstand und Bodentextur

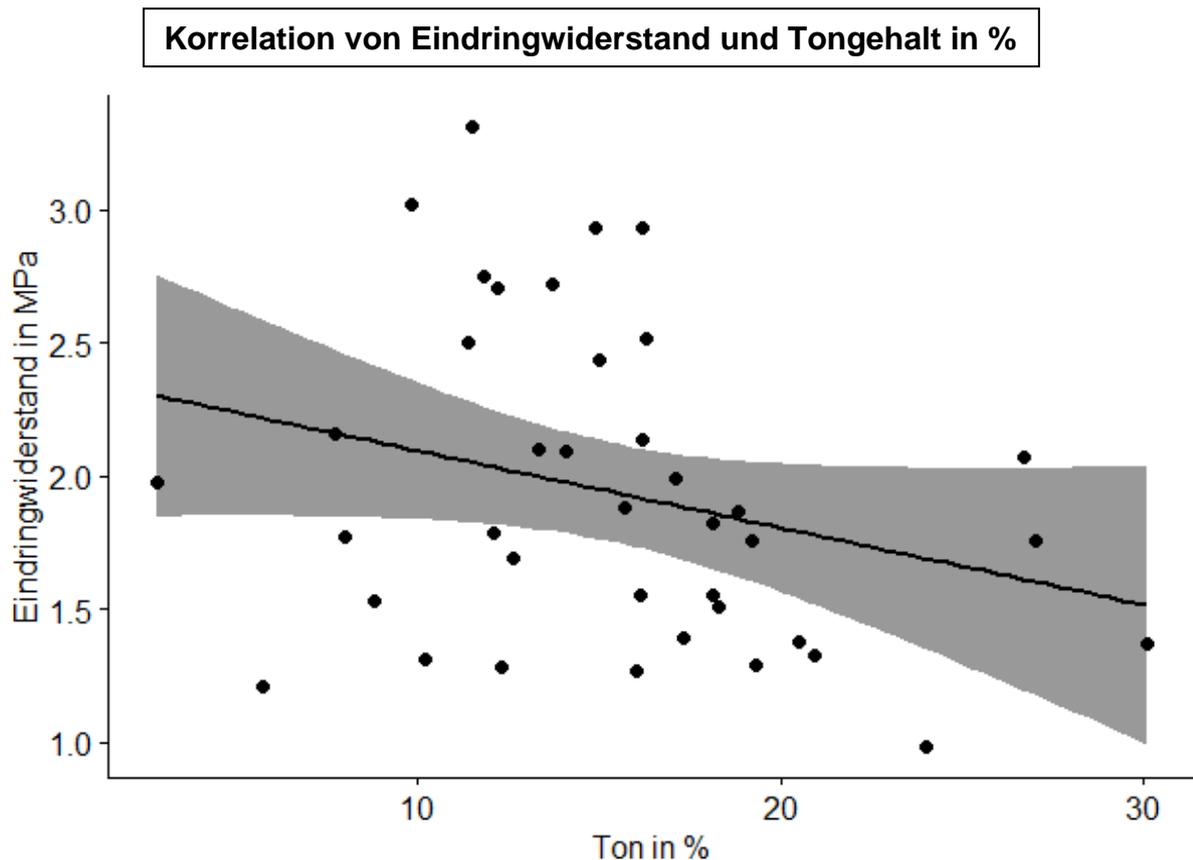


Abbildung 36: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Tongehalt in %

Tabelle 40: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Tongehalt in %

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|----|---|---------------|
| Eindringwiderstand | 40 | | |
| Ton | 39 | -0.32 | > 0.05 n.s |

In *Abbildung 36* und *Tabelle 40* wird auf den Zusammenhang des Eindringwiderstandes und des Tongehaltes im Boden hingewiesen. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine nicht signifikante ($p > 0.05$)

negative Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Tongehalt. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.32 . Es konnte hier also kein signifikanter Zusammenhang zwischen Eindringwiderstand und Tongehalt festgestellt werden.

Dieses Ergebnis überrascht, da der Tongehalt und die Lagerungsdichte sehr wohl signifikant korrelieren und sich, laut Amelung et al. (2018) und Blume et al. (2011), ein hoher Tongehalt positiv auf das Porenvolumen und somit auf die Durchwurzelung im Boden auswirken könnte.

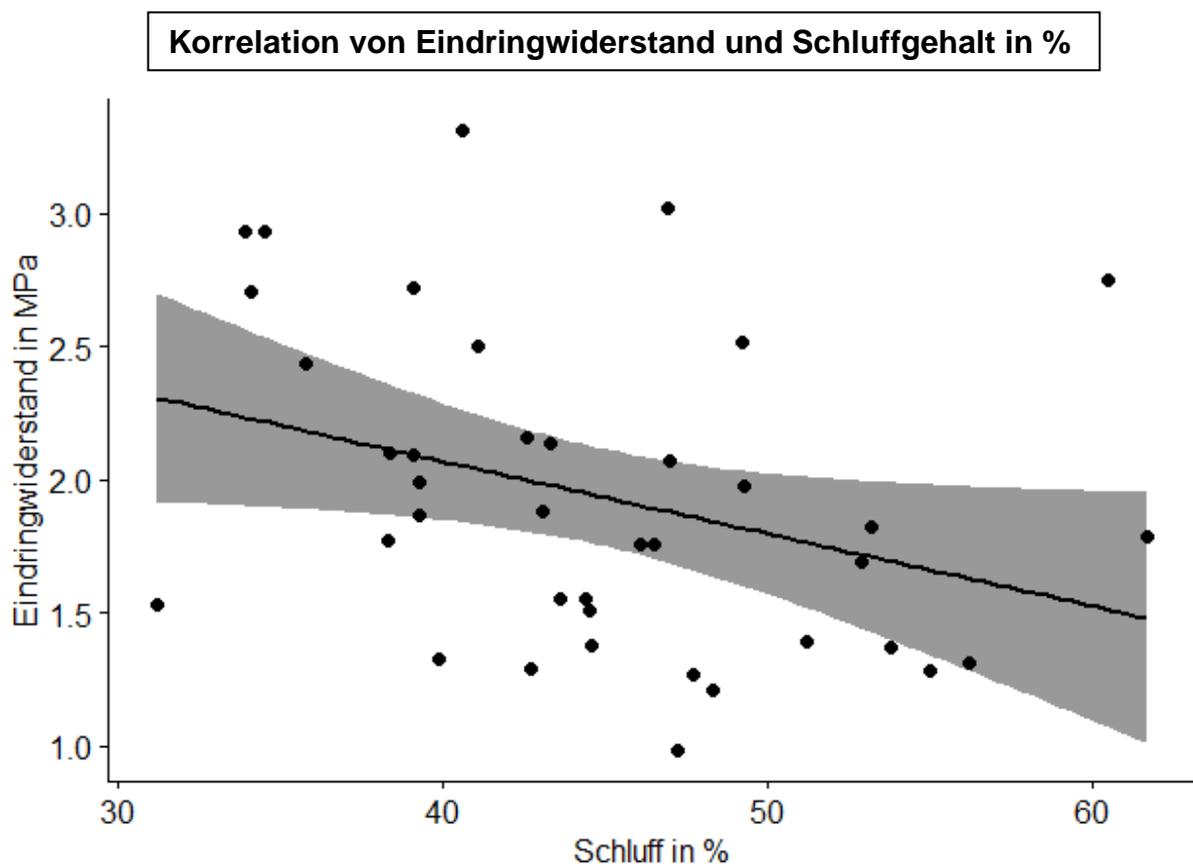


Abbildung 37: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Schluffgehalt in %

Tabelle 41: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Schluffgehalt in %

| | n | Spearmanscher Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|----|--|---------------|
| Eindringwiderstand | 40 | -0.41 | $< 0.01^{**}$ |
| Schluff | 39 | | |

In *Abbildung 37* und *Tabelle 41* wurde der Zusammenhang von Eindringwiderstand und Schluffgehalt im Boden gegenübergestellt. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine signifikante ($p < 0.01$) negative Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Schluffgehalt. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient lautet -0.41 . Dies bedeutet, dass der Eindringwiderstand mit steigendem Schluffgehalt sinkt.

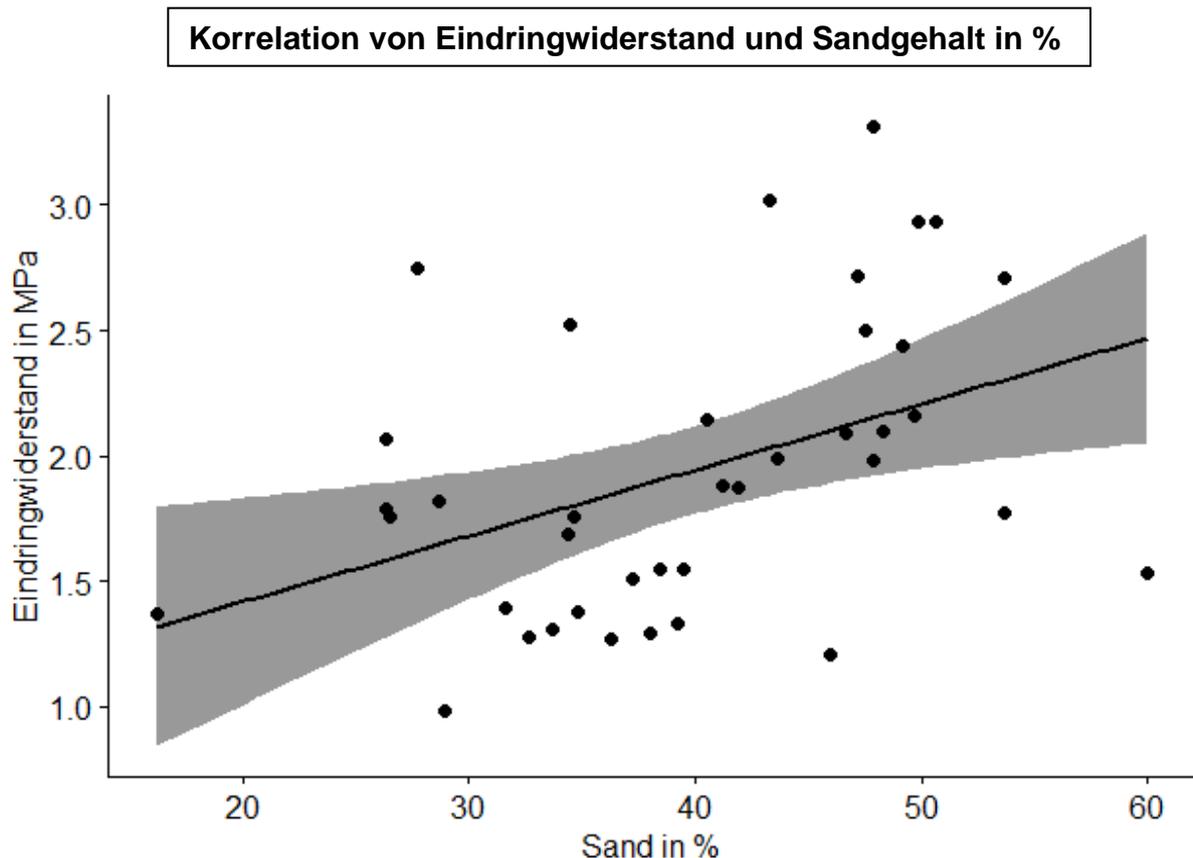


Abbildung 38: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Sandgehalt in %

Tabelle 42: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Sandgehalt in %

| | n | Spearmanscher Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|----|--|-----------|
| Eindringwiderstand | 40 | 0.46 | < 0.01 ** |
| Sand | 39 | | |

In *Abbildung 38* und *Tabelle 42* wurde der Zusammenhang von Eindringwiderstand und Sandgehalt im Boden verglichen. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine signifikante ($p < 0.01$) positive Korrelation zwischen

Eindringwiderstand und Sandgehalt. Der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient lautet 0.46. Das bedeutet, dass bei steigendem Sandgehalt auch der Eindringwiderstand steigt.

Ähnliche Ergebnisse brachte der Vergleich von Sandgehalt und Lagerungsdichte. Auch hier stieg die Lagerungsdichte mit steigendem Sandgehalt. Somit könnten die Ergebnisse mit den Aussagen von Amelung et al. (2018) und Blume et al. (2011) übereinstimmen. Dass sich nämlich größere Korngrößen der Bodenteilchen, wie zum Beispiel bei Sand, negativ auf das Porenvolumen im Boden auswirken. Im Umkehrschluss könnte durch dieses kleinere Porenvolumen im Boden, der Eindringwiderstand erhöht werden.

4.6.7 Nutzungsspezifische Eindringwiderstände

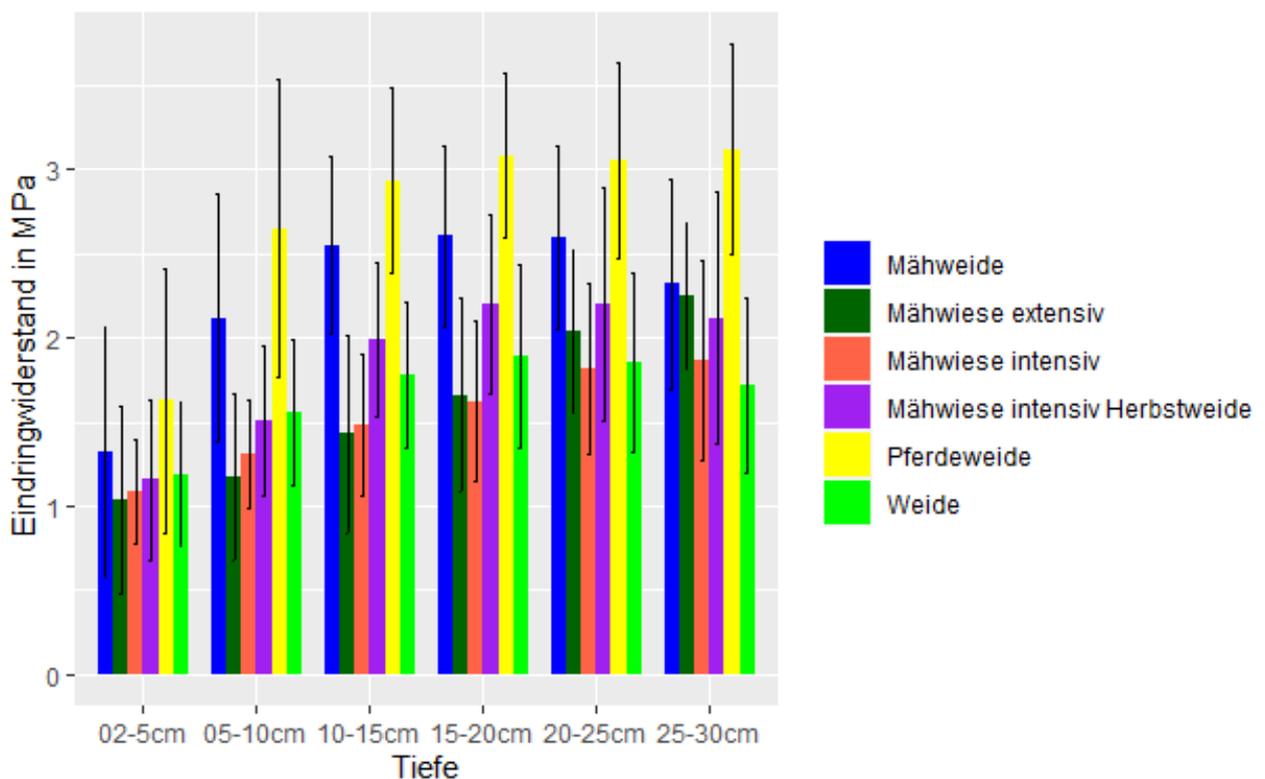


Abbildung 39: Eindringwiderstand in MPa der unterschiedlichen Tiefenstufen und Nutzungsformen

In *Abbildung 39* werden die Eindringwiderstände der unterschiedlichen Nutzungstypen in den verschiedenen Tiefenstufen grafisch dargestellt. Weiters wurden mithilfe des Kruskal Wallis Tests (*Tabelle 49*), signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen den Eindringwiderständen der Nutzungsformen in den verschiedenen Tiefenstufen untersucht.

In der ersten Tiefenstufe (2-5 cm) weisen alle Nutzungstypen die niedrigsten Eindringwiderstände auf. Dies wird deshalb der Fall sein, da die obersten Bodenschichten meist am intensivsten durchwurzelt werden. Ebenfalls ist der Eindringwiderstand der Pferdeweiden (1.63 MPa) in der ersten Tiefenstufe von 2-5 cm signifikant höher als der Eindringwiderstand der Mähwiesen intensiv (1.09 MPa).

Die Mähweiden (1.32 – 2.61 MPa) und die Pferdeweiden (1.63 - 3.12 MPa) weisen in allen Tiefenstufen die höchsten Eindringwiderstände auf. Vor allem in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-15 cm weisen sie signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände auf als alle anderen Nutzungsformen.

Die Pferdeweiden haben jedoch in allen Tiefenstufen die mit Abstand höchsten Eindringwiderstandswerte. In *Kapitel 4.5.5* wiesen die Pferdeweiden ebenfalls in allen Tiefenstufen die höchsten nutzungsspezifischen Lagerungsdichten auf. Wie schon mehrmals erwähnt, wird dies mit großer Wahrscheinlichkeit mit der sehr intensiven Beweidung (Winter und Sommer) und mit dem, zum Teil regelmäßigen, Befahren der Untersuchungsflächen zusammenhängen. Auffallend war, dass sich die Pferdeweiden in den Tiefenstufen 15-20 cm und 25-30 cm von allen anderen Nutzungstypen unterscheiden und signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände aufwiesen.

Die Pferdeweiden weisen in allen Tiefenstufen, außer der ersten (2-5 cm), signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände auf als die Mähwiesen intensiv und extensiv sowie die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung. In der ersten Tiefenstufe (2-5 cm) haben die Pferdeweiden auch signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände als die Mähwiesen intensiv.

Ebenfalls weisen die Pferdeweiden in allen Tiefenstufen, außer der ersten (2-5 cm), signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände auf als die Weiden. In der ersten Tiefenstufe 2-5 cm ist der Eindringwiderstand zwar auch höher, aber nicht signifikant.

Der Nutzungstyp Weide weist in der Tiefenstufe 10-15 cm einen signifikant ($p < 0.05$) höheren Eindringwiderstand auf als die Nutzungsform Mähwiese intensiv. In den

restlichen Tiefenstufen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Nutzungen erhoben werden.

Die Weiden und die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung wiesen in keiner Tiefenstufe signifikante Unterschiede auf.

Die Mähweiden wiesen in allen Tiefenstufen, außer der ersten (2-5 cm), signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände auf als die Weiden und die Mähwiesen intensiv. Dies kann wahrscheinlich auf die abwechselnde Befahrung und Beweidung der Mähweiden zurückzuführen sein.

In den Tiefenstufen 5-10 cm, 10-15 cm und 15-20 cm wiesen die Mähweiden signifikant ($p < 0.05$) höhere Eindringwiderstände auf als die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung.

Die Mähwiesen intensiv und die Mähwiesen extensiv wiesen in keiner Tiefenstufe signifikante Unterschiede auf. Auf den Tiefenstufen 2-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm konnten auf der Mähwiese intensiv jedoch leicht höhere Eindringwiderstände vorgefunden werden als auf der Mähwiese extensiv.

Grundsätzlich konnten auf den Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung, in allen Tiefenstufen, höhere Eindringwiderstände erkannt werden als auf den Mähwiesen intensiv. Die Weiden wiesen auf den ersten 10 cm leicht höhere Eindringwiderstände auf als die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung. Ab 10 cm Bodentiefe hatten die intensiven Mähwiesen mit Herbstbeweidung höhere Eindringwiderstände als die Weiden. Die Weiden konnten bis in eine Tiefe von 25 cm höhere Eindringwiderstände vorweisen als die intensiven Mähwiesen. Diese hatten dann in der Tiefenstufe 25-30 cm höhere Eindringwiderstände als die Weiden. Dies sind zwar keine eindeutigen und signifikanten Ergebnisse, jedoch könnte es sein, dass Verdichtungen durch Beweidung eher nicht so tief reichen wie Verdichtungen durch intensives Befahren.

In den *Tabellen 43 bis 48* werden Mittelwert, Standardabweichung, Median, Minimum und Maximum des erhobenen Eindringwiderstandes, sowie die Grundgesamtheit der verschiedenen Nutzungsformen dargestellt.

Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|---|
| 2-5 | 1.04 | ± | 0.55 | 0.93 | 0.40 | 2.20 | 6 |
| 5-10 | 1.17 | ± | 0.49 | 1.06 | 0.60 | 2.20 | 6 |
| 10-15 | 1.43 | ± | 0.59 | 1.61 | 0.60 | 2.20 | 6 |
| 15-20 | 1.66 | ± | 0.57 | 1.83 | 0.78 | 2.32 | 6 |
| 20-25 | 2.04 | ± | 0.49 | 2.05 | 1.28 | 3.02 | 6 |
| 25-30 | 2.25 | ± | 0.44 | 2.23 | 1.48 | 2.88 | 6 |

Tabelle 43: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

mw = Mittelwert

sd = Standardabweichung

min = Minimum

max = Maximum

n = Grundgesamtheit

Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 2-5 | 1.16 | ± | 0.48 | 1.11 | 0.23 | 2.80 | 24 |
| 5-10 | 1.51 | ± | 0.45 | 1.48 | 0.68 | 2.80 | 24 |
| 10-15 | 1.99 | ± | 0.46 | 2.02 | 1.04 | 2.90 | 24 |
| 15-20 | 2.20 | ± | 0.53 | 2.17 | 1.24 | 3.24 | 24 |
| 20-25 | 2.20 | ± | 0.69 | 2.26 | 1.02 | 3.56 | 24 |
| 25-30 | 2.12 | ± | 0.75 | 2.12 | 0.90 | 3.96 | 24 |

Tabelle 44: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

Mähwiese intensiv

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 2-5 | 1.09 | ± | 0.31 | 1.00 | 0.43 | 1.68 | 24 |
| 5-10 | 1.31 | ± | 0.32 | 1.37 | 0.58 | 1.86 | 24 |
| 10-15 | 1.49 | ± | 0.42 | 1.41 | 0.68 | 2.32 | 24 |
| 15-20 | 1.63 | ± | 0.47 | 1.52 | 0.76 | 2.38 | 24 |
| 20-25 | 1.82 | ± | 0.51 | 1.99 | 0.78 | 2.54 | 24 |
| 25-30 | 1.87 | ± | 0.59 | 1.88 | 0.76 | 3.92 | 24 |

Tabelle 45: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähwiese intensiv

Mähweide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 2-5 | 1.32 | ± | 0.74 | 1.21 | 0.03 | 3.40 | 18 |
| 5-10 | 2.12 | ± | 0.73 | 1.84 | 0.76 | 3.76 | 18 |
| 10-15 | 2.55 | ± | 0.53 | 2.54 | 1.58 | 3.46 | 18 |
| 15-20 | 2.61 | ± | 0.54 | 2.73 | 1.50 | 3.48 | 18 |
| 20-25 | 2.60 | ± | 0.54 | 2.70 | 1.40 | 3.60 | 18 |
| 25-30 | 2.32 | ± | 0.62 | 2.41 | 1.00 | 3.28 | 18 |

Tabelle 46: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Mähweide

Weide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 2-5 | 1.19 | ± | 0.43 | 1.24 | 0.30 | 2.00 | 30 |
| 5-10 | 1.56 | ± | 0.43 | 1.53 | 0.58 | 2.66 | 30 |
| 10-15 | 1.78 | ± | 0.43 | 1.68 | 0.82 | 2.80 | 30 |
| 15-20 | 1.89 | ± | 0.54 | 1.82 | 0.94 | 3.46 | 30 |
| 20-25 | 1.85 | ± | 0.54 | 1.76 | 0.90 | 3.12 | 30 |
| 25-30 | 1.72 | ± | 0.53 | 1.64 | 0.90 | 3.34 | 30 |

Tabelle 47: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Weide

Pferdeweide

| Tiefe in cm | mw | | sd | median | min | max | n |
|-------------|------|---|------|--------|------|------|----|
| 2-5 | 1.63 | ± | 0.79 | 1.59 | 0.18 | 3.33 | 18 |
| 5-10 | 2.65 | ± | 0.88 | 2.56 | 0.82 | 4.34 | 18 |
| 10-15 | 2.94 | ± | 0.55 | 2.85 | 1.88 | 4.38 | 18 |
| 15-20 | 3.09 | ± | 0.49 | 3.10 | 1.98 | 4.26 | 18 |
| 20-25 | 3.06 | ± | 0.58 | 3.06 | 1.88 | 4.42 | 18 |
| 25-30 | 3.12 | ± | 0.63 | 3.14 | 2.10 | 4.24 | 18 |

Tabelle 48: Eindringwiderstand in MPa der Nutzung Weide (Pferd)

Tabelle 49: Statistischer Vergleich vom Eindringwiderstand der unterschiedlichen Nutzungsformen untereinander

| | | p<0.05 | mw | sd | median | min | max | n |
|-------------------------|---------------------------------------|------------|------|--------|--------|------|------|----|
| Tiefenstufe 2-5 cm | Mähweide | ab | 1.32 | ± 0.74 | 1.21 | 0.03 | 3.40 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | ab | 1.04 | ± 0.55 | 0.93 | 0.40 | 2.20 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | b | 1.09 | ± 0.31 | 1 | 0.43 | 1.68 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | ab | 1.16 | ± 0.48 | 1.11 | 0.23 | 2.80 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 1.63 | ± 0.79 | 1.59 | 0.18 | 3.33 | 18 |
| | Weide | ab | 1.19 | ± 0.43 | 1.24 | 0.3 | 2 | 30 |
| Tiefenstufe 5-10 cm | Mähweide | a | 2.12 | ± 0.73 | 1.84 | 0.76 | 3.76 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | b | 1.17 | ± 0.49 | 1.06 | 0.60 | 2.20 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | b | 1.31 | ± 0.32 | 1.37 | 0.58 | 1.86 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | b | 1.51 | ± 0.45 | 1.48 | 0.68 | 2.80 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 2.65 | ± 0.88 | 2.56 | 0.82 | 4.34 | 18 |
| | Weide | b | 1.56 | ± 0.43 | 1.53 | 0.58 | 2.66 | 30 |
| Tiefenstufe 10-15 cm | Mähweide | a | 2.55 | ± 0.53 | 2.54 | 1.58 | 3.46 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | bc | 1.43 | ± 0.59 | 1.61 | 0.60 | 2.20 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.49 | ± 0.42 | 1.41 | 0.68 | 2.32 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | b | 1.99 | ± 0.46 | 2.02 | 1.04 | 2.90 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 2.94 | ± 0.55 | 2.85 | 1.88 | 4.38 | 18 |
| | Weide | b | 1.78 | ± 0.43 | 1.68 | 0.82 | 2.80 | 30 |
| Tiefenstufe 15-20 cm | Mähweide | b | 2.61 | ± 0.54 | 2.73 | 1.50 | 3.48 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | cd | 1.66 | ± 0.57 | 1.83 | 0.78 | 2.32 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | d | 1.63 | ± 0.47 | 1.52 | 0.76 | 2.38 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | c | 2.20 | ± 0.53 | 2.17 | 1.24 | 3.24 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 3.09 | ± 0.49 | 3.10 | 1.98 | 4.26 | 18 |
| | Weide | cd | 1.89 | ± 0.54 | 1.82 | 0.94 | 3.46 | 30 |
| Tiefenstufe 20-25 cm | Mähweide | ab | 2.60 | ± 0.54 | 2.70 | 1.40 | 3.60 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | bc | 2.04 | ± 0.49 | 2.05 | 1.28 | 3.02 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | c | 1.82 | ± 0.51 | 1.99 | 0.78 | 2.54 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | bc | 2.20 | ± 0.69 | 2.26 | 1.02 | 3.56 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 3.06 | ± 0.58 | 3.06 | 1.88 | 4.42 | 18 |
| | Weide | c | 1.85 | ± 0.54 | 1.76 | 0.90 | 3.12 | 30 |
| Tiefenstufe 25-30 cm | Mähweide | b | 2.32 | ± 0.62 | 2.41 | 1 | 3.28 | 18 |
| | Mähwiese extensiv | bc | 2.25 | ± 0.44 | 2.23 | 1.48 | 2.88 | 6 |
| | Mähwiese intensiv | cd | 1.87 | ± 0.59 | 1.88 | 0.76 | 3.92 | 24 |
| | Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung | bcd | 2.12 | ± 0.75 | 2.12 | 0.9 | 3.96 | 24 |
| | Pferdeweide | a | 3.12 | ± 0.63 | 3.14 | 2.1 | 4.24 | 18 |
| | Weide | d | 1.72 | ± 0.53 | 1.64 | 0.9 | 3.34 | 30 |

mw = Mittelwert

min = Minimum

n = Grundgesamtheit

sd = Standardabweichung

max = Maximum

p = Signifikanzwert

4.7 Korrelation Lagerungsdichte und Eindringwiderstand

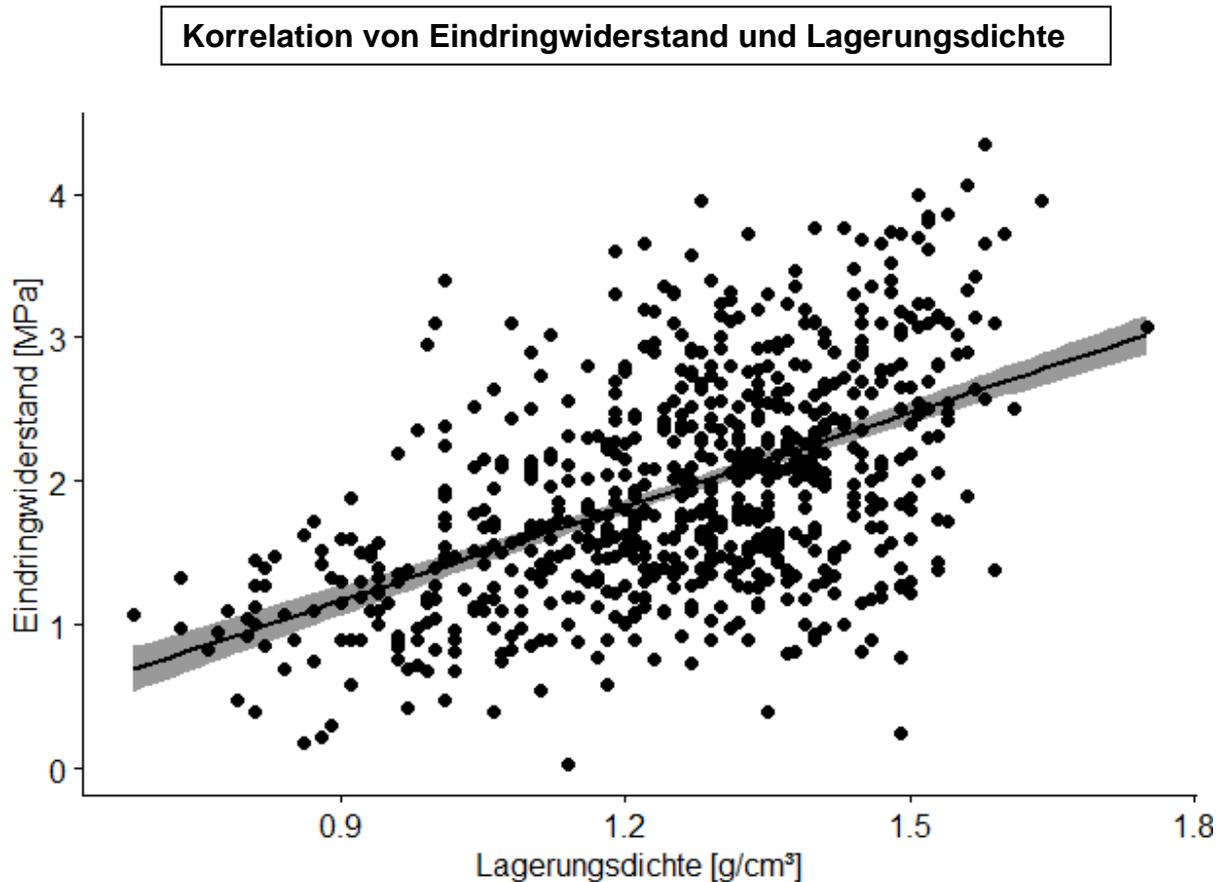


Abbildung 40: Korrelation der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Lagerungsdichte in g/cm³

Tabelle 50: Ergebnis der Rangkorrelationsauswertung nach SPEARMAN der Parameter Eindringwiderstand in MPa und Lagerungsdichte in g/cm³

| | n | Spearmanischer Rangkorrelationskoeffizient | p |
|--------------------|-----|---|----------------|
| Eindringwiderstand | 120 | 0.51 | < 0.0001 ** |
| Lagerungsdichte | 120 | | |

In *Abbildung 40* und *Tabelle 50* wurde dargestellt, ob es einen Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Eindringwiderstand im Boden gibt. Laut der Rangkorrelationsauswertung nach Spearman gibt es eine hoch signifikante ($p < 0.0001$) positive Korrelation zwischen der Lagerungsdichte und dem Eindringwiderstand im Boden. Der Spearmanische Rangkorrelationskoeffizient beträgt 0.51.

Ein Zusammenhang von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand überrascht nicht, da beide von ähnlichen Bodenfaktoren wie Korngrößenverteilung, Porenvolumen,

Bodenwasser- sowie Bodenhumusgehalt beeinflusst werden. Auch Bohner et al. (2017) konnte ähnliche Ergebnisse beim Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Eindringwiderstand erzielen.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Nutzungstypen fiel auf, dass die Pferdeweiden die höchsten Lagerungsdichten sowie die höchsten Eindringwiderstände aller Nutzungstypen aufwiesen. Auffallen war, dass bei der Messung der Lagerungsdichte, die Weiden die zweithöchsten Lagerungsdichten hatten und bei der Messung des Eindringwiderstandes, die Mähweiden die zweithöchsten Eindringwiderstände nach den Pferdeweiden hatten. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass sich die Lagerungsdichte- und Eindringwiderstandswerte der unterschiedlichen Nutzungsformen beim Eindringwiderstand sowie bei der Lagerungsdichte ähnlich verhalten. Diese Korrelation ist auch in *Abbildung 40* zu erkennen.

4.7.1 Grafischer Vergleich von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand

In der *Abbildung 41* wird der lineare Zusammenhang zwischen den Lagerungsdichten der verschiedenen Nutzungstypen grafisch dargestellt. Die Lagerungsdichten steigen bei allen Nutzungstypen in den ersten 10 cm des Bodens am meisten an. Auch in den weiteren Tiefenstufen zwischen 10 und 30 cm, werden die Lagerungsdichten bei allen Nutzungstypen kontinuierlich größer. Hier kann aber kein starker Anstieg mehr beobachtet werden.

Auffallend ist, dass sich die Lagerungsdichten von Mähweiden, Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung sowie von Weiden im Tiefenverlauf sehr ähnlich verhalten. Sie steigen bis zu den ersten 10 cm relativ gleich an, in den darunter liegenden Tiefenstufen (10-30 cm) weisen die Weiden aber höhere Lagerungsdichten auf.

Die Mähwiesen intensiv und Mähwiesen extensiv weisen ebenfalls Ähnlichkeiten im Kurvenverlauf der Lagerungsdichte auf. Wegen der kleineren Stichprobengröße schlägt die Kurve der extensiven Mähwiesen wahrscheinlich weiter aus als die der Mähwiese intensiv. Mähwiese intensiv und extensiv weisen aber generell in allen Tiefenstufen geringere Lagerungsdichten auf als die beweideten Standorte. Bei diesen erreichen die Pferdeweiden wiederum die höchsten Lagerungsdichten. Auch Bohner et al. (2017) konnte in Untersuchungen ähnliche Ergebnisse erzielen, die

Untersuchungen zeigten ebenfalls höhere Lagerungsdichten auf beweideten Grünlandstandorten.

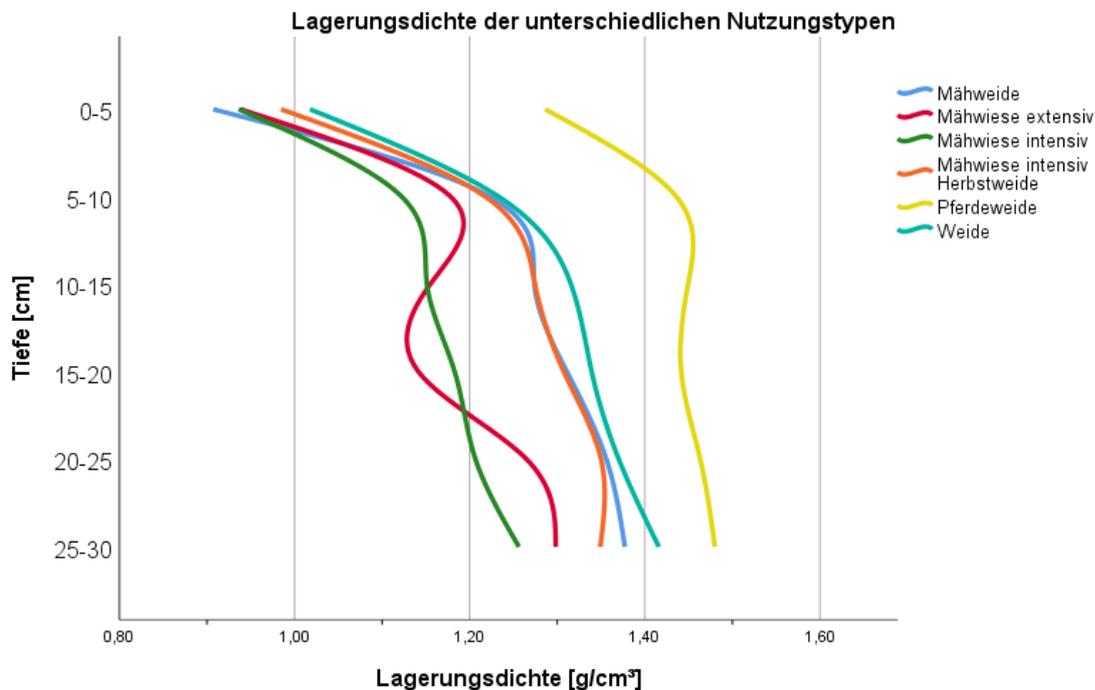


Abbildung 41: Grafischer Vergleich von Lagerungsdichten der unterschiedlichen Nutzungstypen

In *Abbildung 42* wird der lineare Zusammenhang zwischen den Eindringwiderständen der verschiedenen Nutzungstypen grafisch dargestellt. Auch hier steigen die Eindringwiderstände aller Nutzungstypen kontinuierlich, mit steigender Tiefe, an. In der ersten Tiefenstufe (2-5 cm) wurden, wie bei der Lagerungsdichte, die niedrigsten Werte gemessen.

Die Pferdeweiden und die Mähweiden weisen die höchsten Eindringwiderstandswerte auf. Die Weiden und die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung weisen bis in 10 cm Tiefe etwa die gleichen Eindringwiderstände auf. In den Tiefenstufen 10-30 cm weisen die Mähwiesen mit Herbstbeweidung höhere Eindringwiderstände auf als die Weiden. Für die höheren Eindringwiderstandswerte in den tieferen Bodenschichten (>10 cm) der Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung, im Gegensatz zur Weide, könnte das häufigere Befahren mit Maschinen mitverantwortlich sein. Da sich bei Bodenbelastungen mit Maschinen der Bodendruck eher in tiefere Bodenschichten ausbreitet (Bohner et al. 2017).

Ebenfalls ist erkennbar, dass der Kurvenverlauf der Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung und der Mähweide, bis in eine Tiefe von 20-25 cm, relativ ähnlich verläuft. Diese Ähnlichkeit der Kurven könnte mit der abwechselnden Beweidung und Mähnutzung beider Standorte zu tun haben.

Die intensiven Mähwiesen und die extensiven Mähwiesen weisen bis in eine Tiefe von 15-20 cm die niedrigsten Eindringwiderstände aller Nutzungen auf. Ab 20 cm Tiefe steigen die Eindringwiderstände der Mähwiesen intensiv und extensiv langsam an und die Weiden weisen die geringeren Eindringwiderstände auf. Somit könnte auch hier ein Zusammenhang mit den Aussagen von Bohner et al. (2017) bestehen, dass durch Befahrung eher tiefere Bodenschichten und durch Beweidung eher höher liegende Bodenschichten verdichtet werden.

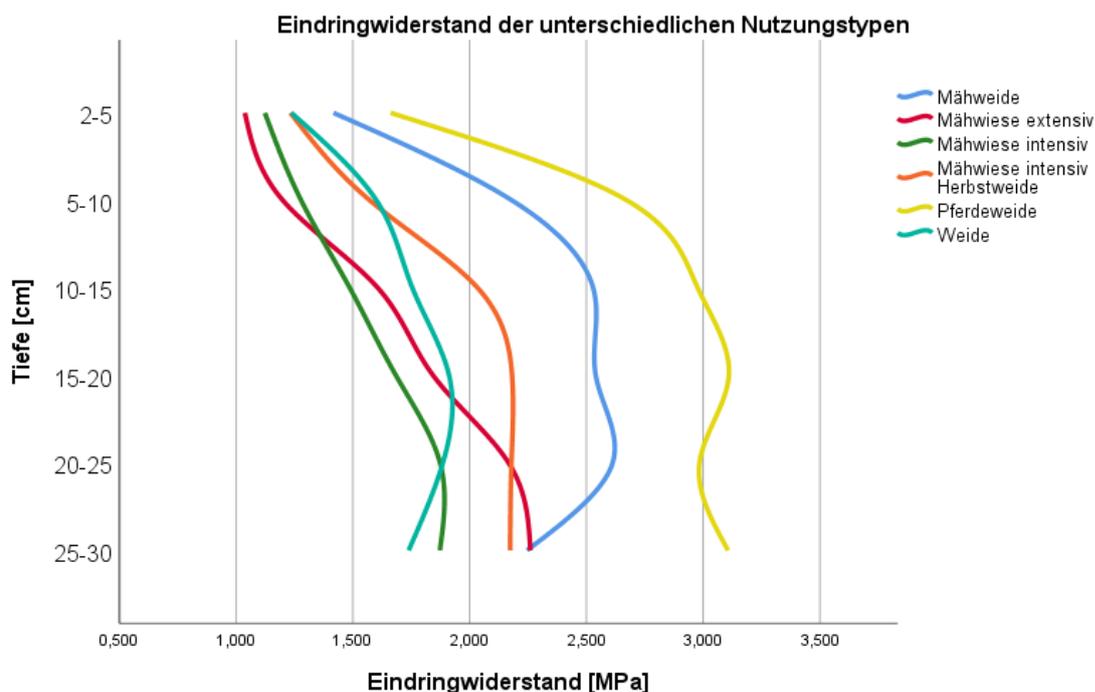


Abbildung 42: Grafischer Vergleich von Eindringwiderständen der unterschiedlichen Nutzungstypen

In den *Abbildungen 43 bis 48* werden Lagerungsdichte und Eindringwiderstand der einzelnen Nutzungstypen grafisch gegenübergestellt. Man kann hier die bestätigte Korrelation zwischen Lagerungsdichte und Eindringwiderstand aus *Kapitel 4.7* somit auch grafisch erkennen.

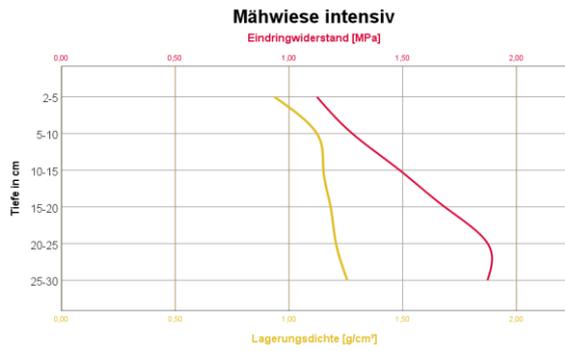


Abbildung 43: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese intensiv

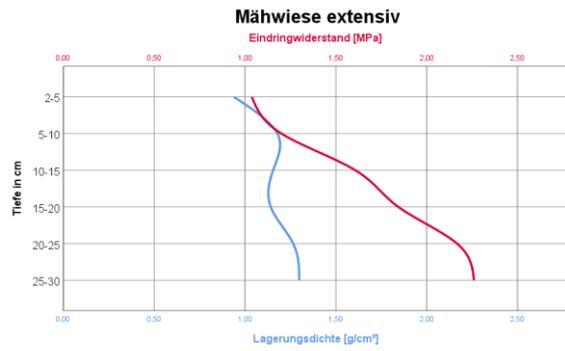


Abbildung 44: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese extensiv

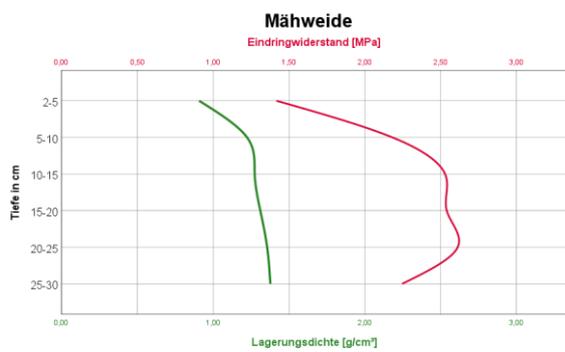


Abbildung 45: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähweide



Abbildung 46: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

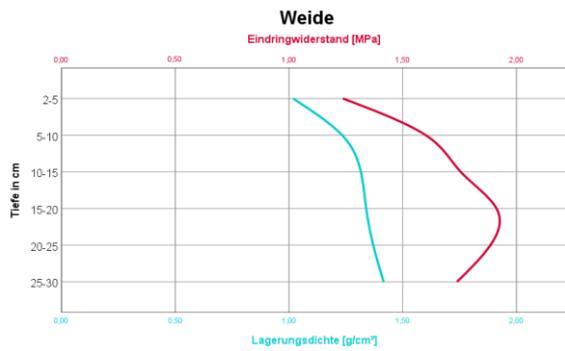


Abbildung 47: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Weide

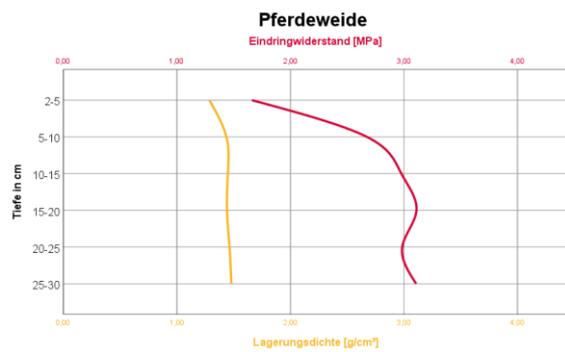


Abbildung 48: Vergleich von Eindringwiderstand und Lagerungsdichte der Pferdeweide

4.8 Vegetationsanalyse

Tabelle 51: Auflistung der erhobenen Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung aller untersuchten Standorte nach BRAUN-BLANQUET

| Nutzung | Nr. | Ranunculus repens | | | Poa annua | | | Plantago major | | | Bellis perennis | | | Leontodon autumnalis | | | Agrostis stolonifera | | | Polygonum aviculare | | | Matricaria discoidea | | | Σ D (%) |
|---------------|------|-------------------|----|---|-----------|----|---|----------------|----|---|-----------------|----|---|----------------------|---|---|----------------------|---|---|---------------------|----|---|----------------------|----|---|---------|
| | | D (%) | M | S | D (%) | M | S | D (%) | M | S | D (%) | M | S | D (%) | M | S | D (%) | M | S | D (%) | M | S | | | | |
| Mext (R) | s1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mint (Herbst) | s2 | | | | | | | 2 | 1 | 1 | 2 | + | 1 | | | | | | | | | | | | 4 | |
| Mint (Herbst) | s4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mint (Herbst) | s5 | | | | | | | 1 | + | 1 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 3 | | |
| Mint (Herbst) | s7 | 3 | 1 | 1 | | | | | | | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 5 | | |
| Mint | s11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mint | s17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mint | s18 | | | | | | | | | | 10 | 2a | 2 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | 12 | | |
| Mint | s19 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | 2 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | | | | | | | | 5 | | |
| MW | s12 | 10 | 2a | 2 | 3 | 2m | 2 | 1 | + | 1 | 10 | 2a | 2 | | | | 3 | 1 | 2 | | | | | 27 | | |
| MW | s13 | 35 | 3 | 3 | 10 | 2a | 3 | 1 | + | 1 | 15 | 2a | 2 | 1 | + | 1 | 2 | 1 | 1 | | | | | 64 | | |
| MW | s16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| W | s6 | 10 | 2a | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 18 | | |
| W | s8 | 3 | 1 | 1 | | | | 2 | 1 | 1 | | | | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | 7 | | |
| W | s9 | 3 | 2m | 2 | 2 | 2m | 2 | 5 | 2a | 2 | | | | | | | 2 | 1 | 2 | | | | | 12 | | |
| W | s14 | 35 | 3 | 3 | 3 | 2m | 2 | 3 | 1 | 1 | | | | 2 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | | | | | 44 | | |
| W | s15 | 3 | 2m | 2 | 2 | 2m | 2 | | | | 1 | + | 1 | | | | | | | | | | | 6 | | |
| W (Pferd) | s3.1 | | | | 10 | 2a | 3 | 30 | 3 | 2 | | | | | | | 3 | 1 | 2 | 20 | 2b | 2 | 5 | 1 | 1 | 68 |
| W (Pferd) | s3.2 | 10 | 2a | 2 | 10 | 2a | 3 | 20 | 2b | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | 44 | | |
| W (Pferd) | s10 | 3 | 2m | 2 | 2 | 1 | 2 | | | | | | | 1 | + | 1 | 2 | 1 | 1 | | | | | 8 | | |

D=Deckung in %

M=Menge (Artmächtigkeit)

S=Soziabilität (Geselligkeit)

Mext (R) = Mähwiese extensiv (Referenzfläche)

Mint = Mähwiese intensiv

Mint (Herbst) = Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung

MW = Mähweide

W = Weide

W (Pferd) = Pferdeweide

In *Tabelle 51* wurden alle Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung aufgelistet, die auf den Untersuchungsflächen erhoben wurden. Die Aufnahme und Auflistung erfolgte nach der Methode von BRAUN-BLANQUET (*siehe Kapitel 3.6.6*). Die Zeigerarten auf den Standorten wurden nach ihrer flächenmäßigen Deckung in %, der Menge bzw. Artmächtigkeit und der Soziabilität eingeteilt.

Es wurden auf rund 75% aller untersuchten Grünlandflächen Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung entdeckt. Auf dem extensiven Mähwiesenstandort (s1), auf dem intensiven Mähwiesenstandort mit Herbstbeweidung (s4), auf den intensiven Mähwiesenstandorten (s11 und s17) sowie auf dem Mähweidestandort (s16) wurden keine Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung gefunden. Wobei anzumerken ist, dass am Mähweidestandort (s16) die Beweidung nicht so intensiv durchgeführt wird wie auf den anderen Mähweidestandorten. Laut Bohner und Starz (2011) können Zeigerarten für Bodenverdichtung auf extensiv bewirtschaftetem Grünland gänzlich fehlen. Sie kommen eher auf intensiv genutzten Mäh- und Dauerweiden sowie Trittrassen vor. Diese Aussagen stimmen mit den Ergebnissen der Arbeit überein, da Zeigerpflanzen eher auf intensiveren Weide- und Mähweidestandorten gefunden wurden.

Auf den Standorten ohne Beweidung, bzw. mit nur kurzer Beweidung im Herbst, konnten weniger Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung erhoben werden als auf den Standorten mit intensiverer Beweidung. Dies könnte damit zu tun haben, dass der Tritt von Weidetieren eher den Oberboden, und damit den Wurzelbereich der Pflanzen, verdichtet. Diese Oberbodenverdichtung schafft Bodenverhältnisse, die Zeigerarten für Bodenverdichtung benötigen. Laut Bohner und Starz (2011) benötigen Bodenverdichtungszeigerpflanzen einen gut mit Nährstoffen versorgten und verdichteten Oberboden.

Auf den nicht beweideten, bzw. nur im Herbst beweideten Mähwiesen, wurden die Arten *Ranunculus repens*, *Plantago major*, *Bellis perennis* und *Leontodon autumnalis* festgestellt, jedoch nur zu einem geringen Deckungsgrad von 1-3%. Nur der intensive Mähwiesenstandort (s18) wies einen höheren Deckungsgrad von 10% bei der Art *Bellis perennis* auf.

Auf den beweideten Standorten wie den Mähweiden, den Weiden und den Pferdeweiden wurden mehr Zeigerarten für Bodenverdichtung entdeckt als auf den nicht beweideten oder nur im Herbst beweideten Standorten. Ebenfalls war der Gesamtdeckungsgrad der Bodenverdichtungszeiger zum Teil höher als auf den nicht beweideten oder nur im Herbst beweideten Standorten. Es wurden die Arten *Ranunculus repens*, *Poa annua*, *Plantago major*, *Bellis perennis*, *Leontodon autumnalis*, *Agrostis stolonifera*, *Polygonum aviculare* und *Matricaria discoidea* mit unterschiedlichen Deckungsgraden von 1-35% festgestellt. Laut Bohner et al. (2017) können die höchsten Deckungsgrade von Bodenverdichtungszeigern auf intensiv

beweideten Grünlandstandorten nachgewiesen werden. Diese Aussage konnte mit den Untersuchungen bestätigt werden.

Auf den Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung wurden die Zeigerarten *Ranunculus repens*, *Plantago major* und *Bellis perennis* festgestellt. Wobei der Deckungsgrad dieser Arten nur zwischen 1-3% lag.

Auf den Mähwiesen intensiv wurden die Zeigerarten *Ranunculus repens*, *Bellis perennis* und *Leontodon autumnalis* festgestellt. Der Deckungsgrad dieser Arten lag zwischen 1-2%. Einzig auf Standort s18 kam *Bellis perennis* mit einem Deckungsgrad von 10% vor.

Auf den Mähweiden kam die Zeigerart *Ranunculus repens* mit einem Deckungsgrad zwischen 10 und 35% am häufigsten vor. Die Art *Bellis perennis* kam zwischen 10 und 15% am zweithäufigsten vor, und die Art *Poa annua* kam zwischen 3 und 10% am dritthäufigsten vor. Die Arten *Plantago major*, *Leontodon autumnalis* und *Agrostis stolonifera* kamen nur zu einem geringen Deckungsgrad von 1 und 3% vor.

Auf den Weiden kam *Ranunculus repens* ebenfalls am häufigsten vor. Der Deckungsgrad lag zwischen 3 und 35%. Darauf folgten die Arten *Poa annua* und *Plantago major* mit Deckungsgraden zwischen 2 und 5%. Die Arten *Bellis perennis*, *Leontodon autumnalis* und *Agrostis stolonifera* kamen mit einem Deckungsgrad von 1 bis 3% vor.

Auf den Pferdeweiden konnten alle Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung festgestellt werden. Die Arten *Ranunculus repens*, *Poa annua* sowie *Plantago major* kamen mit Deckungsgraden zwischen 2 und 30% am häufigsten vor. Die Arten *Bellis perennis*, *Leontodon autumnalis*, *Agrostis stolonifera*, *Polygonum aviculare* und *Matricaria discoidea* kamen mit Deckungsgraden zwischen 1 und 20% vor.

Auffallend war, dass die Arten *Polygonum aviculare* und *Matricaria discoidea* nur am Pferdeweidestandort (s3.1) gefunden wurden. Da dieser Standort eine extrem intensiv genutzte und befahrene Pferdeweide ist, kann vermutet werden, dass diese Arten erst auf sehr stark verdichteten und intensiv beweideten Standorten vorkommen. Laut Wilmanns (1998) ist die Vogelknöterich-Kamillen-Gesellschaft [*Polygono (aequalis)-Matricarietum discoideae*] eine häufig vorkommende einjährige Trittgesellschaft, welche auch auf lehmigen Wegen vorkommt und etwas höhere Nährstoffgehalte bevorzugt.

Der Pferdeweidestandort (s3.1) wies mit 68% den höchsten Gesamtdeckungsgrad an Bodenverdichtungszeigern auf. Da der Pferdeweidestandort (s3.1), auch im Vergleich mit *Tabelle 20*, nahezu die höchsten Lagerungsdichten aufweist, kann vermutet werden, dass es eine Korrelation zwischen der hohen Lagerungsdichte des Standortes (s3.1) und dem hohem Gesamtdeckungsgrad an Zeigerarten für Bodenverdichtung gibt. Laut Bohner et al. (2017) besteht ein höchst signifikanter Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad von Zeigerpflanzen und den bodenphysikalischen Messwerten über Bodenverdichtung.

Die auf allen Untersuchungsstandorten mit Abstand am häufigsten vorkommende Zeigerpflanze für Bodenverdichtung ist *Ranunculus repens*. Sie kommt vor allem auf beweideten Standorten vor. Die am zweithäufigsten vorkommende Zeigerpflanze ist *Plantago major*, gefolgt von *Poa annua*. Diese Arten kommen vermehrt auf beweideten Standorten vor. Die Zeigerart *Bellis perennis* kommt ebenfalls häufig vor, jedoch auch auf beweideten und nicht beweideten Standorten.

Laut Wilmanns (1998) gehören die Arten *Ranunculus repens*, *Plantago major*, *Poa annua*, *Leontodon autumnalis* und *Agrostis stolonifera* zu der Klasse der Flut- und Trittrasen. Pflanzenarten die Kriechtriebe aufweisen, sind zum Teil in der Lage, offenen Boden sowie Lücken im Pflanzenbestand zu überwinden. Sie können einerseits mit Bodenverdichtungen gut zurechtkommen, andererseits können sie mit Verletzungen oder dem Tod einzelner Individuen, durch Störungen wie dem Befahren oder dem Beweiden, besser zurechtkommen.

Laut Bohner und Starz (2011) können Zeigerpflanzen bei häufigem Vorkommen Nährstoffreichtum im Boden, Oberbodenverdichtungen, eine zu intensive Nutzung oder Vegetationslücken anzeigen. Der Deckungsgrad von Zeigerarten sollte 30-40% nicht überschreiten, da durch die Ausbreitung von Zeigerpflanzenarten wertvolle Futtergräser im Dauergrünland verdrängt werden. Dies kann sich wiederum negativ auf die Menge und Qualität des Futterertrages auswirken. Bei den Untersuchungen für diese Arbeit, konnten die Aussagen der entsprechenden Literatur bestätigt werden. Auf den Untersuchungsflächen, auf denen der Deckungsgrad der Bodenverdichtungszeiger über 40% lag, haben sich die restlichen Futterpflanzen sowie die generelle Pflanzenzusammensetzung, im Hinblick auf Futterqualität und Ertragserwartung, eher nachteilig entwickelt.

Nach Dietl et al. (2012) kommt *Ranunculus repens* auf frischen bis nassen sowie nährstoffreichen und meist verdichteten Böden vor. Häufig tritt er in lückenhaften Vielschnittwiesen und in übernutzten Kriechrasenflächen auf. Auf den untersuchten Flächen konnte dies auch beobachtet werden, denn *Ranunculus repens* kam am häufigsten auf intensiv genutzten Weiden mit guter Nährstoffversorgung vor. Die durch intensive Beweidung geförderte Oberbodenverdichtung, könnte daher ideale Bedingungen für die Ausbreitung von *Ranunculus repens* schaffen.

Die durch Bodenverdichtung entstehende, schlechte Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzeln sowie die verdichtungsbedingte Staunässe im Oberboden, ist laut Bohner et al. (2017) der Grund für ein häufiges Auftreten von Bodenverdichtungszeigern im Grünland.

Grundsätzlich ist die Beurteilung von Zeigerpflanzen nur eine Momentaufnahme des Pflanzenbestandes. Da die Erhebung der Zeigerarten auf den Untersuchungsflächen nur zu einem Zeitpunkt erfolgte, kann nicht eindeutig gesagt werden, dass alle Zeigerarten für Bodenverdichtung entdeckt wurden, die am Standort tatsächlich vorkamen. Aufgrund unterschiedlicher Blühtermine sowie unterschiedlicher Hauptwachstumszeiten der verschiedenen Pflanzenarten, sollte laut Bohner und Starz (2013) eine Erhebung von Zeigerpflanzen zweimal in der Vegetationsperiode erfolgen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es gibt in unserer modernen Agrar- und Kulturlandschaft keine natürlichen unverdichteten Böden mehr. Die Bearbeitung des Bodens durch den Menschen führt über kurz oder lang zu einer Zusammenpressung und Absenkung der Bodenoberfläche (Amelung et al. 2018). Es wird daher auch in Zukunft immer wichtiger werden, schädliche Bodenverdichtungen möglichst zu vermeiden. Mittels dieser Arbeit wurde versucht den Verdichtungszustand von verschiedenen Grünlandnutzungsformen im Steirischen Murtal abzubilden, etwaige Zusammenhänge und Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Grünlandböden zu erheben bzw. zu erklären. Weiters wird es von großer Bedeutung sein, die Kenntnisse über den Bodenverdichtungszustand von Grünlandböden zu erweitern, da auch viele stoffliche Berechnungen des Bodens auf diesen Daten aufbauen.

Die Untersuchungen aus dem *Kapitel 4* zeigten, dass ein höherer Bodenwassergehalt sowie ein hoher organischer Kohlenstoffgehalt im Boden zu signifikant geringeren Lagerungsdichte- und Eindringwiderstandswerten führen kann. Ebenfalls konnte ermittelt werden, dass Lagerungsdichte und Eindringwiderstand durch die Bodentextur beeinflusst werden können. Vor allem ein hoher Sandanteil im Boden führte zu einer signifikant ($p < 0.05$) höheren Lagerungsdichte und zu signifikant ($p < 0.01$) höheren Eindringwiderstandswerten. Dies könnte auf die größere Korngrößenverteilung bei Sand, und dem damit einhergehenden kleineren Porenvolumen im Boden, zurückzuführen sein. Diese Aussagen können auch in der Literatur von Amelung et al. (2018) und Blume et al. (2011) bestätigt werden. Auch der Tongehalt im Boden hatte eine Auswirkung. Generell konnte ein höherer Tongehalt zu geringeren Lagerungsdichte- und Eindringwiderstandswerten führen. Die Lagerungsdichte wurde durch den Tongehalt signifikant ($p < 0.01$) beeinflusst, die Eindringwiderstandswerte jedoch nicht signifikant. Beim Schluffgehalt im Boden war dies umgekehrt, ein hoher Schluffgehalt verringerte den Eindringwiderstand signifikant ($p < 0.01$). Die Lagerungsdichte wurde jedoch nicht signifikant verringert.

In der ersten Tiefenstufe von 0-5 cm konnten generell auf allen Untersuchungsstandorten die niedrigsten Lagerungsdichte- und Eindringwiderstandswerte gemessen werden. Danach stiegen die Werte bis in die Tiefenstufe 25-30 cm kontinuierlich an.

Nach der nutzungsspezifischen Auswertung der Lagerungsdichte wiesen die Mähwiesen intensiv und die Mähwiesen extensiv generell die niedrigsten Lagerungsdichten in allen Tiefenstufen auf. Auch bei den Eindringwiderstandsmessungen wiesen die intensiven und extensiven Mähwiesen bis in eine Tiefe von 20 cm die geringsten Eindringwiderstände auf. Die Weidenutzung verfügte in den ersten 15 cm des Bodens über höhere Eindringwiderstände als die extensiven und intensiven Mähwiesen. Diese Ergebnisse stimmen auch mit den Untersuchungen von Verhonig (2013) überein. Ab einer Tiefe von 20 cm hatte der Nutzungstyp Weide jedoch eher einen geringeren Eindringwiderstand als extensive und intensive Mähwiesen.

Auffallend war, dass sich in allen Tiefenstufen (0-30 cm) die Lagerungsdichte der Nutzungstypen Weide, Mähweide und Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung nicht signifikant ($p < 0.05$) voneinander unterschied. Obwohl die Weideintensität der Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung, durch die ausschließliche Herbstbeweidung geringer war als die der Weiden und Mähweiden, konnten trotzdem nahezu gleiche Lagerungsdichten erhoben werden. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass auch schon eine einmalige Beweidung im Jahr, ähnliche Auswirkungen auf den Boden haben könnte, wie die Nutzung als Weide oder Mähweide. Um darüber genauere Aussagen treffen zu können, bräuchte es aber weitere Untersuchungen. Auch bei der Eindringwiderstandsmessung nahm die Mähwiese intensiv mit Herbstbeweidung eher eine Zwischenstellung zwischen Weiden und Mähweiden ein.

Die Mähweiden und die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung nahmen bei den Lagerungsdichten generell eine Mittelstellung zwischen den Pferdeweiden, Weiden und den Mähwiesen extensiv und intensiv ein. Die Eindringwiderstandsmessungen konnten diese Aussage jedoch nicht bestätigen. Hier hatten die Mähweiden und Pferdeweiden höhere Eindringwiderstände als die Mähwiesen intensiv mit Herbstbeweidung, Weiden und die Mähwiesen intensiv und extensiv.

Die höchsten Lagerungsdichten und Eindringwiderstände in allen Tiefenstufen wurden von den, sehr intensiv im Sommer und Winter beweideten, Pferdeweiden erreicht. Die Pferdeweiden erreichten in den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-15 cm signifikant ($p < 0.05$) höhere Lagerungsdichten als alle anderen Nutzungstypen. Diese hohen Lagerungsdichten im Oberboden weisen auf eine, durch intensive Pferdebeweidung entstandene, starke Verdichtung des Oberbodens hin. Auch Bohner et al. (2017)

konnte bei seinen Erhebungen feststellen, dass eine intensive Beweidung vor allem den Oberboden, zwischen 5 und 15 cm, stark verdichtet. Die Pferdeweiden wiesen auch die mit Abstand höchsten Eindringwiderstandswerte auf. Sie reichen von 1.63 MPa in der Tiefenstufe 2-5 cm bis 3.12 MPa in der Tiefenstufe 25-30 cm.

Auf 75% aller Untersuchungsstandorte wurden Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung entdeckt. Vor allem auf intensiveren Weide-, Mähweide- und Pferdeweidestandorten konnten hohe Deckungsgrade von Bodenverdichtungszeigerpflanzen festgestellt werden. Dies überrascht nicht, da gerade diese Standorte mitunter hohe Lagerungsdichten und Eindringwiderstände aufwiesen. Die meisten Zeigerpflanzen für Bodenverdichtung sind Flachwurzler, welche gut an Bedingungen wie sie bei verdichteten Oberböden vorkommen, angepasst sind. Auch Bohner et al. (2017) konnten bei ihren Untersuchungen auf intensiv beweideten Standorten, die höchsten Deckungsgrade von Bodenverdichtungszeigern feststellen. Die Art *Ranunculus repens* (Kriechender Hahnenfuß) konnte in allen Nutzungstypen, außer den extensiven Mähwiesen, nachgewiesen werden. Vor allem aber in den Mähwiesen, Weiden und Pferdeweiden kam sie mit höheren Deckungsgraden vor, was *Ranunculus repens* (Kriechender Hahnenfuß) zu einem verlässlichen Bodenverdichtungszeiger machen könnte. Die Bodenverdichtungszeiger *Polygonum aviculare* (Vogelknöterich) und *Matricaria discoidea* (Strahlenlose Kamille) kamen nur an einem einzigen Standort vor, dem Pferdeweidestandort s.3.1. Dieser Standort wies die höchsten Lagerungsdichten und sehr hohe Eindringwiderstandswerte auf. Daraus könnte man schließen, dass diese beiden Zeigerpflanzen eher auf sehr stark verdichteten Standorten vorkommen.

6. LITERATURVERZEICHNIS

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.

Amelung, W.; Blume, H. P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B. M. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Spektrum.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2012): Bodenschutzbericht 2012. Bodenzustandsinventur Bezirk Murtal. Graz: Abteilung 10 Land- und Forstwirtschaft.

BFW (2020): Bundesforschungszentrum für Wald - Bodenkartierung eBOD. Online verfügbar unter <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=7067>, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

BIO AUSTRIA (Hg.) (2009): Bodenhandbuch für das Grünland. Unter Mitarbeit von Bauer H., Bohner A., Danner M., Größ C., Prankl P. und Starz W. Linz: Denkmayr, Druck & Verlag GmbH.

Blume, H. P.; Stahr, K.; Leinweber, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3., neubearbeitete Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

BMLFUW (2013): Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz - Bodenfunktionsbewertung: Methodische Umsetzung der ÖNORM L 1076. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.ages.at/download/0/0/7cf47d49dad196e6c46c8a25df08c715f329e6a2/fileadmin/AGES2015/Service/Landwirtschaft/Boden_Datein/Broschueren/bodenfunktionsbewertung_web.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

BMNT (2019): Grüner Bericht 2019. Die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Hg. v. Bundesministerin für Nachhaltigkeit und Tourismus, Stubenring 1, 1010 Wien. Online verfügbar unter www.gruenerbericht.at, zuletzt geprüft am 18.04.2020.

Bohner, A. (2015): Bericht über das 20. Alpenländische Expertenforum zum Thema Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland. 1.-2. Oktober 2015 HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Irdning: HBLFA Raumberg-Gumpenstein.

Bohner, A.; Buchgraber, K.; Froschauer, J.; Galler, J.; Holzner, H.; Humer, J.; Pöllinger, A.; Pötsch, E. M. (2002): Kalk. Wichtig für Acker und Grünland. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Bohner, A.; Herndl, M. (2011): Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden. Bericht der 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung. Irdning: LFZ Raumberg-Gumpenstein.

Bohner, A.; Krautzer, B.; Starz, W.; Graiss, W.; Haslgrübler, P. (2011): Extensive Wiesen. Bedeutung, Nutzung und Pflege. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Bohner, A.; Starz, W. (2011): Zeigerpflanzen im Wirtschaftsgrünland. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Bohner, A.; Starz, W. (2013): Zeigerpflanzen für den Wasserhaushalt und den Säuregrad des Bodens im Grünland. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Bohner, A.; Gehmacher, P.; Bodner, G.; Strauss, P. (2017): Bodenverdichtung im Dauergrünland und ihre Auswirkung auf die Grünlandvegetation. In: *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 68 (2), S. 113–129. DOI: 10.1515/boku-2017-0011.

Bohner, A.; Starz, W.; Angeringer, W.; Edler, V.; Steinwidder, A. (2019): Grünlandböden – Bodenleben aktivieren und Qualität erhalten. Teil 2: Lebensraum. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Boxberger, J.; Moitzi, G. (2007): Vermeidung von Bodenschadverdichtungen beim Einsatz von schweren Landmaschinen – eine aktuelle Herausforderung. Online verfügbar unter https://www.bmlrt.gv.at/land/laendl_entwicklung/Online-Fachzeitschrift-Laendlicher-Raum/archiv/2007/Moitzi.html, zuletzt geprüft am 10.06.2020.

Brandhuber, R.; Demmel, M.; Wild, M. (2010): Themenblatt Bodenverdichtung: Wenig Druck dem Boden zuliebe. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).

Online verfügbar unter
https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/ilt1_bodenfruchtbarkeit_themenblatt_bodenverdichtung.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2020.

Buchgraber, K. (2018): Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. Graz-Stuttgart: Leopold Stocker Verlag.

Buchgraber, K.; Schaumberger, A. (2006): Grünlandbewirtschaftung in Österreich. Hg. v. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter
<https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:070e7cc5-1b90-470b-b238-b8e011619346/Karl%20Buchgraber%20ua.%20-%20Gr%C3%BCnlandbewirtschaftung%20in%20%C3%96sterreich.pdf>, zuletzt geprüft am 20.04.2020.

Deutsch, A. (2002): Bestimmungsschlüssel. Ein Führer zur einfachen und raschen Bestimmung sowie zum Kennenlernen wichtiger Grünlandpflanzen während der ganzen Vegetationszeit. 11. Aufl. Leopoldsdorf: Österreichischer Agrarverl.

Diepolder, M.; Raschbacher, S.; Brandhuber, R.; Kreuter, T. (2009): Auswirkung mechanischer Bodenbelastung auf Dauergrünland. Neue Versuchsergebnisse. Hg. v. LfL Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter
https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/bodenbelastung_gruenland.pdf.

Dierschke, H.; Briemle, G. (2008): Kulturgrasland. Wiesen, Weiden und verwandte Staudenfluren ; 20 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.

Dietl, W.; Jorquera, M.; Bassetti, P. (2012): Wiesen- und Alpenpflanzen. Erkennen an den Blättern, freuen an den Blüten. 4., durchgesehene, verb. und erg. Aufl. Wien: AvBuch.

EIJKELKAMP (2013): Penetrologger Gebrauchsanweisung. Hg. v. Giesbeek Eijkelkamp Agrisearch Equipment. Online verfügbar unter
<https://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/DU/m1-0615sadpenetrologger.pdf>, zuletzt geprüft am 22.04.2020.

Ellenberg, H.; Weber, H. E.; Düll, R.; Wirth, V.; Werner, W.; Paulißen, D. (1991): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Skripta Geobotanica XVIII. 3. Aufl. Göttingen: Erich Goltze KG.

Ellmauer, T. (1996): Die Bedeutung von Wiesengesellschaften für Biodiversität und Naturschutz in Österreich. In: *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien* (133), S. 277–299.

Englisch, T.; Karrer, G. (2001): Zeigerwertsysteme in der Vegetationsanalyse. Anwendbarkeit, Nutzen und Probleme in Österreich. In: *Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft* (13), S. 83–102.

Gehmacher, P. (2016): Einfluss der Bewirtschaftung auf die Lagerungsdichte und den Eindringwiderstand von Dauergrünlandböden des Salzburger Flachgaaes. Diplomarbeit. Wien.

Grone, J. (1991): Die Pferdeweide. 3 Aufl. Cham: Müller Rüschnikon (Wissen rund ums Pferd).

Hammel, K. (Hg.) (1993): Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 14. Stuttgart: Universität Hohenheim.

Hartge, K. H.; Horn, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung. 4., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.

Houlbrooke, D. J.; Thom, E. R.; Chapman, R.; Mclay, C.D.A (1997): A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40, 429-435.

Kilian, W.; Müller, F.; Starlinger, F. (1994): Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. Wien: Forstliche Bundesversuchsanstalt.

LAG (2015): Lokale Entwicklungsstrategie für die Leader Aktionsgruppe. InnovationsRegion Murtal. Online verfügbar unter https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/dokumente/12657605_141980903/dfe9e8bc/LES%20InnovationsRegion%20Murtal.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2020.

Lebert, M.; Brunotte, J.; Sommer, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Berlin: Umweltbundesamt.

Materechera, S. A.; Dexter, A.R; Alston, A. M. (1991): Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil* 135, 31-41.

Münker, B. (1982): Die farbigen Naturführer. Wildblumen. Unter Mitarbeit von G. Steinbach, F. Wendler und M. Stangier. München: Mosaik Verlag GmbH.

Nestroy, O.; Aust, G.; Blum, W.E.H.; 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: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft Peter-Jordanstr. 82b, 1190 Wien.

Rücknagel, J. (2014): Boden unter Druck. Schadverdichtungen vermeiden - Fruchtbarkeit sichern. Frankfurt am Main: DLG-Verlag (AgrarPraxis kompakt).

Schmid, B.; Schelske, O. (1997): Der Boden lebt. Bodenlos - Zum nachhaltigen Umgang mit Böden. In: *Politische Ökologie Sonderheft 10*.

Schroeder, D.; Blum, W.E.H. (1992): Bodenkunde in Stichworten. Berlin, Stuttgart: Hirt (Hirt's Stichwortbücher).

Stahl, H.; Marschall, K.; Götze, H.; Freytag, A. (2009): Bodendruck im Grünland. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Heft 3/2009. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Starz, W. (2007): Der Boden. als Grundlage des biologisch bewirtschafteten Grünlandes. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

Statistik Austria (o.J.): Land- und Forstwirtschaft. Hg. v. Bundesanstalt Statistik Österreich, Guglgasse 13, 1110 Wien. Online verfügbar unter http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/index.html, zuletzt geprüft am 18.04.2020.

Steinwider, A.; Starz, W.; Bohner A.; Angeringer, W.; Edler, V. (2019): Grünlandböden – Bodenleben aktivieren und Qualität erhalten. Teil 3: Nährstoffkreisläufe. Irdning: Österreichische Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG).

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

Wilmanns, O. (1998): Ökologische Pflanzensoziologie. Eine Einführung in die Vegetation Mitteleuropas. 6., neu bearb. Aufl. Wiesbaden: Quelle & Meyer (Uni-Taschenbücher, 269).

ZAMG (2020): Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Klimadaten von Österreich 1971 - 2000. Online verfügbar unter http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm, zuletzt geprüft am 07.04.2020.