



**Bundesamt für Wasserwirtschaft,
Institut für Kulturtechnik
und Bodenwasserhaushalt**



**Universität für
Bodenkultur Wien**

**Agentur für
Gesundheit und
Ernährungssicherheit**



EINFLUSS VERSCHIEDENER BODENBEARBEITUNGS- SYSTEME AUF BODENPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN IM PANNONISCHEN TROCKENGEBIET

MASTERARBEIT

Verfasserin: **Edith Kamptner**

Betreuer: **Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Nicola Rampazzo**

DI Dr. Peter Strauss

Aschbach, am 11.02.2014

DANKSAGUNG

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Peter Strauss vom BAW Petzenkirchen. Er unterstützte mich nicht nur fachlich sehr kompetent und hatte immer ein offenes Ohr für meine Fragen, sondern er fand auch stets motivierende und inspirierende Worte. Vielen Dank für diese konstruktive und bereichernde Zusammenarbeit!

Auch bei meinem Betreuer Dr. Nicola Rampazzo von der BOKU möchte ich mich für die Unterstützung bedanken. Ein großes Dankeschön gilt den LabormitarbeiterInnen des BAW Petzenkirchen – Ing. Monika Kumpan, Ricarda Frenzl, Silvia Jungwirth und Matthias Karner – welche die Analyse meiner Proben im Labor durchführten. Bedanken möchte ich mich auch bei Ing. Franz Aigner vom BAW Petzenkirchen, welcher mit mir den physisch anstrengenden Teil der Arbeit – die Probenahme im Feld – bewältigte. Mein Dank gilt auch Mag. Thomas Bauer vom BAW Petzenkirchen und Dr. Walter Wenzel von der BOKU.

Bei Dr. Heide Spiegel von der AGES möchte ich mich für Ihre Unterstützung bei der Masterarbeit und dafür bedanken, dass ich die Bodenbeprobungen auf dem Langzeitversuch der AGES durchführen durfte.

Ein großes Dankeschön möchte ich meinem Mann Johannes aussprechen. Ich konnte mit ihm spannende Fachdiskussionen führen, er unterstützte mich bei EDV-technischen Belangen und er war eine wichtige moralische Begleitung.

Bei meinen Eltern Elisabeth und Gottfried möchte ich mich ganz herzlich dafür bedanken, dass sie mir durch ihre Unterstützung das Studium ermöglichten, und immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten.

Ich bin dankbar für die schöne und lehrreiche Zeit an der BOKU. Ich habe viele nette und interessante Menschen kennengelernt und konnte meinen Horizont erweitern. Die vielfältigen Erfahrungen während meiner Studienzeit möchte ich nicht missen.

Inhaltsverzeichnis

1	KURZFASSUNG / ABSTRACT	1
1.1	KURZFASSUNG	1
1.2	ABSTRACT.....	2
2	EINLEITUNG.....	4
2.1	SYSTEME DER BODENBEARBEITUNG	4
2.1.1	<i>Konventionelle Bodenbearbeitung</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Konservierende Bodenbearbeitung</i>	<i>6</i>
2.1.3	<i>Direktsaat</i>	<i>6</i>
3	ZIELSETZUNG UND HYPOTHESE.....	7
4	MATERIAL UND METHODEN	10
4.1	VERSUCHSANLAGE	10
4.1.1	<i>Klima</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Boden.....</i>	<i>12</i>
4.1.3	<i>Kulturführung</i>	<i>13</i>
4.1.4	<i>Bodenbearbeitung</i>	<i>14</i>
4.2	BODENBEPROBUNG	14
4.3	LABORANALYSEN UND –METHODIK.....	15
4.3.1	<i>Karbonatgehalt.....</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Korngrößenverteilung.....</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Rohdichte trocken und Porenanteil</i>	<i>19</i>
4.3.4	<i>Organischer Kohlenstoff</i>	<i>21</i>
4.3.5	<i>pF-Kurve.....</i>	<i>22</i>
4.3.6	<i>Ungesättigte und gesättigte Wasserleitfähigkeit</i>	<i>23</i>
4.4	STATISTISCHE DATENANALYSE	27
5	ERGEBNISSE	29
5.1	ERGEBNISSE DER VORERHEBUNG	29
5.2	BESCHREIBUNG DER PROBEHAHMESTANDORTE	30
5.2.1	<i>Bodenprofile</i>	<i>30</i>
5.2.2	<i>Korngrößenverteilung.....</i>	<i>37</i>
5.2.3	<i>Karbonatanteil.....</i>	<i>41</i>

5.3	ROHDICHTE TROCKEN UND PORENANTEIL	42
5.3.1	<i>Statusvergleich 2012</i>	42
5.3.2	<i>Vergleich 2001-2012</i>	44
5.4	ORGANISCHER KOHLENSTOFF.....	47
5.4.1	<i>Statusvergleich 2012</i>	47
5.4.2	<i>Vergleich 2001 – 2012</i>	49
5.5	PF-KURVE.....	53
5.5.1	<i>Statusvergleich 2012</i>	53
5.5.2	<i>Vergleich 2001-2012</i>	59
5.6	UNGESÄTTIGTE WASSERLEITFÄHIGKEIT K_U	61
5.7	GESÄTTIGTE WASSERLEITFÄHIGKEIT K_S	64
5.7.1	<i>Statusvergleich 2012</i>	64
5.7.2	<i>Vergleich 2001-2012</i>	68
5.8	KORRELATION ZWISCHEN EINZELNEN PARAMETERN.....	70
5.8.1	<i>Korrelation Bodenart – C_{org}-Konzentration</i>	70
5.8.2	<i>Korrelation Bodenart – Wassergehalt pF-Kurve</i>	71
5.8.3	<i>Korrelation C_{org}-Konzentration – Wassergehalt pF-Kurve</i>	71
5.8.4	<i>Korrelation C_{org}-Konzentration – Dichte</i>	72
6	DISKUSSION	73
6.1	ROHDICHTE TROCKEN	73
6.2	ORGANISCHER KOHLENSTOFF.....	74
6.3	PF-KURVE.....	77
6.4	UNGESÄTTIGTE WASSERLEITFÄHIGKEIT K_U	78
6.5	GESÄTTIGTE WASSERLEITFÄHIGKEIT K_S	80
6.6	KORRELATION ZWISCHEN EINZELNEN PARAMETERN.....	81
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	82
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	84
9	TABELLENVERZEICHNIS.....	86
10	LITERATURVERZEICHNIS	88

1 Kurzfassung / Abstract

1.1 Kurzfassung

Die reduzierte Bodenbearbeitung gewinnt seit Jahrzehnten sowohl aus ökonomischen (geringerer Kraftstoff- und Personalaufwand sowie kleinerer Maschinenpark) als auch aus ökologischen Gründen (Schutz vor Erosion und Evaporation, bessere Bodenstruktur) weltweit an Bedeutung. In dieser Masterarbeit wird untersucht, wie sich unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme auf die bodenphysikalischen Parameter Dichte, pF-Kurve, gesättigte Wasserleitfähigkeit (K_s) und ungesättigte Wasserleitfähigkeit (K_u) sowie auf den organischen Kohlenstoff (C_{org}) im Boden auswirken. Zu diesem Zweck wird ein Bodenbearbeitungs-Langzeitversuch in Fuchsenbigl im Marchfeld mit den drei Varianten Frässaat (ca. 5-8 cm Bearbeitungstiefe), Grubber (ca. 15 cm Bearbeitungstiefe), und Pflug (ca. 25-30 cm Bearbeitungstiefe) untersucht. Das Versuchsfeld liegt im pannonischen Trockenraum, die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt 9,5 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 525 mm. Im Jahr 2012 wurden Bodenproben in fünf Tiefenstufen (2-7, 10-15, 15-20, 32-37 und 52-57 cm) entnommen und die oben genannten Parameter im Labor bestimmt. Dadurch kann die Auswirkung der seit 24 Jahren kontinuierlich durchgeführten, unterschiedlichen Bodenbearbeitung auf die einzelnen Parameter verglichen werden. Zusätzlich sind bodenphysikalische Messdaten aus dem Jahr 2001 vorhanden, wodurch eine mögliche Veränderung der Parameter zwischen 2001 und 2012 untersucht werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die C_{org} -Konzentration im Bereich 0-15 cm bei der Variante Frässaat höher ist als bei den Varianten Grubber und Pflug, im Bereich darunter hat die Variante Pflug die höchste C_{org} -Konzentration. Der kumulierte C_{org} -Vorrat über den gesamten Horizont ist bei allen Varianten sehr ähnlich.

Die Dichte ist in den Bereichen 2-7 und 32-37 cm bei der Variante Frässaat signifikant geringer als bei den anderen Varianten. Im Horizont 15-20 cm ist die Dichte hingegen bei der Variante Pflug signifikant geringer als bei den anderen Varianten. Die Auswertung der pF-Kurven zeigt folgenden Trend: Im Oberboden ist der Wassergehalt im niedrigen Saugspannungsbereich bei der Variante Pflug höher als bei der Frässaat, im höheren Saugspannungsbereich hat hingegen die Variante Frässaat einen höheren Wassergehalt als

die Variante Pflug. Im Oberboden hat die Variante Frässaat bei hoher Wassersättigung die höchste K_u . Im Horizont 32-37 cm sind die K_u -Werte der Varianten Frässaat und Grubber über den gesamten Saugspannungsbereich (0-15000 hPa) höher als jene der Variante Pflug. K_s ist im obersten Horizont (2-7 cm) bei der Variante Frässaat signifikant höher als bei den anderen Varianten. Die C_{org} -Konzentration korreliert positiv mit dem Tonanteil ($r=0,60$) und negativ mit dem Sandanteil ($r=-0,41$). Die Korrelationsanalysen zeigen auch, dass sowohl die C_{org} -Konzentration als auch der Tonanteil mit zunehmender Austrocknung des Bodens eine immer wichtigere Rolle für die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens spielen.

1.2 Abstract

During the last decades, reduced tillage practices gained in importance worldwide. On the one hand, this is due to economic reasons (less fuel and labour costs) on the other hand this is due to ecologic reasons (protection from erosion and evaporation, improvement of soil structure). This master thesis investigates the influence of three different soil tillage systems on the soil physical parameters bulk density, water retention curve, saturated hydraulic conductivity (K_s) and unsaturated hydraulic conductivity (K_u) as well as on soil organic carbon (SOC). The treatments include conventional tillage with mouldboard plough to 25-30 cm depth (CT), reduced tillage with cultivator to 15 cm depth (RT) and minimum tillage to 5-8 cm depth (MT). The investigated long-term field trial is located in Fuchsenbigl (Marchfeld), which is part of the pannonic dry area with a mean annual temperature of 9,5 °C and a mean annual precipitation of 525 mm. In 2012, soil samples at five depths (2-7, 10-15, 15-20, 32-37 and 52-57 cm) were taken. The above mentioned parameters were analyzed in the laboratory, and a comparison after 24 years of continuous tillage operations could be performed. In addition, the availability of soil physical data of the year 2001 allowed a comparison of the parameters between 2001 and 2012.

SOC-concentration at 0-15 cm depth was higher for MT than for RT and CT, in deeper soil layers CT had the highest SOC-concentration. Total SOC storage of the whole horizon was almost similar for all treatments.

At 2-7 and 32-37 cm depth bulk density of MT was significantly lower than for RT and CT, in contrast bulk density of CT was significantly lower than for MT and RT at 15-20 cm depth.

The water retention curve showed following trend: In the upper soil CT can retain more water than MT at low suction levels, in contrast MT can retain more water than CT at higher suction levels. In the upper soil MT shows a higher K_u than RT and CT at low suction levels, at 32-37 cm depth K_u of MT and RT are higher than CT over the whole suction range (0-15000 hPa). At 2-7 cm depth K_s of MT is significantly higher than for RT and CT. SOC-concentration is positively correlated with the clay fraction ($r=0,60$) and negatively correlated with the sand fraction ($r=-0,41$). The analyses of correlation also show, that the SOC-concentration as well as the clay fraction play an important role for the water retention ability of a soil, which is getting more crucial with increasing dehydration of the soil.

2 Einleitung

2.1 Systeme der Bodenbearbeitung

Das Ziel landwirtschaftlicher Bodenbearbeitung ist die Schaffung eines optimalen Durchwurzelungsraumes für Nutzpflanzenkeimung und –wachstum durch Verbesserung von Bodenstruktur, Bodenwasser- und Lufthaushalt, biologischer Aktivität sowie Nährstoffspeicherung und –verfügbarkeit. Grundsätzlich gilt es, verschiedene Bodenbearbeitungszwecke zu unterscheiden. Die Grundbodenbearbeitung / Primärbodenbearbeitung dient der Lockerung der Ackerkrume bis in eine Tiefe von maximal 40 cm, wobei Verdichtungen durch das Befahren während der Vegetationsperiode mechanisch aufgelockert werden sollen. Zusätzlich sollen Ernterückstände sowie Unkraut und Ausfallgetreide eingearbeitet und damit ein „reiner Tisch“, welcher die Rückstandsfreiheit der Bodenoberfläche von organischem Material bezeichnet, geschaffen werden. Für die Grundbodenbearbeitung wird typischerweise der Pflug eingesetzt, welcher eine komplette Wendung des Bodenmaterials bewirkt. Bei weniger intensiver Bearbeitung kann auch der Grubber mit nichtwendender, mischender Funktion das Gerät der Wahl sein. Der Zweck der Saatbettbereitung / Sekundärbodenbearbeitung ist Zerkleinerung von Klumpen an der Oberfläche sowie die Herstellung eines eingeebneten, homogenisierten und rückverfestigten Untergrundes für die Saatablage. Häufig verwendete Geräte für die Saatbettbereitung sind Kreiselegge und Egge. Die Aufgabe der Stoppelbearbeitung ist die Bereitung eines Keimbettes für Ausfall- und Unkrautsamen, die Förderung der Strohverrottung sowie die Verringerung der unproduktiven Verdunstung durch Unterbrechung des kapillaren Stromes. Grubber und Scheibenegge sind die üblichsten Geräte für die Durchführung des Stoppelsturzes.

Nach der Bodenbearbeitungsintensität werden – abhängig vom jeweiligen Autor – verschiedene Bodenbearbeitungssysteme unterschieden. Buchner und Köller (1990) schlagen folgende Unterteilung vor, welche nachfolgend näher beschrieben wird:

- Konventionelle Bodenbearbeitung
- Konservierende Bodenbearbeitung
- Direktsaat

In Abbildung 1 sind die verschiedenen Systeme samt typisch verwendeter Geräte schematisch dargestellt.

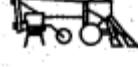
Bodenbear- beitungssystem	Arbeitsabschnitte			Ablauf der Arbeitsgänge
	Grundbodenbearbeitung	Saatbettbereitung	Saat	
<u>Konventionelle</u> Bodenbearbeitung		 oder 		getrennt
		 oder 		reduziert Saatbettbereitung u. Saat zusammengefaßt
				alle Arbeitsgänge zusammengefaßt
<u>Konservierende</u> Bodenbearbeitung	 	 oder 	Roll- oder Scheibenschare 	getrennt
	 	 oder 		reduziert Saatbettbereitung u. Saat zusammengefaßt
	 oder 			alle Arbeitsgänge zusammengefaßt
ohne Lockerung	—	 oder  oder 		ohne Grundbodenbear- beitung, Saatbettbereitung u. Saat zusammengefaßt
<u>Ohne</u> Bodenbearbeitung Direktsaat	—	—		Verzicht auf Grundbodenbear- beitung u. Saatbettbereitung

Abbildung 1: Bodenbearbeitungssysteme und verwendete Geräte (Buchner & Köller, 1990)

2.1.1 Konventionelle Bodenbearbeitung

Die intensivste Form der Bodenbearbeitung mit der längsten Tradition ist die konventionelle Bearbeitung, welche durch jährliche, krumentiefe Lockerung des Bodens mit dem Pflug gekennzeichnet ist. Der entscheidende Effekt des Pflügens ist das Wenden des Bodens, wobei organisches Material von der Oberfläche auf Arbeitstiefe eingearbeitet und somit der reine Tisch hergestellt wird. Der Mischeffekt ist durch den Wendevorgang reduziert, auch die Zerkleinerungswirkung ist nur mittel bis gering, während die Lockerungswirkung durch die groben Schollen mit vielen Zwischenräumen sehr stark ist. Zur Verringerung der Überlockerung können Packer eingesetzt werden. Für die anschließende Vorbereitung des Saatbettes muss eine Sekundärbodenbearbeitung durchgeführt werden, damit der Boden ausreichend zerkleinert und eingeebnet ist. Die intensive Auflockerung mittels Pflug erhöht in erster Linie den Anteil an luftführenden Grobporen. Aus diesem Grund ist der Pflugeinsatz in Regionen mit viel Niederschlag, wo der Sauerstoff durch die hohen Bodenwasseranteile verstärkt der limitierende Faktor wird, weiter verbreitet (Friedrich et al., 2008). Die wesentlichen Nachteile des Pflugeinsatzes sind der hohe Kraftstoffaufwand sowie die Entstehung einer – bei Bearbeitung des Bodens in zu feuchtem Zustand stark ausgeprägten – Pflugsohle. Die Pflugsohle ist ein Verdichtungshorizont, welcher eine Barriere für Bodenwasser, Bodentiere und Pflanzenwurzeln darstellt.

2.1.2 Konservierende Bodenbearbeitung

Das wesentlichste Merkmal der konservierenden Bodenbearbeitung, auch reduzierte Bodenbearbeitung genannt, ist die Reduzierung der Bearbeitungsintensität sowohl nach Art als auch nach Tiefe des mechanischen Eingriffes. Durch den Verzicht auf die tiefe, wendende Pflugbearbeitung werden Ernterückstände auf oder nahe der Bodenoberfläche belassen (Buchner & Köller, 1990). Die primäre Bearbeitung erfolgt in der Regel mittels Grubber. Im Vergleich zur Pflugbearbeitung resultiert das Grubbern in einem stärkeren Zerkleinerungs- und Mischeffekt. Das am Boden aufliegende organische Material wird dabei über eine geringere Tiefe (0-15 cm) eingemischt. Die Lockerungswirkung des Grubbers ist gleichmäßiger und geringer als beim Pflug, dennoch ist auch hier eine Rückverfestigung erforderlich. Eine weitere Variante ist die konservierende Bodenbearbeitung ohne Lockerung, wobei der Boden maximal 10 cm tief bearbeitet wird. Das grundsätzliche Ziel der konservierenden Bodenbearbeitung ist die Etablierung eines stabilen Bodengefüges, welches den Boden vor Verdichtungen durch Befahren schützt; sowie die Vermeidung von Erosion und Verschlammung durch eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung (Friedrich et al., 2008). Die Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche stellen allerdings auch erhöhte Ansprüche an die Saattechnik, welche unter den erschwerten Bedingungen störungsfrei und gleichmäßig arbeiten muss.

2.1.3 Direktsaat

Bei der Direktsaat, in der Literatur häufig No-till genannt, wird auf jegliche Bodenbearbeitung verzichtet. Die Aussaat erfolgt direkt in die Stoppel der Vorfrucht, wodurch die Sätechnik höchsten Anforderungen entsprechen muss. Die Direktsaat zeichnet sich durch hohe Schlagkraft und maximalen Erosionsschutz aus. Durch den Verzicht auf Bodenbearbeitung sind enorme Kraftstoff- und Arbeitszeiteinsparungen möglich. Die Eignung eines Bodens für die Direktsaat wird von der Textur beeinflusst. So sind strukturstabile, gut drainierende Ton- und Lehmböden mit optimalem Humusgehalt und pH-Wert durch den höheren Selbstlockerungseffekt leichter ohne Lockerungsmaßnahmen zu bestellen als struktur- und humusarme Sandböden, welche zur Verdichtung neigen (Friedrich et al., 2008). Durch den geringeren Unkrautdruck sind niederschlagsarme Gebiete einfacher mittels Direktsaat zu bewirtschaften als solche mit hohem Niederschlag. Probleme, die aus der Direktsaat resultieren können, sind neben der Bodenverdichtung das verstärkte Auftreten von schwer bekämpfbaren Unkrautarten sowie ein verschlechtertes

Keimpflanzenwachstum durch zu hohe Strohmenngen an der Bodenoberfläche und unregelmäßige Saatgutablage (Buchner & Köller, 1990). Daher erfordert der Umstieg von konventioneller auf Direktsaat eine gewisse Vorlaufzeit, da ein Mindestmaß an Praxiserfahrung im Umgang mit der neuen Sätechnik sowie mit den veränderten Bodenbedingungen Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung sind.

3 Zielsetzung und Hypothese

Die konservierende Bodenbearbeitung bzw. die Direktsaat gewinnen seit Jahrzehnten an Bedeutung. In den USA sind bereits ca. 23 % der gesamten bewirtschafteten Fläche auf No-till umgestellt (Triplett & Dick, 2008). Die Gründe für den Wechsel von konventioneller Bewirtschaftung mit Pflug zu reduzierter Bodenbearbeitung sind vielfältig. Zum einen spielen ökonomische Überlegungen eine wichtige Rolle. Wenn ein Landwirt / eine Landwirtin auf den Pflugarbeitsgang bzw. auf den Grubbereinsatz verzichtet, sind enorme Kosteneinsparungen durch einen kleineren notwendigen Fuhrpark sowie geringeren Personal- und Kraftstoffaufwand möglich. Bei langjährigen Feldversuchen in Hessen zum Vergleich von konventioneller Bearbeitung mit Pflug und Direktsaat wurden folgende Einsparungspotenziale festgestellt: Einsparung von 39 % bei den Investitionskosten, ein um 75 % geringerer Leistungsbedarf (kW) der Schlepper sowie eine Reduktion der Arbeitszeit um 80 % bei der Direktsaat (Friedrich et al., 2008). Zum anderen sind auch ökologische Überlegungen bei der Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung häufig die Beweggründe. Durch die ganzjährige Vegetationsdecke sowie größere und stabilere Bodenaggregate (Sasal et al., 2006) ist der Boden besser vor Erosion und Evaporation geschützt (Triplett & Dick, 2008; Tebrügge & Düring, 1999). Dadurch, dass der Boden kaum gestört wird und viele Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche als Nahrung zur Verfügung stehen, ist in Böden mit reduzierter Bodenbearbeitung eine höhere Anzahl an Regenwürmern vorzufinden (Anken et al., 2004; Birkás et al., 2004), welche die Bodenstruktur verbessern. Andere Versuchsergebnisse zeigen, dass der Pflugverzicht zu einem höheren Eindringwiderstand führt und der Boden somit weniger anfällig für Verdichtungen durch das Befahren mit Maschinen ist (Tebrügge & Düring, 1999; Singh & Malhi, 2006). Andererseits kann der erhöhte Eindringwiderstand aber auch zu schlechterer Wurzelentwicklung und weniger tiefer Durchwurzelung führen (Baker et al., 2007).

Auch die Wirksamkeit der reduzierten Bodenbearbeitung bzw. der Direktsaat als Maßnahme zur Erhöhung des organischen Bodenkohlenstoffs wurde in den letzten Jahren verstärkt untersucht (Chatterjee & Lal, 2009; Hermlle et al., 2008; Kay & VandenBygaart, 2002; Spiegel et al., 2007). Hintergrund dieser Forschungsarbeiten ist einerseits die mögliche Verbesserung des Pflanzenstandortes und der bodenmikrobiologischen Bedingungen durch Erhöhung der organischen Bodensubstanz, andererseits die Nutzung des Bodens als Kohlenstoffsенke zur Bekämpfung des Klimawandels. Ein Grund für die intensive Forschungstätigkeit in Bezug auf den Boden als Kohlenstoffspeicher ist die Tatsache, dass die im Boden im Bereich 0-30 cm gespeicherte Kohlenstoffmenge so hoch ist, dass sie das Zweifache des in der Atmosphäre als CO₂ gebundenen bzw. das Dreifache des in der oberirdischen Vegetation gebundenen Kohlenstoffpools darstellt (Powelson et al., 2011). Die Möglichkeit der CO₂-Speicherung durch reduzierte Bodenbearbeitung ist mittlerweile in den USA so breit akzeptiert, dass einige Landwirte für die Durchführung von konservierender Bodenbearbeitung über den Chicago Climate Exchange Ausgleichszahlungen von Firmen erhalten, welche Kohle verbrennen (Baker et al., 2007).

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll anhand eines Langzeitversuches am Standort Fuchsenbigl im Marchfeld untersucht werden, ob die dort angewandten Bodenbearbeitungsmethoden (Frässaat, Grubber und Pflug) zu Unterschieden hinsichtlich der bodenphysikalischen Eigenschaften sowie des Speichers an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Boden führen.

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Hypothese lautet:

Langjährige Bodenbearbeitung in verschiedenen Intensitätsstufen an einem möglichst homogenen Bodenstandort führt zu

- einer Differenzierung der bodenphysikalischen Parameter
- unterschiedlichen C_{org}-Konzentrationen/Vorräten im Boden

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden im Jahr 2012 am Standort Fuchsenbigl Bodenproben in fünf Tiefenstufen aus jeder der drei Bearbeitungsvarianten entnommen. Anhand der Laboranalyse dieser Bodenproben werden die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte, Porenanteil, pF-Kurve, ungesättigte und gesättigte hydraulische Wasserleitfähigkeit sowie der gespeicherte organische Kohlenstoff als Momentaufnahme – nach 24 Jahren differierender Bodenbearbeitung – zwischen den Varianten verglichen.

Weiters wurden Zusammenhänge zwischen den einzelnen bodenphysikalischen Parametern geprüft.

Zusätzlich kann auf bodenphysikalische Laboranalysen aus dem Jahr 2001 zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht den Einbezug des Faktors Zeit; die Veränderung der Bodenverhältnisse im Zeitraum 2001 – 2012 soll aufgezeigt werden. Hier steht die Frage im Vordergrund, ob es nach der im Jahr 2001 bereits seit 13 Jahren konstant gleich durchgeführten Bodenbearbeitung noch Veränderungen in den darauffolgenden 11 Jahren bis 2012 gab, oder ob bereits alle Bodenverhältnisse stabil waren.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Analyse sollen eine Bewertung der unterschiedlichen Bodenbearbeitungsmethoden im Hinblick auf die pflanzenbaulichen Parameter, insbesondere den Wasserhaushalt, ermöglichen.

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsanlage

Das in dieser Arbeit untersuchte Versuchsfeld befindet sich bei der Station Fuchsenbigl der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit („AGES“) im Marchfeld (Abbildung 2). Besonders hervorzuheben ist das lange Bestehen dieses Feldversuches. Der Standort wird bereits seit dem Jahr 1988, also seit 25 Jahren kontinuierlich in drei verschiedenen Bodenbearbeitungsintensitäten bewirtschaftet (Spiegel, Pfeffer, & Hösch, 2002):

- Variante „Pflug“: Bearbeitung mit Pflug, Grubber und Saatbeetkombination
- Variante „Grubber“: Bearbeitung mit Grubber und Saatbeetkombination
- Variante „Frässaat“: Frässaat ohne vorhergehende Bearbeitung bzw. Fräsarbeitsgang vor der Saat

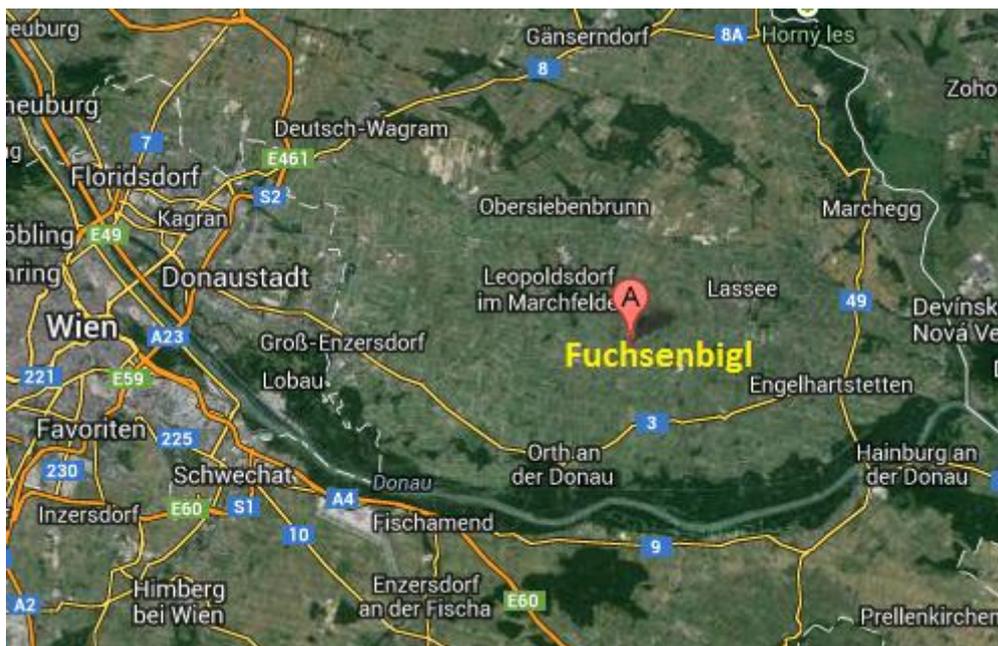


Abbildung 2: Kartenausschnitt mit Versuchsstandort Fuchsenbigl (Google Maps, 2013)

Der randomisierte Blockversuch besteht aus neun Parzellen, wobei eine Parzelle 60x12 m groß ist. Jede der drei Bodenbearbeitungsvarianten wird in drei Wiederholungen geführt. In dieser Arbeit wurden die Parzellen 4, 5 und 6 beprobt. Wie Abbildung 3 zeigt, wurde im Jahr 2001 eine Profilgrube je Variante ausgehoben. 2012 wurden zwei Profilgruben je Variante angelegt: jeweils eine Profilgrube für den Vergleich mit dem Jahr 2001 sowie eine weitere für den Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten zum Statuszeitpunkt 2012.

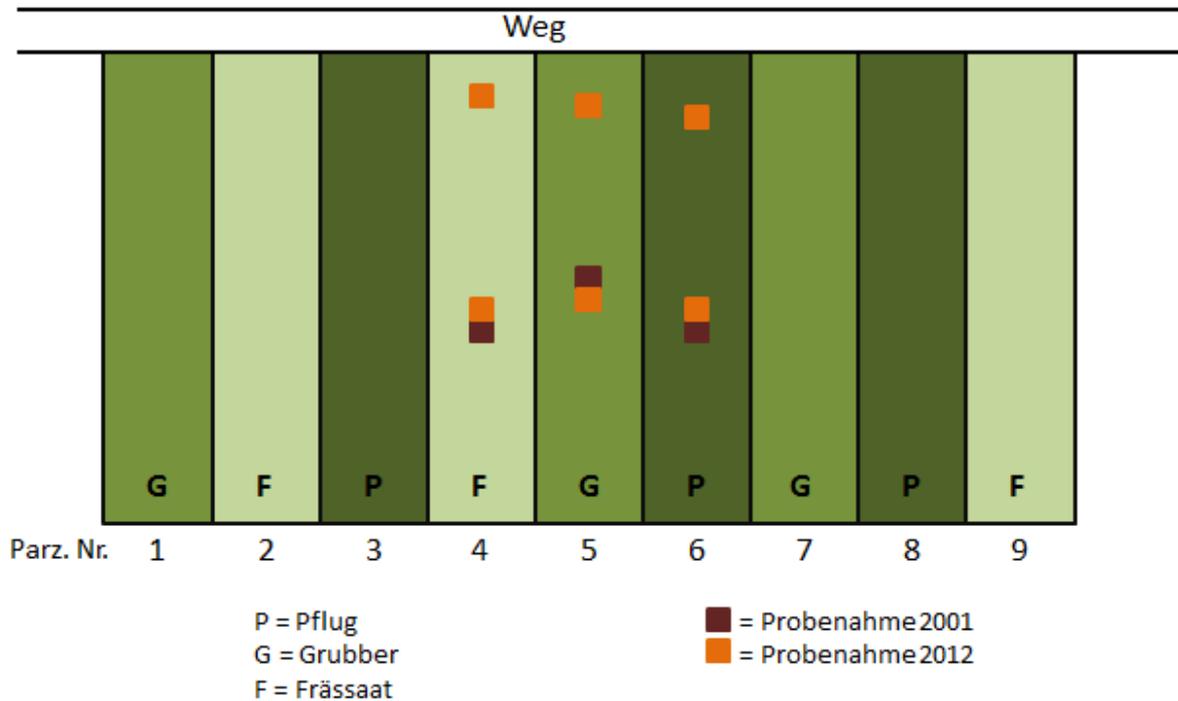


Abbildung 3: Versuchsplan des Bodenbearbeitungsversuches in Fuchsenbigl

4.1.1 Klima

Das Versuchsfeld befindet sich im pannonischen Trockenraum, welcher durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter gekennzeichnet ist (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Die Temperatur liegt im langjährigen Mittel (1971-2000) bei 9,5 °C, der Jahresniederschlag im langjährigen Mittel bei 525 mm (ZAMG, 2013). Durch den geringen Niederschlag, hohe Sommertemperaturen und häufigen Wind stellt das Wasser in vielen Jahren den limitierenden Faktor des Pflanzenwachstums dar, daher wird im Marchfeld häufig Beregnung eingesetzt.

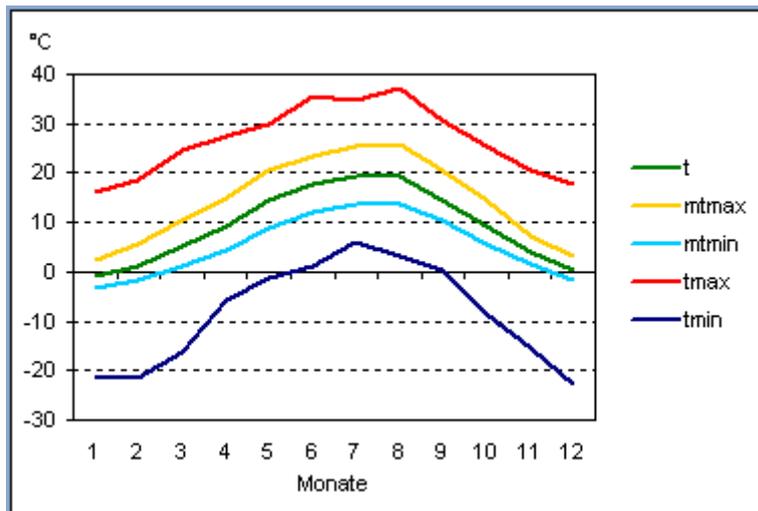


Abbildung 4: Temperaturdiagramm des Standortes Fuchsenbigl, langjährige Mittelwerte 1971-2000; t=Tagesmittel, mtmax=Mittel aller tägl. Maxima, mtmin=Mittel aller tägl. Minima, tmax=absolutes Maximum, tmin=absolutes Minimum (ZAMG, 2013)

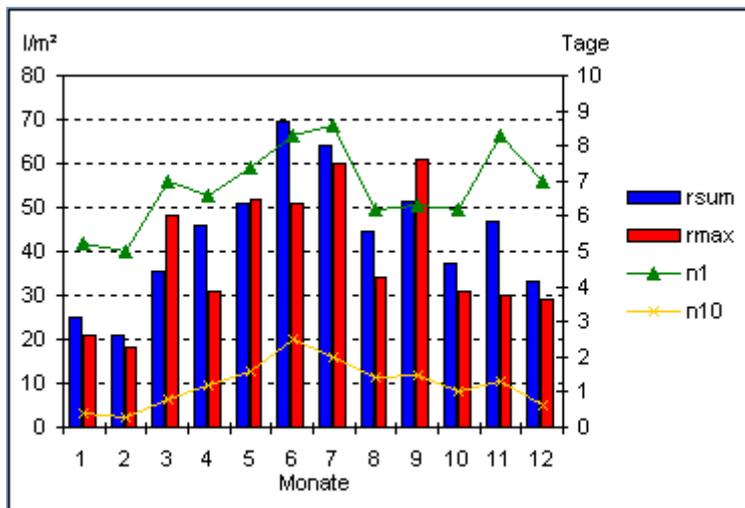


Abbildung 5: Niederschlagsdiagramm des Standortes Fuchsenbigl, langjährige Mittelwerte 1971-2000; rsum=Niederschlagssumme, rmax=größter Tagesniederschlag, n1=Anzahl Tage mit NS>1 mm, n10=Anzahl Tage mit NS>10 mm (ZAMG, 2013)

4.1.2 Boden

Auf dem Standort ist der für das Marchfeld typische Bodentyp Tschernosem anzutreffen. Durch die geringen Niederschläge und die kalten Wintertemperaturen konnten sich in diesem Gebiet zum Teil sehr mächtige, dunkel gefärbte A-Horizonte entwickeln. Laut der eBOD-Karte (Abbildung 6) des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) sind auf der Versuchsfläche zwei Bodenarten vorherrschend: sandiger Lehm und lehmiger Schluff.



Abbildung 6: Auszug eBOD-Karte mit Einfärbung der verschiedenen Bodenarten, Versuchsfeld schwarz eingerahmt (verändert nach BFW, 2013)

4.1.3 Kulturführung

Die Fruchtfolge auf dem Versuchsfeld umfasst Winterweizen, Körnererbse, Sommerweizen, Körnermais, Wintergerste, Sommergerste, Sorghum und Zuckerrübe. Die Düngung erfolgt mittels Mineraldünger gemäß den Richtlinien für sachgerechte Düngung des BMLFUW. In Tabelle 1 sind die Fruchtarten sowie die jeweilige NPK-Düngermenge für die Jahre 2000 bis 2012 aufgelistet. In besonders trockenen Jahren wird die Versuchsfläche bewässert. Vor der Beprobung im März 2001 war Winterweizen kultiviert worden. Im Jahr 2012 wurde die Probenahme nach der Ernte der Wintergerste im August durchgeführt.

Tabelle 1: Fruchtart und Düngung auf der Versuchsfläche Fuchsenbigl für die Jahre 2000-2012

Jahr	Fruchtart	Düngermenge (kg/ha)		
		N	P	K
2000	Winterweizen	120	22	42
2001	Zuckerrübe	100	39	149
2002	Sommerweizen	100	22	42
2003	Körnermais	120	28	125
2004	Winterweizen	120	0	0
2005	Sommerweizen	100	22	42
2006	Körnermais	120	33	125
2007	Winterweizen	120	15	0
2008	Zuckerrübe	100	0	0
2009	Sommergerste	80	24	66
2010	Körnermais	120	33	125
2011	Winterweizen	120	15	0
2012	Wintergerste	110	20	25

In Tabelle 2 sind die Erntemengen der verschiedenen Varianten für die Jahre 1998 bis 2005 aufgelistet (Spiegel et al., 2007). Es ist kein Trend erkennbar, dass eine Variante durchgängig die besten Erträge liefert. In sechs der acht untersuchten Jahre gibt es keinen statistischen Unterschied zwischen den Varianten. Im Jahr 1999 sind die Erträge der Sommergerste bei den Varianten Grubber und Pflug signifikant höher als bei der Variante Frässaat, und im Jahr 2005 wurde bei den Varianten Frässaat und Pflug höhere Sommerweizenerträge erzielt als bei der Variante Grubber.

Tabelle 2: Erträge des Bodenbearbeitungsversuches Fuchsenbigl 1998 bis 2005; unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$, Tukey (verändert nach Spiegel et al., 2007)

Jahr	Fruchtart	Erträge (t/ha)		
		Frässaat	Grubber	Pflug
1998	Sommerweizen	3,17 a	2,78 a	3,02 a
1999	Sommergerste	3,76 a	5,18 b	5,43 b
2000	Winterweizen	2,69 a	2,69 a	3,00 a
2001	Zuckerrübe	63,32 a	60,31 a	63,21 a
2002	Sommerweizen	3,08 a	3,04 a	2,72 a
2003	Körnermais	6,95 a	6,33 a	7,03 a
2004	Winterweizen	5,24 a	4,98 a	5,13 a
2005	Sommerweizen	2,44 b	2,10 a	2,50 b

4.1.4 Bodenbearbeitung

Bei der Variante Pflug (Arbeitstiefe ca. 25-30 cm) wird die Grundbodenbearbeitung wendend mittels Streichpflug durchgeführt. Die Stoppelbearbeitung erfolgt mit einem Grubber und die Saatbeetbereitung mittels Saatbeetkombination.

Bei der Variante Grubber (Arbeitstiefe ca. 15 cm) werden sowohl Grundboden- als auch Stoppelbearbeitung mit dem Grubber nichtwendend durchgeführt. Die Saatbeetbereitung erfolgt wie bei der Variante Pflug mittels Saatbeetkombination.

Die Variante Frässaat (Arbeitstiefe ca. 5-8 cm) wird ohne vorhergehende Bodenbearbeitung direkt mittels Frässaat System Horsch bestellt. Eine Ausnahme stellen Mais und Zuckerrübe dar: bei diesen Ackerfrüchten wird der Boden zuerst mit einer Fräse bearbeitet und der Anbau als eigener Arbeitsgang durchgeführt.

4.2 Bodenbeprobung

Am 7. März 2001 wurden auf jeder Variante Bodenproben entnommen. Die genauen Standorte der Profilgruben (Bezeichnung: Frässaat01, Grubber01, Pflug01) wurden anhand

einer bereits zuvor durchgeführten Erhebung der Bodenformen in einem Bereich festgelegt, der in allen Varianten die gleiche Bodenform darstellte. Die Beprobung wurde unter anderem für folgende Tiefenstufen durchgeführt: 2-7, 10-15, 15-20, 32-37 und 52-57 cm. Es wurden sowohl Stechzylinder als auch gestörte Bodenproben entnommen.

Da bei den Untersuchungen des Jahres 2001 trotz vorhergehender Bestimmung der Bodenformen sehr unterschiedliche Bodentexturen in den einzelnen Profilgruben auftraten (Sandgehalte im Oberboden zwischen 35 % und 46 %), wurde im Jahr 2012 eine weitere Vorerhebung durchgeführt. Am 29. Juni 2012 wurden gleich nach der Ernte der Wintergerste 57 gestörte Bodenproben im Bereich 0-5 cm gezogen und auf ihren Sandgehalt untersucht, wobei die GPS-Daten der jeweiligen Beprobungsorte erfasst wurden. Anhand dieser Ergebnisse wurden die Profilgrubenstandorte für den Statusvergleich im Jahr 2012 ausgewählt.

Am 13. und 14. August 2012 wurden pro Variante zwei Profilgruben ausgehoben. Jeweils eine Profilgrube (Bezeichnung: Frässaat, Grubber und Pflug) dient dem Vergleich der Varianten als Statusfeststellung im Jahr 2012, wobei hierfür Standorte mit einer möglichst homogenen Bodenart für eine bessere Vergleichbarkeit der bodenphysikalischen Parameter ausgewählt wurden. Die zweite Profilgrube je Variante (Bezeichnung: Frässaat12, Grubber12 und Pflug12) wird für den Vergleich der Entwicklung des Standortes zwischen den Jahren 2001 und 2012 herangezogen. Dazu wurden Beprobungsstellen in der Nähe der Profilgruben des Jahres 2001 mit möglichst ähnlichen Sandgehalten wie 2001 gewählt. Alle Profilgruben wurden in 5 Tiefenstufen beprobt (2-7, 10-15, 15-20, 32-37 und 52-57 cm). Pro Horizont wurden fünf Stechzylinder für die Untersuchung der Parameter Dichte, pF-Kurve, gesättigte Wasserleitfähigkeit sowie ein Stechzylinder für den Parameter ungesättigte Wasserleitfähigkeit und eine gestörte Probe für die Parameter Textur, C_{org} und Karbonat entnommen. Zusätzlich wurde auch je genetischem Bodenhorizont eine gestörte Bodenprobe für die Untersuchung der Parameter Textur, C_{org} und Karbonat entnommen.

4.3 Laboranalysen und –methodik

Die im Feld entnommenen Proben wurden in den Labors des Instituts für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen („BAW Petzenkirchen“) analysiert. Die Vorbereitung der gestörten Bodenproben erfolgte durch Lufttrocknen und Absieben sowie Homogenisieren des Feinbodens < 2mm, welcher für die

Laboranalysen herangezogen wurde. Die Stechzylinder-Proben wurden gleich nach dem Eintreffen im Labor gewogen und anschließend samt Deckeln in den Zylinderkoffern verwahrt, um Störungen und Austrocknung bis zur Durchführung der Analysen zu vermeiden.

4.3.1 Karbonatgehalt

Das bekannteste Karbonat Kalzit (CaCO_3) ist farblos und ein wichtiger Bestandteil zahlreicher Gesteinsarten. Weitere Karbonate sind der magnesiumhaltige Dolomit, das natriumhaltige Soda, der phosphorhaltige Apatit und der eisenhaltige Siderit (Müller, 1980). Die Karbonate stellen eines von mehreren Puffersystemen des Bodens dar und dienen der Stabilisierung des pH-Wertes. Bei sinkendem pH-Wert werden die Karbonate als erstes Puffersystem wirksam, und setzen bereits ab einem pH-Wert von 6,2 ein (Kuntze et al., 1994).

Die Bestimmung des Karbonatgehaltes erfolgt gemäß ÖNORM L 1084 (2006) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-13-04 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) gasvolumetrisch nach der Methode von Scheibler. Bei diesem Verfahren werden 0,5 bis 10 g vorbereiteter Boden in das Scheibler-Reaktionsgefäß (siehe Abbildung 7) eingewogen und anschließend 10 ml HCl-Lösung in den Einsatz des Gefäßes pipettiert. Das Reaktionsgefäß wird an der Scheiblerapparatur (Abbildung 7) angehängt und die HCl-Lösung über das eingewogene Bodenmaterial gegossen. Die Salzsäure zerstört die Karbonate, das dabei entstehende CO_2 verdrängt die Säulenflüssigkeit, welche mittels der Ausgleichshähne laufend angepasst werden muss. Nachdem alle Karbonate aufgelöst sind, wird die Menge der verdrängten Flüssigkeit (Scheiblergrade) abgelesen. In Kombination mit der Temperatur und dem Luftdruck der Umgebung kann anhand der Scheiblergrade die Masse an Karbonat, als CaCO_3 angegeben, berechnet werden.

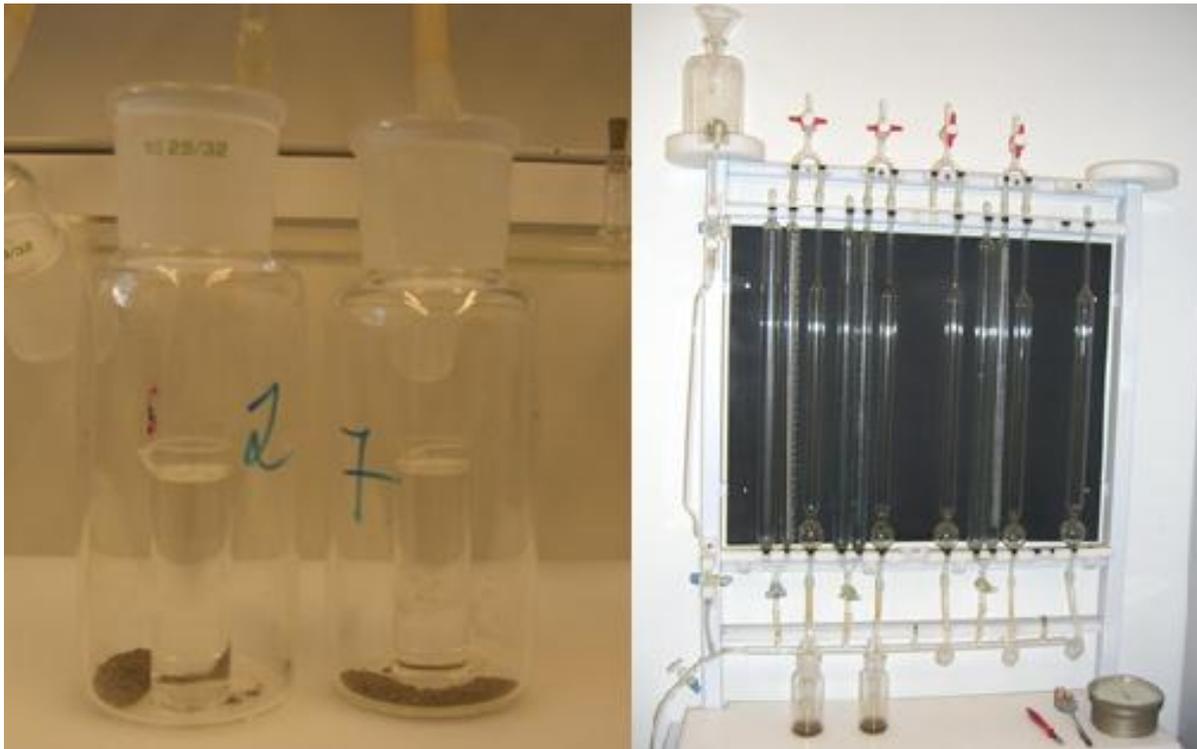


Abbildung 7: Links: Scheibler-Reaktionsgefäße mit Bodenproben und Salzsäure befüllt; Rechts: Scheibler Apparatur des BAW Petzenkirchen

4.3.2 Korngrößenverteilung

Die mineralischen Bestandteile des Bodens können der Größe nach in Grobboden und Feinboden unterteilt werden, wobei der Feinboden weiter in die Fraktionen Sand, Schluff und Ton differenziert wird. Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung, auch Textur oder Körnung genannt, wird der Feinboden kleiner 2 mm herangezogen, welcher anhand des Äquivalentdurchmessers klassifiziert wird (Tabelle 3).

Tabelle 3: Korngrößenklassen des Feinbodens (ÖNORM L 1050, 2004)

Fraktion	Kurzzeichen	Äquivalentdurchmesser (μm)
Sand	S	2000 - 63
Schluff	U	63 - 2
Ton	T	< 2

Nach Bestimmung der einzelnen Fraktionen kann mithilfe des Texturdreiecks die Bodenart bestimmt werden (Abbildung 8). Die Korngrößenverteilung zählt zu den sich am langsamsten verändernden Bodeneigenschaften und korreliert mit einer Reihe von anderen Bodeneigenschaften: Neben der Porosität und der Wasserleitfähigkeit stehen auch die Druckpotenzial-Wasseranteilsbeziehung sowie die Struktur- und Aggregatstabilität in Zusammenhang mit der Textur.

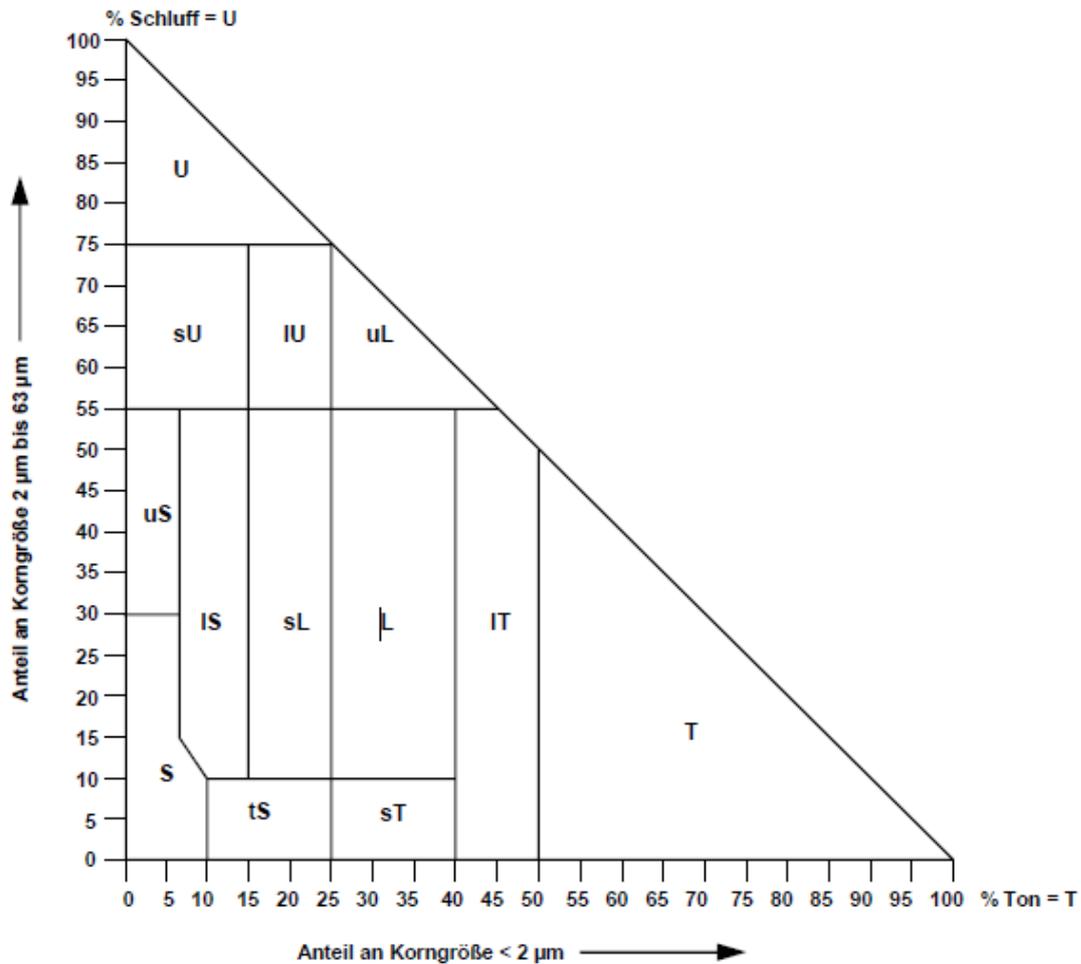


Abbildung 8: Österreichisches Texturdreieck (ÖNORM L 1050, 2004)

Aus diesem Grund ist es in der vorliegenden Arbeit von großer Bedeutung, für den Vergleich zwischen den verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten möglichst ähnliche Korngrößenverteilungen an allen Probenahmestandorten zu haben, um tatsächlich den Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Bodenparameter darstellen und Verfälschungen durch unterschiedliche Textur vermeiden zu können.

Die Texturanalyse im Labor wird gemäß ÖNORM L 1061-2 (2002) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-21-05 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) mittels kombinierter Nasssiebung und Sedimentation ohne Humuszerstörung durchgeführt. Zur Ermittlung des Sandanteils werden 10 g der vorbereiteten gestörten Bodenprobe mit Tetranatriumdiphosphat-Dekahydrat-Lösung dispergiert und anschließend durch ein Sieb mit der Maschenweite 0,063 mm (Grenze Sand/Schluff) nassgesiebt. Der Siebrückstand wird anschließend bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen. Für die Analyse des Tonanteils wird der Siebdurchgang in Standzylindern im

Wasserbad temperiert, homogenisiert (Abbildung 9) und nach der entsprechenden Fallzeit für Ton in Abdampfschalen abpipettiert, welche wiederum bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet, im Exsikkator abgekühlt und gewogen werden. Der Schluffanteil wird als Differenz zwischen Gesamt-, Ton- und Sandmasse berechnet.



Abbildung 9: Homogenisieren des Bodenmaterials in den Standzylindern

4.3.3 Rohdichte trocken und Porenanteil

Die Rohdichte trocken („Dichte“) stellt das Verhältnis zwischen Masse und Volumen des Bodens dar und wird in g/cm^3 bzw. t/m^3 angegeben. In dieser Arbeit wird als Masse die bei 105°C ofengetrocknete Substanz zugrunde gelegt. Die Dichte ist im Gegensatz zur Textur kein konstanter Parameter, sondern ein Kennzeichen des veränderlichen Gefügestandes und beschreibt den Lagerungs- bzw. Verdichtungszustand eines Bodens (Hartge & Horn, 2009). In Tabelle 4 sind übliche Dichtewerte für verschiedene Böden angegeben. Grundsätzlich lässt sich ein Boden umso stärker verdichten, je höher der Ungleichförmigkeitsgrad der Bodenart ist, wobei eine Verdichtung des Bodens über 2 g/cm^3 unmöglich ist (Kuntze et al., 1994).

Tabelle 4: Dichte verschiedener Böden (verändert nach Kuntze et al., 1994)

Boden	Dichte (g/cm^3)
S-, U-Boden (je nach Humusgehalt)	1,2 – 1,8
T-, L-Boden (je nach Humusgehalt)	1,1 – 2,0
Humusboden (je nach Zersetzungsgrad und Entwässerung)	0,05 – 0,5

Aufgrund der Korngrößenverteilung und Formenvielfalt der Primärteilchen kann die feste Bodensubstanz auch bei dichtester Lagerung nicht den gesamten Raum ausfüllen, es bleiben immer Zwischenräume frei – diesen stellen den Porenraum des Bodens dar (Scheffer, et al., 2010). Die Poren sind das im Boden vorhandene Volumen für Bodentiere, Pflanzenwurzeln, Luft und Wasser. Dadurch beeinflusst der Porenraum sowohl alle Organismen im Boden, als auch Transport- und Verlagerungsprozesse und Wechselwirkungen zwischen der festen, flüssigen und gasförmigen Phase.

Die Bodenporen werden nach ihrem Äquivalentdurchmesser in unterschiedliche Gruppen unterteilt (Tabelle 5). Die Grobporen dienen vor allem der Durchlüftung sowie der Bewegung von Wasser im gesättigten Leitfähigkeitsbereich – Niederschlagswasser kann zwar rasch in diese Poren eindringen, dort aber nicht gegen die Schwerkraft gehalten werden. Mittelporen hingegen halten das Wasser so fest, dass Pflanzenwurzeln es noch entziehen können – sie führen das pflanzenverfügbare Wasser. Das in den Feinporen gespeicherte Wasser ist so fest gebunden (> 15.000 hPa), dass es für Pflanzen nicht nutzbar ist (Müller, 1980).

Tabelle 5: Einteilung der Poren nach dem Äquivalentdurchmesser (verändert nach Müller, 1980)

Bezeichnung	Äquivalentdurchmesser (µm)
Grobporen I (weit, schnell dränend)	> 50
Grobporen II (eng, langsam dränend)	50-10
Mittelporen I	10-3
Mittelporen II	3-0,2
Feinporen	< 0,2

Zur Bestimmung der Dichte und des Porenanteils gemäß ÖNORM L 1068 (2005) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-33-04 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) werden die Stechzylinderproben im Labor plan geschnitten, bei 105°C bis zur Massekonstanz ofengetrocknet, abgekühlt und gewogen. Die Dichte errechnet sich wie folgt:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V}$$

ρ_d Dichte trocken in g/cm^3
 m_d Masse der bei 105°C getrockneten Stechzylinderprobe in g
 V Volumen des Stechzylinders in cm^3

Der Porenanteil wird durch vorhergehende Bestimmung der Feststoffdichte mittels Pyknometer über folgende Formel berechnet:

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) * 100$$

n Porenanteil in % Volumen
 ρ_d Dichte trocken in g/cm^3
 ρ_s Feststoffdichte in g/cm^3

4.3.4 Organischer Kohlenstoff

Die organische Substanz, auch Humus genannt, umfasst alle pflanzlichen und tierischen Reste sowie deren Umwandlungsprodukte in und auf dem Boden; die lebenden Organismen zählen nicht dazu. Obwohl die organische Substanz nur wenige Prozent der gesamten Bodenmasse darstellt, ist sie für viele Bodenfunktionen von enormer Wichtigkeit. Die organische Substanz beeinflusst die Bodenfarbe und damit den Bodenwärmehaushalt des Oberbodens. Sie ist aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche mit überwiegend negativer Ladung ein entscheidender Faktor für die verfügbare Kationenaustauschkapazität sowie für die Bindung diverser anderer anorganischer und organischer Stoffe. Gemeinsam mit der Tonfraktion im Boden können stabile Ton-Humus-Komplexe gebildet werden, weshalb Humus auch als Verbesserer der Bodenstruktur gilt. Wird die organische Bodensubstanz mineralisiert, so stehen die dadurch freiwerdenden Nährstoffe den Pflanzen und Bodenorganismen zur Verfügung. Die wichtige Rolle des Bodens als Kohlenstoff-Speicher in der aktuellen Klimawandeldiskussion resultiert daraus, dass etwa 80 % des terrestrischen organischen Kohlenstoffs, der am aktiven Kohlenstoff-Kreislauf teilnimmt, in Böden gespeichert sind; lediglich 20 % sind in der Vegetation gebunden. Allerdings stellt sich bei langjährig konstanter Nutzung ein Gleichgewicht von Kohlenstoff-Zufuhr und -Abbau ein, wobei tonreiche Böden unter gleichen Klimabedingungen und gleicher Kohlenstoffzufuhr mehr Humus speichern können als Sand- oder Schluffböden (Scheffer, et al., 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die C_{org} -Konzentration mittels Nassoxidation gemäß ÖNORM L 1081 (1999) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-12-04 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) im Labor ermittelt. Die Methode bestimmt jene Stoffe, die unter den angewandten Bedingungen Cr(IV) zu Cr(III) reduzieren. Neben organischer Substanz sind dies vor allem auch Fe(II) und Mn(II), welche allerdings nur in Böden mit reduzierenden Bedingungen in nennenswerten Mengen vorkommen. Zur Probenanalyse werden 0,5-2 g vorbereiteter Boden in einem Erlenmeyerkolben mit Kaliumdichromat und Schwefelsäure versetzt und die Probe 30 Minuten bei einer Temperatur von 120-130° C erhitzt. Nach dem Abkühlen werden Wasser, Ortho-Phosphorsäure und Diphenylaminindikator zugesetzt, wobei die Probe durch den Diphenylaminindikator eine tiefblaue Farbe erhält. Anschließend wird mit der Eisen(II)-Sulfat-Heptahydratlösung titriert, bis das Tiefblau in eine Grünfärbung umschlägt. Durch die Bestimmung des Verbrauches an Eisen(II)-Sulfat-Heptahydratlösung

kann die Masse an organischem Kohlenstoff berechnet werden. Für jeden neuen Ansatz von Reagenzien werden zur Kontrolle zwei Blindwertbestimmungen durchgeführt.

4.3.5 pF-Kurve

Aus einer pF-Kurve, auch Druckpotenzial-Wasseranteilsbeziehung, Wasserspannungskurve, Matrixpotenzial-Wassergehaltskurve oder Bodenwassercharakteristik genannt, ist ablesbar, welcher Wassergehalt bei verschiedenen Matrixpotenzialen (pF-Werten) im Boden vorliegt. Der pF-Wert ist der dekadische Logarithmus des Betrages des Matrixpotenzials. Das Matrixpotenzial ist ein Maß für die Einwirkung der Bodenmatrix (alle festen Bestandteile des Bodens) auf das Bodenwasser. Je weniger Wasser im Boden gespeichert ist, desto stärker wird es durch matrixbedingte Kräfte festgehalten. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 10 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass Böden in Abhängigkeit von der Textur, welche die Porengrößenverteilung beeinflusst, sehr unterschiedliche pF-Kurven aufweisen. Die obere Grenze der Feldkapazität liegt zwischen 60 und 300 hPa, der permanente Welkepunkt wird mit 15.000 hPa angenommen. Der Bereich zwischen diesen beiden Grenzen gibt den für den Pflanzenbau interessanten Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser (= nutzbare Feldkapazität) an. Schluffböden haben grundsätzlich den höchsten Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser und zählen bei ausreichend Niederschlag zu den besten Pflanzenstandorten.

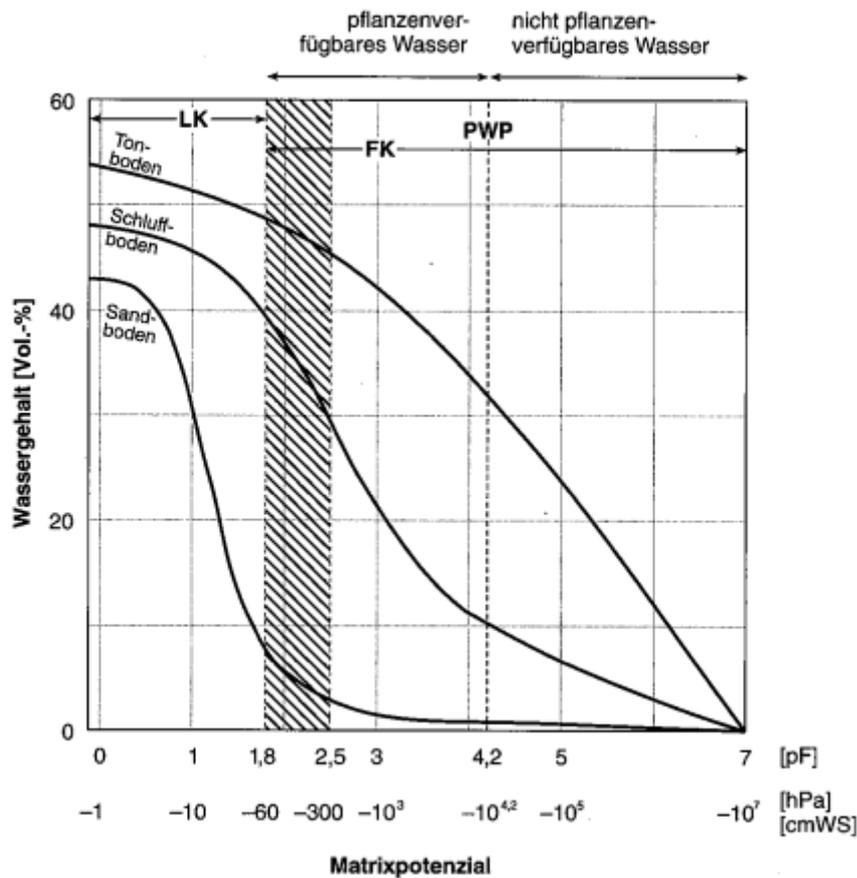


Abbildung 10: pF-Kurven für verschiedene Böden (Scheffer, et al., 2010)

Die pF-Kurve wird gemäß ÖNORM L 1063 (2006) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-31-05 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) mittels Überdruckmethode im Drucktopf ermittelt. Dazu werden die Stechzylinderproben sowie die Keramikplatte des Drucktopfes mit Wasser gesättigt. Anschließend werden die Proben im Drucktopf stufenweise entwässert und die Wassergehalte durch Abwiegen bei 0,1 / 10 / 30 / 60 / 100 / 300 / 800 / 3000 / 15000 hPa ermittelt. Für die Hochdruckstufen > 800 hPa werden anstatt der Stechzylinder je 3 aus den Stechzylindern ausgestochene Ringe für die Untersuchung verwendet. Durch Auftragen des Wassergehaltes gegen die jeweilige Druckstufe kann eine pF-Kurve erstellt werden.

4.3.6 Ungesättigte und gesättigte Wasserleitfähigkeit

Wenn Bodenwasser durch den Porenraum des Bodens fließt, wird die Fließbewegung durch die Eigenschaften des Porensystems (Anzahl, Größe und Form der Poren) beeinflusst. Dieser Einfluss des Bodens auf das durch ihn fließende Wasser wird durch die Wasserleitfähigkeit, auch hydraulische Leitfähigkeit oder nur Leitfähigkeit genannt, parametrisiert. Dabei sind die

Leitfähigkeit K_s im mit Wasser gesättigten Zustand und die Leitfähigkeit K_u im mit Wasser ungesättigten Zustand zu unterscheiden (Hartge & Horn, 2009).

K_s korreliert mit der Textur und ist grundsätzlich umso höher, je gröber die Textur ist. Allerdings kann die Ausbildung von Sekundärporen vor allem in feinkörnigen Böden zu einer starken Erhöhung von K_s führen. Laut Scheffer et al. (2010) ist der Zusammenhang zwischen Textur und K_s umso geringer, je näher der Beprobungsort an der Bodenoberfläche liegt. In den obersten Bodenschichten überprägen die gefügebedingten groben Sekundärporen die durch die Textur beeinflussten Primärporen. Daher gibt K_s Auskunft über die Strukturstabilität bzw. über beginnende Veränderungen der Bodenstruktur. Aufgrund des starken Einflusses von Form, Größe und Kontinuität der Poren streut K_s sehr stark. Wie Abbildung 11 zeigt, liegt K_s im Bereich zwischen 10^{-1} und 10^{-8} cm/s. Die Grafik verdeutlicht, dass es für jede Korngrößenverteilung einen primärporenbedingten Mindestwert für K_s gibt, welcher bei dichtester möglicher Lagerung der Körner auftritt. Texturbedingt weisen Sandböden die höchste K_s auf, jedoch können Schluffe und Tone durch strukturbedingte Elemente wie Schrumpfrisse, Wurzel- oder Tierröhren ebenfalls die Werte von Sanden erreichen (Hartge & Horn, 2009).

Die Bestimmung von K_s erfolgt gemäß ÖNORM L 1065 (2006) bzw. Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-32-04 (Bundesamt für Wasserwirtschaft, s.a.) durch Messung der Wassermenge, welche in einem definierten Zeitraum durch einen Zylinder bekannten Volumens fließt. Dazu werden die Stechzylinderproben mit Wasser gesättigt, mit der Unterseite auf ein Sieb gestellt und auf der oberen Seite mit einem Aufsatz versehen. Ein mit Leitungswasser gefüllter Rundkolben wird oberhalb des Stechzylinders auf einer Halterung fixiert, wobei die Druckhöhe durch den Abstand des Rundkolbens von der Zylinderoberkante eingestellt wird. Anschließend wird die den Zylinder pro Zeiteinheit durchströmende Wassermenge mittels Erlenmeyerkolben aufgefangen und gemessen (Abbildung 11). Dies wird so oft wiederholt, bis stationärer Fluss gegeben ist. Dieser ist erreicht, wenn sich bei drei aufeinanderfolgenden Messungen kein Trend zeigt und die Abweichungen vom Mittelwert weniger als $\pm 5\%$ betragen. Mithilfe folgender Formel kann im Anschluss K_s berechnet werden:

$$K_s = \frac{V \cdot L}{F \cdot t \cdot h}$$

K_s gesättigte Leitfähigkeit in m/d

V perkolierendes Wasservolumen pro Zeiteinheit in m^3

- t Zeit des Wasserdurchflusses in d
- L Länge der durchströmten Probe in m
- F Querschnitt der durchströmten Probe in m^2
- h Differenz vom Innenwasserspiegel bis zum Außenwasserspiegel (Druckhöhe) in m

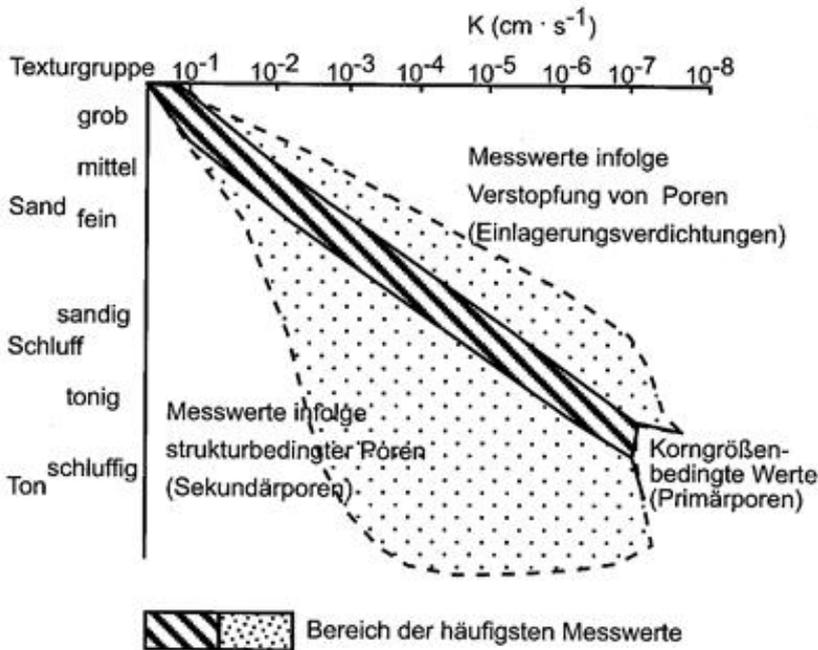


Abbildung 11: Links: Häufige Messwerte von K_s in Abhängigkeit von der Textur (Hartge & Horn, 2009); Rechts: Messanordnung des BAW Petzenkirchen für die Bestimmung von K_s

K_u ist kein Einzelwert, sondern eine Funktion des Wassergehaltes, welcher durch das Matrixpotenzial charakterisiert wird. Aus diesem Grund wird K_u als Kurve dargestellt, wobei auf der Abszisse die Wasserspannung und auf der Ordinate K_u aufgetragen wird. Da Wasserbewegung in terrestrischen Böden fast ausschließlich im ungesättigten Bereich stattfindet, ist K_u ausschlaggebend für die Wasserversorgung von Pflanzen. K_u wird von der Bodentextur beeinflusst, wie aus Abbildung 12 hervorgeht. Es ist erkennbar, dass K_s lediglich den Startpunkt der Kurve von K_u abbildet. Bei beginnender Entwässerung sinkt K_u in grobporenen Böden bereits bei geringer Entwässerung stark, da die Grobporen als Erstes entleert werden. Bei den mittelporenen Schluffen nimmt K_u erst bei stärkerer Entwässerung markant ab, während sie in Tonböden mit sehr feinen Poren selbst in Bereichen stark negativer Matrixpotenziale nahezu konstant bleibt. Eine Ausnahme stellen Tonböden mit groben Sekundärporen dar, welche sich ähnlich wie Sande verhalten. Im Wasserspannungsbereich von -10^2 bis -10^4 hPa (pF 2-4), welcher in terrestrischen Böden häufig anzutreffen ist, ist K_u der Schluffböden am höchsten, weshalb sich diese als gute Pflanzenstandorte auszeichnen.

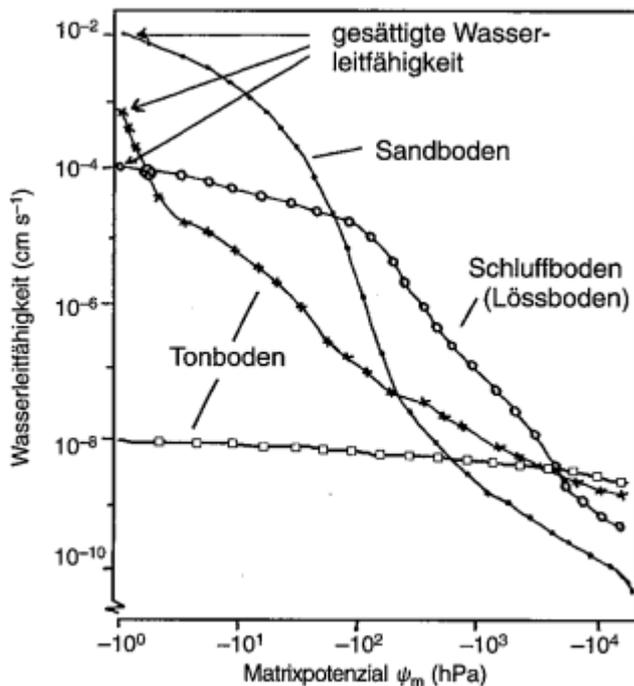


Abbildung 12: Verlauf der ungesättigten Wasserleitfähigkeit verschiedener Böden in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial (Scheffer, et al., 2010)

K_u wird im Laborverdunstungsverfahren (Schindler, 1980) mittels dem System HYPROP der Firma UMS ermittelt. Als Vorbereitung werden die Stechzylinderprobe, zwei Saugkerzen sowie ein Messkopf mit Wasser gesättigt. Die Saugkerzen werden am Messkopf installiert (Abbildung 13) und die Probe auf den Messkopf so aufgesetzt, dass die Mitte zwischen den Saugkerzen exakt der Säulenmitte entspricht. Da die Bodenprobe nach oben hin offen ist, kann das Wasser frei verdunsten. Während der Messdauer werden in regelmäßigen Abständen die Saugspannungen sowie die Masse des Zylinders erfasst. Aus den Wasserspannungswerten werden das mittlere Matrixpotential und der hydraulische Gradient, aus den Massedifferenzen der Wassergehalt und der Volumenstrom von Wasser berechnet. Nach Beendigung der Messung wird die restliche Menge an gespeichertem Wasser über Ofentrocknung bei 105 °C bestimmt. Aus diesen Werten kann mit dem bimodalen Van Genuchten/Mualem-Modell (Durner, 1994) K_u beim jeweiligen Matrixpotenzial sowie die pF-Kurve abgeleitet werden.



Abbildung 13: HYPROP-Messkopf samt Saugkerzen und vorbereitete Zylinderprobe

4.4 Statistische Datenanalyse

Für die Berechnung der Mittelwerte standen im Jahr 2012 jeweils fünf Messwiederholungen (außer bei der Dichte: sechs Wiederholungen durch den zusätzlichen Hyprop-Zylinder) und im Jahr 2001 drei Wiederholungen zur Verfügung. Die statistische Datenanalyse wurde mit dem Programm SPSS 15.0 durchgeführt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde für alle Analysen mit $\alpha = 5\%$ gewählt.

Für den Vergleich zwischen den einzelnen Varianten im Jahr 2012 wurde eine einfaktorielle ANOVA inklusive Levene-Test zur Überprüfung der Varianzhomogenität durchgeführt. Post-hoc wurden die Unterschiede mittels Tukey-Test analysiert. Mittels T-Test für unabhängige Stichproben wurden die Veränderungen im Zeitraum 2001-2012 untersucht.

Da T-Test und ANOVA eine Normalverteilung voraussetzen, wurden die Daten vor der Analyse mittels Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf ihre Normalverteilung überprüft.

Die gesättigte Leitfähigkeit K weist bei wiederholten Untersuchungen extreme Streubreiten auf (bis zu mehrere Potenzen) und ist in der Regel auch nicht normal verteilt (Hartge & Horn, 2009). Daher wurden die Messwerte in Anlehnung an Hartge und Horn (2009) vor der statistischen Analyse mit 10^6 multipliziert, um die negativen Komponenten zu entfernen, und anschließend zur Basis 10 logarithmiert.

Bei den Boxplots im SPSS stellt die Box 50 % aller Werte dar, die Trennlinie in der Box ist der Median, die Whisker markieren das 95%-Konfidenzintervall. Kreise stellen Ausreißer dar – Fälle mit Werten, die zwischen 1,5 und 3 Boxlängen vom oberen oder unteren Rand der Box entfernt sind. Sterne markieren Extremwerte – Fälle mit Werten, die mehr als 3 Boxlängen von der oberen oder unteren Kante der Box entfernt sind.

Die Korrelationen wurden mit dem Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Die Interpretation der Korrelationskoeffizienten wurde anhand des von Bühl (2010) publizierten Schlüssels durchgeführt.

Tabelle 6: Interpretation der Korrelationskoeffizienten (Bühl, 2010)

Wert	Interpretation
bis 0,2	Sehr geringe Korrelation
bis 0,5	Geringe Korrelation
bis 0,7	Mittlere Korrelation
bis 0,9	Hohe Korrelation
über 0,9	Sehr hohe Korrelation

5.2 Beschreibung der Probenahmestandorte

5.2.1 Bodenprofile

Die ausgehobenen Bodenprofile für den Statusvergleich 2012 (Frässaat, Grubber, Pflug) sowie für den Vergleich mit dem Jahr 2001 (Frässaat12, Grubber12, Pflug12) wurden vor Ort in genetische Horizonte unterteilt und gestörte Bodenproben je Horizont entnommen. Anschließend wurden im Labor die Bodenfarbe, die C_{org} -Konzentration, die Textur sowie der $CaCO_3$ -Anteil je Horizont ermittelt.

Das Profil Frässaat ist das tiefgründigste Profil, der D-Horizont beginnt erst in 85 cm Tiefe während bei dem seichtgründigsten Profil Frässaat12 der D-Horizont bereits in 55 cm Tiefe beginnt. Alle Profile haben gut ausgebildete A-Horizonte mit Mächtigkeiten zwischen 30 und 40 cm. Das bedeutet, dass alle Bodenproben der obersten 3 Tiefenstufen (2-7 / 10-15 / 15-20 cm) aus den A-Horizonten stammen. Auffallend ist der bei den Frässaat-Varianten klar abgrenzbare A_p -Horizont (bis 15 cm bei Frässaat bzw. bis 10 cm bei Frässaat12), welcher sich vom Unterboden abheben lässt. Auch bei Grubber12 ist der A_p -Horizont, welcher bis in eine Tiefe von 20 cm reicht, deutlich erkennbar, während dies bei Grubber nicht der Fall ist. Bei den Pflugvarianten reicht der A_p -Horizont bis 30 cm bzw. bis 40 cm Tiefe. Alle Profile außer Frässaat12 weisen einen Übergangshorizont AC auf. Die Bodenproben der vierten Tiefenstufe (32-37 cm) stammen bei Frässaat12, Grubber12 und Pflug aus dem A-Horizont, bei den anderen Varianten aus dem AC-Horizont. Die letzte Tiefenstufe der Proben (52-57 cm) liegt bei Frässaat und Pflug im AC, bei allen anderen Profilen im C- bzw. bei Frässaat12 zum Teil im D-Horizont. Bei Frässaat12 und Grubber12 konnten in der letzten Tiefenstufe, welche bereits Schotter beinhaltete, keine Zylinderproben entnommen werden.

Nachfolgend werden alle sechs Bodenprofile des Jahres 2012 anhand von Fotos und Laborwerten näher beschrieben.

Profilname: Frässaat

Bodentyp: Tschernosem / Calcic Chernozem

Koordinaten: 30.817,55 N / 340.038,01 O / 143,9 H



A_p: 0-15 cm, IS/sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,6
CaCO ₃ (%)	11,4

A1: 15-30 cm, sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,3
CaCO ₃ (%)	12,4

AC: 30-65 cm, IS	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	1,0
CaCO ₃ (%)	20,9

C: 65-85 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,2
CaCO ₃ (%)	23,2

D: > 85 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,2
CaCO ₃ (%)	13,6

Profilname: Grubber

Bodentyp: Tschernosem / Haplic Chernozem

Koordinaten: 30.830,26 N / 340.037,38 O / 143,0 H



A: 0-30 cm, IS/sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,4
CaCO ₃ (%)	13,8

AC: 30-45 cm, IS	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,6
CaCO ₃ (%)	26,8

C: 45-65 cm, IS	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,4
CaCO ₃ (%)	24,6

D: > 65 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,5
CaCO ₃ (%)	17,1

Profilname: Pflug

Bodentyp: Tschernosem / Calcic Chernozem

Koordinaten: 30.842,36 N / 340.036,32 O / 143,9 H



A _p : 0-40 cm, sL	
Farbe	10YR 3/2
C _{org} (%)	1,4
CaCO ₃ (%)	11,4

AC: 40-55 cm, sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,3
CaCO ₃ (%)	15,0

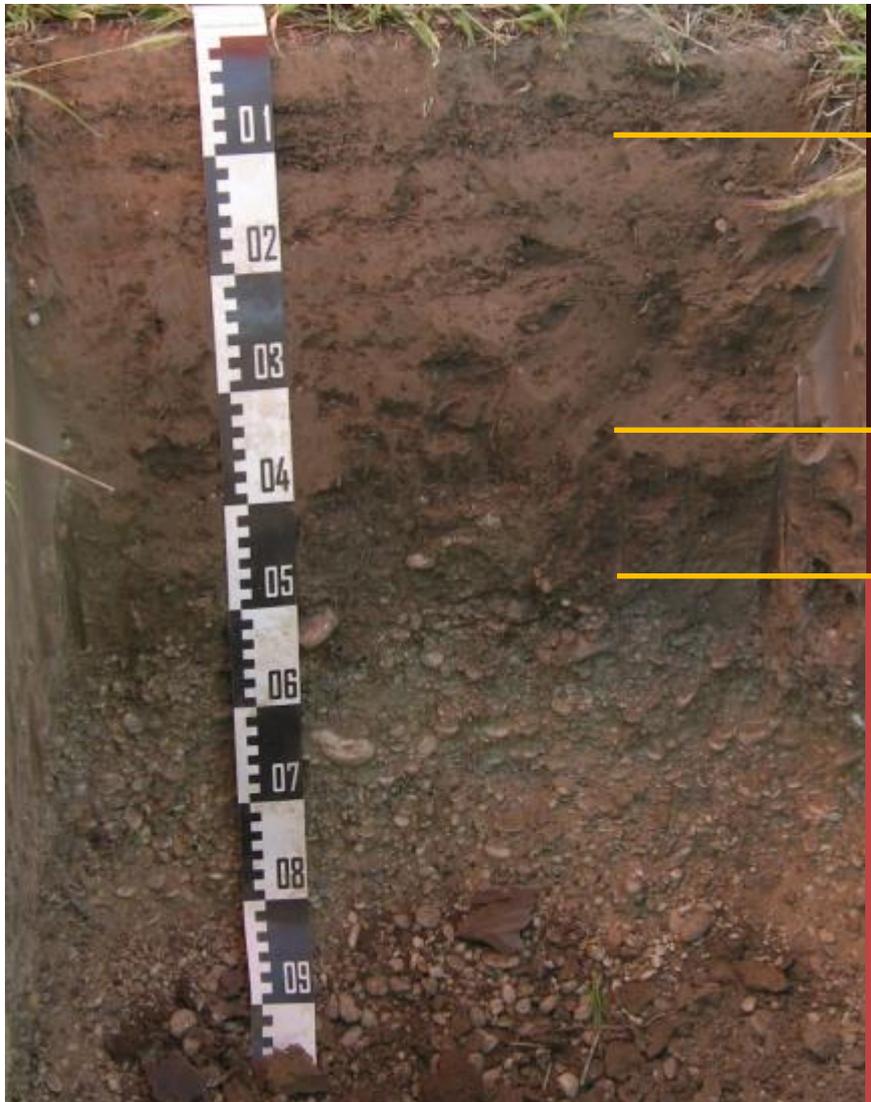
C: 55-70 cm, sL	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	0,8
CaCO ₃ (%)	25,4

D: > 70 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,4
CaCO ₃ (%)	14,2

Profilname: Frässaat12

Bodentyp: Tschernosem / Haplic Chernozem (siltic)

Koordinaten: 30.820,36 N / 340.017,66 O / 144,2 H



A _p : 0-10 cm, sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,9
CaCO ₃ (%)	12,0

A1: 10-40 cm, sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,4
CaCO ₃ (%)	11,4

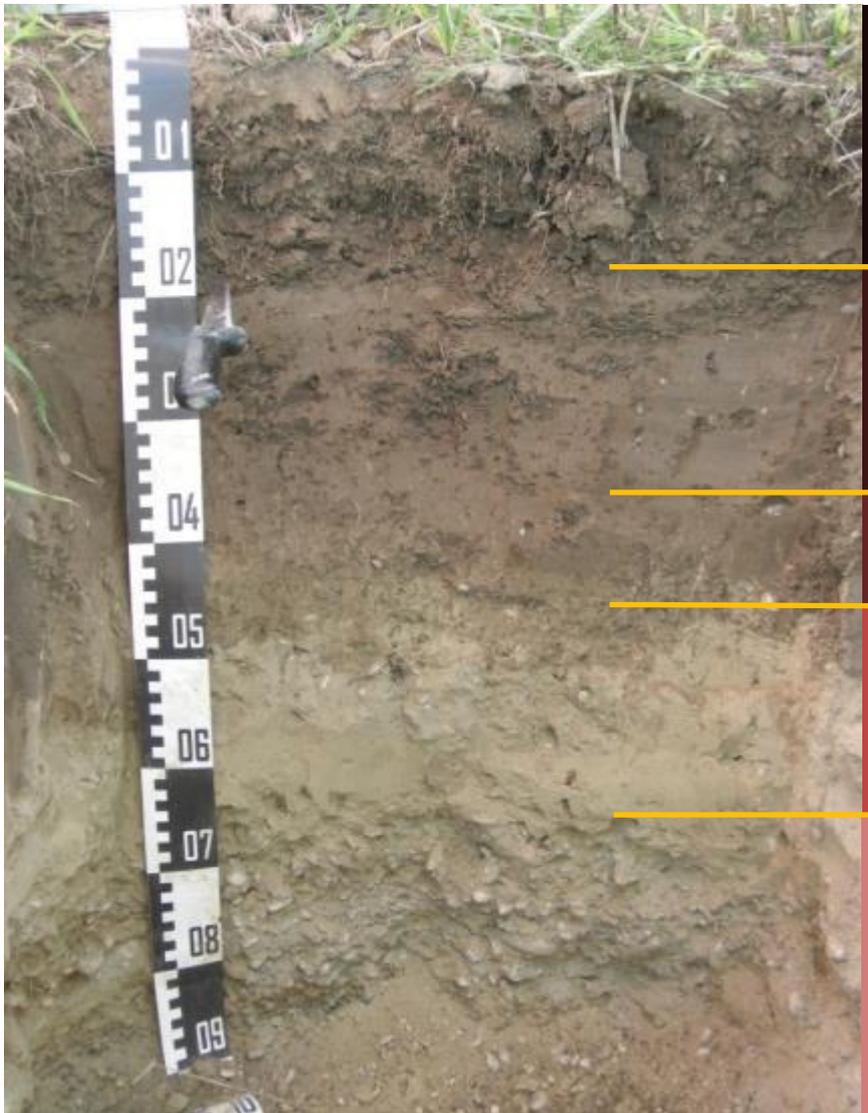
C: 40-55, sL	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	1,4
CaCO ₃ (%)	17,9

D: > 55 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,3
CaCO ₃ (%)	11,5

Profilname: Grubber12

Bodentyp: Tschernosem / Haplic Chernozem

Koordinaten: 30.833,87 N / 340.019,02 O / 143,8 H



A_p: 0-20 cm, IS	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,3
CaCO ₃ (%)	13,5

A1: 20-40 cm, IS	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	1,1
CaCO ₃ (%)	14,8

AC: 40-50 cm, S	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	0,6
CaCO ₃ (%)	20,3

C: 50-70 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,2
CaCO ₃ (%)	18,6

D: > 70 cm, S	
Farbe	10YR 5/2
C _{org} (%)	0,1
CaCO ₃ (%)	15,0

Profilname: Pflug12

Bodentyp: Tschernosem / Calcic Chernozem

Koordinaten: 30.845,46 N / 340.018,73 O / 143,3 H



A _p : 0-30 cm, sL	
Farbe	10YR 3/1
C _{org} (%)	1,4
CaCO ₃ (%)	13,2

AC: 30-45 cm, sL	
Farbe	10YR 3/2
C _{org} (%)	1,3
CaCO ₃ (%)	17,6

C: 45-60 cm, sL	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	0,9
CaCO ₃ (%)	27,0

D: > 60 cm, S	
Farbe	10YR 4/1
C _{org} (%)	0,5
CaCO ₃ (%)	12,5

5.2.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Profilgruben für den Statusvergleich im Jahr 2012 ist in Tabelle 7 ersichtlich. Durch die Vorerhebung des Sandanteils 0-5 cm sollte auf allen drei Varianten eine möglichst homogene Textur erreicht werden. Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 verdeutlichen, dass hier sehr gute Resultate in Bezug auf die Homogenität aller Varianten erzielt werden konnten. Im Bereich 0-37 cm sind der Sand- und Schluffanteil auf allen Varianten sehr ähnlich, lediglich der Tonanteil zeigt stärkere Schwankungen. Die starke Variation der Werte im Bereich 52-57 cm ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Profiltiefe – wie in Punkt 5.2.1 erwähnt – entweder der AC- oder bereits der C-Horizont erreicht ist.

Tabelle 7: Ergebnisse der Texturanalyse der Profile für den Statusvergleich im Jahr 2012

Variante	Horizont (cm)	Ton (Masse%)	Schluff (Masse%)	Sand (Masse%)	Bodenart
Frässaat	2-7	15,8	37,4	46,7	sL
Frässaat	10-15	16,2	36,4	47,3	sL
Frässaat	15-20	17,9	35,7	46,3	sL
Frässaat	32-37	18,8	32,5	48,7	sL
Frässaat	52-57	10,4	32,4	57,3	IS
Grubber	2-7	14,5	34,7	50,8	IS
Grubber	10-15	15,3	35,5	49,1	IS/sL
Grubber	15-20	16,8	34,4	48,8	sL
Grubber	32-37	15,3	38,5	46,2	IS/sL
Grubber	52-57	1,9	26,9	71,3	S
Pflug	2-7	14,3	36,4	49,4	IS
Pflug	10-15	23,9	33,9	42,3	sL
Pflug	15-20	20,4	36,4	43,3	sL
Pflug	32-37	18,4	37,1	44,5	sL
Pflug	52-57	17,0	52,0	31,0	sL

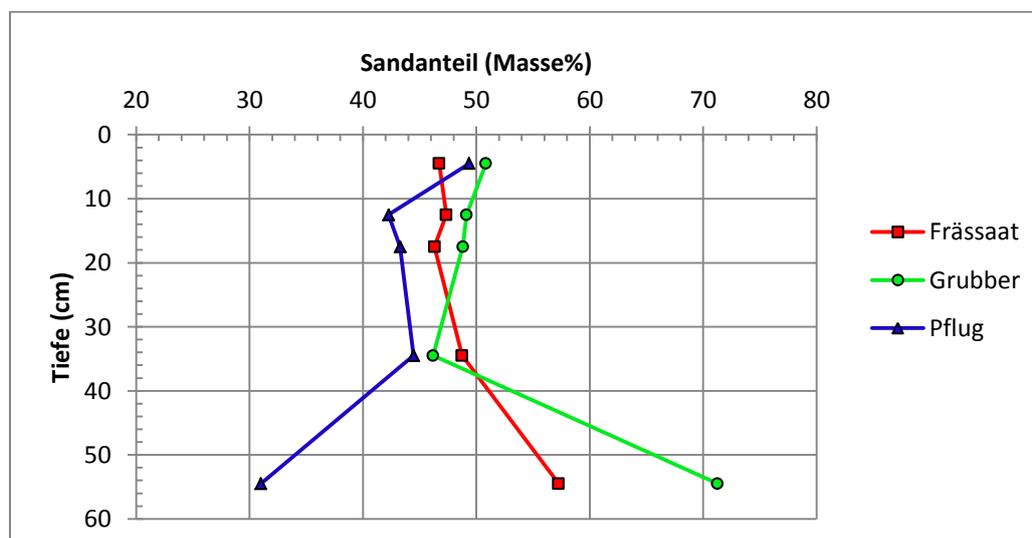


Abbildung 15: Sandanteil der Profile für den Statusvergleich 2012

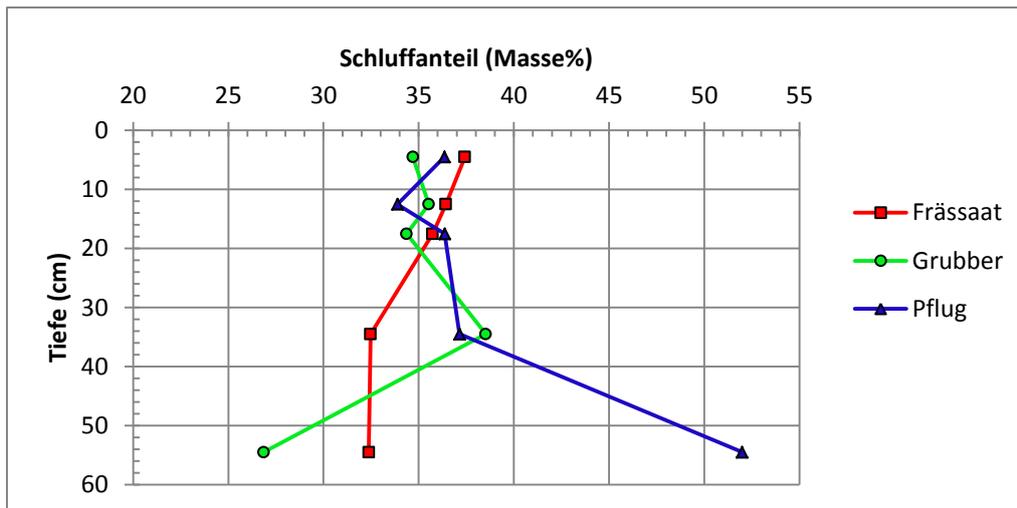


Abbildung 16: Schluffanteil der Profile für den Statusvergleich 2012

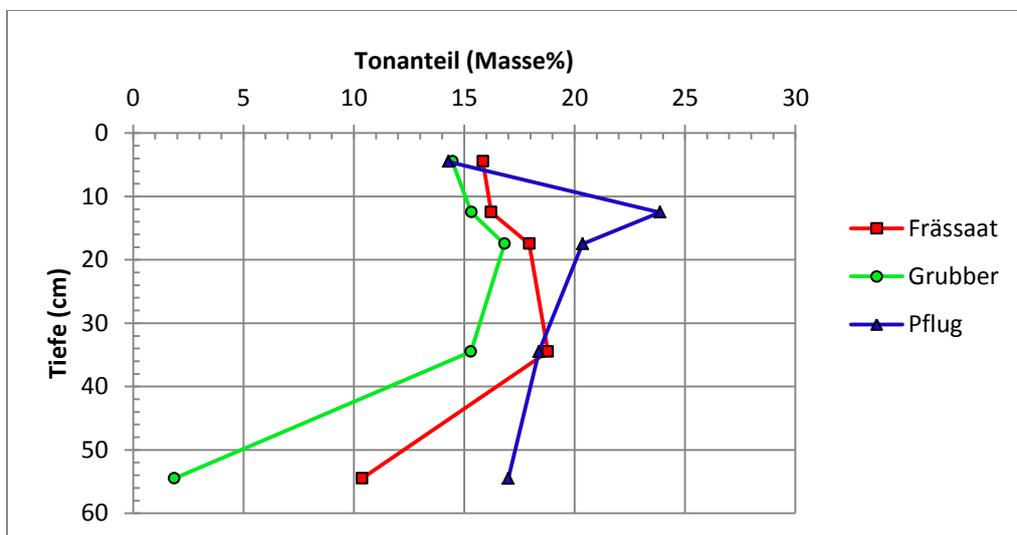


Abbildung 17: Tonanteil der Profile für den Statusvergleich 2012

Die Ergebnisse der Texturanalyse für die Profile im Jahr 2001 sowie der dazugehörigen Vergleichsprofile aus dem Jahr 2012 sind in Tabelle 8 aufgelistet. Die Bodenart ist in allen Profilen vorwiegend sandiger Lehm, zum Teil auch lehmiger Sand. Die im Jahr 2012 ausgewählten Vergleichsstandorte weisen in allen Tiefenstufen außer bei Frässaat 52-57 cm und bei Grubber 32-37 cm dieselbe Bodenart wie im Jahr 2001 auf.

Tabelle 8: Textur der Profile im Jahr 2001 sowie der Vergleichsprofile im Jahr 2012, BA=Bodenart

Variante	Horizont	Ton 2001	Ton 2012	Schluff 2001	Schluff 2012	Sand 2001	Sand 2012	BA 2001	BA 2012
	(cm)	(Masse%)	(Masse%)	(Masse%)	(Masse%)	(Masse%)	(Masse%)		
Frässaat	2-7	22,0	16,8	41,0	43,5	37,0	39,7	sL	sL
Frässaat	10-15	21,0	18,6	43,0	42,7	36,0	38,7	sL	sL
Frässaat	15-20	21,0	18,8	44,0	42,5	35,0	38,7	sL	sL
Frässaat	32-37	20,0	18,9	41,0	41,7	39,0	39,4	sL	sL
Frässaat	52-57	14,1	16,8	31,9	46,7	54,0	36,5	IS	sL
Grubber	2-7	19,0	18,6	35,0	35,2	46,0	46,2	sL	sL
Grubber	10-15	19,0	17,2	35,0	40,4	46,0	42,4	sL	sL
Grubber	15-20	19,0	20,9	36,0	35,1	45,0	44,0	sL	sL
Grubber	32-37	16,0	12,4	31,0	39,8	53,0	47,8	sL	IS
Grubber	52-57	2,1	3,1	10,9	24,5	87,0	72,4	S	S
Pflug	2-7	21,0	19,5	44,0	43,6	35,0	36,9	sL	sL
Pflug	10-15	19,0	19,7	46,0	43,9	35,0	36,4	sL	sL
Pflug	15-20	20,0	19,2	45,0	43,8	35,0	36,9	sL	sL
Pflug	32-37	24,0	19,6	45,9	45,2	30,1	35,2	sL	sL
Pflug	52-57	24,0	20,0	47,0	52,1	29,0	27,9	sL	sL

Zur besseren Vergleichbarkeit der Texturen 2001-2012 ist die Korngrößenverteilung auch in Form von Grafiken für die einzelnen Fraktionen dargestellt. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen, dass der Sand- sowie der Schluffanteil im Jahr 2012 bis in eine Tiefe von 37 cm sehr ähnlich oder gleich hoch wie im Jahr 2001 sind, nur in der untersten Schicht 52-57 cm gibt es größere Abweichungen. Beim Vergleich des Tonanteils in Abbildung 20 zeigt die Variante Frässaat im Oberboden stärkere Differenzen, während die Variante Pflug im Unterboden stärker variiert; ansonsten sind auch beim Tonanteil die Werte sehr ähnlich. Das Ziel der Vorerhebung, im Jahr 2012 Profilgruben mit möglichst ähnlicher Textur wie im Jahr 2001 auszuwählen, konnte somit erreicht werden.

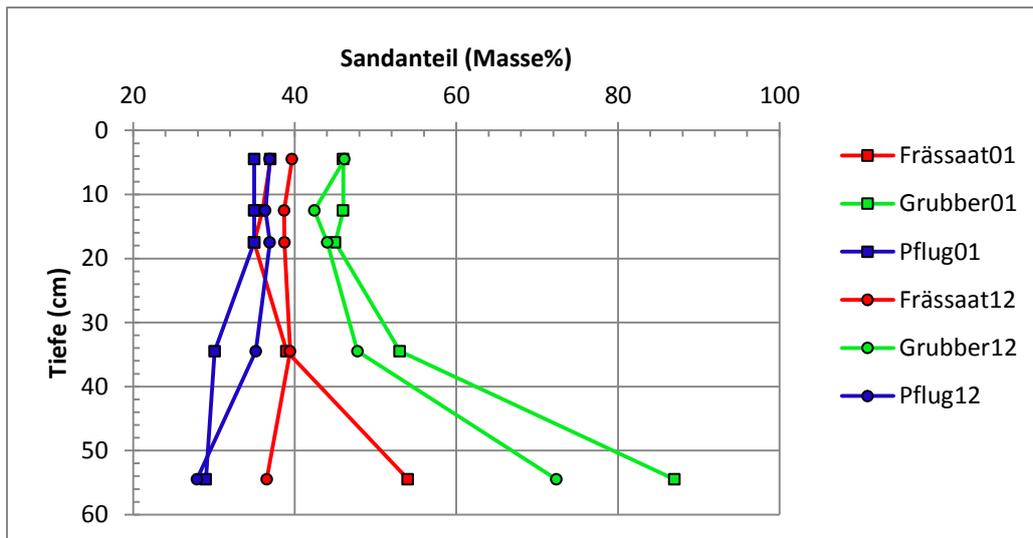


Abbildung 18: Sandanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012

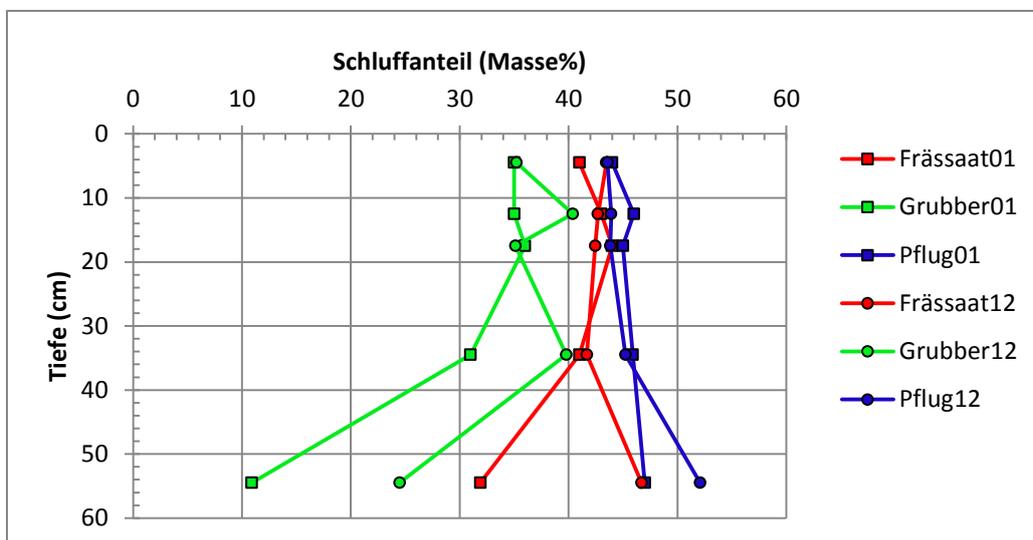


Abbildung 19: Schluffanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012

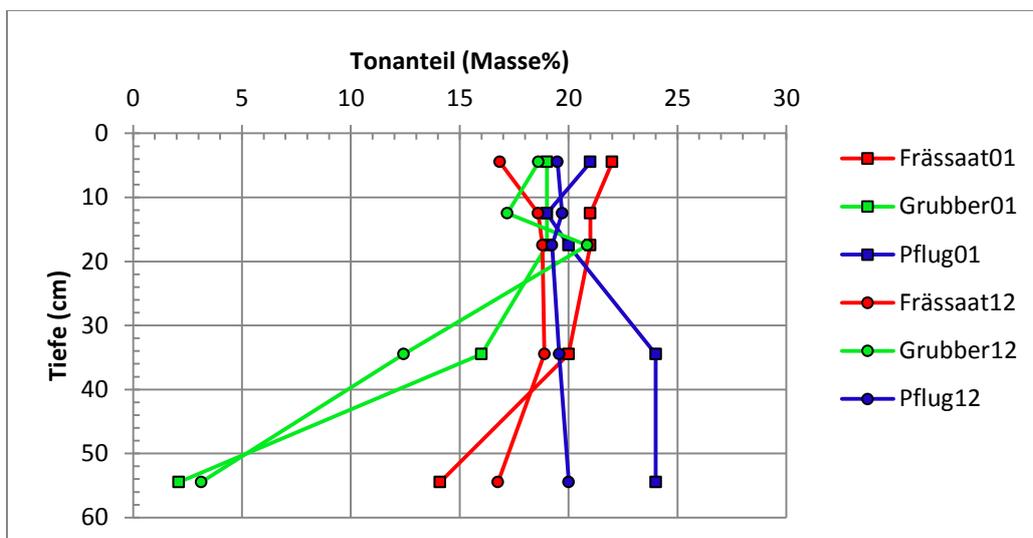


Abbildung 20: Tonanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012

5.2.3 Karbonatanteil

Die Werte der Karbonatbestimmung im Jahr 2012 sind in Tabelle 9 aufgelistet, im Jahr 2001 wurde der Karbonatanteil nicht erhoben. Generell sind auf der Versuchsfläche – typisch für einen Tschernosem – hohe Karbonatwerte zwischen 11 und 25 % festzustellen. Mit zunehmender Tiefe steigt der Karbonatanteil in allen untersuchten Profilen an, wie in Abbildung 21 und Abbildung 22 erkennbar ist. Im oberen Bereich (0-20 cm) liegen die Karbonatwerte aller beprobten Profile mit 11,2 bis 13,7 % sehr eng beisammen. Im Unterboden gibt es bei den Profilgruben für den Statusvergleich 2012 stärkere Abweichungen zwischen den Varianten.

Tabelle 9: Karbonatanteil der beprobten Profile in Masse%

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug	Frässaat12	Grubber12	Pflug12
2-7	11,4	12,3	11,9	11,8	12,1	12,9
10-15	11,2	11,7	10,2	11,7	13,3	13,2
15-20	12,4	13,1	10,6	13,1	13,4	13,7
32-37	20,9	27,3	11,3	12,8	15,1	14,8
52-57	24,1	21,7	24,7	19,6	19,7	24,1

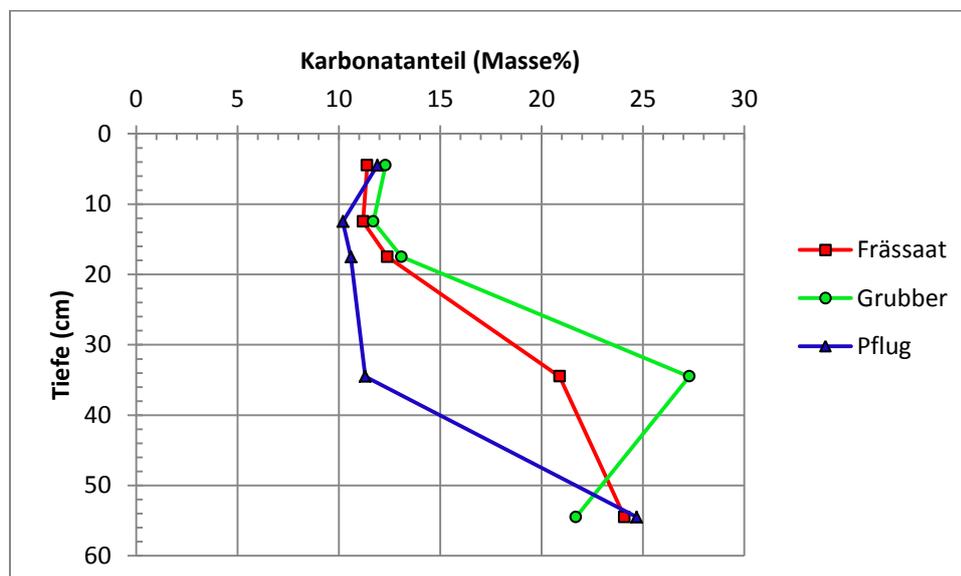


Abbildung 21: Karbonatanteil der Profile für den Statusvergleich 2012

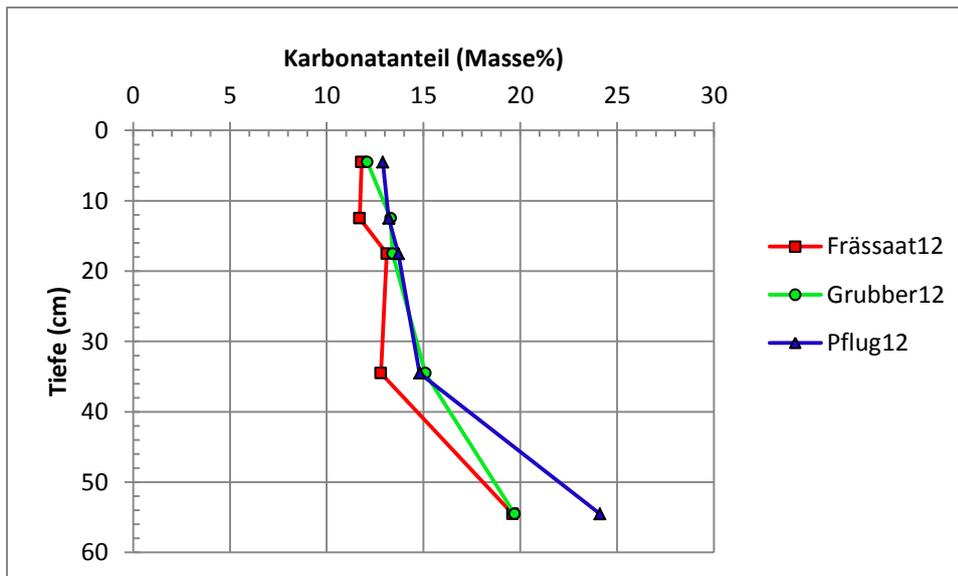


Abbildung 22: Karbonatanteil der Profile für den Vergleich 2001-2012

5.3 Rohdichte trocken und Porenanteil

5.3.1 Statusvergleich 2012

In Abbildung 23 sind die Mittelwerte der Dichtemessungen aller Varianten als Tiefenverlauf abgebildet. Die Variante Frässaat hat im Horizont 2-7 cm die geringste Dichte. In den beiden Horizonten darunter (10-15 und 15-20 cm) hat die Variante Pflug die geringste Dichte, die Varianten Frässaat und Grubber sind hier sehr ähnlich. Im Horizont 32-37 cm weist wieder die Variante Frässaat die geringste Dichte auf. Weiters ist festzuhalten, dass die Variante Pflug über den gesamten Horizont einen gegensätzlichen Tiefenverlauf im Vergleich zu den Varianten Frässaat und Grubber aufweist. Die Varianten Frässaat und Grubber zeigen von der Bodenoberfläche bis in eine Tiefe von 15 cm eine Zunahme, und im Bereich darunter eine Abnahme der Dichte. Bei der Variante Pflug hingegen nimmt die Dichte von der Oberfläche bis 20 cm Tiefe ab und steigt im Bereich darunter wieder an.

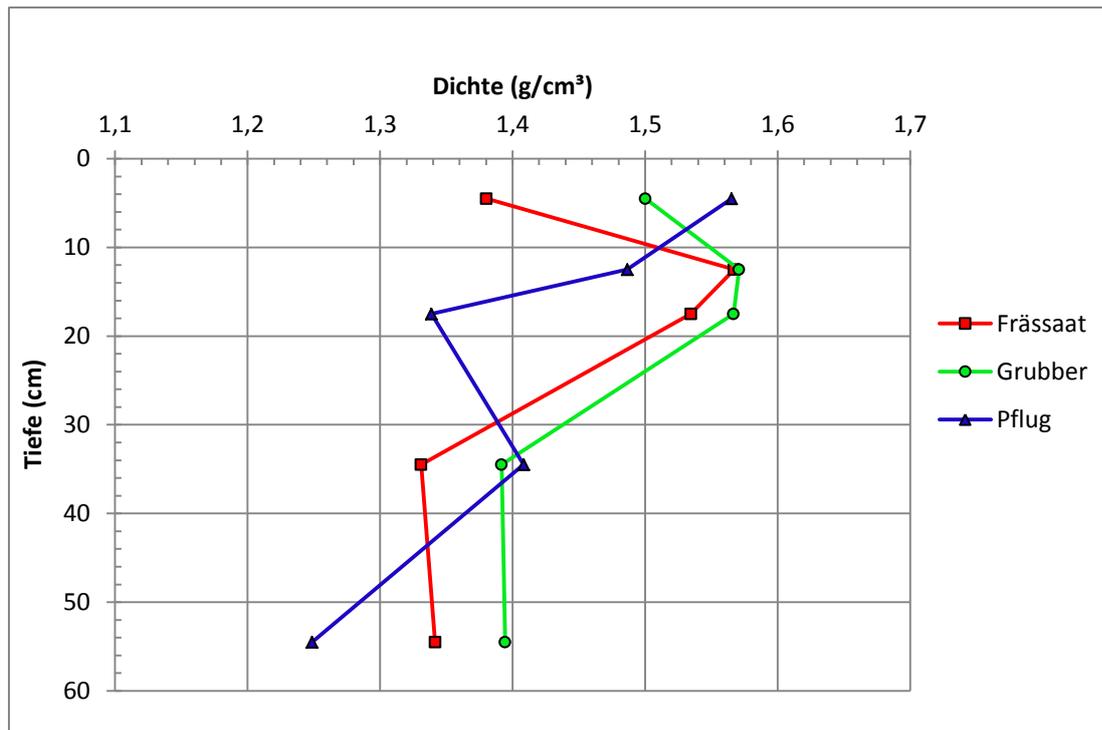


Abbildung 23: Tiefenverlauf der Dichte im Jahr 2012

Der Test der Normalverteilung fällt für alle Untergruppen positiv aus, auch die Homogenität der Varianzen wird für alle Vergleichsgruppen bestätigt. In Tabelle 10 sind die Mittelwerte der Dichtemessungen sowie die Ergebnisse der ANOVA und des Post-hoc Tests aufgelistet.

Tabelle 10: Mittelwerte (g/cm³) und Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey-Test für die Dichte, n=6, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert ANOVA
2-7	1,38 a	1,50 b	1,57 b	0,00
10-15	1,57 a	1,57 a	1,49 a	0,07
15-20	1,53 b	1,57 b	1,34 a	0,00
32-37	1,33 a	1,39 b	1,41 b	0,01
52-57	1,34 b	1,39 c	1,25 a	0,00

Die ANOVA zeigt signifikant, dass die Variante Frässaat im Horizont 2-7 cm eine geringere Dichte als Grubber und Pflug aufweist. Während im Bereich 10-15 cm keine signifikanten Differenzen messbar sind, hat die Variante Pflug in den Horizonten 15-20 cm und 52-52 cm die geringste Dichte. Im dazwischenliegenden Bereich 32-37 cm hat wiederum die Variante Frässaat die signifikant geringste Dichte aller Varianten.

Die Feststoffdichte wurde in den Horizonten 2-7 und 15-20 cm für alle Varianten erhoben, wobei der Mittelwert dieser Ergebnisse ($2,69 \text{ g/cm}^3$) für die Berechnung des Porenanteils zugrunde gelegt wurde. Die Ergebnisse der Porenanteilsberechnung zeigen, bedingt durch

die Berechnungsformel, eine negative Korrelation mit den Dichtewerten (Tabelle 11). Durch die Frässaat hat der Boden im Bereich 2-7 cm um 6,9 % mehr Porenvolumen als die Variante Pflug und um 4,5 % mehr Porenvolumen als die Variante Grubber. Im Bereich 15-20 cm hat hingegen die Variante Pflug ein 8,5 % höheres Porenvolumen als die Variante Grubber und einen 7,3 % höheren Porenanteil als die Variante Frässaat. Die statistische Analyse zeigt ebenfalls das gegenteilige Bild der Dichtestatistik: Während die Variante Frässaat in den Horizonten 2-7 cm und 32-37 cm ein signifikant höheres Porenvolumen als die anderen Varianten aufweist, ist der Porenanteil in den Bereichen 15-20 cm und 52-57 cm bei der Variante Pflug signifikant höher als bei den anderen Varianten. Grafisch dargestellt ist der gegenteilige Verlauf der Porenanteils im Vergleich zur Dichte sehr gut erkennbar (Abbildung 24).

Tabelle 11: Mittelwerte des Porenanteils (Vol.-%) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=6, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert ANOVA
2-7	48,7 b	44,2 a	41,8 a	0,00
10-15	41,7 a	41,6 a	44,7 a	0,07
15-20	42,9 a	41,7 a	50,2 b	0,00
32-37	50,5 b	48,2 a	47,6 a	0,01
52-57	50,1 b	48,1 a	53,6 c	0,00

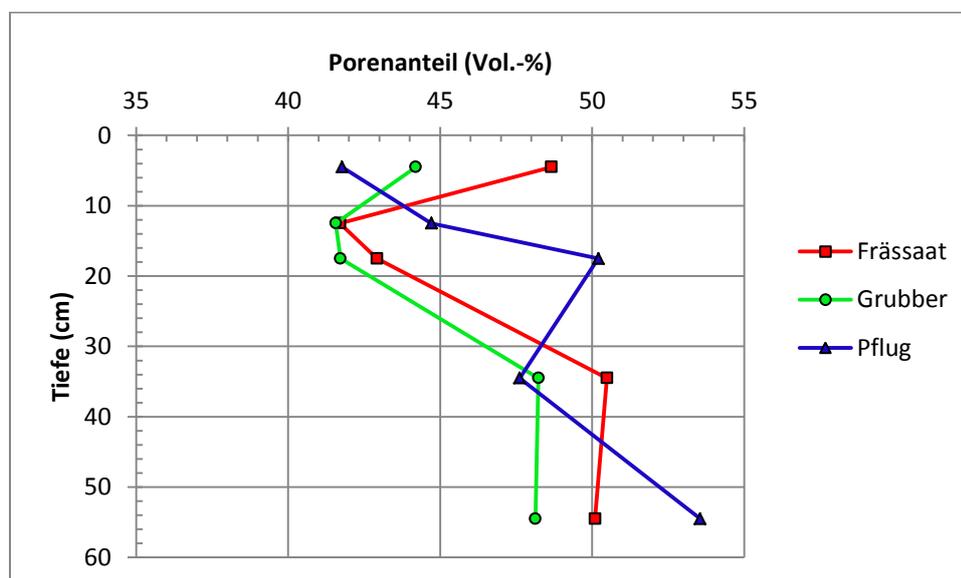


Abbildung 24: Vergleich des Porenanteils aller Varianten

5.3.2 Vergleich 2001-2012

Der Vergleich der Dichte zwischen den Jahren 2001 und 2012 zeigt ein differenziertes Bild für die verschiedenen Varianten, wie in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27

ersichtlich ist. Bei der Variante Frässaat ist der Verlauf in den obersten 20 cm nach 11 Jahren beinahe ident, nur im letzten beprobten Horizont zeigt sich eine Verdichtung im Vergleich zum Jahr 2012. Die Variante Grubber zeigt im Jahr 2012 im Horizont 2-7 cm eine starke Verringerung der Dichte im Vergleich zu 2001, während der darunterliegende Bereich (10-20 cm) eine Erhöhung und der Horizont 32-37 cm wieder eine Verminderung der Dichte aufweist. Sehr ähnlich stellt sich der Verlauf der Dichte 2001-2012 bei der Variante Pflug dar.



Abbildung 25: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Frässaat

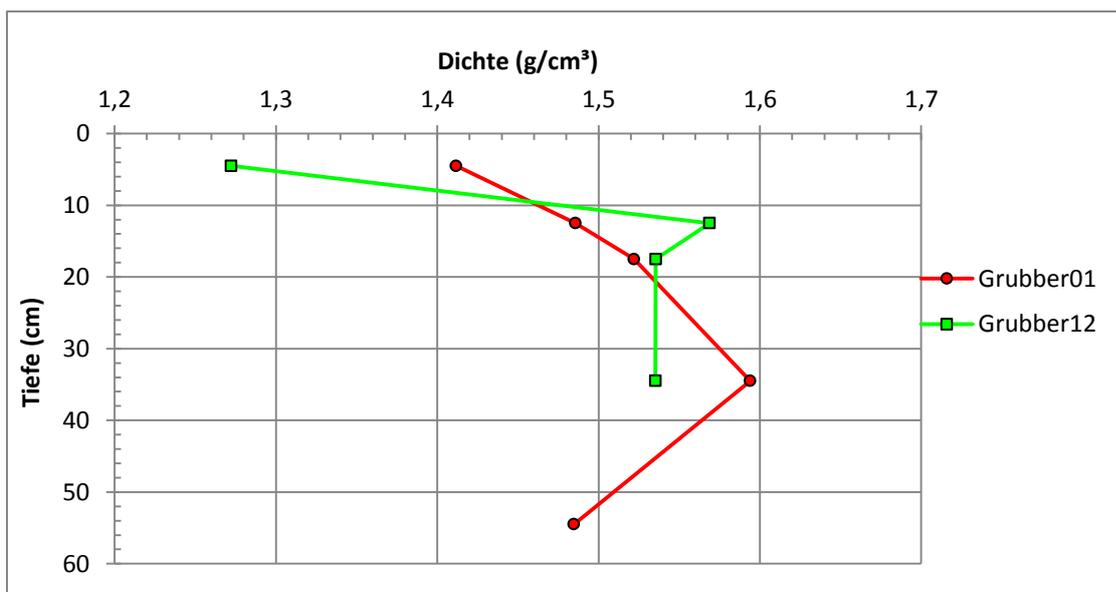


Abbildung 26: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Grubber



Abbildung 27: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Pflug

Nach Überprüfung der Normalverteilung wurden die Ergebnisse aus den Jahren 2001 und 2012 mittels T-Test für unabhängige Stichproben überprüft (

Tabelle 12). Die Variante Frässaat zeigt im Bereich 32-37 cm eine signifikante Erhöhung der Dichte im Jahr 2012 im Vergleich zum Jahr 2001. Die meisten Veränderungen gibt es bei der Variante Grubber: Im Horizont 2-7 cm ist die Dichte im Jahr 2012 signifikant geringer, während sie im darunterliegenden Horizont signifikant höher als im Jahr 2001 ist. Der Bereich 32-37 cm weist wiederum eine signifikante Verringerung der Dichte im Vergleich zum Jahr 2001 auf. Bei der Variante Pflug zeigt sich nur im untersten Horizont eine Veränderung, wobei die Dichte im Jahr 2012 signifikant geringer als im Jahr 2001 ist.

Tabelle 12: Dichte-Mittelwerte (g/cm^3) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n_{2012}=6$ / $n_{2001}=3$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

Variante	Horizont (cm)	ρ 2001 (g/cm^3)	ρ 2012 (g/cm^3)	p-Wert
Frässaat	2-7	1,41 a	1,36 a	0,34
Frässaat	10-15	1,55 a	1,59 a	0,39
Frässaat	15-20	1,51 a	1,53 a	0,40
Frässaat	32-37	1,41 a	1,59 b	0,00
Grubber	2-7	1,41 b	1,27 a	0,00
Grubber	10-15	1,49 a	1,57 b	0,01
Grubber	15-20	1,52 a	1,54 a	0,73
Grubber	32-37	1,59 b	1,54 a	0,04
Pflug	2-7	1,41 a	1,47 a	0,22
Pflug	10-15	1,44 a	1,40 a	0,41
Pflug	15-20	1,42 a	1,32 a	0,08
Pflug	32-37	1,43 a	1,41 a	0,57
Pflug	52-57	1,46 b	1,34 a	0,00

5.4 Organischer Kohlenstoff

Für den Vergleich des organischen Kohlenstoffs war sowohl im Jahr 2001 als auch im Jahr 2012 nur eine Probe je Tiefenstufe gezogen worden, daher konnten die nachfolgend gezeigten Ergebnisse nicht auf ihre statistische Signifikanz überprüft werden.

5.4.1 Statusvergleich 2012

Die ermittelten C_{org} -Konzentrationen der Profile für den Statusvergleich 2012 sind in Tabelle 13 aufgelistet. Im oberen Bereich (0-20 cm) liegen die Werte zwischen 1,8 % und 1,3 % C_{org} , während im Bereich darunter 1,4 % bis 0,4 % C_{org} gespeichert sind.

Tabelle 13: im Jahr 2012 gemessene C_{org} -Konzentrationen in Masse%

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug
2-7	1,8	1,5	1,3
10-15	1,5	1,4	1,4
15-20	1,3	1,3	1,4
32-37	0,9	0,8	1,4
52-57	0,7	0,4	0,8

Wie aus der Tiefenverteilung in Abbildung 28 erkennbar ist, sinkt die C_{org} -Konzentration bei der Variante Frässaat kontinuierlich mit zunehmender Tiefe. Bei der Variante Pflug sind die Werte bis 37 cm Tiefe sehr ähnlich (Pflugdurchmischung), und auch bei der Variante Grubber ist im Oberboden bis 20 cm die Durchmischung durch die Bodenbearbeitung sichtbar. Darunter kommt es auch bei diesen Varianten zur Abnahme der C_{org} -Konzentration. Im Oberboden (0-15 cm) weist die Variante Frässaat die höchste und die Variante Pflug die niedrigste C_{org} -Konzentration auf, ab der dritten Tiefenstufe hat jedoch die Variante Pflug die höchste und die Variante Grubber die geringste C_{org} -Konzentration.

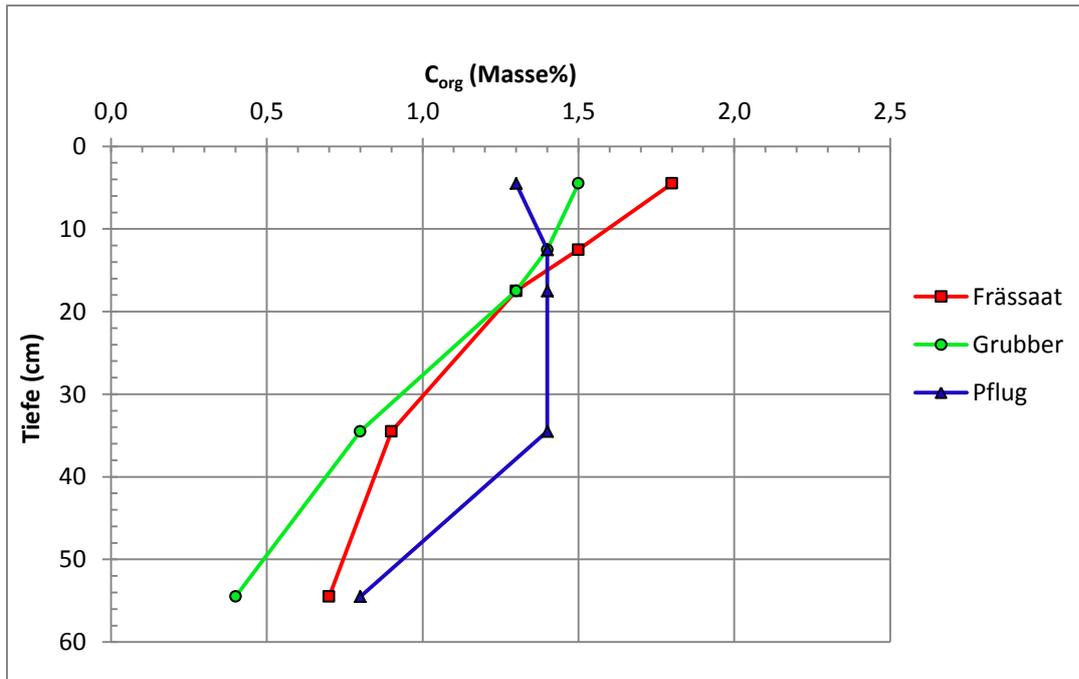


Abbildung 28: C_{org}-Konzentration der Profilgruben für den Statusvergleich 2012

Bei Betrachtung aller sechs beprobten Bodenprofile des Jahres 2012 in Abbildung 29 haben beide Frässaat-Standorte trotz inhomogener Bodentextur im Bereich 0-15 cm höhere C_{org}-Konzentrationen als alle anderen Varianten, wobei der Unterschied im Bereich 2-7 cm sehr stark ausgeprägt ist. Die Frässaat zeigt in diesem Versuch den Effekt der C_{org}-Anreicherung im Oberboden sehr deutlich. Im Bereich 15-37 cm hingegen weisen beide Pflug-Profile knapp die höchsten C_{org}-Konzentrationen auf.

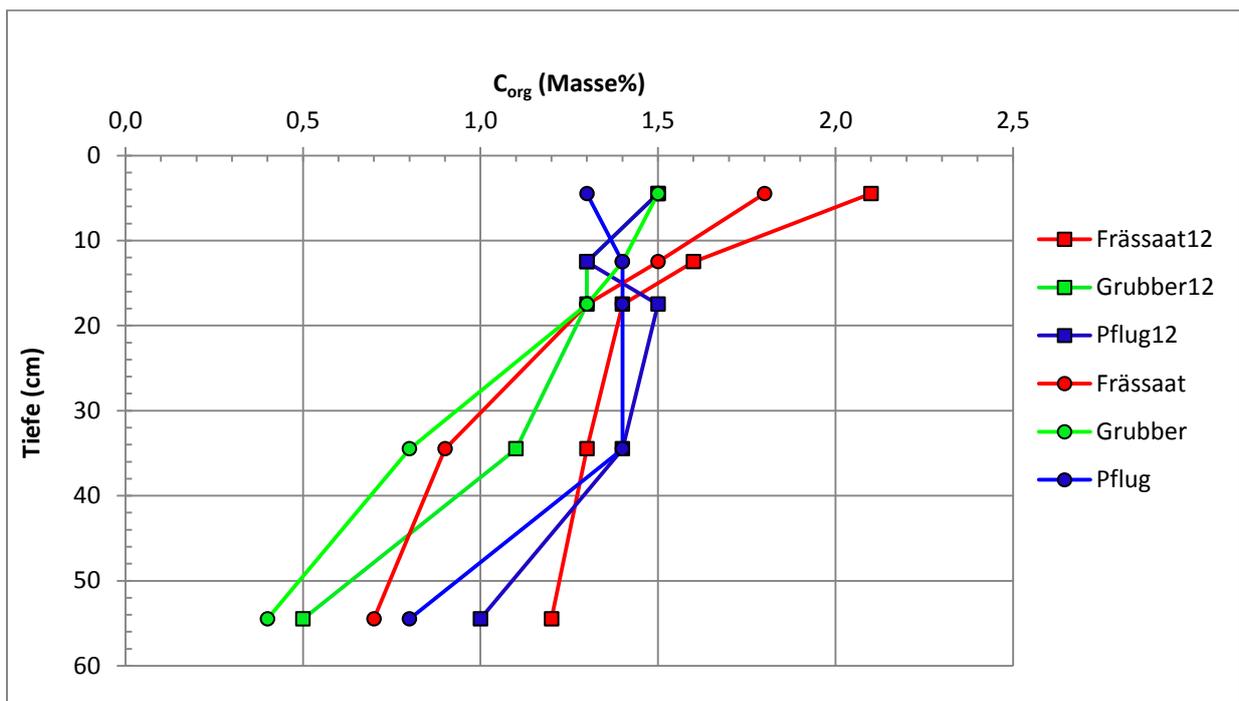


Abbildung 29: C_{org}-Konzentration aller Profilgruben im Jahr 2012

Ein weiterer wichtiger Parameter neben der C_{org} -Konzentration ist der gesamt gespeicherte C_{org} -Vorrat im Boden. Dieser wird mittels der gemessenen Dichte-Mittelwerte für den gesamten beprobten Horizont bis 57 cm Tiefe berechnet und aufsummiert (Tabelle 14). In Abbildung 30 ist erkennbar, dass die Kurven aller drei Varianten sehr ähnlich verlaufen und die Unterschiede nur gering sind. Bis in eine Tiefe von 29 cm weist die Variante Frässaat den höchsten kumulierten C_{org} -Vorrat auf, während bei der Variante Pflug die geringsten Vorräte gespeichert sind. Bei Betrachtung des Horizonts bis 43 cm bzw. 57 cm Tiefe hat die Variante Pflug den höchsten kumulierten C_{org} -Vorrat.

Tabelle 14: C_{org} -Vorrat kumuliert über alle Tiefenstufen (t/ha)

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug
0-8	20,2	17,6	16,7
0-15	36,9	33,2	31,0
0-29	64,5	61,6	57,9
0-43	82,1	76,5	84,6
0-57	94,6	85,0	99,3

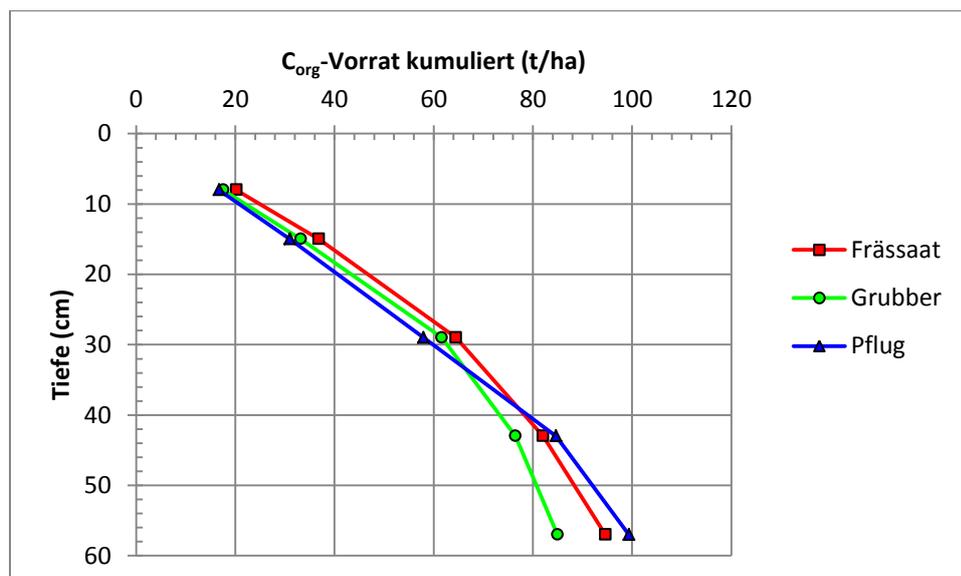


Abbildung 30: C_{org} -Vorrat kumuliert bis 57 cm Tiefe

5.4.2 Vergleich 2001 – 2012

In Tabelle 15 sind die C_{org} -Konzentrationen des Jahres 2001 und die der Vergleichsprofile des Jahres 2012 aufgelistet. Auch im Jahr 2001 hatte die Variante Frässaat im Bereich 2-7 cm höhere C_{org} -Konzentrationen als die beiden anderen Varianten. In den elf Jahren zwischen 2001 und 2012 hat die C_{org} -Konzentration bei der Variante Frässaat in allen Tiefenstufen außer 15-20 cm zugenommen (Abbildung 31). Bei den Varianten Grubber und Pflug hingegen

ist die C_{org} -Konzentration im Bereich bis 20 cm Tiefe konstant geblieben oder leicht gesunken, während es im Unterboden bei beiden Varianten Steigerungen der C_{org} -Konzentration gab (Abbildung 32 und Abbildung 33).

Tabelle 15: C_{org} -Konzentrationen im Vergleich 2001 - 2012 (Masse%)

Horizont (cm)	Frässaat01	Frässaat12	Grubber01	Grubber12	Pflug01	Pflug12
2-7	1,9	2,1	1,5	1,5	1,5	1,5
10-15	1,3	1,6	1,5	1,3	1,4	1,3
15-20	1,4	1,4	1,4	1,3	1,5	1,5
32-37	1,2	1,3	1,0	1,1	1,2	1,4
52-57	0,6	1,2	0,2	0,5	0,6	1,0

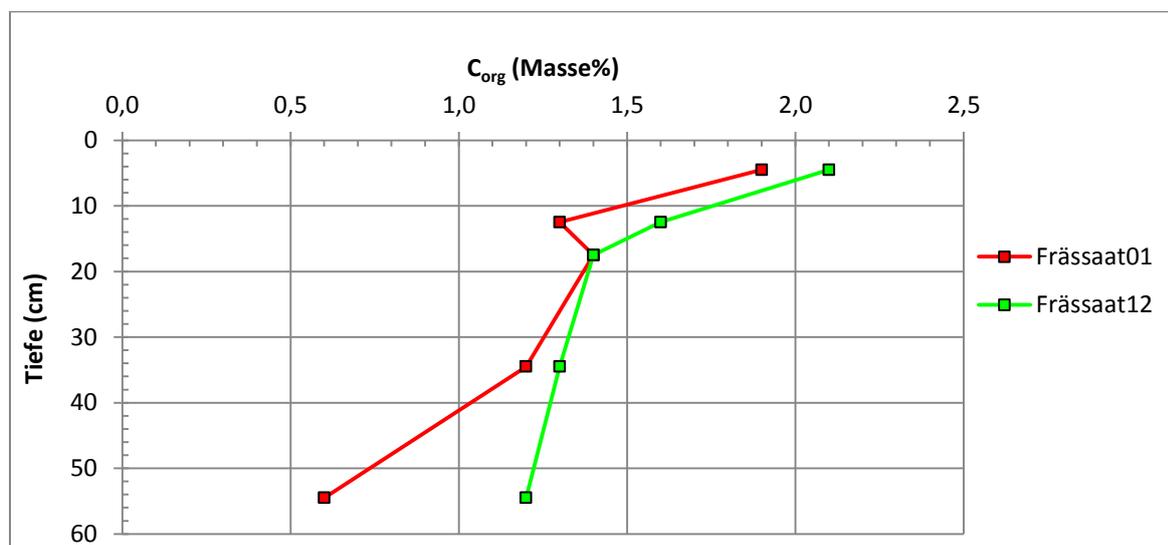


Abbildung 31: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Frässaat

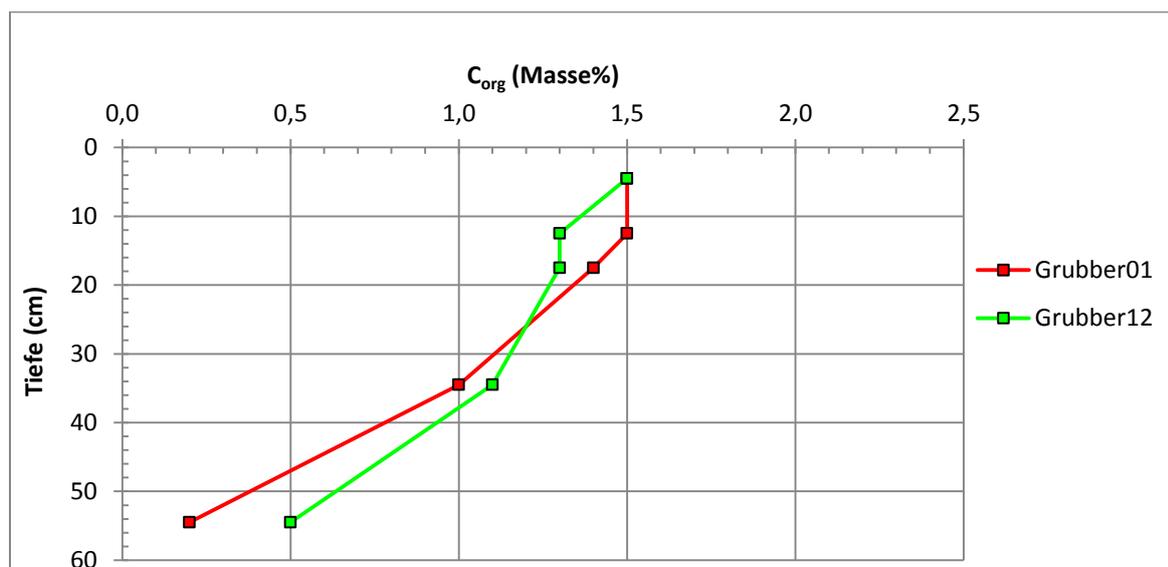


Abbildung 32: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Grubber

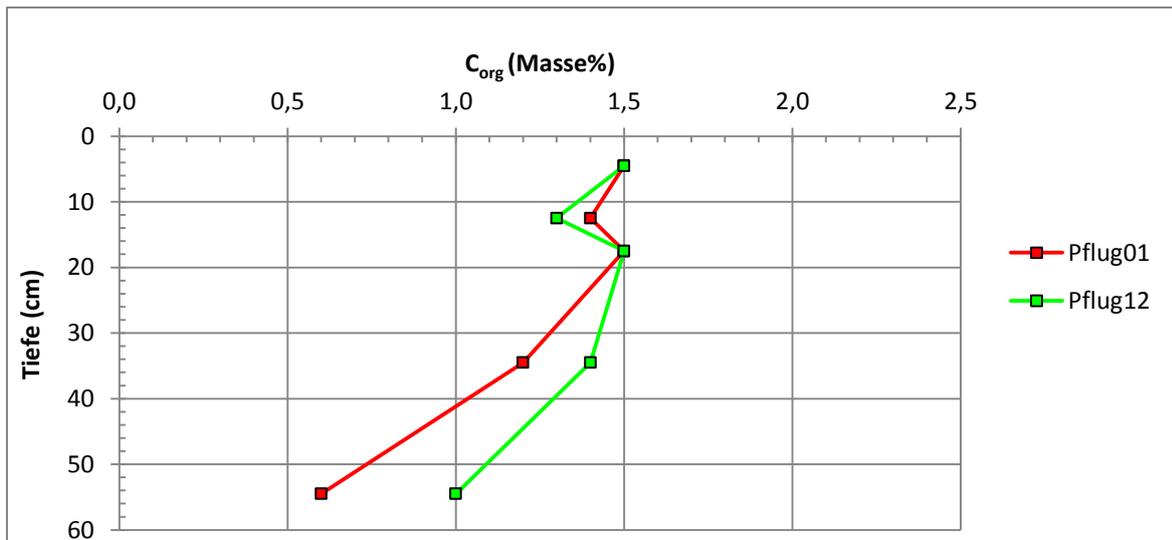


Abbildung 33: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Pflug

Beim Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 zeigt sich folgendes Bild (Tabelle 16 sowie Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36):

Bei der Variante Frässaat ist der kumulierte C_{org} -Vorrat im Jahr 2012 in allen Tiefenstufen höher als im Jahr 2001, wobei diese Erhöhung mit zunehmender Tiefe immer deutlicher wird. Die Varianten Grubber und Pflug zeigen hingegen kaum Veränderungen zwischen den Jahren 2001 und 2012, großteils sind die C_{org} -Vorräte im Jahr 2012 sogar geringfügig geringer als 2001.

Tabelle 16: Vergleich der kumulierten C_{org} -Vorräte (t/ha) 2001-2012

Horizont (cm)	Frässaat01	Frässaat12	Grubber01	Grubber12	Pflug12	Pflug01
0-8	21,0	22,4	16,4	15,1	17,3	17,1
0-15	35,5	39,8	31,6	29,9	30,6	31,1
0-29	65,0	69,9	61,2	57,5	57,9	61,2
0-43	89,1	99,8	84,5	80,3	85,5	85,6
0-57	102,6	127,5	88,2	90,8	105,0	98,7

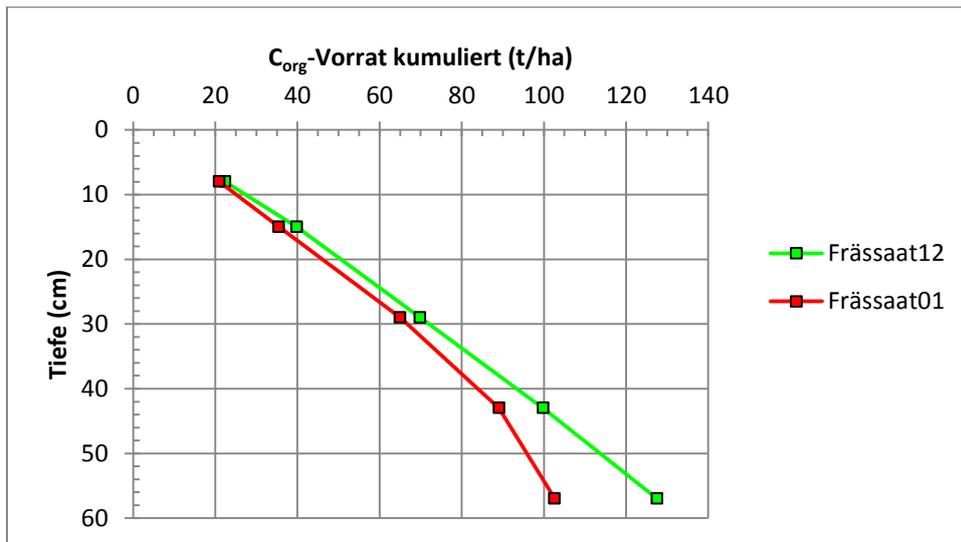


Abbildung 34: Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 der Variante Frässaat

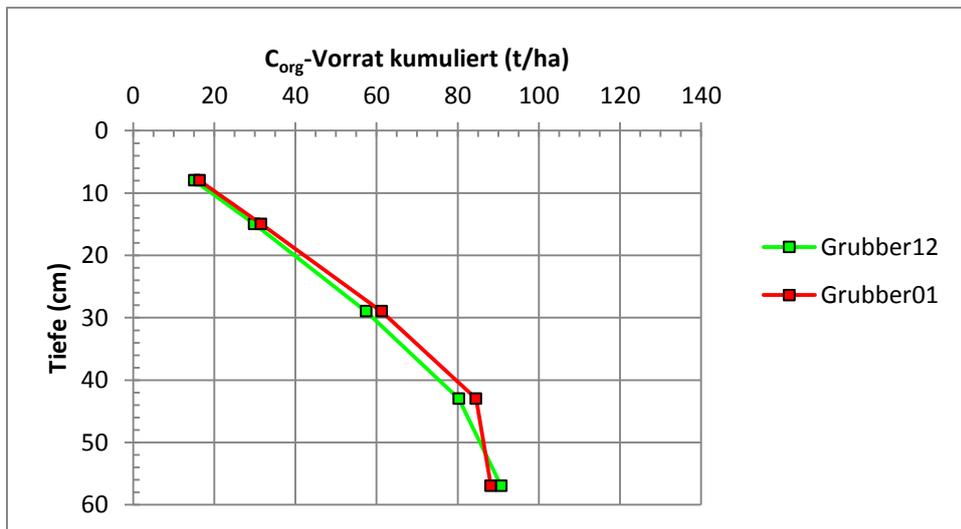


Abbildung 35: Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 der Variante Grubber

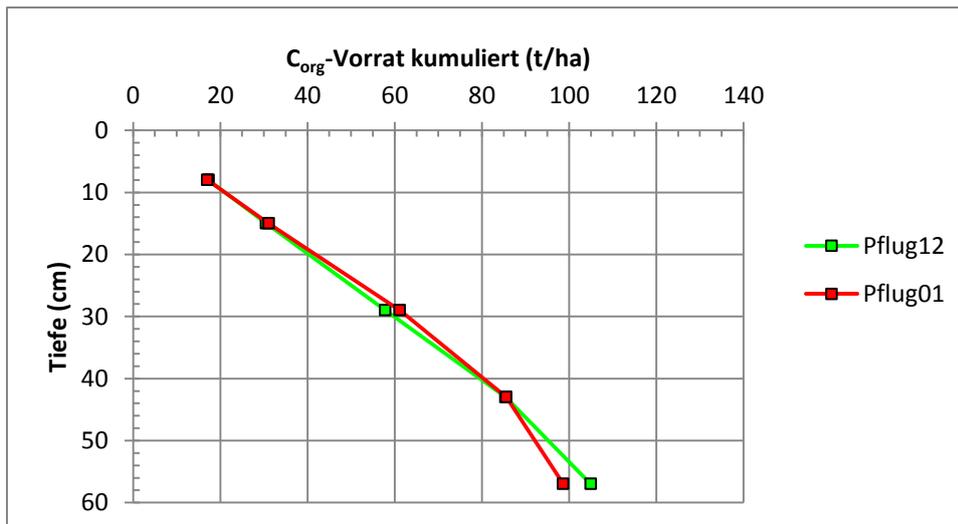


Abbildung 36: Vergleich des kumulierten C_{org}-Vorrates 2001-2012 der Variante Pflug

5.5 pF-Kurve

5.5.1 Statusvergleich 2012

Die Messergebnisse der Druckpotenzial-Wasseranteilsbeziehung werden als pF-Kurven dargestellt. Im Bereich 2-7 cm sind die pF-Kurven aller Varianten sehr ähnlich (Abbildung 37). Bei der Variante Frässaat liegen die Wassergehalte bei fast allen Druckstufen (außer zwischen 10 und 100 hPa) minimal über den Werten der beiden anderen Varianten. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der ANOVA für den Vergleich der Wassergehalte bei gegebener Saugspannung aufgelistet. Bei der Saugspannung 30 hPa können die Varianten Grubber und Pflug statistisch signifikant mehr Wasser speichern als die Variante Frässaat, bei 60 hPa hat die Variante Pflug einen höheren Wassergehalt als die beiden anderen Varianten. Im Saugspannungsbereich von 300 bis 3000 hPa hingegen hat die Variante Frässaat signifikant mehr Wasser gespeichert als die Variante Pflug.

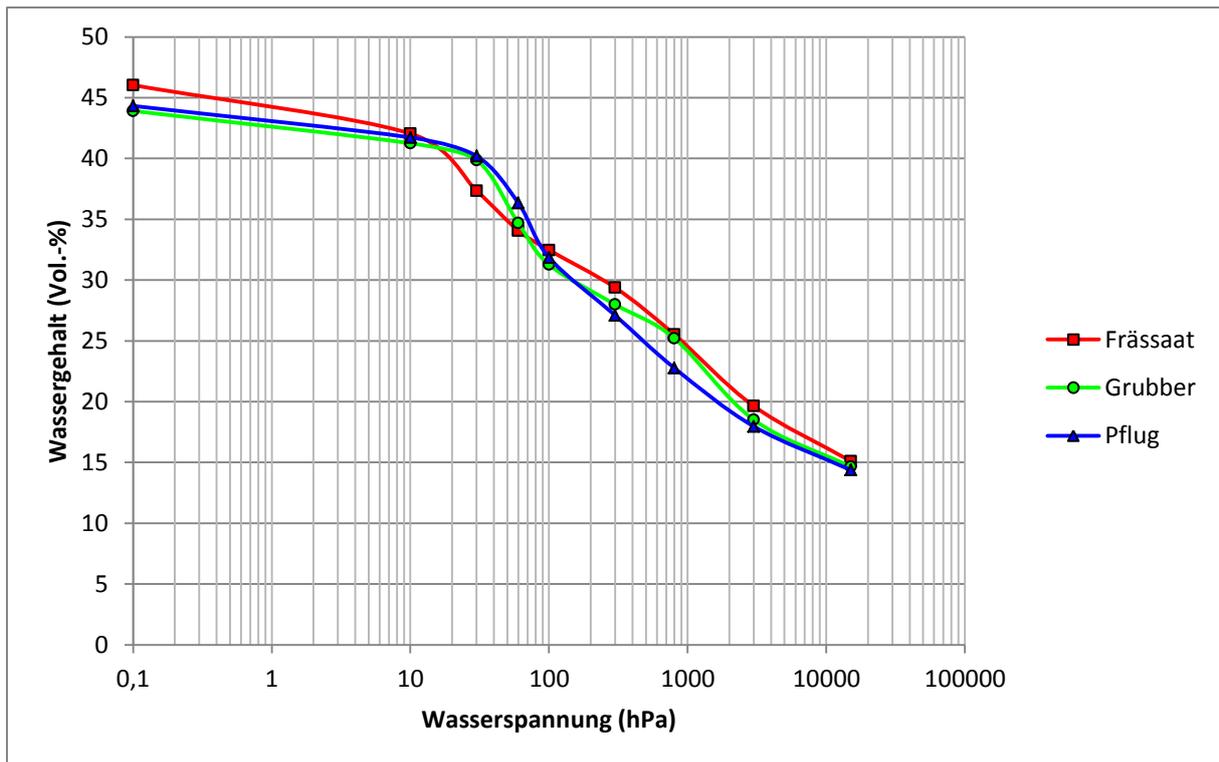


Abbildung 37: pF-Kurven des Bereichs 2-7 cm im Vergleich aller Varianten

Tabelle 17: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 2-7 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

hPa	Frässaar	Grubber	Pflug	p-Wert
0,1	46,0 a	43,9 a	44,3 a	0,41
10	42,0 a	41,2 a	41,7 a	0,63
30	37,3 a	39,9 b	40,2 b	0,00
60	34,1 a	34,7 a	36,4 b	0,00
100	32,5 a	31,3 a	31,9 a	0,12
300	29,4 b	28,0 a	27,1 a	0,00
800	25,5 b	25,2 b	22,8 a	0,00
3000	19,6 b	18,5 ab	18,0 a	0,02
15000	15,1 a	14,7 a	14,4 a	0,27

Im Horizont 10-15 cm hat die Variante Pflug bis 100 hPa den höchsten Wassergehalt, im Saugspannungsbereich darüber sind die Wassergehalte aller drei Varianten nahezu ident, was auch die ANOVA bestätigt (Abbildung 38 und Tabelle 18).

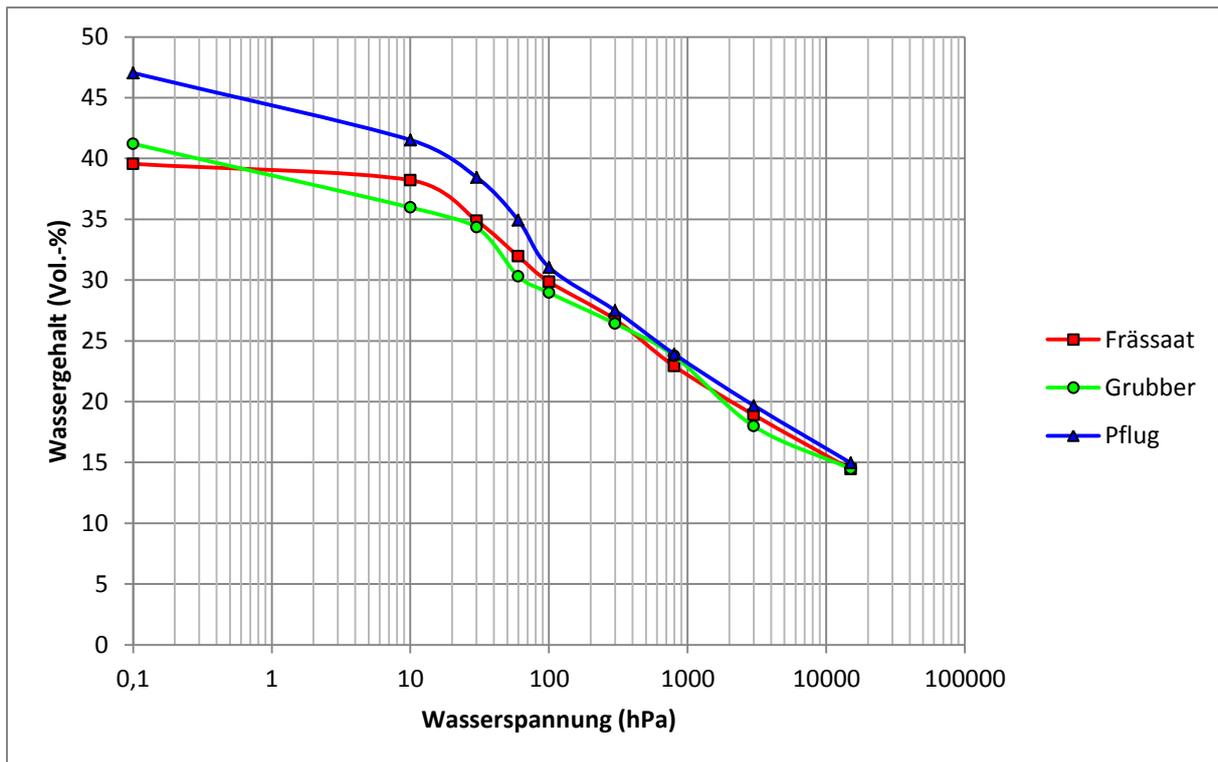


Abbildung 38: pF-Kurven des Bereichs 10-15 cm im Vergleich aller Varianten

Tabelle 18: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 10-15 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level p<0,05

hPa	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert
0,1	39,6 a	41,2 a	47,0 b	0,00
10	38,2 b	36,0 a	41,5 c	0,00
30	34,9 a	34,3 a	38,5 b	0,00
60	32,0 b	30,3 a	34,9 c	0,00
100	29,9 ab	29,0 a	31,1 b	0,01
300	26,8 a	26,4 a	27,5 a	0,27
800	22,9 a	23,8 a	23,9 a	0,24
3000	18,9 a	18,0 a	19,7 a	0,09
15000	14,4 a	14,5 a	15,0 a	0,77

Ein ähnliches Bild zeigt sich für den Bereich 15-20 cm, wo die Variante Pflug bis zu einer Wasserspannung von 10 hPa mehr Wasser als die anderen Varianten speichern kann und im höheren Saugspannungsbereich alle Varianten einen ähnlichen Verlauf zeigen (Abbildung 39). Die ANOVA zeigt hier jedoch beinahe über den gesamten Saugspannungsbereich statistisch signifikante Unterschiede (Tabelle 19): Während die Variante Pflug zwischen 0,1 und 30 hPa (bei 10 hPa auch die Variante Frässaat) einen höheren Wassergehalt als die Variante Grubber hat, ist die gespeicherte Wassermenge zwischen 100 und 300 hPa bei der Variante Grubber signifikant höher als bei der Variante Pflug. Bei Saugspannungen von 800

und 15000 hPa ist bei den Variante Frässaat und Grubber bzw. bei 3000 hPa nur bei der Variante Frässaat signifikant mehr Wasser gespeichert als bei der Variante Pflug.

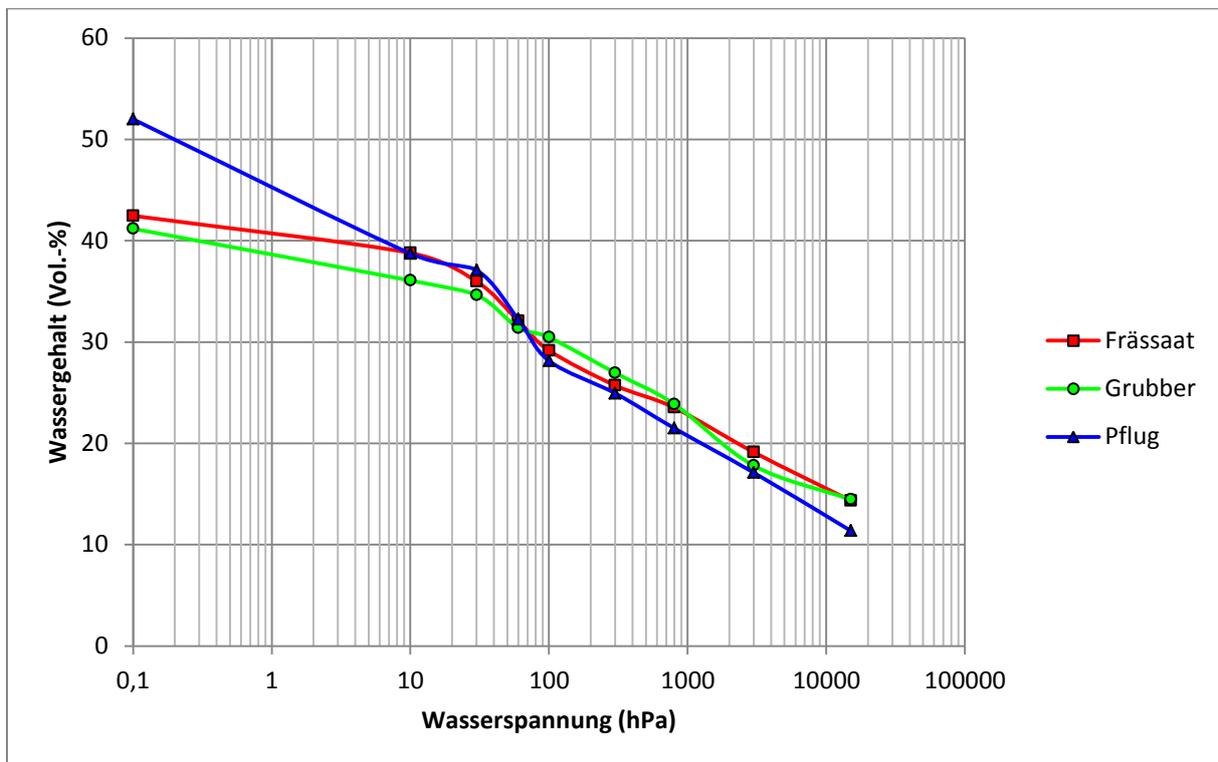


Abbildung 39: pF-Kurven des Bereichs 15-20 cm im Vergleich aller Varianten

Tabelle 19: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 15-20 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

hPa	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert
0,1	42,5 a	41,2 a	52,0 b	0,00
10	38,8 b	36,1 a	38,7 b	0,01
30	36,0 ab	34,6 a	37,1 b	0,01
60	32,1 a	31,4 a	32,3 a	0,52
100	29,2 ab	30,5 b	28,1 a	0,02
300	25,7 ab	27,0 b	24,9 a	0,05
800	23,5 b	23,9 b	21,5 a	0,01
3000	19,1 b	17,8 a	17,1 a	0,00
15000	14,3 b	14,5 b	11,4 a	0,00

Im Horizont 32-37 cm sind über den gesamten Saugspannungsbereich kaum Wassergehaltsunterschiede zwischen den Varianten zu erkennen – nur im Bereich 10-30 hPa hat die Variante Frässaat geringfügig höhere Wassergehalte, dies bestätigt auch die ANOVA (Abbildung 40 und Tabelle 20).

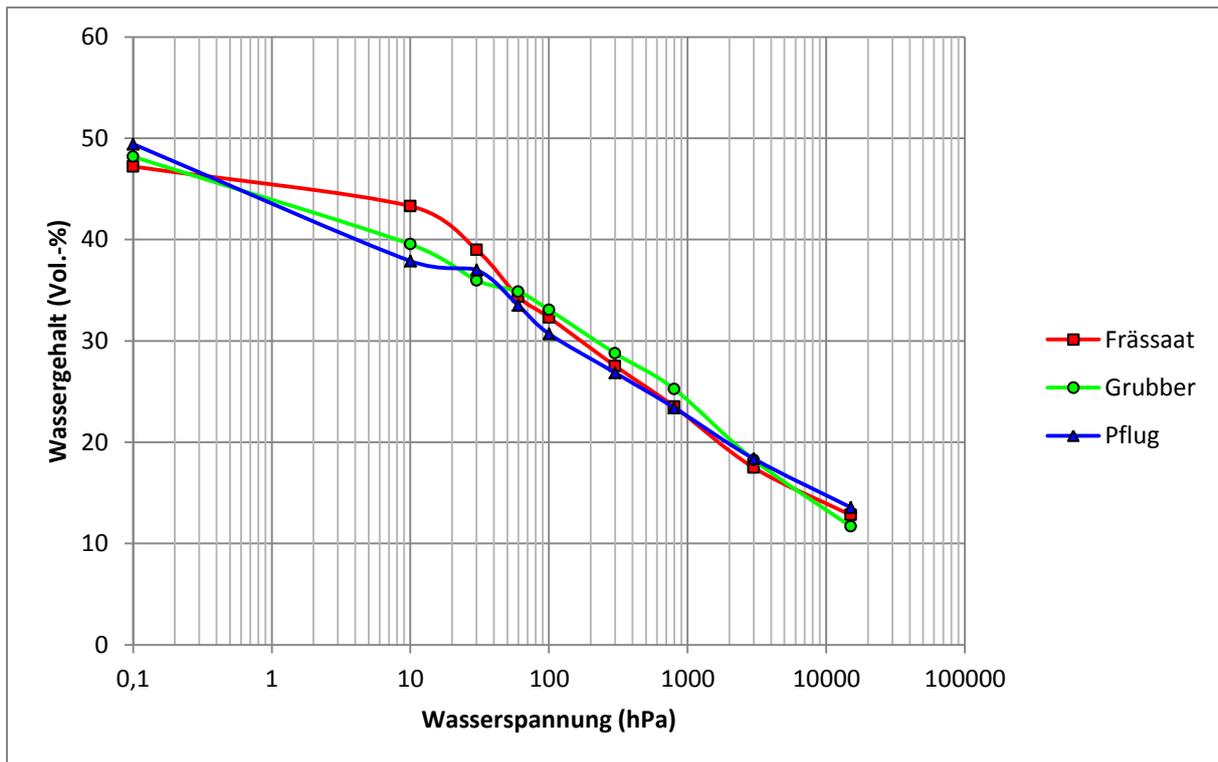


Abbildung 40: pF-Kurven des Bereichs 32-37 cm im Vergleich aller Varianten

Tabelle 20: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 32-37 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level p<0,05

hPa	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert
0,1	47,2 a	48,2 a	49,4 a	0,06
10	43,3 b	39,5 ab	37,9 a	0,01
30	39,0 b	36,0 a	37,0 a	0,00
60	34,4 a	34,9 a	33,5 a	0,18
100	32,3 ab	33,1 b	30,7 a	0,03
300	27,5 a	28,8 a	26,9 a	0,12
800	23,5 a	25,3 a	23,4 a	0,07
3000	17,5 a	18,3 a	18,4 a	0,25
15000	12,8 b	11,7 a	13,6 b	0,00

In der untersten Schicht gibt es die größten Differenzen bei den pF-Kurven, allerdings ist dies durch die stark variierende Textur bedingt (Abbildung 41). Bei der Variante Pflug ist über den gesamten Saugspannungsbereich außer bei 10 und 15000 hPa signifikant mehr Wasser gespeichert als bei den anderen Varianten (Tabelle 21).

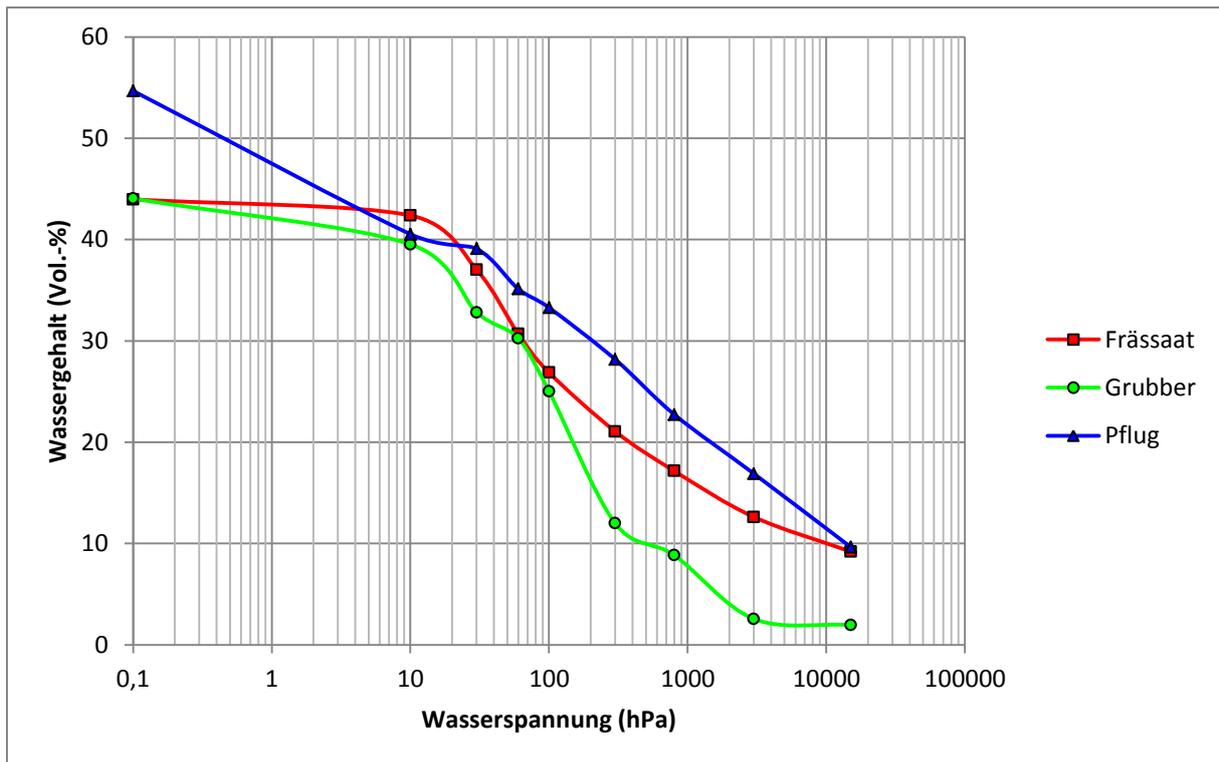


Abbildung 41: pF-Kurven des Bereichs 52-57 cm im Vergleich aller Varianten

Tabelle 21: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 52-57 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

hPa	Frässaar	Grubber	Pflug	p-Wert
0,1	44,0 a	44,0 a	54,7 b	0,00
10	42,4 b	39,5 a	40,5 ab	0,01
30	37,0 b	32,8 a	39,1 c	0,00
60	30,7 a	30,2 a	35,1 b	0,00
100	26,9 b	25,0 a	33,3 c	0,00
300	21,1 b	12,0 a	28,2 c	0,00
800	17,2 b	8,9 a	22,7 c	0,00
3000	12,6 b	2,6 a	16,9 c	0,00
15000	9,2 b	2,0 a	9,7 b	0,00

Aus den Werten der pF-Messung wurde die nutzbare Feldkapazität (nFK) im Wasserspannungsbereich 60 bis 15.000 hPa je Horizont berechnet und statistisch analysiert (Tabelle 22). In den obersten drei Horizonten (2-7, 10-15 und 15-20 cm) kann die Variante Pflug mehr Wasser speichern als die beiden anderen Varianten. Im Bereich darunter weist die Variante Grubber die höchste nFK auf.

Tabelle 22: nFK (Mittelwerte, Vol.-%) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert
2-7	19,0 a	20,0 a	22,0 b	0,00
10-15	17,5 a	15,8 a	20,0 b	0,00
15-20	17,7 a	16,9 a	20,9 b	0,00
32-37	21,5 b	23,2 c	19,9 a	0,00
52-57	21,5 a	28,3 c	25,5 b	0,00

Zusätzlich wurde die kumulierte nFK über alle Tiefenstufen berechnet, wie in Abbildung 42 ersichtlich ist. Die Variante Pflug hat in allen Tiefenstufen die höchste kumulierte nFK. Im gesamten Horizont bis 60 cm kann die Variante Pflug mit 131 mm das meiste pflanzenverfügbare Wasser speichern, die Variante Grubber liegt mit 130 mm nFK nur knapp darunter und die Variante Frässaat kann mit 119 mm das wenigste Wasser pflanzenverfügbar speichern.

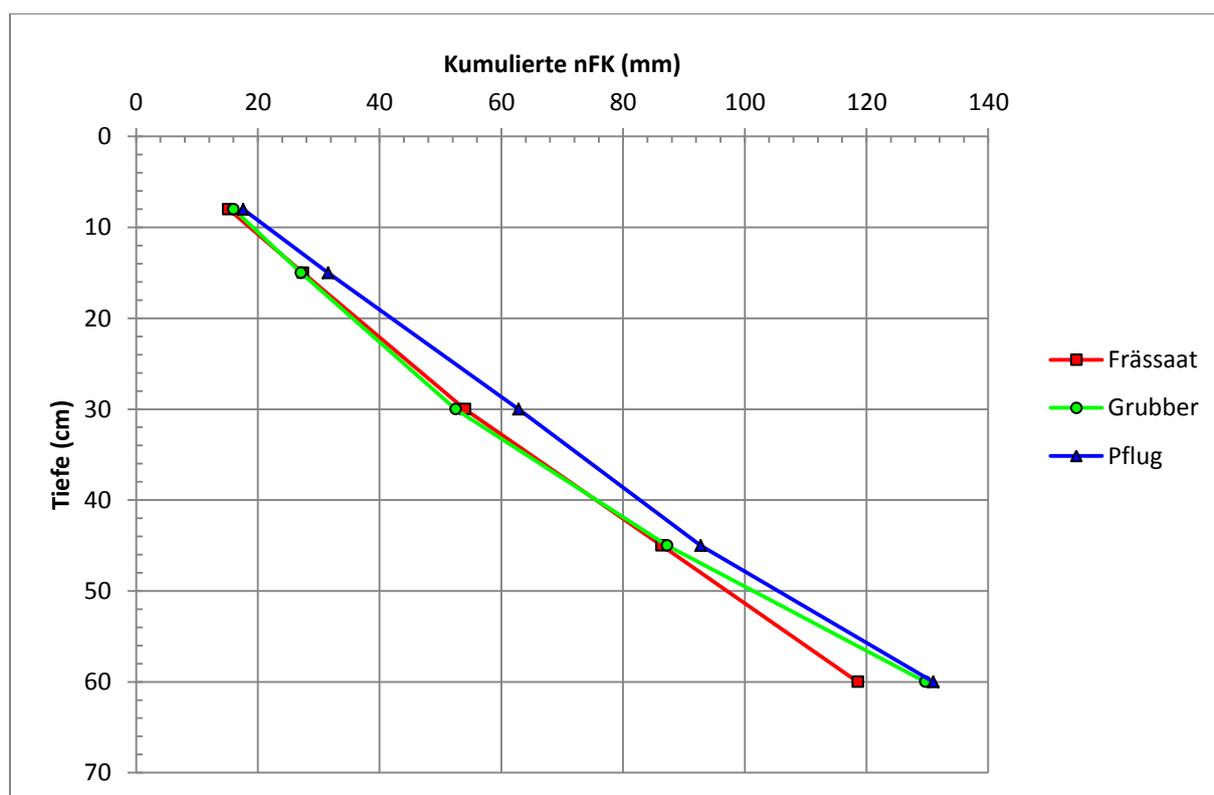


Abbildung 42: Vergleich der kumulierten nutzbaren Feldkapazität (60-15000 hPa) bis 60 cm Tiefe

5.5.2 Vergleich 2001-2012

Der Vergleich der pF-Kurven des Jahres 2001 mit denen aus dem Jahr 2012 zeigt im niedrigen Saugspannungsbereich bei allen Varianten eine Steigerung der Wassergehalte,

während es im höheren Saugspannungsbereich tendenziell eine Abnahme der Wassergehalte im Jahr 2012 gegenüber dem Jahr 2001 gibt (Tabelle 23, Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26). Im Jahr 2001 gab es keine Messung bei 3000 hPa.

Tabelle 23: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 2-7 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p<0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012**

pF-Wert	Frässaat 2001	Frässaat 2012	Grubber 2001	Grubber 2012	Pflug 2001	Pflug 2012
0,1	46,2	52,4**	44,9	55,1**	44,7	45,9
10	39,6	40,5	41,5	43,8	36,7	40,1**
30	37,0	38,7	38,2	37,2	33,9	39,2**
60	35,1	37,4	34,2	32,9	31,7	33,8
100	33,5	35,1	32,0	30,1*	30,0	31,0
300	30,6	30,4	27,4	24,7**	27,2	28,0
800	28,0	26,1	24,7	21,4**	25,2	24,8
3000		20,1		16,8		20,2
15000	15,3	16,3	12,3	12,2	13,1	15,6**

Tabelle 24: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 10-15 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p<0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012**

pF-Wert	Frässaat 2001	Frässaat 2012	Grubber 2001	Grubber 2012	Pflug 2001	Pflug 2012
0,1	39,5	43,7*	42,1	42,9	43,8	49,1**
10	36,8	39,0*	39,9	41,0	37,9	41,3**
30	34,4	38,4**	38,2	35,5**	34,8	35,4
60	32,6	36,0**	33,7	32,5*	33,0	31,2*
100	31,2	33,9**	31,7	30,1**	31,3	29,4*
300	28,6	29,6**	27,5	26,4*	28,6	25,7**
800	26,3	25,5*	25,0	24,8	26,6	22,8**
3000		19,9		20,5		18,4
15000	15,1	16,4	12,5	14,9**	13,5	14,3

Tabelle 25: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 15-20 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p<0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012

pF-Wert	Frässaat 2001	Frässaat 2012	Grubber 2001	Grubber 2012	Pflug 2001	Pflug 2012
0,1	40,7	46,1**	41,6	43,0	44,3	50,1*
10	35,8	40,2**	35,6	37,8	39,4	38,6
30	33,7	37,4**	34,2	36,2	34,7	33,0
60	32,2	35,2**	32,8	32,3	32,9	29,9**
100	30,9	32,2**	31,1	29,2	31,3	28,1**
300	28,4	28,5	27,9	25,7	28,6	24,6**
800	26,2	25,2*	26,2	24,4	26,5	21,8**
3000		20,5		20,2		18,2
15000	14,6	14,0	13,2	14,6	12,8	12,5

Tabelle 26: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 32-37 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p<0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012

pF-Wert	Frässaat 2001	Frässaat 2012	Grubber 2001	Grubber 2012	Pflug 2001	Pflug 2012
0,1	44,4	45,9	38,2	46,5**	45,0	48,8
10	36,7	38,5	31,6	37,3*	39,5	36,9
30	35,1	37,0*	31,2	37,1*	36,5	32,1*
60	33,5	35,0	30,0	34,0	35,1	31,1*
100	31,9	32,4	28,0	30,0	34,1	29,9*
300	28,5	28,2	24,7	25,2	31,7	26,9*
800	25,8	24,0*	22,3	21,1	28,9	24,3*
3000		20,2		16,0		18,5
15000	13,6	14,6**	12,7	10,4**	16,6	15,8

5.6 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit K_u

K_u kann ebenso wie der C_{org} nicht statistisch ausgewertet werden, da nur eine Analyse je Tiefenstufe durchgeführt wurde. Da die Messung von K_u im Jahr 2001 noch mittels einer anderen Methode als im Jahr 2012 durchgeführt wurde (kombinierte Stationär/Instationär-Methode gemäß ISO/DIS 11275, 1995), ist ein Vergleich 2001-2012 bei diesem Parameter nicht möglich.

Im Horizont 2-7 cm hat die Variante Frässaat im Bereich nahe der Sättigung ein K_u von rund 3 m/d während die Varianten Grubber und Pflug bei nur 0,1 m/d liegen (Abbildung 43). Bis zu einer Saugspannung von 100 hPa hat die Variante Frässaat die höchste K_u , die Varianten Grubber und Pflug zeigen in diesem Bereich sehr ähnliche, niedrigere Werte. Zwischen 100

und 1000 hPa nähern sich die K_u -Werte aller Varianten an, während im Bereich über 1000 hPa folgende Reihung für K_u gilt: Grubber > Pflug > Frässaat. Im Bereich 10-15 cm hat die Variante Frässaat im stark wassergesättigten Bereich ebenfalls die höchste K_u , allerdings findet hier bereits ab 10 hPa Saugspannung eine Angleichung der Varianten statt, welche sich mit zunehmender Entwässerung nicht mehr verändert (Abbildung 44). Im nächsttieferen Horizont (15-20 cm) liegt K_u im Bereich nahe der kompletten Sättigung bei allen drei Varianten bei 0,1 m/d (Abbildung 45). Bei einer Saugspannung zwischen 1 und 100 hPa hat die Variante Pflug eine geringfügig höhere K_u als die Varianten Frässaat und Grubber, im übrigen Saugspannungsbereich ist der Kurvenverlauf aller Varianten nahezu ident. Im tiefsten bei allen Varianten beprobaren Horizont (32-37 cm) zeigt K_u bis zu einem Matrixpotenzial von 200 hPa folgende Reihung: Grubber > Frässaat > Pflug, im Bereich darüber haben die Varianten Frässaat und Grubber den gleichen Kurvenverlauf, wobei die Werte höher als jene der Variante Pflug sind (Abbildung 46).

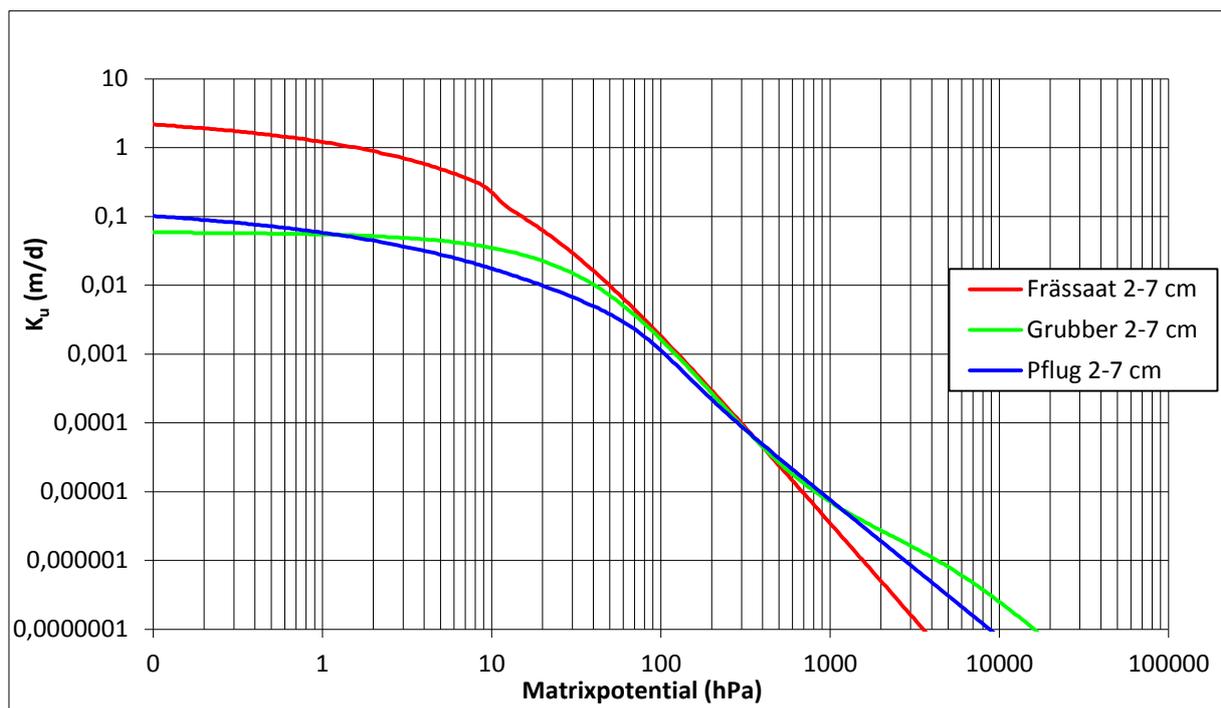


Abbildung 43: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial, Variantenvergleich 2-7 cm Tiefe

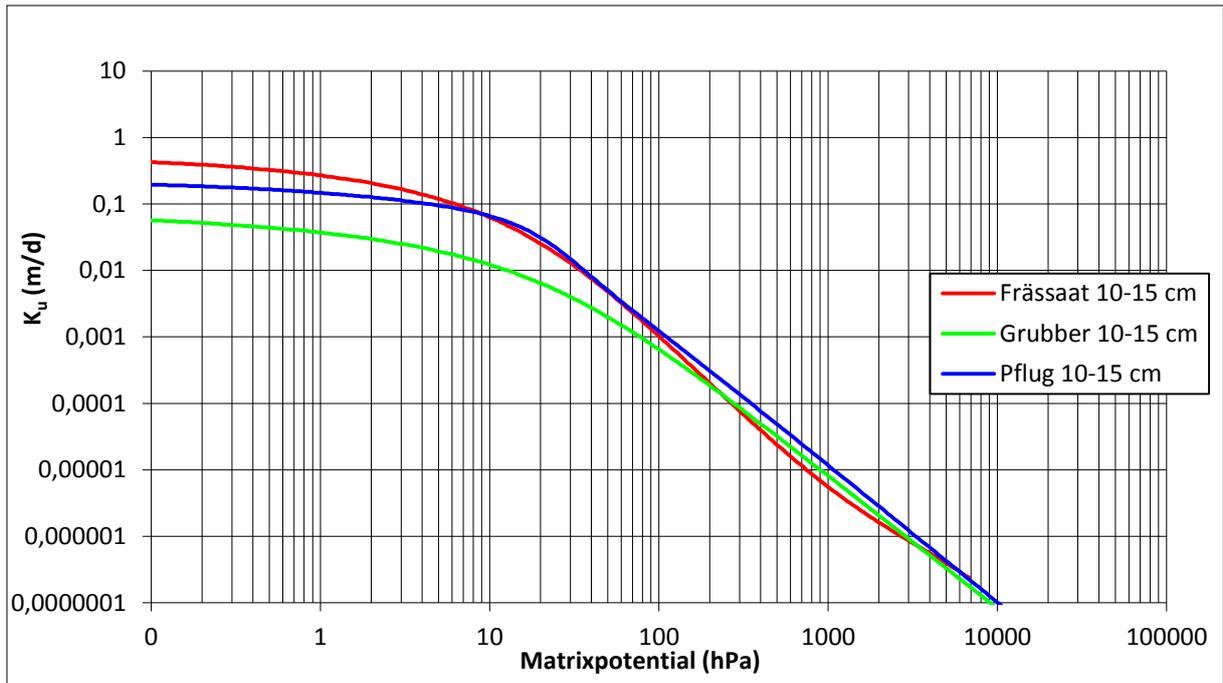


Abbildung 44: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotential, Variantenvergleich 10-15 cm Tiefe

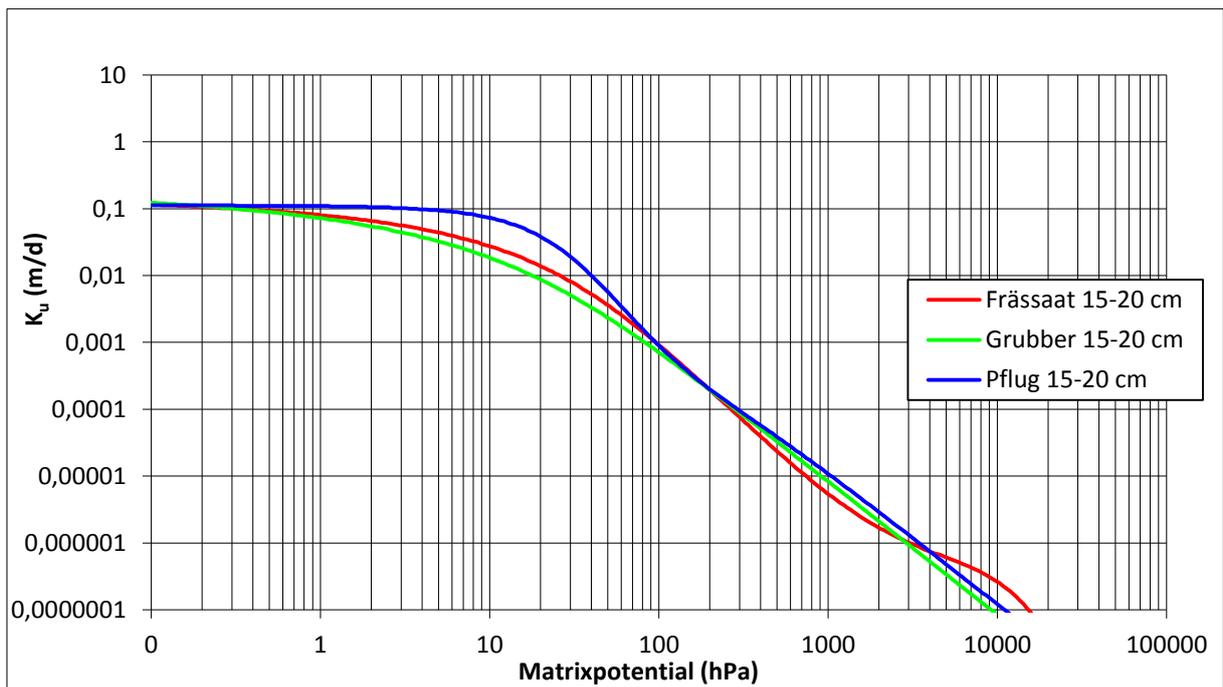


Abbildung 45: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotential, Variantenvergleich 15-20 cm Tiefe

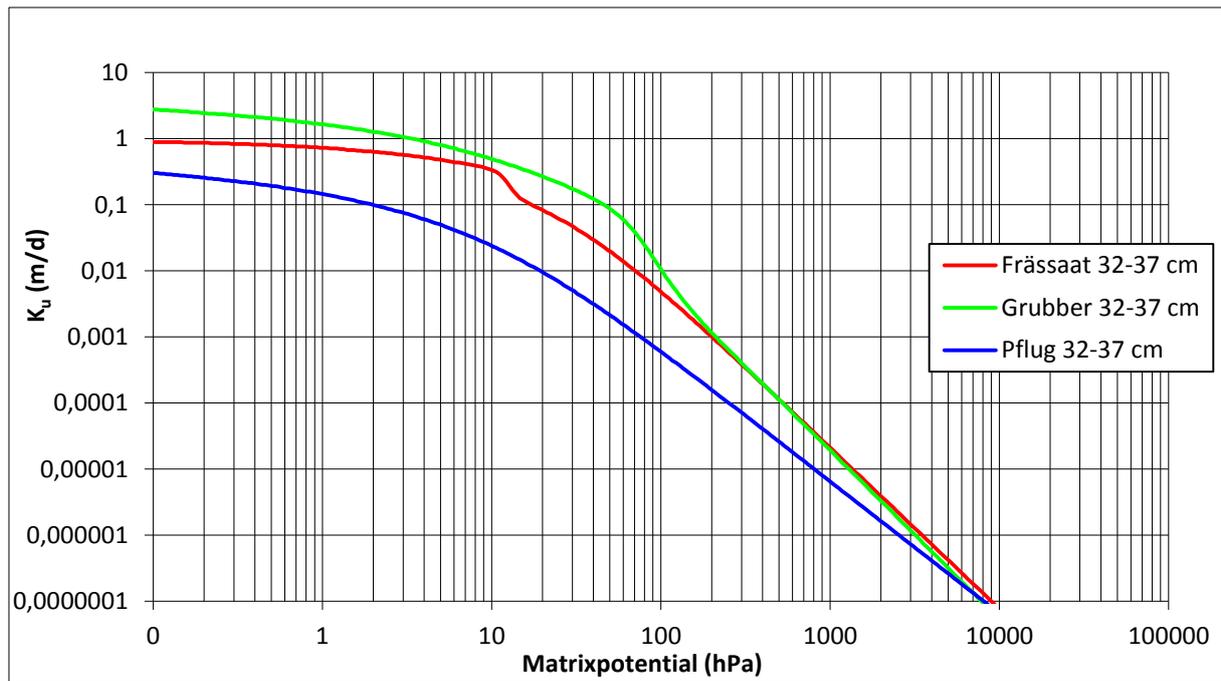


Abbildung 46: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotential, Variantenvergleich 32-37 cm Tiefe

5.7 Gesättigte Wasserleitfähigkeit K_s

5.7.1 Statusvergleich 2012

Die Boxplots in Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die zum Teil sehr starken Streuungen der Messwiederholungen von K_s . Der Maximalwert aller Tiefenstufen und Varianten liegt bei 10,1 m/d, der Minimalwert bei 0,1 m/d – das ergibt eine Streuung aller Messungen von etwas mehr als zwei Potenzen. Laut Hartge und Horn (2009) kann die Streuung von K_s selbst innerhalb einer Gruppe von Parallelen zwei Potenzen und mehr betragen. Die stärkste Streuung innerhalb einer Messgruppe weist der Bereich 2-7 cm der Variante Frässaar auf (0,8 m/d – 8,1 m/d). In den Tiefenstufen 10-15, 15-20 und 32-37 cm gibt es auch Ausreißer und Extremwerte.

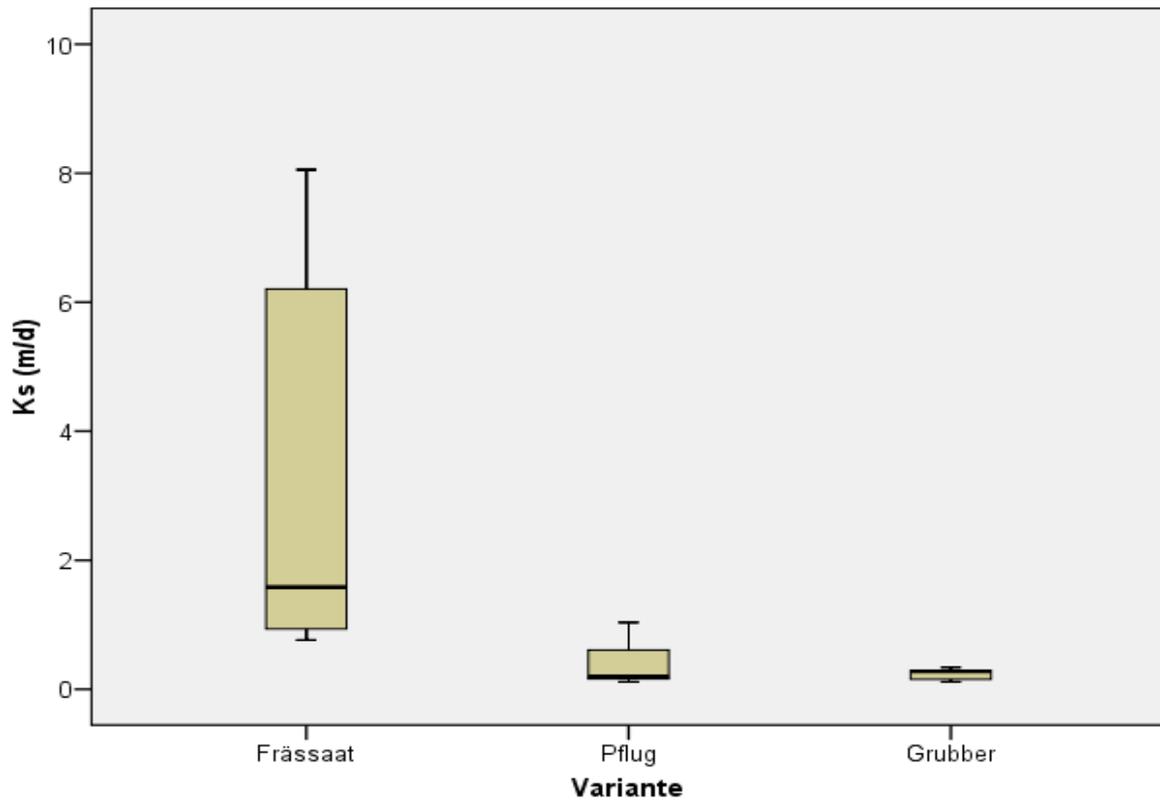


Abbildung 47: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 2-7 cm

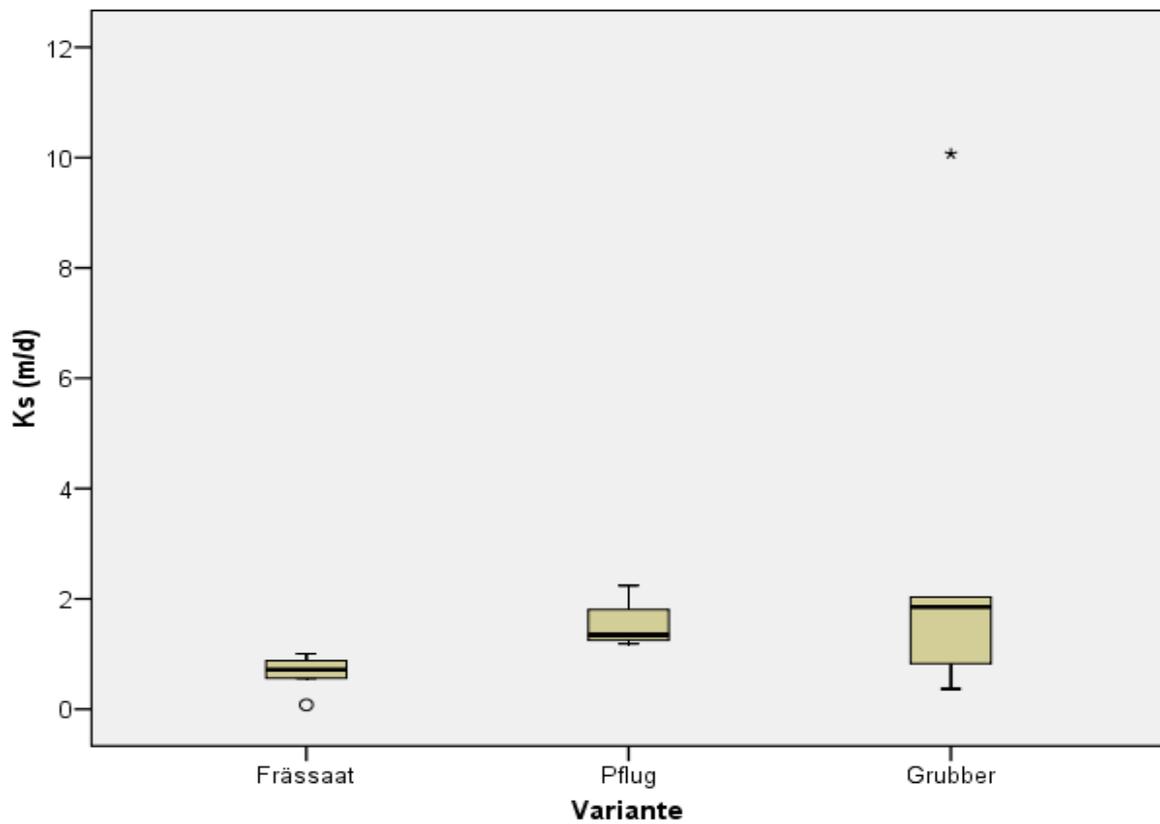


Abbildung 48: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 10-15 cm

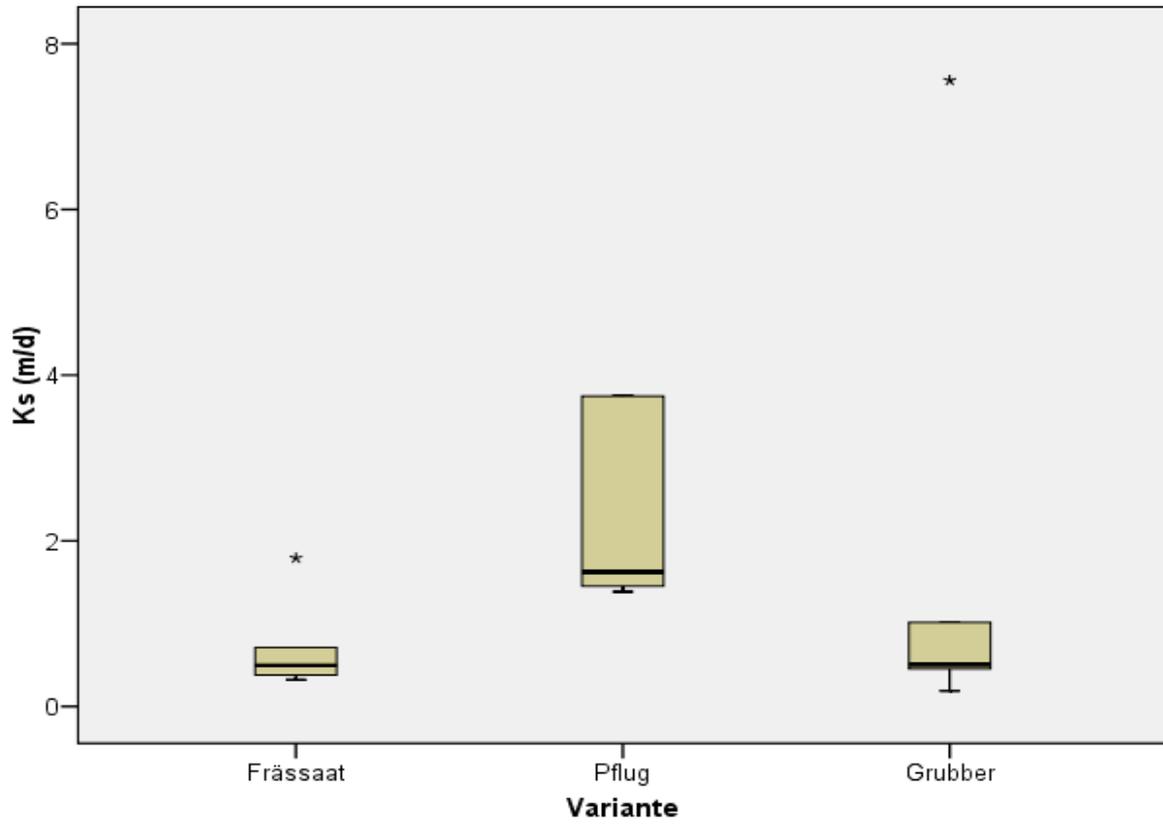


Abbildung 49: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 15-20 cm

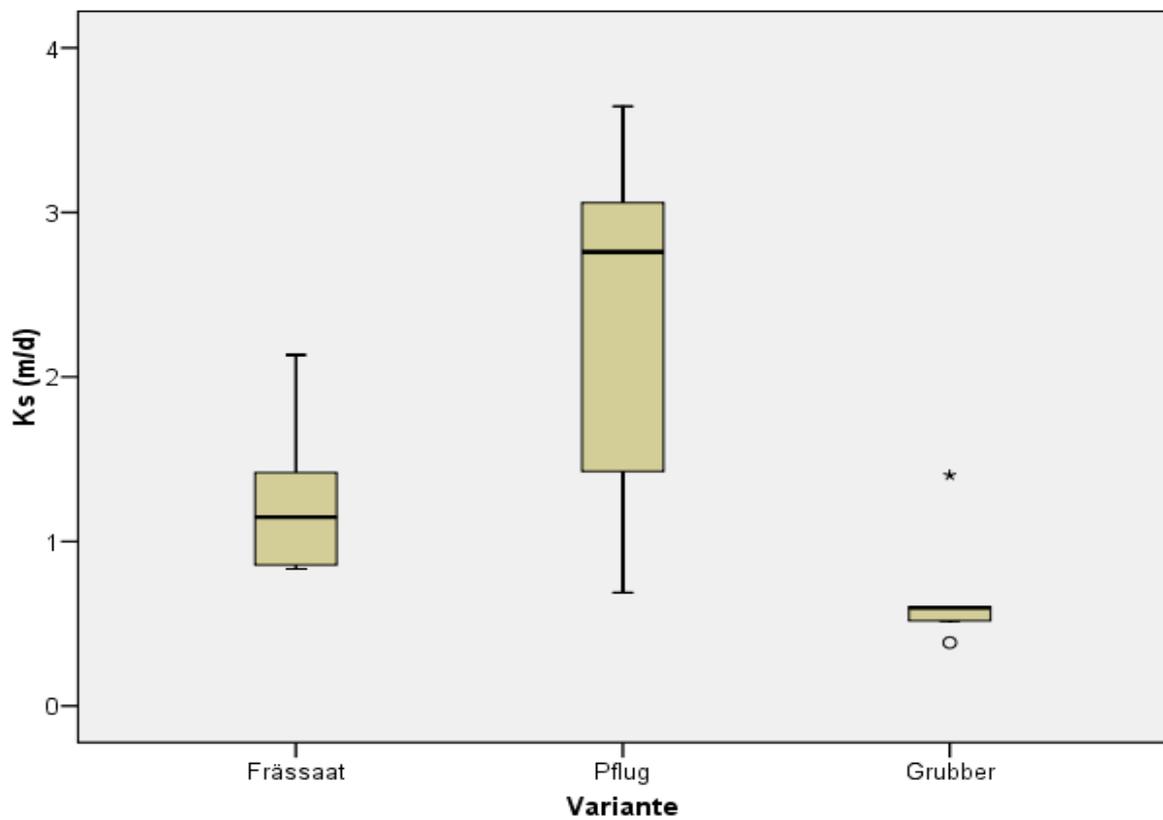


Abbildung 50: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 32-37 cm

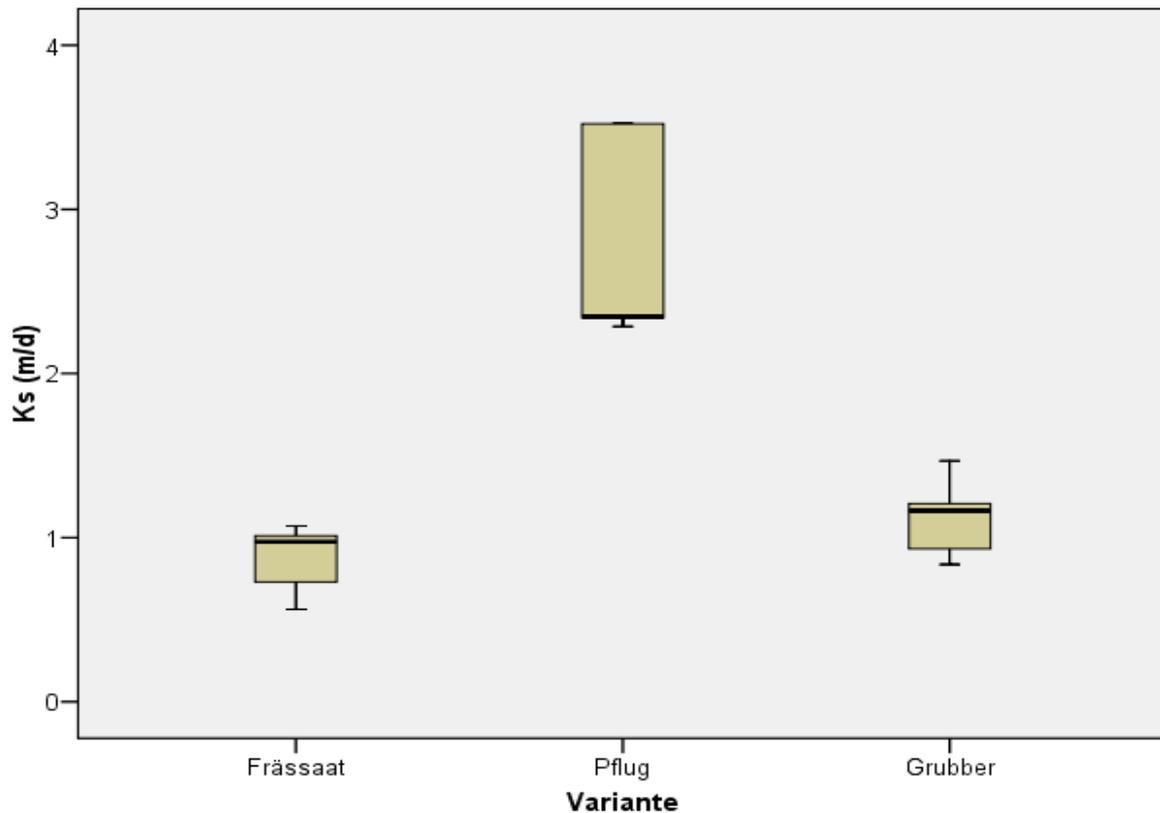


Abbildung 51: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 52-57 cm

Nach Anpassung der gemessenen Werte für K_s ($=\log K_s$) gemäß Hartge und Horn (2009), wie in Kapitel 4.4 beschrieben, weisen alle Gruppen Normalverteilung auf, was die Durchführung einer ANOVA ermöglicht. Der Levene-Test bestätigt die Homogenität der Varianzen bei allen Horizonten außer im Bereich 2-7 cm, wo der Werte mit 0,03 geringfügig unter der Grenze von 0,05 liegt. In Tabelle 27 sind die Mediane von K_s vor der Werteanpassung sowie die Ergebnisse der ANOVA und des Post-hoc Tukey Test aufgelistet.

Tabelle 27: K_s (Mediane, m/d) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$

Horizont (cm)	Frässaat	Grubber	Pflug	p-Wert
2-7	1,58 b	0,28 a	0,19 a	0,00
10-15	0,72 a	1,85 a	1,35 a	0,12
15-20	0,50 a	0,51 a	1,62 a	0,12
32-37	1,15 ab	0,60 a	2,76 b	0,02
52-57	0,97 a	1,16 a	2,35 b	0,00

Wie die ANOVA zeigt, ist der Unterschied von K_s beim Vergleich der verschiedenen Bearbeitungsvarianten im obersten Horizont signifikant, wobei K_s der Variante Frässaat höher ist als bei den anderen beiden Varianten. In den beiden darunterliegenden Horizonten

10-15 und 15-20 cm gibt es keine signifikante Differenz. Im Bereich 32-37 cm ist K_s bei der Variante Pflug signifikant höher als bei der Variante Grubber, und im Horizont 52-57 cm hat ebenfalls die Variante Pflug eine signifikant höhere K_s als die Varianten Frässaat und Grubber.

5.7.2 Vergleich 2001-2012

In Abbildung 52, Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die Boxplots mit den wie in Kapitel 4.4 beschriebenen $\log K_s$ -Werten als Vergleich 2001 – 2012 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass bei den Varianten Grubber und Pflug im Jahr 2012 in fast allen Tiefenstufen höhere K_s -Werte als im Jahr 2001 gemessen wurden.

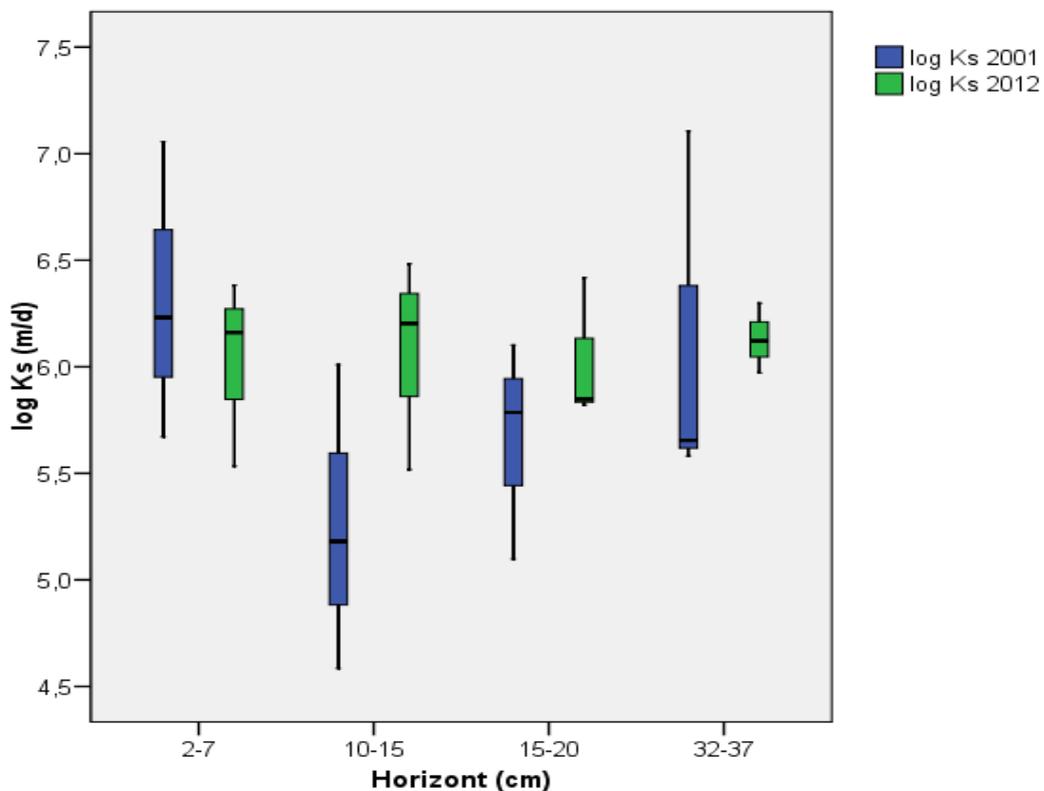


Abbildung 52: Boxplots für $\log K_s$ im Vergleich 2001-2012 der Variante Frässaat

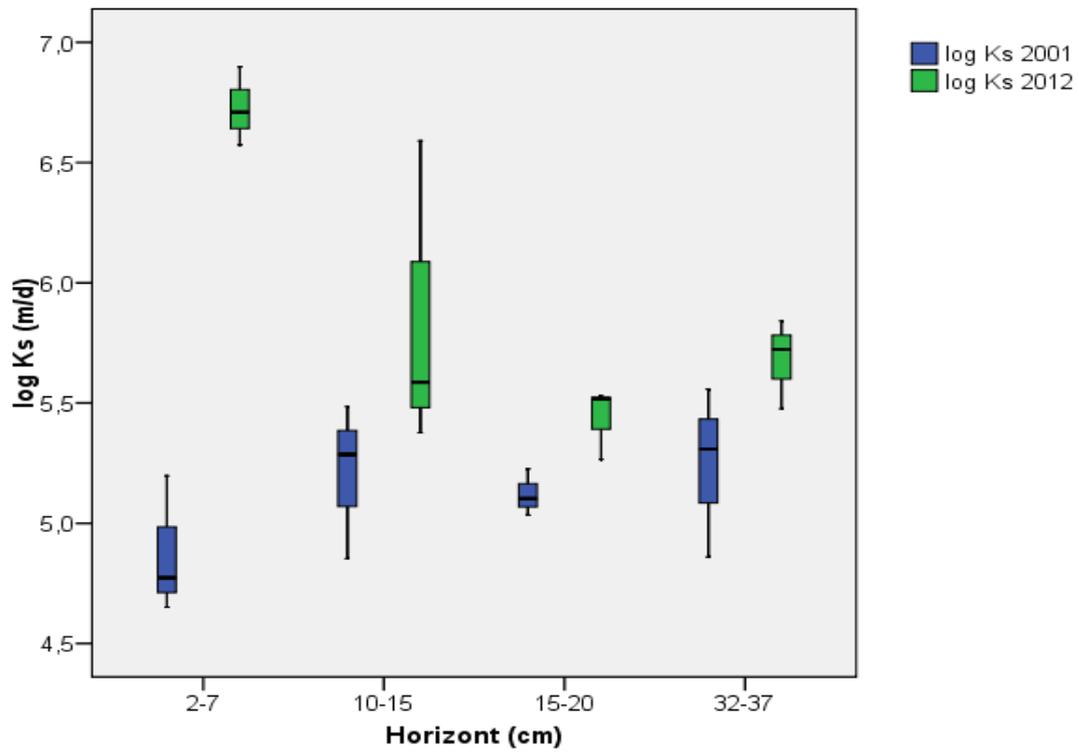


Abbildung 53: Boxplots für log K_s im Vergleich 2001-2012 der Variante Grubber

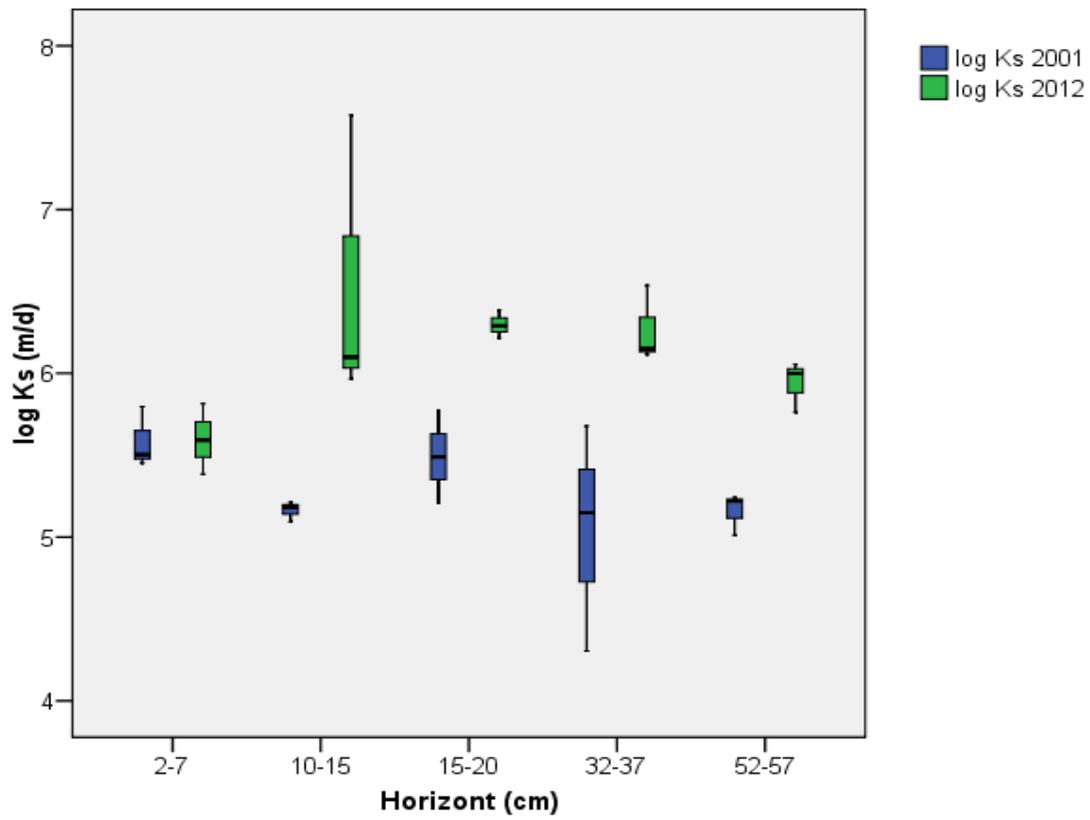


Abbildung 54: Boxplots für log K_s im Vergleich 2001-2012 der Variante Pflug

Nach Überprüfung der Normalverteilung wurden T-Tests für unabhängige Stichproben durchgeführt, welche zu den in Tabelle 28 angegebenen Ergebnissen führten.

Tabelle 28: K_s 2001 und 2012 (Mediane, m/d) sowie Ergebnisse der T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p<0,05$

Variante	Horizont (cm)	K_s 2001	K_s 2012	p-Wert
Frässaat	2-7	1,70 a	2,41 a	0,95
Frässaat	10-15	0,15 a	1,60 a	0,06
Frässaat	15-20	0,61 a	0,71 a	0,25
Frässaat	32-37	0,45 a	0,94 a	0,79
Grubber	2-7	0,06 a	3,75 b	0,00
Grubber	10-15	0,19 a	0,39 a	0,13
Grubber	15-20	0,13 a	0,34 b	0,03
Grubber	32-37	0,20 a	0,53 b	0,04
Pflug	2-7	0,32 a	0,65 a	0,40
Pflug	10-15	0,15 a	1,25 b	0,03
Pflug	15-20	0,31 a	1,95 b	0,00
Pflug	32-37	0,14 a	2,26 b	0,01
Pflug	52-57	0,17 a	1,00 b	0,00

Bei der Variante Frässaat hat sich K_s im Zeitraum 2001-2012 in keinem Horizont statistisch signifikant verändert. Bei der Variante Grubber ist K_s im Jahr 2012 in den Horizonten 2-7, 15-20 und 32-37 cm signifikant höher als im 2001. Bei der Variante Pflug ist K_s im Jahr 2012 in allen Horizonten außer im Horizont 2-7 cm signifikant höher als im Jahr 2001.

5.8 Korrelation zwischen einzelnen Parametern

Zusätzlich zu der Analyse der einzelnen Parameter wurden auch Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern der Profile Frässaat, Grubber und Pflug untersucht.

5.8.1 Korrelation Bodenart – C_{org} -Konzentration

Die Korrelationsanalyse zeigt mit $r=0,60$ eine mittlere Korrelation zwischen Ton-Anteil und C_{org} -Konzentration, gefolgt von Sand-Anteil versus C_{org} -Konzentration mit einer geringen negativen Korrelation $r=-0,41$ (Tabelle 29). Der Schluff-Anteil und die C_{org} -Konzentration weisen nur eine sehr geringe Korrelation von $r=0,11$ auf.

Tabelle 29: Korrelation zwischen Sand-/Schluff-/Ton-Anteil und C_{org} -Konzentration, $n=15$

	Sand - C_{org}	Schluff - C_{org}	Ton - C_{org}
Korrelationskoeffizient r	-0,41	0,11	0,60
Signifikanz	0,13	0,70	0,02

5.8.2 Korrelation Bodenart – Wassergehalt pF-Kurve

Die Textur hat auch Einfluss auf den Wassergehalt bei verschiedenen Saugspannungen, wie in Tabelle 30 ersichtlich ist. Im niedrigen Saugspannungsbereich (10 hPa) haben Sand-, Schluff- und Tonanteil noch keinen Einfluss auf den Wassergehalt. Ab 100 hPa Saugspannung gibt es zwischen Wassergehalt und Tonanteil eine mittlere positive und zwischen Wassergehalt und Sandanteil eine hohe negative Korrelation. Die Korrelation zwischen Sand- bzw. Tonanteil und Wassergehalt wird mit steigender Saugspannung immer deutlicher, nur bei 15000 hPa sinkt die Korrelation wieder. Der Schluffanteil zeigt bei 100 hPa eine mittlere Korrelation mit dem Wassergehalt, welche mit zunehmender Saugspannung kontinuierlich absinkt.

Tabelle 30: Korrelation zwischen Bodenart und Wassergehalt (WG) bei verschiedenen Saugspannungen, n=15

	Sandanteil		Tonanteil		Schluffanteil	
	r	Sign.	r	Sign.	r	Sign.
WG 10 hPa	0,04	0,90	-0,03	0,92	-0,03	0,92
WG 100 hPa	-0,72	0,00	0,57	0,03	0,63	0,01
WG 300 hPa	-0,82	0,00	0,79	0,00	0,58	0,03
WG 800 hPa	-0,76	0,00	0,80	0,00	0,48	0,07
WG 3000 hPa	-0,78	0,00	0,86	0,00	0,46	0,09
WG 15000 hPa	-0,57	0,03	0,76	0,00	0,21	0,46

5.8.3 Korrelation C_{org} -Konzentration – Wassergehalt pF-Kurve

Ein Zusammenhang besteht auch zwischen der C_{org} -Konzentration und dem Wassergehalt bei verschiedenen Sättigungsgraden. Bei niedriger Saugspannung (10 hPa) besteht ähnlich wie beim Zusammenhang Tonanteil – Wassergehalt eine sehr geringe negative Korrelation (-0,19). Ab einer Saugspannung von 100 hPa ist die Korrelation positiv und der Korrelationskoeffizient steigt mit steigender Saugspannung kontinuierlich an. Bei 100 hPa gibt es eine geringe, von 300 bis 800 hPa eine mittlere und von 3000 bis 15000 hPa eine hohe Korrelation zwischen C_{org} -Konzentration und Wassergehalt. In Abbildung 55 sind die Scatterplots für den Zusammenhang C_{org} -Konzentration – Wassergehalt bei 800 bis 15000 hPa ersichtlich.

Tabelle 31: Korrelation zwischen C_{org} -Konzentration und Wassergehalt (WG) bei verschiedenen Saugspannungen, n=15

	r	Signifikanz
C_{org} – WG 10 hPa	-0,19	0,49
C_{org} – WG 100 hPa	0,33	0,23
C_{org} – WG 300 hPa	0,64	0,01
C_{org} – WG 800 hPa	0,70	0,00
C_{org} – WG 3000 hPa	0,75	0,00
C_{org} – WG 15000 hPa	0,85	0,00

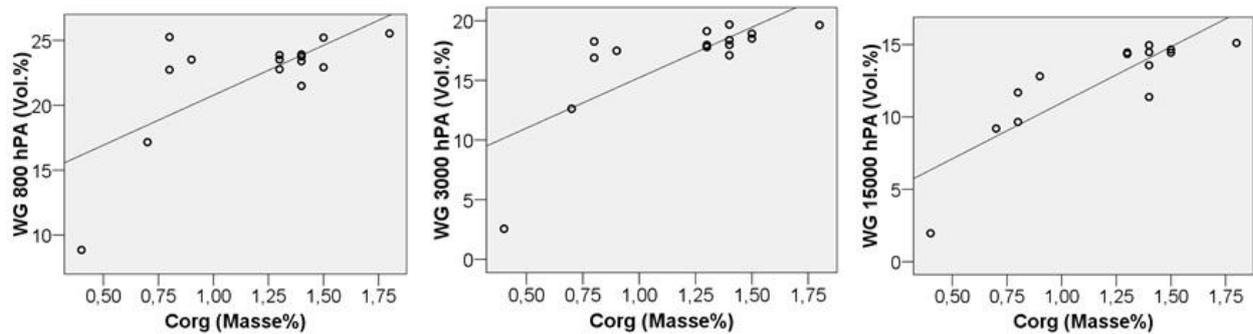


Abbildung 55: Scatterplots des Zusammenhangs C_{org} -Konzentration – Wassergehalt (WG) bei 800, 3000, 15000 hPa

5.8.4 Korrelation C_{org} -Konzentration – Dichte

Die Überprüfung des Zusammenhanges von C_{org} -Konzentration und Dichte ergibt ein $r=0,49$ (Signifikanz 0,06), diese beiden Parameter sind somit mittelstark korreliert.

6 Diskussion

6.1 Rohdichte trocken

Beim Statusvergleich 2012 hat die Variante Frässaat in den Bereichen 2-7 und 32-37 cm eine statistisch signifikant geringere Dichte als die beiden anderen Varianten. Die geringere Dichte bei der Variante Frässaat im Bereich 2-7 cm steht wahrscheinlich in Zusammenhang mit der in diesem Horizont erhöhten C_{org} -Konzentration. In den Horizonten 10-15, 15-20 und 52-57 cm hingegen weist die Variante Pflug die geringste Dichte auf, was in den Bereichen 15-20 und 52-57 cm auch signifikant bestätigt wird.

D'Haene et al. (2008) stellen in ihrer Arbeit über verschiedene Bodenbearbeitungsversuche in Belgien eine verringerte Dichte im Horizont 5-10 cm bei reduzierter Bearbeitung im Vergleich zu konventioneller Bearbeitung fest und argumentieren diese Differenz mit der erhöhten C_{org} -Konzentration bei reduzierter Bearbeitung. Die Daten aus der Studie von Kahlon et al. (2013) über ein Langzeitexperiment von 21 Jahren bestätigen ebenfalls die Reduzierung der Dichte im Oberboden durch eine Verringerung der Bearbeitungsintensität, wobei die Dichte der No-till Variante bei verschiedenen Strohmulchraten (0 / 8 / 16 t pro Hektar und Jahr) immer geringer ist als bei der Pflugvariante – und dies nicht nur im Bereich 0-10 cm, sondern auch im Horizont 10-20 cm.

Der Review von Langzeitexperimenten auf fünf Standorten in Deutschland (Tebrügge & Düring, 1999) kommt zum Ergebnis, dass durch die Reduzierung der Bearbeitungsintensität lediglich die Dichte in der oberflächennahen Schicht 0-3 cm verringert wird, während der Oberboden generell bei Direktsaat eine höhere Dichte als die Pflugvariante aufweist. Im Bereich der Pflugsohle (25-30 cm) wurde analog zu den Ergebnissen dieser Arbeit eine Verdichtung der gepflügten Variante im Vergleich zur Direktsaat festgestellt.

In der Literatur finden sich auch abweichende Ergebnisse. Deen & Kataki (2003) verglichen die Wirkung von Pflug, Grubber und Direktsaat in einem 25-jährigen Versuch über den gesamten Horizont 0-60 cm, wobei sie nur einen signifikanten Unterschied fanden: Die Dichte war bei der Direktsaat im Bereich 5-10 cm signifikant höher als bei der Pflugbearbeitung. Ebenfalls eine erhöhte Dichte bei der No-till im Vergleich zur gepflügten Variante in den Horizonten 0-7,5 cm und 7,5 -15 cm stellen Singh et al. (2006) in ihrer Arbeit über einen 6-jährigen Versuch in Kanada fest. Hermle et al. (2008) stellen beim Vergleich der Dichte in vier Stufen zwischen 0 und 40 cm Tiefe über die Varianten Pflug / seichte

Bearbeitung / Direktsaat nur im Bereich 10-20 cm einen signifikanten Unterschied fest: hier ist die Dichte bei der Pflugvariante signifikant höher als bei den anderen Varianten. Ein Langzeitversuch in der Schweiz zu den Varianten Pflug, reduzierte Bearbeitung und No-till zeigt in keinem der untersuchten Horizonte (5-8 cm, 15-18 cm, 25-28 cm) signifikante Dichteunterschiede (Anken et al., 2004).

Auffällig ist in der vorliegenden Arbeit der gegenläufige Horizontverlauf der Variante Pflug im Vergleich zu den anderen Varianten: Während die Dichte bei den Varianten Frässaat und Grubber von der Oberfläche bis 15 cm Tiefe erst zunimmt und im Bereich darunter wieder abnimmt, sinkt die Dichte bei der Variante Pflug von der Oberfläche bis 20 cm Tiefe, um im darunterliegenden Bereich 32-37 cm wieder anzusteigen (Hinweis auf eine Pflugsohle). Hill (1990) kam in seinen Untersuchungen an drei Standorten in den USA (11 bzw. 12 Jahre Versuchsdauer) zu einem ähnlichen Ergebnis: Bei den Direktsaat-Varianten stieg die Dichte von der Bodenoberfläche bis in eine Tiefe von 17,25 cm an, während sie bei der Pflugvarianten annähernd gleich blieb oder abnahm. Rasmussen (1999) stellt in seinem Review fest, dass es auch bei pflugloser Bestellung zu einer Verdichtung des Bodens im Bereich unterhalb des Bearbeitungshorizontes kommt. Dies ist eine gute Erklärung für die in der vorliegenden Arbeit festgestellte Erhöhung der Dichte bei den Varianten Frässaat und Grubber im Bereich unterhalb des Bearbeitungshorizontes (10-15 cm).

Kaum statistisch signifikante Veränderungen gibt es beim Vergleich der Dichte 2001-2012 im relevanten Bereich bis 37 cm Tiefe: Bei der Variante Pflug ist die Dichte in allen Tiefenstufen unverändert, bei der Variante Frässaat gibt es nur im Horizont 32-37 cm im Jahr 2012 eine Erhöhung der Dichte im Vergleich zu 2001. Die meisten Veränderungen fanden bei der Variante Grubber statt: Hier kam es in den Horizonten 2-7 und 32-37 cm zu einer Dichtereduktion und im Bereich 10-15 cm zu einer Erhöhung der Dichte im Jahr 2012.

6.2 Organischer Kohlenstoff

Die Auswertung der erhobenen Daten in Fuchsenbigl zeigt, dass die C_{org} -Konzentration im Jahr 2012 nach 24 Jahren kontinuierlicher Bodenbearbeitung im oberen Bereich (0-15 cm) bei der Variante Frässaat höher als bei den Varianten Grubber und Pflug ist. Im Bereich

unterhalb 15 cm ist die C_{org} -Konzentration allerdings bei der Variante Pflug am höchsten. Dieser Trend der erhöhten C_{org} -Konzentration im Oberboden durch reduzierte Bodenbearbeitung stimmt mit den Ergebnissen vieler anderer Autoren überein.

Bei einem Langzeitversuch von Hermle et al. (2008) in der Schweiz war die C_{org} -Konzentration sowohl bei Direktsaat als auch bei reduzierter Bearbeitung im Bereich 0-10 cm signifikant höher als bei Pflugbearbeitung, während es im Horizont 10-20 cm keine signifikanten Unterschiede und im Bereich 20-30 cm wiederum eine höhere C_{org} -Konzentration bei der Pflugvariante im Vergleich zu Direktsaat und reduzierter Bearbeitung gab. Sasal et al. (2006) stellten bei drei verschiedenen Versuchen (8, 13, und 20 Jahre Dauer) eine Erhöhung der C_{org} -Konzentration im Oberboden 0-5 cm bei der Direktsaat im Vergleich zur Pflugbearbeitung fest. Ebenfalls eine Erhöhung der C_{org} -Konzentration durch Direktsaat im Vergleich zu Pflugbestellung im Bereich 0-5 cm, allerdings keine Unterschiede im Bereich von 5 bis 55 cm Tiefe konnten Kay & VandenBygaart (2002) bei einem 22-jährigen Versuch in Ontario feststellen. Die Evaluierung von Deen & Kataki (2003) eines 25-jährigen Versuches in Kanada führte zu folgendem Ergebnis: Die C_{org} -Konzentration war in den Bereichen 0-5 cm und 40-60 cm bei der Direktsaat signifikant höher als bei Pflugbearbeitung. Die Zunahme der C_{org} -Konzentration im Oberboden bei reduzierter Bearbeitung bzw. Direktsaat ist durch den höheren Verbleib von Biomasse an der Oberfläche / im oberflächlichen Bodenbereich bedingt, während bei intensiver Bodenbearbeitung die Pflanzenrückstände in tiefere Bodenhorizonte eingearbeitet werden (Deen & Kataki, 2003; Tebrügge & Düring, 1999). Andere Studien weisen in Bezug auf die C_{org} -Konzentration im Oberboden gegensätzliche Ergebnisse auf. So verglichen Chatterjee und Lal (2009) Direktsaat und Pflugbearbeitung an fünf verschiedenen Standorten in den USA, wobei es im Horizont 0-5 cm inkonsistente Ergebnisse gab: An drei Standorten war die C_{org} -Konzentration bei der Direktsaat signifikant höher, während sie an zwei anderen Standorten bei der Pflugvariante höher war.

Beim Vergleich 2001-2012 zeigt die Variante Frässaat im Oberboden im Gegensatz zu den anderen Varianten noch immer den Trend einer Erhöhung der C_{org} -Konzentration, obwohl der Versuch zuvor bereits seit 13 Jahren konstant betrieben wurde.

Wie die Arbeiten von mehreren Autoren zeigen, ist es für den Vergleich der C_{org} -Speicherkapazität von großer Bedeutung, nicht nur die C_{org} -Konzentration im (Ober)Boden

zu betrachten. Da bei den intensiv bearbeiteten Böden der Kohlenstoff oft in tieferen Bodenschichten gespeichert ist, muss für eine eindeutige Aussage die gesamte Masse an gespeichertem C_{org} über das Profil betrachtet werden. Etwaige durch verschiedene Dichte bedingte Unterschiede können durch die Verwendung einer sog. „Equivalent mass basis“ (Zugrundelegen einer Gesamtbodenmasse pro definierter Tiefe) ausgeblendet werden (Deen & Kataki, 2003; Powlson et al., 2011; Schjonning & Thomsen, 2013; Hermle et al., 2008). Daher wurde in dieser Arbeit auch der kumulierte C_{org} -Vorrat untersucht, wobei die im Ergebnisteil präsentierten Werte anhand der tatsächlichen Dichte berechnet wurden. Der Tiefenverlauf des kumulierten C_{org} -Vorrates ist bei allen Varianten sehr ähnlich, die Unterschiede sind gering. Im Bereich 0-29 cm ist der kumulierte C_{org} -Vorrat bei der Variante Frässaat am höchsten und bei der Variante Pflug am geringsten. Betrachtet man das Profil bis 43 cm bzw. 57 cm Tiefe, so zeigt die Variante Pflug den höchsten kumulierten C_{org} -Vorrat. Eine nachträgliche Berechnung anhand der Äquivalenzbodenmasse gemäß Schjonning & Thomsen (2013) für den kumulierten C_{org} -Vorrat bis 29 cm bzw. 57 cm Tiefe ergab die gleichen Ergebnisse wie bei der Berechnung ohne Äquivalenzbasis.

Der Langzeitversuch von Hermle et al. (2008) zeigt beim Vergleich des summierten C_{org} -Vorrats je Hektar bis 40 cm Tiefe (Äquivalenzbodenmasse) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten Pflugbearbeitung, reduzierte Bearbeitung und Direktsaat. Ebenfalls keinen signifikanten Einfluss von seichter (12-15 cm) und tiefer (24-29 cm) Bodenbearbeitung auf den gesamten C_{org} -Speicher im A_p -Horizont konnten Etana et al. (1999) bei fünf Langzeitversuchen in Schweden feststellen (basierend auf Äquivalenzbodenmasse). In der Arbeit von Chatterjee und Lal (2009) gab es beim Vergleich Direktsaat – Pflugbearbeitung an fünf Standorten in den USA zwar Unterschiede im gesamten C_{org} -Vorrat bis 60 cm Tiefe (an drei Standorten bei Direktsaat, an zwei Standorten bei Pflugbearbeitung höher), allerdings waren diese Unterschiede an keinem Standort signifikant.

Der Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrats 2001-2012 zeigt bei der Variante Frässaat über den gesamten Horizont eine leichte Erhöhung im Jahr 2012, während die C_{org} -Vorräte bei den Varianten Grubber und Pflug sehr ähnlich oder geringfügig geringer als im Jahr 2001 sind.

6.3 pF-Kurve

Im Bereich 2-7 cm ist der Verlauf der pF-Kurven aller Varianten sehr ähnlich, dennoch gibt es statistisch signifikante Unterschiede: Im niedrigen Saugspannungsbereich bei 30 hPa haben die Varianten Grubber und Pflug bzw. bei 60 hPa nur die Variante Pflug mehr Wasser gespeichert als die Variante Frässaat. Im höheren Saugspannungsbereich zwischen 300 und 3000 hPa hat hingegen die Variante Frässaat einen höheren Wassergehalt als die Variante Pflug. In einem 14-jährigen Feldversuch in Ohio war der Wassergehalt bei der No-till Variante im Bereich 0-10 cm über den gesamten Saugspannungsbereich zwischen 0 und 15000 hPa höher als bei der Pflugvariante, wobei dies für 30 bis 3000 hPa statistisch signifikant bestätigt wurde (Abid & Lal, 2009). Bei der Auswertung eines 4-jährigen Versuches in Indien kamen Bhattacharyya et al. (2006) zu dem Ergebnis, dass die No-till Variante in den Horizonten 0-7,5 und 7,5-15 cm bei gegebenem Matrixpotenzial immer signifikant mehr Wasser speichern konnte als die reduzierte und die Pflugbearbeitung. D'Haene et al. (2008) untersuchten verschiedene Bodenbearbeitungsversuche in Belgien, wobei der Wassergehalt im Bereich 0-5 cm bei Wassersättigung bei der reduzierten Bearbeitung tendenziell höher war als bei konventioneller Bearbeitung.

Im darunterliegenden Horizont 10-15 cm zeigt sich in der vorliegenden Arbeit folgendes Bild: Bis zu einer Saugspannung von 100 hPa hat die Variante Pflug den signifikant höchsten Wassergehalt aller Varianten, im höheren Saugspannungsbereich gibt es hingegen keine signifikanten Unterschiede.

Auch im Bereich 15-20 cm kann die Variante Pflug im niedrigen Saugspannungsbereich von 0,1 bis 30 hPa (bei 10 hPa gemeinsam mit der Variante Frässaat) mehr Wasser speichern als die Variante Grubber. Allerdings ist bei 100 bis 300 hPa der Wassergehalt bei der Variante Grubber signifikant höher als bei der Variante Pflug. Zwischen 800 und 15000 hPa sind die Varianten Frässaat und Grubber (bei 3000 hPa nur die Variante Frässaat) bessere Wasserspeicher als die Variante Pflug. Aura (1999) untersuchte einen Langzeitversuch mit den Varianten Pflugbearbeitung und seichte Bearbeitung (6 cm) in Finnland, wobei er im Horizont 0-20 cm zu folgendem Ergebnis kam: Der Wassergehalt bei 0, 10 und 100 hPa ist bei der Pflugvariante höher als bei der seichten Bearbeitung, allerdings nicht signifikant. Bei 15000 hPa speichern beide Varianten nahezu gleich viel Wasser.

Die Untersuchung des Wassergehaltes im Bereich 32-37 cm Tiefe zeigt in der vorliegenden Arbeit ein differenziertes Bild: bei 10 bis 30 hPa gilt Frässaat > Pflug (bzw. Grubber bei 30 hPa), bei 100 hPa gilt Grubber > Pflug und bei 15000 hPa haben die Varianten Frässaat und Pflug mehr Wasser als die Variante Grubber gespeichert.

Sehr unterschiedliche ρF -Kurvenverläufe gibt es im Horizont 52-57 cm, wo allerdings auch die Textur die Varianten sehr stark variiert. Fast über den gesamten Saugspannungsbereich gilt folgende Reihung für den Wassergehalt: Pflug > Frässaat > Grubber.

Die nutzbare Feldkapazität (60 – 15000 hPa) ist bei der Variante Pflug in den obersten drei Horizonten (2-7, 10-15 und 15-20 cm) höher als bei den anderen Varianten. Im Bereich darunter weist die Variante Grubber die höchste nFK auf. Beim Vergleich der kumulierten nFK bis 60 cm Tiefe haben die Varianten Pflug und Grubber mit 131 bzw. 130 mm eine höhere Wasserspeicherkapazität als die Variante Frässaat mit 119 mm. Abid und Lal (2009) konnten in einem Langzeitversuch in den USA im Bereich 0-10 cm keine signifikanten Unterschiede bei der pflanzenverfügbar gespeicherten Wassermenge (300 – 15000 hPa) feststellen. Auch D’Haene et al. (2008) konnten beim Vergleich von konventioneller und reduzierter Bearbeitung auf 18 Feldern keine klaren Unterschiede bei der Menge an pflanzenverfügbarem Wasser in den Bereichen 5-10 cm und 25-30 cm feststellen.

Beim Vergleich der Wassergehalte 2001-2012 ist ein Trend erkennbar, dass im niedrigen Saugspannungsbereich über alle Varianten hinweg im Jahr 2012 höhere Wassergehalte als im Jahr 2001 gemessen wurde, während es im höheren Saugspannungsbereich generell eine Reduktion des Wassergehaltes bei gegebener Saugspannung gab. Wodurch es in den 11 Jahren zu dieser Veränderung kam, konnte nicht festgestellt werden.

6.4 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit K_u

Im obersten Horizont (2-7 cm) zeigt sich eine deutliche Differenzierung der verschiedenen Varianten. Hier sind die K_u -Werte der Variante Frässaat im Bereich hoher Wassersättigung bis 100 hPa deutlich höher als jene der beiden anderen Varianten (bei 0,1 hPa: Frässaat ca.

3,0 m/d und Grubber bzw. Pflug ca. 0,1 m/d). Zwischen 100 und 1000 hPa verlaufen die Kurven sehr ähnlich, während im Bereich über 1000 hPa gilt: K_u Grubber > K_u Pflug > K_u Frässaat.

Im Horizont 10-15 cm ist K_u im hohen Sättigungsbereich bei der Variante Frässaat ebenfalls wieder höher als bei den Varianten Grubber und Pflug, allerdings nur bis 10 hPa. Im Bereich 10 bis 100 hPa ist K_u bei den Varianten Frässaat und Pflug höher als bei der Variante Grubber, bei weiterer Entwässerung sind die K_u -Werte aller Varianten sehr ähnlich. Die Tatsache, dass die Variante Frässaat im Oberboden bis 15 cm im Bereich hoher Wassersättigung eine höhere K_u aufweist, deutet darauf hin, dass es in diesem Horizont eine bessere Porenkontinuität als bei den anderen Varianten gibt.

Bei den K_u -Kurven im Horizont 15-20 cm gibt es nur im Bereich zwischen 1 und 100 hPa Unterschiede, wobei die K_u -Werte der Variante Pflug über den Werten der beiden anderen Varianten liegen.

Im darunterliegenden Horizont 32-37 cm zeigen sich stärkere Abweichungen, wobei bis zu einer Saugspannung von 200 hPa gilt: K_u Grubber > K_u Frässaat > K_u Pflug; im höheren Saugspannungsbereich verläuft die K_u -Kurve der Varianten Frässaat und Grubber gleich und liegt höher als jene der Variante Pflug. Die über den gesamten Saugspannungsbereich geringeren K_u -Werte der Variante Pflug im Bereich 32-37 cm könnten ein Hinweis auf die Pflugsohle sein.

Bhattacharyya et al. (2006) untersuchten in ihrer Arbeit einen 4-jährigen Bodenbearbeitungsversuch in Indien, wobei sie K_u im Saugspannungsbereich bis 4000 hPa erhoben: Im Horizont 0-7,5 cm war K_u der No-till Variante im Saugspannungsbereich 20-40 hPa höher als bei reduzierter und konventioneller Bearbeitung während im höheren Saugspannungsbereich > 100 hPa K_u bei der reduzierten Bodenbearbeitung höher war als bei den beiden anderen Varianten. Im Horizont 7,5-15 cm waren die K_u -Werte ab 40 hPa bei No-till und reduzierter Bearbeitung höher als bei der konventionellen Variante. In den darunterliegenden Horizonten 15-22,5 und 22,5-30 cm waren die K_u -Werte der Varianten

reduzierte Bearbeitung und No-till über den gesamten Saugspannungsbereich höher als bei der konventionellen Bearbeitung.

6.5 Gesättigte Wasserleitfähigkeit K_s

Im obersten Horizont 2-7 cm hat die Variante Frässaat eine signifikant höhere K_s als die Varianten Grubber und Pflug. Während es im Bereich 10-20 cm keine signifikanten Unterschiede gibt, ist K_s im Bereich 32-37 cm bei der Variante Pflug höher als bei der Variante Grubber. Im letzten Horizont 52-57 cm ist K_s ebenfalls bei der Variante Pflug höher als bei beiden anderen Varianten. Die Tatsache, dass die Variante Frässaat im obersten Bereich eine sehr starke Streuung und ein signifikant höheres K_s als die Varianten Pflug und Grubber aufweist, legt den Schluss nahe, dass die Frässaat das Entstehen von biogen bedingten Sekundärporen sowie eine bessere Porenkontinuität in der obersten Schicht begünstigt.

Kahlon et al. (2013) kamen in ihrer Arbeit über ein Langzeitexperiment in den USA zu dem Ergebnis, dass die Bodenbearbeitung einen signifikanten Einfluss auf K_s hat, wobei K_s in beiden untersuchten Horizonten 0-10 cm und 10-20 cm folgende Reihung aufwies: No-till > reduzierte Bearbeitung > Pflugbearbeitung. Die Autoren erklären die Unterschiede damit, dass durch den Wegfall der Bodenbearbeitung eine höhere Porosität, ein besseres Aggregatgefüge, eine geringere Tortuosität sowie eine verbesserte Porenkontinuität begünstigt werden. Auf schwedischen Tonböden war K_s im Bereich 25-30 cm bei der seicht bearbeiteten Variante höher als bei der Pflugvariante, was Rasmussen (1999) auf eine bessere Porenkontinuität durch seichte Bearbeitung zurückführt. Bhattacharyya et al. (2006) untersuchten einen Bodenbearbeitungs-Kurzzeitversuch (4 Jahre) in Indien, welcher folgende Resultate zeigte: K_s war in allen untersuchten Horizonten (0-7,5 / 7,5-15 / 15-22,5 / 22,5-30 cm) in der Reihung No-till > reduzierte Bearbeitung > konventionelle Bearbeitung, wobei der Unterschied zwischen No-till und konventioneller Bearbeitung immer signifikant bestätigt wurde.

Beim Vergleich 2001-2012 gibt es auf der Variante Frässaat keine signifikanten Veränderungen, bei der Variante Grubber kam es in den Horizonten 2-7 cm, 15-20 cm und

32-37 cm zu einer Erhöhung von K_s , und auch bei der Variante Pflug waren die K_s -Werte in allen Horizonten außer 2-7 cm im Jahr 2012 signifikant höher als im Jahr 2001.

6.6 Korrelation zwischen einzelnen Parametern

Wie die Korrelationsanalysen zeigen, hat vor allem der Tonanteil ($r=0,60$) einen Einfluss auf die C_{org} -Konzentration im Boden, in geringerem Maße auch der Sandanteil ($r=-0,41$), welcher negativ mit der C_{org} -Konzentration korreliert.

Die Bodenart hat auch einen Einfluss auf den Wassergehalt bei verschiedenen Saugspannungen. Der Sandanteil korreliert negativ mit dem Wassergehalt. Die Korrelation Schluffanteil – Wassergehalt ist im Bereich 100-300 hPa mittel, im Bereich darüber ist sie gering. Der Tonanteil weist ab 100 hPa Saugspannung eine mittlere Korrelation mit dem Wassergehalt auf, welche mit zunehmender Saugspannung auf hohes Niveau steigt. Das bedeutet, dass der Anteil an Ton mit zunehmender Austrocknung des Bodens einen immer wichtigeren Faktor für das Wasserspeichervermögen des Bodens darstellt.

Sehr deutlich ist der Zusammenhang von C_{org} -Konzentration und Wassergehalt bei gegebener Saugspannung: Je höher die Saugspannung, umso höher ist der Korrelationskoeffizient für diese beiden Parameter: im Saugspannungsbereich 300 bis 800 hPa gibt es eine mittlere, im Bereich 3000 bis 15000 hPa eine hohe Korrelation zwischen C_{org} -Konzentration und Wassergehalt. Somit steigt die Bedeutung der C_{org} -Konzentration für die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens – ähnlich wie die des Tonanteils – mit zunehmender Austrocknung des Bodens.

Der Zusammenhang von C_{org} -Konzentration und Dichte ist in dieser Arbeit mit einem $r=0,49$ mittelstark ausgeprägt.

7 Zusammenfassung

Die Hypothese, dass langjährige Bodenbearbeitung in verschiedenen Intensitätsstufen an einem möglichst homogenen Bodenstandort zu einer Differenzierung der bodenphysikalischen Parameter bzw. der gespeicherten C_{org} -Konzentrationen/Vorräte führt, kann aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden.

Die C_{org} -Konzentration im Bereich 0-15 cm ist bei der Variante Frässaat deutlich höher als bei den Varianten Grubber und Pflug, im Bereich darunter hat allerdings die Variante Pflug die höchste C_{org} -Konzentration. Beim Vergleich 2001-2012 zeigt die Variante Frässaat im Oberboden im Gegensatz zu den anderen Varianten noch immer den Trend einer Erhöhung der C_{org} -Konzentration, obwohl der Versuch zuvor bereits seit 13 Jahren konstant betrieben wurde.

Der kumulierte C_{org} -Vorrat ist bei allen Varianten sehr ähnlich. im Horizont 0-29 cm ist der C_{org} -Vorrat bei der Variante Frässaat am höchsten, im Horizont 0-43 bzw. 0-57 cm hat die Variante Pflug den größten C_{org} -Speicher.

Die Dichte ist bei der Variante Frässaat in den Bereichen 2-7 cm und 32-37 cm signifikant geringer als bei den Varianten Grubber und Pflug, im Gegensatz dazu ist sie im Horizont 15-20 cm bei der Variante Pflug signifikant geringer als bei den anderen Varianten. Dies deutet darauf hin, dass es nicht nur beim Pflug sondern auch bei reduzierter Bodenbearbeitung in Analogie zu den Ergebnissen von Rasmussen (1999) zur Ausbildung einer Bodenverdichtung unmittelbar unterhalb des bearbeiteten Horizontes kommt.

Die Auswertung der pF-Kurven zeigt folgenden Trend: Die Variante Pflug kann in den Bereichen 2-7, 10-15 und 15-20 cm im niedrigen Saugspannungsbereich mehr Wasser speichern als die Variante Frässaat, während die Variante Frässaat in den Horizonten 2-7 und 15-20 cm bei höheren Saugspannungen eine größere Wassermenge als die Variante Pflug speichern kann.

Die kumulierte nFK bis 60 cm Tiefe ist bei den Varianten Pflug und Grubber höher als bei der Variante Frässaat. Beim Vergleich der Wassergehalte 2001-2012 ergibt sich bei allen Varianten der Trend, dass die Wassergehalte bei niedrigen pF-Werten im Jahr 2012 tendenziell höher sind, während sie bei hohen pF-Werten tendenziell niedriger als im Jahr 2001 sind.

Die Variante Frässaat hat im Oberboden bis 15 cm bei hoher Wassersättigung die höchste K_u . Mit zunehmender Austrocknung hat die Variante Grubber im Horizont 2-7 cm die höchste K_u .

Im Horizont 32-37 cm sind sowohl die K_u -Werte der Variante Frässaat als auch der Variante Grubber über den gesamten Saugspannungsbereich höher als bei der Variante Pflug.

K_s ist im obersten Horizont (2-7 cm) bei der Variante Frässaat signifikant höher als bei den anderen Varianten, im Unterboden (32-57 cm) hat hingegen die Variante Pflug die höchste K_s . Im Vergleich mit dem Jahr 2001 waren die K_s -Werte der Varianten Grubber und Pflug im Jahr 2012 tendenziell höher.

Die C_{org} -Konzentration korreliert positiv mit dem Tonanteil ($r=0,60$) und negativ mit dem Sandanteil ($r=-0,41$). Der Zusammenhang zwischen C_{org} -Konzentration und Dichte ist mit einem $r=0,49$ mittelstark ausgeprägt. Die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Wassergehalt bei gegebener Saugspannung und den einzelnen Texturfractionen ergibt mittlere bis hohe Korrelationskoeffizienten, wobei der Tonanteil mit zunehmender Austrocknung des Bodens eine immer wichtigere Rolle für die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens spielt. Die C_{org} -Konzentration ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für das Wasserspeichervermögen eines Bodens, wobei auch hier die Bedeutung – wie beim Tonanteil – mit zunehmender Austrocknung kontinuierlich steigt.

Leider konnten die Ergebnisse der C_{org} -Untersuchung und der K_u -Bestimmung aufgrund fehlender Wiederholungen nicht statistisch abgesichert werden. Es wäre wünschenswert, dies bei zukünftigen Untersuchungen an diesem Standort nachzuholen.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodenbearbeitungssysteme und verwendete Geräte (Buchner & Köller, 1990)	5
Abbildung 2: Kartenausschnitt mit Versuchsstandort Fuchsenbigl (Google Maps, 2013)	10
Abbildung 3: Versuchsplan des Bodenbearbeitungsversuches in Fuchsenbigl	11
Abbildung 4: Temperaturdiagramm des Standortes Fuchsenbigl, langjährige Mittelwerte 1971-2000; t=Tagesmittel, mtmax=Mittel aller tägl. Maxima, mtmin=Mittel aller tägl. Minima, tmax=absolutes Maximum, tmin=absolutes Minimum (ZAMG, 2013)	12
Abbildung 5: Niederschlagsdiagramm des Standortes Fuchsenbigl, langjährige Mittelwerte 1971-2000; rsum=Niederschlagssumme, rmax=größter Tagesniederschlag, n1=Anzahl Tage mit NS>1 mm, n10=Anzahl Tage mit NS>10 mm (ZAMG, 2013)	12
Abbildung 6: Auszug eBOD-Karte mit Einfärbung der verschiedenen Bodenarten, Versuchsfeld schwarz eingerahmt (verändert nach BFW, 2013)	13
Abbildung 7: Links: Scheibler-Reaktionsgefäße mit Bodenproben und Salzsäure befüllt; Rechts: Scheibler Apparatur des BAW Petzenkirchen	17
Abbildung 8: Österreichisches Texturdreieck (ÖNORM L 1050, 2004)	18
Abbildung 9: Homogenisieren des Bodenmaterials in den Standzylindern	19
Abbildung 10: pF-Kurven für verschiedene Böden (Scheffer, et al., 2010)	23
Abbildung 11: Links: Häufige Messwerte von K_s in Abhängigkeit von der Textur (Hartge & Horn, 2009); Rechts: Messanordnung des BAW Petzenkirchen für die Bestimmung von K_s	25
Abbildung 12: Verlauf der ungesättigten Wasserleitfähigkeit verschiedener Böden in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial (Scheffer, et al., 2010)	26
Abbildung 13: HYPROP-Messkopf samt Saugkerzen und vorbereitete Zylinderprobe	27
Abbildung 14: Ergebnis der Vorerhebung 2012: die Zahlen geben den Sandanteil in der Tiefenstufe 0-5 cm in % an, die gewählten Probenahmestellen sind mit gelben Kreisen markiert	29
Abbildung 15: Sandanteil der Profile für den Statusvergleich 2012	37
Abbildung 16: Schluffanteil der Profile für den Statusvergleich 2012	38
Abbildung 17: Tonanteil der Profile für den Statusvergleich 2012	38
Abbildung 18: Sandanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012	40
Abbildung 19: Schluffanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012	40
Abbildung 20: Tonanteil der Vergleichsprofile im Jahr 2001 und 2012	40
Abbildung 21: Karbonatanteil der Profile für den Statusvergleich 2012	41
Abbildung 22: Karbonatanteil der Profile für den Vergleich 2001-2012	42
Abbildung 23: Tiefenverlauf der Dichte im Jahr 2012	43
Abbildung 24: Vergleich des Porenanteils aller Varianten	44
Abbildung 25: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Frässaat	45

Abbildung 26: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Grubber _____	45
Abbildung 27: Vergleich der Dichte 2001-2012 der Variante Pflug _____	46
Abbildung 28: C_{org} -Konzentration der Profilgruben für den Statusvergleich 2012 _____	48
Abbildung 29: C_{org} -Konzentration aller Profilgruben im Jahr 2012 _____	48
Abbildung 30: C_{org} -Vorrat kumuliert bis 57 cm Tiefe _____	49
Abbildung 31: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Frässaat _____	50
Abbildung 32: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Grubber _____	50
Abbildung 33: Vergleich C_{org} -Konzentration 2001-2012 der Variante Pflug _____	51
Abbildung 34: Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 der Variante Frässaat _____	52
Abbildung 35: Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 der Variante Grubber _____	52
Abbildung 36: Vergleich des kumulierten C_{org} -Vorrates 2001-2012 der Variante Pflug _____	53
Abbildung 37: pF-Kurven des Bereichs 2-7 cm im Vergleich aller Varianten _____	54
Abbildung 38: pF-Kurven des Bereichs 10-15 cm im Vergleich aller Varianten _____	55
Abbildung 39: pF-Kurven des Bereichs 15-20 cm im Vergleich aller Varianten _____	56
Abbildung 40: pF-Kurven des Bereichs 32-37 cm im Vergleich aller Varianten _____	57
Abbildung 41: pF-Kurven des Bereichs 52-57 cm im Vergleich aller Varianten _____	58
Abbildung 42: Vergleich der kumulierten nutzbaren Feldkapazität (60-15000 hPa) bis 60 cm Tiefe _____	59
Abbildung 43: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial, Variantenvergleich 2-7 cm Tiefe _____	62
Abbildung 44: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial, Variantenvergleich 10-15 cm Tiefe _____	63
Abbildung 45: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial, Variantenvergleich 15-20 cm Tiefe _____	63
Abbildung 46: K_u in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial, Variantenvergleich 32-37 cm Tiefe _____	64
Abbildung 47: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 2-7 cm _____	65
Abbildung 48: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 10-15 cm _____	65
Abbildung 49: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 15-20 cm _____	66
Abbildung 50: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 32-37 cm _____	66
Abbildung 51: Variantenvergleich von K_s (m/d) der Tiefenstufe 52-57 cm _____	67
Abbildung 52: Boxplots für $\log K_s$ im Vergleich 2001-2012 der Variante Frässaat _____	68
Abbildung 53: Boxplots für $\log K_s$ im Vergleich 2001-2012 der Variante Grubber _____	69
Abbildung 54: Boxplots für $\log K_s$ im Vergleich 2001-2012 der Variante Pflug _____	69
Abbildung 55: Scatterplots des Zusammenhangs C_{org} -Konzentration – Wassergehalt (WG) bei 800, 3000, 15000 hPa _____	72

9 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Fruchtart und Düngung auf der Versuchsfläche Fuchsenbigl für die Jahre 2000-2012</i>	13
<i>Tabelle 2: Erträge des Bodenbearbeitungsversuches Fuchsenbigl 1998 bis 2005; unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$, Tukey (verändert nach Spiegel et al., 2007)</i>	14
<i>Tabelle 3: Korngrößenklassen des Feinbodens (ÖNORM L 1050, 2004)</i>	17
<i>Tabelle 4: Dichte verschiedener Böden (verändert nach Kuntze et al., 1994)</i>	19
<i>Tabelle 5: Einteilung der Poren nach dem Äquivalentdurchmesser (verändert nach Müller, 1980)</i>	20
<i>Tabelle 6: Interpretation der Korrelationskoeffizienten (Bühl, 2010)</i>	28
<i>Tabelle 7: Ergebnisse der Texturanalyse der Profile für den Statusvergleich im Jahr 2012</i>	37
<i>Tabelle 8: Textur der Profile im Jahr 2001 sowie der Vergleichsprofile im Jahr 2012, BA=Bodenart</i>	39
<i>Tabelle 9: Karbonatanteil der beprobten Profile in Masse%</i>	41
<i>Tabelle 10: Mittelwerte (g/cm^3) und Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey-Test für die Dichte, $n=6$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	43
<i>Tabelle 11: Mittelwerte des Porenanteils (Vol.-%) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n=6$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i> ..	44
<i>Tabelle 12: Dichte-Mittelwerte (g/cm^3) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n_{2012}=6 / n_{2001}=3$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i> ...	46
<i>Tabelle 13: im Jahr 2012 gemessene C_{org}-Konzentrationen in Masse%</i>	47
<i>Tabelle 14: C_{org}-Vorrat kumuliert über alle Tiefenstufen (t/ha)</i>	49
<i>Tabelle 15: C_{org}-Konzentrationen im Vergleich 2001 - 2012 (Masse%)</i>	50
<i>Tabelle 16: Vergleich der kumulierten C_{org}-Vorräte (t/ha) 2001-2012</i>	52
<i>Tabelle 17: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 2-7 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n=5$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	54
<i>Tabelle 18: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 10-15 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n=5$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	55
<i>Tabelle 19: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 15-20 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n=5$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	56
<i>Tabelle 20: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 32-37 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, $n=5$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	57

<i>Tabelle 21: Wassergehalt (Mittelwerte, Vol.-%) im Bereich 52-57 cm sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 22: nFK (Mittelwerte, Vol.-%) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	<i>59</i>
<i>Tabelle 23: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 2-7 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p < 0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012</i>	<i>60</i>
<i>Tabelle 24: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 10-15 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p < 0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012</i>	<i>60</i>
<i>Tabelle 25: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 15-20 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p < 0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 26: Vergleich des Wassergehaltes (Mittelwerte, Vol.-%) 2001-2012 im Bereich 32-37 cm sowie Ergebnisse des T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, *=signifikanter/**=hoch signifikanter Unterschied auf dem Level $p < 0,05$; grün=Steigerung/blau=Verringerung des Wassergehaltes im Jahr 2012</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 27: K_s (Mediane, m/d) sowie Ergebnisse von ANOVA und Post-hoc Tukey Test, n=5, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 28: K_s 2001 und 2012 (Mediane, m/d) sowie Ergebnisse der T-Tests, $n_{2012}=5$, $n_{2001}=3$, unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede auf dem Level $p < 0,05$</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 29: Korrelation zwischen Sand-/Schluff-/Ton-Anteil und C_{org}-Konzentration, n=15</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 30: Korrelation zwischen Bodenart und Wassergehalt (WG) bei verschiedenen Saugspannungen, n=15.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 31: Korrelation zwischen C_{org}-Konzentration und Wassergehalt (WG) bei verschiedenen Saugspannungen, n=15.....</i>	<i>72</i>

10 Literaturverzeichnis

- Abid, M., & Lal, R. (2009). Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil & Tillage Research*(103), S. 364-372.
- Anken, P., Weiskopf, P., Zihlmann, U., Forrer, H., Jansa, J., & Perhacova, K. (2004). Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research*(78), S. 171-183.
- Aura, E. (1999). Effects of shallow tillage on physical properties of clay soil and growth of spring cereals in dry and moist summers in southern Finland. *Soil & Tillage Research*(50), S. 169-176.
- Baker, J., Ochsner, T., Venterea, R., & Griffis, T. (2007). Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? *Agriculture Ecosystems & Environment*(118), S. 1-5.
- BFW Österreich. (2013). *eBOD Bodenkarte*. Abgerufen am 05. August 2013 von http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD
- Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., & Gupta, H. (2006). Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil & Tillage Research*(86), S. 129-140.
- Birkás, M., Jolánkai, M., Gyuricza, C., & Percze, A. (2004). Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary. *Soil & Tillage Research*(78), S. 185-196.
- Buchner, W., & Köller, K. (1990). *Integrierte Bodenbearbeitung*. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Bühl, A. (2010). *PASW 18 Einführung in die moderne Datenanalyse* (12., aktualisierte Auflage Ausg.). München: Pearson Studium.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-13-04, Karbonatbestimmung nach Scheibler.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-12-04, Humusbestimmung durch Nassoxydation.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-21-05, Korngrößenbestimmung < 2 mm - kombiniertes Nasssieb- u. Sedimentationsverfahren .

- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-31-05, Ermittlung der Druckpotenzial-Wasseranteilsbeziehung.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-32-04, Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft. (s.a.). Standardarbeitsanweisung SAA-IKT-33-04, Bestimmung der Dichteparameter von Böden.
- Chatterjee, A., & Lal, R. (2009). On farm assessment of tillage impact on soil carbon and associated soil quality parameters. *Soil & Tillage Research*(104), S. 270-277.
- Deen, W., & Katakai, P. (2003). Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. *Soil & Tillage Research*(74), S. 143-150.
- D'Haene, K., Vermang, J., Cornelis, W., Leroy, B., Schiettecatte, W., De Neve, S., et al. (2008). Reduced tillage effects on physical properties of silt loam growing root crops. *Soil & Tillage Research*(99), S. 279-290.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*(30), S. 211-223.
- Etana, A., Hakansson, I., Zagal, E., & Bucas, S. (1999). Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. (52), S. 129-139.
- Friedrich, T., Kienzle, J., Epperlein, J., Voßhenrich, H.-H., Brunotte, J., & Basch, G. (2008). Anforderungen an die Bodenbearbeitung. In DLG e.V., *Schonende Bodenbearbeitung. Systemlösungen für Profis.* (S. 9-49). Frankfurt am Main: DLG-Verlags-GmbH.
- Google Maps. (2013). Abgerufen am 16. Juli 2013 von <https://maps.google.at/maps?hl=de>
- Hartge, K., & Horn, R. (1999). *Einführung in die Bodenphysik* (3. Ausg.). Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Hartge, K., & Horn, R. (2009). *Die physikalische Untersuchung von Böden* (4. Ausg.). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Hermle, S., Anken, T., Leifeld, J., & Weisskopf, P. (2008). The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperature conditions. *Soil & Tillage Research*(98), S. 94-105.
- Hill, R. (1990). Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*(54), S. 161-166.
- ISO/DIS 11275. (1995). Soil quality - Determination of unsaturated hydraulic conductivity and water retention characteristic - Wind's evaporation method.

- Kahlon, M., Lal, R., & Ann-Varughese, M. (2013). Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil & Tillage Research*(126), S. 151-158.
- Kay, B., & VandenBygaart, A. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research*(66), S. 107-118.
- Kuntze, H., Roeschmann, G., & Schwerdtfeger, G. (1994). *Bodenkunde* (5. Neubearb. und erw. Ausg.). Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Müller, G. (1980). *Bodenkunde*. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- ÖNORM L 1050. (2004). Boden als Pflanzenstandort, Begriffe und Untersuchungsverfahren.
- ÖNORM L 1061-2. (2002). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden.
- ÖNORM L 1063. (2006). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Drucktopf mit keramischer Platte.
- ÖNORM L 1065. (2006). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben.
- ÖNORM L 1068. (2005). Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Dichte von Böden.
- ÖNORM L 1081. (1999). Chemische Bodenuntersuchungen, Humusbestimmung durch Nassoxydation mit Kaliumchromat-Schwefelsäure.
- ÖNORM L 1084. (2006). Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Carbonat.
- Powlson, D., Whitmore, A., & Goulding, W. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*(62), S. 42-55.
- Rasmussen, K. (1999). Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian Review. *Soil & Tillage Research*(53), S. 3-14.
- Sasal, M., Andriulo, A., & Taboada, M. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*(87), S. 9-18.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Horn, R., Kandeler, E., et al. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Ausg.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

- Schindler, U. (1980). Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk*(24), 1-7.
- Schjonning, P., & Thomsen, I. (2013). Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. *Soil & Tillage Research*(132), S. 12-20.
- Singh, B., & Malhi, S. (2006). Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. (85), S. 143-153.
- Spiegel, H., Dersch, G., Hösch, J., & Baumgarten, A. (2007). Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria. *Die Bodenkultur*(58), S. 47-58.
- Spiegel, H., Pfeffer, M., & Hösch, J. (2002). N Dynamics under Reduced Tillage. *Archives of Agronomy and Soil Science*(48:5), S. 503-512.
- Tebrügge, F., & Düring, R.-A. (1999). Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*(53), S. 15-28.
- Triplett, G., & Dick, W. (2008). No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture. *Agronomy Journal*(100), S. 153-165.
- ZAMG. (2013). *Klimadaten von Österreich 1971-2000*. Abgerufen am 16. Juli 2013 von http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm