

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Institutsleiter: Univ.-Prof. Dr. Hans-Peter Kaul



Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf den Bodenwasserhaushalt im semiariden Produktionsgebiet

**Masterarbeit zur Erlangung des Master
an der Universität für Bodenkultur Wien**

**Robert Strebl
Matr. Nr. 9640209**

**Betreuer
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Liebhard
Dipl.-Ing. Dr. Gernot Bodner**

Laa, April 2015

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, insbesondere meinem Betreuer ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Liebhard für die Überlassung des Themas und die freundliche und geduldige Unterstützung während der Entstehung der Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gernot Bodner danke ich für die fachliche Betreuung bei der Durchführung der Versuchsreihen.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Klaus Ofner und Herrn Josef Schodl für ihre Unterstützung bei den praktischen Versuchen am Feld bedanken.

Ohne die moralische und die finanzielle Unterstützung meiner Eltern wäre es mir nicht möglich gewesen, mein Studium durchzuführen. Ein großer Dank für ihre Geduld und ihren Glauben an mein Durchhaltevermögen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin, Frau Julia Frick, für die stete Unterstützung bei der Arbeit, für das Korrekturlesen und für ihre Formatierungkenntnisse.

Abstract

In the near future agriculture has to face an increase of weather extremes (periods intense rainfalls and periods of aridity) due to the emerging change of climate conditions. The rainfall dates of the experimental year 2006 show the abberation from the long term average in the months April, May and August.

The intention of this diploma thesis was to evaluate five different systems of soil tillage in regard to their (careful) handling of the marginal resource water and their ability to protect the soil from erosion or sealing. The evaluation included parameters as soil density, infiltration rate and yields of summer and winter wheat measured in the long term field experiment (chernozem soil in the Pannonian production area).

The highest soil density resulted from no tillage, followed by reduced tillage (working depth 10 cm) and „integrierte“ tillage. Conventional tillage showed a very low soil density, the system of reduced tillage (working depth 20 cm) showed even less soil density. The lack of invasion in the upper area of the soil results in a higher soil density, whereas ploughing and ripping decrease soil density in the upper area.

Conserving tillage prevents sealed surface and erosion due to remaining mulch on the soil surface. Condensation water can infiltrate soil because of macropores and increase soil conductivity. Conventional tillage results in higher infiltration rate, but it does not prevent soil from erosion through water or wind.

The yield of both crops under no tillage were the lowest, probably caused by incorrect drilling due to inadequate cropping system. Higher yields were harvested in soil systems where straw was totally or partly mixed with the upper soil. This shows the need to improve straw management under no tillage.

The pros and cons of all soil tillage systems have to be taken in account before deciding for a certain system.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung.....	8
1.1. Einleitung.....	8
1.2. Problemstellung.....	8
1.3. Zielsetzung.....	9
2. Literaturübersicht.....	10
2.1. Bodenwasser.....	10
2.1.1. Bodenwasserhaushalt.....	10
2.1.2. Bodenwasserherkunft.....	12
2.1.3. Bodeneigenschaften und Bodenwasser.....	13
2.1.3.1. Grund- und Stauwasser.....	16
2.1.3.2. Adsorptionswasser.....	16
2.1.3.3. Kapillarwasser.....	17
2.1.3.4. Wasserhaushalt eines Standortes.....	17
2.1.4. Bestimmung des Wassergehaltes.....	18
2.1.4.1. Potential.....	18
2.1.4.2. Wasserspannung und Wassergehalt.....	20
2.1.4.2.1. Feldkapazität (FK).....	22
2.1.4.2.2. Permanenter Welkepunkt (PWP).....	23
2.1.5 Wasseraufnahme und Wasserabgabe.....	23
2.1.5.1. Infiltration.....	23
2.1.5.2. Kapillarer Aufstieg.....	26
2.1.5.3. Dränung.....	26
2.1.5.4. Evaporation.....	27
2.2 Bodenbearbeitungssysteme und Einfluss auf die Bodeneigenschaften.....	28
2.2.1. Unterscheidung der Bodenbearbeitungssysteme nach Intensität des Bodeneingriffs.....	30
2.2.1.1. Lockerbodenwirtschaft (konventionelle Bodenbearbeitung).....	31
2.2.1.2. Direktsaat (Extreme Festboden-Mulchwirtschaft).....	32
2.2.1.3. Lockerboden-Mulchwirtschaft (tiefe Mulchsaat).....	33
2.2.1.4. Festboden-Mulchwirtschaft (seichte Mulchsaat).....	34

2.2.1.5. Integriertes Bodenbearbeitungssystem.....	35
2.2.2. Bodenverdichtung durch Bodenbearbeitung.....	36
2.2.2.1. Ursachen.....	36
2.2.2.2. Auswirkung.....	37
2.2.2.3. Eingriffsintensität.....	38
2.2.2.4. Humuswirtschaft.....	39
2.3 Einfluss der Bodenbearbeitung auf das Bodenleben.....	40
3. Material und Methoden.....	41
3.1. Versuchsstandort.....	41
3.1.1. Geographische Lage – Großraum.....	41
3.1.2. Boden.....	43
3.1.2.1. Bodenprofil eines typischen Tschernosems.....	44
3.1.3. Klima und Witterung.....	45
3.1.3.1. Versuchsjahr 2006.....	46
3.2. Versuchsanlage.....	49
3.2.1. Versuchsfaktor Bodenbearbeitung.....	51
3.2.1.1. Lockerbodenwirtschaft (konventionelle Bodenbearbeitung).....	51
3.2.1.2. Direktsaat (Extreme Festboden-Mulchwirtschaft).....	51
3.2.1.3. Lockerboden-Mulchwirtschaft (tiefe Mulchsaat).....	52
3.2.1.4. Festboden-Mulchwirtschaft (seichte Mulchsaat).....	52
3.2.1.5. Integriertes Bodenbearbeitungssystem.....	52
3.2.2. Bestimmung der Lagerungsdichte.....	53
3.2.3. Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit mit Tensionsinfiltrrometer.....	63
3.3. Statistische Auswertung.....	66
4. Ergebnisse und Besprechung der Ergebnisse.....	67
4.1. Lagerungsdichte.....	67
4.1.1. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Lockerbodenwirtschaft.....	67
4.1.2. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Festbodenwirtschaft.....	68
4.1.3. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Lockerboden– Mulchwirtschaft.....	69
4.1.4. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Festboden–Mulchwirtschaft	70

4.1.5. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Integrierte Bodenbearbeitung	71
4.1.6. Varianzanalyse der Lagerungsdichte.....	72
4.1.7. Mittelwert der Lagerungsdichte aller Bodenbearbeitungsvarianten.....	72
4.2. Hydraulische Leitfähigkeit.....	74
4.2.1. Fruchtfolge A Sommerweizen.....	74
4.2.2. Fruchtfolge B Winterweizen.....	75
4.2.3. Leitfähigkeit Varianzanalyse.....	76
4.3. Kornträge bei den unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten	77
4.3.1 Varianzanalyse der Erträge.....	77
4.3.2 Korntrag in Abhängigkeit von Bodenbearbeitungsvariante.....	77
5. Diskussion.....	80
5.1. Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Lagerungsdichte.....	80
5.2. Einfluss der Bodenbearbeitung auf die hydraulische Leitfähigkeit.....	81
5.3. Einfluss der Bodenbearbeitungssysteme auf den Korntrag.....	83
6. Zusammenfassung.....	84
7. Literaturverzeichnis.....	86
8. Abbildungsverzeichnis.....	92
9. Tabellenverzeichnis.....	94
10. Formelverzeichnis.....	95

1. Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

1.1. Einleitung

Die Landwirtschaft ist einem steten Wandel unterworfen. Die Strukturveränderungen der letzten Jahre in der Landwirtschaft führen zur Möglichkeit, kostengünstiger zu produzieren. Die immer weiter reichende Öffnung der Agrarmärkte Europas für Produzenten aus anderen Kontinenten zwingt dazu, Kostensenkungspotentiale in den Betrieben aufzuspüren und auszuschöpfen.

Nicht nur Kostengründe fordern ein Umdenken der Landwirte – auch erhöhtes Umweltbewusstsein und Nachhaltigkeitsdenken der Gesellschaft, verbunden mit der täglichen Verringerung der landwirtschaftlichen Produktionsfläche durch Siedlung und Straßenbau erfordert ein Umdenken in der Bearbeitung der vorhandenen Ackerböden. Boden ist letztlich eine nicht vermehrbare Ressource und muss aus diesem Grund nachhaltig bearbeitet werden. Der sich abzeichnende Klimawandel, die Häufung von aussergewöhnlichen Wetterereignissen – wie die deutliche Zunahme von Starkregen in den letzten Jahren, die mehrmals zu großen Überschwemmungen in ganz Europa führten – sind auch für die Landwirtschaft von großer Bedeutung. So gilt es durch eine entsprechende Bodenbearbeitung die Böden wasseraufnahmefähig zu halten, um Niederschläge aufzunehmen, Erosion durch oberflächigen Abfluss zu vermindern bzw. zu verhindern und die Ertragsfähigkeit der Böden zu erhalten.

Die Bodenbearbeitung ist der Schlüssel, den steigenden Bedarf an Nahrungs- und Futtermitteln sicherzustellen.

Aufgrund der historischen Entwicklung in Europa ist der Pflug in weiten Teilen noch immer das häufigste Bodenbearbeitungsgerät. In den letzten Jahren wurden pfluglose Bodenbearbeitungssysteme entwickelt.

1.2. Problemstellung

Die Landwirte stehen vor der Herausforderung, ihre Böden auf die immer öfter auftretenden Wetterextreme vorzubereiten. Wie können die Nutzpflanzenbestände extreme Nässe und längere Trockenperioden unbeschadet überstehen? Welche Möglichkeiten bieten sich, den Pflanzen optimale Wachstumsbedingungen zu geben, um damit die Ernte zu sichern und die Wirtschaftlichkeit des Betriebes zu erhalten.

1.3. Zielsetzung

Eine Kosteneinsparung in der Bodenbearbeitung vermindert die Produktionskosten. Die konventionelle Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist meist eine Bearbeitungsvariante mit hohen Kosten. Zudem besteht das Risiko einer starken Pflugsohlenbildung durch Arbeitsschritte zu ungünstigen Bedingungen, z.B. bei zu hohem Reifendruck oder bei Bearbeitung zu nasser Böden.

Ein Umstieg auf eine reduzierte Bodenbearbeitung oder auf die Direktsaat führt langfristig zu erheblichen Kosteneinsparungen, außerdem ergeben sich positive Effekte bei bodenchemischen und bodenphysikalischen Kriterien, weiters Verminderung der Erosionsgefahr, der Verschlammungsneigung und des Oberflächenabflusses.

Ziel dieser Arbeit war es, festzustellen, in wie weit sich physikalische Bodeneigenschaften bei unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen ändern. Zu diesem Zweck wurden auf einem Langzeitvergleichsversuch der Universität für Bodenkultur Wien, im Jahr 2006, zwei Messreihen durchgeführt.

Auf dem Langzeitversuch werden seit 1996 fünf verschiedene Bodenbearbeitungssysteme ausgeführt – konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug, konservierende Bodenbearbeitung ohne Pflug (Direktsaat), Lockerboden-Mulchwirtschaft, Festboden-Mulchwirtschaft und ein integriertes Bodenbearbeitungssystem. Innerhalb dieses Versuches wurden in ausgewählten Parzellen die Lagerungsdichte erhoben, sowie bei allen Parzellen die hydraulische Leitfähigkeit gemessen.

Im Besonderen soll beurteilt werden, wie sich die unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme auf die Lagerungsdichte und die hydraulische Leitfähigkeit auswirken. Es wurde erhoben, ob ein messbarer Zusammenhang zwischen Bodenbearbeitung, Lagerungsdichte und hydraulischer Leitfähigkeit besteht.

2. Literaturübersicht

2.1. Bodenwasser

2.1.1. Bodenwasserhaushalt

Der Bodenwasserhaushalt wird als Ausschnitt übergeordneter Energie- und Wasserflüsse gesehen, denn er ist ein Teil des globalen Klimas. Sämtliche das Wasser betreffenden Abläufe im Boden sind daher im Kontext der globalen ökologischen Vorgänge und Kreisläufe zu betrachten.

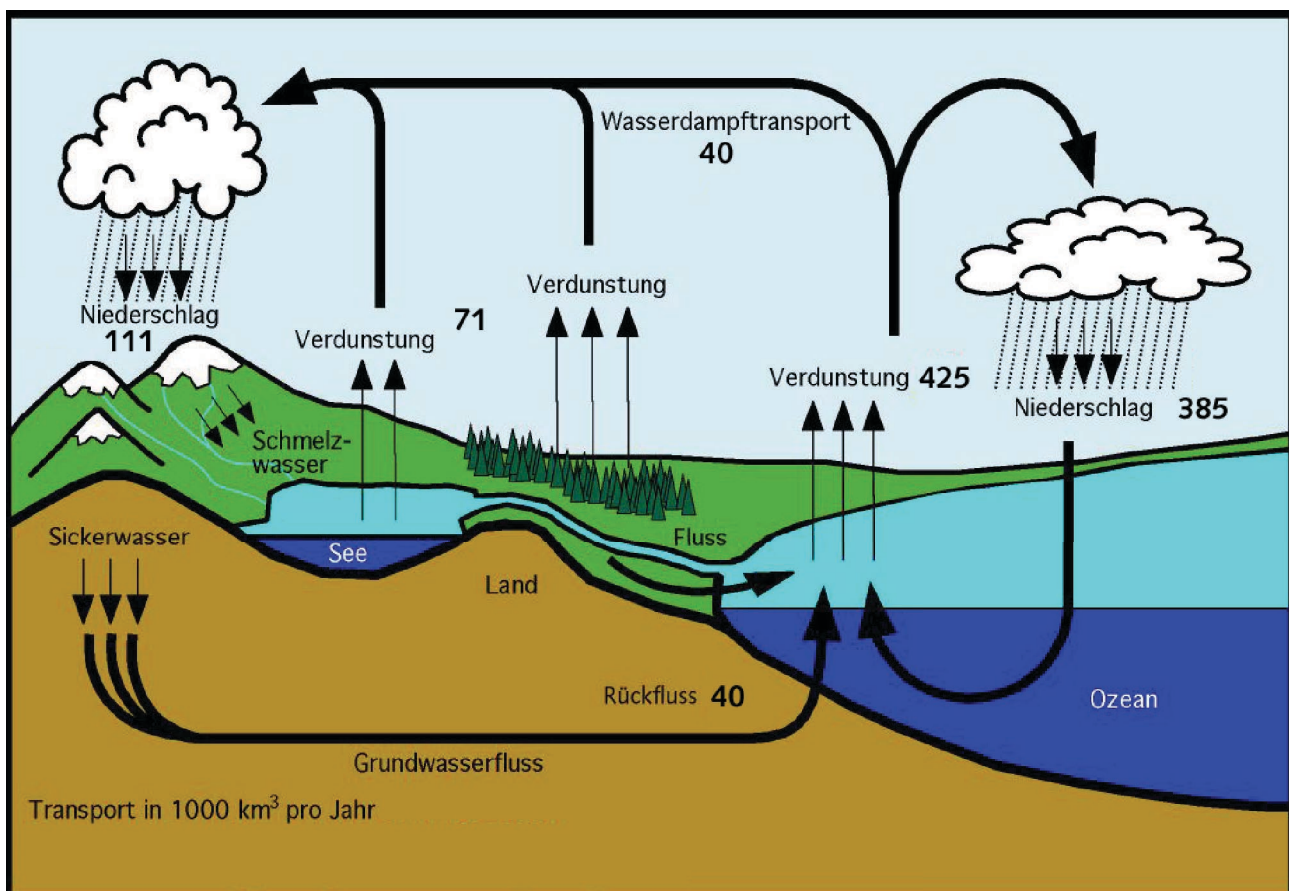


Abb. 1: Globaler Wasserkreislauf (Quelle: www.trinkwasser.ch, 17.03.2010)

Theoretisch ist auf der Erde Wasser im Überfluss vorhanden. Die Weltmeere und sämtliche Wassermassen, die in den Polar- und Gletscherregionen gebunden sind, stellen ein gewaltiges Reservoir dar. Aus diesem Speicher geht aber nur ein kleiner Bruchteil in die Zirkulation mit Verdunstung, Kondensation und Niederschlag ein. Von den Niederschlägen, die das Festland erreichen, steht wiederum nur ein geringer Anteil als Quelle für Oberflächenwasser, Bodenfeuchte und Grundwasser zur Verfügung.

Jener Anteil des Niederschlages, der über die Landmassen dem Boden zur Verfügung steht, kann mithilfe der Wasserhaushaltsgleichung beschrieben werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$N = E + A + \Delta S_w \quad (1)$$

oder

$$N - E - A = \Delta S_w$$

N Niederschlag

E Verdunstung

A Abfluss

ΔS_w Speicherung im Boden

Wird von den Niederschlägen jene Menge abgezogen, die wieder verdunstet und jene Menge, die wieder abfließt, so bleibt schließlich jenes Wasser übrig, das dem Boden zur Speicherung zur Verfügung steht.

Die Erdoberfläche ist zu 75% von Wasser bedeckt und insgesamt stehen rund 1,4 Mrd. km³ Wasser in den Weltmeeren den rund 47,9 Mio. km³ Wasser auf der Landoberfläche gegenüber (EITZINGER, 2005).

Tab. 1: Aufteilung des Wasservolumens der Landmassen (EITZINGER, 2005)

	Mio km ³	%
Am Wasserkreislauf teilnehmendes Grundwasser (überwiegend Süßwasser)	10,530	21,946
sonstiges Grundwasser	12,870	26,821
Bodenfeuchte	0,017	0,035
Gletscher, ständiger Schnee, Eis in Dauerfrostböden	24,364	50,775
Seen – Süßwasser	0,091	0,190
– Salzwasser	0,085	0,177
Flüsse	0,002	0,004
Sümpfe	0,011	0,023
Biosphäre (Pflanzen, Tiere, Menschen)	0,001	0,002
Atmosphäre	0,013	0,027
insgesamt	47,984	100,00
davon Süßwasser	35,029	

Die Aufteilung der Binnengewässer ist in Tab. 1 angeführt. Gemäß dieser Tabelle liegt der Anteil des Bodenwassers am Gesamtwasservolumen am Festland bei 0,035 %. Dennoch ist dieser niedrige Wert für das Pflanzenwachstum und die pflanzliche Produktion, somit

auch für die menschliche Ernährung von höchster Bedeutung.

Die Untersuchung des Wasserkreislaufes und des Bodenwasserhaushalts sind Aufgaben der Agrarmeteorologie und der Bodenkunde. Diese bedienen sich wiederum weiterer Wissenschaften, wie der allgemeine Meteorologie, der Physik, der Biologie und der Agrarwissenschaften.

Beeinflusst wird der Bodenwasserhaushalt vor allem vom Klima und den Bodenverhältnissen.

2.1.2. Bodenwasserherkunft

Im natürlichen System der küstenfernen Festlandmassen ist die Quelle der Bodenfeuchte der Niederschlag. Zu einem geringen Ausmaß kann auch die Luftfeuchtigkeit zur Bodenbefeuchtung beitragen. Alle anderen Quellen, wie der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser, der horizontale Transport von Bodenfeuchte oder die Freisetzung von Wasser aus biologischen Prozessen stammen letztendlich indirekt aus dem Niederschlag. Die Menge und Intensität der Niederschläge und damit die dem Boden zur Verfügung stehende Wassermenge werden langfristig vom Klima und kurzfristig vom gerade vorherrschenden Wetter beeinflusst (OEHMICHEN, 1983).

Bei jedem Niederschlagsereignis erreicht nicht das gesamte Wasser die Bodenoberfläche. Ein kleiner Teil verdunstet bereits im freien Fall zur Erde und befeuchtet so die Luft. Ein anderer Teil wird, so denn eine Pflanzendecke vorhanden ist, von dieser abgefangen, verdunstet von dort oder fließt über die Pflanzendecke in den Boden ab. Dieses Abfangen oder Zurückhalten der Niederschläge an der Oberfläche der Pflanzen nennt man Interzeption. Die Interzeption ist abhängig von der Dichte des Blattgrüns, vom Blattflächenindex (BFI), von Menge bzw. Intensität des Niederschlages und von der Art der Pflanzen. Hohe Interzeptionverluste treten in Wäldern mit geschlossenem Blätterdach auf. Bei schwachen Niederschlägen werden die Niederschläge von den Kronen aufgefangen und erreichen nur als „Kronentrauf“ oder „Stammablauf“ die Bodenoberfläche (LUEF, 1997).

Der Restniederschlag, der nicht von der oberirdischen Pflanzendecke aufgehalten wird, trifft auf den Boden auf. Wenn er von diesem nicht vollständig absorbiert werden kann, tritt Stauwasser auf. Bei Intensivniederschlägen, wie dies bei Gewittern oft der Fall ist, ist der Oberflächenabfluss am stärksten. Da der anfangs noch trockene Boden nicht in der Lage ist, große Mengen an Wasser aufzunehmen, fließt Wasser ab. Bei schwachen

Niederschlägen wird der Boden allmählich befeuchtet und kann das auffallende Wasser dadurch besser aufnehmen. Wie viel Stauwasser abfließt und wie viel Wasser infiltriert werden kann, ist von der Hangneigung und vom jeweiligen Pflanzenbestand abhängig (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

2.1.3. Bodeneigenschaften und Bodenwasser

Die Bodeneigenschaften entscheiden, was mit dem Niederschlagswasser passiert, welcher Anteil in den Boden eindringt. Dabei ist die chemische Zusammensetzung des Bodens von Bedeutung. Organische Böden, wie z.B.: Torfe, können sehr viel Wasser aufnehmen, speichern und wieder abgeben. Die Wasserspeicherfähigkeit von mineralischen Böden kann durch Humusanreicherung verbessert werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998).

Die chemische Zusammensetzung des Mineralbodens hat erheblichen Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit. Der Mineralboden besteht zu einem Großteil aus Tonmineralen. Tonminerale weisen eine geschichtete, kristalline Struktur auf und wenn diese mit Wasser in Berührung kommen, quellen sie auf. Dabei nehmen sie Wassermoleküle zwischen ihren Schichten auf. Die innere Oberfläche eines Tonwürfels mit 6 cm² Außenfläche kann so bis zu 600.000 cm² betragen. Im Wesentlichen lassen sich zwei Typen von Tonmineralen unterscheiden:

- Kaolinit: tritt vor allem in reifen, stark verwitterten Böden auf
- Montmorillonit: stellt den Haupttyp in jungen Böden dar

Montmorillonit ist viel quellfähiger als Kaolinit. Die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens ist daher stark von seinem Verwitterungsgrad abhängig (SCHMIDT, 2006).

Eine weitere bedeutende Aufgabe in der Ackerkrume hat der Kalkgehalt. Kalkreiche Böden sind in Struktur und Wasseraneignung den vergleichbaren kalkarmen Böden überlegen. Da Kalk die Flockung des Bodens bewirkt, führt dies zu einem Koagulatgefüge.

Die höchste Bedeutung für das Wasserspeichervermögen haben die physikalischen Eigenschaften des Bodens. Dabei stellt die Körnung oder auch Textur eine der wichtigsten physikalischen Bodeneigenschaften dar. Sie beeinflusst den Bodenwasserhaushalt, die Bearbeitbarkeit der Böden, die Ertragsfähigkeit, die Bodenentwicklung sowie die Filterung von anorganischen und organischen Stoffen. Wobei der Zusammenhang zwischen

Wasserhaushalt und Körnung darin besteht, dass die Größe der Bodenteilchen auch die Größe der Poren bestimmt, die von ihnen umschlossen werden. Somit enthalten sandige Böden (Korngröße 63 μm – 2000 μm) relativ viele Grobporen ($> 10 \mu\text{m}$). Je feiner dagegen die Bodenteilchen sind, desto feiner sind die Poren (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

Das Porenvolumen bestimmt, wie viel Wasser ein Boden im gesättigten Zustand enthält. Wie viel er davon gegen die Schwerkraft halten kann, bestimmt die Verteilung der Porengrößen.

Tab. 2: Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2%) und organische Böden (Quelle: SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998)

	Poren-volumen (%)	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen(%)
Sande	46 +/- 10	30 +/- 10	7 +/- 5	5 +/- 3
Schluffe	47 +/- 9	15 +/- 10	15 +/- 7	15 +/- 5
Tone	50 +/- 15	8 +/- 5	10 +/- 5	35 +/- 10
Anmoore	70 +/- 10	5 +/- 3	40 +/- 10	25 +/- 10
Hochmoore	85 +/- 10	25 +/- 10	40 +/- 10	25 +/- 10

Grobporen haben das größte Volumen und sind in der Lage, rasch Wasser aufzunehmen und weiterzuleiten. Allerdings können sie den größten Teil des Wassers nicht gegen die Schwerkraft halten. Das Wasser sickert aus ihnen in wenigen Tagen in tiefere Bodenschichten ab. Mittelporen dagegen sind in der Lage, mehr Wasser gegen die Schwerkraft zu halten. Deswegen ist für die Landwirtschaft aus pflanzenbaulicher Sicht ein hoher Anteil von Mittelporen erstrebenswert (GEISLER, 1988). Die Mittelporen können Pflanzen über eine längere Trockenperiode hinaus mit gespeichertem Wasser versorgen und so einem Trockenstress vorbeugen (HOFMANN und KLIK, 2005).

Ein hoher Anteil von Feinporen ergibt meist einen hohen Anteil an Porenvolumen. Feinporen haben aber im Verhältnis zum Volumen auch die größte Oberfläche, weswegen sehr starke elektrostatische Kräfte, die van-der-Waals-Kräfte, vorliegen. Es bestehen Bindungen über Wasserstoffbrücken zwischen ihnen und den Wassermolekülen (SCHMIDT, 2006). Durch diese Kräfte wird verhindert, dass die Pflanzenwurzeln das Wasser aufnehmen können.

Bodenchemie und Bodenphysik sind aber keine unveränderlichen Eigenschaften. Jeder Boden hat eine individuelle Entwicklung durchgemacht, die zu einer bestimmten Schichtung, den Bodenhorizonten, geführt hat. Die so entstandenen Böden werden in

verschiedene Bodentypen zusammengefasst. Jeder Bodentyp hat einen für ihn charakteristischen Bodenwasserhaushalt.

Von den zahlreichen verschiedenen Bodentypen wird, aufgrund der nachfolgend angeführten Ergebnisse, nur der Tschernosem beschrieben. Er liegt am Versuchsstandort vor.

Der Tschernosem ist ein A/C Boden aus Lockergestein mergeliger Zusammensetzung mit einem bis zu 40 cm mächtigen A Horizont. Typisch für Tschernoseme sind als Folge intensiver Bioturbation metertief reichende, mit humosem Bodenmaterial befüllte, ehemalige Wurmgänge und Krotowinen durch meist wühlender Nagetiere (BLUM, 2007).

Tschernosem - Schwarzerden bildeten sich in Europa vorwiegend aus Löß. Die Kombination einiger günstiger Faktoren führte dazu, dass die Entwicklung über eine Mull – Pararendzina hinausging. Dies passierte vor allem durch die charakteristischen Eigenschaften eines CaCO_3 -haltigem lockeren Ausgangsgesteins, dem Einfluss eine kontinentalen, semiariden bis semihumiden sommertrockenen Klimas, der Auswirkung einer grasreichen Vegetation und der wühlenden, vermischenden Tätigkeit von Steppentieren.

Der Ah Horizont besitzt mit einem Porenvolumen von 50% einen relativ hohen Anteil an Mittel- und Grobporen. Diese Böden sind gut durchwurzelbar und ausreichend belüftet. Löß – Schwarzerden sind somit in der Lage, im oberen Meter rund 200 mm Niederschlag nutzbar zu speichern. Dies ermöglicht der Vegetation ein Überdauern von Trockenzeiten, ohne größere Schäden davonzutragen (KILIAN et al., 2002).

Abgesehen von der Anwesenheit und der Tiefe des Spiegels des Grundwassers sowie des Klimas ist vor allem vom Bodentyp abhängig, ob kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in höhere Bodenschichten besteht oder nicht.

Bodenchemismus, -physik und -typ haben also direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt. Sie bestimmen, in welchem Verhältnis die versickernden Niederschläge auf die verschiedenen Fraktionen des Bodenwassers aufgeteilt werden. Dabei kann nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998) folgende Unterteilung des Bodenwassers vorgenommen werden.

2.1.3.1. Grund- und Stauwasser

Als Grund- und Stauwasser wird jener Anteil des Bodenwassers bezeichnet, das nicht durch Bindungen an der Bodenmatrix festgehalten wird. Es bildet sich über Schichten mit geringer Durchlässigkeit, z.B.: Tonen. Grundwasser wird jenes Wasser betitelt, welches das ganze Jahr über vorkommt. Von Stauwasser spricht man, wenn es nur teilweise im Jahr vorkommt, meist im Frühjahr nach starken Niederschlägen.

Das Grund- und Stauwasser werden nach oben durch die Grundwasser- bzw. die Stauwasseroberfläche abgeschlossen. Die Grundwasseroberfläche ist definiert als jene Fläche im Boden, deren Wasserdruck dem mittleren Druck der Atmosphäre entspricht. Es ist unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998).

2.1.3.2. Adsorptionswasser

Unter Adsorptionswasser wird das unter der Wirkung von Adsorptionskräften und osmotischen Kräften stehende Wasser zusammengefasst. Nur der leichter gebundene Teil ist pflanzenverfügbar. Adsorptionswasser umhüllt die festen Bodenteilchen. Es wird mit außerordentlich hoher Kraft an die Teilchenoberfläche gebunden (MÜCKENHAUSEN, 1993). Zu den Adsorptionskräften, die zwischen der Festsubstanz und den Wassermolekülen wirken, zählen die Van-der-Waals-Kräfte, die Wasserstoffbrücken zwischen den Sauerstoffatomen der festen Oberfläche und den Wassermolekülen sowie die Kräfte des elektrostatischen Feldes (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 2010).

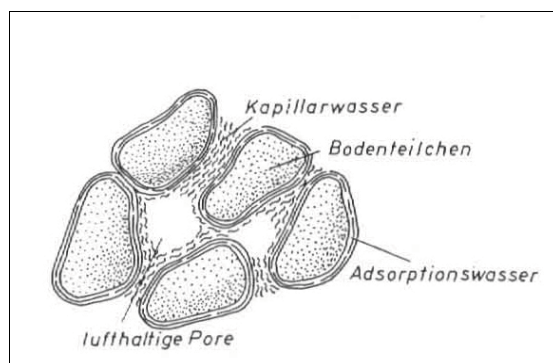


Abb. 2: Adsorptions- und Kapillarwasser (MÜCKENHAUSEN, 1993)

2.1.3.3. Kapillarwasser

Kapillarwasser wird verursacht durch Kapillarkräfte und ist somit Wasser, dass durch die Oberflächenspannung in den kapillaren Zwischenräumen des Bodens festgehalten wird. Ein Teil davon kann entlang der Schwerkraft versickern, der andere Teil ist vollständig pflanzenverfügbar. Die Bildung von Kapillarwasser wird verursacht durch die Tendenz der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft sich zu verkleinern. Dadurch wird wegen der hohen Grenzflächenspannung von Wasser gegenüber Luft ein energieärmerer Zustand erreicht (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

2.1.3.4. Wasserhaushalt eines Standortes

Für die Pflanze und ihren Wurzeln ist der Wasserhaushalt und vor allem die Erreichbarkeit und die Möglichkeit der Wasserzuführung aus tieferen Schichten von Bedeutung. Wasser trifft bei Niederschlag auf die Bodenoberfläche auf, kann oberflächlich abfließen, oder aber in den Boden eindringen. Dort steht es dann aus dem Grundwasserkörper durch den kapillaren Aufstieg der Pflanzenwurzel wieder zur Verfügung. Die Pflanze selbst, aber auch die umgebende Erde veratmet, bez. verdunstet ständig Wasser, weswegen immer wieder von unten Nachschub notwendig ist.

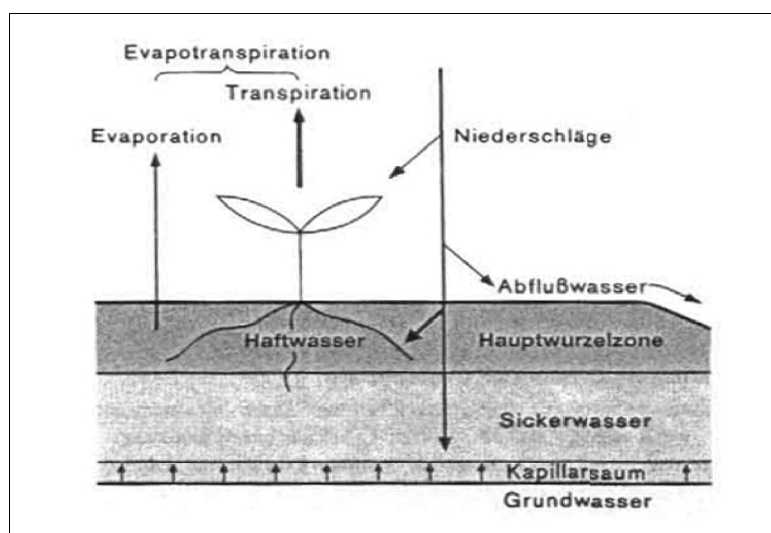


Abb. 3: Wasserhaushalt eines Standortes (FINCK, 2007)

2.1.4. Bestimmung des Wassergehaltes

Eine Möglichkeit zur Wassergehaltsbestimmung ist die Trocknung einer im Gelände genommenen und damit nicht zerstörungsfreien Bodenprobe bei 105 °C. Vorher und nachher wird die Masse bestimmt. Durch die Hitze wird das in der Probe enthaltene Wasser ausgetrieben. Die Gewichts Differenz entspricht daher der Masse des vorher im Boden enthaltenen Wassers.

Für die Messung vor Ort werden häufig indirekte Methoden angewendet, bei denen der Einbau von Messfühlern in den Boden auch fortlaufende Messungen ermöglicht. Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass die Weitergabe von Impulsen unterschiedlicher Art (z.B. elektrische Spannung, Wärme) im Boden vor allem vom Wassergehalt abhängt.

Der gravimetrische Wassergehalt (g Wasser pro g Boden) dient als Eichung und kann bei Bedarf durch Multiplikation mit der Lagerungsdichte φ_B auf die Volumenbasis (cm³ Wasser pro cm³ Boden) umgerechnet werden.

Als die flexibelste und am einfachsten durchzuführende Methode gilt die *Time-Domain-Reflectometrie* (TDR-Methode). Diese basiert auf der Tatsache, dass die relative Dielektrizitätszahl (DEZ) von Wasser (DEZ $\approx$ 80) sehr viel größer ist als diejenige anderer Bestandteile des Bodens (DEZ $<$ 5). Durch die Änderung der Reflexionsgeschwindigkeit des elektrischen Pulses im Sensor sind Unterschiede und Veränderungen des volumetrischen Wassergehalts somit direkt erfassbar (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

2.1.4.1. Potential

Das Potential ist definiert als die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren. Die Arbeit entspricht derjenigen die notwendig ist, um die Mengeneinheit Wasser von einer freien Wasseroberfläche (z.B.: Grundwasserspiegel) auf eine bestimmte Höhe in einem Porensystem zu heben bzw. der Bodenmatrix zu entziehen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998).

Wird dieses Konzept des Potentials auf das Bodenwasser angewendet, so lassen sich alle Bewegungsvorgänge wie die Infiltration, die Dränung und der kapillare Aufstieg berechnen. Das Wasser bewegt sich von Stellen höheren Potentials zu solchen mit niedrigerem, da bei diesem Vorgang Energie frei wird. Diese Bewegung hält so lange an,

bis das Gesamtpotential an allen Stellen den gleichen Wert aufweist.

Das Potential des Bodenwassers kann durch folgende Formel beschrieben werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$\psi = m \cdot b \cdot h \quad (2)$$

m Masse des Wassers
b Erdbeschleunigung
h Höhe über einer freien Wasserfläche

Gesamtpotential (ψ)

Das Gesamtpotential ist definiert als die Summe aller durch die verschiedenen im Boden auftretenden Kräfte hervorgerufenen Teilpotentiale. Meist ist es schwierig, das Gesamtpotential zu messen, da die verfügbaren Messgeräte nur wechselnde Gruppierungen von Teilpotentialen anzeigen. Daher ist es notwendig zu erkennen, welche Teilpotentiale bei der Messung erfasst werden, um zu beurteilen, wie gut die Annäherung an das Gesamtpotential ist. Die folgende Teilung ist die am meisten gebräuchliche (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$\psi = \psi_z + \psi_m + \psi_g + \psi_o \quad (3)$$

Die in dieser Formel enthaltenen Teilpotentiale werden im Folgenden kurz umrissen.

Gravitationspotential (ψ_z)

Da das Bodenwasser stets im Einfluss des Gravitationsfeldes der Erde steht, kann ein Gravitationspotential definiert werden. Dieses entspricht der Arbeit, die aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe anzuheben. Wird das Gewicht als Bezugseinheit verwendet, so erscheint das Gravitationspotential als die Ortshöhe (z).

Matrixpotential (ψ_m)

Das Matrixpotential umschließt alle durch die Matrix auf das Wasser ausgeübten Einwirkungen. Je weniger Wasser ein Boden enthält, desto stärker halten die matrixbedingten Kräfte es fest und umso schwerer ist es dem Boden beispielsweise durch Pflanzenwurzeln zu entziehen.

Osmotisches Potential (ψ_o)

Weil im Boden niemals nur reines Wasser vorliegt, wird das Gesamtpotential stets durch das osmotische oder Lösungspotential mit beeinflusst. Der Anteil dieses Potentials ist von der Menge der gelösten Salze abhängig. Dieses Potential entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine Einheitsmenge Wasser durch eine semipermeable Membran aus der Bodenlösung zu ziehen.

Gaspotential (ψ_g)

Das Gaspotential muss berücksichtigt werden, wenn der Luftdruck, der im Boden herrscht nicht mit dem übereinstimmt, der an der als Bezugsniveau bestimmten Ebene vorherrscht (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998).

2.1.4.2. Wasserspannung und Wassergehalt**Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt**

Jene Wassermenge, die zu einem bestimmten Matrixpotential an einem Ort im Boden vorliegt, ist von der Porengrößenverteilung und vom Porenvolumen abhängig. Daher ist der Verlauf dieser Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential bzw. Wasserspannung für jeden Horizont und jede Schicht typisch.

Die Wassergehaltskurve oder auch Matrixpotentialkurve, pF-Kurve oder Bodenwassercharakteristik genannt ist eine Grundgröße für die Berechnung von Wasserbewegung und andere Größen des Wasserhaushaltes. Der pF-Wert entspricht dem logarithmischen Wert des Betrages des Matrixpotentials (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

Die pF-Kurve ist ein wichtiges Charakteristikum für jeden Boden, da sie nicht nur Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt sondern auch auf die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser zulässt, welche ein Boden aufzunehmen in der Lage ist (HARTGE und HORN, 1999)

Die genaue Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der Wasserspannung ist vom Gesamtvolumen und der Größenverteilung der Poren abhängig. Aber auch Faktoren wie die Körnung, das Gefüge oder der Humusgehalt spielen eine Rolle. Der Textur

entsprechend haben bei Sandböden die Grobporen den größten Anteil an der Wasserspeicherung, bei Schluffböden die Mittelporen und bei Tonböden die Feinporen. Der Einfluss des Gefüges tritt besonders bei quell- oder schrumpffähigen Tonböden zutage. Denn hierbei geht es nicht nur um eine Ab- oder Zunahme des gesamten Porenvolumens, sondern auch um die Änderung der Porengrößenverteilung. Bei Quellung nimmt der Anteil an den groben Poren ab, der an den Mittelporen, vor allem an den Feinporen dagegen stark zu. Bei der Schrumpfung verhält es sich umgekehrt.

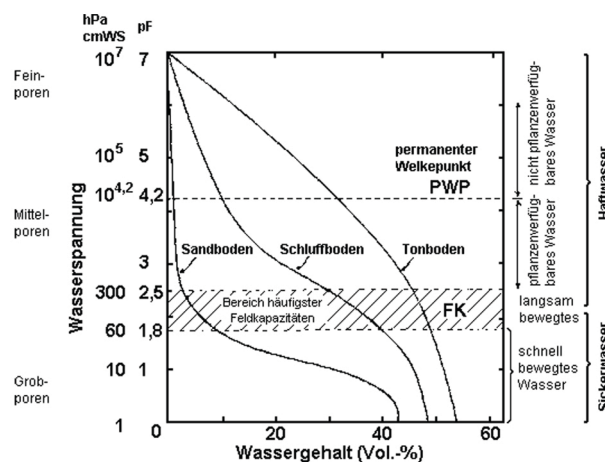


Abb. 4: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (Wasserspannungs-, pF-Kurve) bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lößboden) und einem Tonboden (A-Horizonte) (FOHRER und HORN, 1998)

Wie in der Abb. 4 zu sehen ist, gibt es für unterschiedliche Bodentypen jeweils andere Verläufe in der pF-Kurve. Ursache dafür ist die verschiedenartige Porengrößenverteilung.

Einfluss der Körnung auf die Wasserspannungskurve

Der unterschiedliche Verlauf der drei Wasserspannungskurven für Sand, Schluff und Ton hängt von der unterschiedlichen Körnung der Böden ab.

Wird einem Sandboden Wasser entzogen, so verläuft die pF-Kurve zunächst steil bis zu einem Wert von etwa pF 1,8. Der steile Verlauf lässt darauf schließen, dass dem abgegebenen Wasser (~30%) in diesem Bereich eine relativ einheitliche Bindungsstärke zuzuschreiben ist. Anders ausgedrückt, werden hier Poren mit relativ einheitlichen Äquivalenzdurchmessern angenommen. Die restlichen 5% Wasser sind mit steigenden Bindungskräften gebunden und die letzten Anteile in Form dünner Filme von Adsorptionswasser.

Die anderen Beiden Kurven für Schluff und Ton hängen mit der andersartigen Porengrößenverteilung zusammen. Bei Schluffböden sind die Mittelporen mit ~20% beteiligt und bei Tonböden die Feinporen mit ~30%.

Aus der obigen Abbildung ist ersichtlich, dass bei gleichem Wassergehalt die Bindungsstärke des Bodenwassers in der Reihenfolge Sandboden < Schluffboden < Tonboden steigt. Mit zunehmenden Tongehalt steigt also das Matrixpotential eines Bodens. Diese unterschiedliche Bindungsstärke des Bodenwassers beruht auf einer Zunahme der absorbierenden Oberfläche und einer Abnahme des Porendurchmessers.

Einfluss des Gefüges auf die Wasserspannungskurve

Aufgrund der Bodenentwicklung verändert sich das Gefüge und damit die Lagerungsdichte. Dabei ändert sich die Lagerung der einzelnen Bodenpartikel und zwar in der Art, dass das neue Gefüge heterogener ist als im Ausgangszustand. Daher hat außer der Körnung auch das Gefüge einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf der pF-Kurve.

Große Bedeutung hat der Einfluss des Gefüges vor allem bei Böden, die quellen und schrumpfen, da hier das gesamte Porenvolumen zu- und abnimmt. Mit der Zu- und Abnahme des Porenvolumens ändert sich aber auch die Porengrößenverteilung, da bei Quellung der Anteil an sekundären Grobporen zunimmt, der an Mittelporen und vor allem der Feinporen stark abnimmt. Der umgekehrte Vorgang läuft bei der Schrumpfung ab (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

Umso intensiver ein Bodengefüge entwickelt ist, desto stärker ausgeprägt werden nicht nur die sekundären Grobporen, die durch Schrumpfung und Quellung, durch biologische Aktivität (z.B.: Regenwurmgänge), durch mechanische Be- und Entlastungen entstanden, sondern umso dichter gelagert werden auch die Aggregate. Diese weisen daher ein geringeres Gesamtporenvolumen bei vorwiegender Mittel- und Feinporendominanz auf (HARTGE und HORN, 1999).

Aus der Wasserspannungskurve lassen sich aber noch zwei für den Pflanzenbau wichtige Punkte ableiten, der Permanente Welkepunkt (PWP) sowie die Feldkapazität (FK).

2.1.4.2.1. Feldkapazität (FK)

Als Feldkapazität wird jener Zustand bezeichnet, der sich einstellt, wenn sich nach einem längeren Niederschlag der Wasserhaushalt im Bodenprofil sich einem ausgeglichenen Potential nähert. Dieser Vorgang kann unterschiedlich lang dauern, mitunter bis zu drei

Tagen. Anders ausgedrückt ist die Feldkapazität jener Wassergehalt, den ein Boden maximal in ungestörter Lagerung gegen die Schwerkraft zurückhalten kann (BLUM, 2007). Nach HARTGE und HORN (1999) gibt die Feldkapazität jene Wassermenge an, die ein Boden gegen den Einfluss der Schwerebeschleunigung („Schwerkraft“) festhalten kann, wenn Evaporation und Entzug durch die Pflanzen ausgeschaltet sind.

2.1.4.2.2. Permanenter Welkepunkt (PWP)

Als permanenter Welkepunkt wird jener Punkt bezeichnet, an dem eine Pflanze weniger Wasser aus dem Boden entnehmen kann, als sie durch Transpiration verliert. Nach Überschreiten des permanenten Welkepunktes beginnt die Pflanze zu welken (HARTGE und HORN, 1999). Der permanente Welkepunkt wird häufig bei einem ψ_f -Wert von 4,2 angenommen, das entspricht einem Druckpotential von 15.000 hPa (= 15 bar). Der permanente Welkepunkt wird herangezogen, um festzustellen, ob die Pflanzen unter Trockenstress leiden. Wird dieser Punkt erreicht, sind sie nicht mehr in der Lage dem Boden ausreichend Wasser für den Stoffwechsel zu entziehen, weil das noch im Boden vorhandene Wasser zu stark an den Bodenteilchen haftet. Das Wasser liegt nur noch in dünnen Filmen über den Wänden der Mittel und Grobporen vor (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).

2.1.5 Wasseraufnahme und Wasserabgabe

2.1.5.1. Infiltration

Der Begriff Infiltration bezeichnet den Prozess des Wassereintritts in den Boden, konkret die Bewegung des Sickerwassers von der Bodenoberfläche in den Boden(körper) unter der Voraussetzung, dass das Matrixpotential höher ist als dem Gleichgewicht mit dem freien Grund- oder Stauwasserspiegel entspricht (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$\psi_H = \psi_m \quad \psi_z > 0 \quad (4)$$

Hydraulisches Potential (ψ_H)

Matrixpotential (ψ_m)

Gravitationspotential (ψ_z)

Infiltration ist eine Folge von Niederschlägen, künstlicher Bewässerung oder Überstauung. Die aktuelle Infiltrationskapazität beeinflusst Oberflächenabfluss und Bodenwasserhaushalt.

Der Verlauf bzw. die Intensität der Infiltration wird durch die Infiltrationsrate gekennzeichnet, die jene Wassermenge angibt, die pro Zeiteinheit versickert (dh. Angabe in Länge/Zeit, z.B. mm/s).

Für die Berechnung der kumulativen Infiltration i (gesamte in einer Zeit vom Boden aufgenommene Wassermenge) gibt es u.a. die Formel nach Philip, 1957 (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$i = s t^{1/2} + k_{\theta} t \quad (5)$$

i kumulative Infiltration

s Sorptivität (dh. Wasseraufnahmegeschwindigkeit)

t Zeit

k_{θ} die durch den Wassergehalt gekennzeichneten Wasserleitfähigkeit

Die Infiltrationskapazität ist bei Beginn eines Niederschlages in Abhängigkeit vom Benetzungswiderstand sehr gering. Sie steigt aber mit Sinken des Benetzungswiderstandes und ist bei gefülltem Porenraum konstant. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate, kommt es zum Oberflächenabfluss.

Dadurch wird Bodenmaterial verlagert und Nährstoffe oberflächlich lateral ausgetragen. Die verminderte Infiltrationskapazität führt zu einer Versiegelung von Flächen und damit zu höheren und schnelleren Abflüssen (JONASSEN und WITTKE, 2003).

Von großer Bedeutung für die Infiltration sind neben der Bodenoberfläche, der Bedeckung des Bodens und des Bodenprofils die Bodeneigenschaften wie Bodenart, Porosität, Wassergehalt und vor allem die Wasserleitfähigkeit der Bodenoberfläche.

Die Leitfähigkeit des Bodens ist generell bei sandigen Böden eher hoch, bei tonigen

Böden eher gering. Wurzelgänge, Wurmgänge und bodenwühlende Organismen beeinflussen die Leitfähigkeit positiv, wachshaltige organische Substanzen an der (von Vegetation unbedeckten) Bodenoberfläche und Frost, der sich an der Oberfläche bildet, beeinflussen die Leitfähigkeit negativ (OBRIST, 2004).

Formel zur Abhängigkeit der Wasserleitfähigkeit in ungesättigtem Boden $K_{(h)}$ und in gesättigtem Boden $K_{(s)}$ nach Darcy (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010):

$$\text{Gesättigte Zone: } q = -k_s \times \delta H / \delta z \quad (6)$$

$$\text{Ungesättigte Zone: } q = -k(\theta) \times \delta H / \delta z \text{ oder } q = -k(h) \times \delta H / \delta z \quad (7)$$

$k_{(h)}$ hydraulische Leitfähigkeit in ungesättigtem Boden

$\delta H / \delta z$ Potentialgradient

q Darcy-Fluss

Sollte die Wasserleitfähigkeit beispielsweise durch eine Zerstörung der Aggregate oder durch Verschlammung und die darauf folgende Bildung einer Kruste herabgesetzt sein, nimmt die Infiltration stark ab. Dadurch entsteht bei hoher Wasserzufuhr Oberflächenwasser und in der Folge kommt es zu Erosionsgefahr.

Beispiel für einen Infiltrationsverlauf:

In Abb. 5 ist der charakteristische Verlauf der Wassergehaltsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit für eine gleichbleibende Wasserzufuhr und konstanter Überstauung durch eine unendlich dünne Wasserschicht dargestellt. Im Lauf der Infiltration bilden sich vier Zonen aus. Die Sättigungs- und die Übergangszone entstehen zuerst und erstrecken sich nur über wenige Zentimeter. Anschließend entsteht die Transportzone, deren Mächtigkeit bereits stark zunimmt und abschließend die Befeuchtungszone, welche tief in den Boden reicht.

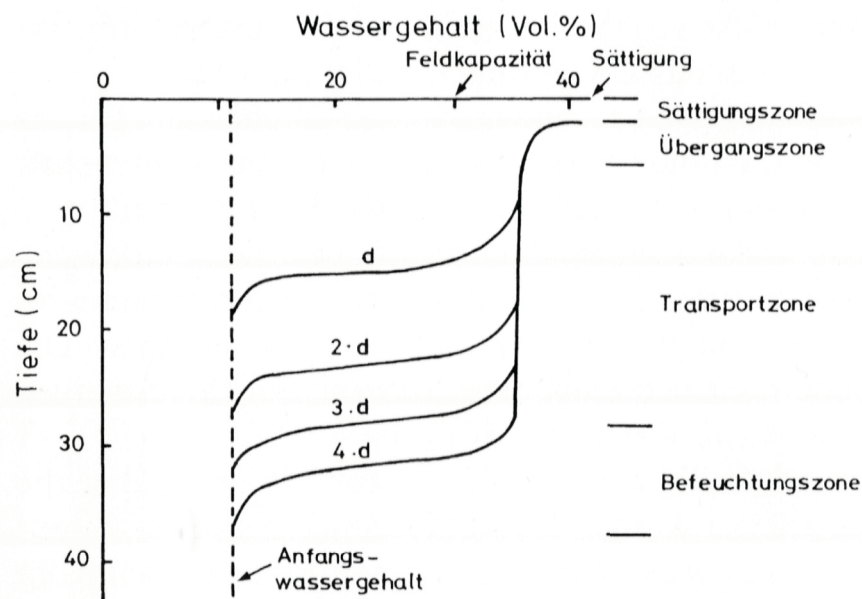


Abb. 5: Verlauf der Infiltration bei einem homogen überfluteten Boden in gleichen Zeitintervallen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998)

2.1.5.2. Kapillarer Aufstieg

Der kapillare Aufstieg stellt die Umkehrung der Infiltration dar. Das aus dem Grund- oder Stauwasser stammende Wasser bewegt sich nach oben. Diese Bewegung kommt dann zustande, wenn das Matrixpotential oberhalb der Grundwasseroberfläche niedriger ist, als es dem Gleichgewicht mit dem freien Wasserspiegel entspricht. Dies geschieht im Freiland dann, wenn an der Bodenoberfläche Wasser verdunstet und durch Pflanzen entzogen wird (GEISLER, 1988).

2.1.5.3. Dränung

Bei der Dränung kommt es zu einem Wasserverlust des Bodens unter Einfluss der Schwerkraft. Dies geschieht durch die Absenkung der als Bezugsbasis für das Matrixpotential im Profil dienende Grundwasseroberfläche. Entweder mittels Rohrsystemen oder mittels offener Gräben. Da beide Systeme ein bestimmtes Gefälle einhalten müssen, ist die Grundwasseroberfläche nicht beliebig absenkbar (ZIMMERLING, 2004).

2.1.5.4. Evaporation

An der Bodenoberfläche spielt die Bewegung von Wasserdampf eine größere Rolle als im Bodenprofil. Zum einen, weil die Sonneneinstrahlung auf die Bodenoberfläche auftrifft, zum anderen, weil die relativen Wasserdampfdrücke in der angrenzenden Luft geringer sind als in der Bodenluft. Letztendlich aufgrund der Tatsache, dass infolge von Luftbewegung der Abtransport schneller erfolgt als durch den Diffusionsvorgang alleine (HARTGE und HORN, 1999).

Die Verdunstungsverluste an der Bodenoberfläche werden durch Wasserbewegung in der flüssigen Phase aus tieferen Schichten ausgeglichen. Solange die Nachlieferung ausreichend hoch ist, trocknet die Bodenoberfläche nicht aus (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998). Je mehr die Verdunstung allerdings steigt, umso mehr Wasser muss nachgeliefert werden, um die Verdunstungsverluste auszugleichen. Dies hat zur Folge, dass der Wassergehalt und damit auch die Wasserleitfähigkeit der oberflächennahen Schicht abnehmen, wodurch auch die Evaporation sprunghaft abnimmt, obwohl die ausgetrocknete Schicht nur sehr dünn ist. Die Abnahme der Evaporation ist besonders bei Böden ausgeprägt, deren Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Entwässerung rasch sinkt. Beobachtet werden kann dies bei Grob- und Mittelsandböden, bei denen auf eine trockene Schicht, welche scharf abgegrenzt ist, der feuchte Boden folgt. In ton- und schluffreichen Böden sowie in Feinsandböden bleibt die oberste Schicht länger feucht. Das verdunstete Wasser wird durch den kapillaren Wassernachschub während eines längeren Zeitraumes ergänzt (GEISLER, 1988).

Da sich bei Sandböden leichter eine trockene Oberfläche bildet, begünstigt dies die Winderosion. Eine Verminderung der Evaporation und damit auch der Winderosion kann durch Windschutzanlagenpflanzung oder durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen erreicht werden.

Die größten Verluste aus dem Bodenwasserreservoir über der Grundwasseroberfläche finden auf Schwarzbrachen über die Evaporation statt.

2.2 Bodenbearbeitungssysteme und Einfluss auf die Bodeneigenschaften

Die Bodenbearbeitung hat im intensiven Ackerbau nach wie vor einen hohen Stellenwert (VOGT, 1983). Die ständige Steigerung und Sicherung der Erträge ist nicht zuletzt auf eine verbesserte Bodenbearbeitung zurückzuführen.

Die Bodenbearbeitung selbst hat spezielle Aufgaben. So soll durch gezielte Bearbeitung eine gute Bodenstruktur erhalten und verbessert werden. Ernterückstände, Unkraut, organische und mineralische Dünger sollen in den Boden eingearbeitet werden, damit sie schnell umgesetzt werden und die Nährstoffe den Nutzpflanzen zur Verfügung stehen.

Die Bodenbearbeitung hat sich in den letzten Jahrhunderten nicht gravierend verändert (ESTLER und KNITTEL, 1996). Mit einem Pflug wird der Boden gelockert, mit der Egge wird gekrümelt und hinterher wird die Saat ausgebracht. Lediglich in der Form und Leistung der Bodenbearbeitungsgeräte kam es zu großen Veränderungen mit technischem Fortschritt. Die Aufgaben der Bodenbearbeitung sind demnach immer noch dem Ziel, den Boden ertragsfähig zu halten oder die Ertragsfähigkeit zu steigern und die Umwelt nicht negativ zu beeinflussen, untergeordnet.

Durch die Bodenbearbeitung greift der Landwirt in das Bodengefüge ein, er verändert dadurch Wurzelraum, Wasser- und Lufthaushalt sowie die Nährstoffverfügbarkeit. Welche Bodenbearbeitungsmaßnahmen notwendig sind, ergibt sich aus der Nutzung des Bodens und ist der jeweiligen Kultur anzupassen (GEISLER, 1988). Die konkreten Aufgaben liegen darin, einen lockeren feinkrümeligen Boden für die Saatgutablage herzustellen, Konkurrenzpflanzen um Licht, Wasser und Nährstoffe zu entfernen, den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt für die Kulturpflanzen optimal zu gestalten und von organischen oder mineralischen Dünger sowie mögliche Erntereste einzumischen (OEHMICHEN, 1983).

Bodenbearbeitungssysteme

Die Bodenbearbeitungssysteme lassen sich aufgrund ihrer Intensität und ihrer Eingriffswirkung in den Boden, wie in der folgenden Tabelle abgebildet, einteilen:

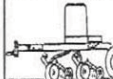
Bodenbearbeitungs- u. Bestellverfahren	Grundbodenbearbeitung	Arbeitsabschnitte Arbeitsabschnitte	Saat	Arbeitsgänge
Bodenbearbeitung mit Pflug		oder  		getrennt
		 oder 		Saatbettbereitung u. Saat kombiniert
				alle Arbeitsgänge kombiniert
Konservierende Bodenbearbeitung	 oder 	 oder 		getrennt
ohne Pflug mit Lockerung	 oder 	 oder 		Saatbettbereitung u. Saat kombiniert
	 oder 			alle Arbeitsgänge kombiniert
ohne Lockerung		 oder  oder 		Saatbettbereitung u. Saat kombiniert
Direktsaat (keine Bodenbearb.)				nur Saat

Abb. 6: Einteilung der Bodenbearbeitungssysteme (VOSZHENRICH/BRUNOTTE, 2008)

In der Abb. 6 sind die Unterteilung in die konventionelle, die konservierende Bodenbearbeitung und die Direktsaat sowie der notwendige und mögliche Maschineneinsatz bildlich dargestellt.

Die konventionelle und die konservierende Bodenbearbeitung unterscheiden sich im wesentlichen in der Verwendung des Pfluges – konventionelle Bodenbearbeitung findet immer mit dem Pflug statt; Konservierende Bodenbearbeitung ohne Pflug.

2.2.1. Unterscheidung der Bodenbearbeitungssysteme nach Intensität des Bodeneingriffs

Zwischen konventioneller Bodenbearbeitung mit Pflug, konservierender Bodenbearbeitung ohne Pflug und Direktsaat gibt es abweichende Angaben. Folgende Übersichtstabelle soll Abhilfe schaffen.

Intensität des Bodeneingriffs		
<u>Pflugwirtschaft:</u> Fortdauernder Einsatz des Pfluges zur Grundbodenbearbeitung bei Herbst- und Saatzfurche „Reiner Tisch“ Konventionelle Bearbeitung	<u>Pfluglose Wirtschaft:</u> flachlockernde, nichtwendende Bearbeitung; Verzicht auf Pflug; Mulchsaat in Stroh- oder Zwischenfruchtreste Konservierende Bodenbearbeitung	<u>Direktsaat:</u> Verzicht auf jegliche Bodenbearbeitung, Saat in den vor der Vorfrucht hinterlassenen Boden „No Till“ Direktsaat

Abb. 7: Intensität des Bodeneingriffs nach ELLMER, 2001 (aus DIEPENBROCK, 2005)

Bei der Unterscheidung der einzelnen Systeme kommt es manchmal zu Verwechslungen zwischen konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat. Für den deutschsprachigen Raum gilt als Definition für die Direktsaat, dass sie ohne jegliche Bodenbearbeitung seit der vorangegangenen Ernte auskommt. Direktsaat ist also ein System, bei dem die Saat mit Spezialsämaschinen in den unbearbeiteten Boden eingebracht wird.

Im Folgenden werden unterschiedliche Bodenbearbeitungsvarianten näher besprochen, da sie für den Versuch, der dieser Arbeit zugrunde liegt, von maßgeblicher Bedeutung waren.

2.2.1.1. Lockerbodenwirtschaft (konventionelle Bodenbearbeitung)

Nach GEISLER (1988) ist unter den Bedingungen des Ackerbaus im gemäßigten Klima der Pflug noch immer das wichtigste Bodenbearbeitungsgerät. Mit dem Pflug kann die Ackerkrume in unterschiedlicher Tiefe gelockert werden, sie wird außerdem gewendet und in einem gewissen Umfang auch gemischt.

Tab. 3: Lockerbodenwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)

System	Arbeitsweise	Verfahrensschritte	
Lockerbodenwirtschaft	vor jeder Hauptfrucht mit Scharpflug wendend auf volle Krumentiefe	Stoppelbearbeitung: < 15 cm	Schälflug, Scheibenpflug, Flügelschargrubber, Fräse, Zinkenrotor, Kreiselegge, Rüttelegge
		Grundbodenbearbeitung 10 – 40 cm	Scharpflug, Scheibenpflug mit Nachlaufgeräten: Packer, Netzege
		Saatbeetbereitung < 8 cm	Kombination Feingrubber mit Saategge, Wälzege und eventuell Walzen, Kreiselegge, Rüttelegge mit Walzenkombination
		Aussaat	übliche Drill-, Band-, Breit- oder Einzelkornsämaschine

Bei der Lockerbodenwirtschaft ist die Arbeitsweise durch den jährlichen Einsatz des Pfluges gekennzeichnet.

Vor jeder Hauptfrucht wird im Herbst mit dem Pflug bis auf die volle Krumentiefe gepflügt. Anschließend wird mit einem Kombinationsgerät das Saatbeet bereitet, und die Saat mit einer Drill-, Band-, Breit- oder Einzelkornsämaschine ausgebracht.

2.2.1.2. Direktsaat (Extreme Festboden-Mulchwirtschaft)

Nach ESTLER und KNITTEL (1996) stellt die Direktsaat die extremste Form der Feldbestellung dar. Hier wird in konsequenter Weise nicht nur auf die Grundbodenbearbeitung, sondern in weiterer Folge auch auf jegliches gezieltes Lockern und Krümeln des Bodens im Saathorizont verzichtet.

Tab. 4: Extreme Festboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)

System	Arbeitsweise	Verfahrensschritte	
Extreme Festboden-Mulchwirtschaft	Boden wird bei jeder Saat nur in der Saatreihe in Saattiefe bearbeitet	Stoppelbearbeitung:	----
		Grundbodenbearbeitung	----
		Saatbeetbereitung	----
		Aussaat	Mulchsaat Sämaschine

Der Eingriff in das Bodengefüge ist im Vergleich zu anderen Varianten am geringsten, was Vor-, aber auch Nachteile verursachen kann. Es können bei der Direktsaat Kosten eingespart werden, da das Pflügen und die Saatbeetbereitung entfallen. Diese Verfahren wird in getreideintensiven Gebieten genutzt und zwar überwiegend für Körnerfruchtarten (LIEBHARD 1995). Meist ist der Einsatz von Totalherbiziden notwendig, um den Ausfallaufwuchs sowie Beikräuter gezielt zu regulieren (PAUL, 2006). Bei der Festboden-Mulchwirtschaft kommt es vor allem auf das Strohmanagement und die Sämaschine an. Das Stroh muss zur Ernte gleichmäßig verteilt werden und die Aussaat muss mit geeigneten Sämaschinen erfolgen (KÖLLER, 2002; SCHMIDT, 2002).

2.2.1.3. Lockerboden-Mulchwirtschaft (tiefe Mulchsaat)

Alternativen zu den beiden genannten Varianten sind Kombinationen von Arbeitsgängen aus beiden Bodenbearbeitungsarten, so beispielsweise die Lockerboden-Mulchwirtschaft. Hierbei wird vor jeder Hauptfrucht bis in eine Tiefe von 15 cm gelockert, aber nicht gewendet. Auf den Pflug wird verzichtet.

Tab. 5: Lockerboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)

System	Arbeitsweise	Verfahrensschritte	
Lockerboden-Mulchwirtschaft	vor jeder Hauptfrucht wühlend lockern, meist weniger als die gesamte Krumentiefe	Stoppelbearbeitung: < 15 cm	Schälflug, Scheibenpflug, Flügelschargrubber, Fräse, Zinkenrotor, Kreiselegge, Rüttelegge
		Grundbodenbearbeitung 10 – 40 cm	Tief-, Zweischichtgrubber, Parapflug mit Packer
		Saatbeetbereitung < 8 cm	Kombination Feingrubber mit Saategge, Wälzegge und eventuell Walzen, Kreiselegge, Rüttelegge mit Walzenkombination
		Aussaat (Aufwuchs muss vor der Saat mit Totalherbizid behandelt werden)	übliche Drill-, Band-, Breit- oder Einzelkornsämaschine Mulchsaat-Sämaschine, spezielle Einkornsämaschine

In der Lockerboden-Mulchwirtschaft finden hauptsächlich der Grubber und andere flach arbeitende Werkzeuge wie Scheibenegge oder Fräse Anwendung (KÖLLER, 1993; GRUBER, 2003). Mit Hilfe des Grubbers wird in verschiedenen Tiefen die Erde mit den Pflanzenresten vermischt. Auch hier muss ein eventueller Aufwuchs oder Beikrautbestand mit einem Totalherbizid behandelt werden. In getreideintensiven Fruchtfolgen können Unkräuter zum Problem werden und bedürfen einer erhöhten Aufmerksamkeit in der Bekämpfung (PALLUT, 2003).

2.2.1.4. Festboden-Mulchwirtschaft (seichte Mulchsaat)

Bei der Festboden-Mulchwirtschaft findet nur eine oberflächennahe Bearbeitung bis in eine Tiefe von etwa 15 cm mit verschiedenen Arten von Grubbern oder Spatenrolleggen statt.

Tab. 6: Festboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)

System	Arbeitsweise	Verfahrensschritte	
Festboden-Mulchwirtschaft	flächendeckend vor der Saat in Saattiefe wühlend	Stoppelbearbeitung: < 15 cm	Flügelschargrubber, Zinkenrotor, Kreiselegge, Rüttelegge, Spatenrollegge
		Grundbodenbearbeitung 10 – 40 cm	
		Saatbeetbereitung < 8 cm	Zinkenrotor, Reihenfräse, Kreiselegge, Rüttelegge kombiniert mit Walzen
		Aussaat (Aufwuchs muss vor der Saat mit Totalherbizid behandelt werden)	Mulchsaat – Sämaschinen, spezielle Einzelkornsämaschinen

Auf die Grundbodenbearbeitung mit einem Pflug und die damit einhergehenden Wendung des Bodens wird verzichtet. Die Pflanzenreste verbleiben zum Großteil an der Bodenoberfläche und bilden dadurch eine Mulchschicht. Dadurch ergeben sich nach ESTLER und KNITTEL (1996) Vorteile die Förderung des Bodenlebens, die Verbesserung der Regenversickerungsfähigkeit des Bodens durch Erhöhung der Regenwurmanzahl und verringerter oberflächlicher Wasserabfluss. Bedeckung mit Mulch induziert steigende Infiltration und reduzierte Oberflächen Evaporation (BONO et al., 2008). Nachteile entstehen aus der veränderten Beikrautpopulation, die eine andere Bekämpfungsstrategie erfordert (PALLUTT und GÜNTER, 2006).

2.2.1.5. Integriertes Bodenbearbeitungssystem

Beim Integrierten Bodenbearbeitungssystem handelt es sich um eine Kombination der vorhergehenden Modelle. Es gibt keine strikte Vorgabe in Bezug auf Verwendung des oder Verzicht auf den Pflug. Je nach Witterungsbedingungen kommt es zu einem Einsatz des Pfluges oder nicht.

Tab. 7: Integriertes Bodenbearbeitungssystem (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)

System	Arbeitsweise	Verfahrensschritte	
Integriertes System	vor jeder Hauptfrucht mit Scharpflug wendend auf volle Krumentiefe	Stoppelbearbeitung: < 15 cm	Schälplflug, Scheibenpflug, Flügelschargrubber, Fräse, Zinkenrotor, Kreiselegge, Rüttelegge
		Grundbodenbearbeitung 10 – 40 cm	Scharpflug, Scheibenpflug mit Nachlaufgeräten: Packer, Netzegge
		Saatbeetbereitung < 8 cm	Kombination Feingrubber mit Saategge, Wälzegge und eventuell Walzen, Kreiselegge, Rüttelegge mit Walzenkombination
		Aussaat	übliche Drill-, Band-, Breit- oder Einzelkornsämaschine

Dieses System stellt eine Kombinationsmöglichkeit der Grundbodenbearbeitungsgeräte Pflug, Grubber und Scheibenegge dar. Je nach Witterung, Vorfrucht und Bedarf wird die entsprechende Maschine eingesetzt.

2.2.2. Bodenverdichtung durch Bodenbearbeitung

Die derzeitigen Produktionsverfahren in der Landwirtschaft geben Grund zur Annahme, dass in den nächsten Jahren bei unsachgemäßem Einsatz der immer schwerer werdenden Maschinen und Erntegeräte die Böden darunter schwer zu leiden haben. Es werden mit schlagkräftigen Mähdreschern oder Zuckerrübensvollerntern die Gesamtlasten von 50 t bereits überschritten. Notwendig wird der Einsatz dieser Großmaschinen durch den Druck auf die Landwirtschaft, kostengünstiger zu produzieren (DIEPENBROCK et al., 2005). Doch die Entwicklung hin zu großen Maschinen erhöht auch die Radlasten und die damit verbundenen Einflüsse auf den Boden. Werden nun diese schweren Maschinen bei ungünstiger Witterung eingesetzt so können nachhaltig schwere Schäden angerichtet werden.

Die Bodenverdichtung an sich ist die Erhöhung der Masse pro Volumeneinheit (g/cm^3) und bedeutet gleichzeitig eine Verminderung des Porenvolumens bis hin zu einem Wert, den der Boden noch unbeschadet übersteht und seine Funktionen weiter erfüllen kann. Wird der Boden allerdings über dieser Belastbarkeit hinaus verdichtet, so entstehen Bodenschäden, welche die Bodenfunktion stören. Zu den Bodenfunktionen zählen die Regulationsfunktion (Puffer, Speicher und Leiter für Wasser, Sauerstoff, Nähr- und Schadstoffe), die Lebensraumfunktion (Mikroorganismen und Bodentiere) und letztlich auch die Produktionsfunktion (landwirtschaftliche Nutzung). Entstehen durch unsachgemäße Bodenbearbeitung Schadverdichtungen, so werden die Funktionen des Bodens zeitweilig oder dauerhaft gestört. Dies betrachtet man als bewirtschaftungsbedingte Beschädigung des Bodengefüges (DIEPENBROCK et al., 2005).

2.2.2.1. Ursachen

Bewirtschaftungsbedingte Bodenschadverdichtung entstehen bei Bearbeitung oder Befahren eines Bodens, der zum Zeitpunkt des Maschineneinsatzes durch einen zu hohen Wassergehalt gekennzeichnet ist. Folgende Größen gelten zu den auslösenden Faktoren: die Radlast, der Kontaktflächendruck und die Überfahrhäufigkeit. Bei einer hohen Belastung setzt sich der Druck bis in den Unterboden fort. Bei entsprechend hohen Radlasten, wie unter den schweren Erntemaschinen, finden sich noch in 1 m Tiefe Drücke

von 20 bis 30 kPa.

Die Ursachen für die immer höheren Radlasten der Maschinen in der Landwirtschaft sind auch in den ökonomischen Zwang zur Rationalisierung zu suchen, denn daraus resultiert die Verwendung von leistungsfähigen, aber auch immer schwereren Ackerschleppern, Erntemaschinen und Transportfahrzeugen (DIEPENBROCK et. al., 2005).

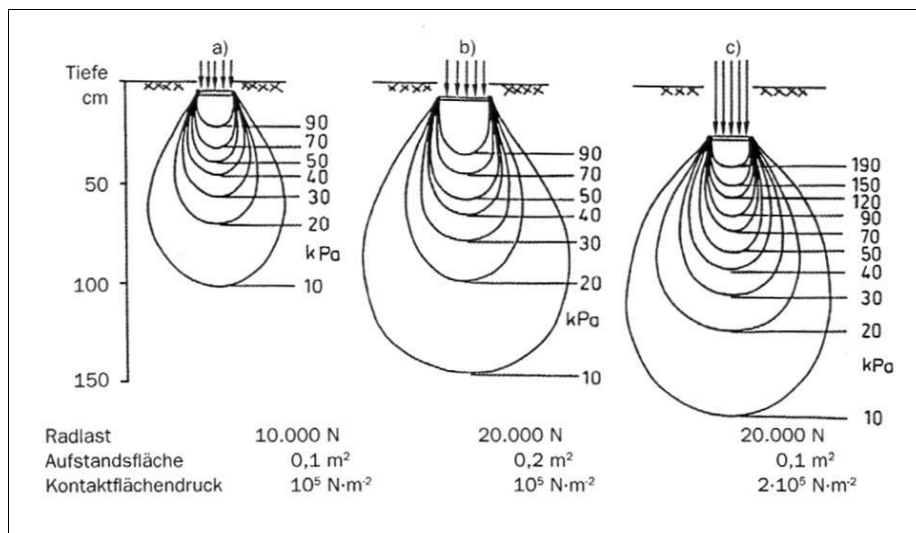


Abb. 8: Bodenzwiebeln (WEYER, 2008)

Die Beanspruchung des Bodens steigt mit zunehmender Überfahrhäufigkeit. Je öfter also eine Maschine oder ein Traktor über eine Stelle fahren, umso stärker wird der darunter liegende Boden verdichtet. Übersteigt nun die Belastung durch Schlepper, Geräte oder Erntefahrzeuge die bodenspezifische Belastbarkeit, so wird der Boden geschädigt.

2.2.2.2. Auswirkung

Die Schädigung auf den Boden resultiert hauptsächlich in der Reduzierung der Luft- und Wasserleitenden Grobporen und deren Kontinuität. Daraus ergeben sich eine gestörte Wasser- und Luftleitfähigkeit, eine verringerte hydraulische Leitfähigkeit und eine verminderte Luftkapazität.

Dadurch werden wiederum die Verlagerung und die Dynamik von Stoffen im Boden beeinträchtigt. Eine Folge davon können verstärkte Nährstoffverluste durch Auswaschung und Denitrifikation sein. Außerdem hemmen Bodenschadverdichtung aufgrund des Sauerstoffmangels auch die biologische Aktivität. Die Lebensmöglichkeit der Mikroorganismen werden negativ beeinflusst und aerobe Zersetzungs-, Ab- und

Umbauprozesse werden vermindert. Darüber hinaus bewirken Bodenschadverdichtung auch ein eingeschränktes und verändertes Wurzelwachstum. Dies zeigt sich in reduzierten und verminderten Pflanzenerträgen.

Durch das Fehlen von Grobporen kommt es zu einer geringeren Durchlüftung des Bodens und zu einem gestörtem Wasserhaushalt.

Verdichtete Böden verlieren neben ihrer Regulationsfunktion auch ihre Lebensraumfunktion. Die Lebensbedingungen für Regenwürmer verschlechtern sich, da sie unter der Sauerstoffarmut und möglicher Staunässe leiden. Sie wandern daher in weniger dichtgelagerte Bodenbereiche aus.

Verdichtete Böden werden zu einer Kostenbelastung im Betrieb, da sie die Betriebsausgaben sowohl für Dünger, Pflanzenschutz, aber auch für Meliorationsmaßnahmen nach oben treiben, wenn mögliche Mindererträge durch die verschlechterten Wachstumsbedingungen ausgeglichen werden.

2.2.2.3. Eingriffsintensität

Die angeführten unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme haben Einfluss auf unterschiedliche Bodeneigenschaften. So beziehen sich die physikalischen Wirkungen etwa auf die Bodenstruktur und den Porenraum, die biologischen auf die Tätigkeit der Bodenlebewesen und die chemischen auf die Nährstoffverteilung und -dynamik.

Ein Effekt der wendenden Bodenbearbeitung ist oft die Entstehung der typischen Pflugsohlenverdichtung, die im wesentlichen durch das in der Furche fahrende Schlepperrad verursacht wird. Die Verdichtung zeigt sich im Porenraum durch eine Abnahme der groben und feinen Poren. Durch die Bearbeitung mit dem Pflug wird die Krume überlockert, die Krumenbasis allerdings tendenziell verdichtet, da sie stärkeren Belastungen ausgesetzt wird (DIEPENBROCK et al., 2005).

Unter der Mulchsaat und Direktsaat verändert sich die Situation dahingehend, dass der Boden im Krumenbereich dichter lagert. Die Grobporen und Feinporen nehmen mit der Tiefe zu und geben dem Boden damit eine geregelte Luft und Wasserführung. Durch die herabgesetzte Bodenbearbeitung wird außerdem der Lebensraum des Bodenlebens nicht mehr so häufig und heftig gestört, was vor allem den Regenwürmern erlaubt, sich auszubreiten und ihnen eine ungestörte Arbeit erlaubt.

2.2.2.4. Humuswirtschaft

Der Humus beinhaltet die im Boden enthaltene tote organische Substanz, vorwiegend Pflanzenreste, deren Abbauprodukte und tierische Organismen (FINCK, 2007). Er ist Träger und Förderer der Bodenfruchtbarkeit und gibt den Bodenlebewesen eine Lebensgrundlage. Darüber hinaus bestimmt er wichtige Eigenschaften des Bodens und dient den Pflanzen als Vorratslager an Nährstoffen.

Eine Einteilung der organischen Substanz aus landwirtschaftlicher Sicht:

- **Dauerhumus:** er ist für die dunkle Färbung der Oberböden verantwortlich und wird durch die Hilfe von Bodenorganismen gebildet; schwer oder nicht zersetzbarer Rückstand der organischen Bodensubstanz
- **Nährhumus:** Stoffgemisch aus pflanzlichen Rückständen, abgestorbenen Bodenlebewesen, sowie deren Umsetzungsprodukten, durch die Mikroorganismen schnell abbaubare Teil des Humus bildet die Grundlage des Lebens im Boden. Er ist die Nahrungsquelle für die im Boden lebenden Organismen wie Bakterien, Pilze und Kleinlebewesen. Beim Abbau werden die gebundenen Nährstoffe freigesetzt und sind für das Pflanzenwachstum verfügbar (FINCK, 2007).

Ohne Humus können auf Böden keine Nutzpflanzen wachsen. Die Bedeutung des Humus liegt in der umfassenden Verbesserung beinahe sämtlicher Bodeneigenschaften. Die Förderung der biologischen Aktivität hat eine phytosanitäre Wirkung. Die Verbesserung des Bodengefüges führt zu einer erhöhten Aggregatstabilität, einer guten Bodendurchlüftung, verbesserter Wasserspeicherung und besserer Durchwurzelung. Die Bodenerosion wird durch geringe Verschlämmungs- und Verdichtungsneigung, erhöhte Infiltrationsrate und somit geringer Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen verringert. Humöse Böden erwärmen sich im Frühjahr leichter (WEYER, 2008).

2.3 Einfluss der Bodenbearbeitung auf das Bodenleben

Durch den verminderten Einsatz des Pfluges können sich die Regenwurmpopulationen erholen und die Bestände wachsen wieder (EMMERLING, 2002). Die Regenwurmgänge dienen den Pflanzen als Wurzelraum, wodurch sie schneller in die Tiefe vordringen können. Außerdem helfen die Makroporen, die so geschaffen werden, bei der schnellen Infiltration von Wasser in den Untergrund bei auftretendem Starkregen.

Wichtig für eine Erhöhung der Regenverdaulichkeit des Bodens sind vor allem tief reichende Regenwurmgänge, da durch sie das Wasser rasch in die Tiefe geführt werden kann. Auch SCHRADER et al. (2005) weisen auf die Bildung eines stabilen Grobporensystems unter Direktsaat hin. Durch die Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung fehlt die Störung mit dem Pflug im Bodengefüge, wodurch die Regenwurmgänge erhalten bleiben.

Nicht nur verhältnismäßige große Tiere wie der Regenwurm werden durch die konservierende Bodenbearbeitung gefördert – auch die mikrobielle Aktivität wird erhöht (ROGASIK, et al. 2006). Konservierende Bodenbearbeitung verhindert den Transport von organischem Material in die Tiefe, wie es beim Pflugeinsatz geschieht. Durch die Anreicherung von organischem Material in der oberen Bodenschicht wird auch die mikrobielle Aktivität erhöht und durch den Verzicht auf den Pflugeinsatz wird das sich einstellende Milieu nicht gestört und in die Tiefe verlagert.

3. Material und Methoden

3.1. Versuchsstandort

3.1.1. Geographische Lage – Großraum

Geologisch gesehen gehört Groß-Enzersdorf zur Niederterrasse des Marchfeldes, der Praterterrasse. Der Versuchsstandort befindet sich im südwestlichen Marchfeld.

Der Großraum ist eine Ebene von ca. 100.000 ha Fläche, welche im Norden vom Hügelland des Weinviertels, im Osten von der March, im Süden von der Donau und im Westen vom Bisamberg-Zug begrenzt wird. Auf einem Anteil von 75% der Fläche wird hier Landwirtschaft betrieben, Wiesen und Weiden machen aufgrund der trockenen klimatischen Bedingungen nur einen sehr geringen Teil aus. Ein Großteil der Wälder wurde in Landschaftsräumungen entfernt. Das Marchfeld liegt im ackerbaulich am intensivsten genutzten Produktionsgebiet in Österreich (SZALAY, 2003).

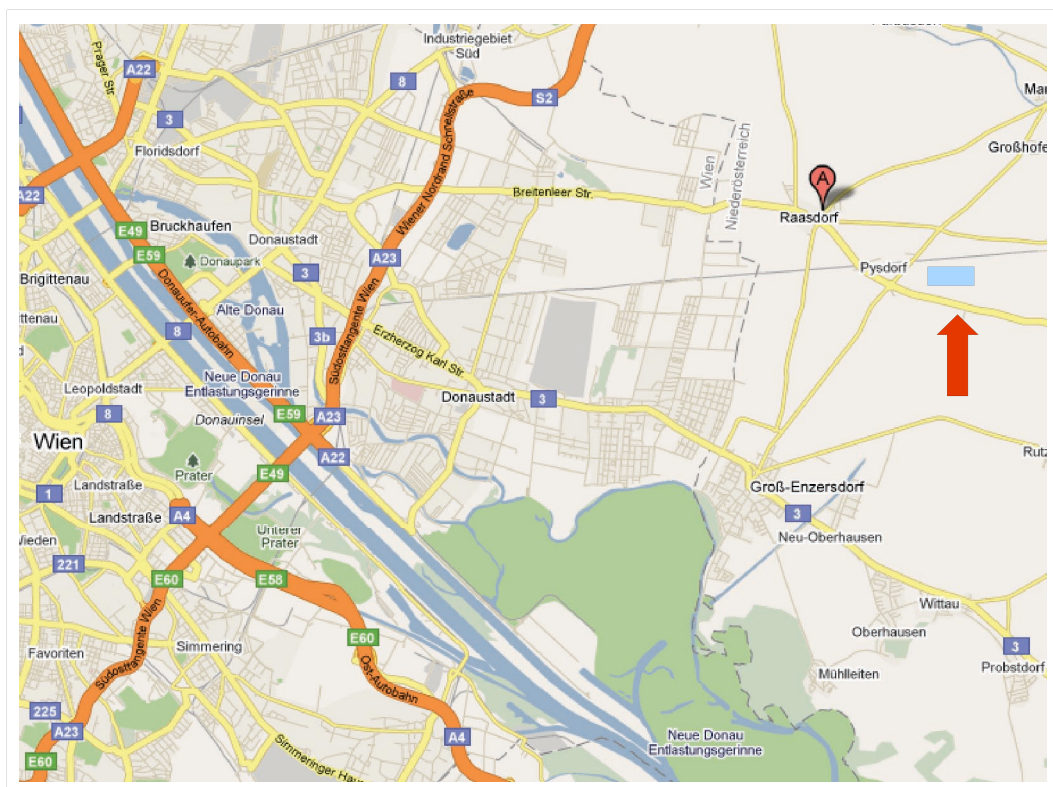


Abb. 9: Standort der Versuchsparzellen in Raasdorf bei Wien (Feld der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf der Universität für Bodenkultur, Quelle: <http://maps.google.de>, 02.05.2010)

Der Versuchsstandort Raasdorf befindet sich ca. 8 km östlich von Wien und liegt auf einer Seehöhe von 153 m. Das Versuchsfeld liegt ungeschützt in offener und windiger Lage am Raasdorfer Schlag der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf der Universität für Bodenkultur.

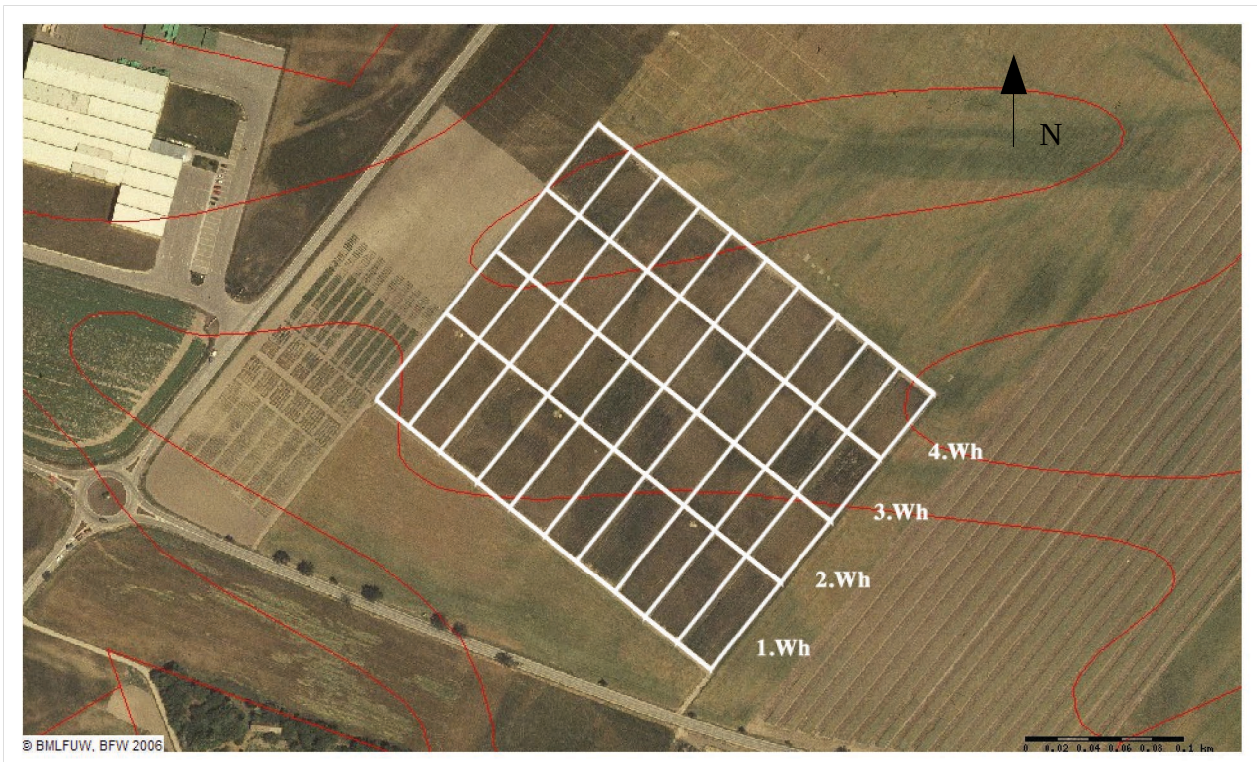


Abb. 10: Lageplan der Versuchsanlage (Quelle: www.eama.at, 15.03.2010)

Das eingefügte Satellitenbild zeigt die Versuchsfläche bei Raasdorf. Links im Bild zu erkennen ist der Kreisverkehr nahe der Ortschaft Raasdorf. In nördlicher Richtung geht die Ausfahrt Richtung Gänserndorf, östlich nach Leopoldsdorf, südlich nach Groß Enzersdorf und westlich zurück nach Raasdorf. In der Bildmitte sind die Parzellen der Versuchsanlage „Bodenbearbeitungssystemvergleich“ deutlich ersichtlich.

3.1.2. Boden

Der Boden der Versuchsanlage ist ein für das Marchfeld typischer Tschernosem, der aus den alluvialen Feinsedimenten der Donau entstanden ist. Eine Feinkartierung der Versuchsfläche erfolgte durch das Institut für Bodenforschung und Baugeologie der Universität für Bodenkultur im Jahr 1996. Die einzelnen Horizonte des Bodens können wie folgt beschrieben werden.

Der Ap – Horizont hat eine Mächtigkeit zwischen 30 und 40 cm und weist eine graubraune Farbe auf. Der Oberboden ist humos und der Humusgehalt beträgt etwa 3%.

Der Ah – Horizont weist eine Mächtigkeit von etwa 10 cm auf und reicht bis etwa 50 cm. Hier liegt der Humusgehalt bei 2,5%. Die vorliegende Humusform ist Mull.

Die Krume fällt bei Bearbeitung schollig bis blockig und neigt bei starken Regenfällen zur Verschlammung, Verkrustung und Dichtlagerung. Die Durchwurzelbarkeit in den tiefen Bodenschichten ist sehr gut. Der pH - Wert liegt im alkalischen Bereich zwischen 7,5 und 7,6. Der Kalkgehalt nimmt mit der Tiefe des Bodens zu und steigt dabei von ~21% (0-30 cm) auf ~26% (30-50 cm Bodentiefe).

Der AC – Horizont reicht von 50 bis 90 cm in die Tiefe. Hierbei handelt es sich um einen humusfleckigen Schwemmlöß. Die Bodenschicht ist stark lehmig, mäßig durchwurzelt und belebt und reagiert ebenfalls alkalisch.

Es folgt der D – Horizont, der aus ockerfarbigem Schwemmlöß besteht, von 90 – 120 cm in die Tiefe geht und schließlich auf mittelfeinem Schotter aufliegt.

Der Boden weist eine hohe Wasserspeicherfähigkeit und eine mäßige Durchlässigkeit auf. Es liegt ein C/N – Verhältnis von 8 bis 10 vor, sowie eine Austauschkapazität von etwa 250 mval je 100 g, die zu 85% an mineralische Teile gebunden ist. Die Feldkapazität wird bei 28,4 Volumsprozent, der permanente Welkepunkt bei 14,7 Volumsprozent Wassergehalt in der Krume erreicht. Daraus ergibt sich eine von den Pflanzen nutzbare Wasserkapazität von etwa 14 Volumsprozent.

3.1.2.1. Bodenprofil eines typischen Tschernosems

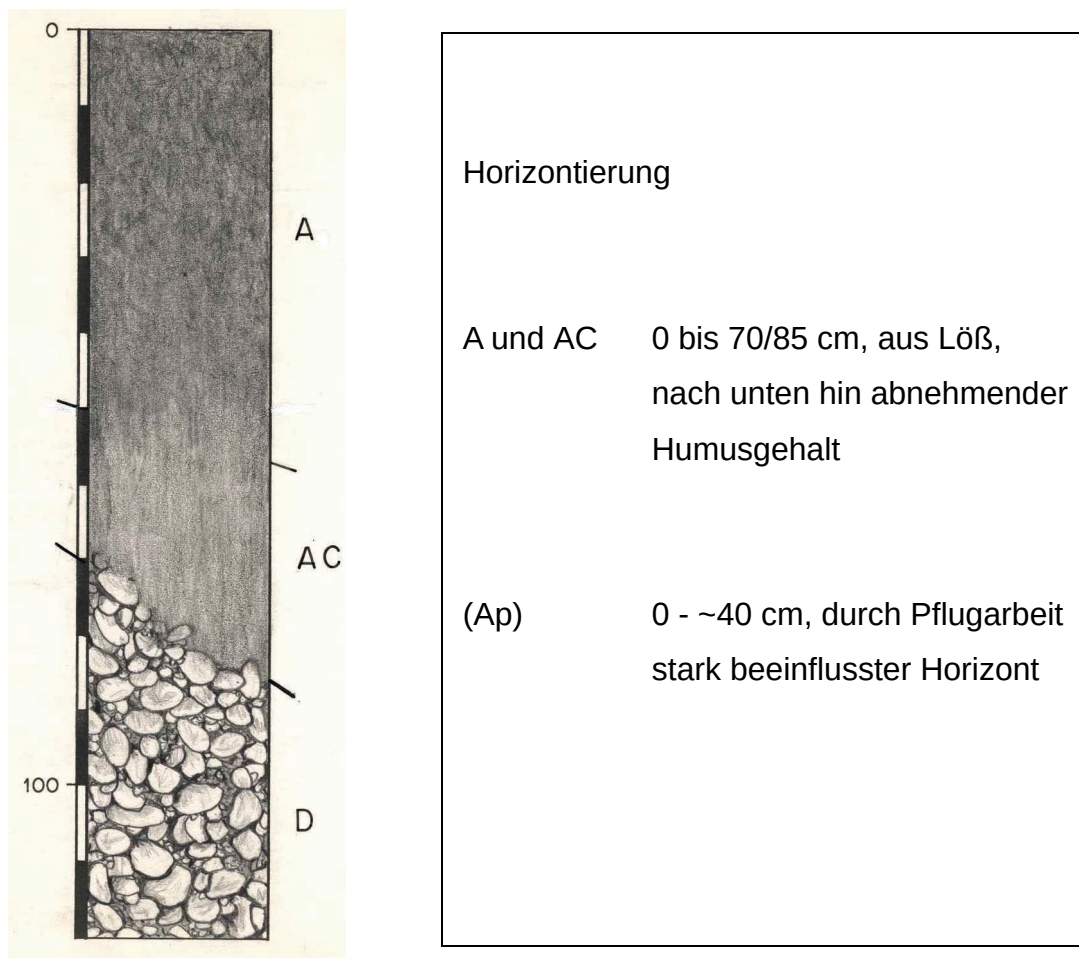


Abb. 11: Bodenprofil eines Tschernosems (<http://gis.lebensministerium.at/eBOD>, 08.03.2010)

Den D-Horizont und Grundwasserträger bilden Schichten aus bis zu 7 m mächtigen, quatiären Donauschotter über tertiärem Tegel.

Der Boden selbst hat ein ausgereiftes Profil. Die Schichten sind klar abgegrenzt und voneinander getrennt. Der pH-Wert ist aufgrund des kalkhaltigen Ausgangsgesteins der alkalisch.

Wie alle Tschernoseme weist der Boden der Versuchsanlage eine AC-Horizontierung auf. Es gibt keinen klar abgetrennten B-Horizont mehr. Der A-Horizont ist mächtig und schwankt in die Tiefe. Ebenso heterogen in der Tiefe ist der darunter liegende AC-Horizont.

3.1.3. Klima und Witterung

Der Versuchsstandort Raasdorf gehört zum pannonischen Klimagebiet und ist geprägt von heißen niederschlagsarmen Sommern sowie kalten und schneearmen Wintern. Die Sonnenscheindauer beträgt bis zu 2000 h/Jahr und die Temperatursumme während der Vegetationszeit beträgt ca. 3000°C/d. Zudem sind eine geringe relative Luftfeuchtigkeit und geringe Taubildung typisch für dieses Gebiet.

Die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,8°C und die langjährige Jahresniederschlagsmenge beträgt 520 mm. Das Maximum der Niederschläge fällt im Juni, die Minima liegen im Februar und Jänner. Die Temperaturen erreichen im Juli ihr Maximum. Im langjährigen Mittel liegt die Anzahl der Sommertage (Temperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) bei 60 Tagen, die Anzahl der heißen Tage (Temperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$) bei 13 Tagen. Zwischen Oktober und Mai ist mit Frösten zu rechnen, wobei die Anzahl der Frosttage (Temperaturtagesminimum $< 0^{\circ}\text{C}$) 77 beträgt und die Anzahl der Eistage (Temperaturtagesmaximum $< 0^{\circ}\text{C}$) bei 23 liegt.

Tab. 8: langjährige Monatsmittel (1971-2000) von Niederschlag in mm und Temperatur in °C am Versuchsstandort Groß Enzersdorf (Quelle: www.zamg.ac.at, 15.03.2010)

Zeitraum	Niederschlag (mm)	Temperatur (°C)
Jänner	28,0	- 0,4
Februar	27,9	1,1
März	35,4	5,3
April	38,8	9,7
Mai	55,2	14,8
Juni	67,4	17,8
Juli	59,5	20,0
August	50,2	19,6
September	49,8	15,2
Oktober	32,1	9,7
November	42,7	4,2
Dezember	33,0	1,1
Summe:	520	Jahresmittel: 9,8

3.1.3.1. Versuchsjahr 2006

Die durchschnittlichen Monatsniederschläge weichen im Versuchsjahr teilweise stark von den langjährig gemessenen ab. So war im April und Mai der Niederschlag etwa um die Hälfte mehr als im Durchschnitt. Besonders auffallend ist der August mit beinahe dreimal so starken Niederschlägen verglichen mit dem Langjahresschnitt. Wobei die Summe der Niederschläge über das ganze Jahr gerechnet niedriger (460 mm) als in den Langzeitmessungen (520 mm) war. Auch das Jahresmittel der Temperaturen liegt beinahe um ein Grad Celsius höher (2006 bei 10,7 °C und im langjährigen Mittel bei 9,8 °C).

Tab. 9: Monatsmittel 2006 von Niederschlag in mm und Temperatur in °C am Versuchsstandort Groß Enzersdorf (Quelle: Wetterdaten auf <http://ipp.boku.ac.at>, 15.03.2010)

Zeitraum	Niederschlag (mm)	Temperatur (°C)
Jänner	19,2	- 4,6
Februar	18,6	- 0,8
März	36,6	3,2
April	59,4	11,5
Mai	85,4	14,4
Juni	25,2	18,5
Juli	2,6	23,2
August	140,8	18,2
September	15,0	17,7
Oktober	13,8	12,3
November	27,0	7,4
Dezember	16,8	7,6
Summe:	460,4	Jahresmittel:10,7

Im Versuchsjahr lag die Lufttemperatur in den ersten drei Monaten unter dem langjährigen Mittel. Im April und Juli kam es zu starken Abweichungen vom Durchschnitt. Allerdings kam es im August auch aufgrund der hohen Niederschläge und der Anzahl an niederschlagsreichen Tagen zu einer deutlichen Abkühlung und Temperaturen unter dem langjährigen Monatsmittel, während hingegen die letzten vier Monate des Jahres überdurchschnittlich warm waren. Das Temperaturminimum liegt im Jänner, die Anzahl der Frosttage beträgt 84 (Temperaturtagesminimum < 0°C), die Anzahl der Eistage 29 (Temperaturtagesmaximum < 0°C). Das Temperaturmaximum liegt im außergewöhnlich heißen Juli. Im Sommer gab es eine Anzahl von 63 Tagen über 25°C und 27 Tagen über 30°C.

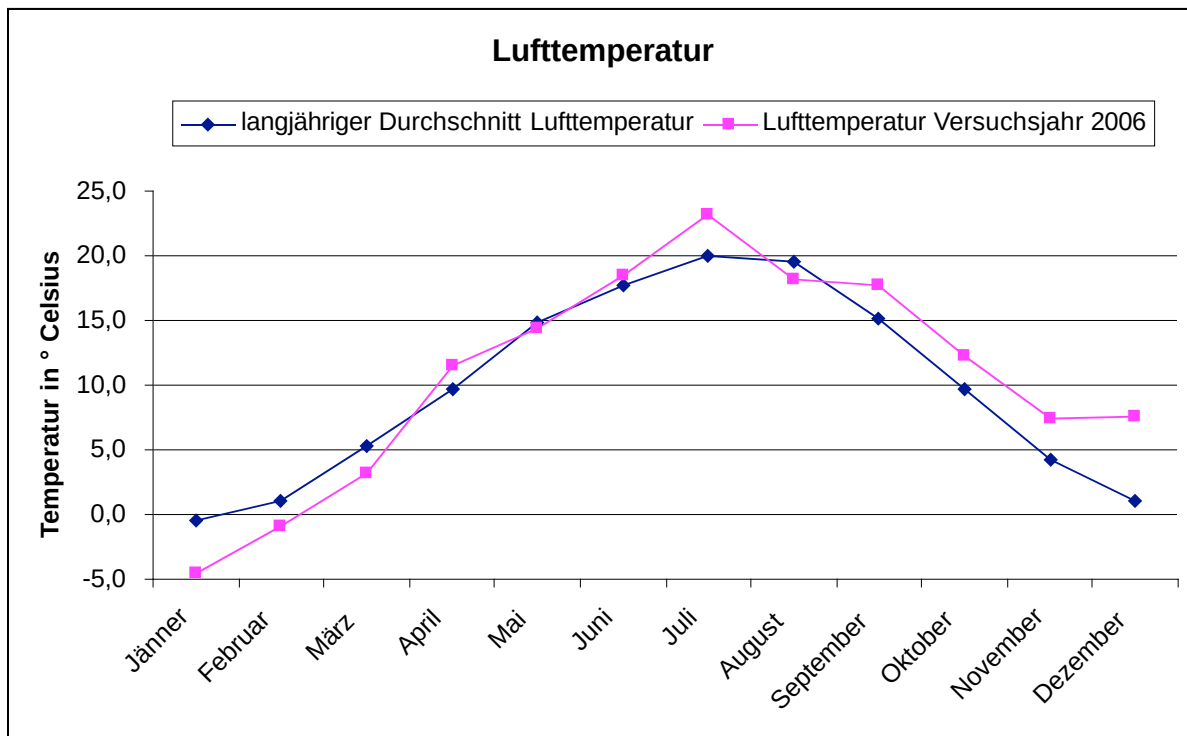


Abb. 12: Monatsmittelwerte der Temperatur in ° Celsius im langjährigen Durchschnitt (1971-2000) und im Versuchsjahr 2006 (Quelle: Wetterdaten auf <http://ipp.boku.ac.at>, 15.03.2010)

Im Versuchsjahr 2006 ergab sich eine Jahresniederschlagsmenge von 460 mm. Das Maximum der Niederschläge fiel in den Monaten Mai und August. Im Mai war der Niederschlag etwa ein Viertel höher als im langjährigen Durchschnitt, im August sogar das Dreifache. Die übrigen Monate regnete es entweder ähnlich viel oder aber zum Teil erheblich weniger als im langjährigen Mittel. Besonders die Monate Juni und Juli waren von außergewöhnlicher Trockenheit gekennzeichnet.

Die Witterung im Versuchsjahr unterscheidet sich daher deutlich vom langjährigen Mittel. Auch die Niederschlagsverteilung ist im Jahr 2006 eher untypisch, wie aus Abb. 13 deutlich hervorgeht.

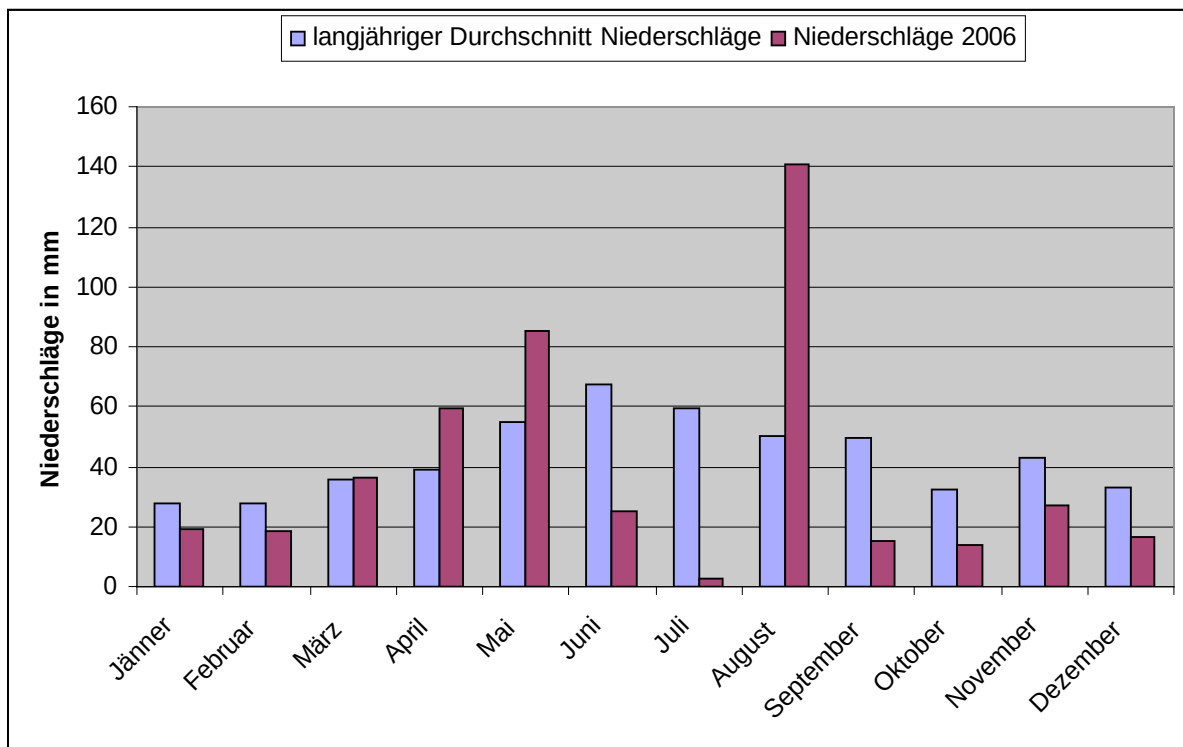


Abb. 13: Monatsmittelwerte der Niederschläge in mm im langjährigen Durchschnitt und im Versuchsjahr 2006, Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf (Quelle: Wetterdaten auf <http://ipp.boku.ac.at>, 15.03.2010)

Die Abb. 13 zeigt deutlich die Abweichungen vom langjährigen Mittel. Deutlich sichtbar gehen die Abweichungen im April und Mai über das langjährige Mittel hinaus. Die geringen Niederschläge im Juni und Juli, der darauf folgende Starkregen im August sowie die geringen Niederschläge in den letzten 4 Monaten des Jahres zeigen die außerordentlich starken Abweichungen vom Langjahresschnitt.

3.2. Versuchsanlage

Der Versuch auf dem Raasdorfer Schlag wurde als zweifaktorieller Versuch mit den Faktoren Bodenbearbeitung und Fruchtfolge konzipiert und als Spaltanlage mit 5 x 2 Parzellen in vierfacher Wiederholung angelegt.

Die gesamte Versuchsanlage hat eine Fläche von 5,15 ha, ist 264 m breit und 195 m lang. Die Parzellen der ersten Wiederholung haben eine Größe von 60 x 24 m, insgesamt 1.440 m². Die Parzellen der restlichen 3 Wiederholungen sind 24 x 40 m, in Summe 960 m².

An den Längsseiten der Parzellen befinden sich etwa zwei Meter breite Grünstreifen als Abgrenzung zur den Nachbarparzellen. An den Stirnseiten sind ca. 10 m breite Streifen, die als Vorgewende angelegt wurden, wodurch das Befahren der angrenzenden Parzelle nicht notwendig ist.

Im Untersuchungsjahr 2006 wurden auf den Parzellen Winterweizen und Sommerhartweizen angebaut. In der anschließenden Grafik werden die Elemente der Versuchsdurchführung - sowohl die verschiedenen Bodenbearbeitungen als auch die unterschiedlichen Fruchtarten - farblich dargestellt.

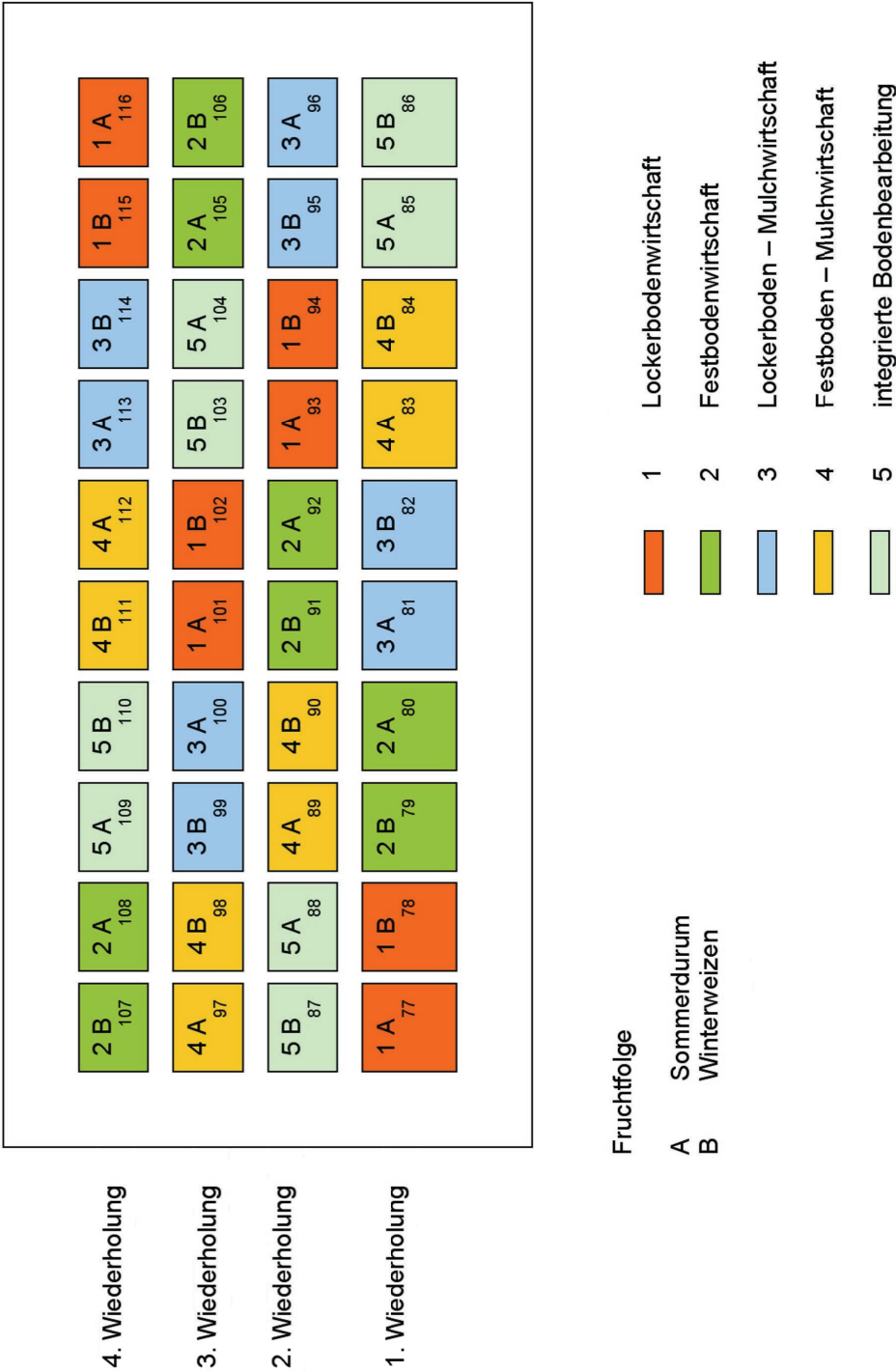


Abb. 14: Schema der Versuchsanlage (Versuchsbeschreibung LIEBHARD, ergänzt durch STREBL)

3.2.1. Versuchsfaktor Bodenbearbeitung

Die Versuchsanlage beinhaltet fünf unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme in vier Wiederholungen.

Vergleichende Bodenbearbeitungssysteme:

3.2.1.1. Lockerbodenwirtschaft (konventionelle Bodenbearbeitung)

Kennzeichnend für die Lockerbodenwirtschaft ist der jährliche Einsatz des Pfluges, der zur Grundbodenbearbeitung herangezogen wird.

Ein Argument für den häufigen Einsatz in der Praxis ist die jahrelange, mitunter jahrzehntelange Erfahrung der Landwirte mit dieser Maschine. Das Pflügen in der heutigen Zeit unterscheidet sich allerdings stark vom Pflügen vor dem Einsatz der zugkräftigen Schlepper. Durch die leistungsstarken Traktoren und immer bessere Technik ist es heute möglich, tiefer zu arbeiten und nach der Ernte für die nächste Kultur „reinen Tisch“ zu machen. Dadurch werden aber die Böden oft stark überlockert und organisches Material in tiefe Bodenschichten verbracht, wo es unter Luftabschluss vergraben wird (ESTLER und KNITTEL, 1996).

3.2.1.2. Direktsaat (Extreme Festboden-Mulchwirtschaft)

Bei der extremen Festboden-Mulchwirtschaft wird zur Gänze auf die Bodenbearbeitung verzichtet. Die Kulturen werden in die ungestörten Böden, die noch mit den Ernteresten der Vorfrucht bedeckt sind, gesät. Ein vorhandener Bewuchs wird in der Regel mit einem Totalherbizid beseitigt. Es erfolgt keine Einarbeitung der organischen Masse in den Boden. Dies geschieht nur durch die Bodenlebewesen.

Die Saat ist allerdings gänzlich ohne Bodenbearbeitung nicht möglich. Bei der Direktsaat wird der Boden unmittelbar vor dem Sächar, also in der Saatrille, mit entsprechenden Werkzeugen gelockert. Zwischen den Säscharen wird der Boden jedoch nicht bearbeitet (KÖLLER, 1993; KÖLLER, 2002).

3.2.1.3. Lockerboden-Mulchwirtschaft (tiefe Mulchsaat)

Auch hier erfolgt keine Bodenbearbeitung mit dem Pflug, sondern wird mittels Tiefengrubber und einem Flügelschargrubber (bis 15 cm) durchgeführt. Der Strichabstand des Tiefengrubber beträgt 50 cm und die Bearbeitungstiefe liegt bei maximal 60 cm. Durch den breiten Strichabstand wird nicht der gesamte Boden gelockert. Mittels des Flügelschargrubbers erfolgt eine intensive Einmischung der Pflanzenrückstände in die Oberkrume.

3.2.1.4. Festboden-Mulchwirtschaft (seichte Mulchsaat)

Bei dieser Bodenbearbeitung wird auf den Einsatz des Pfluges verzichtet. Im Gegensatz zur tiefen Mulchsaat wird hierbei auch kein Tiefenlockerer eingesetzt, womit die ursprüngliche Schichtung des Bodens zerstört wird. Das Hauptbearbeitungsgerät ist daher meist ein Flügelschargrubber mit einer Packerwalze als Nachläufer. Der Flügelschargrubber ermöglicht eine flache Bodenbearbeitung auf Saattiefe, dadurch erfolgt eine seichte Einmischung der organischen Masse. Bei diesem Bodenbearbeitungssystem verbleiben allerdings bis zu 30% der organischen Restmasse an der Bodenoberfläche.

3.2.1.5. Integriertes Bodenbearbeitungssystem

Bei dieser Variante der Bodenbearbeitung werden die Geräte Pflug, Tiefenlockerer und Flügelschargrubber in Kombination eingesetzt. Es gibt grundsätzlich kein starres Vorgehensmuster, die Bodenbearbeitungsgeräte kommen je nach Vor- bzw. Nachfrucht und Witterung zum Einsatz (LIEBHARD, 1995).

3.2.2. Bestimmung der Lagerungsdichte

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurden nur drei Wiederholungen der Parzellen aus der Fruchtfolge B mit Winterweizen herangezogen. Für den Versuch selbst wurden in verschiedenen Bodentiefen jeweils drei Bodenproben gezogen. Die Versuchsdurchführung wird anhand einiger Bilder anschaulich beschrieben:

Folgende Geräte waren zur Versuchsdurchführung notwendig:

- a) Stechzylinder mit zwei passenden Deckeln (Volumen 200 cm³)
- b) Schlagstock mit angebrachtem Schützring
- c) Hammer
- d) Spachtel

Ablauf der Bestimmung

Schritt 1:

Die Zylinder werden mit einem Deckel leer eingewogen, und das Gewicht wird notiert. Jeder Zylinder ist mit einer Nummer versehen, und die Deckel werden mit den jeweils gleichen Nummern beschriftet. Dies geschieht, damit die Zylinder im Feld mit dem passenden Deckel verschlossen werden.

Schritt 2:

Um in der gewünschten Bodentiefe die Proben zu entnehmen, wird mit dem Spachtel eine passende Fläche gesäubert und die Erde bis zur vorgesehenen Tiefe abgegraben. Der Zentimetermaßstab zeigt die gewünschte Tiefe von 25 cm an.



Der Maßstab markiert die gewünschte Tiefe von 25 cm

Abb. 15: geöffnetes Bodenprofil bis 25 cm Bodentiefe (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 3:

Anschließend werden die Stechzylinder angesetzt, mit welchen aus dem Profil in der entsprechenden Tiefe die Proben entnommen werden. Die Zylinder wurden vor der Probenahme mit einem Deckel jeweils gemeinsam leer eingewogen. Sowohl die Deckel als auch die Zylinder sind mit Nummern versehen, um sie anschließend wieder richtig zuordnen zu können.



Abb. 16: Stechzylinder in der vorgegebenen Bodentiefe von 25 cm (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 4:

Die Zylinder werden mit dem Schlagstock und dem darauf angebrachten Stützring mit Hilfe eines Hammers in die Erde getrieben. Beim Eintreiben in die Erde muss darauf geachtet werden, dass sich die Zylinder nicht verkanten und sie gerade eingeschlagen werden.



Abb. 17: Schlagstock mit Stützring auf einem Zylinder angesetzt (Foto: STREBL, 2006)

Dieses Foto zeigt, wie die Zylinder in den Boden eingeschlagen wurden. Bei den beiden links sieht man noch einen Teil des oberen Randes, sie sind noch nicht ganz eingeschlagen. Der Zylinder ganz rechts ist bereits ganz in den Boden getrieben worden, nur noch der Ring am Ende des Schlagstockes ist noch sichtbar.



Abb. 18: Zur Hälfte in den Boden geschlagene Zylinder auf vorgegebener Tiefe (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 5:

Nachdem die Zylinder bis zum oberen Rand in die Erde vorgetrieben wurden, wird mit einer Spachtel rund herum die Erde entfernt. Die Zylinder werden so aus dem sie umgebenden Erdreich herausgegraben. Dabei dürfen sie jedoch nicht gehoben werden oder sonst bewegt werden, da die Probe, die sie beinhalten, sonst gestört wird.



Abb. 19: Die Erde um die Zylinder wird entfernt (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 6:

Die Erde, die über den oberen Rand des Zylinders übersteht wird vorsichtig mit einer Spachtel oder einem Messer entfernt, um die Oberseite mit dem dazu passenden Deckel abschließen zu können. Die Deckel und die Zylinder wurden zu Beginn beschriftet um sie im Feld nicht zu verwechseln.



Abb. 20: Der Zylinder wird an der Oberseite mit dem dazu passenden Deckel geschlossen (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 7:

Nach Schließung des Zylinders auf der Oberseite wurde mit der Spachtel vorsichtig unter den Zylinder gestochen. Auf diese Art wird er aus der Erde entfernt. Danach wird die Unterseite ebenso sauber abgestrichen und mit einem zweiten Deckel versehen. Beim Ausheben aus der Erde und dem Abstreichen der Unterseite darf der Zylinderinhalt nicht gestört werden oder Material aus der Probe entfernt werden. Dies beeinträchtigt die Messung.



Abb. 21: Der Zylinder wird mit dem Deckel auf der Unterseite verschlossen (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 8:

Die anderen beiden Zylinder werden ebenfalls an der Ober- und Unterseite vorsichtig mit den dazugehörigen Deckeln verschlossen. Es muss darauf geachtet werden, dass die passenden Deckel für die richtigen Zylinder genommen werden, sowohl für die Oberseite als auch für die Unterseite.



Abb. 22: Alle 3 Zylinder sind an der Ober- und Unterseite verschlossen (Foto: STREBL, 2006)

Schritt 9:

Die Grundfläche, auf der die drei Zylinder ausgestochen wurden, wird gesäubert. Im Anschluss wird bis zur nächsten Beprobungsebene tiefer gegraben. Der Prozess beginnt von neuem.

Schritt 10:

Sobald alle Proben gesammelt sind, werden die Deckel der Unterseite entfernt, die Zylinder wieder gewogen und für 24 Stunden in einem Trockenschrank bei 110°C getrocknet. Danach werden die trockenen Proben nochmals gewogen und erneut für 12 Stunden bei 70°C im Trockenschrank getrocknet. Nach den verstrichenen 12 Stunden Trocknungsdauer wird auf Gewichtskonstanz kontrolliert.

Anschließend werden die Zylinder gesäubert und für die nächste Probennahme präpariert.

3.2.3. Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit mit Tensionsinfiltrrometer

Zur Erfassung der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens werden bei der vorgegebenen Methode folgende Messinstrumente verwendet: Tensionsinfiltrrometer, das Pressure Infiltrrometer, Doppelring-Infiltrrometer und die Soil Core Methode.

Für den vorliegenden Versuch wurde das Tensionsinfiltrrometer verwendet, da es auch in leicht ungesättigtem Bereich eine Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit erlaubt (vgl. REYNOLDS et al, 2000). Da es leicht und schnell handzuhaben ist, und es die Makroporenstruktur des Bodens, welche den nah-gesättigten und gesättigten Fluss reguliert, nur wenig beeinflusst, eignet es sich gut für die in-situ Messung (ELRICK AND REYNOLDS; 1992 in REYNOLDS ET AL, 2000). Außerdem ist es aufgrund der separaten Infiltrationsplatte stabiler und man benötigt ein geringeres Wasservolumen. Die Flexibilität des Messbereiches ist größer durch eine stufenlos regulierbare Tensionseinstellungen zwischen 0 - 30 cm Wassersäule. Es ermöglicht auch eine elektronische Datensammlung mittels Datenlogger.

Mithilfe der so gemessenen zeitabhängigen Infiltrationsrate lassen sich die Wasserleitfähigkeit, die Sorptivität und die Makroporenanteile eines wasserungesättigten Bodens ermitteln.

Aufbau

Das Tensionsinfiltrrometer besteht aus zwei stehenden Zylindern (Vorratsbürette und Unterdruckrohr, *reservoir* und *bubbling tower*), die auf einer gemeinsamen Bodenplatte (*base*) angebracht sind. Auf beiden Zylindern sind Maßbänder zum Ablesen der Einheiten angebracht. Beide Zylinder sind während der Messung mit Wasser gefüllt. Im Unterdruckrohr wird die einwirkende Saugspannung eingestellt.

Der Zylinder wird am oberen Ende mit einem luftdichten Verschluss versehen, in dessen Mitte sich ein Röhrchen befindet. Mittels dieses Röhrchens (*air entry port*) lassen sich verschiedene Saugspannungen anlegen. Die beiden mit Wasser gefüllten großen Zylinder (*bubble tower* und *reservoir*) sind mit einer Leitung (*bubbling tube*) verbunden.

Die Luft, die in das Unterdruckrohr eindringt, wird durch die verbindende Leitung in die Vorratsbürette (*reservoir*) übergeleitet.

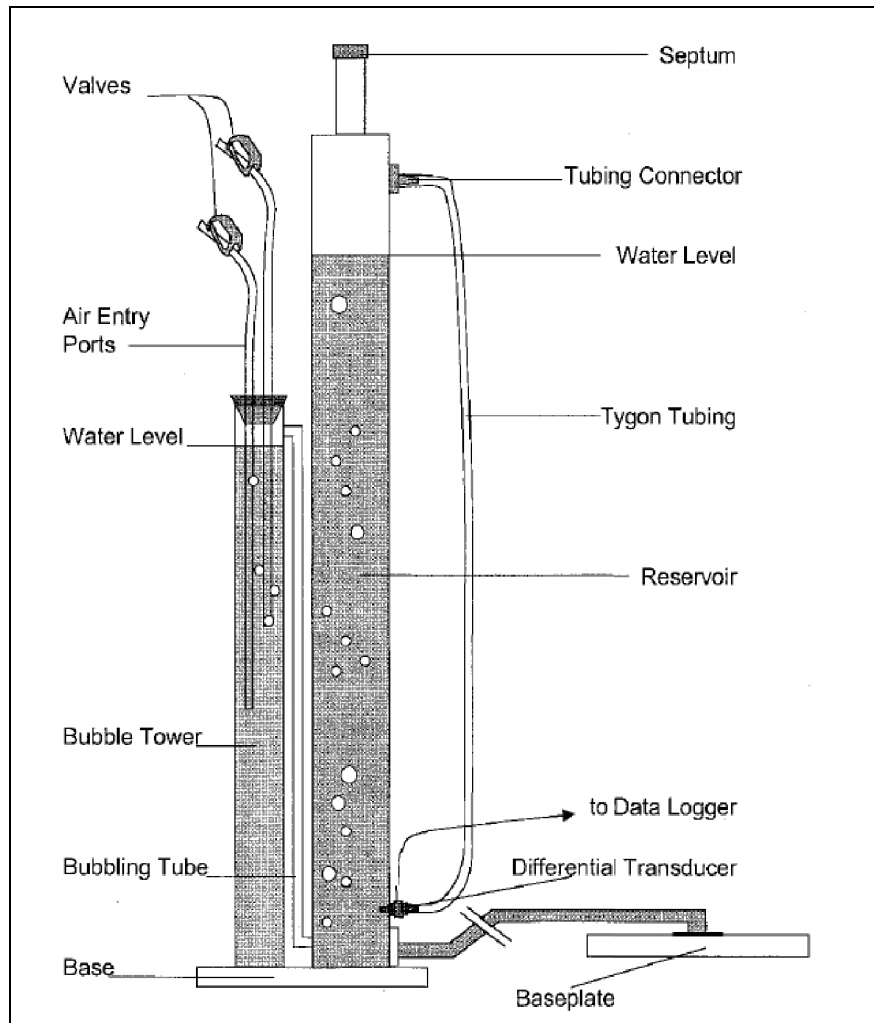


Abb. 23: Modell eines Tensiometers (nach ANKENY, 1988)

Das Wasser wird über eine Membran (*baseplate*), die über der Versuchsfläche angebracht ist, in den Boden infiltriert.

Die Glasplatte (*baseplate*) ist mit einer feinmaschigen Nylonfiltertuch-Membran mit 0,53 μm Maschenabstand überzogen und wird auf der Kontaktfläche am ungesättigten, vorbereiteten planen Boden aufgestellt.

Die Durchflussrate kann direkt von der Wassersäule abgelesen (wie beim verwendeten Gerät) oder wahlweise über einen Druckaufnehmer mit Datenlogger ausgelesen werden, wenn dieser vorhanden ist.

Die exakte Versuchsdurchführung wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit

Bei der Probenziehung muss darauf geachtet werden, dass keine Stelle ausgewählt wird, die sichtlich verdichtet ist. Schlepperspuren, Fahrgassen, Menschen- und Tiertritte sind im Feld erkennbar und sollten als Probenflächen vermieden werden, da diese Einflüsse die Messung verfälschen können.

Sobald eine passende Stelle in der Versuchsparzelle gefunden wurde, wird die zu beprobende Fläche vorbereitet. Zuerst ist eine Fläche für die Membranplatte vorzubereiten. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass keine spitzen Strohreste, Steinchen oder andere Pflanzenreste zurückbleiben, um eine Verletzung der Nylonfiltertuch-Membran zu vermeiden. Herausragende Wurzeln werden mit einer kleinen Schere abgeschnitten, Steinchen oder Pflanzenreste werden vorsichtig entfernt, um nicht zu große Störungen in der Oberfläche hervorzurufen. Neben der Messfläche wird dann die Aufstandsfläche für die Bodenplatte des Infiltrometers vorbereitet. Diese muss nur so eben sein, dass das Messinstrument ungestört zum Stehen kommt.

Auf der Messfläche wird ein Metallring aufgelegt, der dem Radius der Membranplatte entspricht. Nun wird gewaschener Quarzsand innerhalb des Ringes aufgebracht und die Oberfläche vorsichtig mit einem Lineal glatt gestrichen. Der Sand dient dazu, eventuell vorhandene Unebenheiten noch auszugleichen und einen ausreichenden Kontakt zwischen dem Membranteller und der Oberfläche zu gewährleisten.

Die Oberfläche des Sandes wird mit einer Sprühflasche vorsichtig mit Wasser besprüht, aber aus einer etwas größeren Entfernung, damit nicht eventuell durch zu große Tropfen die Oberfläche des Sandes wieder gestört wird. Durch den feuchten Kontaktsand soll aufsteigende Luft in die Nylonfiltertuch-Membran vermieden werden. Diese würde die Messergebnisse stören und verfälschen.

Die Membranplatte selbst wird unter Vakuum gewässert, damit keine Lufteinschlüsse entstehen können. Danach werden die Infiltrationsplatte und das Wasserreservoir gemeinsam auf die vorbereiteten Flächen aufgestellt. Beim Aufsetzen der Platte ist darauf zu achten, dass keine Lufteinschlüsse entstehen.

Anschließend werden durch Einstellen der Kapillare am Unterdruckrohr die verschiedenen Saugspannungsstufen (-10 cm, -4 cm und -1 cm) nacheinander eingestellt und die Höhe des Wasserspiegels im Versorgungsrohr wird abgelesen und notiert. Der zeitliche Abstand beim Notieren beträgt bei -10 cm etwa drei Minuten, bei -4 cm eine Minute und bei -1 cm

30 Sekunden, sodass die Änderung des Wasserspiegels ausreichend genau auf der 1mm - Skala abgelesen werden kann.

3.3. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Programms SAS mittels Varianzanalyse durch die Prozeduren PROC MIXED im Falle wiederholter Messungen (Tiefenstufen, Saugspannungsstufen) sowie PROC GLM. PROC MIXED erlaubt in der Varianzanalyse die Berücksichtigung wiederholter Messpunkte, für die die Unabhängigkeitsannahme nicht zutrifft. Die optimale Korrelationsstruktur wurde über das Akaike Informationskriterium (AIC) ermittelt (Piepho et al., 2005). Im Falle signifikanter Faktoren in der Varianzanalyse (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) wurde ein anschließender Mittelwertsvergleich mittels Tukey-Test durchgeführt. Regressionen wurden im Programm SigmaPlot analysiert.

4. Ergebnisse und Besprechung der Ergebnisse

4.1. Lagerungsdichte

Aus jeder Bodenbearbeitungsvariante wurden zur Bestimmung der Lagerungsdichte jeweils drei Parzellen (= Wiederholungen) aus beiden Fruchtfolgen bemustert und untersucht.

4.1.1. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Lockerbodenwirtschaft

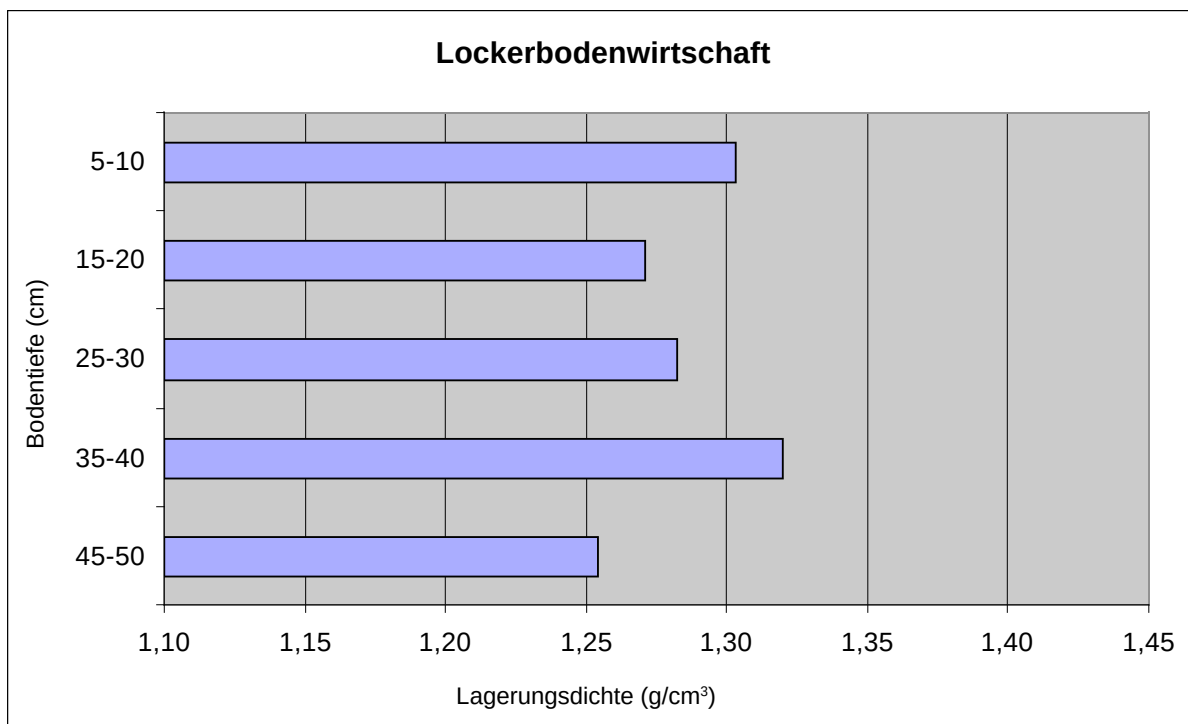


Abb. 24: Lagerungsdichte bei Lockerbodenwirtschaft

Bei der Lockerbodenwirtschaft, in der der Pflug die zentrale Rolle in der Bearbeitung einnimmt, wurde im Versuchsjahr eine relativ hohe Lagerungsdichte von etwa 1,30 g/cm³ in der obersten Schicht festgestellt. Dieser Wert wurde nicht erwartet, da aufgrund der Pflugbearbeitung ein hohes Porenvolumen vorliegt und eine niedrige Lagerungsdichte folgt.

4.1.2. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Festbodenwirtschaft

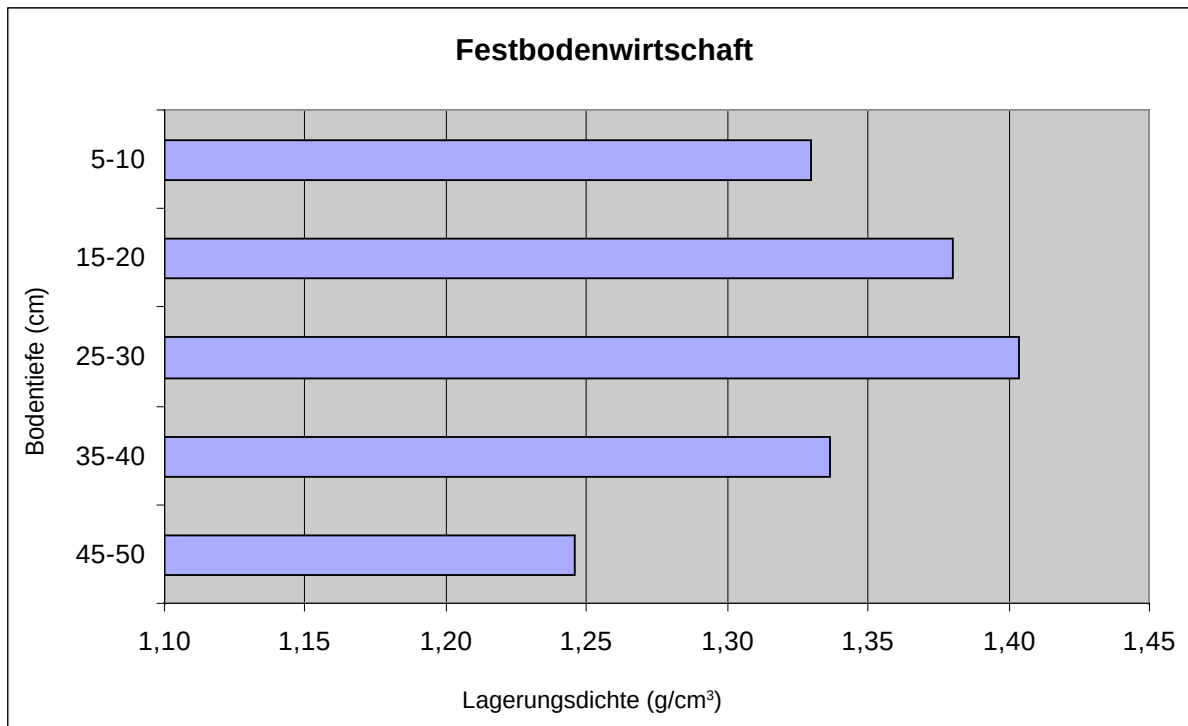


Abb. 25: Lagerungsdichte bei Festbodenwirtschaft

Erwartungsgemäß findet sich in der Bodenbearbeitungsvariante Festbodenwirtschaft die höchste Lagerungsdichte mit ca. 1,35 g/cm³ in der obersten untersuchten Schicht. Hier findet die geringste Bearbeitung des Saathorizontes statt und durch die verwendeten Werkzeuge wird hier am geringsten in das Bodengefüge eingegriffen. Dadurch kann sich ein natürlich dicht gelagerter Boden ausbilden. Mit zunehmender Tiefe steigt auch die Lagerungsdichte, bis bei 35 cm eine Umkehr eintritt und der Wert in der letzten untersuchten Tiefe bei durchschnittlich 1,25 g/cm³ liegt.

4.1.3. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Lockerboden–Mulchwirtschaft

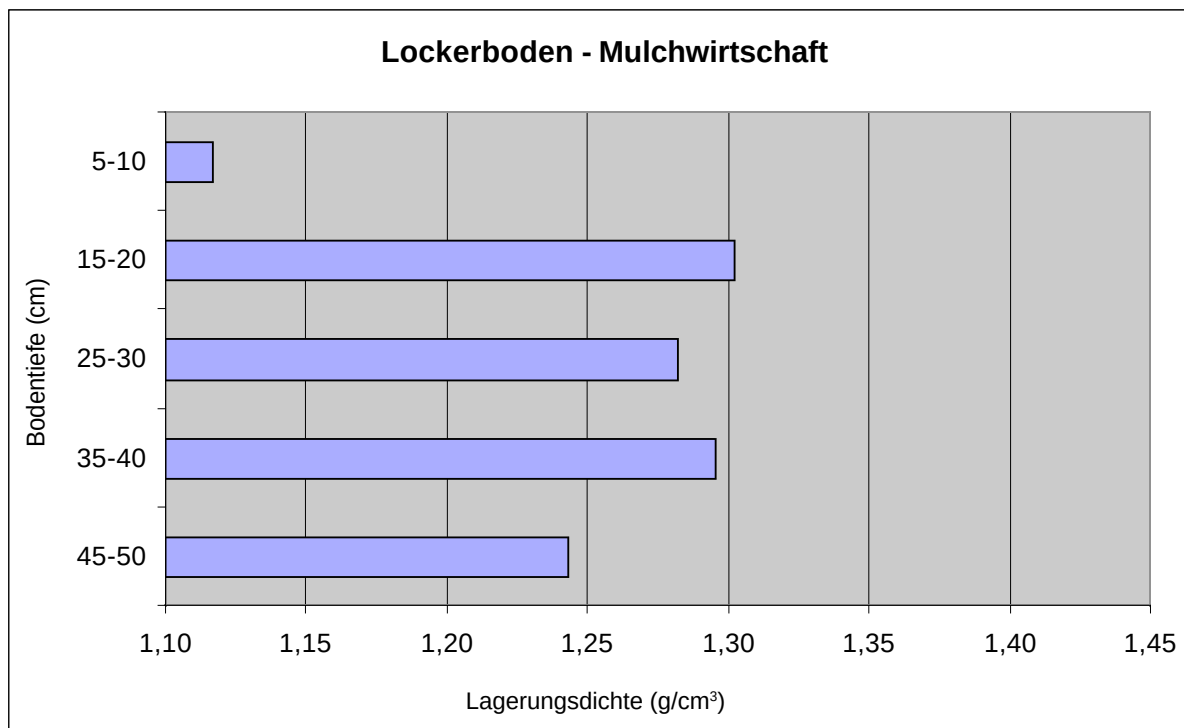


Abb. 26: Lagerungsdichte bei Lockerboden–Mulchwirtschaft

Bei der Lockerboden-Mulchwirtschaft findet sich die geringste Lagerungsdichte in der obersten Schicht. Sie beträgt hier nur knapp mehr als 1,1 g/cm³. Durch den Einsatz von nur flach mischenden Werkzeugen in dieser Bodenbearbeitungsvariante befindet sich ein hoher Streuanteil in der oberen Bodenschicht. Dies führt neben der wiederholten Bearbeitung der Flächen mit einem flach arbeitenden Grubber zu der geringen Lagerungsdichte in der oberen Schicht. In der danach folgenden Schicht findet nur geringe Bearbeitung statt, hier steigt die Lagerungsdichte bereits wieder an. Bis in eine Tiefe von 35 – 40 cm bewegt sich die Lagerungsdichte um einen Wert von 1,3 g/cm³, erst in der untersten untersuchten Schicht (45 – 50 cm Tiefe) sinkt der Wert wieder auf knapp unter 1,25 g/cm³. Auch hier findet so tief nie eine Bodenbearbeitung statt.

4.1.4. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Festboden–Mulchwirtschaft

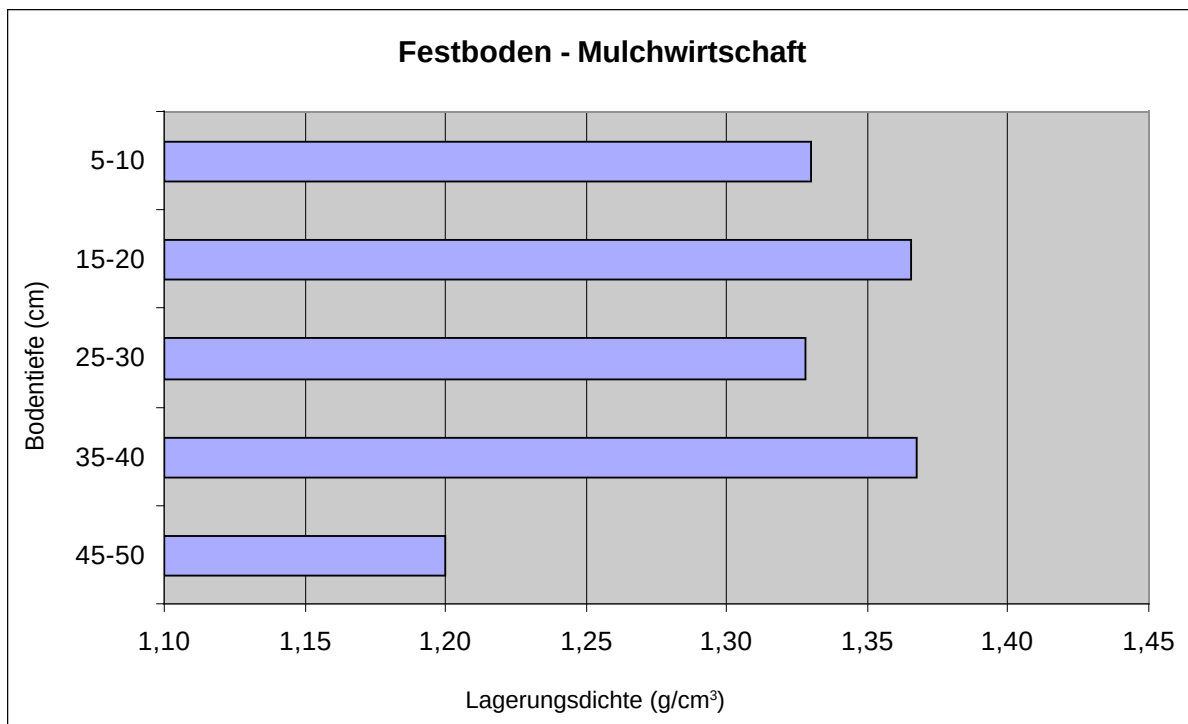


Abb. 27: Lagerungsdichte bei Festboden–Mulchwirtschaft

Aus der Abb. 27 ist ersichtlich, dass bei der Festboden–Mulchwirtschaft im oberen untersuchten Bereich (0 – 25 cm Bodentiefe) die Lagerungsdichte relativ hoch war. In den darunter liegenden Schichten schwankt sie um den Wert von 1,35 g/cm³, um schließlich in der untersten Tiefe von 45 – 50 cm wieder einen durchschnittlichen Wert um 1,20 g/cm³ zu erreichen. In dieser Variante fand nur eine oberflächennahe Bearbeitung bis 15 cm Tiefe statt und keine Grundbodenbearbeitung. Die Erntereste werden nur flächendeckend in den Saathorizont eingebracht und nicht tiefer verlagert oder vergraben.

4.1.5. Lagerungsdichte bei Bodenbearbeitungsvariante Integrierte Bodenbearbeitung

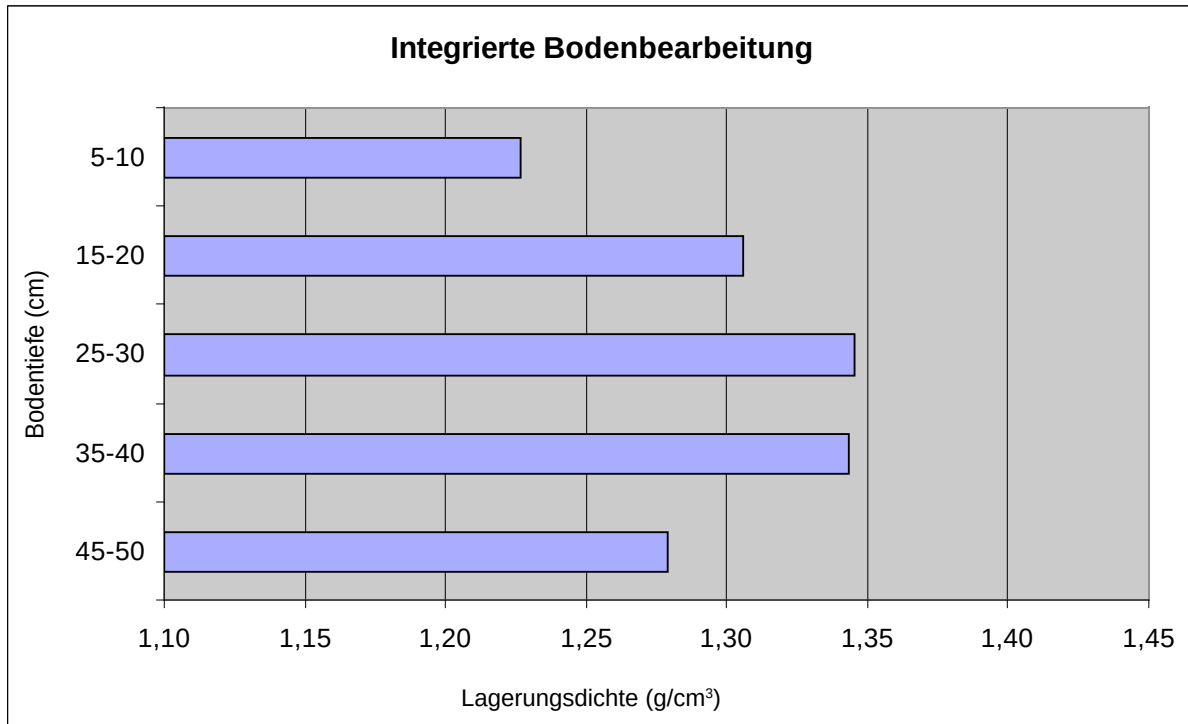


Abb. 28: Lagerungsdichte bei Integrierter Bodenbearbeitung

Bei der Integrierten Bodenbearbeitung wurde in der Oberkrume (bis 10 cm Tiefe) ein durchschnittlicher Wert von $1,22 \text{ g/cm}^3$ vorgefunden. Die Integrierte Bodenbearbeitung zeichnet sich dadurch aus, dass flachwendende und tiefgreifende Werkzeuge kombiniert und variiert werden. Je nach Witterung, Vorfrucht und Bedarf wird zwischen dem Einsatz von Grubber, Scheibenegge und Pflug variiert.

4.1.6. Varianzanalyse der Lagerungsdichte

Wie die Varianzanalyse zeigt, hat die Art der Bodenbearbeitung eine signifikante Wirkung auf die Lagerungsdichte, allerdings unabhängig von der Tiefe. Die Mittelwertsvergleiche der Varianzanalyse werden mit Hilfe des T-Tests ermittelt. Dessen Ergebnisse sind in Abb. 29 enthalten.

Tab. 10: Lagerungsdichte Varianzanalyse

Effekt	F - Statistik	Pr > F
BB	7,41	0,0037
Block	1,8	0,2098
T	3,34	0,0960
BB*T	1,46	0,3073
BB*Block	1,87	0,5151
Block*T	0,44	0,7794

BB ...Bodenbearbeitung

Block ...Wiederholung

T ...Tiefe

4.1.7. Mittelwert der Lagerungsdichte aller Bodenbearbeitungsvarianten

Da die Varianzanalyse nur einen mittleren signifikanten Unterschied zwischen den Varianten zeigt, wurde der Mittelwert über alle untersuchten Tiefen für die jeweilige Bodenbearbeitung gebildet.

Wie sich anschaulich zeigt, weist die Lockerbodenwirtschaft (Pflugeinsatz) eine durchschnittliche Lagerungsdichte von 1,29 g/cm³ auf und unterscheidet sich signifikant von der Festboden- sowie der Lockerboden-Mulchwirtschaft. Die höchste Lagerungsdichte findet sich bei der Festbodenwirtschaft (geringste Bodenbearbeitung) mit 1,34 g/cm³. Bei der Lockerboden-Mulchwirtschaft wurde eine geringe Lagerungsdichte als bei der Lockerbodenwirtschaft gemessen, nämlich 1,25 g/cm³. Dies kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass durch regelmäßiges Lockern mit Grubbern kein Pflughorizont entstehen kann.

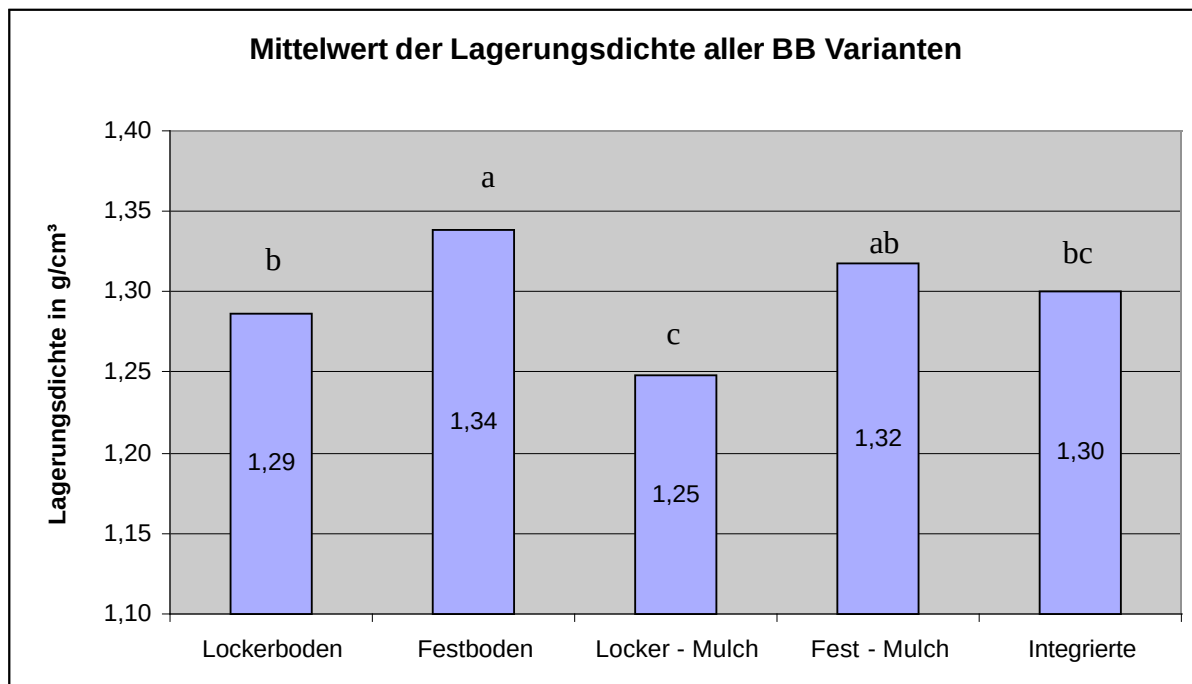


Abb. 29: Mittelwert der Lagerungsdichte über alle Schichten in allen BB-Varianten

Die Festboden-Mulchwirtschaft weist eine nicht signifikant niedrigere Lagerungsdichte (1,32 g/cm³) auf als die Festbodenwirtschaft (1,34 g/cm³). Die Integrierte Bodenbearbeitung, mit Pflugeinsatz je nach Witterung oder Notwendigkeit, unterscheidet sich nicht signifikant von den anderen Varianten, nur von der Bodenbearbeitungsvariante Festboden-Mulchwirtschaft.

4.2. Hydraulische Leitfähigkeit

4.2.1. Fruchtfolge A Sommerweizen

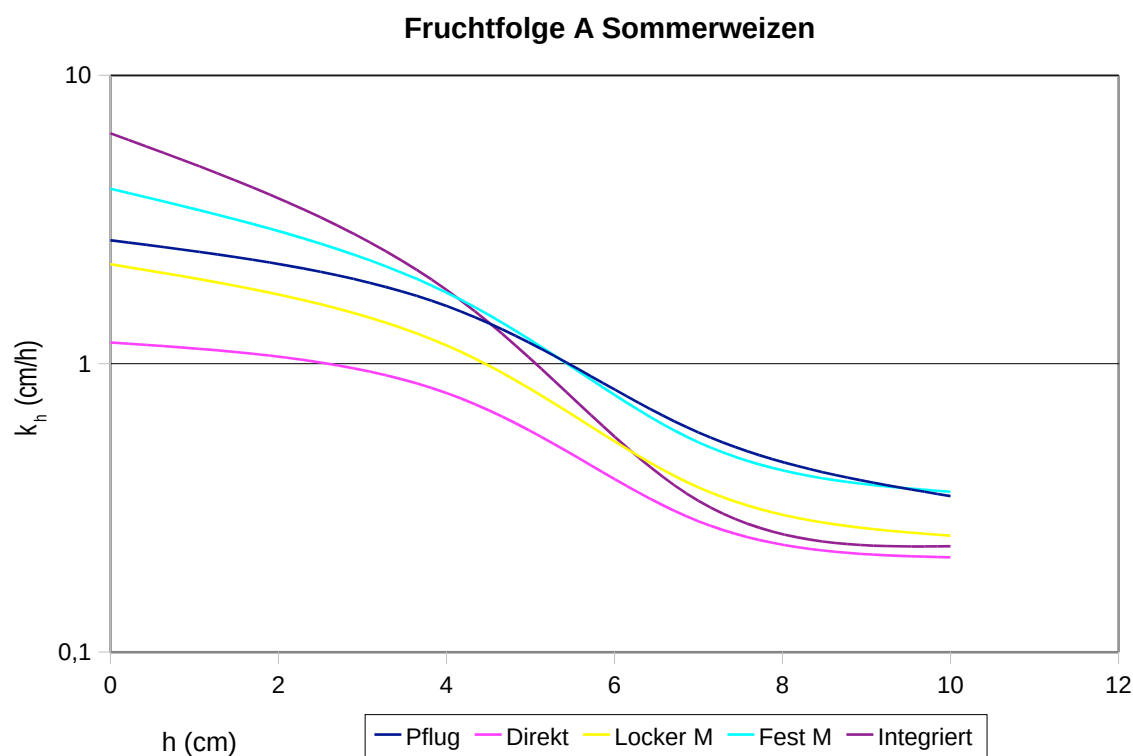


Abb. 30: Ergebnisse der Infiltrationsversuche, Fruchtfolge A Sommerweizen

Zur besseren Übersichtlichkeit wird die Wasserleitfähigkeit in einer logarithmierten Grafik dargestellt. Bei der Fruchtfolge A (bei Sommerweizen) war sie in der Bodenbearbeitungsvariante „Integrierte Bodenbearbeitung“ zu Beginn am höchsten ($K_0 = 6,3 \text{ cm h}^{-1}$). Bei der „Festboden–Mulchwirtschaft“ lag die Wasserleitfähigkeit etwas niedriger ($K_0 = 4,05 \text{ cm h}^{-1}$), gefolgt von der Variante „Pflug“ ($K_0 = 2,68 \text{ cm h}^{-1}$). Bei der „Lockerboden-Mulchwirtschaft“ lag die Wasserleitfähigkeit bei $K_0 = 2,21 \text{ cm h}^{-1}$ und schließlich bei der „Direktsaat“ bei $K_0 = 1,18 \text{ cm h}^{-1}$.

Bei einer Saugspannung von 4 cm fiel die Wasserleitfähigkeitskurve bei der „Integrierten Bearbeitung“ stark ab, während sich die Kurven der „Festboden–Mulchwirtschaft“ und der „Konventionellen Bearbeitung mit Pflug“ annähern und beinahe gleichmäßig verlaufen.

Etwa bei einer Saugspannung von 7 cm fällt die Kurve der „Integrierten

Bodenbearbeitung“ unter die der „Lockerboden–Mulchwirtschaft und nähert sich der „Direktsaat“ an.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die „Integrierte Bodenbearbeitung“ anfangs eine hohe Leitfähigkeit aufweist und schnell viel Wasser aufnimmt. Bei einer Saugspannung von etwa 4 cm ändert sich der Verlauf rasch, die Leitfähigkeit sinkt und nähert sich der „Direktsaat“ an.

Die „Direktsaat“ weist eine über alle Druckstufen niedrige Leitfähigkeit auf, sie nimmt zwar zu Beginn weniger Wasser auf, dafür gibt es keinen so schnellen Abfall in der Leitfähigkeit.

4.2.2. Fruchtfolge B Winterweizen

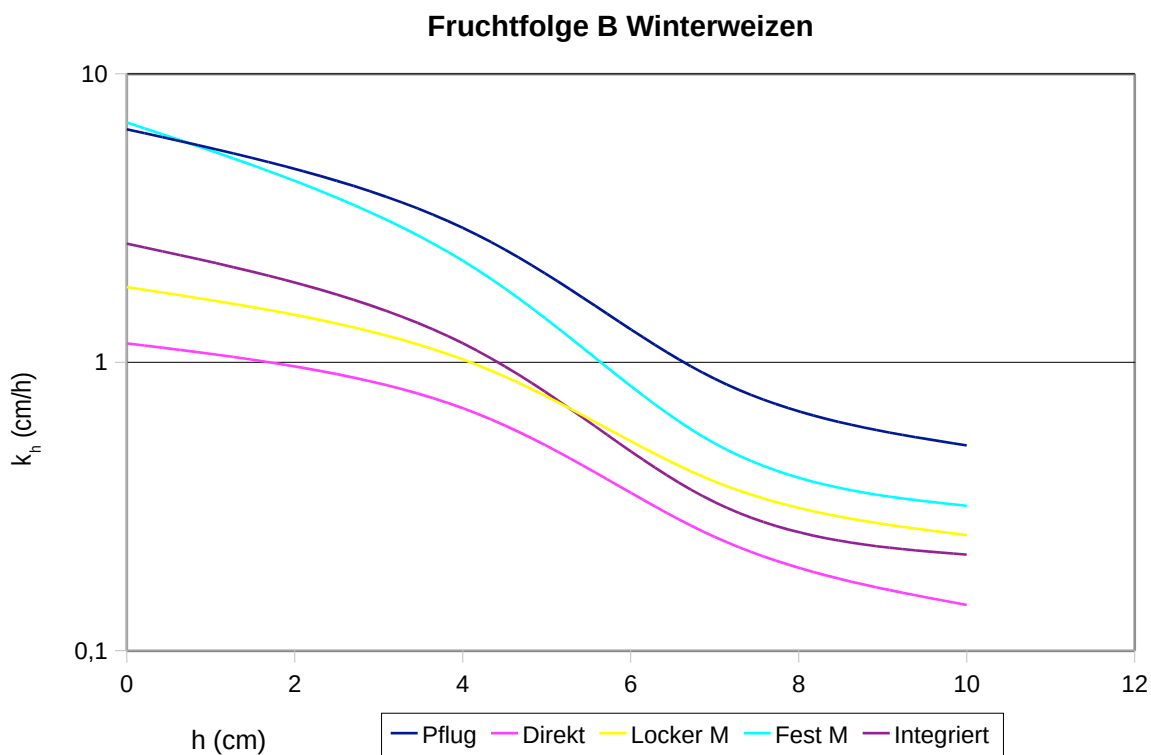


Abb. 31: Ergebnisse der Infiltrationsversuche, Fruchtfolge B Winterweizen

Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse in einer logarithmierten Grafik angeführt. Bei der Fruchtfolge B mit der Fruchtart Winterweizen war bei der „Festboden–Mulchwirtschaft“ bei der Saugspannung $h = 0$ die Wasserleitfähigkeit ($K_0 = 6,79 \text{ cm h}^{-1}$) am

höchsten. Darauf folgt die „Bodenbearbeitungsvariante mit Pflug“ ($K_0 = 6,43 \text{ cm h}^{-1}$). Die „Integrierte Bodenbearbeitung“ ergab bei $K_0 = 4,05 \text{ cm h}^{-1}$. Eine etwas geringere Wasserleitfähigkeit ergab die „Lockerboden–Mulchwirtschaft“ ($K_0 = 1,82 \text{ cm h}^{-1}$). Wie aus Abb. 31 hervor geht, hatte die Bodenbearbeitungsvariante „Direktsaat“ den geringsten Wasserleitfähigkeitskoeffizienten ($K_0 = 1,16 \text{ cm h}^{-1}$).

Die „Direktsaat“ weist wie in der Fruchtfolge A (bei Sommerweizen) die niedrigste k_h bezüglich der Wasserleitfähigkeit auf. Die Wasserleitfähigkeitskurve der „Lockerboden–Mulchwirtschaft“ liegt knapp über der „Direktsaat“. Wobei die Kurve der „Integrierten Bearbeitung“ zu Beginn über der „Lockerboden–Mulchwirtschaft“ liegt und bei einer Saugspannung von etwa 5 cm unter die „Lockerboden–Mulchwirtschaft“ abfällt.

Die „Festboden–Mulchwirtschaft“ liegt zu Beginn knapp oberhalb der Wasserleitfähigkeitskurve von der „konventionellen Bearbeitung mit Pflug“, fällt jedoch relativ rasch darunter.

Die Variante „Pflug“ ergab die höchste hydraulische Leitfähigkeit und ihre Wasserleitfähigkeitskurve lag bis zum letzten Messpunkt über den übrigen.

4.2.3. Leitfähigkeit Varianzanalyse

Die Ergebnisse der Varianzanalyse für die hydraulische Leitfähigkeit zeigen, dass die Bodenbearbeitung im Mittel aller Saugspannungen Einfluss auf die Infiltration hat, wobei keine Wechselwirkung zwischen Bodenbearbeitung und der Saugspannung besteht.

Tab. 11: Leitfähigkeit Varianzanalyse

Effekt	F - Statistik	Pr > F
BB	3,37	0,0306
FF	0,04	0,8450
tens1	110,96	< 0,0001
BB*FF	1,25	0,3131
BB*tens1	1,13	0,4237
FF*tens1	0,54	0,6629
BB*FF*tens1	0,35	0,9687
Block	1,45	0,26206
Block*tens1	0,65	0,7343

BB ...Bodenbearbeitung

tens ...Saugspannung

FF ...Fruchtfolge

Block ...Wiederholung

Der Mittelwertsvergleich zeigt, dass sich die Bodenbearbeitungssysteme „Pflug“ und „Direktsaat“ signifikant unterscheiden. Ebenso besteht ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen zwischen der Variante „Direktsaat“ und „Festboden–Mulchwirtschaft“.

4.3. Kornerträge bei den unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten

4.3.1 Varianzanalyse der Erträge

Die Varianzanalyse der Erträge zeigt, dass das Bodenbearbeitungssystem einen Einfluss auf den Kornertrag hat. Die Mittelwertsvergleiche der Varianzanalyse (Abb. 32) zeigen, dass sich die Erträge in der Variante „Direktsaat“ signifikant von den anderen Bodenbearbeitungssystemen unterscheiden.

Tab. 13: Varianzanalyse der Erträge

Effekt	F - Statistik	Pr > F
WH	0,07	0,9749
BB	5,94	0,0015
FF	4,05	0,0543
BB*FF	0,34	0,8479

WH ...Wiederholung

BB ...Bodenbearbeitung

FF ...Fruchtfolge

4.3.2 Kornertrag in Abhängigkeit von Bodenbearbeitungsvariante

Wie in der Abb. 32 zu sehen ist, differiert der Ertrag in den einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten teilweise erheblich. Am deutlichsten unterscheidet sich die Variante „Direktsaat“ im Ertrag von den anderen Bearbeitungsvarianten.

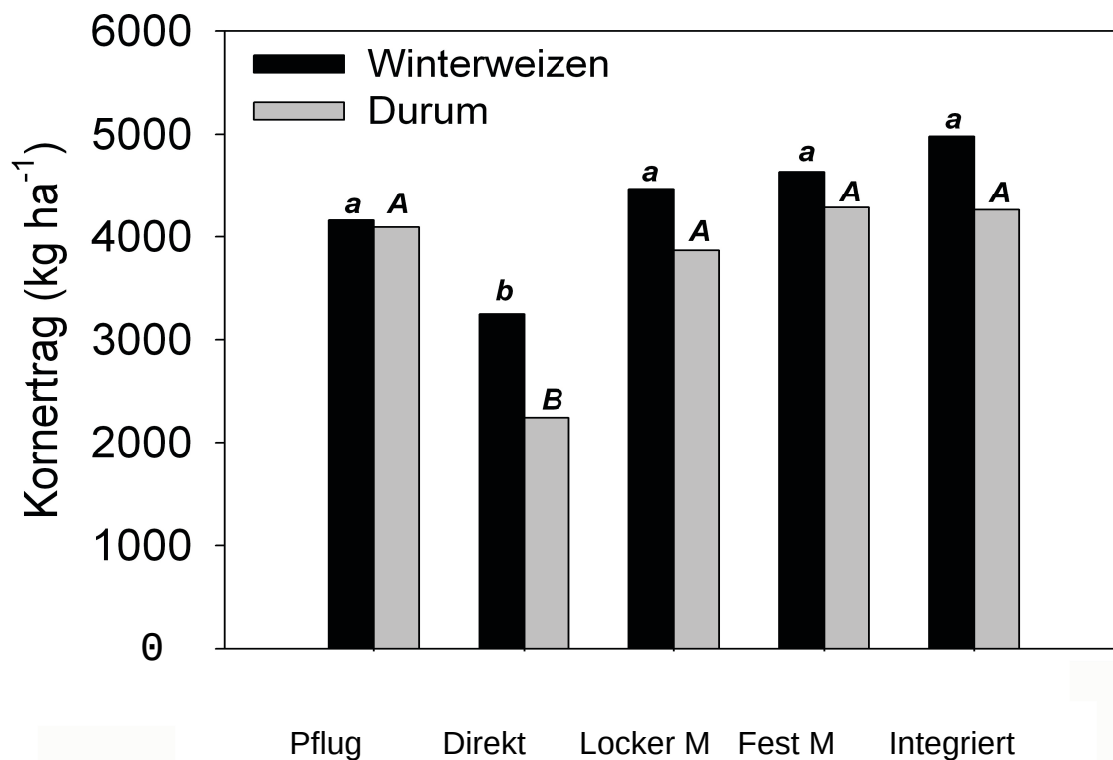


Abb. 32: Kornertrag in Abhängigkeit von Bodenbearbeitungsvariante

Bei der „Direktsaat“ von Winterweizen wurden nur etwa 3 to/ha geerntet, bei den anderen 4 Bodenbearbeitungsvarianten hingegen zwischen 4 und 5 to/ha. Auch bei Durum zeigte sich deutlich der geringere Ertrag in der „Direktsaat“ als in den übrigen Varianten. Zudem lag er mit nur etwas knapp mehr als 2 to/ha auch noch wesentlich niedriger als der Winterweizen. Eine mögliche Ursache war der am Boden liegende Mulch bei der Saat, der zu einer ungenauen Ablage des Saatgutes führte und sich dadurch nur ein lückriger Bestand ergab.

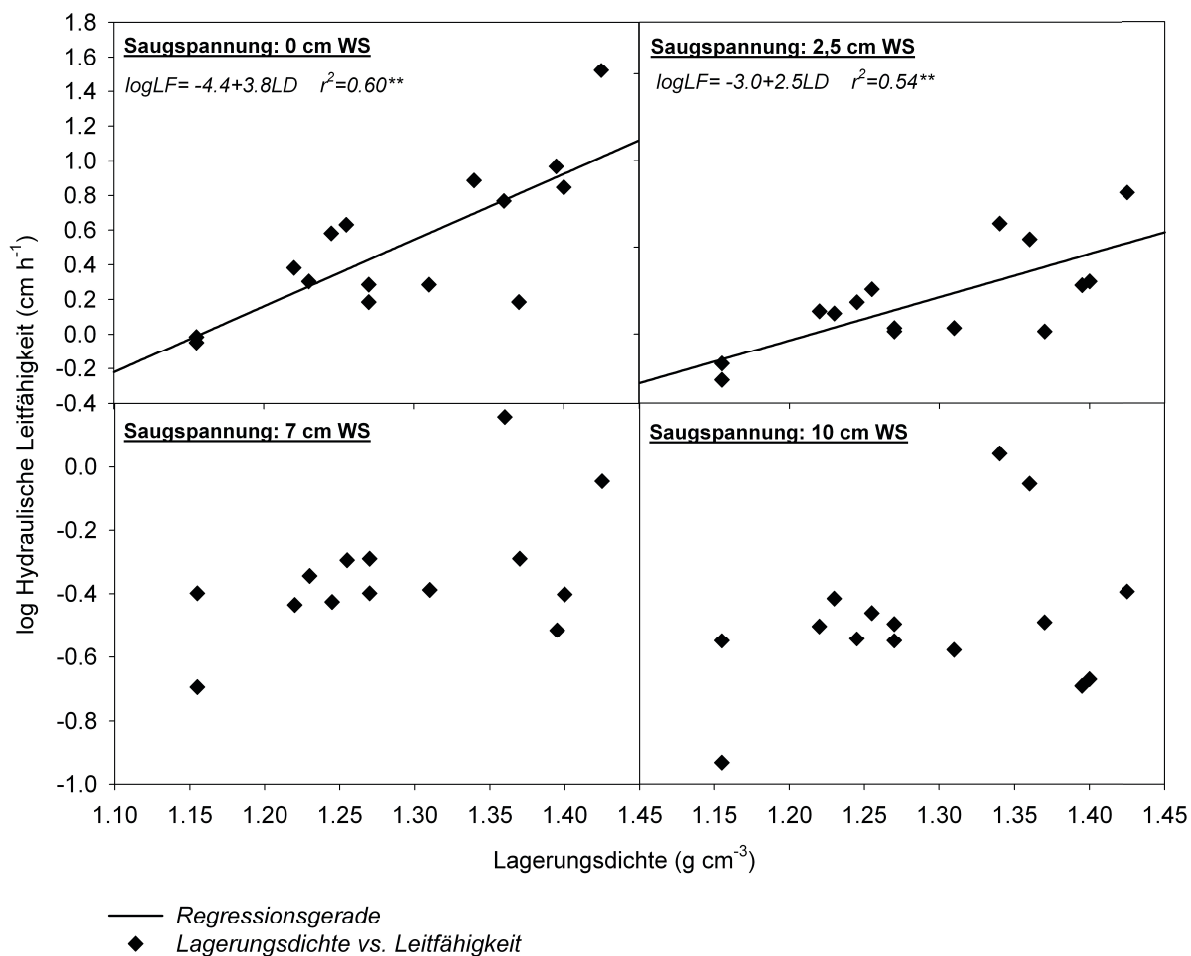


Abb. 33: Regressionsgerade

Wie in der Abb. 33 ersichtlich, besteht bei niedrigen Saugspannungen (0; 2,5 cm) bei hoher Lagerungsdichte eine höhere Leitfähigkeit. Da die Direktsaatvariante jene war, die die höchsten Lagerungsdichten aufwies, ist anzunehmen, dass dieser Zusammenhang indirekt auf die höhere Zahl an weiten Makroporen in der Direktsaat hinweist und weniger auf den direkten Einfluss einer höheren Lagerungsdichte, da man in diesem Fall aufgrund des geringeren Gesamtporenvolumens eher den gegenteiligen Zusammenhang erwarten würde. Auch in der Literatur wird darauf verwiesen, dass in ungestörten Böden eine höhere Anzahl Makroporen vorhanden ist, aufgrund höherer Regenwurmpopulationen. Durch diese kontinuierlichen Tiergänge kann selbst in dicht gelagerten Böden bei hoher Makroporendichte schnell viel Wasser infiltrieren.

5. Diskussion

Im Rahmen der Masterarbeit wurden unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme und ihre Auswirkungen auf die Lagerungsdichte und die hydraulische Leitfähigkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden an der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien in Groß-Enzersdorf im Langzeitversuch zwei Versuchsreihen durchgeführt – die Bestimmung der Lagerungsdichte anhand von ungestörten Bodenproben und die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit.

Unter der pfluglosen Bodenbearbeitung stellt sich nach einigen Jahren ein natürlich dicht gelagerter Boden ein (DAHM, 2000; BRUNOTTE, 2007.) Dadurch verbessern sich die Eigenschaften des Bodens, wie die Tragfähigkeit, die Erodierbarkeit, das Infiltrationsvermögen sowie die biologische Aktivität und darüber hinaus die phytosanitären Eigenschaften des Bodens. Durch den Rückgang der Eingriffsintensität verbleiben vermehrt Erntereste an der Oberfläche (HOFFMANN und KOCH, 1998). Die ebenfalls nahe der Bodenoberfläche verbleibenden Unkrautsamen müssen gezielt durch Herbizideinsatz bekämpft werden. Eine ständige Beobachtung der Flächen und der Unkrautbestände ist einzuhalten. Erhöhte Saatmengen sollen helfen, mögliche Fehlstellen im Aufgang zu kompensieren (PRINGAS und KOCH, 2004). Bearbeitungsrichtungen schräg zur Mährescherspur helfen einen lückenlosen Feldaufgang zu erreichen. Dafür sind allerdings auch die dementsprechend großen Flächen notwendig, die in der eher klein strukturierten österreichischen Landwirtschaft meist nicht vorzufinden sind. Aber in den getreideintensiven Gebieten im Osten Österreichs könnten diese Anforderungen an die veränderte Bearbeitungsrichtung teilweise erfüllt werden.

5.1. Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Lagerungsdichte

Im angeführten Versuch wurde unter der Variante „Pflug“ in der obersten untersuchten Schicht (Tiefe 5 bis 10 cm) eine relativ hohe Lagerungsdichte vorgefunden ($1,30 \text{ g/cm}^3$). Sie lag nur etwas unter dem Wert für die „Direktsaat“ ($1,33 \text{ g/cm}^3$). Die Messungen erfolgten im September 2006 nach der Getreideernte und nach dem bereits durchgeführten Stoppelsturz. Obwohl die Messgruben ausserhalb der sichtbaren

Fahrspuren durch Mähdrescher und Traktoren lagen, wurden in der konventionellen Bodenbearbeitung leicht höhere Werte gemessen als in den konservierenden Bodenbearbeitungsvarianten.

Aufgrund der krumentiefen Lockerung mit dem Pflug ist im oberen Bereich des Bodens erwartungsgemäß ein höheres Porenvolumen als unter „Direktsaat“ vorzufinden.

Allerdings war das Jahr 2006, was die Niederschlagsverteilung betrifft, ein Ausnahmejahr im langjährigen Mittel – es gab hohe Niederschlagsmengen im August (140 mm pro m²). Möglicherweise beeinträchtigte dieser Starkregen die oberste Bodenschicht und führte zu diesen hohen Werten. Die Proben zur Lagerungsdichte wurden Anfang September entnommen, nach den starken Regenfällen. Diese trugen möglicherweise zu einer derartigen Veränderung in der oberen Schicht bei.

In den tieferen Schichten gab es durchwegs den erwarteten Trend. Die Werte in der „Konventionellen Bodenbearbeitung“ lagen zum Teil deutlich unter denen der „Direktsaat“. In 15-20 cm Bodentiefe bei „Konventioneller Bodenbearbeitung“ 1,27 g/cm³ – hingegen bei „Direktsaat“ 1,38 g/cm³. Diese Werte entsprechen den Ergebnissen aus der Literatur, wonach die Dichtelagerung unter Böden mit „Direktsaat“ höher ist als unter konventionell bearbeiteten Flächen (SCHRADER, et al. 2005; HARTGE und HORN, 1999)

5.2. Einfluss der Bodenbearbeitung auf die hydraulische Leitfähigkeit

Bei dem angeführten Langzeitversuch weist das Bodenbearbeitungssystem einen signifikanten Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit auf, während die Fruchtfolge nur marginale Auswirkung hat. Letzteres vermutlich aus dem Grund, dass es sich bei beiden untersuchten Fruchtarten um Getreide, nämlich Sommer- und Winterweizen, handelte.

In beiden Fruchtarten zeigte sich bei der „Direktsaat“ die kontinuierlichste und geringste Leitfähigkeit. Durch den Verzicht auf jegliche Form der Bodenbearbeitung bei der Direktsaat werden durch Pflanzenwurzeln und Tiergänge gebildete Grobporen nicht zerstört. Diese natürlich entstandenen und erhaltenen Poren sind dafür verantwortlich, dass das Wasser kontinuierlich versickert.

Im Gegensatz dazu ist die Wasserleitfähigkeit bei der „Lockerboden-Mulchwirtschaft“ und noch viel mehr bei der konventionellen Bearbeitung mit Pflug bei Sommerweizen höher. Grund dafür ist vermutlich das durch die Bearbeitung mit dem Grubber oder dem Pflug entstandene Grobporensystem (Sekundärgefüge). Allerdings kam es auch hier in tieferen

Bodenschichten aufgrund von Bodenschadverdichtung zu Stauzonen. Darüber hinaus reichen die Grobporen nicht so tief in den Boden, da durch die Bearbeitung mit dem Grubber oder dem Pflug natürlich entstandene Grobporen zerstört werden. Somit ist kein kontinuierlicher Abfluss des Wassers in tiefere Schichten möglich.

Aufgrund des Einsatzes des Pfluges kam es auch in der „Integrierten Bodenbearbeitung“ zur Ausbildung eines Pflugsohlenhorizontes. An diesem kann sich bei Starkregen Stauwasser bilden. Durch den hohen Anteil an Grobporen im Oberboden wird anfänglich viel Wasser schnell in den Boden aufgenommen. Durch die Pflugsohle kam es zu Bodenschadverdichtung, was eine weitere Infiltration verhinderte und so die Bildung von Stauwasser begünstigte.

Erstaunlicherweise zeigen „Pflug“ und „Integrierte Bodenbearbeitung“ bei den beiden unterschiedlichen Fruchtfolgen keine annähernd ähnlichen Wasserleitfähigkeitskurven. Es war zu erwarten, dass sich die Kurven in den unterschiedlichen Fruchtfolgen ähnlich sind, so wie es bei der „Direktsaat“ der Fall war.

Die Ursache dafür ist aufgrund der Ergebnisse nicht erklärbar. Möglichkeiten bestehen darin, dass bei der Messung zufällig Stellen ausgesucht wurden, unter denen Grobporen die Messung beeinflusst haben. Die außergewöhnlich hohen Niederschläge im April und Mai des Versuchsjahres beeinflussten womöglich die Bodenstruktur, so dass die Wasserleitfähigkeit noch Monate später nicht dem Durchschnitt entsprach.

Eine Verminderung der Bodenbearbeitungsintensität bringt nicht nur ökonomische Vorteile, wie Arbeitszeiteinsparung, Treibstoffkostensenkung, sondern bringt auch ökologische Vorteile mit sich, wie eine Verringerung der Gefahr für Schadverdichtungen und eine Erosionsminderung durch Mulchauflage (NITZSCHE und SCHMIDT, 2002). Auch ROGASIK et al. (2006) weisen darauf hin, dass konservierende Bodenbearbeitung zu Akkumulation von Humus im oberen Krumenbereich aufgrund erhöhter Regenwurmaktivität führt. Diese führt wiederum zur Bildung von tiefreichenden und durch die veränderte Bodenbearbeitung nicht gestörten Grobporen, die als Leitbahnen für Wasserinfiltration dienen, als Raum für schnelles Tiefenwachstum der Wurzeln, sowie dem Gasaustausch dienen.

NITZSCHE und SCHMIDT (2002) weisen außerdem darauf hin, dass durch verringerte Bodenbearbeitung stabile Krümel und Bodenaggregate an der Bodenoberfläche eine

infiltrationshemmende Oberflächenverschlammung verhindern. Dadurch wird eine hohe Wasserversickerungsrate gesichert und der Oberflächenabfluss reduziert und so der Bodenabtrag durch Wasser vermindert.

5.3. Einfluss der Bodenbearbeitungssysteme auf den Kornertrag

Wie in der Literatur angeführt ist, sind die Erträge bei konventioneller Bewirtschaftung mitunter höher als unter der Direktsaat (BIESANTZ et al, 1999, PRINGAS und KOCH, 2004). Dies wurde durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt.

Eine mögliche Ursache dafür ist, dass durch den Pflug ein „reiner Tisch“ hergestellt wird. Durch die Entfernung von Ernterückständen und Einarbeitung in tiefere Schichten werden mögliche Konkurrenten um Licht und Nährstoffe beseitigt. Bei der Direktsaat hingegen verbleiben sämtliche Erntereste an der Oberfläche – dies kann dazu führen, dass die Saatgutablage ungenau ist (SCHOLL, 2009). Konservierende Bodenbearbeitung benötigt ein sehr gutes Strohmanagement (SCHMIDT, 2002; RECKLEBEN, 2007). Das Stroh muss möglichst kurz gehäckselt werden und über die gesamte Breite des Mähdeschers wieder ausgebracht werden. Zudem dürfen keine Strohschwaden entstehen (KÖLLER, 2002).

Bei ungleichmäßiger Strohablage oder falschen Strohmanagement, können bei Direktsaat im Anbau offene Stellen in der Kultur entstehen, die nicht kompensiert werden können. Durch den geringeren Feldaufgang bieten sich für Konkurrenzpflanzen Möglichkeiten, sich vermehrt auszubreiten und bieten zudem ein offenes Tor für Schädlingsbefall (PRINGAS und KOCH, 2004).

Im Versuchsjahr 2006 sind die geringeren Kornerträge auf den niedrigen Feldaufgang zurückzuführen. Bei den übrigen Bodenbearbeitungssystemen lagen die Kornerträge bei W-Weizen und S-Durum annähernd gleich hoch.

6. Zusammenfassung

Die Landwirtschaft muss sich zukünftig aufgrund des sich abzeichnenden Klimawandels auf eine Häufung von Witterungsextremen (Phasen intensiver Niederschläge und Zeiten von langanhaltenden Trockenheiten) einstellen. Das Versuchsjahr 2006 zeigte sehr deutlich Abweichungen der Niederschlagsmenge im Vergleich zum langjährigen Mittel mit hohen Werten im April und Mai sowie im August.

Ziel dieser Arbeit war es, fünf unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme dahingehend zu bewerten, wie sie die knappe Ressource Bodenwasser beeinflussen und die Böden in der Folge vor Erosion oder Verschlammung schützen. Beurteilt wurden die Lagerungsdichte, die hydraulische Leitfähigkeit und die Kornerträge bei den Fruchtarten Sommer- und Winterweizen auf einem mitteltiefgründigen Tschernosem im pannonischen Produktionsgebiet.

Die angeführten Ergebnisse bei der Lagerungsdichte zeigen, dass diese unter der „Direktsaat“ am höchsten ist, gefolgt von der „Festboden–Mulchwirtschaft“ und der „Integrierten Bodenbearbeitung“. Im Versuchsjahr wies die Variante „Pflug“ eine relativ geringe Lagerungsdichte auf, die nur bei der Variante „Lockerboden–Mulchwirtschaft“ noch geringer war. Durch die fehlenden Eingriffe in die oberen Bereiche des Bodens kommt es zu erhöhten Lagerungsdichten, während durch den Einsatz von Pflug und Grubber sich die Lagerungsdichten in den oberen Schichten vermindern.

Eine „Konservierende Bodenbearbeitung“ trägt durch den an der Oberfläche verbleibenden Mulch dazu bei, dass bei Niederschlägen der Verschlammung vorgebeugt wird und so Erosion vermindert wird. Da die natürlich entstandenen Makroporen durch die fehlende Bodenbearbeitung nicht zerstört werden, kann Niederschlag kontinuierlich in den Boden aufgenommen werden. Unter den Bodenbearbeitungssystemen „Pflug“ wurde zwar anfangs eine höhere Leitfähigkeit festgestellt, dieses System bietet dem Boden aber keinerlei Schutz vor Erosion durch Wind oder Wasser.

Die Kornerträge im Versuch ergaben bei „Direktsaat“ in beiden Fruchtfolgeblöcken die geringsten Erträge. Verursacht wurde dies durch eine fehlerhafte Saatgutablage, hervorgerufen durch keine ausreichend gute Direktsaat. In den Varianten, wo das Stroh gänzlich oder teilweise in den Oberboden eingearbeitet wurde, waren die Kornerträge höher. Dies zeigt einen Verbesserungsbedarf bei der Saattechnik „Direktsaat“ auf.

Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Bodenbearbeitungssysteme müssen vor der Entscheidung für ein System vernetzt berücksichtigt werden.

7. Literaturverzeichnis

- BLUM, W. E. (2007): Bodenkunde in Stichworten. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart 2007, 106
- BAEUMER, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau, 3. Auflage, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 284 ff, 297
- BIESANTZ, A., ADAK, S., ESER, D. (1999): Produktivität einer Leguminosen/Weizen-Fruchtfolge mit konservierender Bodenbearbeitung gegenüber traditionellen Brache/Weizen-Anbausystemen mit Pflugeinsatz auf zentralanatolischen Trockenstandorten. Pflanzenbauwissenschaften, 3 (2), 64-72
- BONO, A., ALVAREZ, R., BUSCHIAZZO, D. E., CANTET, R. J. C. (2008): Tillage Effects on Soil Carbon Balance in a Semiarid Agroecosystem. SSSAJ Volume 72, Number 4, July – August 2008, 1140 ff
- BRUNOTTE, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtung, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Landbauforschung Völkenrode, FAL Agricultural Research, 123
- DAHM, U. (2000): Möglichkeiten zur Adaptierung nordamerikanischer Geräte für die konservierende Bodenbearbeitung in Mitteleuropa. Shaker Verlag Aachen, 123
- DIEPENBROCK, W., ELLMER, F., LÉON, J. (2005): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 78, 82, 84
- EITZINGER, J. (2005): Vorlesungsunterlage zur Lehrveranstaltung Agrarmeteorologie, Kap 5-2
- EMMERLING, C. (2002): Regenwürmer. Ingenieure des Bodens. In: GetreideMagazin, 7. Jg. 3/2002, 176 - 177

- ELRICK, D.E., REYNOLDS, W.D. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. In: G.C. TOPP ET AL (ed.) Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI., 1-24
- ESTLER, M. und KNITTEL, H. (1996): Praktische Bodenbearbeitung, Grundlagen, Gerätetechnik Verfahren, Bewertung. Frankfurt, Verlags Union Agrar Frankfurt, 20, 21
- FINCK, A. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin – Stuttgart, 87, 141
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau, Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 157, 145, 198, 207
- GRUBER, W. (2003): Maschinen und Geräte zur pfluglosen Bodenbearbeitung. GetreideMagazin, 8. Jg. 3/2003, 184
- HARTGE, K. H. und HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 133, 115, 74
- HOFMANN, J. und KLIK, A. (2005): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter. Mitt. Österr. Bodenk. Ges. 72, 2005, 141 - 146
- HOFFMANN C., KOCH H.-J. (1998): Einfluss reduzierter Bodenbearbeitung auf Ertrag und N-Aufnahme von Weizen und Gerste bei unterschiedlicher N-Düngung. Pflanzenbauwissenschaften, 2 (2), 69-75,
- JOHANNSEN, A. und WITTE, J. (2003): Infiltration und Abfluss. Seminararbeit. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 1

- KILIAN, W., unter Mitarbeit von ENGLISCH M., HERZBERGER E., NESTROY O., PEHAMBERGER A., WAGNER J., HUBER S., NELHIEBEL P., PECINA E. & SCHNEIDER W. (2002): Schlüssel zur Bestimmung der Böden Österreichs. Mitt. Österr. Bodenk. Ges., 67, 1 - 96
- KÖLLER, K.H. (2002): Konservierende Bodenbearbeitung – neue technische Entwicklungen. GetreideMagazin, 3/2002, 170
- LIEBHARD, P. (1995): Effekte langjähriger unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte Bodenkennzahlen und das Ertragsverhalten von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Körnermais (*Zea mays* L.) und Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima* Doell) im semiariden Ackerbaugebiet Oberösterreichs; Habilitation, Universität für Bodenkultur
- LUEF, S. (1997): Interzeption der Streuschicht von Fichte und Buche. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien, 5
- MÜCKENHAUSEN, E. (1993): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 307
- NITZSCHE, O., SCHMIDT, W. (2002): Fruchtfolgewirkungen in pfluglosen Anbauverfahren. GetreideMagazin 2/2002, 104 ff
- OBRIST, D. (2004): Einführung in die Hydrologie. Unterrichtsmaterialien. Institut für Umweltgeowissenschaften, Universität Basel, Kap. 3, 3
- OEHMICHEN, J. (1983): Pflanzenproduktion. Band 1. – Berlin; Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 56, 77
- PALLUTT, B. (2003): Pfluglose Bodenbearbeitung, Einfluss auf Verunkrautung und Ertrag

von Getreide. GetreideMagazin, 8. Jg. 3/2003, 144 ff

PALLUTT, B. und GÜNTER, A. (2006): Veränderung der Verunkrautung durch konservierende Bodenbearbeitung. GetreideMagazin 11. Jg. 2/2006, 102 ff

PAUL, R. (2006): Pfluglos auf dem Vormarsch? Gefügeentwicklung auf intensiv bewirtschafteten und periodisch gepflügten Ackerflächen in Krume und Unterboden. GetreideMagazin, 11. Jg. 3/2006, 182 ff

PRINGAS C., KOCH H.-J. (2004): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Ertrag und Qualität von Winterweizen nach unterschiedlichen Vorfrüchten – Ergebnisse einer Versuchsserie auf Großflächen. Pflanzenbauwissenschaften, 8 (1), 24-33

RECKLEBEN, B. (2007): Mehrjährige Erfahrungen mit konservierender Bodenbearbeitung und Bestellung. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, 93

REYNOLDS W.D., BOWMAN B.T., BRUNKE R.R., DRURY C.F., TAN C.S. (2000): Comparison of tension Infiltrrometer, Pressure Infiltrrometer, and Soil Core Estimates of Saturated Hydraulic Conductivity. Soil Scie. Soc. Am., 64. Jg. 2000, 478-484

ROGASIK, J., FUNDER U., SCHNUG, E., ROGASIK, H., KÖRSCHENS, M. (2006), Humus und seine Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. GetreideMagazin 11. Jg. 4/2006, 224 ff

SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 74, 166, 209, 212, 213, 225, 229

SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010, 220, 214, 221, 222, 223, 226, 227, 243, 236, 237

- SCHMIDT, D. (2002): Mulchsaat-Management: Schritt für Schritt zur pfluglosen Bodenbearbeitung. GetreideMagazin, 4/2002, 218 ff
- SCHMIDT, H. H. (2006): Grundlagen der Geotechnik, 3., vollständig überarbeitete, erweiterte und aktualisierte Auflage 2006. Verlag Teubner, 2006, 46
- SCHOLL, P. (2009): Schätzung des Potentials unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme zur Verbesserung der bodenphysikalischen und -hydraulischen Eigenschaften sowie ihrer Ertragswirkung bei Winterweizen im semiariden Produktionsgebiet. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 2009, 69 ff
- SCHRADER, S. (2005): Ohne Pflug zu einem leistungsfähigen Boden. Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung auf Bodeneigenschaften. In: GetreideMagazin, 10. Jg. 3/2005, 184 - 186
- SZALAY, T. (2003): Einfluss von stabilisierten Stickstoffdüngern zur Saat als Unterfußdünger bei Durumweizen, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, 2003, 24
- ZIMMERLING, B. (2004): Beregnungsversuche zum Infiltrationsverhalten von Ackerböden nach Umstellung der konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitung. Osnabrück, Der Andere Verlag, 3
- VOGT, C. (1983), in OEHMICHEN, Pflanzenproduktion, Grundlagen Band 1. Berlin, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 149 ff
- VOSZHENRICH, H.-H., BRUNOTTE, J.: (2008): Anforderungen an die Bodenbearbeitung. In: DLG e.V. (Hrsg.) Schonende Bodenbearbeitung. Systemlösung für Profis. Frankfurt am Main, 52

WEYER, T. (2008): Ursachen, Auswirkungen und Ausmaß von Bodenverdichtungen. In: DLG e.V. (Hrsg.) Schonende Bodenbearbeitung. Systemlösung für Profis. Frankfurt am Main, 30 ff

Quellen aus dem Internet:

Das Internetserviceportal der Agrarmarkt Austria
<http://www.eama.at>, 15.03.2010

Elektronische Bodenkarte
<http://gis.lebensministerium.at/eBOD>, 08.03.2010

Feld der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf der Universität für Bodenkultur
<http://maps.google.de>, 15.03.2010

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung an der Universität für Bodenkultur Wien
<http://ipp.boku.ac.at>, 15.03.2010

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW
www.trinkwasser.ch, 17.03.2009

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien
www.zamg.ac.at, 15.03.2010

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Globaler Wasserkreislauf (Quelle: www.trinkwasser.ch , 17.03.2010)	10
Abb. 2: Adsorptions- und Kapillarwasser (MÜCKENHAUSEN, 1993).....	16
Abb. 3: Wasserhaushalt eines Standortes (FINCK, 2007).....	17
Abb. 4: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (Wasserspannungs-, pF-Kurve) bei einem Sandboden, einem tonigen Schluffboden (Lößboden) und einem Tonboden (A-Horizonte) (FOHRER und HORN, 1998).....	21
Abb. 5: Verlauf der Infiltration bei einem homogen überfluteten Boden in gleichen Zeitintervallen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998).....	26
Abb. 6: Einteilung der Bodenbearbeitungssysteme (VOSZHENRICH/BRUNOTTE, 2008).....	29
Abb. 7: Intensität des Bodeneingriffs nach ELLMER, 2001 (aus DIEPENBROCK, 2005).....	30
Abb. 8: Bodenzwiebeln (WEYER, 2008).....	37
Abb. 9: Standort der Versuchsparzellen in Raasdorf bei Wien (Feld der Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf der Universität für Bodenkultur, Quelle: http://maps.google.de , 02.05.2010).....	41
Abb. 10: Lageplan der Versuchsanlage (Quelle: www.eama.at , 15.03.2010).....	42
Abb. 11: Bodenprofil eines Tschernosems (Quelle: http://gis.lebensministerium.at/eBOD , 08.03.2010).....	44
Abb. 12: Monatsmittelwerte der Temperatur in ° Celsius im langjährigen Durchschnitt (1971-2000) und im Versuchsjahr 2006 (Quelle: Wetterdaten auf http://ipp.boku.ac.at , 15.03.2010).....	47
Abb. 13: Monatsmittelwerte der Niederschläge in mm im langjährigen Durchschnitt und im Versuchsjahr 2006, Versuchswirtschaft Groß Enzersdorf (Quelle: Wetterdaten auf http://ipp.boku.ac.at , 15.03.2010).....	48
Abb. 14: Schema der Versuchsanlage (Versuchsbeschreibung LIEBHARD, ergänzt durch STREBL).....	50
Abb. 15: geöffnetes Bodenprofil bis 25 cm Bodentiefe (Foto: STREBL, 2006).....	54
Abb. 16: Stechzylinder in der vorgegebenen Bodentiefe von 25 cm (Foto: STREBL, 2006)	55
Abb. 17: Schlagstock mit Stützring auf einem Zylinder angesetzt (Foto: STREBL, 2006).....	56
Abb. 18: zur Hälfte in den Boden geschlagene Zylinder auf vorgegebener Tiefe (Foto: STREBL, 2006).....	57

Abb. 19: Die Erde um die Zylinder wird entfernt (Foto: STREBL, 2006)	58
Abb. 20: Der Zylinder wird an der Oberseite mit dem dazu passenden Deckel geschlossen (Foto: STREBL, 2006)	59
Abb. 21: Der Zylinder wird mit dem Deckel auf der Unterseite verschlossen (Foto: STREBL, 2006).....	60
Abb. 22: Alle 3 Zylinder sind an der Ober- und Unterseite verschlossen (Foto: STREBL, 2006)	61
Abb. 23: Modell eines Tensionsinfiltrometers (nach ANKENY, 1988).....	64
Abb. 24: Lagerungsdichte bei Lockerbodenwirtschaft.....	67
Abb. 25: Lagerungsdichte bei Festbodenwirtschaft.....	68
Abb. 26: Lagerungsdichte bei Lockerboden–Mulchwirtschaft.....	69
Abb. 27: Lagerungsdichte bei Festboden–Mulchwirtschaft.....	70
Abb. 28: Lagerungsdichte bei Integrierter Bodenbearbeitung.....	71
Abb. 29: Mittelwert der Lagerungsdichte über alle Schichten in allen BB-Varianten.....	73
Abb. 30: Ergebnisse der Infiltrationsversuche, Fruchtfolge A Sommerweizen.....	74
Abb. 31: Ergebnisse der Infiltrationsversuche, Fruchtfolge B Winterweizen.....	75
Abb. 32: Kornertrag in Abhängigkeit von Bodenbearbeitungsvariante.....	78
Abb. 33: Regressionsgerade	79

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufteilung des Wasservolumens der Landmassen (EITZINGER, 2005)	11
Tab. 2: Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2%) und organische Böden (Quelle: SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998)	14
Tab. 3: Lockerbodenwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt).....	31
Tab. 4: Extreme Festboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)....	32
Tab. 5: Lockerboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt).....	33
Tab. 6: Festboden-Mulchwirtschaft (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt).....	34
Tab. 7: Integriertes Bodenbearbeitungssystem (BAEUMER 1992, geändert und ergänzt)	35
Tab. 8: langjährige Monatsmittel (1971-2000) von Niederschlag in mm und Temperatur in °C am Versuchsstandort Groß Enzersdorf (Quelle: www.zamg.ac.at, 15.03.2010).....	45
Tab. 9: Monatsmittel 2006 von Niederschlag in mm und Temperatur in °C am Versuchsstandort Groß Enzersdorf (Quelle: Wetterdaten auf http://ipp.boku.ac.at , 15.03.2010).....	46
Tab. 10: Lagerungsdichte Varianzanalyse.....	72
Tab. 11: Leitfähigkeit Varianzanalyse.....	76
Tab. 13: Varianzanalyse der Erträge.....	77

10. Formelverzeichnis

(1) Wasserhaushaltsgleichung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	11
(2) Formel für das Potential des Bodenwassers (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	19
(3) Formel für das Gesamtpotential (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	19
(4) Formel für Hydraulisches Potential (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	23
(5) Formel für kumulative Infiltration (PHILIP, 1957 aus SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	24
(6) Formel zur Abhängigkeit der Wasserleitfähigkeit in ungesättigtem Boden $K_{(h)}$ (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	25
(7) Formel zur Abhängigkeit der Wasserleitfähigkeit in gesättigtem Boden $K_{(s)}$ (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2010).....	25