Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft

UNTERSUCHUNG DES DURCHLÄSSIGKEITSBEIWERTES IN BIOLOGISCH BEWIRTSCHAFTETEN BÖDEN

Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von:
LUNZER, Erich

Betreuer: Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Klik
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Nicole Emerstorfer

Matrikelnummer: H0240100 04.10.2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, an der Universität für Bodenkultur in Wien erstellt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Klik und Dipl.-Ing. Nicole Emerstorfer für ihre Anregungen und hilfreichen Stellungnahmen bedanken.
Ein besonderer Dank gilt allen, die an der Umsetzung der Diplomarbeit beteiligt waren und mir stets behilflich waren: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Kammerer, Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Spangl, Dipl.-Ing. Reinhard Nolz, Friedrich Forster, Karl Haigner und Yunes Sufi.

Widmen möchte ich die vorliegende Arbeit meiner Familie und meiner Freundin Charlotte für ihre Geduld und Unterstützung.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die Auswirkungen von biologischer Landwirtschaft auf den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) des Bodens untersucht und zusätzlich die verschiedenen k-Wert Bestimmungsmethoden miteinander verglichen. Die eingesetzten Methoden waren: Guelph-Permeameter, Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel, Ringinfiltrometer und empirische Formeln. Es wurden fünf Flächen untersucht, die sich hinsichtlich der Bodenbonität (mittel, gering) und Düngungsvariante (Gründüngung, Biokompost, Stallmist, Mineraldünger) unterschieden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine biologische Bewirtschaftung den Durchlässigkeitsbeiwert im Vergleich zu einer konventionellen Bewirtschaftung signifikant erhöht. Ein signifikanter Einfluss der Bodentiefe auf die Durchlässigkeit wurde ebenfalls festgestellt. Ein Einfluss der Jahreszeit auf den k-Wert konnte nicht festgestellt werden.

Jedes Verfahren für die Bestimmung des k-Wertes hat Vor- und Nachteile. Je nach Erfordernis sollte das Geeignetste gewählt werden.

Abstract

The purpose of this study was to investigate the impacts of organic farming on saturated hydraulic conductivity of soils and compare methods to determine saturated hydraulic conductivity. The used methods included Guelph-Permeameter, method with increasing water level, ring infiltrometer and empirical formulas. Five plots were used in the investigation which differed in soil quality as well as in fertilising methods (cover crops, compost, dung, conventional fertiliser).

The results show a significant increase of saturated hydraulic conductivity in organic tilled soils compared to conventional tilled soils. In addition there is also a significant effect of soil depth on saturated hydraulic conductivity. It seems that seasons do not affect significantly the amount of saturated hydraulic conductivity.

As every method to investigate the saturated hydraulic conductivity has advantages and disadvantages, you should choose the method on a case-by-case basis.

Keywords: saturated hydraulic conductivity, organic farming, infiltration methods;

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Allgemeine Grundlagen 3
2.1 Der Durchlässigkeitsbeiwert 3
2.2 Räumlicher und zeitlicher Einfluss auf die Bodenparameter 6
2.3 Makroporen und k-Wert Messungen 7
2.4 Schwankungen des k-Wertes 8
2.5 Auswahl einer Methode 8
3 Material und Methoden 10
3.1 Standort Rutzendorf 10
3.1.1 MUBIL die Grundlage 10
3.1.2 Informationen zum Standort 11
3.1.3 Lage der Versuchsflächen 13
3.1.4 Beschreibung der Versuchsflächen in der Vegetationsperiode 15
3.1.5 Zeitplan der k-Wert Messungen und Probeentnahmen 18
3.2 k-Wert Messmethoden 19
3.2.1 Guelph-Permeameter 19
3.2.2 Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel 24
3.2.3 Ringinfiltrometer 28
3.3 k-Wert Abschätzung aus der Kornverteilungskurve 33
3.3.1 Korngrößenanalyse 33
3.3.2 Empirische Formeln 35
3.4 Bestimmung der Trockendichte 37
3.5 Statistische Methoden 38
4 Ergebnisse und Diskussion 40
4.1 Guelph-Permeameter 40
4.2 Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel 46
4.3 Ringinfiltrometer 49
4.4 Korngrößenanalyse 50
4.5 Empirische Formeln 53
4.6 Trockendichte 56
4.7 Numerischer Vergleich der k-Wert Methoden 57

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung 59
6 Literaturverzeichnis 62
Anhang A - Guelph-Permeameter 65
Anhang B - Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel 75
Anhang C - Ringinfiltrometer 78
Anhang D - Korngrößenanalyse 80
Anhang E - Empirische Formeln 82
Anhang F - Trockendichte 86
Anhang G - Numerischer Vergleich der k-Wert Methoden 88
Anhang H - Verwendete Formblätter 90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wasserdurchlässigkeit verschiedener Bodenarten (SCHROEDER, 1968; zit. bei ACHTNICH, 1980) 4

Tabelle 2: Einteilung des Durchlässigkeitsbeiwertes (DVWK, 1999) 5

Tabelle 3: Niederschlagsverhältnisse in Rutzendorf (in mm) 12

Tabelle 4: Beschreibung der Versuchsflächen in der Vegetationsperiode 2007 16

Tabelle 5: Zeitplan der k-Wert Messungen und Probeentnahmen in der Vegetationsperiode 2007 18

Tabelle 6: Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter α^* (CEPUDER et al., 2006) 31

Tabelle 7: Empirische Formeln zur Ermittlung des k-Wertes 35

Tabelle 8: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Guelph-Permeameter 40

Tabelle 9: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel 46

Tabelle 10: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Ringinfiltrometer 49

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 53

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 54

Tabelle 13: mittlere k-Werte und Standardabweichungen der k-Wert Methoden in 10 und 30 cm Bodentiefe im Oktober 2007 58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtsplan – Lage des Standortes Rutzendorf 11

Abbildung 2: Finanzbodenschätzungskarte - Schlageinteilung in Rutzendorf 13

Abbildung 3: Versuchsflächen SK, S1G und S1M in Rutzendorf 14

Abbildung 4: Zustand der Versuchsflächen im April, Mai, Juli und Oktober 2007 (von oben nach unten) 17

Abbildung 5: Links: Zusammenbau des Luftrohres; Rechts: Loch zum Befüllen des Guelph-Permeameters 20

Abbildung 6: Links: Ventilknopf, Kerbe zeigt nach oben (X); Rechts: zusammengebautes Guelph-Permeameter 20

Abbildung 7: Versuchsanordnung für die k-Wert-Bestimmung im Labor mit aufsteigendem Wasserspiegel 24

Abbildung 8: Links: Entnahme einer Stechzylinder-Bodenprobe; Rechts: ungestörte Bodenproben (Stechzylinder) 25

Abbildung 9: Links: Aufsättigung der Bodenproben in der Wanne; Rechts: Online-k-Wert-Apparatur mit Bodenproben und aufgesetzten Messsonden 25

Abbildung 10: Links: Aufsättigung des Bodens im Ring; Rechts: Messung 28

Abbildung 11: Links: gestörte Bodenproben; Mitte: Nasssiebung des Feinbodens; Rechts: Pipetteverfahren nach Kubiena 33

Abbildung 12: mittlere k-Werte (Zeit und Bodentiefen) bei den untersuchten Flächen 41

Abbildung 13: mittlere k-Werte (Zeit und Flächen) in 10 und 30 cm Bodentiefe 42

Abbildung 14: mittlere k-Werte (Bodentiefen und Flächen) im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 42

Abbildung 15: mittlere k-Werte (Flächen) in 10 und 30 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 43

Abbildung 16: mittlere k-Werte (Tiefen) für die Flächen im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 (bei den Juli*-Mittelwerten wurden die Messwerte aus 20 cm, anstelle der 30 cm verwendet) 44

Abbildung 17: mittlere k-Werte (Zeit) für die Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe 45

Abbildung 18: mittlere k-Werte (Bodentiefen) im Oktober 2007 bei den untersuchten Flächen 46

Abbildung 19: mittlere k-Werte (Flächen) im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe ... 47

Abbildung 20: mittlere k-Werte im Oktober 2007 für die untersuchten Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe 48

Abbildung 21: mittlere k-Werte (Flächen) im Oktober 2007 49

Abbildung 22: Rutzendorf - Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050 (1988) 50

Abbildung 23: mittlere Korngrößenverteilung der untersuchten Flächen in Rutzendorf 51

Abbildung 24: mittlere Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 52

Abbildung 25: mittlere Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 52

Abbildung 26: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 54

Abbildung 27: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 55

Abbildung 28: mittlere Trockendichten im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe bei den untersuchten Flächen 56

Abbildung 29: mittlere Trockendichten (Flächen) im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe 56

Abbildung 30: mittlere k-Werte der k-Werte Methoden in 10 und 30 cm Bodentiefe im Oktober 2007 58

Anhang

Anhang 1: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe (Messwerte) 65

Anhang 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe 65

Anhang 3: k-Werte bei den untersuchten Varianten im April 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 66

Anhang 4: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Mai 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 66

Anhang 5: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Juli 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 67

Anhang 6: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 67

Anhang 7: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe (Messwerte) 68

Anhang 8: Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe 68

Anhang 9: k-Werte bei den untersuchten Varianten im April 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 69

Anhang 10: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Mai 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 69

Anhang 11: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Juli 2007 in 20 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 70

Anhang 12: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot) 70

Anhang 13: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 bis 30 cm Bodentiefe 71

Anhang 14: mittlere k-Werte (Oktober) für die Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe 71

Anhang 15: SPSS 15, Stichprobenanzahl 72

Anhang 16: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität 72

Anhang 17: SPSS 15, Varianzanalyse 73

Anhang 18: SPSS 15, Post- Hoc- Test für den signifikanten Faktor Fläche 73

Anhang 19: SPSS 15, Post- Hoc- Test für den signifikanten Faktor Bodentiefe 74

Anhang 20: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe 75

Anhang 21: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe 76

Anhang 22: SPSS 15, Stichprobenanzahl 77

Anhang 23: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität 77

Anhang 24: SPSS 15, Varianzanalyse 77

Anhang 25: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe 78

Anhang 26: SPSS 15, Stichprobenanzahl 78

Anhang 27: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität 79

Anhang 28: SPSS 15, Varianzanalyse 79

Anhang 29: Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T), d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} und d_{60}/d_{10} bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 80

Anhang 30: Mittelwerte und Standardabweichungen der Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 80

Anhang 31: Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T), d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} und d_{60}/d_{10} bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 81

Anhang 32: Mittelwerte und Standardabweichungen der Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 81

Anhang 33: berechnete k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe (n=0,35, v=1,31*10^-6; Werte für d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} siehe Anhang 29) 82

Anhang 34: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 82

Anhang 35: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe 83

Anhang 36: berechnete k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe (n=0,35, v=1,31*10^-6; Werte für d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} siehe Anhang 31) ... 84

Anhang 37: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 84

Anhang 38: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe 85

Anhang 39: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockendichten bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe 86

Anhang 40: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockendichten bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe 87

Anhang 41: mittlere k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe 88

Anhang 42: mittlere k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe 89

Anhang 43: Feldprotokoll Rutzendorf 90

Anhang 44: Feldprotokoll Guelph-Permeameter 91

Anhang 45: Feldprotokoll Ringinfiltrometer 92

Anhang 46: Protokoll Korngrößenanalyse 93

1 Einleitung

Unter „Boden“ im landwirtschaftlichen Sinn verstehen wir die oberste, lockere und von Pflanzen bewachsene Verwitterungsschicht der Erdrinde. Diese Schichte wird andauernd durch den Einfluss von chemischen und physikalischen Vorgängen (Klima, Pflanze, Mensch) verändert (AIGNER und ALTENBURGER, 2001). Der Boden besteht im wesentlichen aus mineralischen Bestandteilen, organischer Substanz, Wasser und Luft.
Der Boden soll das Wachstum der Pflanzen ermöglichen, indem er Wasser und Nährstoffe speichert und freisetzt. Er ist ebenfalls für den Umbau abgestorbener organischer Stoffe mit Hilfe von Bodenlebewesen in Nährstoffen verantwortlich.

Es ist heute nicht mehr abzustreiten, dass die konventionelle Landwirtschaft weltweit zu gravierenden Umweltschäden geführt hat und führt (LENZ, 2006). Die Sicherung der Ressource Boden ist deshalb für die Existenzsicherung der Menschheit auf unserer Erde von größter Bedeutung (HUBACEK und PESEK, 1993). Daher ist ein wesentliches Ziel der nachhaltigen Agrarwirtschaft (biologischer Landbau), die vielfältigen Funktionen des Bodens zu erhalten und wenn möglich zu verbessern (KLIK et al., 2005). Der Boden ist Lebensraum für Bakterien, Pilze, Pflanzen, Tiere und Menschen. Er ist die Grundlage für die Pflanzen- und Nährstoffproduktion. Der Boden hat ebenfalls eine Filter- und Pufferfunktion von Wasser, Nähr- und Schadstoffen.

Die Herausforderungen in der Arbeit waren, in dieser in so vielen Wechselwirkungen stehenden Ressource Boden, brauchbare k-Wert Messungen auf biologisch bewirtschafteten Flächen durchzuführen und zu vergleichen.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Jahr 2003 wurde auf den Feldern des landwirtschaftlichen Betriebes in Rutzendorf ein Langzeitversuch (MUBIL) gestartet. Dieser Versuch untersucht die Auswirkungen der Umstellung von einem konventionellen, landwirtschaftlichen Betrieb in einen Biobetrieb. Dabei soll erfasst werden, wie sich die Umstellung auf Boden, Wasser, Fauna, Flora, Ertrag, Wirtschaftlichkeit sowie Qualität und Gesundheit der Pflanzen auswirkt (IFÖL, 2003).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Auswirkungen von biologischer Landwirtschaft auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) zu untersuchen und die verschiedenen k-Wert Bestimmungsmethoden miteinander zu vergleichen.
Da sich in Abhängigkeit von Veränderungen im Bodenkörper auch die Durchlässigkeit ändert, ist der k-Wert ein geeignetes Maß, um Strukturveränderungen im Boden zu quantifizieren (HARTGE und HORN, 1992). Die große Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit erschwert aber die Bestimmung repräsentativer k-Werte.
Die eingesetzten Methoden waren: Guelph-Permeameter, Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel, Ringinfiltrometer und empirische Formeln. Während der Vegetationsperiode 2007 (April, Mai, Juli und Oktober) wurden Guelph-Permeameter Messungen in 10 und 30 cm Bodentiefe durchgeführt. Im Oktober kamen zusätzlich alle anderen oben genannten Methoden zum Einsatz.
Mittels statistischer Auswertung der Messergebnisse wurden die Unterschiede zwischen den Flächen (Bodenbonität, Düngungsvariante, Bodentiefe) und mit der Zeit (nur beim Guelph-Permeameter) erhoben. Die Oktobermessungen ermöglichten, die verschiedenen Messwerte der k-Wert Bestimmungsmethoden numerisch zu vergleichen.

Es wurden fünf Flächen untersucht, die sich hinsichtlich Bearbeitung, Bodenbonität und Düngungsvariante unterschieden:

- DV1: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Gründüngung
- DV2: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Biokompost
- DV3: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Stallmist
- S1G: biologischer Landbau, geringe Bodenbonität, Gründüngung
- SK: konventioneller Landbau, mittlere Bodenbonität, Mineraldünger

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Der Durchlässigkeitsbeiwert

Eine für den Wassertransport und wassergebundenen Stofftransport wichtigste Bodenkenngröße ist der Durchlässigkeitsbeiwert k (auch Wasserleitfähigkeit). Sie hat die Dimension einer Geschwindigkeit. Die Wasserleitfähigkeit ist das Durchflussvolumen an Wasser je Zeiteinheit und je Einheit der Fläche des durchströmten Querschnitts bei einem hydraulischen Gefälle von eins (DVWK, 1999). Sie wird nach dem Gesetz von Darcy beschrieben. Darcy erkannte 1856, dass die Fließgeschwindigkeit und der hydraulische Gradient mit einem konstanten Faktor verknüpft sind, nämlich mit dem Durchlässigkeitsbeiwert (WIETEK, 1997). Aus der Formel ist daher ersichtlich, dass der k-Wert ein Proportionalitätsfaktor ist, d.h. verdoppelt sich der k-Wert ist auch der Durchfluss doppelt so groß. Die Formel ist nur bei laminaren Fließzuständen anzuwenden.

$$v_f = -k \cdot i \qquad \text{oder} \qquad Q = k \cdot i \cdot A$$

$[v_f]$	=	$m \cdot s^{-1}$	Filtergeschwindigkeit
$[k]$	=	$m \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert
$[i]$	=	dim.los	hydraulischer Gradient
$[Q]$	=	$m^3 \cdot s^{-1}$	Durchfluss
$[A]$	=	m^2	durchströmte Fläche

Der k-Wert ist keine konstante Größe sondern vom Bodenwassergehalt abhängig. Den größten Wert erreicht die hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Wassersättigung des Bodens (gesättigte Durchlässigkeit, k_s-Wert). Bei abnehmenden Wassergehalten verkleinert sich der Querschnitt, der im Boden für die Wasserbewegung zur Verfügung steht und der k-Wert nimmt aufgrund des exponentiellen Verhältnisses von Porengröße und Durchfluss dramatisch ab (ungesättigte Durchlässigkeit, k_u-Wert). Die k_s-Werte werden im wassergesättigten Boden gemessen und sind daher höher als die k_u-Werte. Die k-Wert Messmethoden, die in der Diplomarbeit verwendet werden, ermitteln alle einen k_s-Wert.

Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Kontinuität der Poren haben neben dem Wassergehalt des Bodens ebenfalls einen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit. Aus Tabelle 1 ist ersichtlich wie der k-Wert mit der Bodenart variiert.

In Abhängigkeit von Veränderungen im Bodenkörper ändert sich auch der k-Wert. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist daher auch ein geeignetes Maß, um Strukturveränderungen im Boden zu quantifizieren (HARTGE und HORN, 1992). Die große Variabilität der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erschwert aber die Bestimmung repräsentativer k-Werte, dazu mehr im Kapitel 2.4 Schwankungen des k-Wertes. Die Durchlässigkeit (Tabelle 2) bestimmt die Dränfähigkeit und die Filtereigenschaften eines Bodens. Mit steigender Verweildauer des Wassers im Boden sinkt die Geschwindigkeit chemischer (Adsorption, Fällung) und biologischer (Nitrifikation, Denitrifikation, Stoffumsatz) Um- und Abbauprozesse.

Tabelle 1: Wasserdurchlässigkeit verschiedener Bodenarten (SCHROEDER, 1968; zit. bei ACHTNICH, 1980)

Bodenart	Korngröße mm	mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert $m \cdot d^{-1}$
Ton	< 0,002	0,0003
feiner Schluff	0,002 - 0,006	0,016
mittlerer Schluff	0,006 - 0,02	0,042
grober Schluff	0,02 - 0,06	2,91
feiner Sand	0,06 - 0,2	3,71
mittlerer Sand	0,2 - 0,6	76,89
grober Sand	0,6 - 2,0	622,08
Kies	> 2,0	1296,00

Tabelle 2: Einteilung des Durchlässigkeitsbeiwertes (DVWK, 1999)

Bezeichnung	Durchlässigkeitsbeiwert $m \cdot d^{-1}$
sehr gering	< 0,01
gering	0,01 - 0,1
mittel	0,1 - 0,4
hoch	0,4 - 1
sehr hoch	1 - 3
extrem hoch	> 3

Der Wassertransport im Boden wird vom Durchlässigkeitsbeiwert und zusätzlich vom Potenzialgradienten (Wasserspannung und Gravitationspotenzial) bestimmt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1998; NACHTNEBEL, 2003). Die treibenden Kräfte sind die Schwerkraft (Gravitationspotenzial) und die Wasserspannung des Bodens (Matrixpotenzial). Die Wasserspannung ist eine bodenspezifische Größe, die vom aktuellen Bodenwassergehalt abhängig ist. Diese Bodenkenngröße wird durch die Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehung beschrieben (pF-Kurve). Die Wasserspannung ist jene Größe, die durch Adsorptions- und Kapillarkräfte des Bodenwassers an der Bodenmatrix entsteht. Die Bindungskräfte sind in engen Poren größer als in weiten Poren. Wasserspannungsunterschiede in verschiedenen Tiefenbereichen führen zu einem Potenzialgefälle, welches ungesättigten Wassertransport nach sich zieht. Bei einem Infiltrationsversuch ist zu Beginn der Messung die Infiltrationskapazität größer, da zunächst ein großer Gradient existiert. Mit fortschreitender Aufsättigung des Bodens nähert sich die Infiltrationskapazität des Bodens dem gesättigten k-Wert. Wenn der Boden wassergesättigt ist, beträgt der Wert der Wasserspannung Null, d.h. der Wassertransport im Boden ist nur mehr vom k-Wert und dem Gravitationspotenzial abhängig. Dies ist bei den in der Arbeit verwendeten k-Wert Experimenten der Fall, da im wassergesättigten Boden gemessen wurde.

Die Aufnahmefähigkeit des Bodens für Wasser am Feld wird anhand der Infiltration beurteilt. Wie schon vorher erwähnt, ist sie stark von dem jeweils im Boden vorliegenden

Wassergehalt abhängig. Die Infiltrationsrate wird weiters noch vom Oberflächenzustand der Felder beeinflusst. Eine Bedeckung mit Pflanzen oder Pflanzenresten vermindert die Aufschlagkraft von Regentropfen und damit die Gefahr einer Verschlämmung. Sie verringert die Abflussgeschwindigkeit und verlängert damit die Zeit, die dem Oberflächenabfluss zum Versickern bleibt. Die Oberfläche eines unbewachsenen Bodens hingegen kann durch den Aufprall großer Regentropfen so stark verdichtet werden, dass sie fast undurchlässig wird. Intensiver Oberflächenabfluss wird oft in Gegenden mit unbewachsener Bodenoberfläche festgestellt.

Der im Labor oder am Feld ermittelte k-Wert eines Bodens muss daher nicht einen direkten Rückschluss auf seine Infiltrationsspende im Feld zulassen, da jeweils unterschiedliche Faktoren von Bedeutung sind.

2.2 Räumlicher und zeitlicher Einfluss auf die Bodenparameter

Alle Bodeneigenschaften variieren mit Raum und Zeit. Mathematisch kann diese Beziehung definieren werden als (SCOTT, 2000):

$$RT = f\left(x, y, z, t\right)$$

[*RT*] kann jeder beliebige Bodenparameter sein; wie zum Beispiel k-Wert, Wassergehalt, Temperatur und etc

[*x, y, z*] Kartesischen Koordinaten eines Raumes

[*t*] die Zeit *t* bringt den zeitlichen Einfluss in die Formel

Probeentnahmen und Zeit

Menschliche Aktivitäten, wie Arbeiten am Feld, können signifikante temporäre und räumliche Schwankungen in den Bodeneigenschaften ergeben. Generell sind nach der Ernte bis zum nächsten Anbau die temporären Schwankungen am geringsten, da der Boden Zeit hatte um sich zu verdichten. Nach der Ernte zerfallen die Wurzeln der beernteten Kultur und

der Boden ist meist unbedeckt. Starkregenereignisse auf trockenen Böden im Sommer nach der Ernte können die Struktur des Bodens verändern, speziell die Bodenoberfläche (Verschlämmung). Bodenbearbeitungen und Setzungen sind meistens die größten Quellen für die zeitlichen Schwankungen der physikalischen Eigenschaften (McKENZIE et al., 2002).

Wurzeln im Boden können ebenfalls die Bodeneigenschaften verändern. Lebende Wurzeln können die Makroporen auffüllen und so die Durchlässigkeit limitieren. Wenn aber die Wurzeln absterben und verrotten, können sie große leere Makroporen hinterlassen und so die Durchlässigkeit wieder erhöhen (VAN NOORDWIJK, 1991; zit. bei McKENZIE et al., 2002).

Der Wassergehalt von Böden hat einen Einfluss auf die Bodeneigenschaften (RAGUSA et al. 1994, zit. bei McKENZIE et al., 2002). Zum Beispiel wenn Stechzylinderproben erforderlich sind, sollten sie nur bei feuchtem Boden entnommen werden, da das Quellen und Schwinden (Nässe/Trockenheit) bei Böden mit hohem Tonanteil Auswirkungen auf die Qualität der Probe haben kann.

2.3 Makroporen und k-Wert Messungen

Es sind vor allem die Makroporen (Grobporen), die wesentlich zur Infiltration beitragen. Makroporen sind die größten Poren (> 1000 µm), Mesoporen sind die mittleren Poren (10-1000 µm) und die Mikroporen sind die kleinsten (< 10 µm). Das Porensystem im Feld ist räumlichen und auch zeitlichen Schwankungen unterworfen.
Böden mit hohen Infiltrationsraten, Ackerbauböden und Böden mit gutem Pflanzenwachstum können Indikatoren für einen hohen Anteil an Makroporen sein. Krümelige Böden besitzen nicht nur großen Makroporenreichtum, sondern auch eine gute Stabilität dieser Poren. Makroporen erlauben eine schnelle Versickerung von Wasser nach schweren Regenfällen oder Bewässerung. Wenn diese Poren leer sind, verlangsamt sich die Versickerung. Die Größe und Ausbreitung von Makroporen ist normalerweise unabhängig von der Korngrößenverteilung des Bodens und der damit in Verbindung stehenden Mikroporen-Ausbreitung. Makroporen entstehen entlang der Wurzeln, besonders wenn diese

wieder verrotten. Sie können aber auch durch Schwinden und Schwellen von Ton im Boden entstehen bzw. auch durch mechanische Bodenbearbeitung (z.B.: Pflügen). Weiters werden sie von verschiedenen Bodentieren erzeugt, wie zum Beispiel Regenwürmern, Ameisen, Mäusen und Insekten.
Eine hohe Makroporosität spiegelt sich in einer geringen Trockendichte wieder, da viele Hohlräume im Boden vorhanden sind. Die Anwesenheit von Makroporen erhöht die Schwankungsbreite der k-Werte.

2.4 Schwankungen des k-Wertes

Der k-Wert, besonders der gesättigte k-Wert ist häufig zitiert als die räumlich höchst veränderliche Variable aller Bodenparameter (WARRICK und NIELSON, 1980; WILDING und DRESS, 1983; zit. bei McKENZIE et al., 2002)

Gemessene k-Werte variieren oft um den Faktor 10 oder mehr innerhalb einer Messserie, obwohl die Proben nebeneinander entnommen wurden. Zusätzlich schwanken die k-Werte mit der Methode mit der sie ermittelt wurden. Ermittelte Laborwerte stimmen selten mit Feldmessungen überein. Die Werte können um den Faktor 100 oder höher schwanken, da sich die Methodik zwischen Labor- und Feldmessung unterscheidet. Feldmethoden sind generell verlässlicher als Labormethoden, da sie die natürlichen Bedingungen besser berücksichtigen (SCOTT, 2000).

2.5 Auswahl einer Methode

Für die Bewertung von Flächen mit Hilfe des k-Wertes ist es nützlich bei Sättigung zu messen (gesättigte Durchlässigkeit, k_s-Wert), da die Messungen mit vergleichbar wenig Aufwand durchgeführt werden können. In der Diplomarbeit werden nur k_s-Werte ermittelt. Es existiert eine große Auswahl an k_s-Wert Messmethoden. Alle diese Methoden können ein unterschiedliches Ergebnis liefern. Die Methoden unterscheiden sich vor allem in den Kosten für das Equipment, in dem nötigen Fachwissen und der zugrunde liegenden Theorie.

Viele Methoden sind nur für bestimmte Bodengegebenheiten anwendbar, da sie ansonst irreführende Durchlässigkeitsbeiwerte ermitteln. Feldmessmethoden sind in den letzten Jahren sehr populär geworden, da effiziente Messmethoden kommerziell verfügbar geworden sind (z.B. Guelph-Permeameter). Insitu Messungen haben den großen Vorteil, dass vor Ort in einem ungestörten Boden gemessen wird. Bei Stechzylinderproben mit anschließender Laborauswertung besteht immer die Gefahr, dass die Bodenproben nicht ungestört sind. Traditionell wird der k-Wert im Labor mit kleinen Stechzylinderproben (200 cm^3) ermittelt, mit dem Resultat, dass die Messwerte stark schwanken. Das kleine Probenvolumen und der Fluss an der Probenwand („edge-flow effect“) sind dafür verantwortlich (CAMERON et al., 1990; zit. bei McKENZIE, 2002). Größere Probenvolumen (> 200 cm^3) würden diesen Effekten besser entgegensteuern, aber den Aufwand bei der Probenentnahme erhöhen. Labormessungen erlauben generell eine bessere Steuerung der Messung, sind aber auch Ressourcen aufwändiger (Equipment, Zeit,…). Die Wahl zwischen Feld und Labormessmethoden ist nicht einfach.

Für die Diplomarbeit wurden k_s-Wert Bestimmungen im Feld (Guelph-Permeameter, Ringinfiltrometer) und k_s-Wert Bestimmungen im Labor (Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel, empirische Formeln) eingesetzt. Die jeweiligen Methoden werden im folgenden Kapitel 3, „Material und Methoden“ genauer erläutert.

3 Material und Methoden

3.1 Standort Rutzendorf

3.1.1 MUBIL die Grundlage

Im Jahr 2003 wurde das Projekt MUBIL (Monitoring, Umstellung, biologischer Landbau) auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Rutzendorf gestartet. MUBIL untersucht die Auswirkungen der Umstellung von einem konventionellen, landwirtschaftlichen Betrieb in einem Biobetrieb. In diesem längerfristig ausgelegten Projekt erforschen 12 Institute die Auswirkungen einer Umstellung auf den Landschaftshaushalt, die Agrarbiodiversität, die Produktion und Wirtschaftlichkeit. Nach einer sorgfältigen Bodenevaluierung wurden vergleichsweise homogene Versuchsflächen für das Monitoring ausgewählt. Letztendlich gibt es eine konventionelle Referenzfläche (SK) und biologisch, bewirtschaftete Vergleichsflächen (DV1, DV2, DV3 und S1G), diese unterscheiden sich wieder in den Düngungsvarianten und in der Bodenbonität.

Die Ackerflächen des Betriebes wurden mit den Anbaumaßnahmen Herbst 2001 auf die biologische Wirtschaftweise umgestellt. Ab 2004 wurde auf den ersten Flächen mit der Leitfruchtfolge begonnen. Die Leitfruchtfolge ist: 1. Jahr: Luzerne; 2. Jahr: Luzerne; 3. Jahr: Winterweizen + Zwischenfrucht; 4. Jahr: Körnermais; 5. Jahr: Sommergerste + Zwischenfrucht; 6. Jahr: Erbse + Zwischenfrucht; 7. Jahr: Winterweizen; 8. Jahr: Winterroggen, Untersaat Luzerne. Die Bodenbearbeitung geschieht in der Regel mit Grubber und Pflug, wenn möglich reduziert (IFÖL, 2003).

Die Wetterstation der Versuchswirtschaft Gross-Enzersdorf, die ca. 5 km entfernt liegt, stellt die Wetterdaten (Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) für das Projekt bereit.

3.1.2 Informationen zum Standort

Lage:

Rutzendorf (156 m.ü.A.), eine Ortschaft der Großgemeinde Groß-Enzersdorf befindet sich im niederösterreichischen Bezirk Gänserndorf. Der Ort liegt ca. 20 km vom Zentrum Wiens entfernt (Abbildung 1).

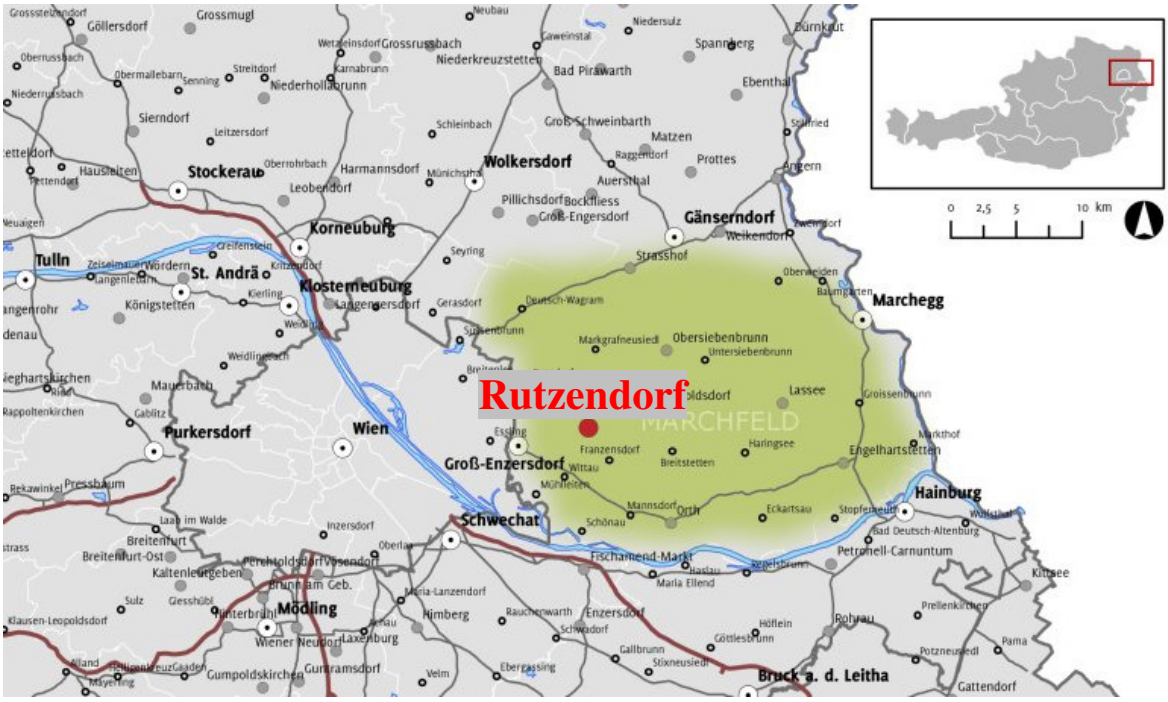


Abbildung 1: Übersichtsplan – Lage des Standortes Rutzendorf

Klima:

Die Versuchsflächen liegen im pannonischen Klimagebiet (d.h. Niederschlag 400 bis 600 mm; 70 bis 90 Frosttage; Vegetationszeit März bis Oktober), im Marchfeld. Das Marchfeld liegt im nordöstlichen Teil des Wiener Beckens, einer der größten Ebenen Österreichs. Es grenzt nordöstlich an die Bundeshauptstadt an und wird im Süden von der Donau, im Osten von der March, im Norden vom Hügelland und im Westen vom Bisambergzug umrahmt. Die Felder liegen in windoffener Lage. Der Klimaraum ist durch heiße, trockene Sommer und kalte, schneearme Winter geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 9,8 °C, die mittlere Niederschlagssumme 554 mm. Besonders im Sommer zeichnet sich das Klima durch geringe Luftfeuchtigkeit und wenig Taubildung aus.

Lufttemperatur:

Die Temperaturen variieren stark im Jahreswechsel. Es gibt lange, heiße, trockene Perioden im Sommer, sowie extrem tiefe Temperaturen im Winter.

Niederschlag:

Gewitter sind im Sommer häufig und von unterschiedlicher Intensität. Schnee wird im Winter durch die offene Lage sehr oft verfrachtet. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist, liegt der Niederschlag in Rutzendorf im Jahr 2007 (646 mm) um 10 % höher als im langjährigen Mittel.

Tabelle 3: Niederschlagsverhältnisse in Rutzendorf (in mm)

Monat	lgj. Mittel (1901-2001)	1965	1971	2001	2007
Jänner	72	26	7	17	41
Februar	30	12	17	10	48
März	35	51	66	49	10
April	41	139	16	31	1
Mai	57	149	24	19	59
Juni	71	192	58	56	48
Juli	65	114	35	93	52
August	57	78	41	34	89
September	47	48	54	115	193
Oktober	38	1	15	10	76
November	42	35	60	42	28
Dezember	34	70	32	16	1
Summe	589	915	425	494	646

Boden:

Die Böden der Region um Rutzendorf werden als Tschernoseme bezeichnet, die aus kalkhaltigen Feinsedimenten des Tertiärs entstanden sind. Sie sind Teil der Praterterrasse und liegen auf 156 m Seehöhe. Die Tiefgründigkeit des Bodens ist nicht gleichmäßig, es treten Teilflächen mit hoch anstehenden Schotterlagen auf. In ca. 90 cm Tiefe ist der Übergang zum schottrigen C-Horizont. Der A-Horizont besteht aus lehmigem Schluff mit einem Humusgehalt von 2,5 bis 4,8 %. Die Bodenreaktion liegt im alkalischen Bereich (pH 7,5 bis 7,6). Die Böden sind mit Phosphor, Kalium und Magnesium ausreichend bis gut versorgt (IFÖL, ???).

3.1.3 Lage der Versuchsflächen

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, weisen die Versuchsflächen eine räumliche Nähe auf. Aus der Finanzbodenschätzungskarte sind ebenfalls die Mäander der Urdonau zu erkennen. In Abbildung 3 ist ein Detailplan der Versuchsflächen SK, S1G und S1M (DV1, DV2, DV3) ersichtlich.

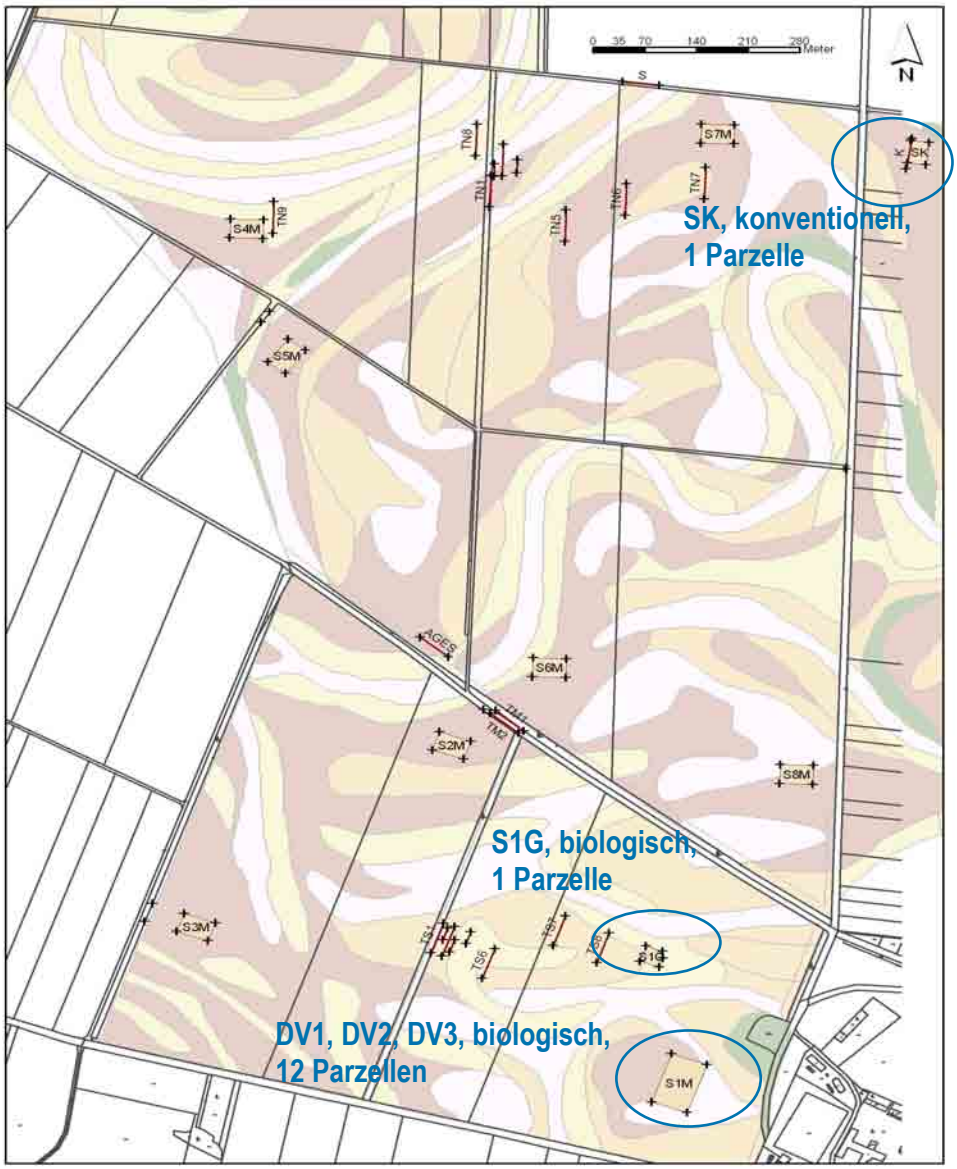


Abbildung 2: Finanzbodenschätzungskarte - Schlageinteilung in Rutzendorf

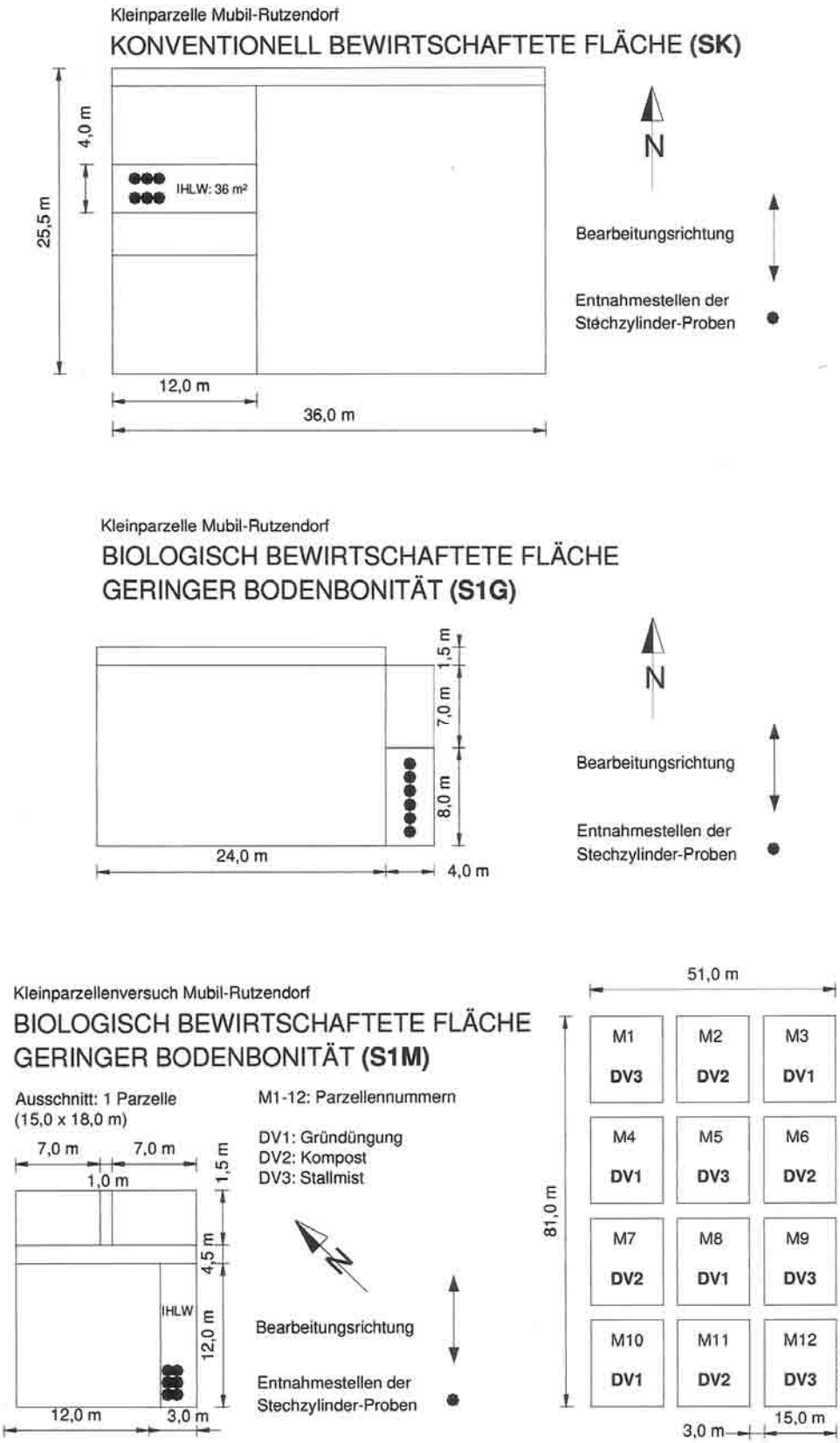


Abbildung 3: Versuchsflächen SK, S1G und S1M in Rutzendorf

3.1.4 Beschreibung der Versuchsflächen in der Vegetationsperiode

Wie in der Tabelle 4 ersichtlich ist, wurden fünf Versuchsflächen gewählt: DV1, DV2, DV3, S1G und SK. Diese Flächen unterscheiden sich in der Bewirtschaftungsform (biologisch, konventionell), in den Düngungsvarianten (Gründüngung, Biokompost, Stallmist, Kunstdünger) und in der Bodenbonität (mittel, gering).
In der Vegetationsperiode 2007 (Abbildung 4) wurde auf den biologischen Flächen und auf der konventionellen Fläche Winterweizen angebaut (Aussaat Herbst 2006, Ernte Sommer 2007). Nach der Ernte wurde als Zwischenfrucht Erbse angebaut.

Biologische Flächen

Auf der Fläche von S1M (biologisch bewirtschaftet, mittlere Bodenbonität) wurde ein Kleinparzellenversuch mit drei unterschiedlichen Düngungsvarianten (DV1, DV2, DV3) untersucht.
DV1 – Gründüngung, d.h. die Flächen werden nur mit organischer Substanz der Gründüngung versorgt, auf eine externe Nährstoffzufuhr wird verzichtet. Die Gründüngung fixiert die Nährstoffe in der Pflanze, damit sie nicht ausgewaschen oder abgebaut werden können. Die Nährstoffe stehen somit zu einem anderen Zeitpunkt zur Verfügung.
DV2 – Biokompost, d.h. zusätzlich zur Gründüngung findet eine Zufuhr von organischer Substanz durch Biotonnenkompost statt.
DV3 – Stallmist, d.h. organischer Dünger aus Tierbeständen wird aufgebracht, es werden weitgehend geschlossene Betriebskreisläufe simuliert.

S1G ist eine biologisch bewirtschaftete Fläche mit geringer Bodenbonität. Auf S1G wird wie in der DV1 mit Gründüngung gearbeitet.

Konventionelle Fläche

SK ist eine konventionell bewirtschaftete Fläche mit mittlerer Bodenbonität und dient als Referenzfläche. Auf SK wird wie üblich in der konventionellen Landwirtschaft mit Kunstdünger gedüngt, d.h. Nährstoffe werden durch die Ernte aus dem Boden entzogen und wieder in Form von Mineraldünger dem Boden zurückgegeben.

Tabelle 4: Beschreibung der Versuchsflächen in der Vegetationsperiode 2007

Bezeichnung	Bewirtschaftung/ Düngung	Bodenbonität	Anzahl der Parzellen	angebaute Kultur	Anbau Ernte
DV1	biologisch/ Gründüngung	mittel	4 Kleinparzellen	Winterweizen	Herbst 2006 Sommer 2007
DV2	biologisch/ Biokompost	mittel	4 Kleinparzellen	Winterweizen	Herbst 2006 Sommer 2007
DV3	biologisch/ Stallmist	mittel	4 Kleinparzellen	Winterweizen	Herbst 2006 Sommer 2007
S1G	biologisch/ Gründüngung	gering	1 Kleinparzelle	Winterweizen	Herbst 2006 Sommer 2007
SK	konventionell/ Kunstdünger	mittel	1 Kleinparzelle	Winterweizen	Herbst 2006 Sommer 2007

Abbildung 4: Zustand der Versuchsflächen im April, Mai, Juli und Oktober 2007 (von oben nach unten)

3.1.5 Zeitplan der k-Wert Messungen und Probeentnahmen

Um die Fragestellung, Auswirkungen von biologischer Landwirtschaft auf den k-Wert und Vergleich der k-Wert Bestimmungsmethoden, beantworten zu können, wurde ein Messplan für die eingesetzten Methoden erstellt (Tabelle 5).

Die Methoden waren:

- Guelph-Permeameter,
- Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel,
- Ringinfiltrometer und
- empirische Formeln.

Während der Vegetationsperiode (April, Mai, Juli und Oktober 2007) wurden Guelph-Permeameter Messungen in 10 und 30 cm Bodentiefe durchgeführt. Im Oktober kamen dann zusätzlich alle anderen oben genannten Methoden zum Einsatz.
Es wurden jeweils drei Wiederholungen in den Düngungsvarianten DV1, DV2 und DV3 durchgeführt. Auf den Flächen S1G und SK gab es jeweils zwei Wiederholungen. Pro Feldtag waren zeitgleich bis zu vier Personen eingesetzt.

Tabelle 5: Zeitplan der k-Wert Messungen und Probeentnahmen in der Vegetationsperiode 2007

Ziel	benötigt	Methode	Tiefe	Messtage			
*versehentlich in 20 cm gemessen				Rutz1 10-13.4.2007	Rutz2 7-10.5.2007	Rutz3 16-17.7.2007	Rutz4 1-3.10.2007
k - im Feld gemessen	Versuchsapperatur	Guelph-Permeameter	10 cm	x	x	x	x
			30 cm	x	x		x
			*20 cm			x	
k - im Feld gemessen	Versuchsapperatur	Ringinfiltrometer	10 cm				x
k - im Labor gemessen	ungestörte Bodenproben (Stechzylinder)	Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel	10 cm				x
			30 cm				x
k - rechnerisch	gestörte Bodenproben (Plastiksackerln) → Kornverteilungen	Formeln: Hazen, Slichter, Terzaghi, Beyer, Sauerbrei und USBR;	10 cm				x
			30 cm				x

3.2 k-Wert Messmethoden

3.2.1 Guelph-Permeameter

Das verwendete GPM (Guelph-Permeameter, Abbildung 6) stammt von der Firma Soilmoisture Equipment Corporation aus den USA. Die Apparatur ist in einem Transportkoffer untergebracht, dies ist vor allem für einen schnellen Transport zu und von der Messstelle von Vorteil.
Das Verfahren eignet sich zur Ermittlung des k_s-Wertes und des Matrixflusspotenzials im Feld. In einem sorgfältig hergestellten Bohrloch wird das GPM aufgestellt. Durch das Boyle-Mariottesche Prinzip stellt sich im Bohrloch unabhängig von dem infiltrierten Wasservolumen ein konstanter Wasserspiegel ein. Es wird das infiltrierte Wasservolumen je Zeiteinheit gemessen. Zur Auswertung werden zwei Messreihen benötigt, d.h. zwei Messungen mit unterschiedlichen Wasserpiegeln im Bohrloch. Eine Messung dauert in der Regel nicht länger als eine Stunde.

Vorbereitung

Die für die Herstellung des Bohrloches notwendigen Bohrer und Bohrgestänge befinden sich im Transportkoffer. Der Flügelbohrer wird mit dem Bohrgestänge verbunden und ein beliebig tiefes Loch zwischen 10-75 cm hergestellt, da auf diese Tiefe die GPM-Ausrüstung ausgelegt ist. Wenn der Flügelbohrer die gewünschte Tiefe erreicht hat, wird das Bohrloch vom lockeren Bodenmaterial mit dem Sohlbohrer gereinigt. Bei hohen Wassergehalten im Boden kommt es vor, dass der Boden beim Einsatz des Sohlbohrers verschmiert. Diese Schmierschichte kann mit der beiliegenden Bohrlochbürste aufgebrochen werden. Die Bürste wird in das Bohrloch abgesenkt und wieder herausgezogen (ohne zu drehen). Nun ist das Bohrloch fertig für die Messung.

Beim Zusammenbau der Apparatur wird mit dem Dreibein begonnen. Die Füße des Dreibeines werden in eine Halterung gesteckt und mit einer Kette, die eine beliebige Länge haben kann verbunden. Je nach Bohrlochtiefe kann das Dreibein optimal eingestellt werden. Das untere Luftrohr wird mit dem oberen Luftrohr, das sich in der Reservoireinheit befindet, verbunden (Abbildung 5). Danach wird das untere Versorgungsrohr an die Reservoireinheit gesteckt. Nun kann das zusammengefügte GPM in das Dreibein eingeführt werden.

Zum Befüllen des GPM mit Wasser, wird der Stopfen am oberen Ende des GPM geöffnet (Abbildung 5). Es ist darauf zu achten, dass die Kerbe des Ventilknopfes an der Reservoirhalterung nach oben zeigt (Abbildung 6), dadurch können beide Vorratsbehälter mit Wasser befüllt werden. Beim Befüllen ist darauf zu achten, dass das GPM vollständig mit Wasser aufgefüllt wird. Im Behälter darf keine Luft mehr vorhanden sein, da sonst die Messung nicht fehlerfrei funktioniert. Nun wird die Reservoir-Einheit wieder mit dem Stopfen verschlossen.

Beim Platzieren des GPM in das Bohrloch ist zu achten, dass kein Bodenmaterial hineinfällt, z.B. durch Berühren des GPM an der Bohrlochwand. Wenn Bodenmaterial in das Bohrloch gefallen sein sollte, ist es wieder mit dem Sohlbohrer und gegebenenfalls mit der Bürste zu reinigen.

Abbildung 5: Links: Zusammenbau des Luftrohres; Rechts: Loch zum Befüllen des Guelph-Permeameters

Abbildung 6: Links: Ventilknopf, Kerbe zeigt nach oben (X); Rechts: zusammengebautes Guelph-Permeameter

Messung

Nachdem das GPM zusammengebaut, aufgefüllt und über dem Bohrloch aufgestellt ist, wird mit der ersten Messreihe begonnen. Zuerst werden die GPM Einstellungen überprüft (Kerbe des Ventils sollte nach oben zeigen; der Indikator am oberen Luftrohr ist ganz nach unten gezogen; der Stopfen verschließt den Behälter luftdicht). Nach der Überprüfung der Einstellungen wird das Luftrohr langsam auf 5 cm aufgezogen, sodass sich im Bohrloch ein 5 cm hoher Wasserspiegel einstellt. Bei zu schnellem Ziehen des Luftrohres kann sich das Bohrloch verschlämmen und dadurch die Messung verfälschen.

Für die Einstellung des Ventils gibt es zwei Möglichkeiten (Kerbe oben = beide Zylinder, für durchlässige Böden / Kerbe unten = nur Innenzylinder, für weniger durchlässige Böden). Die passende Ventileinstellung richtet sich nach der Durchlässigkeit des Bodens. Dazu wird das Absinken des Wasserspiegels im Reservoir beobachtet. Wenn im Minutenintervall keine Ablesungen (Kerbe oben) durchgeführt werden können, besteht die Möglichkeit das Ventil mit der Kerbe nach unten zu drehen. Dadurch wird nur der Innenzylinder zur Infiltration freigegeben. Es ist nun möglich genauere Ablesungen an der Skala durchzuführen. Mit Hilfe dieser Skala kann die Absenkung des Wasserspiegels pro Minute auf einem Formblatt festgehalten werden. Wenn sich ein konstanter Fluss eingestellt hat (5 gleiche Messungen), wird die erste Messreihe beendet. Während einer Messung darf die Ventileinstellung (Reservoirkonstante X oder Y) nicht geändert werden.

Die zweite Messreihe funktioniert so wie die erste Messreihe, der Unterschied ist nur die Einstauhöhe von 10 cm. Für eine einfache Auswertung sollte die gleiche Ventileinstellung wie bei der 5 cm Messreihe verwenden werden. Die Messung wird beendet, wenn die Infiltration konstant wird (5 gleiche Messungen). Mit Hilfe von Formeln und den beiden Messreihen wird der k_s-Wert berechnet.

Auswertung

Wenn die zwei Standardwasserspiegelhöhen H_1 = 5cm und H_2 = 10 cm benutzt wurden, werden zur Auswertung die einfachen Formeln aus der GPM-Gebrauchsanleitung verwendet (1991).

Wenn beide Reservoirs benutzt wurden (Kerbe des Ventilknopfes oben):

$$k_s = 0{,}0041 \cdot X \cdot q_2 - 0{,}0054 \cdot X \cdot q_1$$

Wenn nur der Innenzylinder benutzt wurde (Kerbe des Ventilknopfes unten):

$$k_s = 0{,}0041 \cdot Y \cdot q_2 - 0{,}0054 \cdot Y \cdot q_1$$

$[k_s]$	=	$cm \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert unter feldgesättigten Bedingungen; die beiden Konstanten in der Gleichung (0,0041 und 0,0054) für k_s besitzen die Einheit cm^{-2}
$[X]$	=	cm^2	Reservoirkonstante für beide Reservoirs, benetzte Grundrissfläche; entspricht der Summe der beiden Kreisringflächen Luftrohr – Innenzylinder und Innenzylinder – Außenzylinder; für das Gerät am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft: X = 35,13 cm^2
$[Y]$	=	cm^2	Reservoirkonstante für den Innenzylinder, benetzte Grundrissfläche; entspricht der Kreisringfläche Luftrohr-Außenradius – Innenzylinder-Innenradius; für das Gerät am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft: Y = 2,15 cm^2
$[q_1]$	=	$cm \cdot s^{-1}$	mittlere Fließrate der drei letzten Messungen der ersten Messreihe; q = Wasserspiegeldifferenz im Innenbehälter in cm / Zeitdifferenz in s
$[q_2]$	=	$cm \cdot s^{-1}$	mittlere Fließrate der drei letzten Messungen der zweiten Messreihe; q = Wasserspiegeldifferenz im Innenbehälter in cm / Zeitdifferenz in s

Eigenschaften – Guelph-Permeameter

Das Guelph-Permeameter ist eine schnelle Methode für die k_s-Wert Ermittlung im Feld. Die Methode kann nicht für Messungen an der Bodenoberfläche eingesetzt werden, da für diesen

Versuch ein Bohrloch von mindestens 10 cm vorhanden sein muss. Die Genauigkeit ist dürftig und das Permeameter sollte nur angewendet werden, wenn keine genauen Durchlässigkeitsbeiwerte erforderlich sind. Das Permeameter wird nicht als Standardmessmethode empfohlen. Es kann aber dazu eingesetzt werden um kostengünstig viele Messungen zu erhalten.

Einsatzbereich: ca. 0,01–20 m/d

Genauigkeit: Die Genauigkeit ist dürftig bis schwach, abhängig von den Bodengegebenheiten. Die Werte der Messungen sind oft um den Faktor 10 bis 100 kleiner als mit anderen genaueren Methoden (DAVIS et al., 1999; zit. bei McKENZIE et al., 2002).

Zeit: Eine Person kann bei guten Bedingungen 10 bis 15 Messungen durchführen.

Kosten: Die Anschaffungskosten eines Guelph-Permeameters sind hoch.

Einsatzgebiet: Die Methode ist am besten in mächtigen Böden geeignet, in Böden mit hoher Aggregatstabilität, geringen Tongehalten und geringer Makroporosität. Sie kann nicht an der Bodenoberfläche verwendet werden, da für diesen Versuch ein Bohrloch von mindestens 10 cm vorhanden sein muss.

Vorteile: Die Methode ist schnell und billig. Messungen können bis zu einer Tiefe von 0,75 m durchgeführt werden, ohne dass größere Erdbewegungen notwendig sind. Das Equipment ist sehr handlich in einem Transportkoffer untergebracht und der Wasserbedarf ist gering.

Nachteile, fehleranfällig wenn:

- der Bohrer bei höheren Wassergehalten des Bodens das Bohrloch verschmiert, dann ist zur Fehlerminimierung die Bohrlochbürste zu verwenden;
- es bei Trockenheit durch ein zu schnelles Infiltrieren von Wasser in den Boden zu einer Verschlämmung der Bohrlochwand kommt;
- ein wenig durchlässiger Boden knapp unter dem Bohrloch ansteht und diese Schichte eine stationäre Infiltration verhindert;

3.2.2 Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

Die Messung erfolgte mit einem instationärem Versuch nach ÖNORM L 1065 (1988). Bei diesem Versuch wird ein konstanter Außenwasserspiegel mit 4,5 cm über der Bodenprobenoberkante eingestellt und das Ansteigen des Innenwasserspiegels über der Bodenprobe beobachtet (Abbildung 7). Die k_s-Werte werden mittels einer Online-k-Wert-Apparatur im Labor erfasst.

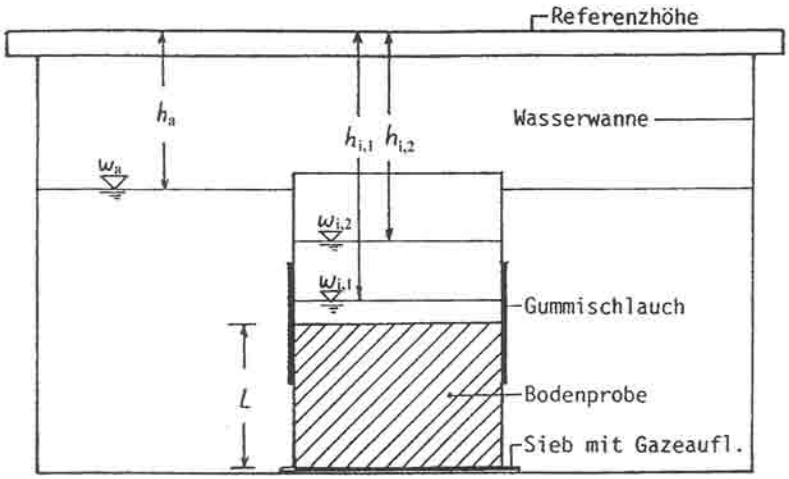


Abbildung 7: Versuchsanordnung für die k-Wert-Bestimmung im Labor mit aufsteigendem Wasserspiegel

Vorbereitung

Die ungestörten Bodenproben (Stechzylinderproben, 5 cm hoch, 200 cm³) werden mit entlüftetem Wasser aufgesättigt (Abbildung 8, Abbildung 9). Dazu werden die Proben auf eine Siebplatte mit Gazeauflage in eine leere Wanne gestellt. Danach wird ein zweiter leerer Zylinder aufgesetzt und diese beiden Zylinder werden mit einer Gummidichtung wasserdicht verbunden (Abbildung 7). Nun wird mit entlüftetem Leitungswasser ein Wasserspiegel in der Wanne hergestellt und etappenweise um jeweils 0,5 cm angehoben bis die Proben 2 mm überstaut sind. Die Zeitabstände der Anhebungen sind dabei von der Bodenart abhängig (sandige Böden – kurze Zeitabstände; tonige Böden – längere Zeitabstände). Es ist wichtig, dass die Sättigung nicht zu schnell erfolgt, da sonst Luftbläschen in den Poren eingeschlossen werden können, die die k-Wert Messungen beeinträchtigen.

Abbildung 8: Links: Entnahme einer Stechzylinder-Bodenprobe; Rechts: ungestörte Bodenproben (Stechzylinder)

Abbildung 9: Links: Aufsättigung der Bodenproben in der Wanne; Rechts: Online-k-Wert-Apparatur mit Bodenproben und aufgesetzten Messsonden

Messung

Das PC-Programm für die k-Wert Messung wird gestartet und eingerichtet. Die Messsonden werden auf die Zylinder aufgesetzt (Abbildung 9). An jeder Messsonde sind 6 unterschiedlich lange Metallnadeln, die den Anstieg des Innenwasserspiegels erfassen. Anschließend wird der Außenwasserspiegel in der Wanne bis ca. 0,5 cm unter die Oberkante des aufgesetzten Zylinders gehoben. Der Wasserspiegel wird mit Hilfe einer Boyle-Mariotteschen Flasche konstant gehalten. Nun beginnt der Wasserspiegel im Inneren der Zylinder zu steigen. Die Messsonden registrieren die zeitliche Veränderung des Innenwasserspiegels und ein Ultraschallsensor ermittelt ständig die Höhe des

Außenwasserspiegels. Wenn alle Nadeln der Messsonden benetzt sind, ist die Messung beendet.

Auswertung

Die k-Wert Berechnung erfolgt automatisch mit einem PC-Programm. Die vom Programm ermittelten k-Werte sind nur dann korrekt, wenn die Messungen fehlerfrei durchgeführt wurden und der Außenwasserspiegel während der gesamten Messung konstant war. Wenn aber während der automatischen Messung einen Fehler gemacht wurde, besteht die Möglichkeit mit den vorhandenen Daten die k-Werte selbst zu berechnen.

Die händische Auswertung erfolgt nach folgender Formel (CEPUDER et al., 2006):

$$k_s = \frac{L}{t_2 - t_1} . \ln \frac{h_{i1} - h_{a1}}{h_{i2} - h_{a2}}$$

$[k_s]$	=	$cm \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert (bei Sättigung)
$[L]$	=	cm	Höhe des Stechzylinders bzw. der Bodenprobe
$[t_2]$	=	s	Zeitpunkt der zweiten Ablesung (ab Beginn der Messung)
$[t_1]$	=	s	Zeitpunkt der ersten Ablesung (ab Beginn der Messung)
$[h_{i1}]$	=	cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Wasserspiegel über der Bodenprobe zum Zeitpunkt 1
$[h_{a1}]$	=	cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Außenwasserspiegel (in der Wanne) zum Zeitpunkt 1
$[h_{i2}]$	=	cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Wasserspiegel über der Bodenprobe zum Zeitpunkt 2
$[h_{a2}]$	=	cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Außenwasserspiegel (in der Wanne) zum Zeitpunkt 2; in der Regel gilt $h_{a1} = h_{a2}$

Eigenschaften - Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

Stechzylinderproben (V = 200 cm³) mit einer Höhe von 5 cm werden am Feld entnommen. Wenn der Boden für eine genaue Entnahme zu trocken ist, kann er zuvor angefeuchtet werden.

Einsatzbereich: ca. 0,001-50 m/d (mit Hilfe einer Online-Erfassung)

Genauigkeit: mittel

Zeit: Es sind Probenentnahmen im Feld durchzuführen und anschließend die Messungen und die Auswertungen im Labor (Labor: ca. 6 Proben pro 2 Stunden).

Kosten: Wenn die Auswertungsapparatur bereits vorhanden ist, sind die Kosten moderat, muss das Equipment gekauft werden, ist mit hohen Kosten zu rechnen.

Einsatzgebiet: Die Methode ist robust und kann auf vielen Bodentypen angewendet werden. In steinigen und stark verdichteten Böden sollte das Ringinfiltrometer benutzt werden. Die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel eignet sich auch bei gering mächtigen Horizonten, da die Probenhöhe nur 5 cm beträgt.

Vorteile: Die Methode ist verlässlich, auf vielen Böden anwendbar und in der ÖNORM L 1065 standardisiert.

Nachteile:

- Zeitaufwand (Probeentnahme im Feld, Messung und Auswertung im Labor);
- die kleine Probengröße beeinträchtigt die Genauigkeit der Messung

3.2.3 Ringinfiltrometer

Die Messung erfolgte mit einer stationären Versuchsanordnung. In diesem Versuch wird ein konzentrischer Zylinder ca. 4 cm tief in den Boden geschlagen, ein ca. 5 cm hoher konstanter Innenwasserspiegel hergestellt und der Boden aufgesättigt. Wenn die beobachtete Infiltrationsrate (es wird das infiltrierte Wasservolumen je Zeiteinheit gemessen) konstant wird, ist der Messvorgang beendet (Abbildung 10). Die k_s-Werte werden mittels einer Formel berechnet.

Abbildung 10: Links: Aufsättigung des Bodens im Ring; Rechts: Messung

<u>Vorbereitung</u>

Der verwendete Ring ist dünnwandig (ca. 3mm) und aus rostfreiem Stahl. Der Durchmesser des Ringes beträgt 30 cm und die Höhe 25 cm.

Mit Hilfe eines Grabwerkzeuges und einer Wasserwaage wird auf der gewählten Fläche ein horizontales Planum, auf der gewünschten Tiefe errichtet. Falls Vegetation vorhanden ist, wird sie mit einer Schere so tief wie möglich zurück geschnitten.

Auf diesem errichteten Planum wird der 30 cm Ring ca. 3 bis 5 cm tief eingeschlagen. Zum Eintreiben des Ringes in den Boden wird ein Holzkreuz, das auf den Ring aufgelegt wird, verwendet. Mit einem Plastikhammer wird zentrisch auf das Holzkreuz geschlagen. Mit einer Wasserwaage wird kontrolliert, ob der Zylinder auch tatsächlich horizontal im Boden ausgerichtet ist.

Wenn der Ring korrekt platziert wurde (horizontal und mit einer Eindringtiefe von 3 bis 5 cm), wird der außerhalb des Ringes liegende Boden vorsichtig an den Ring gedrückt, dies verhindert eine mögliche Kurzschlussströmung des Wassers nach außen.
Als Schutz der Bodenoberfläche wird ein Geotextil in den Zylinder eingebracht, oder es wird anstelle des Geotextils eine 1 cm dicke Filtersandschicht verwendet, die dieselbe Funktion hat. Diese Maßnahme sorgt dafür, dass der Boden nicht verschlämmt.
Es wird nun eine Art Maßstab an die Zylinderinnenseite montiert. Dieser Maßstab hat ein aufgebogenes Ende, das zu einer Spitze verjüngt ist. Diese Spitze stellt die Füllhöhe während des Versuches dar. Diese Spitze sollte ca. 5 cm über der Bodenoberkante sein.
Für die Infiltration werden ca. 15 l Wasser benötigt (3 Kanister zu je 5 Liter Wasser). Die Kanister werden auf einen Tisch gestellt, damit sie nicht andauernd angehoben werden müssen. Auf einen Kanister wird ein Kunststoffschlauch mit Ventil montiert. Mit Hilfe des Schlauches wird der Boden im Ring langsam mit Wasser aufgesättigt. Die erwünschte Wasserspiegelhöhe ist dann erreicht, wenn die Spitze des Maßstabes gerade nicht sichtbar ist. Der Wasserspiegel wird nun konstant gehalten. Wenn der Boden gesättigt ist, wird mit dem Stationärversuch begonnen.

Durchführung

Für den gewählten Stationärversuch, wird der Wasserspiegel (5 cm über der Bodenoberkante) während des gesamten Versuches konstant gehalten. Für die Messung werden zwei Messbecher, eine Stoppuhr und ein Formblatt um die Messwerte festzuhalten benötigt. Es werden die beiden Messbecher zu je 500 ml mit Wasser befüllt. Das Ziel ist nun den Wasserspiegel mit dem Wasser des ersten Messbechers konstant auf der Spitze des Maßstabes zu halten. Wenn der Messbecher entleert wurde, notiert eine weitere Person die Zeit die für die Entleerung notwendig war, d.h. man erhält einen Durchfluss (Volumen/Zeiteinheit). Es wird nun der zweite schon befüllte Messbecher benutzt, um die Messung ohne Unterbrechung fortzusetzen, während dessen der erste Messbecher wieder mit Wasser befüllt wird.
Das Experiment ist dann beendet, wenn die Zeitschritte für die Infiltration von 500 ml Wasser konstant werden (d.h. der Durchfluss ist konstant).

Auswertung

Bei einem Ringversuch kann mit Hilfe der folgenden Formel der k-Wert berechnet werden (CEPUDER et al., 2006):

$$k_s = \frac{q_s}{\frac{H}{(C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + \frac{1}{\alpha^* \cdot (C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + 1}$$

[k_s]	=	$cm \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert bei Feldsättigung; eine vollständige Sättigung kann unter Feldbedingungen i. a. nicht erzielt werden, wegen der verbleibenden eingeschlossenen Luftblasen und Inhomogenitäten
[q_s]	=	$cm \cdot s^{-1}$	gemessene Infiltrationsrate unter Überstaubedingungen
[H]	=	cm	Überstauhöhe; Höhe des stationären Wasserspiegels im Zylinder über der Bodensohle
[C_1]		dim.los	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für d ≥ 3 cm und H ≥ 5 cm beträgt $C_1 = 0{,}316 \cdot \pi$
[C_2]		dim.los	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für $d \geq 3$ cm und $H \geq 5$ cm beträgt $C_2 = 0{,}184 \cdot \pi$
[d]	=	cm	Eindringtiefe des Zylinders in den Boden
[a]	=	cm	Radius des Zylinders
[α^*]	=	cm^{-1}	makroskopischer Parameter für die Kapillarenlänge; α* drückt die relative Bedeutung der Schwerkraft bezogen auf die Kapillarkraft aus, wobei große Werte von α* die Dominanz der Schwerkraft über die Kapillarkraft anzeigen; das trifft insbesondere auf grob texturierte und/oder hochgradig strukturierte Böden zu (α*, Tabelle 6)

Die Gleichung besteht aus drei Hauptkomponenten :

- aus dem hydrostatischen Druck bzw. Überstauhöhe (erster Term im Nenner der Gleichung);
- aus dem ungesättigten Fluss unterhalb des Zylinders infolge der im Boden herrschenden Kapillarkräfte (Wasserspannung; zweiter Term im Nenner) und
- aus dem reinen Schwerkraftfluss (Gradient 1 bzw. dritter Term)

Tabelle 6: Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter *α** **(CEPUDER et al., 2006)**

Bodentextur- und -struktur-Kategorie	α* cm^{-1}
● Verdichtete, strukturlose, tonige oder schluffige Substrate; diese Kategorie trifft oftmals auf Deponieabdeck- oder -dichtungsschichten, limnische oder marine Sedimente zu	0,01
● Böden, die sowohl fein texturiert (tonig oder schluffig), als auch unstrukturiert sind; können auch einen gewissen Feinsand-Anteil aufweisen	0,04
● Die meisten strukturierten Böden von Tonen bis zu Lehmen, einschließlich unstrukturierten mittleren und feinen Sanden; diese Kategorie trifft für die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden zu	0,12
● Grobsande und kiesige Sande; einschließlich stark strukturierte oder aggregierte Böden als auch Böden mit großen und/oder zahlreichen Rissen oder Makroporen	0,36

Eigenschaften - Ringinfiltrometer

Das Ringinfiltrometer mit nur einem Ring wird nicht empfohlen. Ganz im Gegensatz dazu wird das Doppelringinfiltrometer (zwei Ringe) als Standardmessversuch am Feld empfohlen. Der durch diesen Versuch ermittelte k_s-Wert wird vom Makroporenfluss dominiert (CEPUDER et al., 2006).

Einsatzbereich: ca. 0,01–50 m/d

Genauigkeit: mittel

Zeit: Eine Person kann bei guten Bedingungen ca. 10 Messungen pro Tag durchführen.

Kosten: Die Kosten sind gering, da bereits vorhandenes Material verwendet werden kann.

Einsatzgebiet: Der Versuch wird normalerweise für Messungen an der Bodenoberfläche eingesetzt. Messungen in tieferen Bodenhorizonten können ebenfalls durchgeführt werden. Die Methode ist am besten für mächtige Horizonte geeignet. Eine Stärke dieses Verfahrens ist ebenfalls, dass es auch auf sehr kiesigen und verdichteten Böden angewandt werden kann. Im Gegensatz dazu ist es auf kiesigen Böden schwierig ungestörte Stechzylinder-Proben zu entnehmen, die für die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel benötigt wären. Die Herstellung eines Bohrloches für das Guelph-Permeameter würde sich auch als schwierig erweisen.

Vorteile: Die Methode ist einfach, robust, billig und kann auf vielen Böden angewendet werden.

Nachteile:

- hoher Wasserbedarf in durchlässigen Böden;

Fehleranfällig wenn:

- ein wenig durchlässiger Boden die Messung beeinflusst bevor ein stationärer Durchfluss erreicht ist;
- der anfängliche Wassergehalt des Bodens nicht einheitlich ist;
- während der Messung das Schwellen von Tonen die Durchlässigkeit des Bodens beeinflusst;
- ein bevorzugter Fluss eintritt (Makroporen), da die Annahme einer gleichmäßigen Feuchtefront nicht mehr erfüllt wird;

3.3 k-Wert Abschätzung aus der Kornverteilungskurve

3.3.1 Korngrößenanalyse

Die Bestimmung der Korngrößen erfolgt nach den ÖNORMEN L 1061-1 (2002) und L 1061-2 (2002). Mit Hilfe der Korngrößenanalyse wird der Boden in Klassen eingeteilt, z.B. in Grobboden und Feinboden. Weiters wird der Feinboden in Sand, Schluff und Ton unterteilt.

Feinboden Siebdurchgang < 2 mm

Grobboden Siebdurchgang > 2 mm

Vorbereitung

Die Feinbodenanalyse (geschätzter Grobbodenanteil < 10 %) wird mit Hilfe einer Nasssiebung (2 mm > d ≥ 0,0063 mm, Sand) und durch das Pipetteverfahren nach Kubiena (0,0063 mm > d, Schluff und Ton) durchgeführt (Abbildung 11).

Abbildung 11: Links: gestörte Bodenproben; Mitte: Nasssiebung des Feinbodens; Rechts: Pipetteverfahren nach Kubiena

Für die Feinbodenanalyse sind mindestens 100 g lufttrockener Boden für die Feinsiebung, und mindestens 20 g lufttrockener Boden für das Pipetteverfahren bereitzustellen.

Die Bodenproben werden für die Feinsiebung und für das Absetzverfahren mit einem Dispergierungsmittel angesetzt. Für die Feinsiebung wird 100 g Boden mit 250 ml

Dispergierungsmittel im Sedimentationszylinder vermischt. Für das Pipetteverfahren wird 20 g Boden mit 50 ml Dispergierungsmittel in einem weiteren Zylinder vorbereitet. Beide Zylinder werden für 8 Stunden stehen gelassen, damit das Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat-Lösung) die Bodenpartikel auftrennen kann. Danach wird ca. 200 ml entionisiertes Wasser in beide Zylinder gefüllt. Die Flaschen werden mit einem Gummistopfen verschlossen und ca. 6 Stunden im Überkopfschüttler geschüttelt.

Durchführung

● Nasssiebung des Feinbodens (2 mm > d ≥ 0,0063 mm, Sand)

Die Nasssiebung dient zur Ermittlung des Sandanteils und deren Unterklassen. Der Siebsatz 2,0 mm – 1 mm – 0,63 mm – 0,2 mm – 0,125 mm – 0,063 mm wird auf das Rüttelgerät aufgesetzt und die dispergierte Probe nass gesiebt. Danach werden die einzelnen Siebrückstände im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Mit Hilfe der Siebrückstände wird die Sandfraktion berechnet.

● Pipetteverfahren nach Kubiena (0,0063 mm > d, Schluff und Ton)

Das Pipetteverfahren ist ein Absetzverfahren und dient zur Bestimmung des Schluff- und des Tonanteiles im Feinboden. Die dispergierten Bodenproben werden im Sedimentationszylinder für das Absetzverfahren mit entionisiertem Wasser bis zur 1000-ml-Marke aufgefüllt und in eine Wasserwanne gestellt. Die Temperatur der Probe und der Wasserwanne soll übereinstimmen (21,0 +- 0,4 °C). Nach dem der Zylinder geschüttelt wurde, kann mit der Pipettierung begonnen werden. Dazu werden in den Zylindern zu definierten Zeitpunkten in bestimmten Tiefen Proben entnommen (pipettiert). Anschließend werden die einzelnen Proben im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und durch Wiegen die Bodenmasse bestimmt.

Auswertung

Die Ermittlung des prozentuell richtigen Ton-, Schluff- und Sandanteiles erfolgte mit einer Excel Datei des Institutes für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft.

3.3.2 Empirische Formeln

Zur Abschätzung kann auch der k-Wert rechnerisch aus der Kornverteilungskurve bestimmt werden. Dafür stehen eine ganze Reihe von empirischen Formeln (Tabelle 7) zur Verfügung, deren Anwendbarkeit von der Kornzusammensetzung des Bodens abhängt (VUKOVIC und SORO, 1992). Diese Formeln wurden für sandige und kiesige Böden entwickelt, daher eignen sie sich nicht für bindige Böden.

Die Formeln schließen von der Korngrößenverteilung auf die Porengrößenverteilung. Wenn der Boden in Einzelkorngefüge vorliegt sind die Formeln anwendbar (z.B. bei Sand), sobald der Boden aggregiert ist (z.B. bei Schluff und Ton) sind die Formeln nicht zu verwenden.

Empirische Formeln sind die billigste Methode um einen k-Wert abzuschätzen, die Werte sind jedoch wesentlich ungenauer als die Messverfahren im Feld oder Labor.

Auswertung

Tabelle 7: Empirische Formeln zur Ermittlung des k-Wertes

Genereller Ausdruck: $K = \frac{g}{v} \cdot C \cdot \varphi(n) \cdot d_e^{\,2}$

Author	Value of coefficient C	Function of porosity $\varphi(n)$	Effective grain diameter d_e	Domain of applicability
1 Hazen	$6 \cdot 10^{-4}$	$[1+10(n-0,26)]$	$d_e = d_{10}$	$0,1\text{mm} < d_e < 3$ mm $U < 5$
2 Slichter	$1 \cdot 10^{-2}$	$n^{3,287}$	$d_e = d_{10}$	$0,01\text{mm} < d_e <$ 5 mm
3 Terzaghi	$10,7 \cdot 10^{-3}$	$\left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2$	$d_e = d_{10}$	large grain sands
4 Beyer	$6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{U}$	1	$d_e = d_{10}$	$0,06\text{mm} < d_e <$ 0,6 mm $1 < U < 20$

5	Sauerbrei	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$\frac{n^3}{\left(1-n^2\right)}$	$d_e = d_{17}$	sand and sandy clay
6	USBR, (U.S. Bureau of Reclamation)	$4,8 \cdot 10^{-4} \cdot d_{20}^{0,3}$	1	$d_e = d_{20}$	medium grain sands $U < 5$

Die Formeln bestehen aus drei Teilen:

- Wert des Koeffizienten;
- Funktion des Porenanteils;
- effektiver Korndurchmesser;

<u>Eigenschaften - k-Wert Abschätzung aus der Kornverteilungskurve</u>

Für Böden besteht die Möglichkeit, den k-Wert aus der Kornverteilungskurve abzuschätzen. Dazu stehen empirische Formeln zur Verfügung.

Einsatzbereich: Die empirischen Formeln sind nur in nicht bindigen Böden zu verwenden.

Genauigkeit: dürftig (ist nur eine Abschätzung)

Zeit: Es ist mit einem hohen Zeitaufwand zu rechnen, wenn der Porenanteil und die Kornverteilung ermitteln werden müssen.

Kosten: Die Kosten sind moderat bis hoch. Wenn eine Kornverteilungsermittlungsapparatur bereits vorhanden ist, sind die Kosten moderat. Muss jedoch eine Apparatur angeschafft werden sind die Kosten hoch. Die k-Werte werden aber auch oft aus der Bodenkartierung abgeleitet.

Einsatzgebiet: Die Formeln taugen für eine schnelle Abschätzung des k-Wertes bei vorhandenen Bodenparametern (Porenanteil und wirksamer Korndurchmesser).

Vorteile: schnelle Abschätzung

Nachteile: nur Abschätzung, keine Messung

3.4 Bestimmung der Trockendichte

Die Ermittlung der Trockendichte ρ_d erfolgte nach ÖNORM L 1068 (1988). Die ungestörten Stechzylinderproben wurden bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Trockendichte wurde nach folgender Formel berechnet:

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

$[\rho_d]$	=	$g \cdot cm^{-3}$	Trockendichte der ofentrockenen Bodenprobe (Stechzylinder)
$[m_s]$	=	g	Feststoffmasse der ofentrockenen Bodenprobe
$[V]$	=	cm^3	Gesamtvolumen der Bodenprobe (= Volumen des Stechzylinders)

3.5 Statistische Methoden

Allgemeines

Ziel der Testtheorie (Signifikanztests) ist es, aufgrund von Stichproben Aussagen über die wahren Werte (Grundgesamtheit) zu machen. Die Testtheorie stellt die Verbindung zwischen Experiment und Wirklichkeit dar (UNTERSTEINER, 2007).

Werden zwei Mittelwerte miteinander verglichen, so formuliert man zwei Hypothesen:

H_0 (Nullhypothese): Die beiden Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit, d.h. Unterschiede zu den Mittelwerten sind zufallsbedingt.

H_1 (Alternativhypothese): Die beiden Stichproben entstammen verschiedenen Grundgesamtheiten.

Mit einem Signifikanztest wird entschieden welche der beiden Hypothesen zutrifft. Mit Hilfe der Teststheorie und den Stichprobenwerten wird die Irrtumswahrscheinlichkeit berechnet. Die Irrtumswahrscheinlichkeit (p) ist jene Wahrscheinlichkeit, mit der man sich irrt, wenn man H_0 verwirft und H_1 annimmt, obwohl H_0 zutrifft (anders ausgedrückt; p ist jene Wahrscheinlichkeit mit der man falsch liegt, wenn man annimmt, dass die Stichproben verschiedenen Grundgesamtheiten entstammen).

Es gelten folgende Signifikanzniveaus:

$p > 0{,}05$	nicht signifikant
$p \leq 0{,}05$	signifikant
$p \leq 0{,}01$	sehr signifikant

Durchführung

In der Diplomarbeit wurden die statistischen Analysen mit der Software SPSS 15 durchgeführt (BÜHL, 2006; ECKSTEIN, 2006; BROSIUS, 2007). Einfache Aufgaben wurden mit Microsoft Excel berechnet und grafisch ausgegeben. Mit Hilfe der univariaten Varianzanalyse (ANOVA) in SPSS wurde der Einfluss von einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Fläche, Bodentiefe und Zeit) auf eine abhängige Variable (k-Wert) untersucht. Die Varianzanalyse überprüft, ob sich die Stichproben hinsichtlich ihrer

Mittelwerte nur zufällig oder signifikant unterscheiden. Voraussetzungen für die Anwendung dieses parametrischen Tests ist die Normalverteilung der Stichproben. Die Normalverteilung kann man mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüfen. Bei einem signifikanten Ergebnis der Varianzanalyse wurde mit Hilfe eines Post-Hoc-Tests festgestellt welche Gruppen sich signifikant voneinander unterscheiden. Die Varianzhomogenität wurde mit dem Levene-Test ermittelt. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit mit $p > 0,05$ beim Levene-Test bedeutet, dass Varianzhomogenität vorherrscht. Damit kann man den Post-Hoc-Test mit Student-Newman-Keuls rechnen. Wenn keine Gleichheit der Varianzen vorherrscht, wird der Post-Hoc-Test nach Tamhane verwendet.

Für die grafische Darstellung der Ergebnisse wurden Balkendiagramme verwendet. Buchstaben bei Werten in den Diagrammen (z.B. Abbildung 12) und in den Tabellen (z.B. Tabelle 8) weisen auf signifikante Unterschiede hin. Werte, die denselben Buchstaben aufweisen, unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

4 Ergebnisse und Diskussion

Es wurden fünf Flächen untersucht:

DV1: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Gründüngung

DV2: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Biokompost

DV3: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Stallmist

S1G: biologischer Landbau, geringe Bodenbonität, Gründüngung

SK: konventioneller Landbau, mittlere Bodenbonität, Mineraldünger

4.1 Guelph-Permeameter

Messungen: im April, Mai, Juli und Oktober 2007; in 10 und 30 cm Tiefe

Tabelle 8: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Guelph-Permeameter

	Signifikanz		Gruppe		
			a	ab	b
Fläche	0,013	-> signifikant	S1G SK	DV1 DV3	DV2
Bodentiefe	0,002	-> signifikant	30 cm	20 cm	10 cm
Zeit	0,232	-> nicht signifikant	-	-	-

Signifikante Unterschiede zwischen den Flächen

Bei der Auswertung der Messwerte wurde festgestellt, dass hinsichtlich des k-Wertes ein signifikanter Unterschied von S1G (geringe Bodenbonität/Gründüngung) und SK (mittlere Bodenbonität/Mineraldünger) zu DV2 (mittlere Bodenbonität/Biokompost) herrscht (Tabelle 8). Mit einem Mittelwert von 5,48 m/d ist die Durchlässigkeit bei DV2 größer als bei den anderen Flächen. S1G (1,48 m/d) und SK (1,58 m/d) weisen eine kleinere mittlere Wasserdurchlässigkeit auf (Abbildung 12). Es hat den Anschein, dass die geringe

Bodenbonität bei S1G, der Einsatz von Mineraldünger und die intensivere Bodenbearbeitung (Verdichtung) bei SK den kleinen mittleren k-Wert verursachen.
Eine mittlere Bodenbonität zusammen mit einer biologischen Bewirtschaftung (DV1, DV2, DV3) wirken sich positiv auf den mittleren k-Wert aus (k-Werte ≥ 3,04 m/d). Eine geringe Bodenbonität (bei S1G) oder der Einsatz von Mineraldünger und die intensivere Bodenbearbeitung (bei SK) reduzieren die mittlere Durchlässigkeit (k-Werte ≤ 1,58 m/d).

Ein Einfluss der Düngungsvarianten auf die Durchlässigkeit konnte festgestellt werden. Die biologisch, bewirtschafteten Flächen weisen höhere mittlere k-Werte (k-Werte ≥ 3,04 m/d) als die konventionelle bewirtschaftete Referenzfläche auf (1,58 m/d), wenn S1G nicht berücksichtigt wird. Es herrscht sogar ein signifikanter Unterschied von DV2 (Biokompost) zu SK (Mineraldünger), d.h. die Stichproben der beiden Flächen entstammen unterschiedlicher Grundgesamtheiten.

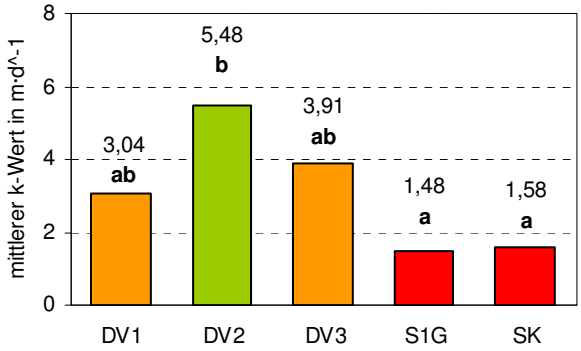


Abbildung 12: mittlere k-Werte (Zeit und Bodentiefen) bei den untersuchten Flächen

<u>Signifikante Unterschiede mit der Bodentiefe</u>

Ein signifikanter Einfluss der Bodentiefe auf die Durchlässigkeit wurde festgestellt (Tabelle 8). Mit einem mittleren k-Wert von 4,46 m/d, in 10 cm Tiefe über die gesamte Versuchsperiode, unterscheidet sich der k-Wert signifikant von jenem in 30 cm Tiefe (1,50 m/d) (Abbildung 13). Hiermit zeigt sich, dass mit zunehmender Tiefe der mittlere k-Wert geringer wird.
Der Grund dafür dürfte die Zunahme der Trockendichte mit der Tiefe sein, da sich die Anzahl der Poren verringert. Die Trockendichten zeigen uns in 10 cm Tiefe eine mittlere

Dichte von 1,30 g/cm³ und in 30 cm 1,41 g/cm³ (siehe Abbildung 29, im Kapitel „Trockendichte“).

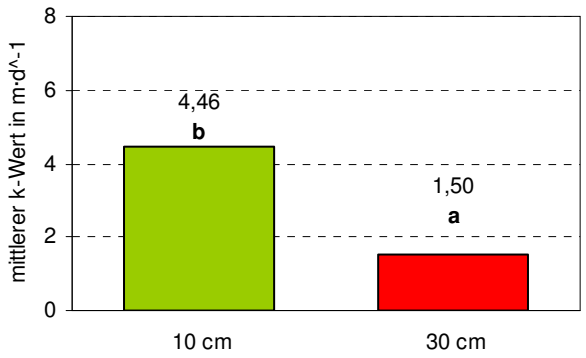


Abbildung 13: mittlere k-Werte (Zeit und Flächen) in 10 und 30 cm Bodentiefe

<u>Signifikante Unterschiede mit der Zeit</u>

Ein Einfluss der Jahreszeit auf den mittleren k-Wert konnte nicht festgestellt werden (Tabelle 8). Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Monaten April, Mai, Juli und Oktober 2007.

Aus der Abbildung 14 erkennt man, dass der Boden in den darauf folgenden Monaten immer durchlässiger wird. Im April beträgt die mittlere Durchlässigkeit 2,18 m/d, im Mai 2,96 m/d, im Juli wurde der „Peak“ mit 3,94 m/d ermittelt. Im Oktober fällt der mittlere k-Wert ein wenig ab, nämlich auf 3,79 m/d.

Aus diesem Resultat geht hervor, dass mit einer möglichen Zunahme der Poren (z.B. verursacht durch Bodenlebewesen) in der Vegetationsperiode auch der k-Wert ansteigt.

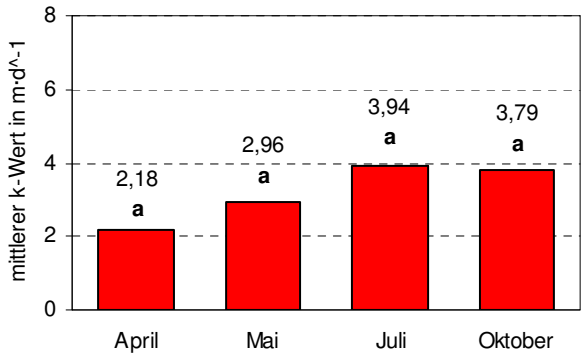


Abbildung 14: mittlere k-Werte (Bodentiefen und Flächen) im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007

Unterschiede mit der Zeit und der Bodentiefe

Die Abbildung 15 lässt erkennen, dass der mittlere k-Wert in 10 cm Tiefe von 3,28 m/d im April stetig ansteigt, und im Oktober mit 5,98 m/d das Maximum erreicht.

In 30 cm Tiefe beträgt der mittlere k-Wert im April 1,07 m/d, im Mai 1,83 m/d (Maximum) und im Oktober 1,60 m/d. Der mittlere k-Wert in 10 cm Tiefe hat sich vom April bis Oktober um das 1,82 fache erhöht, in 30 cm Tiefe um das 1,49 fache. Der Anstieg des k-Wertes ist in 10 cm Tiefe um 33 % höher als in 30 cm Tiefe.

Der mittlere k-Wert steigt monatlich, da sich wahrscheinlich die Poren (z.B. verursacht durch Bodenlebewesen) erhöhen. Ebenfalls erkennt man, dass sich vermutlich die Poren in 10 cm Tiefe besser entwickeln können als in 30 cm.

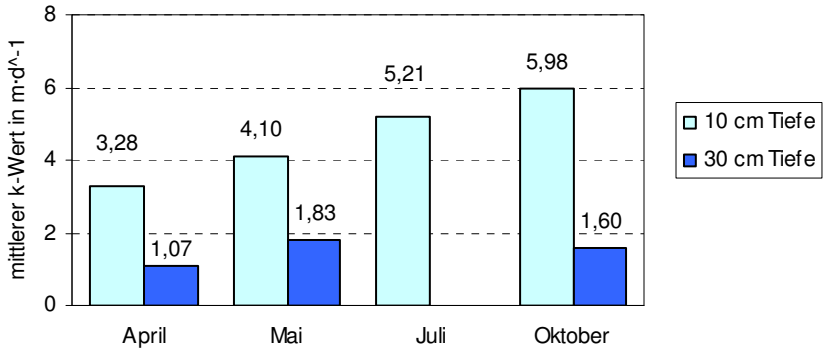


Abbildung 15: mittlere k-Werte (Flächen) in 10 und 30 cm Tiefe im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007

Unterschiede mit der Zeit und der Fläche

Bei der Auswertung der Messwerte wurde festgestellt, dass hinsichtlich des mittleren k-Wertes über die Zeit zwischen den Flächen hohe Schwankungen herrschen (Abbildung 16).

April: 0,86 m/d (SK) - 2,95 m/d (DV2);

Mai: 0,89 m/d (S1G) - 6,79 m/d (DV2);

Juli: 1,52 m/d (S1G) – 5,50 m/d (DV1);

Oktober: 0,32 m/d (SK) - 7,45 m/d (DV2)

Auffällig ist, dass der Monat Oktober den kleinsten aller Mittelwerte von 0,32 m/d (SK) aufweist und ebenfalls den größten von 7,45 m/d (DV2). Die 7,45 m/d dürften an der erhöhten Zunahme der Poren am Ende der Vegetationsperiode auf den biologischen,

gedüngten Flächen zurückzuführen sein. Im April herrscht am wenigsten Dynamik zwischen den biologisch, gedüngten Flächen und zu der konventionellen Fläche (SK).

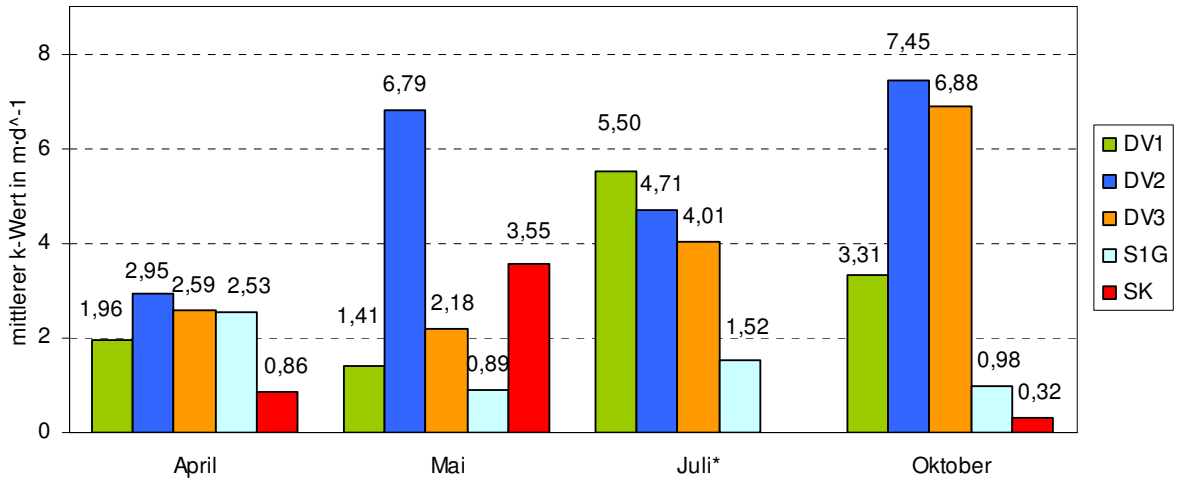


Abbildung 16: mittlere k-Werte (Tiefen) für die Flächen im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 (bei den Juli*-Mittelwerten wurden die Messwerte aus 20 cm, anstelle der 30 cm verwendet)

Unterschiede mit der Fläche und mit der Bodentiefe

Die Abbildung 17 lässt erkennen, dass die biologisch gedüngten Flächen (DV1, DV2, DV3, S1G) die größten mittleren k-Wert Differenzen (> 1,91 m/d) mit der Tiefe aufweisen. Die konventionell, gedüngte Fläche (SK) hat die kleinste Differenz (0,21 m/d). Man erkennt auch, dass die Fläche DV2 in beiden Tiefen die größten k-Werte besitzt (10 cm: 7,36 m/d; 30 cm: 2,74 m/d). Den kleinsten mittleren k-Wert für eine Bodentiefe von 10 cm hat SK (1,47 m/d) und in 30 cm Tiefe S1G (0,49 m/d).

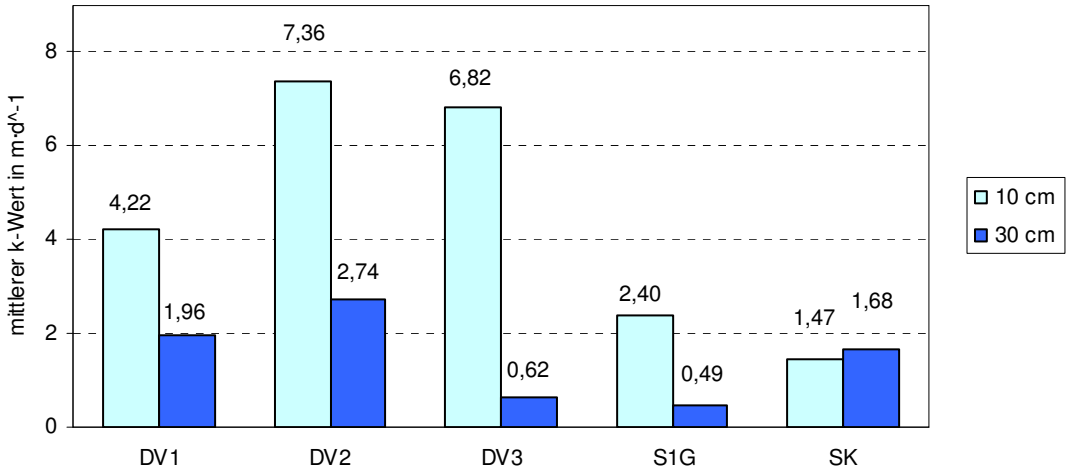


Abbildung 17: mittlere k-Werte (Zeit) für die Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe

Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

Messungen: im Oktober 2007; in 10 und 30 cm Tiefe

Tabelle 9: Ergebnisse der Varianzanalyse für die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

	Signifikanz		Gruppe		
			a	ab	b
Fläche	0,66	-> nicht signifikant	-	-	-
Bodentiefe	0,027	-> signifikant	30 cm	-	10 cm

Signifikante Unterschiede mit der Fläche im Oktober 2007

Bei der Auswertung der Fläche für die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel konnte kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden (Tabelle 9). Mit einem Mittelwert von 6,60 m/d ist die Durchlässigkeit bei DV3 am größten, dicht gefolgt von DV2 (6,37 m/d), S1G (5,46 m/d) und DV1 (5,01 m/d). Den kleinsten mittleren k-Wert weist SK mit 2,88 m/d auf (Abbildung 18).

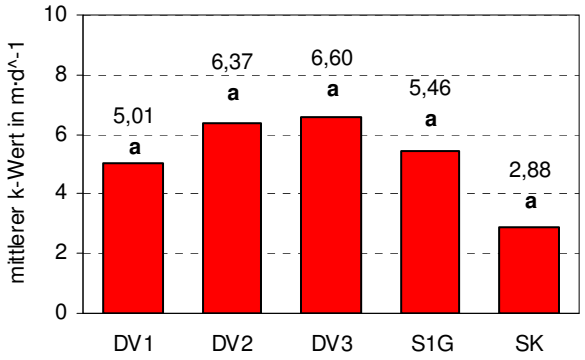


Abbildung 18: mittlere k-Werte (Bodentiefen) im Oktober 2007 bei den untersuchten Flächen

Signifikante Unterschiede mit der Bodentiefe im Oktober 2007

Ein signifikanter Einfluss der Bodentiefe auf die Durchlässigkeit wurde festgestellt (Tabelle 9). Mit einem mittleren k-Wert von 6,82 m/d in 10 cm Tiefe im Oktober 2007, unterscheidet sich der k-Wert signifikant von jenem in 30 cm Tiefe (3,71 m/d) (Abbildung 19). Somit zeigt sich, dass mit zunehmender Tiefe der k-Wert geringer wird. Der mittlere k-Wert im Oktober 2007 ist in 10 cm Tiefe um 84 % größer als in 30 cm Tiefe. Der Grund dafür dürfte wie beim Guelph-Permeameter an der Zunahme der Trockendichte mit der Tiefe (Anzahl der Poren verringert sich) liegen.

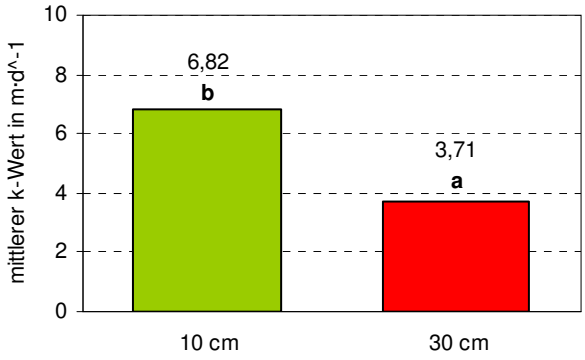


Abbildung 19: mittlere k-Werte (Flächen) im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe

Unterschiede mit der Fläche und mit der Bodentiefe im Oktober 2007

Aus der Abbildung 20 ist ersichtlich, dass die biologisch, gedüngten Flächen (DV1, DV2, DV3, S1G) einen größeren mittleren k-Wert aufweisen, als die konventionell, gedüngte Fläche (SK). Man erkennt auch, dass die DV2 in 10 cm den höchsten k-Wert hat (10,91 m/d), aber zugleich in 30 cm den geringsten k-Wert (1,84 m/d). (Vergleiche dazu im „Anhang- Guelph-Permeameter"; Anhang 14: mittlere k-Werte (Oktober) für die Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe)

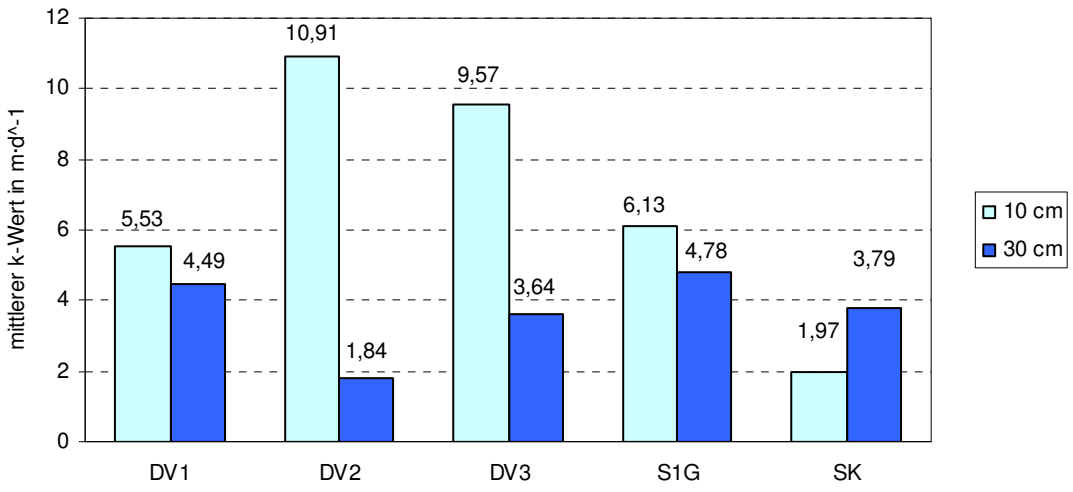


Abbildung 20: mittlere k-Werte im Oktober 2007 für die untersuchten Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe

4.2 Ringinfiltrometer

Messungen: im Oktober 2007; in 10 cm Tiefe

Tabelle 10: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Ringinfiltrometer

	Signifikanz		Gruppe		
			a	ab	b
Fläche	0,156	-> nicht signifikant	-	-	-

Signifikante Unterschiede mit der Fläche im Oktober 2007

Bei der Auswertung der Fläche für das Ringinfiltrometer konnte kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden (Tabelle 10). Der mittlere k-Wert ist bei SK mit 38,67 m/d am höchsten, dicht gefolgt von DV2 (35,54 m/d), DV1 (27,98 m/d) und DV3 (24,65 m/d). Den geringsten mittleren k-Wert weist S1G mit 8,68 m/d auf (Abbildung 21).

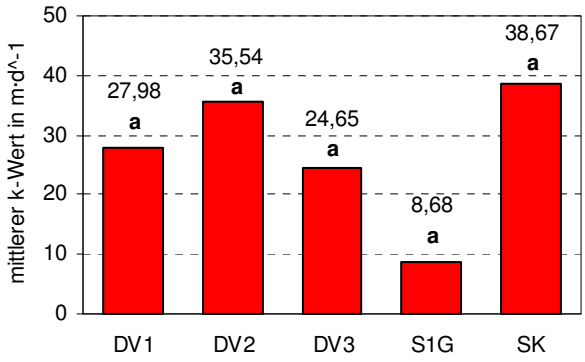


Abbildung 21: mittlere k-Werte (Flächen) im Oktober 2007

4.3 Korngrößenanalyse

Werte: für Oktober 2007; 0-10 und 20-30 cm Tiefe

Die Auswertung der Messwerte ergab, dass die Korngrößenverteilungen der Flächen nur geringfügig schwanken. In 0-10 cm Tiefe wies im Oktober 2007 Schluff den höchsten Anteil auf (52,31-55,70 %), gefolgt von Ton (22,02-29,80 %). Der Sandanteil hatte den geringsten prozentuellen Anteil an der Kornzusammensetzung (16,94-24,58 %; Abbildung 24).
In 20-30 cm Bodentiefe sieht die Bodenzusammensetzung ähnlich wie in 0-10 cm Tiefe aus (Schluff: 51,07-53,74 %, Ton: 22,89-31,23 %, Sand: 17,70-25,17 %; Abbildung 25).
Mit Hilfe des österreichischen Texturdreieckes nach ÖNORM L 1050 (1988) wird der Boden in Rutzendorf, Mittelwert der Flächen DV1, DV2, DV3, S1G und SK, als Lehm bezeichnet (Schluff: ca. 53 %, Ton: ca. 27 %, Sand: ca. 20 %; Abbildung 22, Abbildung 23). Der Boden befindet sich im Texturdreieck gerade noch im „Lehmfeld“. Die umliegenden Flächen sind (Texturdreieck, Abbildung 22) schluffiger Lehm (uL), sandiger Lehm (sL) und lehmiger Schluff (lU).

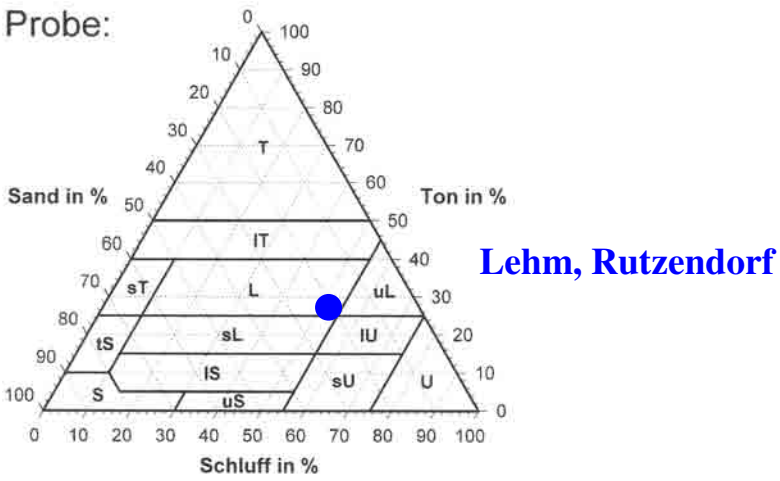


Abbildung 22: Rutzendorf - Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050 (1988)

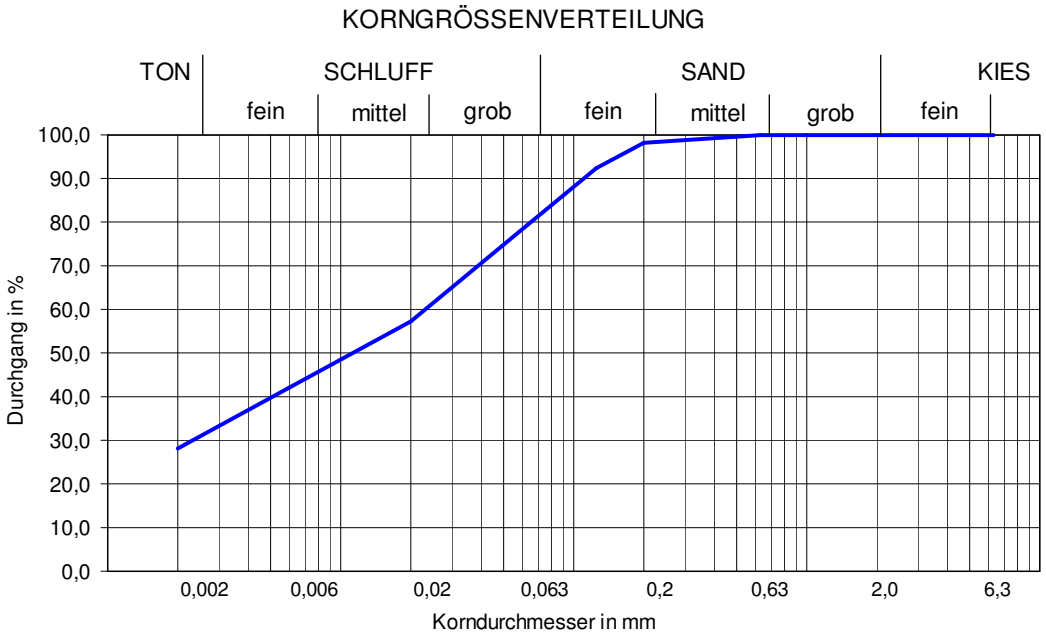


Abbildung 23: mittlere Korngrößenverteilung der untersuchten Flächen in Rutzendorf

Der Grund, dass die ermittelten Korngrößen in 0-10 und 20-30 cm sehr ähnlich sind, dürfte an der jährlichen Bodenbearbeitung liegen. Der Boden wird jährlich durch das Pflügen bis zu einer Tiefe von ca. 30 cm (Pflugtiefe) vermischt.

Die Flächen DV1, DV2, DV3 und SK weisen eine mittlere Bodenbonität auf. Bei diesen Flächen ist der Tonanteil höher als der Sandanteil. S1G weist eine geringe Bodenbonität auf. Diese erkennt man auch daran, dass der Sandanteil höher als der Tonanteil ist (Abbildung 24, Abbildung 25).

Die Flächen DV1, DV2, DV3 liegen räumlich nur einige Meter auseinander, daher sind die ermittelten Werte fast ident (Abbildung 24, Abbildung 25). SK ist ca. 450 m von DV1, DV2 und DV3 entfernt (Abbildung 2), hat aber eine ähnliche Kornzusammensetzung als DV1, DV2 und DV3 (all diese Flächen haben eine mittlere Bodenbonität). S1G ist 150 m von DV1, DV2 und DV3 entfernt, weist aber den größten Unterschied in der Kornzusammensetzung im Vergleich zu den anderen Flächen auf (geringe Bodenbonität).
Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die räumliche Entfernung der Flächen keinen Unterschied in der Kornzusammensetzung erkennen lässt. Das Untersuchungsgebiet wurde durch die „Urdonau“ gestaltet. Die Mäander der „Urdonau“ sind in Abbildung 2 anhand der

unterschiedlichen Farben erkennbar. Die Bodenbonitäten im Untersuchungsgebiet wechseln mehrmals mit den „alten Flussbetten der Donau“.

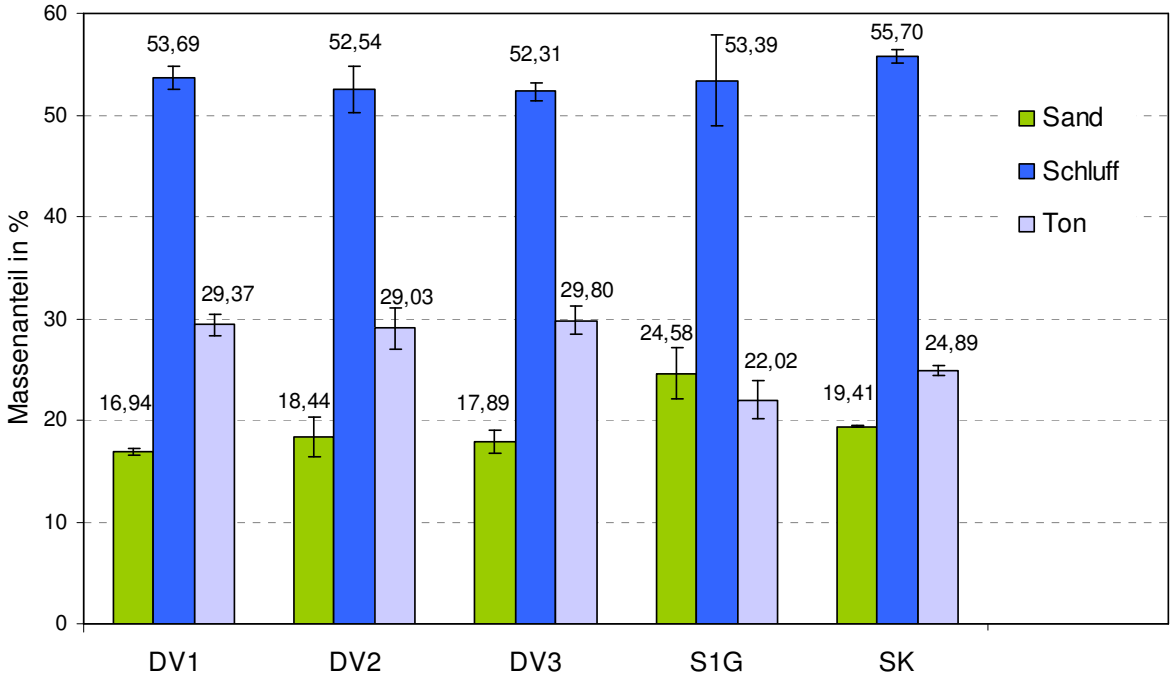


Abbildung 24: mittlere Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

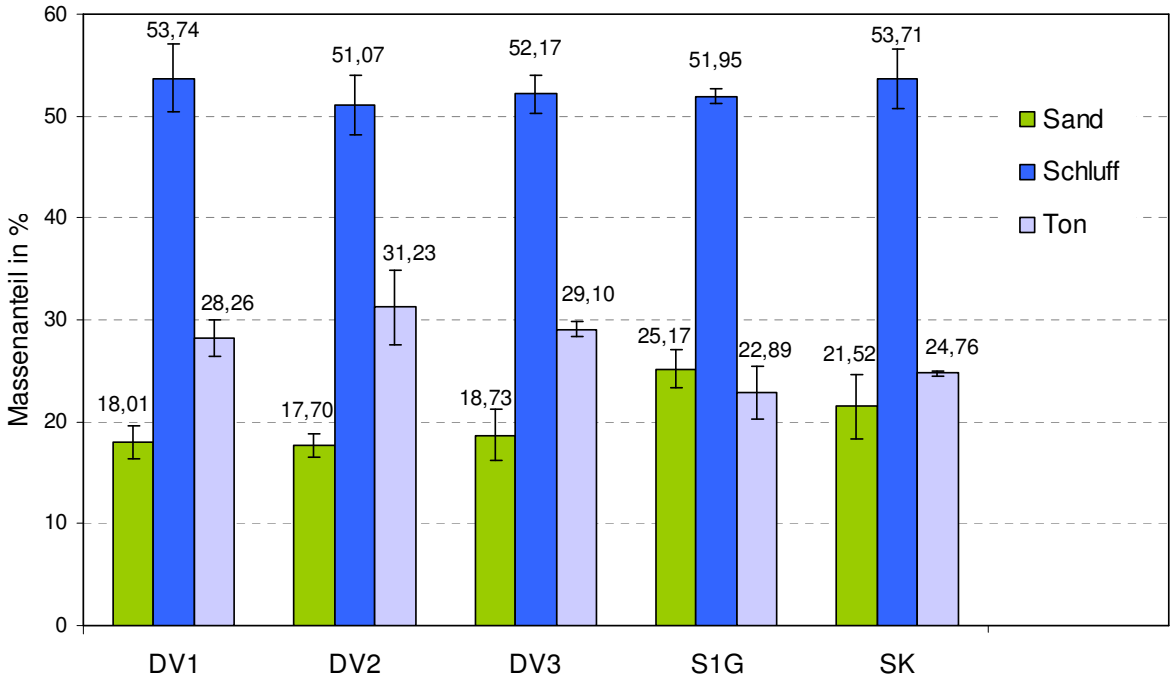


Abbildung 25: mittlere Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

4.4 Empirische Formeln

Die k-Werte wurden anhand der Korngrößenverteilungen errechnet (im Oktober 2007; für 0-10 und 20-30 cm Tiefe).

Aus der Tabelle 11 und Abbildung 26 geht hervor, dass bei der Anwendung der empirischen Formeln für die Tiefe von 0-10 cm k-Werte von 0,0009 m/d (Formel USBR) bis 0,00039 m/d (Formel Hazen) für die Flächen in Rutzendorf errechnet wurden.
In 20-30 cm Bodentiefe sehen die Ergebnisse der empirischen Formeln fast ident aus (Tabelle 12, Abbildung 27), da die Korngrößenanalyse keine nennenswerten Unterschiede in den Tiefen geliefert hat. In allen empirischen Formeln wird ein effektiver Korndurchmesser (d_{10}, d_{17}, d_{20}) verwendet. Da die ermittelten Kornverteilungskurven nur bis ca. d_{30} reichen, wurden kleinere effektive Korndurchmesser wie d_{10}, d_{17} und d_{20} mit Hilfe von Extrapolationen bestimmt. Die Formel von Beyer (Tabelle 7) verwendet zusätzlich zu d_{10} in der Gleichung ebenfalls die Ungleichförmigkeitszahl U, daher ist bei DV3 in 20-30 cm der k-Wert um 0,00002 m/d geringer als in 0-10 cm Bodentiefe. Dies ist der einzige Unterschied, den die empirischen Formeln in den Tiefen bestimmt haben.
Zusammenfassend ist zu sagen, dass die empirischen Formeln für bindige Böden, wie sie in Rutzendorf vorherrschen, ungeeignet sind. Empirische Formeln eignen sich nur für nicht bindige Böden.

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

Fläche	Hazen		Slichter		Terzaghi		Beyer		Sauerbrei		USBR	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00000	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV2	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00026	0,00002	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV3	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00027	0,00003	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
S1G	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00019	0,00000	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
SK	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00021	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000

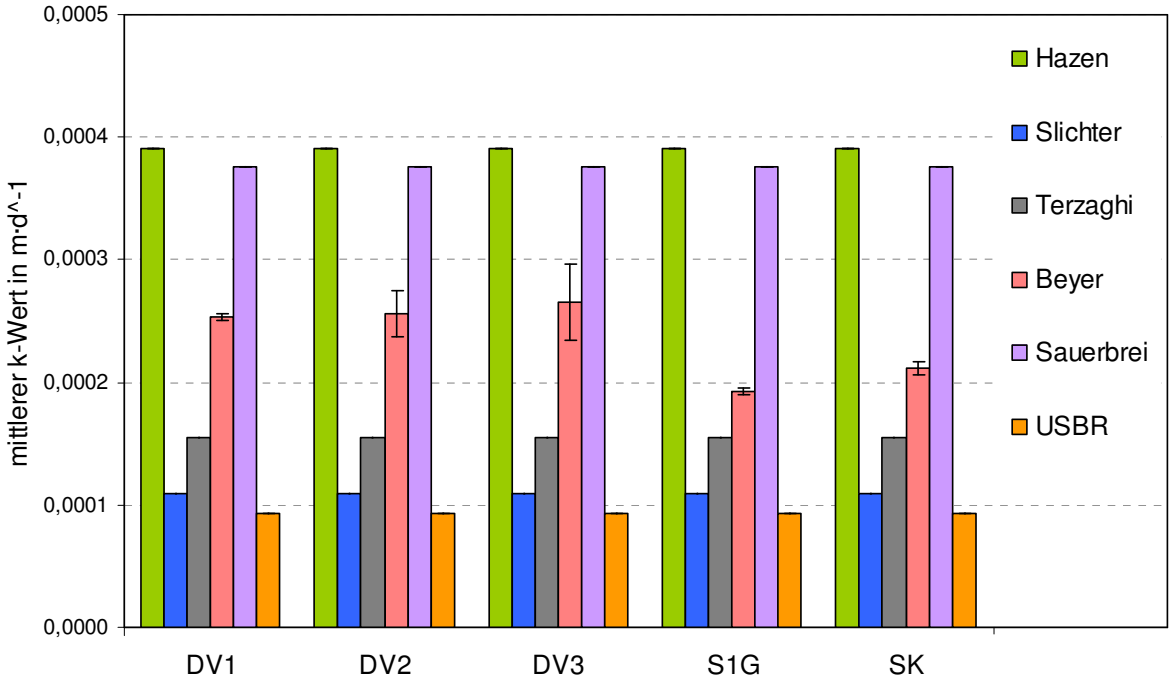


Abbildung 26: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

Tabelle 12: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

Fläche	Hazen		Slichter		Terzaghi		Beyer		Sauerbrei		USBR	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$	$m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00003	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV2	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00026	0,00002	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV3	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
S1G	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00019	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
SK	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00021	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000

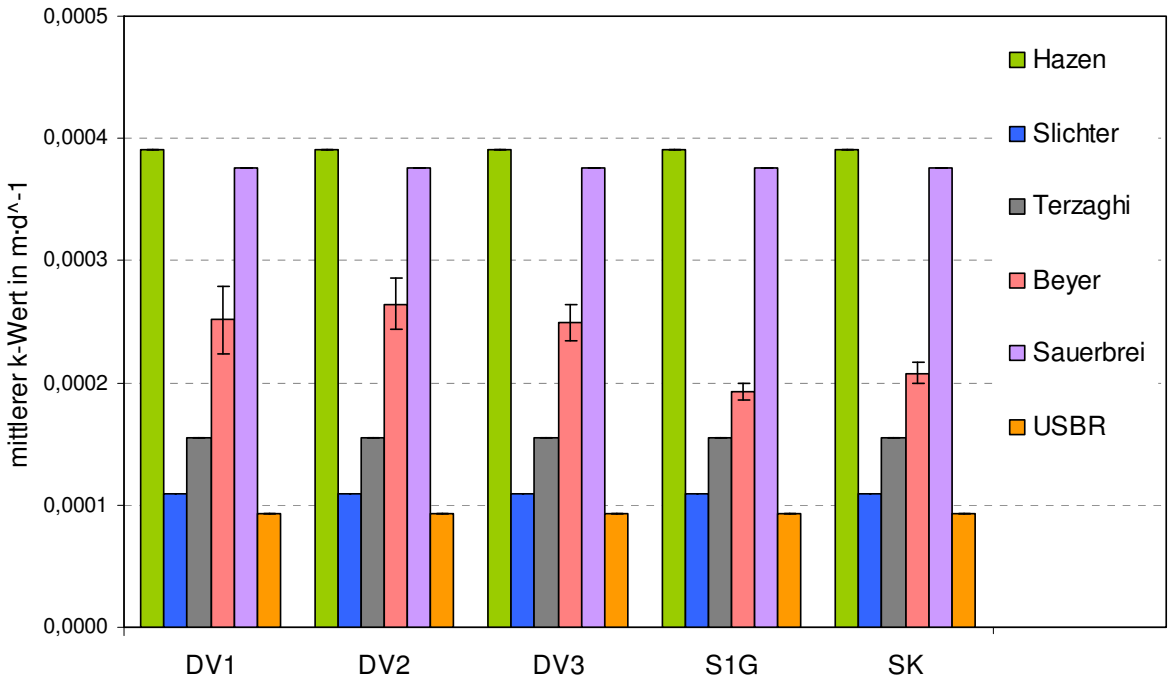


Abbildung 27: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Flächen im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

4.5 Trockendichte

Werte: für Oktober 2007; 10 und 30 cm Tiefe

Die Trockendichten wurden im Oktober 2007 ermittelt, das hat dem Boden ausreichend Zeit gegeben, sich nach dem Pflügen (im Herbst) und nach der Frostausdehnung (im Winter) zu kompaktieren. Die mittleren Trockendichten reichen in 10 cm Bodentiefe von 1,28 g/cm³ (DV1 und DV2) bis 1,34 g/cm³ (DV3) und in 30 cm von 1,36 g/cm³ (DV3) bis 1,46 g/cm³ (S1G). Es konnte nachgewiesen werden, dass bei allen Flächen die Trockendichten mit der Tiefe zunehmen (Abbildung 28).

Die Schwankungen der Trockendichten sind sehr gering. Die mittleren Trockendichten zeigen in 10 cm Tiefe eine Dichte von 1,30 g/cm³ und in 30 cm 1,41 g/cm³ (Abbildung 29). Dies bestätigt die Annahme, dass die Dichte mit der Tiefe ansteigt und dadurch der k-Wert abnimmt.

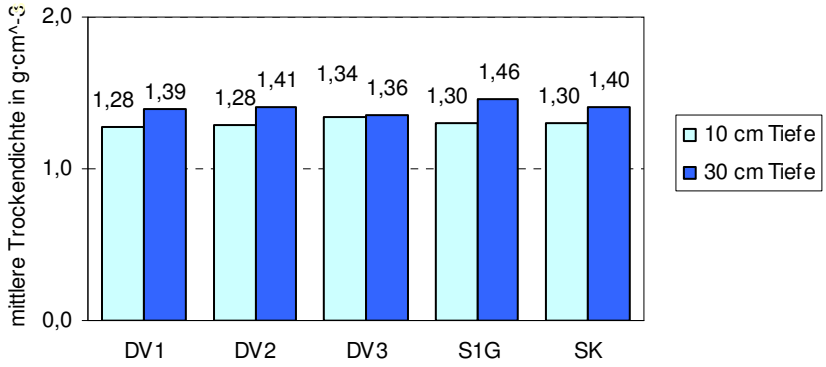


Abbildung 28: mittlere Trockendichten im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe bei den untersuchten Flächen

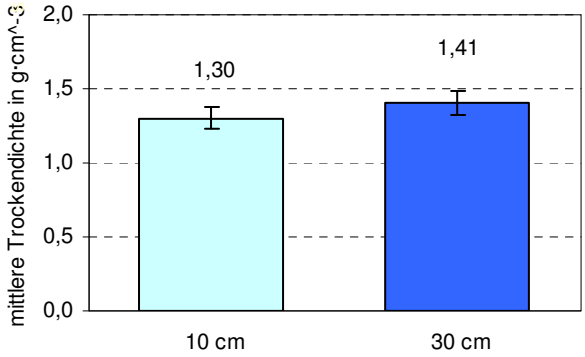


Abbildung 29: mittlere Trockendichten (Flächen) im Oktober 2007 in 10 und 30 cm Bodentiefe

4.6 Numerischer Vergleich der k-Wert Methoden

Messungen: im Oktober 2007; in 10 und 30 cm Tiefe

Der Vergleich der k-Wert Methoden hat gezeigt, dass zwischen den einzelnen Methoden hohe Schwankungen vorherrschen. Aus Abbildung 30 ist ersichtlich, dass die Messung mit dem Ringinfiltrometer in 10 cm Tiefe den höchsten mittleren k-Wert mit 27,10 m/d lieferte. Die geringsten mittleren k-Werte wurden in beiden Tiefen mit den empirischen Formeln berechnet (0,0002 m/d). Das Guelph-Permeameter ermittelte in 10 cm Tiefe einen mittleren k-Wert von 5,98 m/d, dicht gefolgt von der Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel mit 6,82 m/d. Ähnlich sieht es in 30 cm Bodentiefe aus, in der das Guelph-Permeameter einen niedrigeren mittleren k-Wert (1,60 m/d) als die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel (3,71 m/d) aufweist.
Daraus wird geschlossen, dass das Guelph-Permeameter und die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel sehr gut für die Bestimmung des k-Wertes geeignet sind. Das Ringinfiltrometer zeigt zu hohe, und die empirischen Formeln zu geringe k-Werte an.

Die Standardabweichungen schwanken in 10 cm Tiefe von 4,70 m/d (Guelph-Permeameter) bis 8,42 m/d (Ringinfiltrometer) und in 30 cm Tiefe von 2,68 m/d (Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel) bis 2,91 m/d (Guelph-Permeameter) (Tabelle 13). Diese Aussage ist nur gültig, wenn die Standardabweichungen (0,00 m/d) der empirischen Formeln nicht beachtet werden.
Die hohen Standardabweichungen zeigen, dass die Messwerte stark schwanken. Die k-Wert Experimente gehen immer mit einer hohen Variabilität der Messwerte einher.

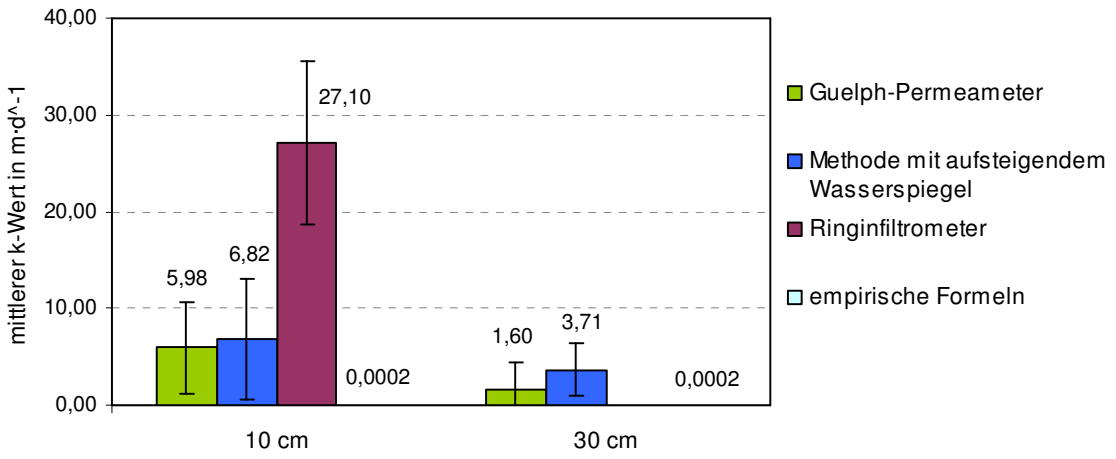


Abbildung 30: mittlere k-Werte der k-Werte Methoden in 10 und 30 cm Bodentiefe im Oktober 2007

Tabelle 13: mittlere k-Werte und Standardabweichungen der k-Wert Methoden in 10 und 30 cm Bodentiefe im Oktober 2007

Tiefe	Guelph-Permeameter		M. mit aufsteigendem Wasserspiegel		Ringinfiltrometer		empirische Formeln	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$	$m \cdot d^{-1}$
10 cm	5,98	4,70	6,82	6,18	27,10	8,42	0,0002	0,0000
30 cm	1,60	2,91	3,71	2,68	-	-	0,0002	0,0000

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Jahr 2003 wurde auf den Feldern eines landwirtschaftlichen Betriebes in Rutzendorf ein vom BMLFUW finanzierter Langzeitversuch gestartet, um die Auswirkungen der Umstellung von einem konventionellen, landwirtschaftlichen Betrieb in einen Biobetrieb zu untersuchen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Auswirkungen von biologischer Landwirtschaft auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) zu untersuchen und die verschiedenen Bestimmungsmethoden miteinander zu vergleichen. Die verwendeten Methoden beinhalteten sowohl Labor- als auch Felduntersuchungen und waren: Guelph-Permeameter, Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel, Ringinfiltrometer und empirische Formeln. Während der Vegetationsperiode 2007 (April, Mai, Juli und Oktober) wurden Guelph-Permeameter Messungen in 10 und 30 cm Bodentiefe durchgeführt. Im Oktober kamen zusätzlich alle anderen oben genannten Methoden zum Einsatz. Die Oktobermessungen ermöglichten, die verschiedenen k-Wert Methoden zu vergleichen.

Es wurden fünf Flächen untersucht, die sich hinsichtlich Bearbeitung, Bodenbonität und Düngungsvariante unterschieden:

- DV1: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Gründüngung
- DV2: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Biokompost
- DV3: biologischer Landbau, mittlere Bodenbonität, Stallmist
- S1G: biologischer Landbau, geringe Bodenbonität, Gründüngung
- SK: konventioneller Landbau, mittlere Bodenbonität, Mineraldünger

Mittels statistischer Auswertung der Messergebnisse wurden die Unterschiede zwischen den Flächen (Bodenbonität, Düngungsvarianten, Bodentiefe), und mit den unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten (nur beim Guelph-Permeameter) erhoben.
Anschließend wurden die Messwerte der k-Wert Bestimmungsmethoden numerisch verglichen und interpretiert.

Mit dem Guelph-Permeameter wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Flächen nachgewiesen. Der höchste k-Wert wurde auf der biologisch, bewirtschafteten Fläche mit Biokompostdünger ermittelt (mittlere Bodenbonität; DV2), der geringste auf der ebenfalls

biologisch, bewirtschafteten Fläche mit geringer Bodenbonität und Gründüngung (S1G), dicht gefolgt von der konventionell, bewirtschafteten Referenzfläche (mittlere Bodenbonität; SK). Zum Unterschied zum Guelph-Permeameter wurden mit der Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel und dem Ringinfiltrometer keine signifikanten Unterschiede zwischen den Flächen nachgewiesen. Durch das Aufbringen von Biokompost (Erhöhung des Humus im Boden - Strukturverbesserung) wird die Durchlässigkeit des Bodens erhöht. Die Applikation von Stallmist und Gründüngung erhöht die Durchlässigkeit auf den Flächen mit mittlerer Bodenbonität ebenfalls, aber in einem geringeren Ausmaß als Biokompost. Im Vergleich zu den biologisch, bewirtschafteten Flächen mittlerer Bodenbonität erhöht eine geringe Bodenbonität mit Gründüngung (S1G) den k-Wert nicht. Es ist anzunehmen, dass der positive Effekt der Gründüngung durch die geringe Bodenbonität aufgehoben wird. Die konventionell, bewirtschaftete Referenzfläche (SK) befindet sich wie erwartet am unteren Ende der k-Werte, aber vor der Fläche mit geringer Bodenbonität und Gründüngung (S1G).
Ein signifikanter Einfluss der Bodentiefe auf die Durchlässigkeit wurde festgestellt. Der k-Wert in 10 cm Bodentiefe ist signifikant höher als jener in 30 cm. Dieses Ergebnis wird auch durch die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel bestätigt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Tiefe der k-Wert abnimmt. Das dürfte mit der Zunahme der Trockendichte mit der Tiefe, da sich die Anzahl der Poren verringert, zusammenhängen.
Ein signifikanter jahreszeitlicher Einfluss auf den k-Wert konnte nicht festgestellt werden, es zeigt sich aber ein Anstieg des k-Wertes im Sommer. Aus diesem Ergebnis geht hervor, dass mit der Zunahme der Poren, (z.B. verursacht durch Bodenlebewesen,…) in der Vegetationsperiode, auch der k-Wert ansteigt.

Beim Vergleich der k-Wert Methoden wurde festgestellt, dass zwischen den einzelnen Methoden hohe Schwankungen vorherrschen. Mit dem Ringinfiltrometer wurde der höchste k-Wert ermittelt (27,10 m/d), der geringste k-Wert wurde mit den empirischen Formeln berechnet (0,0002 m/d). Die Ergebnisse des Guelph-Permeameters und die ermittelten k-Werte der Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel liefern ähnliche Werte (ca. 6 m/d). Es hat den Anschein, dass das Guelph-Permeameter und die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel gut für die Bestimmung des k-Wertes geeignet sind. Das Ringinfiltrometer ermittelt deutlich höhere k-Werte und die empirischen Formeln deutlich kleinere Werte. Bei dem in der Arbeit verwendeten modifizierten Ringinfiltrometer-Versuch wurde nur ein Ring verwendet, vielleicht hat diese Modifikation den hohen k-Wert verursacht. Die Anwendung der empirischen Formeln ist nur zulässig, wenn der Boden nicht bindig ist. Die Böden in

Rutzendorf sind bindig und daher sind die errechneten Werte sehr niedrig und eigentlich nicht zu verwenden.

Zusammenfassend kann daraus geschlossen werden, dass eine biologische Bewirtschaftung den Durchlässigkeitsbeiwert im Vergleich zu einer konventionellen Bewirtschaftung signifikant erhöht. Die beste Düngungsvariante war Biokompost, gefolgt von Stallmist und Gründüngung. Ein signifikanter Einfluss der Bodentiefe auf die Durchlässigkeit wurde ebenfalls festgestellt, der k-Wert in 10 cm Bodentiefe ist signifikant höher als jener in 30 cm. Die Ursache dafür dürfte an der höheren Anzahl der Poren in den ersten 10 cm liegen. Ein signifikanter jahreszeitlicher Einfluss auf den k-Wert konnte nicht festgestellt werden.

Das Guelph-Permeameter und die Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel sind sehr gut für die Bestimmung des k-Wertes geeignet. Der Ringinfiltrometer-Versuch mit einem Ring hat sich bei dieser Arbeit nicht bewährt. Zu den empirischen Formeln ist anzumerken, dass sie nur in ihrem Anwendungsbereich verwendet werden sollen. Jedes Verfahren hat Vor- und Nachteile. Je nach Erfordernis sollte das Geeignetste gewählt werden.

6 Literaturverzeichnis

ACHTNICH, W. (1980): Bewässerungslandbau, Ulmer-Verlag, Stuttgart

AIGNER, J., ALTENBURGER, J. (2001): Pflanzenbau, 5. Auflage, Österreichischer Agrarverlag, Wien

BRETSCHNEIDER, H., LECHER, K., SCHMIDT, M. (1993): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 7. Auflage, Verlag Paul Parey, Hamburg

BROSIUS, F. (2007): SPSS für Dummies, 1. Auflage, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim

BÜHL, A. (2006): SPSS 14, 10. Auflage, Pearson Studium, München

CEPUDER, P., KAMMERER, G., KLIK, A. (2006): Applied Soil Physics, Studienblätter, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien

DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, 1999): Bodenkundliche Untersuchungen im Feld zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharaktarisierung, Heft 136, Bonn

ECKSTEIN, P. (2006): Angewandte Statistik mit SPSS, 5. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden

GPM-MANUAL (1991): Operating Instructions - Guelph Permeameter Model 2800, Soilmoisture Equipment Corporation, Santa Barbara

HARTGE, K. H., HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden, 3. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

HUBACEK, H., PESEK, A. (1993): Chemie und Umwelttechnik, R. Oldenbourg, Wien

IFÖL (???): Informationen zum Standort Groß-Enzersdorf, Institut für ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur Wien

IFÖL (2003): IFÖL-Jahresbericht, Institut für ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur Wien

KLIK, A., HOLLAUS, K., FAUSTMANN, P. (2005): MUBIL-Abschlussbericht, Monitoring der Umstellung auf biologischen Landbau, Universität für Bodenkultur Wien

LENZ, S. (2006). Auswirkungen von Biolandbau auf Bodenkennwerte, Diplomarbeit, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien

McKENZIE, N., COUGHLAN, K., CRESSWELL, H. (2002): Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation, Csiro Publishing, Collingwood

MUBIL-Homepage (2009): http://mubil.boku.ac.at/

NACHTNEBEL, H. P. (2003): Hydrologie, Studienblätter, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien

ÖNORM L 1050 (1988): Boden als Pflanzenstandort – Begriffsbestimmungen, Untersuchungsverfahren, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM L 1061-1 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 1: Grobboden, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM L 1061-2 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM L 1065 (1988): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in gesättigten Zylinderproben, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM L 1068 (1988): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Dichte von Böden, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

SCOTT, H. (2000): Soil Physics, Agricultural and Environmental Applications, Iowa State University Press, Ames/Iowa

SURBÖCK, A., HEINZINGER, M., FRIEDEL, J. K., FREYER, B. (2006): Monitoring der Umstellung auf den biologischen Landbau (MUBIL), Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

UNTERSTEINER, H. (2007): Statistik - Datenauswertung mit Excel und SPSS, 2. Auflage, Facultas-WUV, Wien

VUKOVIC, M., SORO, A. (1992): Determination of Hydraulic Conductivity of porous media from grain-size Composition, Water Resources Publication, Littleton

WIETEK, B. (1997): Grundbau – Einführung in Theorie und Praxis, 2. Auflage, Manz, Wien

Anhang A - Guelph-Permeameter

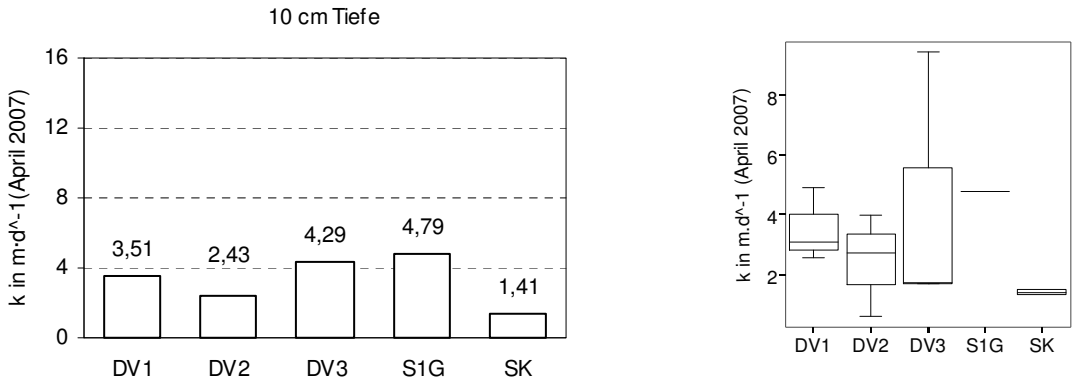
k-Werte für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 1: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe (Messwerte)

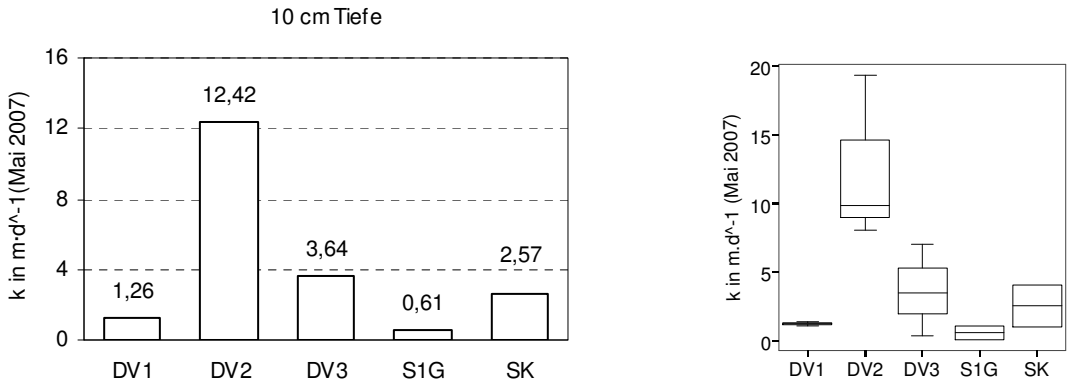
nicht berücksichtigte Werte werden mit * gekennzeichnet	April $m \cdot d^{-1}$	Mai $m \cdot d^{-1}$	Juli $m \cdot d^{-1}$	Oktober $m \cdot d^{-1}$
DV1	3,09	1,42	3,97	3,69
DV1	4,92	1,09	12,44	*-0.58
DV1	2,54	1,26	11,83	1,72
DV2	0,60	9,84	6,92	10,04
DV2	2,71	19,35	1,86	15,60
DV2	3,97	8,08	1,07	8,31
DV3	1,69	7,02	6,14	21,77
DV3	1,73	3,52	4,07	5,23
DV3	9,44	0,37	7,35	*-1.17
S1G	-	1,14	2,97	0,59
S1G	4,79	0,09	1,58	3,29
SK	1,48	4,08	-	0,44
SK	1,33	1,06	-	*-0.02

Anhang 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe

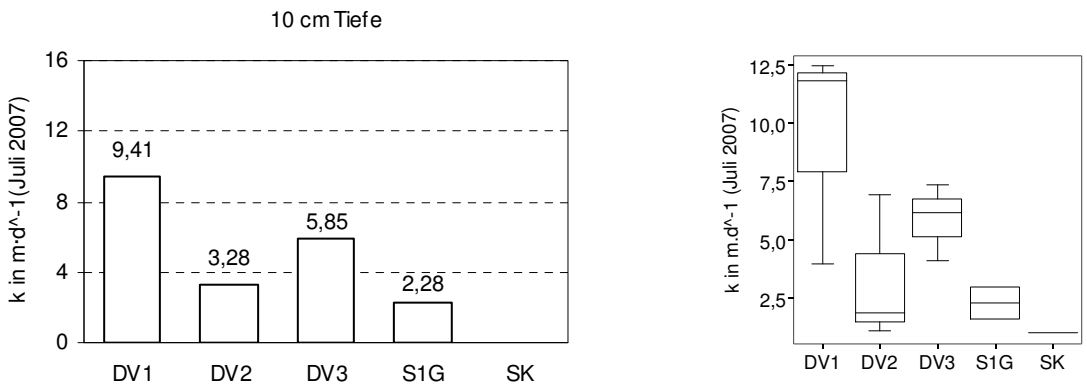
Variante	April		Mai		Juli		Oktober	
	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$
DV1	3,51	1,24	1,26	0,16	9,41	4,73	2,71	1,39
DV2	2,43	1,70	12,42	6,06	3,28	3,17	11,32	3,81
DV3	4,29	4,46	3,64	3,33	5,85	1,66	13,50	11,70
S1G	4,79	-	0,61	0,74	2,28	0,98	1,94	1,91
SK	1,41	0,11	2,57	2,14	-	-	0,44	-



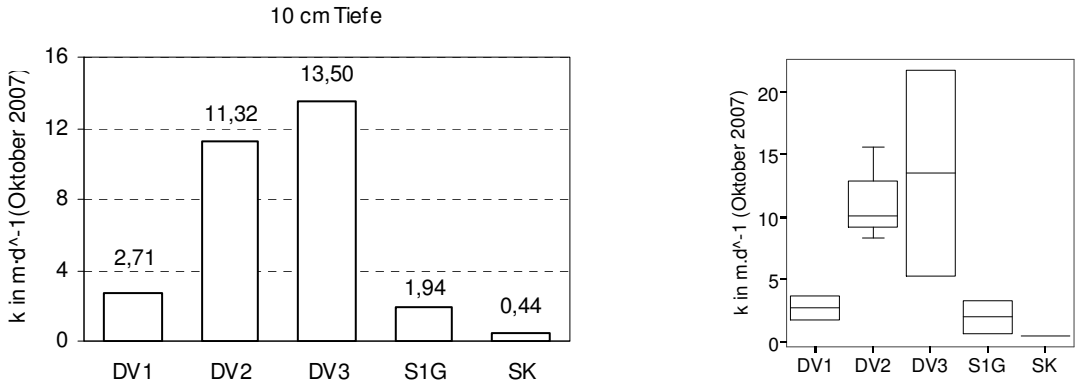
Anhang 3: k-Werte bei den untersuchten Varianten im April 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)



Anhang 4: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Mai 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)



Anhang 5: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Juli 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)



Anhang 6: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)

k-Werte für 30 cm Bodentiefe:

Anhang 7: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe (Messwerte)

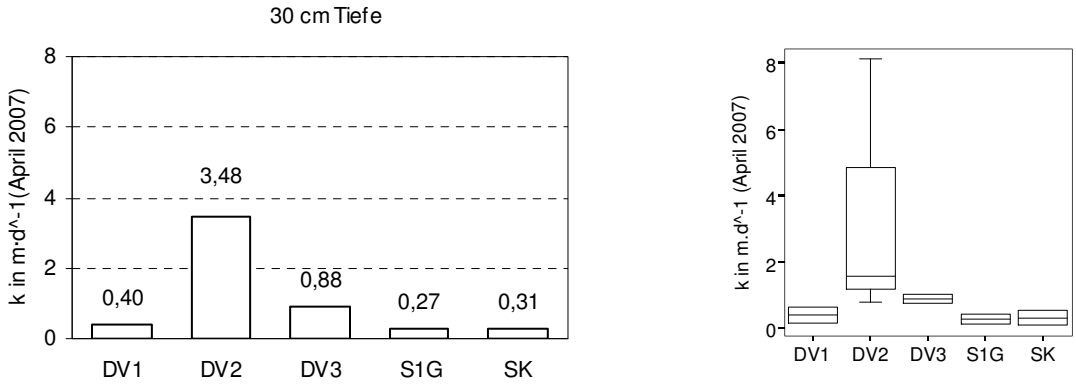
nicht berücksichtigte Werte werden mit * gekennzeichnet	April $m \cdot d^{-1}$	Mai $m \cdot d^{-1}$	**Juli $m \cdot d^{-1}$	Oktober $m \cdot d^{-1}$
DV1	-	0,95	0,52	0,01
DV1	0,16	0,81	2,29	11,71
DV1	0,64	2,97	1,95	0,02
DV2	0,77	0,30	1,88	1,73
DV2	8,11	0,76	2,04	0,18
DV2	1,56	2,42	14,49	8,84
DV3	-	0,75	2,49	0,26
DV3	0,75	0,42	0,94	*-0.12
DV3	1,02	0,98	3,11	*-0.04
S1G	0,13	1,24	0,59	0,05
S1G	0,41	1,07	0,96	0,01
SK	0,53	4,54	-	0,03
SK	0,09	*-0,02	-	0,37

** in 20 cm gemessen

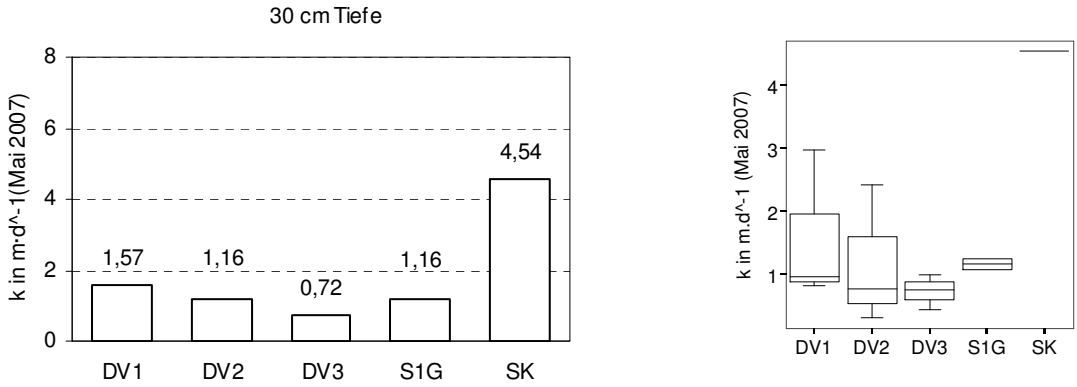
Anhang 8: Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe

Variante	April		Mai		**Juli		Oktober	
	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$
DV1	0,40	0,34	1,57	1,21	1,58	0,94	3,91	6,76
DV2	3,48	4,03	1,16	1,11	6,14	7,24	3,58	4,62
DV3	0,88	0,19	0,72	0,28	2,18	1,12	0,26	-
S1G	0,27	0,20	1,16	0,11	0,77	0,26	0,03	0,03
SK	0,31	0,31	4,54	-	-	-	0,20	0,24

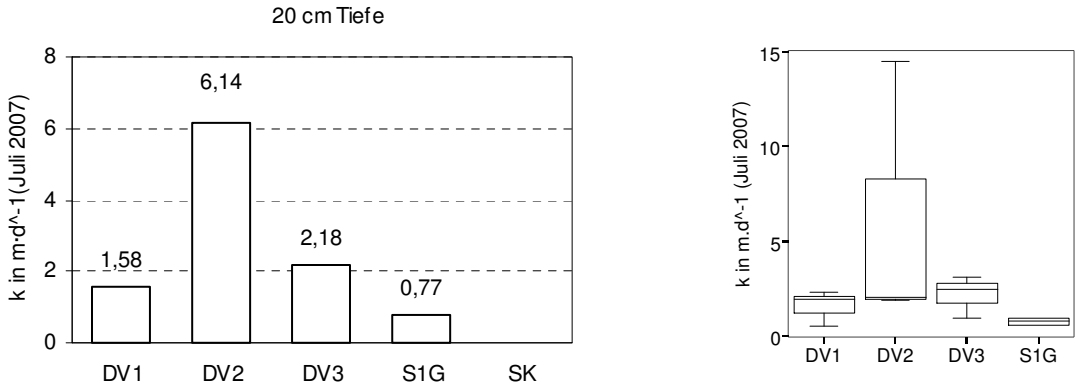
** in 20 cm gemessen



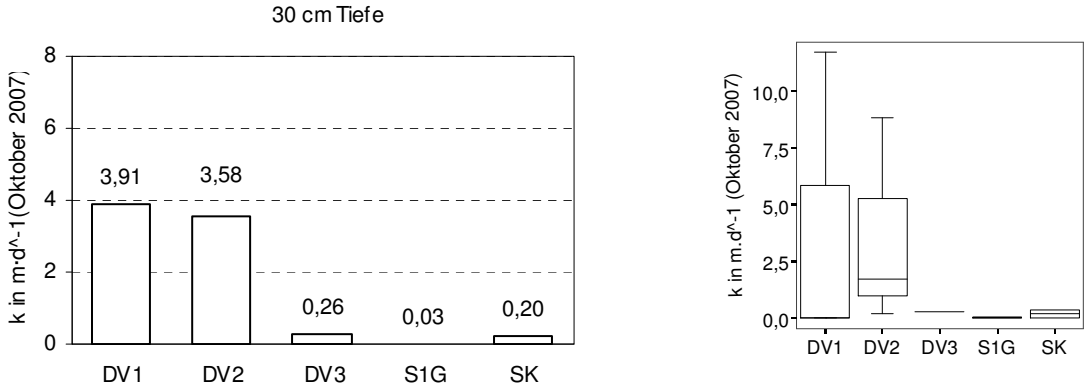
Anhang 9: k-Werte bei den untersuchten Varianten im April 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)



Anhang 10: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Mai 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)

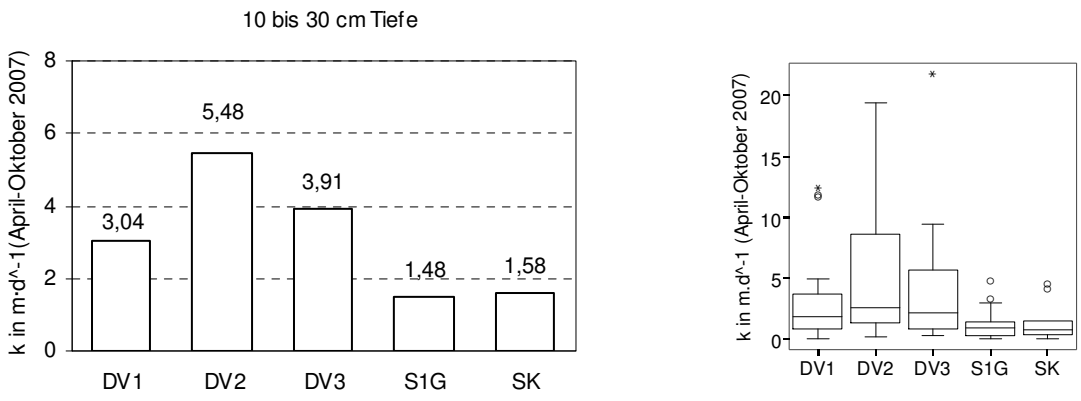


Anhang 11: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Juli 2007 in 20 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)

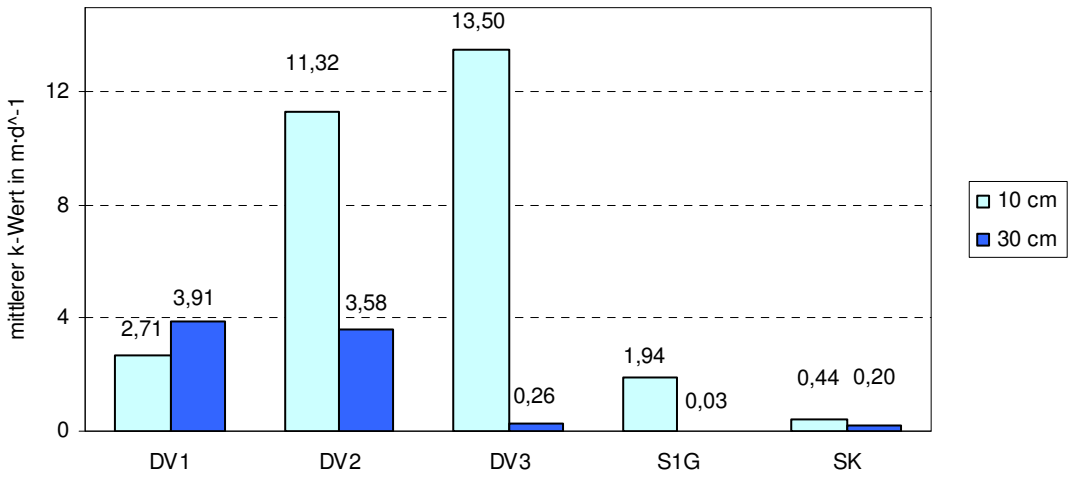


Anhang 12: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe (links: Mittelwerte, rechts: Boxplot)

k-Werte für 10-30 cm Bodentiefe:



Anhang 13: k-Werte bei den untersuchten Varianten im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2007 in 10 bis 30 cm Bodentiefe



Anhang 14: mittlere k-Werte (Oktober) für die Flächen in 10 und 30 cm Bodentiefe

SPSS Auswertung für 10-30 cm Bodentiefe:

Anhang 15: SPSS 15, Stichprobenanzahl

Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Fläche	1	DV1	22
	2	DV2	24
	3	DV3	20
	4	S1G	15
	5	SK	10
Bodentiefe	1	10 cm	46
	2	30 cm	34
	3	20 cm	11
Zeit	1	April	23
	2	Mai	25
	3	Juli	22
	4	Oktober	21

Anhang 16: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: kWerte

F	df1	df2	Sig.
1,200	37	53	,268

Anhang 17: SPSS 15, Varianzanalyse

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: kWerte

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	494,129[a]	9	54,903	3,595	,001
Intercept	356,668	1	356,668	23,356	,000
Fläche	205,330	4	51,332	3,361	,013
Bodentiefe	209,553	2	104,776	6,861	,002
Zeit	66,831	3	22,277	1,459	,232
Error	1236,960	81	15,271		
Total	2809,644	91			
Corrected Total	1731,089	90			

a. R Squared = ,285 (Adjusted R Squared = ,206)

Anhang 18: SPSS 15, Post- Hoc- Test für den signifikanten Faktor Fläche

kWerte

Student-Newman-Keuls[a,b,c]

Fläche	N	Subset 1	Subset 2
S1G	15	1,2600	
SK	10	1,3940	
DV1	22	3,1805	3,1805
DV3	20	3,9524	3,9524
DV2	24		5,4761
Sig.		,205	,217

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 16,459.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Anhang 19: SPSS 15, Post- Hoc- Test für den signifikanten Faktor Bodentiefe

kWerte

Student-Newman-Keuls[a,b,c]

Bodentiefe	N	Subset 1	Subset 2
30 cm	34	1,6048	
20 cm	11	2,8398	2,8398
10 cm	46		4,9453
Sig.		,308	,084

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 21,118.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Anhang B - Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

k-Werte für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 20: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe

Variante	Messwert $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$
DV1	8,62		
DV1	2,32		
DV1	12,00	5,53	4,55
DV1	-		
DV1	3,08		
DV1	1,63		
DV2	8,55		
DV2	27,38		
DV2	1,06	10,91	9,83
DV2	1,52		
DV2	15,44		
DV2	11,52		
DV3	6,17		
DV3	7,99		
DV3	2,39	9,57	9,29
DV3	0,33		
DV3	15,17		
DV3	25,35		
S1G	1,78		
S1G	2,59	6,13	5,79
S1G	5,74		
S1G	14,43		
SK	1,88		
SK	1,10	1,97	1,42
SK	0,90		
SK	4,00		

Anhang 21: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe

Variante	Messwert $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$
DV1	3,61		
DV1	0,86		
DV1	9,94	4,49	4,20
DV1	9,61		
DV1	1,64		
DV1	1,29		
DV2	0,90		
DV2	0,59		
DV2	1,14	1,84	1,16
DV2	3,57		
DV2	2,73		
DV2	2,09		
DV3	3,72		
DV3	4,31		
DV3	6,79	3,64	2,43
DV3	5,39		
DV3	0,66		
DV3	0,95		
S1G	-		
S1G	2,19	4,78	3,29
S1G	3,67		
S1G	8,49		
SK	6,34		
SK	1,18	3,79	2,33
SK	5,03		
SK	2,60		

SPSS Auswertung für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 22: SPSS 15, Stichprobenanzahl

Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Fläche	1	DV1	11
	2	DV2	12
	3	DV3	12
	4	S1G	7
	5	SK	8
Bodentiefe	1	10 cm	25
	2	30 cm	25

Anhang 23: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: k in m/d (Oktober 2007)

F	df1	df2	Sig.
1,584	9	40	,153

Anhang 24: SPSS 15, Varianzanalyse

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: k in m/d (Oktober 2007)

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	255,623[a]	5	51,125	1,543	,196
Intercept	1314,039	1	1314,039	39,663	,000
Fläche	80,290	4	20,072	,606	,660
Bodentiefe	173,933	1	173,933	5,250	,027
Error	1457,733	44	33,130		
Total	3195,591	50			
Corrected Total	1713,356	49			

a. R Squared = ,149 (Adjusted R Squared = ,053)

Anhang C - Ringinfiltrometer

k-Werte für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 25: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe

Variante	Messwert $m \cdot d^{-1}$	μ $m \cdot d^{-1}$	σ $m \cdot d^{-1}$
DV1	34,42		
DV1	23,83	27,98	5,65
DV1	25,69		
DV2	23,49		
DV2	28,35	35,54	16,85
DV2	54,80		
DV3	27,46		
DV3	37,36	24,65	14,32
DV3	9,13		
S1G	7,21	8,68	2,08
S1G	10,15		
SK	36,42	38,67	3,18
SK	40,92		

SPSS Auswertung für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 26: SPSS 15, Stichprobenanzahl

Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Fläche	1	DV1	3
	2	DV2	3
	3	DV3	3
	4	S1G	2
	5	SK	2

Anhang 27: SPSS 15, Test auf Varianzhomogenität

Levene's Test of Equality of Error Variances

Dependent Variable: k in m/d (Oktober 2007)

F	df1	df2	Sig.
3,080	4	8	,082

Anhang 28: SPSS 15, Varianzanalyse

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: k in m/d (Oktober 2007)

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1176,847[a]	4	294,212	2,227	,156
Intercept	9183,010	1	9183,010	69,523	,000
Fläche	1176,847	4	294,212	2,227	,156
Error	1056,687	8	132,086		
Total	12159,354	13			
Corrected Total	2233,534	12			

a. R Squared = ,527 (Adjusted R Squared = ,290)

Anhang D - Korngrößenanalyse

Werte für 0-10 cm Bodentiefe:

Anhang 29: Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T), d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} und d_{60}/d_{10} bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

Fläche	Sand %	Schluff %	Ton %	d10 mm	d17 mm	d20 mm	d60 mm	d60/d10
DV1	17,26	54,14	28,60	0,00073	0,00124	0,00145	0,02084	28,64
DV1	16,57	54,53	28,90	0,00073	0,00124	0,00145	0,02210	30,38
DV1	17,00	52,40	30,60	0,00073	0,00124	0,00145	0,02101	28,88
DV2	17,24	51,45	31,31	0,00073	0,00124	0,00145	0,01652	22,71
DV2	17,36	55,14	27,49	0,00073	0,00124	0,00145	0,02100	28,87
DV2	20,71	51,02	28,27	0,00073	0,00124	0,00145	0,02525	34,72
DV3	17,04	53,05	29,92	0,00073	0,00124	0,00145	0,02157	29,65
DV3	17,52	51,33	31,15	0,00073	0,00124	0,00145	0,01241	17,05
DV3	19,10	52,56	28,34	0,00073	0,00124	0,00145	0,02388	32,82
S1G	26,36	50,27	23,37	0,00073	0,00124	0,00145	0,04270	58,70
S1G	22,81	56,52	20,67	0,00073	0,00124	0,00145	0,04098	56,33
SK	19,49	55,24	25,27	0,00073	0,00124	0,00145	0,03236	44,49
SK	19,33	56,17	24,50	0,00073	0,00124	0,00145	0,03520	48,39

Anhang 30: Mittelwerte und Standardabweichungen der Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

Fläche	Sand		Schluff		Ton	
	μ %	σ %	μ %	σ %	μ %	σ %
DV1	16,94	0,35	53,69	1,13	29,37	1,08
DV2	18,44	1,97	52,54	2,27	29,03	2,02
DV3	17,89	1,08	52,31	0,89	29,80	1,41
S1G	24,58	2,51	53,39	4,42	22,02	1,91
SK	19,41	0,11	55,70	0,66	24,89	0,55

Werte für 20-30 cm Bodentiefe:

Anhang 31: Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T), d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} und d_{60}/d_{10} bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

Fläche	Sand %	Schluff %	Ton %	d10 mm	d17 mm	d20 mm	d60 mm	d60/d10
DV1	17,01	55,47	27,52	0,00073	0,00124	0,00145	0,02664	36,63
DV1	17,15	55,85	27,00	0,00073	0,00124	0,00145	0,02532	34,80
DV1	19,86	49,89	30,25	0,00073	0,00124	0,00145	0,01512	20,79
DV2	16,57	47,95	35,48	0,00073	0,00124	0,00145	0,01458	20,04
DV2	17,67	53,66	28,67	0,00073	0,00124	0,00145	0,02321	31,91
DV2	18,85	51,60	29,55	0,00073	0,00124	0,00145	0,01949	26,79
DV3	17,45	53,43	29,12	0,00073	0,00124	0,00145	0,01841	25,31
DV3	17,14	53,02	29,85	0,00073	0,00124	0,00145	0,02351	32,32
DV3	21,60	50,06	28,34	0,00073	0,00124	0,00145	0,02509	34,49
S1G	23,85	51,42	24,73	0,00073	0,00124	0,00145	0,03960	54,43
S1G	26,48	52,47	21,05	0,00073	0,00124	0,00145	0,04440	61,03
SK	19,30	55,75	24,95	0,00073	0,00124	0,00145	0,03298	45,33
SK	23,75	51,67	24,58	0,00073	0,00124	0,00145	0,03775	51,90

Anhang 32: Mittelwerte und Standardabweichungen der Massenanteile der Korngrößenklassen (S, U, T) bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

Fläche	Sand		Schluff		Ton	
	μ %	σ %	μ %	σ %	μ %	σ %
DV1	18,01	1,61	53,74	3,34	28,26	1,75
DV2	17,70	1,14	51,07	2,89	31,23	3,70
DV3	18,73	2,49	52,17	1,84	29,10	0,75
S1G	25,17	1,86	51,95	0,74	22,89	2,60
SK	21,52	3,15	53,71	2,89	24,76	0,27

Anhang E - Empirische Formeln

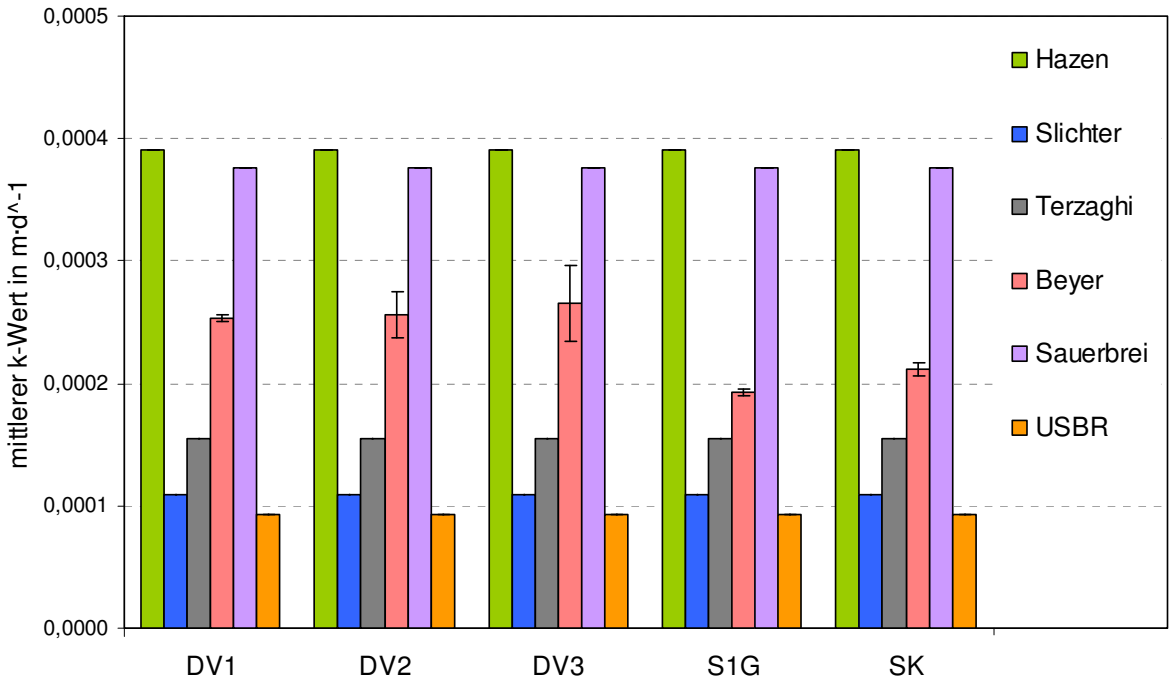
k-Werte für 0-10 cm Bodentiefe:

Anhang 33: berechnete k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe (n=0,35, v=1,31*10^-6; Werte für d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} siehe Anhang 29)

Fläche	Hazen $m.d^{-1}$	Slichter $m.d^{-1}$	Terzaghi $m.d^{-1}$	Beyer $m.d^{-1}$	Sauerbrei $m.d^{-1}$	USBR $m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00026	0,00038	0,00009
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00025	0,00038	0,00009
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00025	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00028	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00025	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00024	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00025	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00030	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00024	0,00038	0,00009
S1G	0,00039	0,00011	0,00015	0,00019	0,00038	0,00009
S1G	0,00039	0,00011	0,00015	0,00019	0,00038	0,00009
SK	0,00039	0,00011	0,00015	0,00022	0,00038	0,00009
SK	0,00039	0,00011	0,00015	0,00021	0,00038	0,00009

Anhang 34: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

Fläche	Hazen		Slichter		Terzaghi		Beyer		Sauerbrei		USBR	
	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00000	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV2	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00026	0,00002	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV3	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00027	0,00003	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
S1G	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00019	0,00000	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
SK	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00021	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000



Anhang 35: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 0-10 cm Bodentiefe

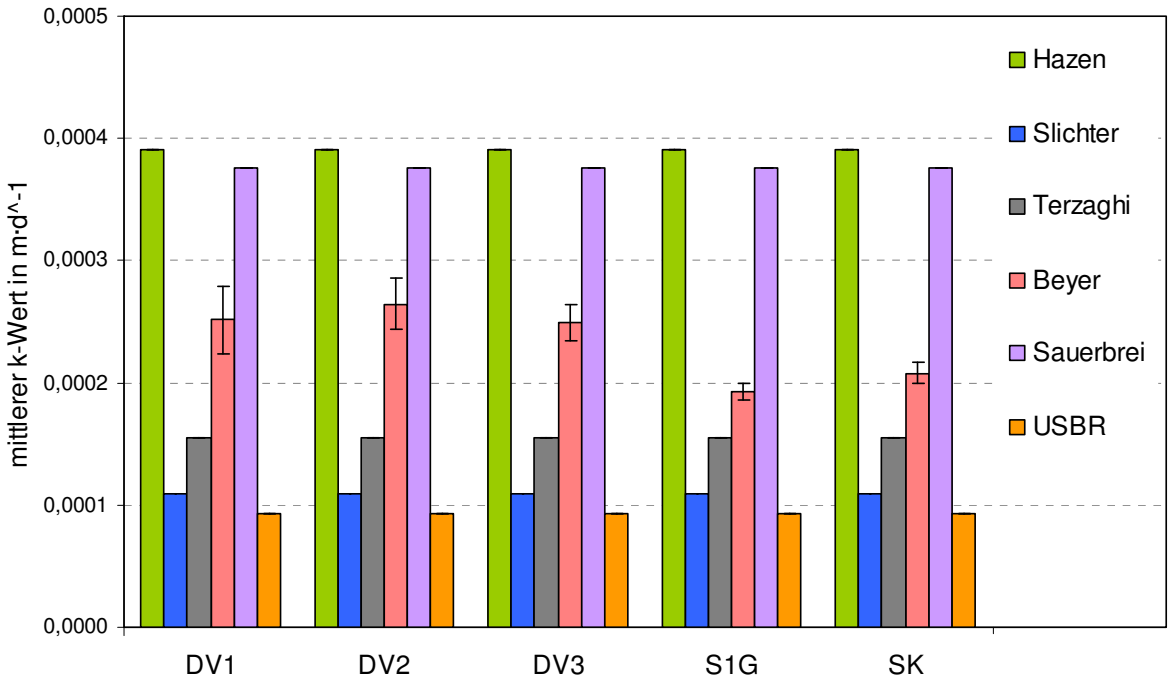
k-Werte für 20-30 cm Bodentiefe:

Anhang 36: berechnete k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe (n=0,35, v=1,31*10^-6; Werte für d_{10}, d_{17}, d_{20}, d_{60} siehe Anhang 31)

Fläche	Hazen $m.d^{-1}$	Slichter $m.d^{-1}$	Terzaghi $m.d^{-1}$	Beyer $m.d^{-1}$	Sauerbrei $m.d^{-1}$	USBR $m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00023	0,00038	0,00009
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00024	0,00038	0,00009
DV1	0,00039	0,00011	0,00015	0,00028	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00029	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00025	0,00038	0,00009
DV2	0,00039	0,00011	0,00015	0,00026	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00027	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00024	0,00038	0,00009
DV3	0,00039	0,00011	0,00015	0,00024	0,00038	0,00009
S1G	0,00039	0,00011	0,00015	0,00020	0,00038	0,00009
S1G	0,00039	0,00011	0,00015	0,00019	0,00038	0,00009
SK	0,00039	0,00011	0,00015	0,00021	0,00038	0,00009
SK	0,00039	0,00011	0,00015	0,00020	0,00038	0,00009

Anhang 37: Mittelwerte und Standardabweichung der berechneten k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

Fläche	Hazen		Slichter		Terzaghi		Beyer		Sauerbrei		USBR	
	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$	μ $m.d^{-1}$	σ $m.d^{-1}$
DV1	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00003	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV2	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00026	0,00002	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
DV3	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00025	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
S1G	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00019	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000
SK	0,00039	0,00000	0,00011	0,00000	0,00015	0,00000	0,00021	0,00001	0,00038	0,00000	0,00009	0,00000



Anhang 38: mittlere berechnete k-Werte mit Standardabweichungen bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 20-30 cm Bodentiefe

Anhang F - Trockendichte

Werte für 10 cm Bodentiefe:

Anhang 39: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockendichten bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe

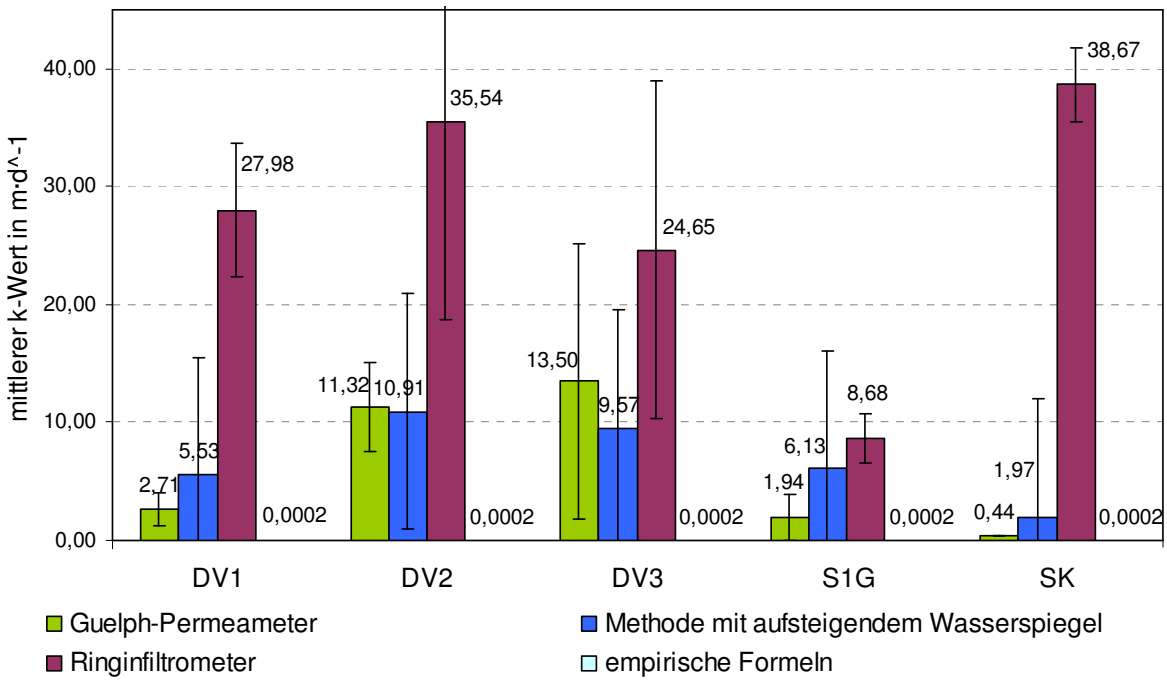
Variante	Messwert $g \cdot cm^{-3}$	μ $g \cdot cm^{-3}$	σ $g \cdot cm^{-3}$
DV1	1,27		
DV1	1,32		
DV1	1,29	1,28	0,11
DV1	1,07		
DV1	1,32		
DV1	1,39		
DV2	1,32		
DV2	1,34		
DV2	1,26	1,28	0,04
DV2	1,26		
DV2	1,22		
DV2	1,31		
DV3	1,34		
DV3	1,37		
DV3	1,43	1,34	0,09
DV3	1,43		
DV3	1,21		
DV3	1,27		
S1G	1,36		
S1G	1,34	1,30	0,08
S1G	1,32		
S1G	1,19		
SK	1,26		
SK	1,33	1,30	0,03
SK	1,29		
SK	1,32		

Werte für 30 cm Bodentiefe:

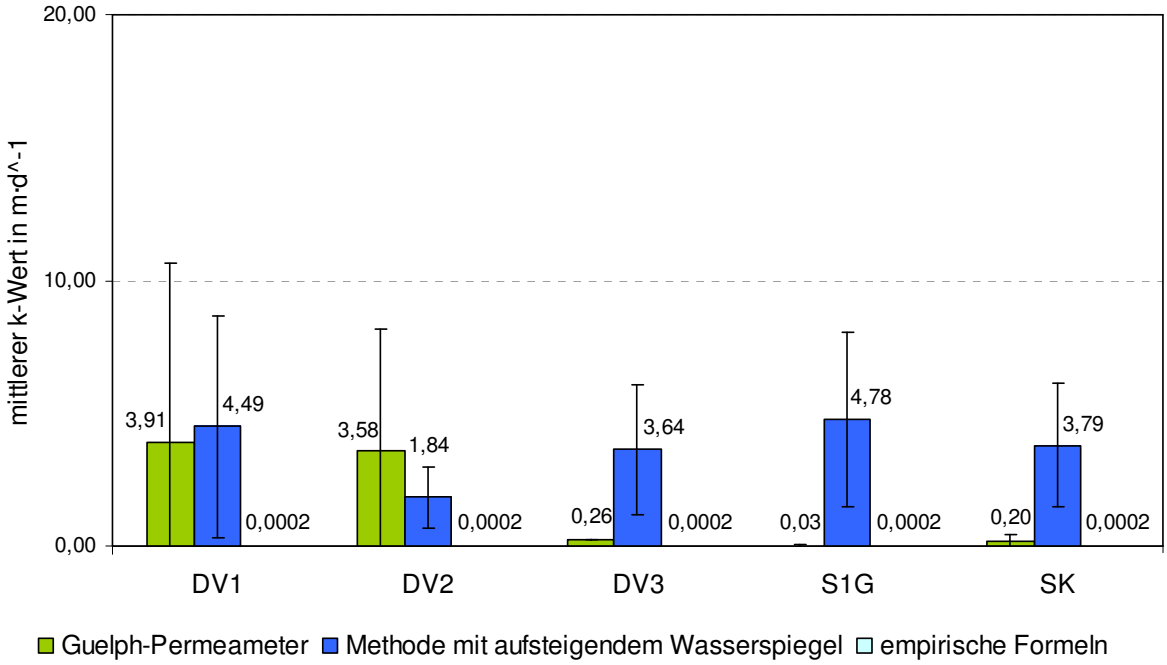
Anhang 40: Messwerte, Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockendichten bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe

Variante	Messwert $g \cdot cm^{-3}$	μ $g \cdot cm^{-3}$	σ $g \cdot cm^{-3}$
DV1	1,34		
DV1	1,42		
DV1	1,43	1,39	0,04
DV1	1,43		
DV1	1,39		
DV1	1,34		
DV2	1,55		
DV2	1,57		
DV2	1,25	1,41	0,13
DV2	1,34		
DV2	1,46		
DV2	1,30		
DV3	1,37		
DV3	1,36		
DV3	1,38	1,36	0,02
DV3	1,35		
DV3	1,37		
DV3	1,33		
S1G	1,44		
S1G	1,54	1,46	0,06
S1G	1,43		
S1G	1,42		
SK	1,49		
SK	1,29	1,40	0,12
SK	1,30		
SK	1,53		

Anhang G - Numerischer Vergleich der k-Wert Methoden



Anhang 41: mittlere k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 10 cm Bodentiefe



Anhang 42: mittlere k-Werte bei den untersuchten Varianten im Oktober 2007 in 30 cm Bodentiefe

Anhang H - Verwendete Formblätter

FELDPROTOKOLL RUTZENDORF
DAUERBEOBACHTUNGSFLÄCHEN (DBF)

Datum: Zeit ab: Zeit an:

km ab: km an:

Witterung:

Verkehrsmittel: Mitfahrer:

SK Datenauslesung: JA NEIN

Kommentare:

S1G Datenauslesung: JA NEIN

Kommentare:

S1M/KPV Datenauslesung: JA NEIN

Kommentare:

Anhang 43: Feldprotokoll Rutzendorf

Auswertung der Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:			
Versuchsdatum:		Durchführender:	
Bohrlochradius	Standard: R / cm = 6,0	Kurve 1, 2, oder 3:	
	R / cm ± 0,1 =	Kurve 1 – $\alpha^* \geq 0{,}09\ \mathrm{cm}^{-1}$ (Standard)	
Reservoirkonstante X oder Y:		Kurve 2 – $\alpha^* = 0{,}04\ \mathrm{cm}^{-1}$	(Kurven-Nr.
Kerbe am Ventilknopf		Kurve 3 – $\alpha^* = 0{,}01\ \mathrm{cm}^{-1}$	sh. Rückseite)
X = beide Zylinder	oben		
Y = nur Innenzylinder	unten		

			Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
Wasserstand	Standard:	H / cm =	5,0	10,0
		H / cm ± 0,1 =		
mittlere stationäre Absenkung		Δs / cm ± 0,1 =		
im Zeitintervall		Δt / s ± 1 =		

Versuchsreihe 1				Versuchsreihe 2			
Zeit		Absenkung		Zeit		Absenkung	
t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1	t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1

Anhang 44: Feldprotokoll Guelph-Permeameter

INSTITUT FÜR HYDRAULIK UND LANDESKULTURELLE WASSERWIRTSCHAFT Beobachter:	Ort: Versuch Nr.: Datum:

Eindringtiefe des Innenzylinders
d = cm

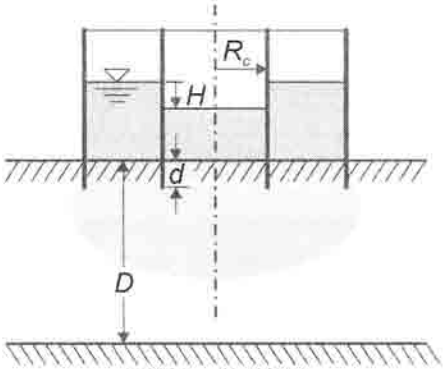
Abstand von der unteren Schicht
D = cm

Innenradius des Innenzylinders
R_c = cm

Verhältnis D/R_c =

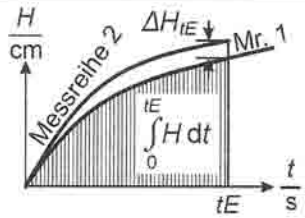
Verhältnis d/R_c =

Geometriebeiwert F =
(aus Nomogramm A oder B zu entnehmen)



untere Schicht
undurchlässig / gut durchlässig
→ Nomogramm A / → Nomogramm B

Messreihe 1: Wasserspiegel im Außenrohr konstant		Messreihe 2: Wasserspiegel im Außenrohr nachgeführt	
Vorgewählte Absenkung im Innenrohr	Zeit, um Absenkung zu erreichen	Vorgewählte Absenkung im Innenrohr	Zeit, um Absenkung zu erreichen
H / cm	t / s	H / cm	t / s
0,0	0	0,0	0



Höhenunterschied ΔH_{tE} zwischen der Absenkung der Messreihe 2 und der Messreihe 1 nach einer Enddauer t_E der Messreihe 2:

ΔH_{tE} = cm

Integral über $H(t)$ der Messreihe 1 von 0 bis t_E (der Messreihe 2):

$\int_0^{tE} H\,dt$ = cm·s

$$k_{fs} = \frac{R_c}{F} \cdot \frac{\Delta H_{tE}}{\int_0^{tE} H\,dt}$$

k_{fs} = cm/s

Anmerkungen:

Anhang 45: Feldprotokoll Ringinfiltrometer

KORNGRÖSSENANALYSE – geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Probennummer Labor:		analysiert am:	
Entnahmedaten:		Bearbeiter:	

FEINSIEBUNG

Masse lufttrockene Bodeneinwaage m_{ges} / g =						Massenanteile p / %
i	SR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	Masse Siebrückstand (g) $m_{SR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	**p [Grobb.] / % =** $100 \times m_{SR\,2,0}/m_{ges}$
1	2,0					
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\,2,0\,mm}$ =						
2	1,0					**p [Feinb.] / % =** $100 \times m_{s+w} / m_{ges}$
3	0,63					
4	0,20					Sandanteil $p\,[S]_S$ / % = $100 \times (\Sigma m_{SR\,i}) / m_{s+w}$ =
5	0,125					
6	0,063					
Masse Sand (g) = $\Sigma m_{SR\,i}$ ohne $m_{SR\,2,0\,mm}$ (i = 2…6) =						

PIPETTEVERFAHREN nach KUBIENA

Suspensionstemp. zu Beginn t_A/°C =						*: = $5000 \times m_{PR\,0,063\,mm} / m_{s+w}$
Masse Feinbodeneinwaage m_{s+w}/g =					Masse Eindampfrückstand $m_{PR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$ − 0,0266	Massenanteile p / %
i	PR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g		100,0
1	0,063					− *
2	0,020					=
3	0,0063					= $p\,[S]_P$ / %
4	0,0020					$p\,[S]_S - p\,[S]_P$ =
Suspensionstemperatur nach der Pipettierung t_E/°C =						

Anhang 46: Protokoll Korngrößenanalyse