

**Räumliche Variabilität bodenphysikalischer Eigenschaften eines
ökologisch bewirtschafteten Ackers in Rutzendorf**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Wasserwirtschaft und Umwelt

eingereicht und verfasst von

Johannes Krammer

Betreuung:

Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat.techn. Andreas Klik

Dipl.-Geow. Dr.nat.techn. Andreas Schwen

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft

Wien, September 2014

Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei meinen Betreuern Herrn Univ. Prof. Dr. Andreas Klik und Herrn Dr. Andreas Schwen sowohl für die äußerst interessante Wahl der Aufgabenstellung als auch für die umfassende beratende und kollegiale Unterstützung bei der Erarbeitung des Themas.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft. Mein besonderer Dank gilt hier Frau DI.in Martina Faulhammer, Herr Dr. Reinhard Nolz, Herr Dr. Stefan Strohmeier, Herr Karl Haigner, Herr Fritz Forster und Herr Cristian Paulsen, die mich bei der praktischen Versuchsdurchführung tatkräftig unterstützt haben.

Weiters gebührt auch meinen Studienkollegen, Johannes Reiter, Benjamin Helmreich und Andreas Briefer Dank, die mein Studienleben bereichert haben und mir immer die Möglichkeit zum Diskutieren und Reflektieren gegeben haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern und Großeltern ganz herzlich bedanken, die mich bei all meinen Vorhaben immer unterstützt und mir mein Studium finanziert haben, sowie bei meinem Bruder, der mich mit seinen Erfahrungen aus seinem Studium immer zur Seite gestanden hat. Ohne Euch wäre ich nicht so weit gekommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführende Worte und Fragestellung.....	1
1.2	Geostatistik	2
1.3	Bodenschätzung	2
2	Material und Methoden.....	4
2.1	Standort.....	4
2.2	Versuchsaufbau	5
2.3	Labormethoden	6
2.3.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	6
2.3.2	Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes	9
2.3.3	Bestimmung der Aggregatstabilität	11
2.3.4	Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k-Wert)	12
2.3.5	Bestimmung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung.....	15
2.3.6	Bestimmung der Trockendichte	18
2.4	Statistische Analysen	19
2.4.1	Stichprobenvergleich.....	19
2.4.2	Korrelationsrechnung.....	19
2.4.3	Geostatistische Analysen	19
3	Ergebnisse	23
3.1	Visualisierung der Ergebnisse.....	23
3.1.1	Korngrößenverteilung	23
3.1.2	Kohlenstoffgehalte.....	24
3.1.3	Aggregatstabilität.....	25
3.1.4	Trockendichte.....	26
3.1.5	Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung.....	27
3.1.6	Hydraulische Leitfähigkeit	29
3.2	Stichprobenvergleich	30
3.3	Korrelationsrechnung.....	31
3.4	Geostatistische Analysen	32
3.4.1	Räumliche Variabilität (Semivariogrammanalyse).....	32
3.4.2	Räumliche Korrelation (Kreuzvariogrammanalyse).....	44
4	Diskussion	46
5	Schlussfolgerung.....	51
6	Zusammenfassung.....	53

7	Literaturverzeichnis	55
8	Anhang.....	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte Marchfeld (Land NÖ, BEV)	4
Abbildung 2: Übersicht Transsekt mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB) ..	5
Abbildung 3: Transsekt während der Probennahme	5
Abbildung 4: Nasssieber	7
Abbildung 5: automatische Kubiena-Apparatur.....	8
Abbildung 6: Elementaranalysator	9
Abbildung 7: Scheibler-Apparatur.....	10
Abbildung 8: Siebtauch-Apparatur.....	11
Abbildung 9: Apparatur zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit.....	12
Abbildung 10: Methode mit aufsteigendem Innenwasserspiegel und (annähernd) konstantem Außenwasserspiegel (Cepuder 2011)	12
Abbildung 11: Kapillarimeter nach Fischer.....	15
Abbildung 12: Schema Semivariogramm	20
Abbildung 13: Räumliche Verteilung des Sand- Schluff und Tongehaltes entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB)	23
Abbildung 14: Räumliche Verteilung des Gesamtkohlenstoff- und organischer Kohlenstoffgehaltes entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB)	24
Abbildung 15: Räumliche Verteilung der Aggregatstabilität entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB)	25
Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Trockendichte entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB)	26
Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB)	27
Abbildung 18: Räumliche Verteilung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung zwischen den Standpunkten 0 und 10 Meter	28
Abbildung 19: Räumliche Verteilung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung zwischen den Standpunkten 190 und 200 Meter	28

Abbildung 20: Räumliche Verteilung des Durchlässigkeitsbeiwertes entlang des Transekts mit mittlerer (mB) und geringer Bodenbonität (gB).....	29
Abbildung 21: Semivariogramm des Sandgehaltes.....	33
Abbildung 22: Semivariogramm des Schluffgehaltes.....	34
Abbildung 23: Semivariogramm des Tongehaltes.....	34
Abbildung 24: Semivariogramm des Gesamtkohlenstoffgehaltes.....	35
Abbildung 25: Semivariogramm des organischen Kohlenstoffgehaltes	36
Abbildung 26: Semivariogramm der Aggregatstabilität	37
Abbildung 27: Semivariogramm der Trockendichte	38
Abbildung 28: Semivariogramm der Trockendichte mit reduzierter Werteanzahl	39
Abbildung 29: Semivariogramm des Wasseranteils bei 150 hPa Matrixpotenzial	40
Abbildung 30: Semivariogramm des Wasseranteils bei 50 hpa Matrixpotenzial.....	41
Abbildung 31: Semivariogramm des Wasseranteils bei 30 hpa Matrixpotenzial.....	41
Abbildung 32: Semivariogramm des k-Wertes.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stichprobenvergleich.....	30
Tabelle 2: Korrelation nach Spearman	31
Tabelle 3: Hierarchie der räumlichen Variabilitätsstruktur	43
Tabelle 4: räumliche Korrelation	44

Verwendete Abkürzungen

SandG	Sandgehalt
SchluffG	Schluffgehalt
TonG	Tongehalt
GesK	Gesamtkohlenstoffgehalt
OrgK	Organischer Kohlenstoffgehalt
AS	Aggregatstabilität
TD	Trockendichte
$\theta/30$ hPa	Wasseranteil bei 30 hPa Matrixpotenzial
$\theta/50$ hPa	Wasseranteil bei 50 hPa Matrixpotenzial
$\theta/150$ hPa	Wasseranteil bei 150 hPa Matrixpotenzial
k-Wert	hydraulische Leitfähigkeit
n_{mB}	Stichprobe der mittleren Bonität
n_{gB}	Stichprobe der mittleren Bonität

Abstract

The impact of organic farming on soil physical properties at a long term field monitoring (MUBIL) in Rutzendorf (Lower Austria) have been monitored since 2003. Strong fluctuations of the measured soil properties complicated the interpretation of the soil data. Therefore, a study determining spatial variability was performed in spring 2013. The objective of the master thesis was to reduce the scatter of the measured values and to facilitate the interpretation of the arithmetic means of the soil properties. In addition, different soil bonitations were examined and brought in classical and spatial correlation to the soil properties.

Disturbed and undisturbed soil samples ($n = 131$) were taken along a 200 m-transect at distances of 2 m and nested parts with a higher sampling density. The samples were analyzed for particle size distribution, total and organic carbon contents, aggregate stability, bulk density, saturated hydraulic conductivity, and volumetric water contents at three pressure potentials (30, 50, 150 hPa). (Geo-)statistical analysis was performed to derive experimental semivariograms and reveal the spatial variation and association among observations.

The study showed a differential spatial behavior of the observed properties along the transect: The particle size distribution (by means of sand, silt, and clay contents), total and organic carbon contents, bulk density, and volumetric water contents at the three pressure potentials exhibited moderate or strong spatial dependencies, whereas aggregate stability and saturated hydraulic conductivity were only weakly spatial dependent. According to correlation analysis, soil bonitation showed a strong classical and spatial correlation to particle size distribution, organic carbon contents and volumetric water contents at the three pressure potentials.

To sum up, in this thesis it was shown, that the high spatial variability of hydraulic conductivity and aggregate stability – in contrast to the other measured parameters – enabled no reliable analysis according to the impact of organic farming. Furthermore, the soil bonitation is closely connected to the particle size distribution, organic carbon content and volumetric water contents at the three pressure potentials.

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts MUBIL wurden seit dem Jahr 2003 die Wirkungen der Umstellung und langfristigen biologischen Bewirtschaftung auf Bodenkennwerte anhand ausgewählter Eigenschaften erfasst. Da Schwankungen der gemessenen Bodenkennwerte deren Interpretation erschwerten, sollte im Rahmen dieser Masterarbeit eine geostatistische Untersuchung der räumlichen Variabilität dazu dienen, die Streuungsbreite der Messwerte zu reduzieren und die Mittelwerte besser interpretieren zu können. Darüber hinaus wurde die räumliche Korrelation zwischen den Bodenkennwerten erfasst sowie Bodenbonitätsklassen auf ihre Korrelation (nach Spearman) zu den Bodenkennwerten untersucht.

Gestörten und ungestörten Bodenproben ($n = 131$) wurden genommen und für die Bestimmung der Korngrößenverteilung (bestimmt mittels Sand, Schluff, Tongehalt), des Gesamt- und des organischen Kohlenstoffgehaltes, der Aggregatstabilität, der Trockendichte, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung bei 3 Druckstufen (30, 50, 150 hPa) herangezogen. (Geo-) statistische Analysen wurden durchgeführt, um die räumliche Variabilität der Kennwerte und deren Beziehungen zueinander aufzuzeigen.

Die Ergebnisse zeigten ein unterschiedliches, räumliches Verhalten der betrachteten Eigenschaften entlang des Transekts auf: Die Korngrößenverteilung, der Gesamt- und organischen Kohlenstoffgehalt, die Trockendichte und die Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung bei 3 Druckstufen wiesen eine mittlere oder starke räumliche Autokorrelation auf, während die Aggregatstabilität und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit eine schwache räumliche Autokorrelation zeigten. In Bezug auf die Korrelationsanalyse, ließen die Bodenbonitätsklassen eine starke klassische und räumliche Korrelation zu der Korngrößenverteilung, dem organische Kohlenstoffgehalt und der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung erkennen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die hohe räumliche Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit und der Aggregatstabilität - im Gegensatz zu den anderen gemessenen Parametern - nur eine eingeschränkte statistische Analyse derer zulässt. Weiters ließen sich die Bodenbonitätsklassen besser durch die Korngrößenverteilung, den organische Kohlenstoffgehalt und die Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung als durch die weiteren Bodenkennwerten charakterisieren.

1 Einleitung

1.1 Einführende Worte und Fragestellung

Auf einem biologisch bewirtschafteten Marktfruchtbetrieb im Marchfeld in Rutzendorf/Niederösterreich wird eine umfassende Langzeituntersuchung zur Dokumentation und Entwicklung des biologischen Landbaus durchgeführt. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts MUBIL werden seit dem Jahr 2003 die Wirkungen der Umstellung und langfristigen biologischen Bewirtschaftung auf das Ertragspotential der Kulturpflanzen, die Pflanzengesellschaften, die Fauna, Bodenkennwerte und den Wasserhaushalt anhand ausgewählter Eigenschaften erfasst. Das Ziel ist, die Wirkungen und agrarökologischen Leistungen der biologischen Bewirtschaftung in Bezug auf Biodiversität, Bodenqualität und Klimawandel zu dokumentieren und zu bewerten (Freyer, 2010).

Eine Arbeitsgruppe um Univ. Prof. Andreas Klik, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur, hat dabei die Aufgabe übernommen, in einem Teilprojekt die Wirkungen auf Erosion und den Bodenwasserhaushalt zu erfassen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Untersuchung und Erfassung möglicher Veränderungen bodenphysikalischer Kennwerte bei der Umstellung von konventionellem auf biologischen Landbau. Die spezifischen Aufgaben dieses Forschungsvorhabens sind unter anderem wie folgt definiert (Freyer, 2010):

- Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes von biologisch bewirtschafteten Flächen mit unterschiedlicher Düngung und Bodenbonität sowie einer konventionell bewirtschafteten Referenzfläche
- Untersuchung der zeitlichen Veränderung wesentlicher bodenphysikalischer Kennwerte (wie Trockendichte, Durchlässigkeit und Aggregatstabilität)

Da Schwankungen der gemessenen Bodenkennwerte deren Interpretation erschweren, soll im Rahmen dieser Masterarbeit eine geostatistische Untersuchung der räumlichen Variabilität dazu dienen, die Streubreite der Messwerte zu reduzieren und die Mittelwerte besser interpretieren zu können. Darüber hinaus wird die räumliche

Korrelation zwischen den Bodenkennwerten erfasst sowie Bodenbonitätsklassen (der Finanzbodenschätzung) auf ihre Korrelation zu den Bodenkennwerten untersucht. Daher ergeben sich folgende Fragestellungen:

Inwieweit korrelieren die verschiedenen Bodenbonitätsklassen mit bodenphysikalischen Eigenschaften?

Inwieweit korrelieren die bodenphysikalischen Eigenschaften untereinander?

Welche räumliche Variabilität zeigen die bodenphysikalischen Eigenschaften?

Kann eine räumliche Korrelation zwischen den bodenphysikalischen Eigenschaften beobachtet werden?

1.2 Geostatistik

Unter dem Kurzbegriff „Geostatistik“ wird heute eine geowissenschaftliche Spezialdisziplin zusammengefasst, die durch Mathéron (1965) als „Theorie der Ortsabhängigen Variablen und ihrer Schätzung“ eingeführt wurde. Dieses Spezialfach beschäftigt sich mit der räumlichen Variabilität von ortsabhängigen Variablen. Dabei geht es um die quantitative Erfassung der räumlichen Variabilität, deren mathematischen Beschreibung und anschließend um die Erstellung eines räumlichen Modells (mehr dazu im Kapitel 3.4.3).

Die etwas missverständliche Bezeichnung „Geostatistik“ führt immer wieder zu der Auffassung, es handele sich hierbei schlicht um die statistische Interpretation geowissenschaftlicher Kenngrößen. Dem ist nicht so. Es werden lediglich einige grundlegende Annahmen aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die räumliche Korrelation solcher Variablen angewendet, die durch ihre Ortslage (Koordinaten) einen eindeutigen Bezug im Raum aufweisen (Schafmeister 1999).

1.3 Bodenschätzung

Die nachfolgende Beschreibung der technischen Durchführung der Finanzbodenschätzung wurde aus „Geostatistische Analysen zur Integration von Geländemodellen und Bodenschätzungsdaten für verbesserte digitale Bodenkarten am

Beispiel einer alluvialen Landschaft“ (Schaupenlehner 2005) und „Bodenschätzung und Bodenkartierung“ (Pehamberger 2013) entnommen und zusammengefasst:

Die Probennahme zur Feststellung der Bodenbonität erfolgt meist im Rastersystem, wobei der Raster in ebenen Lagen zwischen 50 und 80 Metern liegt. An jedem Probenpunkt wird ein Bohrstich entnommen, der direkt im Feld eingewertet und in die Feldschätzungskarte eingetragen wird. Der Bodenschätzer ist dabei an einen Schätzungsrahmen gebunden, mit dessen Hilfe eine Wertezahl auf Basis der Bodenart, der Zustandsstufe und der Entstehungsart ermittelt wird. Jeder Boden muss also in diese drei Merkmalsgruppen eingeordnet werden, um seine entsprechende Wertzahl bestimmen zu können:

1. Bodenart

Die mineralischen Bodenarten werden im Feld mit der Fingerprobe ermittelt. Dabei werden die Mengenanteile von Sand, Schluff und Ton festgestellt und die Bodenart entsprechend den Angaben im Texturdreieck nach Wagner ausgewiesen. Der Wert des Bodens steigt beginnend bei Sand bis zu Lehm und nimmt in Richtung Ton wieder ab.

2. Zustandsstufe

Die Zustandsstufe eines Bodens beschreibt im Fall der Ackerschätzung die grundsätzliche Eignung eines Bodens für den Anbau von Kulturpflanzen und fasst in einer Wertezahl Klimaeinflüsse, frühere Vegetation, Geländeform, Wasserverhältnisse, Tiefgründigkeit, Humusanteil sowie menschliche Bearbeitung zusammen. Sie bildet entweder die Entwicklungs- oder die Alterungsstufen der Boden ab, wobei für die Einteilung eines Ackerbodens sieben Zustandsstufen möglich sind. Die Entwicklung erfolgt beginnend beim Rohboden hin zur höchsten Leistungsfähigkeit und endet mit der Abnahme der Leistungsfähigkeit durch Verarmung und Versauerung.

3. Entstehungsart

Die Entstehungsart beschreibt die geologischen Begebenheiten, im Rahmen derer die landwirtschaftlichen Boden entstanden sind. Lössböden (Diluvialboden aus äolischem Sediment) und Alluvialböden tragen zu einer höheren Ackerzahl des Bodens bei, Diluvialböden und Verwitterungsböden zu einer geringeren.

2.2 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität wurde ein Transsekt auf Schlag 1 entlang des Kleinparzellenversuchs (S1M) bis zur Kleinparzelle (S1G) mit einer Länge von 200 m gelegt. Der Transsekt durchlief dabei Böden mit unterschiedlicher Bonitätsklassen (Abbildung 2). Zur mittleren Bonität (mB) wurden Böden gezählt, die eine Ackerzahl > 60 nach der österreichischen Finanzbodenschätzung aufwiesen, Böden mit einer Ackerzahl < 60 zählen zur Kategorie geringe Bonität (gB). (Zur besseren Darstellung des Transsekt und der Bonitätsklassen wird auf das Kapitel 4.1 „Visualisierung der Ergebnisse“ hingewiesen.)

Es wurden alle 2 m eine gestörte Probe aus 0-10 cm Tiefe und eine ungestörte Probe (Stechzylinder) aus einer Tiefe von 10-15 cm genommen. Am Anfang und am Ende des Transekts wurde über eine Länge von 10 m die Probennahmedichte auf 0,5 m verkürzt, somit belief sich die Zahl der Probennahmepunkte auf 131. Die Bodenprobenahme fand einmalig im Frühjahr (13.04.-15.04.2014) statt, als der Boden konsolidiert war.

Anschließend wurden im Labor die Bodenproben analysiert. Anhand der gestörten Bodenproben wurden die Korngrößenverteilung, der Kohlenstoffgehalt und die Aggregatstabilität bestimmt. Die ungestörten Proben dienten zur Bestimmung der Trockendichte, der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung und des Durchlässigkeitsbeiwertes.

Die Korngrößenverteilung und der Kohlenstoffgehalt wurden alle 4 m bestimmt, die Trockendichte, die Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung und der Durchlässigkeitsbeiwert alle 4 m sowie im Bereich der verdichteten Bodenprobennahme und die Aggregatstabilität an allen 131 Probennahmepunkte.

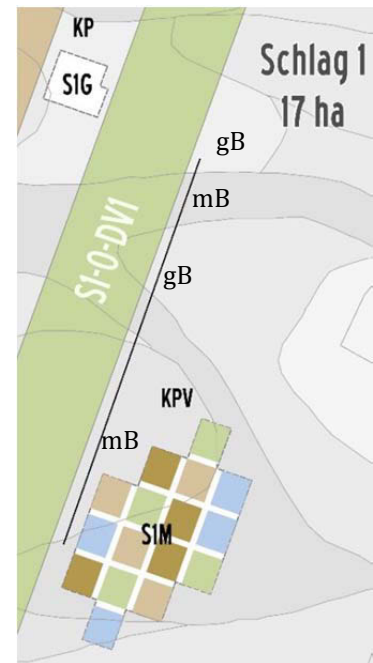


ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT TRANSEKT MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)



ABBILDUNG 3: TRANSEKT WÄHREND DER PROBENNAHME

2.3 Labormethoden

2.3.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an die ÖNORMEN L1061-2 (2002). Die Analyse dient der Bestimmung der Massenanteile der Feinboden-Körnungsgruppen (Korngrößenklasse) Sand, Schluff und Ton von Mineralböden. Als Feinboden wird der Siebdurchgang $d < 2$ mm bezeichnet.

Für die Trennung der Fraktionen kommen Nasssiebung und Pipettierverfahren nach Kubiena zum Einsatz. Die Nasssiebung des Feinbodens dient zur Bestimmung des Sandgehaltes und wird standardmäßig mit einem Siebsatz 2,0 mm – 1,0 mm – 0,63 mm – 0,20 mm – 0,125 mm – 0,063 mm durchgeführt. Das Pipettierverfahren ist ein Absetzverfahren und dient zur Bestimmung des Schluff- und des Tonanteils am Feinboden, wobei folgende Kornfraktionen gemessen werden: 0,063 mm - 0,020 mm - 0,0063 mm - 0,002 mm.

Vorbereitung:

Vor der Bestimmung wird die gestörte Bodenprobe auf $d < 2$ mm Korngröße gesiebt und organisches Material (Ernterückstände, Wurzeln, ...) entfernt. Für die Feinsiebung ist 100,00 g Probenmaterial (Genauigkeit: 0,01 g) und für das Absetzverfahren sind 20,00 g (Genauigkeit: 0,0001 g) in eine Wägeschale einzuwägen. Die Bodeneinwaage wird anschließend in Schottflasche (Duran®) überführt, mit dem Dispergierungsmittel (44,61 g $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ auf 1,000 L) vermischt und 8 Stunden stehen gelassen. 250 mL Natriumpyrophosphat-Lösung sind für die Feinsiebung und 50 mL für das Absetzverfahren zuzusetzen. Nach den 8 Stunden wird rund 200 mL entionisiertes Wasser hinzugegeben, die Schottflasche mit einem Gummistopfen verschlossen und 6 Stunden lang im Überkopfschüttler geschüttelt.

Durchführung:

Nasssiebung

Bei der Feinsiebung soll zuerst die Fraktion $d < 0,063$ mm mittels manueller Spülung abgeschieden werden. Bodenproben mit höheren Schluff- und Tonanteilen verlegen oft die Siebe und führen bei Nasssiebvorrichtungen zum Überlaufen. Der Inhalt jeder Probenflasche wird daher in einem Sieb mit 0,063 mm Maschenweite für 10 Minuten gewaschen.

Der Siebrückstand wird dann in den bereits aufgebauten Siebturm überführt (Abbildung 4). Die Siebe werden nun mindestens 30 Minuten lang mit Wasser und unter Rütteln gespült, bis keine Partikel mehr ausgewaschen werden. Der Inhalt jedes Siebes muss nun vollständig in eine abgewogene Abdampfschale überführt werden. Als letzter Schritt folgt ein Trocknen und erneutes Abwägen.



ABBILDUNG 4: NASSSIEBER

Pipettierverfahren nach Kubiena

Da die Korngrößenanalyse bis auf einen Durchmesser von 2 μm durchgeführt wird, es jedoch kein Sieb gibt, das diese Maschenweite aufweist, wird beim Pipettierverfahren auf indirektem Weg mittels Absetzgeschwindigkeit der Massenanteil je Korndurchmesser ermittelt. Diese Methode beruht auf dem Stokes'schen Gesetz, welches besagt, dass sich Bodenpartikel in Wasser bei einer bestimmten Temperatur abhängig von ihrem Durchmesser unterschiedlich schnell absetzen:

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot g}{18 \cdot \eta}$$

[v]	= cm·s ⁻¹	Absetzgeschwindigkeit
[d]	= cm	Äquivalenter Korndurchmesser
[g]	= cm·s ⁻²	Erdbeschleunigung
[ρ_s]	= g·cm ³	mittlere Feststoffdichte
[ρ_l]	= g·cm ³	Dichte der Flüssigkeit
[η]	= g·s ⁻¹ ·cm ⁻¹	dynamische Viskosität

Über die Zeit/Wegstrecke/Geschwindigkeits-Beziehung wird für jeden Durchmesser (0,063 mm - 0,020 mm - 0,0063 mm - 0,002 mm) bei bekannter Weglänge (10 cm in dieser Arbeit) die Absetzzeit berechnet:

$$t = \frac{h}{v}$$

[v]	= cm·s ⁻¹	Absetzgeschwindigkeit
[h]	= cm	Wegstrecke, die ein Teilchen zurücklegt
[t]	= s	Zeit

Für die Versuchsdurchführung steht am Institut eine Apparatur zur Verfügung, die eine vollautomatische Beprobung ermöglicht (Abbildung 5). Der Inhalt jeder Probenflasche (vgl. Vorbereitung) wird in einen Messzylinder gegeben und bis zur 1,000 L Markierung aufgefüllt. Auf eine einheitliche Temperatur der Probensuspensionen muss unbedingt geachtet, da es sonst zu unterschiedlichen Absetzgeschwindigkeiten kommen kann. Anschließend werden die Abdampfschalen abgewogen (Genauigkeit: 0,0001 g) und gemeinsam mit den Messzylindern in der Vorrichtung positioniert. Die Probennahme erfolgt anschließend automatisch und wie bereits oben beschrieben, zu bestimmten Zeiten in vorgegebenen Tiefen. Der letzte Schritt beinhaltet das Trocknen der Proben und Abwägen der Abdampfschalen.



ABBILDUNG 5: AUTOMATISCHE KUBIENA-
APPARATUR

2.3.2 Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes

Die Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes erfolgt in Anlehnung an die ÖNORMEN L1080 und L1084 (2002). Im Labor werden der Gesamtkohlenstoffgehalt und der anorganische Kohlenstoffgehalt direkt bestimmt, durch das Abziehen des anorganischen Kohlenstoffgehaltes vom Gesamtkohlenstoffgehalt kann auf den organischen Kohlenstoffgehalt geschlossen werden.

Vorbereitung:

Vor der Bestimmung wird die gestörte Bodenprobe auf $d < 2$ mm Korngröße gesiebt und organisches Material (Ernterückstände, Wurzeln, ...) gründlich entfernt. Des Weiteren wird das Probenmaterial bei 105°C über Nacht getrocknet und vor der Analyse in den Exsikkator gelegt.

Durchführung:

Gesamtkohlenstoffgehalt

Die Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehalts erfolgt mit Hilfe des Elementaranalysators (Vario Max, Elementar Analysensysteme GmbH). Für die Versuchsdurchführung steht am Institut eine Apparatur zur Verfügung, die eine Online-Erfassung der Messgrößen und eine vollautomatische Auswertung per Computer ermöglicht (Abbildung 6).

Je 0,500 g Probenmaterial (Genauigkeit: 0,001 g) werden in die vorbereiteten Metallbecher eingewogen. Zur Eichung des C-Analysators wird Glutaminsäure (0,200 g) als Standard verwendet.

Die Analyse erfolgt dann durch Oxidation der Kohlenstoffverbindung im O₂-Strom bei einer Temperatur von über 900°C und der Messung des entstehenden CO₂-Gases mittels eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors.



ABBILDUNG 6: ELEMENTARANALYSATOR

Bestimmung des Karbonatgehaltes

Die Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffgehaltes (Karbonatgehaltes) erfolgt mit der Apparatur nach Scheibler (Abbildung 7). 4,000 g Probenmaterial wird in das Reaktionsgefäß eingewogen sowie 10mL verdünnte Salzsäure in die Apparatur eingebracht. Nach der Schließung des Systems wird der Boden mit der Salzsäure in Kontakt gebracht. Diese führt zu der Zerstörung der Karbonate und das sich dabei entwickelnde CO₂ kann nun nach 5-10 Minuten gasvolumetrisch abgelesen werden. Unter Berücksichtigung von Temperatur und Druck wird nun mit folgender Gleichung die vorhandene Menge CaCO₃ berechnet:

$$w(\text{CaCO}_3) = \frac{0,12120 \cdot V_{\text{Abl}} \cdot p}{m_s \cdot (t + 273,15)} \cdot f$$

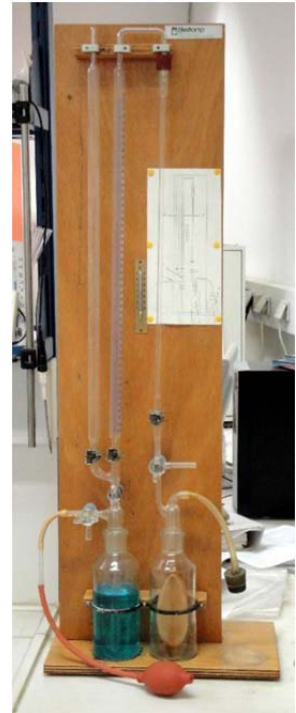


ABBILDUNG 7: SCHEIBLER-
APPARATUR

[w(CaCO ₂)]	= %	Massenanteil des Karbonats in Prozent
[V _{Abl}]	= mL	Abgelesenes CO ₂ -Volumen
[p]	= hPa	atmosphärischer Luftdruck
[m _s]	= g	eingewogene Feststoffmasse an Boden
[t]	= °C	beim Versuch herrschende Temperatur
[f]	= ~ 0.9	Korrekturfaktor, sollte täglich anhand eines Standards bestimmt werden

Unter der Annahme, dass der gesamte anorganische Kohlenstoff in der Probe als Carbonat vorliegt, kann aus dem Scheiber-Resultat nach folgender Formel auf den Gehalt an anorganischem Kohlenstoff geschlossen werden:

$$w(C_{\text{anorg}}) = w(\text{CaCO}_3) \cdot 0,12$$

[w(CaCO ₂)]	= %	Massenanteil des anorganischen Kohlenstoffgehaltes
-------------------------	-----	--

2.3.3 Bestimmung der Aggregatstabilität

Die Bestimmung der Aggregatstabilität erfolgte nach Kemper und Koch (1966).

Vorbereitung:

Mithilfe eines 1 und 2 mm Siebes werden Aggregate der Größenklasse 1-2 mm aus den luftgetrockneten Proben gewonnen. Im Gegensatz zur Bestimmung der KGV dürfen hier die Aggregate $d > 2$ mm nicht mit einem Mörser zerkleinert und der Siebung hinzugefügt werden, da durch den mechanischen Einfluss deren Stabilität zu sehr beeinflusst ist.

Durchführung:

Je 4,0 g der Proben werden in einer Siebtauchapparatur 5 Minuten in dest. Wasser mit einer Frequenz von ungefähr 40 Hüben pro Minute auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 0,25 mm in vertikaler Richtung bewegt (Abbildung 8).



ABBILDUNG 8: SIEBTAUCH-APPARATUR

Stabile Aggregate und Sand $> 0,25$ mm verbleiben auf dem Sieb, werden in eine Abdampfschale gewaschen und bei 105°C getrocknet. Nach der Ermittlung der Trockenmasse werden diese mit einem Dispergierungsmittel zerstört und anschließend in die Siebtauch-Apparatur rückgeführt. Auf dem Sieb verbleibt nach einer weiteren Behandlung der Sand $d > 0,25$ mm, welcher wieder getrocknet wird. Der prozentuale Anteil stabiler Aggregate wird anschließend folgend berechnet:

$$AS (\%) = \frac{m_{A,S} - m_S}{m_T - m_S} \cdot 100$$

[AS]	= %	Aggregatstabilität in Prozent
[$m_{A,S}$]	= g	Trockenmasse der Aggregate und des Sandanteils
[m_S]	= g	Trockenmasse des Sandanteils
[m_T]	= g	Trockenmasse der gesamten Probe (ca. 4 g)

2.3.4 Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k-Wert)

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird im Labor nach der Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel in Anlehnung an die ÖNORM L 1065 ermittelt.

Für die Versuchsdurchführung steht am Institut eine Apparatur zur Verfügung, die eine Online-Erfassung der Messgrößen und eine vollautomatische Auswertung per Computer ermöglicht (Abbildung 9).



ABBILDUNG 9: APPARATUR ZUR BESTIMMUNG DER HYDRAULISCHEN LEITFÄHIGKEIT

Bei diesem Verfahren wird der Außenwasserspiegel annähernd konstant etwa 4,5 cm über der Oberkante der Bodenprobe gehalten und das zeitliche Ansteigen des Innenwasserspiegels über der Bodenprobe beobachtet (Abbildung 10).

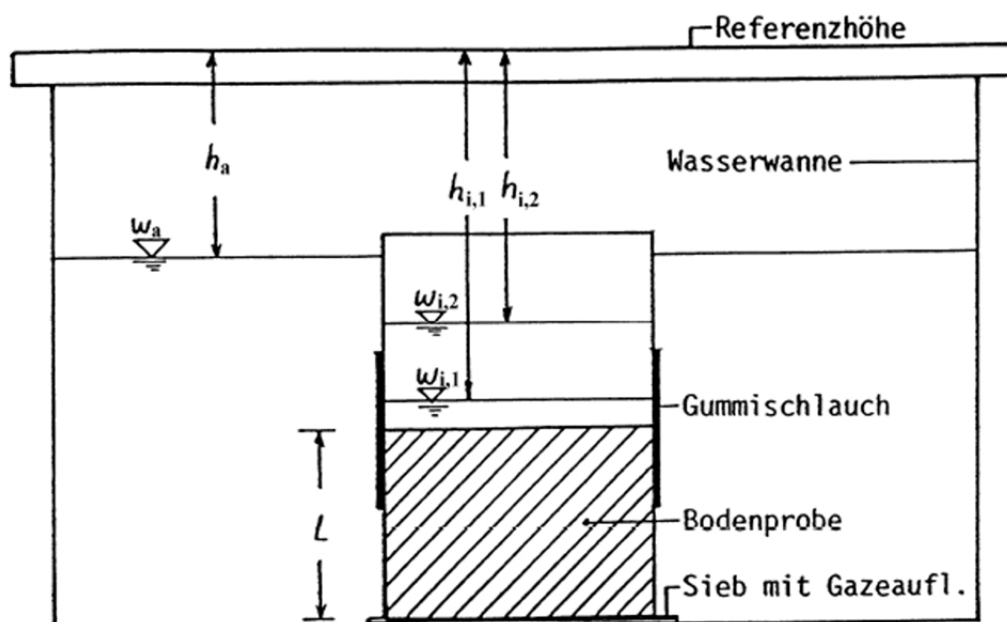


ABBILDUNG 10: METHODE MIT AUFSTEIGENDEM INNENWASSERSPIEGEL UND (ANNÄHERND) KONSTANTEM AUßENWASSERSPIEGEL (CEPUDER 2011)

Vorbereitung:

Auf den Stechzylinder mit der Bodenprobe wird ein leerer Stechzylinder mit gleichem Durchmesser aufgesetzt. Die beiden Zylinder werden mit einer Gummimanschette wasserdicht aneinander gefügt. Danach wird die Bodenprobe auf eine Siebplatte mit

Gazeauflage in eine leere Wasserwanne gestellt. Nun wird in die Wanne entlüftetes Wasser eingefüllt. Die Bodenprobe wird langsam (mind. 6 Std.) durch etappenweises Anheben des Wasserspiegels gesättigt und schließlich etwa 2 mm überstaut. Während dieses Vorganges sollte die Bodenluft nach oben möglichst langsam entweichen können.

Durchführung:

Nach der vollständigen Sättigung wird der Wasserspiegel in der Wanne bis ca. 0,5 cm unter die Oberkante des aufgesetzten Stechzylinders erhöht und mittels einer Mariotteschen Flasche auf dieser Höhe möglichst konstant gehalten. Gemessen wird nun die zeitliche Änderung der Wasserspiegelhöhe im Stechzylinder (mittels Elektroden, die bei Kontakt mit dem aufsteigenden Wasser ein Signal abgeben) zur Wasserspiegelhöhe in der Wanne (mittels einer Ultraschallsonde):

1. Messung: W_a zurzeit $t_1 \rightarrow h_{a1}$

W_i zurzeit $t_1 \rightarrow h_{i1}$

2. Messung: W_a zurzeit $t_2 \rightarrow h_{a2}$

W_i zurzeit $t_2 \rightarrow h_{i2}$

$[W_a]$	=	Außenwasserspiegel
$[W_i]$	=	Innenwasserspiegel über der Bodenprobe
$[t_1]$	= s	Zeitpunkt der ersten Ablesung (ab Beginn der Messung)
$[t_2]$	= s	Zeitpunkt der zweiten 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.

Unter der Annahme, dass sich der Außenwasserspiegel nicht ändert, kann $[h_{a1}] = [h_{a2}] = [h_a]$ gesetzt werden. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit folgender Formel und wird per Computer automatisch berechnet:

$$k_{st} = \frac{L}{t_1 - t_2} \cdot \ln \frac{h_{i1} - h_a}{h_{i2} - h_a}$$

$[k_{st}]$ $= \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ Durchlässigkeitsbeiwert (bei Sättigung)

$[L]$ $= \text{cm}$ Höhe des Stechzylinders

2.3.5 Bestimmung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung

Die Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung wird im Labor mittels Kapillarimeter nach Fischer in Anlehnung an die ÖNORM L 1063 ermittelt (Abbildung 11). Die Standardapparatur ist für die stufenweise Entwässerung mit pF-Werten von 1,0 bis 2,2 beziehungsweise von 10 cm bis 150 cm WS geeignet. Die Anzahl und Höhe der einzustellenden Wasserspannungen richtet sich nach der Bodenprobe und dem Zweck der Untersuchung (für diese Masterarbeit: 30 cm, 50 cm, 150 cm). Die Untersuchung wird an einer ungestörten Bodenprobe in 5 cm hohen Stechzylindern mit bekannter Masse und bekanntem Volumen durchgeführt.



ABBILDUNG 11: KAPILLARIMETER NACH FISCHER

Vorbereitung:

Die Filternutsche ist in einer Wasserwanne über 12 Stunden zu sättigen. Ein Schlauch und eine Messpipette werden ebenfalls untergetaucht beziehungsweise gesättigt und schließlich Filternutsche, Schlauch und Messpipette unter Wasser miteinander verbunden. Anschließend ist die Filternutsche mit dem Schlauch und Pipette aus der Wasserwanne zu nehmen und an einem Laborhalter zu montieren. Durch Absaugen von Wasser mit einer Spritze wird der Wasserspiegel in der Messpipette grob auf das Niveau der Filterplattenoberkante der Nutsche eingestellt und durch vertikales Verschieben der Pipette feinjustiert. Das Ausgangsvolumen in der Messpipette (V_{Pip0}) ist abzulesen und zu notieren.

Durchführung:

Eine gesättigte Stechzylinder-Bodenprobe wird vorsichtig auf die Filterplatte der Filternutsche gesetzt, ein guter Kontakt der Bodenprobe zu der Platte ist unbedingt zu bewerkstelligen.

Nun wird die erste Wasserspannung beziehungsweise Druckstufe (30 cm) in der Bodenprobe durch Absenken der Messpipette und damit des Wasserspiegels in der Pipette angelegt. Infolge der Entwässerung der Bodenprobe fließt das Wasser langsam durch die Filterplatte und der Wasserspiegel in der Pipette steigt. Dies bedingt ein

häufiges Nachstellen auf die gewünschte Druckstufe. Dieser Vorgang wird so oft durchgeführt, bis innerhalb von 7 Stunden der Wasserspiegel in der Pipette konstant bleibt. Die neue Pipettenablesung ($V_{\text{Pip}30}$) abzüglich der vorherigen ($V_{\text{Pip}0}$) ergibt das von der Bodenprobe abgegebene Wasservolumen (V_{0-30}). Für die weiteren zu bestimmenden Druckstufen (50, 150cm) werden die abgegebenen Wasservolumina (V_{30-50} , V_{50-150}) nach dem gleichen Verfahren bestimmt.

Die abschließende Wasseranteilbestimmung der Stechzylinder-Bodenproben in Bezug auf die untersuchten Druckstufen erfolgt in Anlehnung der ÖNORM L 1062.

Die feuchte Stechzylinderprobe (SZ_{150}) wird nach Erreichen der zu untersuchenden Druckstufe vorsichtig aus der Filternutsche genommen, abgewogen und bei 105 °C bis zur Massenkonzanz im Trockenschrank getrocknet. Wenn die Massenkonzanz erreicht ist, wird der trockene Stechzylinder erneut abgewogen (SZ_t). Aus der Differenz der Masse der feuchten Probe zur Masse der trockenen Probe ergibt sich die Masse des verdunsteten Wassers. Dieser Wert dividiert durch die Dichte des Wassers ρ_w ergibt das Volumen des Wassers V_w . Bezogen auf das Volumen der Bodenprobe (Stechzylindervolumen, V_{St}) lässt sich der Wasseranteil (θ_{150}) in cm^3/cm^3 ermitteln:

$$n_l = \theta_{150} = \frac{V_w}{V} = \frac{SZ_{150} - SZ_t}{\rho_w \times V_{St}}$$

$[n_l]$	$= \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	Wasseranteil in der Bodenprobe
$[\theta_{150}]$	$= \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	Wasseranteil bei 150 cm Druckstufe
$[SZ_{150}]$	$= \text{g}$	Masse der feuchten Stechzylinderprobe nach der Druckstufe 150 cm
$[SZ_t]$	$= \text{g}$	Trockenmasse der Stechzylinderprobe
$[\rho_w]$	$= 1,000 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Dichte von Wasser
$[V_{St}]$	$= \text{cm}^3$	Gesamtvolumen der Bodenprobe (Stechzylinder)

Für die Bestimmung der Wasseranteile der Druckstufen 30 und 50 cm (θ_{30} , θ_{50}) müssen die abgegebene Wasservolumina (V_{30-50} , V_{50-150}) folgend hinzugerechnet werden:

$$n_l = \theta_{50} = \frac{V_w}{V} = \frac{SZ_{150} + V_{50-150} \cdot \rho_w - SZ_t}{\rho_w \times V_{St}}$$

$$n_l = \theta_{30} = \frac{V_w}{V} = \frac{SZ_{150} + (V_{50-150} + V_{30-50}) \cdot \rho_w - SZ_t}{\rho_w \times V_{St}}$$

$[V_{50-150}]$	$= \text{cm}^3$	abgegebenes Wasservolumen zwischen den Druckstufen 50 und 150 cm
$[\Theta_{50}]$	$= \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	Wasseranteil bei 50 cm Druckstufe
$[V_{30-50}]$	$= \text{cm}^3$	abgegebenes Wasservolumen zwischen den Druckstufen 30 und 50 cm
$[\Theta_{30}]$	$= \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	Wasseranteil bei 30 cm Druckstufe

2.3.6 Bestimmung der Trockendichte

Die Trockendichte wird im Labor in Anlehnung an die ÖNORM L 1068 ermittelt. Für die Bestimmung der Trockendichte ist das Volumen der Gesamtprobe erforderlich, das bei der Stechzylinderprobe durch das Volumen des Stechzylinders bestimmt wird. Die Trockendichte wird anschließend an die Bestimmung der Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung ermittelt.

Durchführung

Die Stechzylinderprobe wird vorsichtig auf einen Metalluntersetzter, dessen Masse vorher bestimmt wird, gesetzt, und bei 105 °C bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wird die Masse der getrockneten Stechzylinderprobe mit dem Metalluntersetzter bestimmt. Die Feststoffmasse des Bodens ergibt sich dann durch Abzug der Masse von Abdampfschale und Stechzylinder. Wird nun die Feststoffmasse durch das Volumen des Stechzylinders dividiert, erhält man die Trockendichte:

$$\rho_d = \frac{m_{U+St+s} - m_U - m_{St}}{V_{St}}$$

$[m_{U+St+s}]$	= g	Masse des Metalluntersetzers mit Stechzylinder und ofentrockener Bodenprobe
$[m_U]$	= g	Masse des Untersetzers
$[m_{St}]$	= g	Masse des Stechzylinders
$[V_{St}]$	= cm ³	Volumen des Stechzylinders
$[\rho_d]$	= g·cm ⁻³	Trockendichte der (ofentrockenen) Bodenprobe

2.4 Statistische Analysen

Mit Hilfe des Statistikprogramme „SPSS für Windows, Version 21“, „R“ sowie des Tabellenkalkulationsprogramms „Microsoft Excel 2013“ wurde das Datenmaterial analysiert, graphisch aufgearbeitet und dargestellt.

2.4.1 Strichprobenvergleich

Zur Überprüfung signifikanter Unterschiede der Bodenkennwerte wurde der nichtparametrische Mann Whitney U-Test mittels SPSS durchgeführt. Da unterschiedlich großen Stichproben der mittleren und geringen Bonität vorliegen und die Stichprobe nicht normalverteilt sein muss, wurde dieser Test dem parametrischen t-Test vorgezogen. Die ermittelten Unterschiede wurden als signifikant bezeichnet, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$ war (Sachs 1999).

2.4.2 Korrelationsrechnung

Um die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bodenkennwerten zu beschreiben, wurden Spearman'sche Rang-Korrelationskoeffizienten mittels SPSS berechnet, da die Rang-Korrelation äußerst robust gegenüber Ausreißern ist. (Sachs 1999).

2.4.3 Geostatistische Analysen

2.4.3.1 Experimentelles Semivariogramm

Die Schätzung der Semivarianz dient der Beschreibung der raumstrukturellen Beziehungen von Merkmalen und stellt somit eines der wichtigsten Werkzeuge geostatistischer Analysen dar (Akin und Siemens, 1988). Die Semivarianz (γ) des Abstandes (h) setzt sich als durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen allen Beobachtungspaaren ($A(x_i) - A(x_i + h)$) zusammen (Pannatier, 1996 zitiert nach Penne, 2009):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [A(x_i) - A(x_i + h)]^2$$

Die graphische Darstellung der Semivarianz erfolgt als Semivariogramm (Abbildung 12).

Parameter der Variogrammanalyse

Im Variogramm wird die Semivarianz gegen die Entfernung (Lag-Abstand) aufgetragen. Der Abstand (h), bei dem das Variogramm einen Schwellenwert erreicht, wird Aussageweite genannt, die die Grenze der räumlichen Autokorrelation (Erhaltungsneigung) darstellt. Bis zu diesem Punkt ist die räumliche

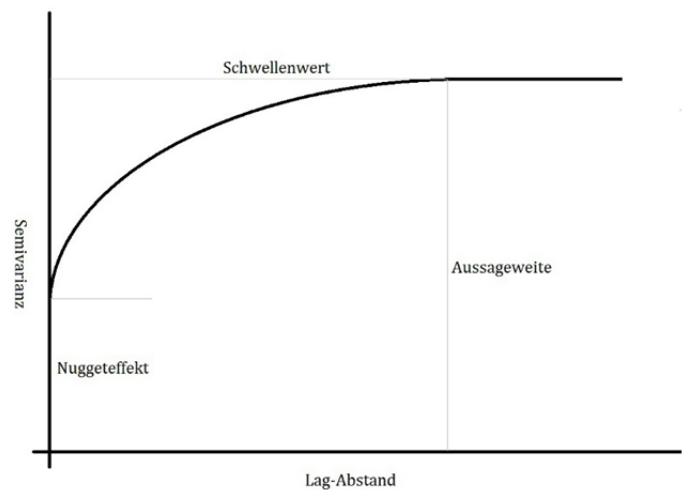


ABBILDUNG 12: SCHEMA SEMIVARIOGRAMM

Verteilung der Variablen erklärbar. Anders gesagt, bis zu dieser Entfernung ist die Autokorrelation der Variablen gegeben. Die Restvarianz (Nuggetvarianz) wird durch Messfehler oder die kleinräumige Varianz des Datensatzes verursacht und auch als Nuggeteffekt bezeichnet. Theoretisch müsste ja die Semivarianz für Wertepaare mit dem Abstand $h=0$ ebenfalls null betragen und der Graph der Semivarianz durch den Ursprung gehen, da es sich um ein und denselben Punkt handelt. Ein reiner Nuggeteffekt, das heißt $\gamma(h)=\text{Nuggetwert}$, weist darauf hin, dass nur geringe oder sogar keine räumliche Korrelation in den Stichproben vorhanden ist (Penne, 2009 und Schafmeister, 1999).

Theoretische Semivariogrammmodelle

An das experimentelle Variogramm kann eine Modellfunktion angepasst werden, um die vorher erwähnten Parameter besser schätzen zu können. Eine kleine Anzahl von Modellfunktionen hat sich in der Praxis als ausreichend erwiesen. In dieser Arbeit wurden folgende Modelle angewendet:

Das Sphärische Modell:

$$\gamma_{a,b}(h) = b \cdot \left[1,5 \cdot \frac{h}{a} - 0,5 \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ für } h \leq a \text{ bzw. } b \text{ für } h > a$$

Das Gauss'sche Modell:

$$\gamma_{a,b}(h) = b \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-3 \cdot h^2}{a^2} \right) \right]$$

[a] = Reichweite

[b] = Schwellenwert

[h] = Lag-Abstand

Locheffekt und Drift

Erreicht ein experimentelles Variogramm ein Maximum und fällt dann mit zunehmender Schrittweite wieder ab, anstatt bei diesem Maximalwert zu bleiben, dann liegt ein Locheffekt vor. Dies deutet darauf hin, dass Bereiche mit sehr hohen Werten und Bereiche mit sehr niedrigen Werten nebeneinander liegen. Bei auftretendem Locheffekt können Sinusförmige Variogrammfunktionen eingesetzt werden. Als praktischer Hinweis sei nach Akin und Siemens (1980) die Möglichkeit angedeutet, dass ein experimentelles Variogramm mit Locheffekt durch ein sphärisches Variogrammmodell bis zum ersten Schwellenwert beschrieben werden kann.

Nimmt die räumliche Autokorrelation mit zunehmender Entfernung linear ab und erfährt keine Sättigung, deutet dies auf einen Trend in den Daten hin. Dieses Phänomen wird eine Drift genannt.

Auch kann eine Kombination aus Locheffekt und Drift auftreten. Nach Erreichen eines Schwellenwerts kommt es zunächst zu einem kleinen Abfall der Kurve und dann zu einem parabolischen Anstieg. Die Aussageweite ist vor diesem parabolischen Anstieg zu definieren.

2.4.3.2 Experimentelles Kreuzvariogramm

Das Kreuzvariogramm ist das multivariate Analogon zum Semivariogramm. Es wird benötigt, wenn die räumliche Korrelation zwischen zwei Variablen beschrieben werden soll und/oder mit der Hilfe einer Variablen eine andere geschätzt wird. Die Berechnung der experimentellen Kreuzvarianz für zwei Probenwerte A(x) und B(x) erfolgt in

Analogie zur Berechnung der Semivarianz nach folgender Beziehung (Akin und Siemens 1988):

$$\Gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=h}^{N(h)} [A_i(x_i) - A_i(x_i + h)][B_i(x_i) - B_i(x_i + h)]$$

Die Darstellung der Kreuzvarianz beziehungsweise deren Interpretation erfolgt mittels Kreuzvariogramm, welches ähnlich wie ein Semivariogramm mittels Aussageweite, Nuggetvarianz und Schwellenwert zu bewerten ist.

3 Ergebnisse

3.1 Visualisierung der Ergebnisse

3.1.1 Korngrößenverteilung

Die Ergebnisse der Transektmessungen für die Korngrößenverteilung sind in Abbildungen 13 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Sandgehalt bei geringer Bodenbonität (gB) um bis zu 6% höher ist als bei mittlerer Bonität (mB). Im Mittel beträgt der Unterschied rund 3% (Tabelle 1). Der Schluffgehalt verhält sich invers zum Sandgehalt, das heißt dort wo der Schluffgehalt hoch ist, ist der Sandgehalt niedrig. Im Mittel beträgt der Unterschied rund 2 %. Der Tongehalt nimmt von Standort 0 m bis Standort 200 m - abgesehen von ein paar kleinen Schwankungen – leicht zu.

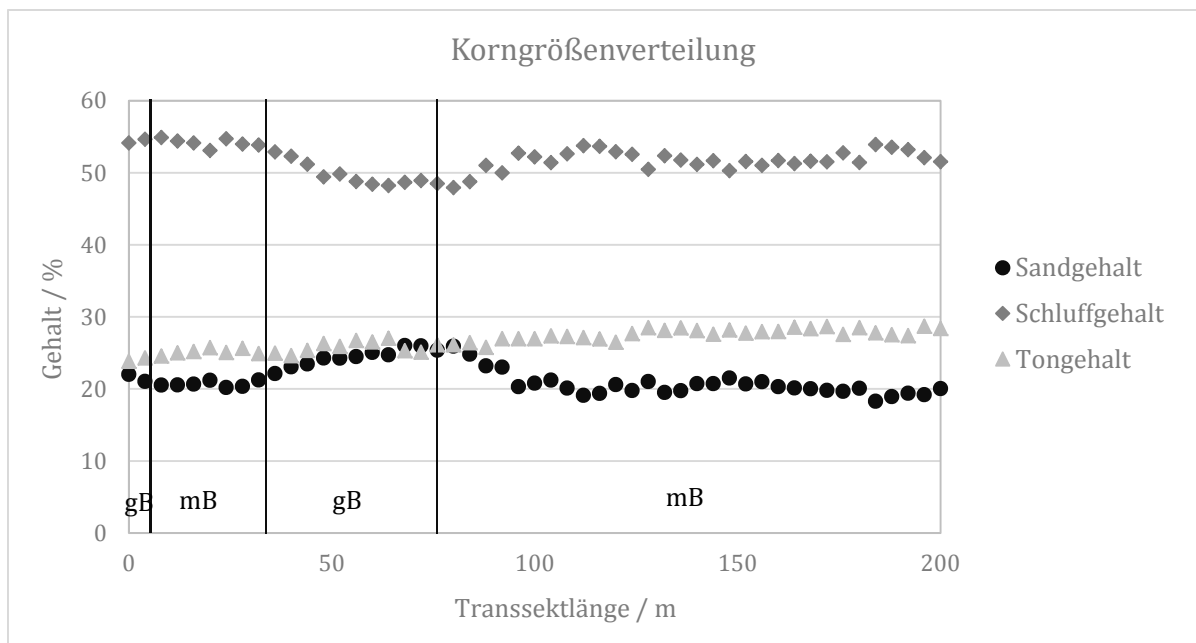


ABBILDUNG 13: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES SAND- SCHLUFF UND TONGEHALTES ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)

3.1.2 Kohlenstoffgehalte

Die Daten der Transektmessungen für den Kohlenstoffgehalt sind in Abbildung 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Gesamtkohlenstoffgehalt über die 200 m - abgesehen von ein paar kleinen Schwankungen - konstant bleibt. Sowohl die höchsten (4,7 %) als auch die geringsten Werte (4,2 %) kommen im Bereich der mittleren Bonität (mB) vor. Die Größenwerte der geringen Bonität (gB) liegen zwischen diesen Werten. Im Mittel liegt kein Unterschied vor. Anhand des organischen Kohlenstoffgehalts ist zu erkennen, dass dieser bei mittlerer Bodenbonität um bis zu 0,5% höher sein kann als bei geringerer Bonität. Im Mittel beträgt der Unterschied rund 0,2%.

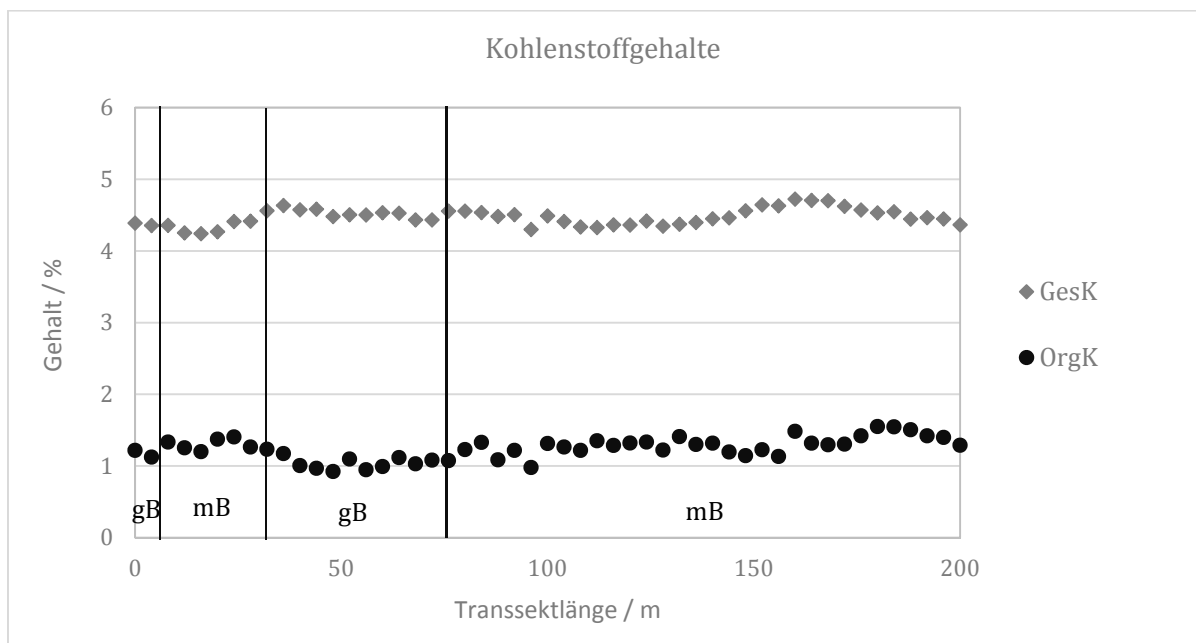


ABBILDUNG 14: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES GESAMTKOHLLENSTOFF- UND ORGANISCHER KOHLLENSTOFFGEHALTES ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (mB) UND GERINGER BODENBONITÄT (gB)

3.1.3 Aggregatstabilität

Die Ergebnisse der Transektmessungen für die Aggregatstabilität sind in Abbildung 15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Aggregatstabilität entlang der 200 m um den Wert 30 stark streut. Im Mittel sind keine Unterschiede zwischen den Bonitäten auszumachen.

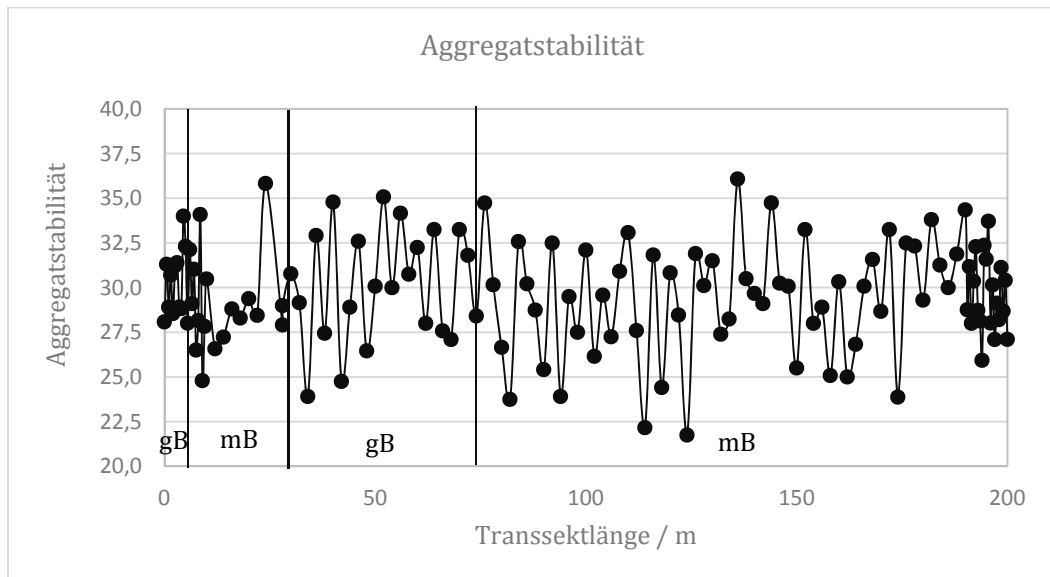


ABBILDUNG 15: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER AGGREGATSTABILITÄT ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)

3.1.4 Trockendichte

Die Ergebnisse der Transektmessungen für die Trockendichte sind in Abbildung 16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Trockendichte entlang der ersten 120 m um den Wert 1,45 streut und es dann zu einem abrupten Anstieg der Trockendichte auf rund 1,53 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ kommt. Im Mittel sind Unterschiede zwischen den Bonitäten zu beobachten.

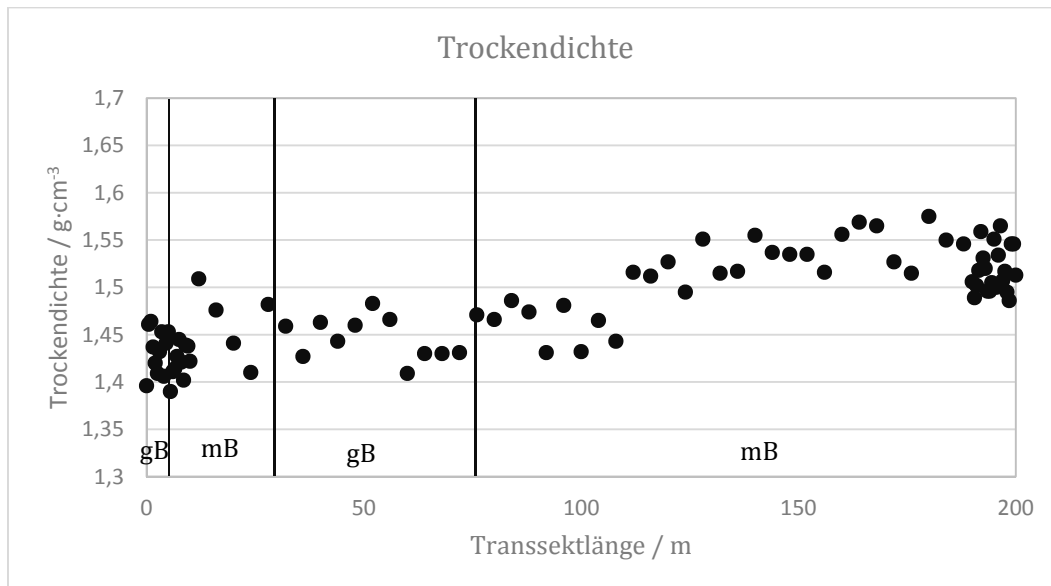


ABBILDUNG 16: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER TROCKENDICHTE ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)

3.1.5 Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung

Die Daten für die Wasserspeicherkapazität bei 150 hPa Matrixpotenzial, was in etwa der Feldkapazität entspricht, zeigen, dass die Flächen mit mittlerer Bonität im Mittel um rund 2% Wasser speichern können als jene mit geringer Bonität (Tabelle 1), Unterschiede bis zu 6% jedoch auftreten können (Abbildung 17). Die Werte der Wasserspeicherkapazität bei 50 hPa Matrixpotenzial zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Werte bei 150 hPa, der Unterschied im Mittel liegt ebenfalls im Mittel um rd. 2%. Bei einem Matrixpotenzial 30 hPa hingegen verringert sich der Unterschied der Wasserspeicherkapazität auf 0,7%.

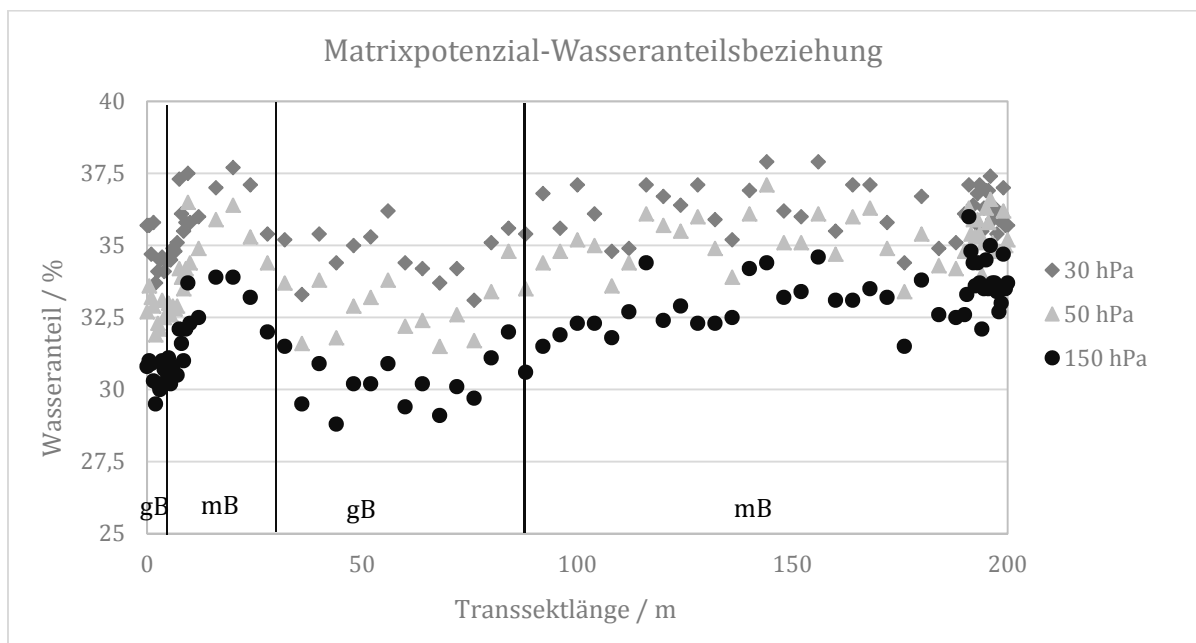


ABBILDUNG 17: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MATRIXPOTENZIAL-WASSERANTEILSBEZIEHUNG ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)

Eine bessere Darstellung der Werte im Bereich der verdichteten Probennahmepunkte wird in den folgenden Diagrammen ermöglicht (Abbildung 18 und 19):

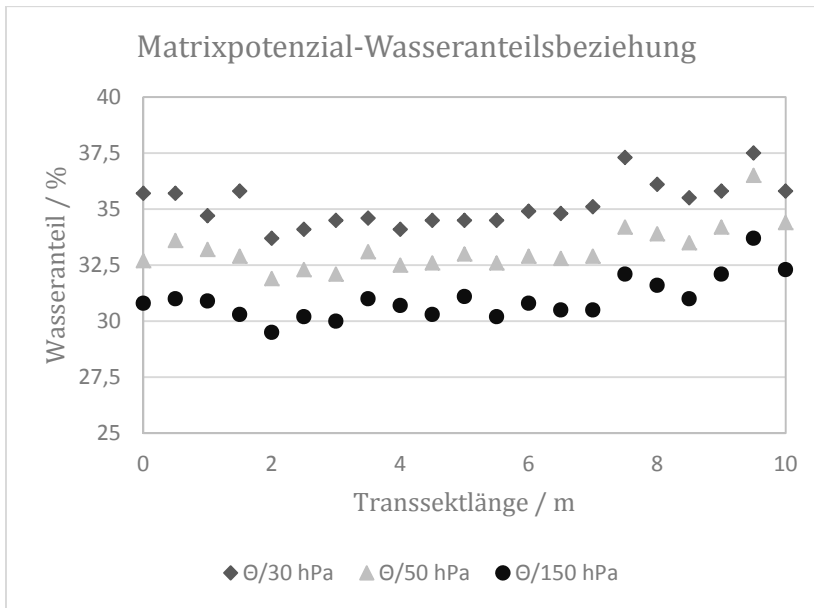


ABBILDUNG 18: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MATRIXPOTENZIAL-WASSERANTEILSBEZIEHUNG ZWISCHEN DEN STANDPUNKTEN 0 UND 10 METER

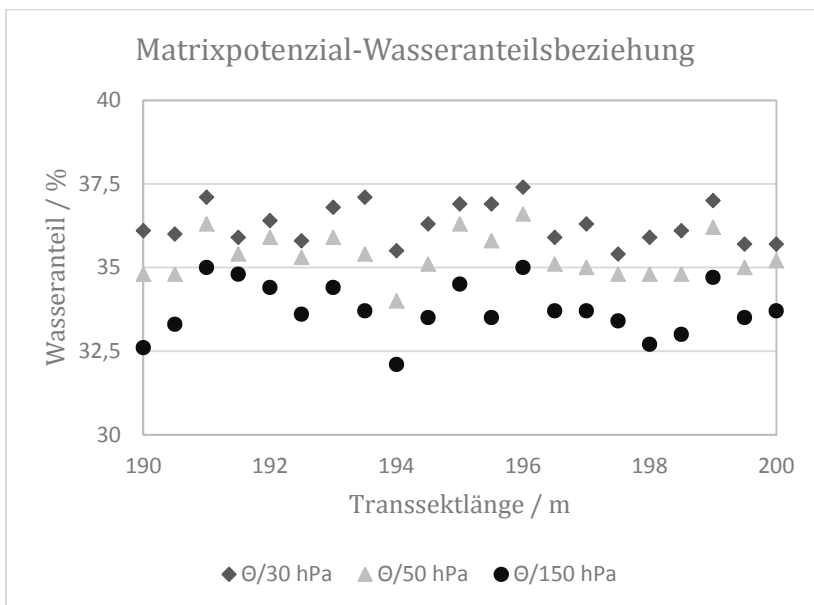


ABBILDUNG 19: RÄUMLICHE VERTEILUNG DER MATRIXPOTENZIAL-WASSERANTEILSBEZIEHUNG ZWISCHEN DEN STANDPUNKTEN 190 UND 200 METER

3.1.6 Hydraulische Leitfähigkeit

Die Ergebnisse der Transektmessungen für die hydraulische Leitfähigkeit sind in Abbildung 20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Durchlässigkeitsbeiwert entlang der 200 m um den Wert $4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ streut.

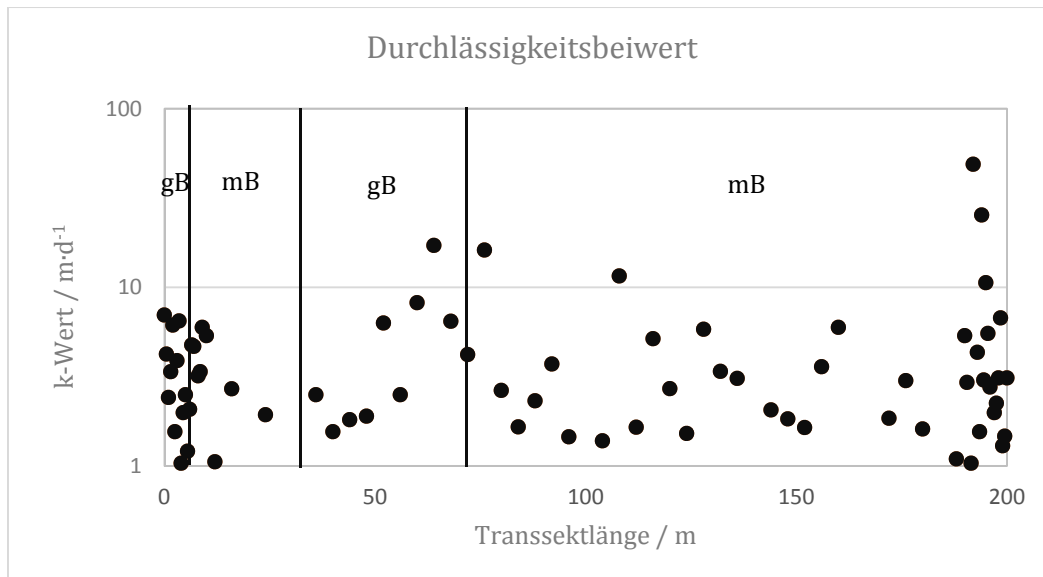


ABBILDUNG 20: RÄUMLICHE VERTEILUNG DES DURCHLÄSSIGKEITSBEIWERTES ENTLANG DES TRANSEKTS MIT MITTLERER (MB) UND GERINGER BODENBONITÄT (GB)

3.2 Stichprobenvergleich

In der Tabelle 1 sind die Mittelwerte der verschiedenen Bodenkennwerte in Bezug zu den zwei Bonitätsklassen dargestellt. Der Stichprobenvergleich mittels Mann-Whitney-U-Test zeigt bei folgenden Kennwerte signifikante Unterschiede zwischen den Bonitäten: Dem Sandgehalt und Tongehalt, organischen Kohlenstoffgehalt, der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung bei allen drei Druckstufen sowie der Trockendichte. Die Mittelwerte des Schluffgehaltes, des Gesamtkohlenstoffgehaltes der Aggregatstabilität und des k-Wertes unterscheiden sich jedoch nicht signifikant untereinander.

TABELLE 1: STICHPROBENVERGLEICH, UNTERSCHIEDLICHE BUCHSTABEN KENNZEICHNEN
SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE

Variable	geringe Bonität MW $\pm$ STABW	mittlere Bonität MW $\pm$ STABW
Sandgehalt / %	23,69 $\pm$ 1,50 a	20,88 $\pm$ 1,83 b
Schluffgehalt / %	50,78 $\pm$ 2,38 a	52,03 $\pm$ 1,71 a
Tongehalt / %	25,53 $\pm$ 1,05 a	27,09 $\pm$ 1,23 b
Gesamtkohlenstoffgehalt / %	4,50 $\pm$ 0,08 a	4,46 $\pm$ 0,12 a
org. Kohlenstoffgehalt / %	1,05 $\pm$ 0,10 a	1,29 $\pm$ 0,13 b
Aggregatstabilität / %	30,47 $\pm$ 2,70 a	29,37 $\pm$ 2,93 a
Wasseranteil bei 30 hPa Matrixpotenzial / %	34,69 $\pm$ 0,78 a	36,07 $\pm$ 0,97 b
Wasseranteil bei 50 hPa Matrixpotenzial / %	32,66 $\pm$ 0,69 a	34,85 $\pm$ 1,12 b
Wasseranteil bei 150 hPa Matrixpotenzial / %	30,25 $\pm$ 0,69 a	32,8 $\pm$ 1,32 b
Trockendichte / g·cm ⁻³	1,44 $\pm$ 0,02 a	1,49 $\pm$ 0,04 b
k-Wert / m·d ⁻¹	4,45 $\pm$ 3,71 a	3,97 $\pm$ 6,78 a

3.3 Korrelationsrechnung

In der Tabelle 2 sind die Korrelationskoeffizienten der untersuchten Bodenkennwerte dargestellt. Zuerst wird auf die Korrelation zwischen den Bodenkennwerte und der Bonität eingegangen, danach werden ausgewählte Werte hervorgehoben.

TABELLE 2: KORRELATION NACH SPEARMAN

	SandG	SchluffG	TonG	GesK	OrgK	AS	TD	Bonität	$\theta/30$ hPa	$\theta/50$ hPa	$\theta/150$ hPa	k-Wert
SandG	1,00	-0,62	-0,55	0,22	-0,77	0,10	-0,59	-0,55	-0,32	-0,53	-0,67	0,22
SchluffG	-0,62	1,00	-0,25	-0,41	0,49	-0,16	-0,02	0,23	0,15	0,22	0,32	-0,30
TonG	-0,55	-0,25	1,00	0,16	0,42	0,04	0,79	0,47	0,38	0,55	0,60	-0,03
GesK	0,22	-0,41	0,16	1,00	-0,16	0,29	0,18	-0,15	-0,12	-0,17	-0,13	0,04
OrgK	-0,77	0,49	0,42	-0,16	1,00	-0,07	0,50	0,62	0,33	0,51	0,62	-0,24
AS	0,10	-0,16	0,04	0,29	-0,07	1,00	0,00	-0,15	-0,13	-0,12	-0,14	0,15
TD	-0,59	-0,02	0,79	0,18	0,50	0,00	1,00	0,48	0,44	0,66	0,70	-0,20
Bonität	-0,55	0,23	0,47	-0,15	0,62	-0,15	0,48	1,00	0,52	0,63	0,65	-0,19
$\theta/30$ hPa	-0,32	0,15	0,38	-0,12	0,33	-0,13	0,44	0,52	1,00	0,90	0,79	-0,19
$\theta/50$ hPa	-0,53	0,22	0,55	-0,17	0,51	-0,12	0,66	0,63	0,90	1,00	0,93	-0,28
$\theta/150$ hPa	-0,67	0,32	0,60	-0,13	0,62	-0,14	0,70	0,65	0,79	0,93	1,00	-0,25
k-Wert	0,22	-0,30	-0,03	0,04	-0,24	0,15	-0,29	-0,19	-0,19	-0,28	-0,25	1,00

Es ist zu sehen, dass die Kennwerte des Sandgehaltes, des organischen Kohlenstoffgehaltes und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung positiv mit den Bonitätsklassen hoch korrelieren. Etwas wenig geringer fallen die Korrelationskoeffizienten zwischen der Bonität und des Tongehaltes sowie der Trockendichte aus. Der Schluffgehalt, der Gesamtkohlenstoffgehalt, die Aggregatstabilität und der k-Wert zeigen jedoch schwache bis gar keine Zusammenhänge.

Der Sandgehalt korreliert negativ zu dem Schluffgehalt und dem Tongehalt. Des Weiteren ist eine hohe negative Beziehung zwischen dem Sandgehalt und dem organischen Kohlenstoffgehalt gegeben. Der Schluff- und der Tongehalt korrelieren hingegen positiv zum organischen Kohlenstoffgehalt. Weiters kann eine hohe positive Korrelation zwischen der Wasseranteil-Matrixpotenzialbeziehung und den Kennwerten Tongehalt und organischer Kohlenstoffgehalt festgestellt werden und eine negative zu dem Sandgehalt. Der Gesamtkohlenstoffgehalt, die Aggregatstabilität und der k-Wert zeigen geringe beziehungsweise keine Zusammenhänge mit den anderen Kennwerten.

3.4 Geostatistische Analysen

Für die Analyse des räumlichen Verhaltens sind die Semivarianz für jeden Parameter und die Kreuz-Semivarianz für alle Parameterkombinationen berechnet worden. Die Ergebnisse werden dargestellt und ihr räumliches Verhalten analysiert.

3.4.1 Räumliche Variabilität (Semivariogrammanalyse)

Die experimentellen Semivariogramme werden mittels des Statistikpakets „GSTAT“ aus dem Statistiksoftware „R“ berechnet. Mit der Programmfunktion „vario.fit“ werden für die experimentellen Semivariogramme theoretische Modelle geschätzt und die zu untersuchenden Parameter (Aussageweite, Semivarianz und Nuggetvarianz) bestimmt. Die Variogrammanalyse wird bis zu einem Lag-Abstand von ca. 66 m durchgeführt. Dies ist durch die Grundeinstellung von „GSTAT“ festgelegt, die eine Berechnung auf ein Drittel der Länge des Transekts beschränkt. In der Literatur wird empfohlen, dass der maximalen Lag-Abstand der Semivariogrammanalyse ein Drittel bis maximal die Hälfte der Gesamttransektlänge betragen soll (Akin und Siemens 1998), da für die Berechnung der Semivarianz höherer Lag-Abstände keine repräsentative Anzahl an Wertepaare mehr vorliegt.

3.4.1.1 Semivariogramme zur Korngrößenverteilung

Das experimentelle Semivariogramm des Sandgehaltes (Abbildung 21) kann durch ein gauss'sches Variogrammodell angepasst werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 6, die Nuggetvarianz ist sehr gering ausgeprägt. Die Aussageweite reicht bis 55 m, bis zu diesem Punkt ist die Autokorrelation der Werte gegeben.

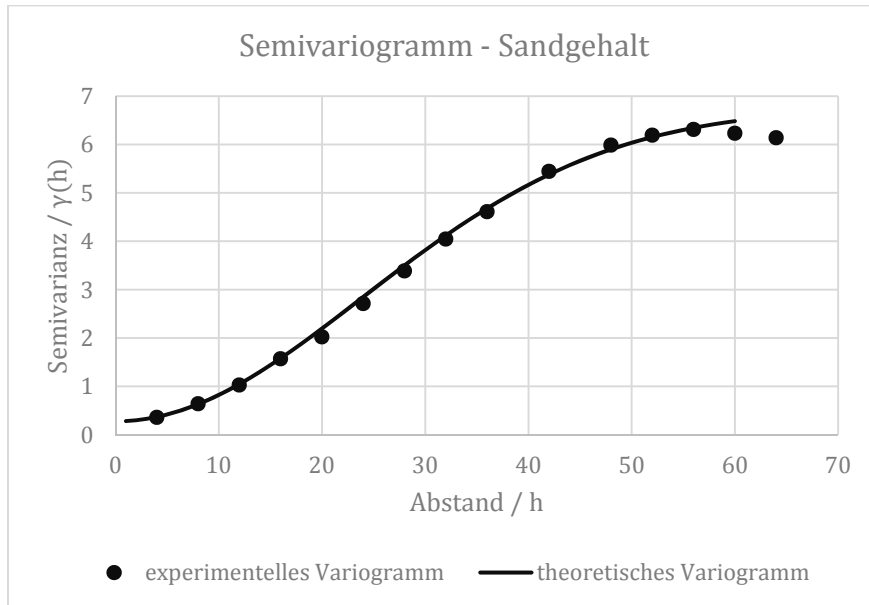


ABBILDUNG 21: SEMIVARIOGRAMM DES SANDGEHALTES

Das experimentelle Semivariogramm des Schluffgehaltes (Abbildung 22) kann ebenfalls durch ein gauss'sches Variogrammodell angepasst werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 6, die Nuggetvarianz ist sehr gering ausgeprägt. Die Aussageweite reicht bis 50 m, bis zu diesem Punkt ist die Autokorrelation der Werte gegeben.

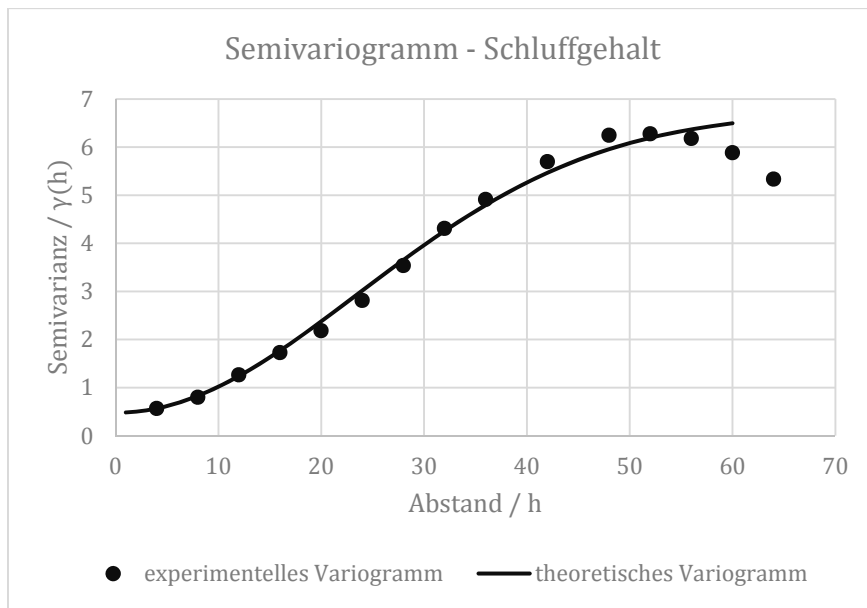


ABBILDUNG 22: SEMIVARIOGRAMM DES SCHLUFFGEHALTES

Das experimentelle Semivariogramm des Tongehaltes (Abbildung 23) zeigt einen Loch-Drift-Effekt. Nach einem Anstieg der γ -Werte bis zu Lag-Abstand von 25 m wird ein erstes Niveau erreicht. Ab 40 m steigt die Semivarianz wieder an. Das Semivariogramm kann bis zum Erreichen des ersten Plateaus nach Akin und Siemens durch ein gauss'sches Variogrammmodell angepasst werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 0,5.

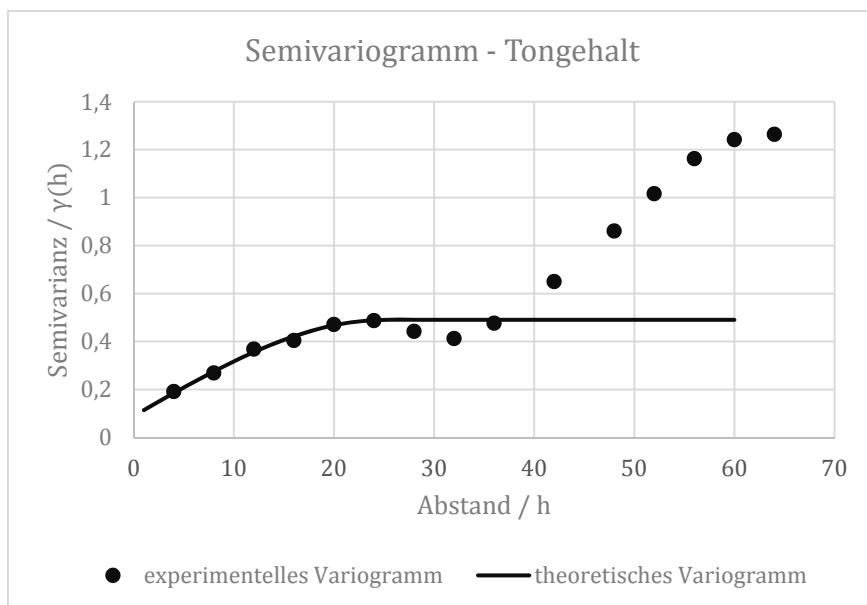


ABBILDUNG 23: SEMIVARIOGRAMM DES TONGEHALTES

3.4.1.2 Semivariogramme zum Kohlenstoffgehalt

Das experimentelle Semivariogramm des Gesamtkohlenstoffgehaltes (Abbildung 24) kann durch ein sphärisches Variogrammmodell beschrieben werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 0,17, die Nuggetvarianz ist sehr gering ausgeprägt. Die Aussageweite reicht bis 35 m.

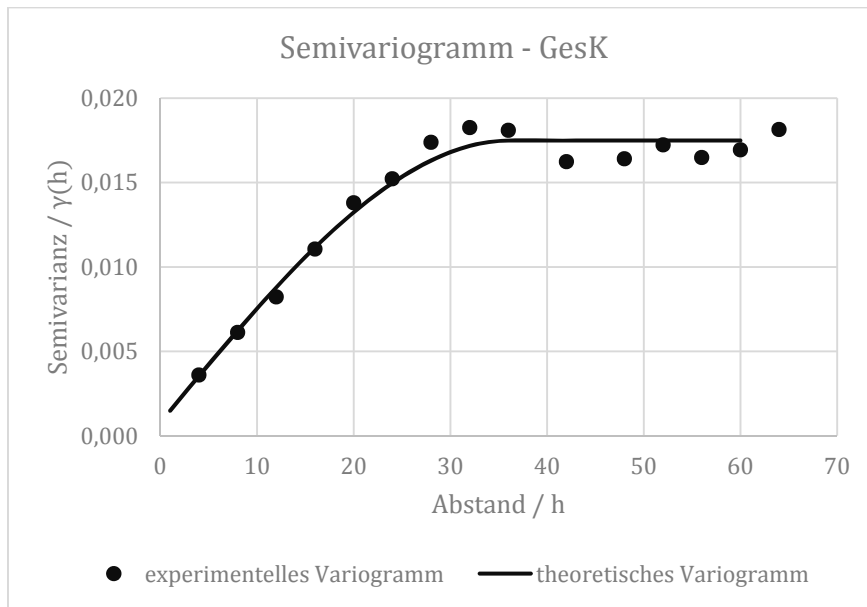


ABBILDUNG 24: SEMIVARIOGRAMM DES GESAMTKOHLLENSTOFFGEHALTES

Das experimentelle Semivariogramm des organischen Kohlenstoffgehaltes (Abbildung 25) kann durch ein sphärisches Variogrammodell beschrieben werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 0,024, die Nuggetvarianz liegt bei 0,007 und die Aussageweite reicht bis 43 m.

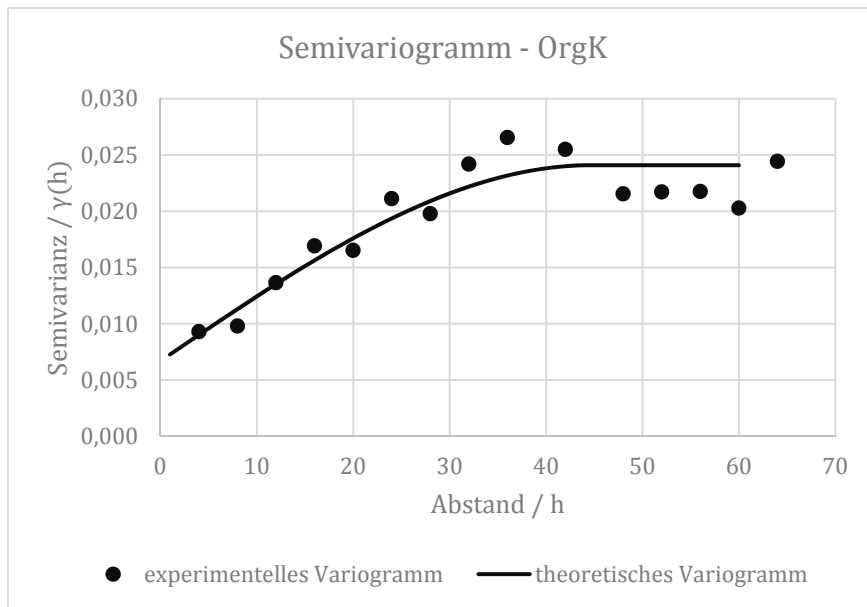


ABBILDUNG 25: SEMIVARIOGRAMM DES ORGANISCHEN KOHLENSTOFFGEHALTES

3.4.1.3 Semivariogramm zur Aggregatstabilität

Das experimentelle Semivariogramm der Aggregatstabilität (Abbildung 26) wird durch ein sphärisches Variogrammmodell beschrieben werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 9,8. Die Nuggetvarianz liegt bei einem hohen Wert von ca. 7. Die Aussageweite reicht bis 25 m.

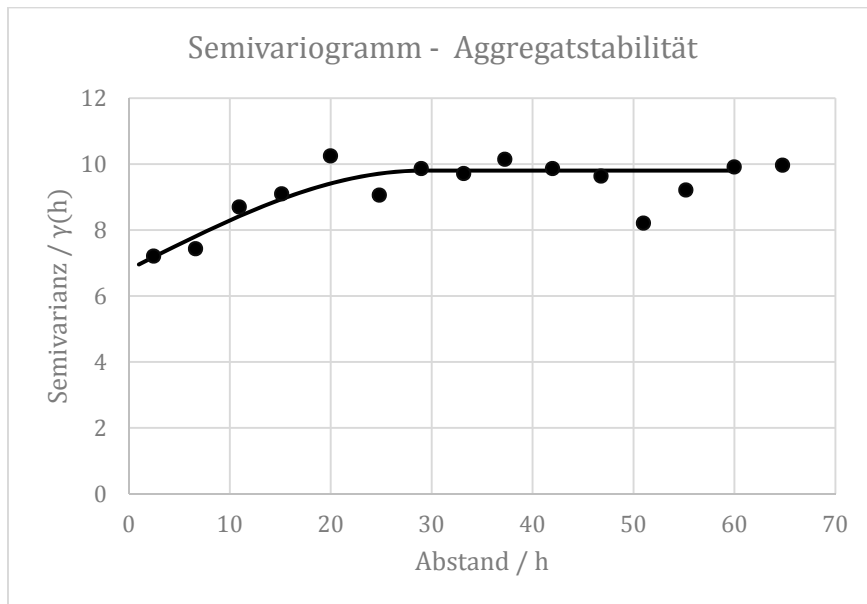


ABBILDUNG 26: SEMIVARIOGRAMM DER AGGREGATSTABILITÄT

3.4.1.4 Semivariogramm zur Trockendichte

Das experimentelle Semivariogramm der Trockendichte (Abbildung 27) wird durch ein sphärisches Variogrammodell beschrieben werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 0,00093. Die Nuggetvarianz liegt bei einem hohen Wert von ca. 0,0005. Die Aussageweite reicht bis 13 m.

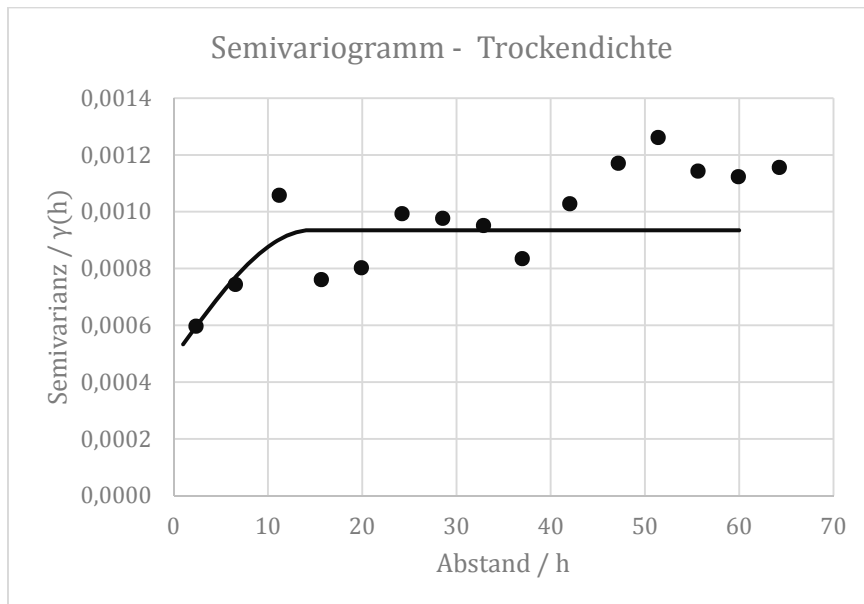


ABBILDUNG 27: SEMIVARIOGRAMM DER TROCKENDICHTE

Wie schon weiter oben beschrieben ist eine Verdichtung des Bodens entlang einer Strecke von 80 m auszumachen. Aus diesem Grund wird eine Semivariogrammanalyse ohne die Werte aus dem verdichteten Bereich durchgeführt. Das Semivariogramm mit der reduzierten Werteanzahl und das Semivariogramm mit allen berücksichtigten Werten sind in Abbildung 28 dargestellt. Bis zu einem Lag-Abstand von 20 m zeigen beide Variogramme einen ähnlichen Verlauf. Die γ -Werte beider Variogramme weichen jedoch mehr als 5% voneinander ab. Umso größer der Lag-Abstand dann wird, umso mehr unterscheiden sich beide Variogramme.

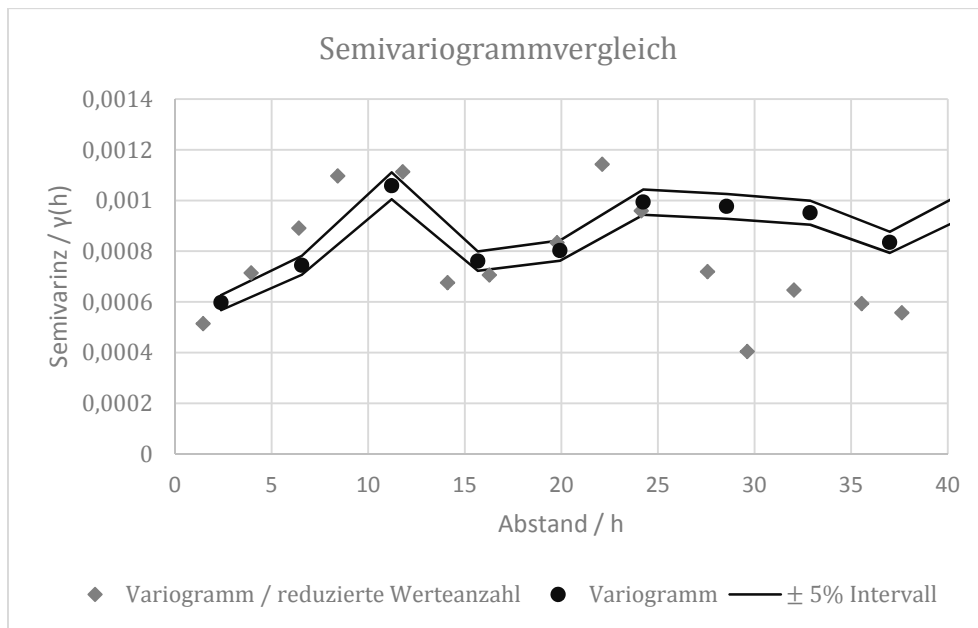


ABBILDUNG 28: SEMIVARIOGRAMM DER TROCKENDICHTE MIT REDUZIERTER WERTEANZAHL

3.4.1.5 Semivariogramme zur Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung

Die Schätzung der Parameter des Semivariogramms erfolgt in Anlehnung nach Akin und Siemens.

Beim folgenden Variogramm kann ein Locheffekt beobachtet werden (Abbildung 29). Nach einem raschen Anstieg der Semivarianz fällt diese abrupt ab und steigt wieder leicht an. Ein sphärisches Variogrammmodell kann bis zum ersten Höhepunkt angepasst werden. Der Schwellenwert liegt bei ca. 2,1. Die Nuggetvarianz liegt bei einem Wert von ca. 0,2. Die Aussageweite reicht bis 15 m.

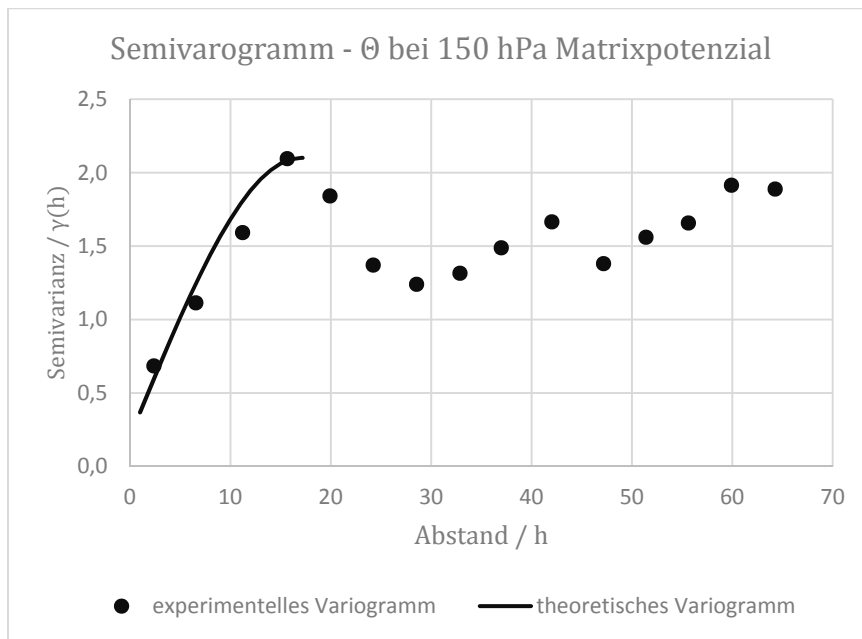


ABBILDUNG 29: SEMIVARIOGRAMM DES WASSERANTEILS BEI 150 hPa MATRIXPOTENZIAL

Beim nächsten Variogramm kann wieder ein Locheffekt beobachtet werden (Abbildung 30). Nach einem raschen Anstieg der Semivarianz fällt diese abrupt ab und steigt wieder leicht an. Der Schwellenwert liegt bei ca. 2,1. Die Nuggetvarianz liegt bei einem Wert von ca. 0,2. Die Aussageweite reicht bis 15 m.

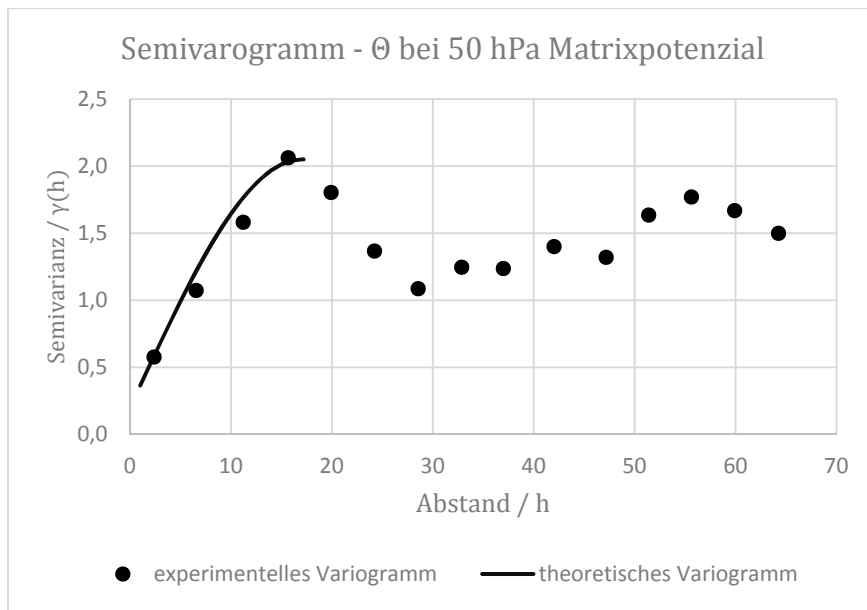


ABBILDUNG 30: SEMIVARIOGRAMM DES WASSERANTEILS BEI 50 hPa MATRIXPOTENZIAL

Beim letzten Variogramm kann wieder ein Locheffekt beobachtet werden (Abbildung 31). Nach einem raschen Anstieg der Semivarianz fällt diese abrupt ab und steigt wieder leicht an. Der Schwellenwert liegt bei ca. 1,6. Die Nuggetvarianz liegt bei einem Wert von ca. 0,3. Die Aussageweite reicht bis 15 m.

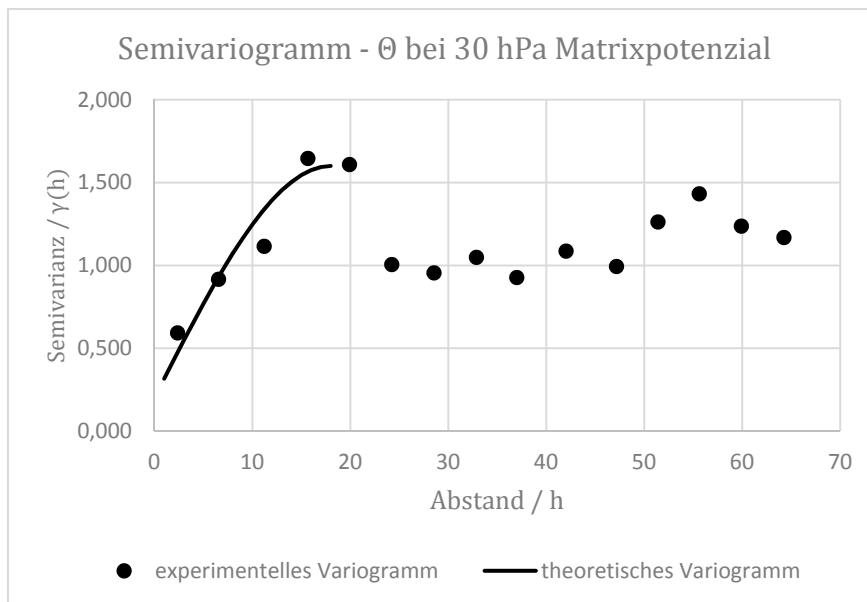


ABBILDUNG 31: SEMIVARIOGRAMM DES WASSERANTEILS BEI 30 hPa MATRIXPOTENZIAL

3.4.1.6 hydraulische Leitfähigkeit

Das experimentelle Semivariogramm der hydraulischen Leitfähigkeit (Abbildung 32) zeigt sowohl vor als auch nach Logarithmieren der Werte einen reinen Nuggeteffekt.

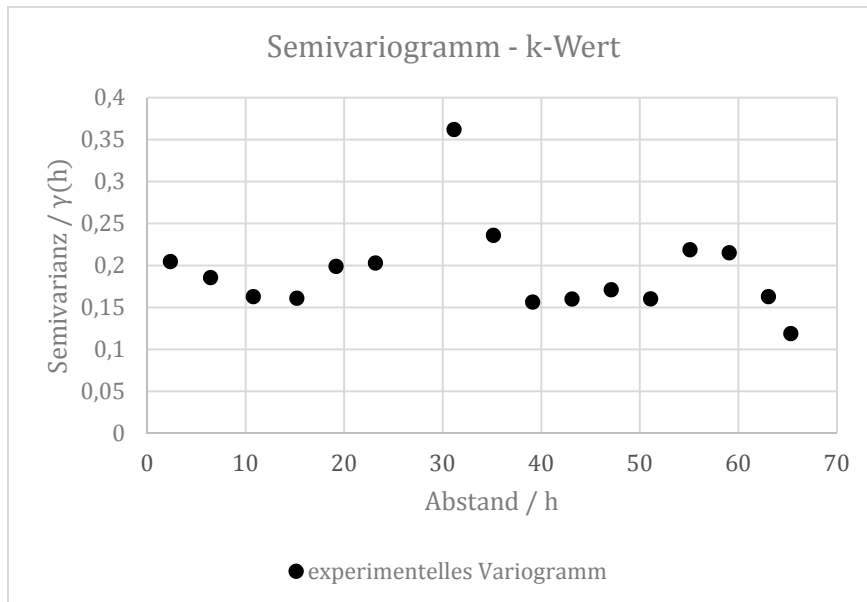


ABBILDUNG 32: SEMIVARIOGRAMM DES K-WERTES

3.4.1.7 Hierarchie der räumlichen Variabilitätsstruktur

Die untersuchten Bodenkennwerte zeigen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Autokorrelation und es kann daraus eine Hierarchie der räumlichen Variabilitätsstruktur nach Schafmeister (1999) abgeleitet werden (Tabelle 3). Schafmeister schlägt eine Reihung der Variablen nach der engräumigen Variabilität vor, welche den prozentuellen Anteil der Nuggetvarianz an der Semivarianz darstellt. In Anlehnung an Camberella (1994) können die Bodenkennwerte bezüglich ihrer engräumigen Variabilität noch folgend beschrieben werden: Liegt die engräumigen Variabilität zwischen 100 – 66 % spricht man von einer schwachen räumlichen Abhängigkeit, zwischen 66 – 34 % von einer mittleren räumlichen Abhängigkeit oder zwischen 33 – 0 % dann von einer starken räumlichen Abhängigkeit.

Danach müssen der k-Wert und die Aggregatstabilität aufgrund ihrer schwachen räumlichen Abhängigkeit als räumlich absolut zufällig eingestuft werden. Die Trockendichte weist mit ihrer mittelhohen engräumigen Variabilität eine wenig entwickelte räumliche Erhaltungsneigung (Aussageweite) auf. Besser ausgebildet erscheint die räumliche Erhaltungsneigung der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung, des organischen Kohlenstoffgehaltes und des Tongehaltes. Weiters fällt die sehr ausgeprägte räumliche Struktur der Variablen des Gesamtkohlenstoffgehaltes auf. Ähnliches gilt für den Schluff- und Sandgehalt.

TABELLE 3: HIERARCHIE DER RÄUMLICHEN VARIABILITÄTSSTRUKTUR

Variable	Erhaltungsneigung (Aussageweite)	Schwellenwert (Semivarianz)	Nuggetvarianz	engräumige Variabilität in %
Sandgehalt	55 m	6,75	0,27	4,0
Gesamtkohlenstoffgehalt	36 m	0,018	0,001	5,6
Schluffgehalt	50 m	6,74	0,48	7,1
Wasseranteil bei 150 hPa Matrixpotenzial	15 m	2,2	0,3	13,6
Wasseranteil bei 50 hPa Matrixpotenzial	15 m	2,1	0,3	14,3
Tongehalt	22 m	0,5	0,1	20,0
Wasseranteil bei 30 hPa Matrixpotenzial	15 m	2,0	0,5	25,0
org. Kohlenstoffgehalt	45 m	0,024	0,007	29,2
Trockendichte	12 m	0,0009	0,0005	55,6
Aggregatstabilität	25 m	9,81	6,80	69,3
k-Wert	0 m	-	-	100,0

3.4.2 Räumliche Korrelation (Kreuzvariogrammanalyse)

Die experimentellen Kreuz-Semivariogramme werden mittels des Statistikpakets „GSTAT“ aus dem Statistiksoftware „R“ berechnet. Im Gegensatz zur Semivariogrammanalyse ist eine Berechnung der Parameter (Aussageweite, Schwellenwert und Nuggetvarianz) nicht mittels der Programmfunktion „vario.fit“ durchgeführt worden, sondern diese sind aus dem (Kreuz)-Semivariogramplot (siehe Anhang, Abbildung 32 und 33) geschätzt worden. Da die eigenständige Schätzung des Schwellenwertes und Nuggetvarianz nur schwer möglich ist, wird aus diesem Grund nur die Aussageweite abgeschätzt und in der Ergebnistabelle (Tabelle 4) angeführt. (Auf die Werte des Schwellenwertes und der Nuggetvarianz wird weiter unten nur kurz eingegangen). Weiters beschreibt ein Plus oder Minus, ob eine positive oder negative räumliche Korrelation zwischen den Parametern vorherrscht. Eine „0“ sagt jedoch aus, dass keine beziehungsweise nur eine geringe räumliche Korrelation zwischen beiden Parametern besteht. Zuerst wird auf die räumliche Korrelation zwischen den Bodenkennwerte und der Bonität eingegangen, danach werden ausgewählte Werte hervorgehoben:

TABELLE 4: RÄUMLICHE KORRELATION

	SandG	SchluffG	TonG	GesK	OrgK	AS	TD	Bonität	Θ/30 hPa	Θ/50 hPa	Θ/150 hPa	k-Wert
SandG		-/40	-/10	+/40	-/30	0	0	+/30	-/50	-/50	-/50	0
SchluffG	-/40		-/10	-/30	+/20	0	0	+/30	+/40	+/40	+/40	0
TonG	-/10	-/10		0	0	0	+/10	0	+/10	+/10	+/10	0
GesK	+/40	-/30	0		-/30	0	+/10	-/30	-/20	-/20	-/20	0
OrgK	-/30	+/30	0	-/30		0	0	+/20	+/20	+/30	+/30	0
AS	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
TD	0	0	+/10	+/10	0	0		+10	+/10	+/10	+/10	0
Bonität	-/30	+/30	0	-/30	+/20	0	+10		+/20	+/20	+/20	0
Θ/30 hPa	-/50	+/40	+/10	-/20	+/20	0	+/10	+/20		+/20	+/20	0
Θ/50 hPa	-/50	+/40	+/10	-/20	+/30	0	+/10	+/20	+/20		+/20	0
Θ/150 hPa	-/50	+/40	+/10	-/20	+/30	0	+/10	+/20	+/20	+/20		0
k-Wert	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Es ist zu sehen, dass die Kennwerte des Sandgehaltes und des Gesamtkohlenstoffgehaltes negativ räumlich mit den Bonitätsklassen korrelieren. Der Schluffgehalt, der organischen Kohlenstoffgehalt und die Wasseranteil-Matrixpotenzial-

Beziehung weisen positive Beziehungen zu den Bonitätsklassen auf. Die Aussageweiten der vorher erwähnten Parameter liegen zwischen 20 und 30 m. Der Tongehalt, die Trockendichte, die Aggregatstabilität und der k-Wert zeigen jedoch schwache bis gar keine Zusammenhänge.

Weiters ist zu beobachten, dass der Sand- und Schluffgehalt eine hohe räumliche Korrelation (Aussageweiten zwischen 30 und 50 m) zu fast allen Parametern aufweisen. Während der Sandgehalt positive Beziehungen zu dem Gesamtkohlenstoffgehalt sowie negative zu dem organischen Kohlenstoffgehalt und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung zeigt, verhält sich der Schluffgehalt konträr dazu.

Der Gesamtkohlenstoffgehalt und der organische Kohlenstoffgehalt weisen räumliche Korrelationen von 20 bis 30 m zu der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung auf. Der organische Kohlenstoffgehalt hat eine positive Beziehung zu der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung, der Gesamtkohlenstoffgehalt eine negative.

Allen diesen vorher erwähnten Beziehungen ist gemein, dass ihre Nuggetvarianz auch gering ausgeprägt ist. Sie nimmt meist einen Wert unter 25 % an der gesamten Semivarianz ein, nur ein paar wenige Beziehungen zeigen eine höhere Nuggetvarianz.

Der Tongehalt, die Trockendichte, die Aggregatstabilität und der k-Wert zeigen jedoch schwache bis gar keine Zusammenhänge zu den anderen Parameter.

4 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit zeigen die zu untersuchenden Parameter unterschiedliches Verhalten in Bezug auf die Bonität. Signifikante Unterschiede der Mittelwerte sind zwischen den Bonitätsklassen bei folgenden Bodenkennwerten zu beobachten: Dem Sandgehalt und Tongehalt, dem organischen Kohlenstoffgehalt, der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung bei allen drei Druckstufen sowie der Trockendichte. Die Mittelwerte des Schluffgehaltes, des Gesamtkohlenstoffgehaltes, der Aggregatstabilität und des k -Wertes unterscheiden sich jedoch nicht signifikant untereinander. Erwähnenswert ist, dass der Mittelwert der Trockendichte der mittleren Bonität geringer ausfallen hätte können (ca. um die $1,46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Entlang des Transekts ist im Bereich der mittleren Bonität (vgl. Pkt. 4.1.4) eine Verdichtung des Bodens festgestellt worden. Laut Heinzinger (2013) ist dies auf die überdurchschnittliche hohe mechanische Beanspruchung des Bodens (mehrmalige Befahrung während der Ernten, Zugangsweg für andere Forscher und Mitarbeiter zum Versuch) um den Kleinparzellenversuch S1M zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit den seit dem Jahr 2003 durchgeführten Bodenuntersuchungen (Freyer 2010, Lunzer 2009, Briefer 2014).

Lunzer (2009) hat während seiner Arbeit ähnliche Werte bezüglich der KGV beobachtet. Die Mittelwerte des Sand- und Tongehaltes haben ebenfalls zwischen den Bodenbonitätsklassen große Unterschiede aufgewiesen, der Schluffgehalt war jedoch annähernd gleich.

Auch bezüglich der Kohlenstoffgehalte, Aggregatstabilität und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung können von dieser Arbeit Synergien zu vorangegangenen Arbeiten (Freyer 2013) gezogen werden: Höhere organische Kohlenstoffgehalte sind bei der mittleren Bodenbonität als bei der geringen Bodenbonität gemessen worden. Die Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung zeigt, dass in Nähe der Feldkapazität die Flächen mit mittlerer Bonität mehr Wasser speichern können als jene mit geringer Bonität. Und die Aggregatstabilität lässt keine unterschiedlichen Werte zwischen den Bodenbonitäten erkennen.

Die Werte der Trockendichte ähneln trotz der beobachteten Verdichtung entlang des Transekts den Ergebnissen von Briefer (2014). Briefer beobachtet ebenfalls, dass die Mittelwerte der Trockendichte der Parzellenversuche S1M und S1G (vgl. Kapitel 3.2) zwischen $1,44$ und $1,49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ liegen.

Einzig allein der in dieser Arbeit gemessene k-Wert ist geringer ausgefallen wie in Freyer (2010) berichtet. Aber mit Werten um ca. $4\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ist der k-Wert nach der AG Boden (2004) trotzdem als sehr hoch einzuschätzen.

Die Korrelationsrechnung zeigt unterschiedlich starke Beziehungen zwischen den Bodenkennwerten auf.

Die Bodenbonität korreliert mit den Parametern Sandgehalt, Tongehalt und organischer Kohlenstoffgehalt hoch, wobei der Sandgehalt negativ sowie der Tongehalt und der organischer Kohlenstoffgehalt positiv korreliert. Anders gesagt, im Bereich der hohen Bonitätsstufe sind ein niedriger Sandgehalt, eine höherer Tongehalt und höherer organische Kohlenstoffgehalt als im Bereich der niedrigen Bonitätsstufe gefunden worden.

Diese Ergebnisse lassen sich gut durch das der Finanzbodenschätzung zugrunde liegende Bewertungssystem erklären. Die zu untersuchenden Böden sind anhand drei Merkmalsgruppen - wie im Kapitel 2.3 erwähnt - zu bewerten, wovon ein Beurteilungsmerkmal die „mineralische Bodenart“ ist. Umso mehr der untersuchte Boden einem Lehm Boden entspricht, umso höher fällt die Ackerzahl (Bonität) aus (Pehamberger 2000):

In dieser Arbeit können die Böden, die im Bereich der mittleren Bonität liegen, als Lehm Böden bestimmt werden und erhalten so eine höhere Ackerzahl als die Böden, die im Bereich der geringen Bonität liegen und als sandige Lehm Böden ausgewiesen werden.

Und die höhere Bonität beziehungsweise Produktionskraft des Lehm Bodens führt zu einer höheren biologischen Aktivität und daraus resultierend zu einer Anreicherung an organischem Material im Boden, was den höheren Anteil an organischen Kohlenstoff in den Bodenproben der mittleren Bonität erklären kann.

Die Bonitätsklassen zeigen weiters eine starke, positive Korrelation zu der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung. Da die Bonitätsklassen - wie weiter oben beschrieben - negativ zum Sandgehalt beziehungsweise positiv zum Tongehalt und organischem Kohlenstoffgehalt korrelieren, erscheint dieses Ergebnis plausibel. Eine feinere Textur und ein höherer Anteil an organischem Material erhöhen die Bindungsstärke des Wassers an der Bodenmatrix (Scheffer und Schachtschabel 2009).

Die Aggregatstabilität korreliert sehr schwach mit der Bodenbonität sowie auch mit den anderen Parametern. Anscheinend sind die Unterschiede der Gehalte des Sandgehaltes, Tongehaltes und organischer Kohlenstoffgehaltes zu gering, um Auswirkungen auf die Aggregatstabilität zu haben. Kögler (1995) hat ebenfalls in seiner Arbeit beobachtet, dass Parameter wie die KGV, der organische Kohlenstoffgehalt keinen bis nur geringen Einfluss auf die Aggregatstabilität gezeigt haben.

Der k-Wert korreliert ebenfalls schwach mit der Bodenbonität sowie mit den anderen Parametern. Hier gilt wohl ähnliches, wie schon weiter oben bei der Aggregatstabilität beschrieben ist. Die Unterschiede der Gehalte der Bodenkennwerte sind zu gering, um Auswirkungen auf den k-Wert zu haben.

Die Trockendichte korreliert (mittel-)hoch mit der Bodenbonität sowie mit den anderen Parametern. Es sei aber angemerkt, dass die Korrelationskoeffizienten aber geringer ausfallen hätten können, wenn es zu keiner Verdichtung des Bodens entlang des Transekts im Bereich der mittleren Bonität gekommen wäre.

In Bezug auf die Untersuchung der räumlichen Variabilität zeigen die Bodenkennwerte unterschiedliches räumliches Verhalten. Während der Gesamtkohlenstoffgehalt sowie der Schluff- und Sandgehalt eine ausgeprägte räumliche Struktur aufweisen, fallen die Trockendichte, die Aggregatstabilität und der k-Wert durch ihre (mittel-)hohe engräumige Variabilität auf. Die räumliche Erhaltungsneigung der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung, des Tongehaltes und der organischen Kohlenstoffgehaltes fällt leicht geringer als die des Gesamtkohlenstoffgehaltes sowie des Schluff- und Sandgehaltes aus.

Die Ergebnisse der Semivariogrammanalyse zeigen gute Übereinstimmungen mit den in der Fachliteratur beschriebenen Resultaten. Schafmeister (1999), Iqbal et al. (2004), Mzuku et al. (2005) und Brinkmann (2002) haben bei ihren Untersuchungen beobachtet, dass die räumliche Autokorrelation bei Bodenkennwerten wie der KGV, der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung und die Kohlenstoffgehalte meist hoch ausgeprägt ist. Schafmeister (1999) und Brinkmann (2002) erklären dieses räumliche Verhalten damit, dass Bodenkennwerte wie die KGV oder der Kohlenstoffgehalt eng an das geologische Ausgangssubstrat gekoppelt sind, welches zu mindestens über kürzere Distanzen homogen vorliegt, deshalb auch die Werte der davon abhängigen

Bodenparameter weniger variieren und das zu ihrer hohen räumlichen Autokorrelation führt.

Der Gesamtkohlenstoff- und der organischen Kohlenstoffgehalt zeigen in Bezug auf die räumliche Variabilität unterschiedliches Verhalten. Der organische Kohlenstoffgehalt ist höher variabel, da die organische Substanz im Boden nicht homogen verteilt ist und einen stetigen Auf- und Abbau durchläuft (Scheffer und Schachtschabel 2010, Schafmeister 1999).

Und der Anteil an stabilen anorganischen Kohlenstoffverbindungen (CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3) am Gesamtkohlenstoffgehalt puffert wiederum die durch den organische Kohlenstoffgehalt verursachte Schwankungen und lässt den Gesamtkohlenstoffgehalt weniger streuen.

Die Trockendichte weist hingegen zu den bereits oben erwähnten Bodenkennwerten mit ihrer hohen engräumigen Variabilität eine wenig entwickelte räumliche Erhaltungsneigung auf. Dieses räumliche Verhalten kann bei der Trockendichte wohl auf die ackerbauliche Bearbeitung des Bodens, das heißt auch auf das regelmäßige Pflügen und Grubbern zurückgeführt werden (Mzuku et al. 2005).

Außerdem schätzt Iqbal et al. (2004) den k-Wert in seiner Arbeit als äußerst räumlich variabel ein. Der k-Wert, besonders der gesättigte k-Wert, ist häufig als die räumlich höchst veränderliche Variable aller Bodenparameter zitiert (Warrick und Nielson 1980 und Wilding und Dres 1983 zitiert nach McKenzie et al., 2002). Weiters wird im Handbuch Eurocode 7 (2010) darauf hingewiesen, dass auch in relativ homogenen Bodenschichten eine starke Variation im Durchlässigkeitsbeiwert aufgrund von kleinen Unterschieden des Gefüges, der Korngröße, der Feinschichtung oder der biologischen Aktivität (Wurzelwachstum, Wurmlöcher) möglich ist.

Die Aggregatstabilität ist ebenfalls als räumlich sehr variabel einzustufen, was auch Kögler (1995) in seiner Arbeit festgestellt hat. Die unterschiedlich starke mechanische Beanspruchung des Bodens während der ackerbaulichen Bearbeitung könnte wohl zu der starken Streuung der Werte beitragen: Die Eindringungstiefe des Grubbers schwankt während der Bearbeitung zwischen 10 und 20 cm und die Hackstriegele belasten den Oberboden ungleichförmig.

Zusammenfassend kann die hohe räumliche Variabilität der Parameter k-Wert, Aggregatstabilität und Trockendichte wohl damit erklärt werden, dass diese

Bodenkennwerte stärker als die anderen untersuchten von äußeren Einwirkungen (Bodenbearbeitung, biologische Aktivität) beeinflusst werden.

Die Kreuzvariogrammanalyse deutet auf unterschiedlich starke räumliche Beziehungen zwischen den Bodenkennwerten hin.

Da sich die Suche nach geeigneter Literatur im Bereich „Kreuzvariogrammanalyse von Bodenkennwerten“ als nicht sehr ergiebig erwiesen hat, kann leider nur auf die unten erwähnten Beziehungen eingegangen werden. In der vorgefundenen Fachliteratur können Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen dieser Arbeit beobachtet werden.

Nielsen (2003) erwähnt, dass die Bodenbonität räumlich mit dem Parameter KGV und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung stark korreliert. Weiters weist Vaucelin (zitiert nach Iqbal (2005)) auf eine starke räumliche Beziehung zwischen der KGV und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung hin. Und Boruvka (2002) hat räumliche Beziehungen - wenn auch nur schwache - zwischen der KGV, dem organischen Kohlenstoffgehalt und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung beobachtet.

Abschließend sei erwähnt, dass Parameter, die eine hohe räumliche Korrelation zueinander haben, ebenfalls meist hohe Korrelationskoeffizienten aufgewiesen haben. Boruvka (2002) hat in seiner Arbeit ähnliche Ergebnisse nachgewiesen. Er weist aber darauf hin, dass, hervorgerufen durch externe Faktoren, die klassische Korrelation von der räumliche Korrelation auch stark abweichen kann.

5 Schlussfolgerung

Die Stichprobenvergleiche und Korrelationsrechnungen zeigen, dass die Bonitätsklassen nicht durch alle untersuchten Bodenkennwerte gleich gut charakterisiert werden können. Die KGV, der organische Kohlenstoffgehalt und die Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung eignen sich dazu besser als die weiteren Kennwerte.

Weiters sind unterschiedlich starke Beziehungen zwischen den Kennwerten beobachtet worden, als Beispiel seien hier noch einmal die starke Beziehung zwischen der KGV und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung beziehungsweise die schwache Beziehung der Aggregatstabilität zu allen anderen Kennwerten angeführt.

Mit Hilfe der Variographie lassen sich räumliche Strukturen von Bodenkennwerten erkennen und mit Hilfe eines Modells beschreiben. Das unterschiedliche räumliche Verhalten hat einen Einfluss auf die optimale Planung der Probennahme. Grundsätzlich gilt, je zufälliger die räumliche Variabilität ist, das heißt eine kleine Reichweite und ein hoher Nuggeteffekt, desto dichter sollen die Proben genommen werden (Schafmeister 1999).

Die Parameter Sandgehalt, Schluffgehalt, Tongehalt, Gesamtkohlenstoffgehalt, organischer Kohlenstoffgehalt, die Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung bei allen drei Druckstufen und die Trockendichte zeigen eine mittlere bis starke Autokorrelation und deswegen können für deren (geo-)statistische Analyse größerer Abstände bei der Probennahme gewählt beziehungsweise eine geringere Probenanzahl genommen werden als gegenüber der Aggregatstabilität und dem k-Wert, die nur eine schwache Autokorrelation aufweisen.

Die Jahresmittel der räumliche hoch variablen Parameter Aggregatstabilität und k-Wert können aufgrund der hohen Probenzahl ($n = 30$) gut interpretiert und verglichen werden. Aber ob deren Schwankungen der Monatsmittel durch Einwirkungen am Feld (biologische Aktivität, Wetter, Bodenbearbeitung, ...) oder doch durch die hohe räumliche Variabilität des k-Wertes und der Aggregatstabilität hervorgerufen werden, kann aufgrund der niedrigen Probenzahl ($n = 6$) nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Hierbei sollte Vorsicht in der Interpretation geboten sein!

Die Kreuz-Variogrammanalyse zeigt, dass die Bonitätsklassen nicht durch alle untersuchten Bodenkennwerte gleich gut geschätzt werden können. Die KGV, der organische Kohlenstoffgehalt und die Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung eignen sich dazu besser als die weiteren Kennwerte.

Weiters sind unterschiedlich starke, räumliche Beziehungen zwischen den Kennwerten beobachtet worden, als Beispiel seien hier noch einmal die starke Beziehung zwischen der KGV und der Wasseranteil-Matrixpotenzial-Beziehung beziehungsweise die schwache Beziehung der Aggregatstabilität zu allen anderen Kennwerten angeführt.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts MUBIL wurden seit dem Jahr 2003 die Wirkungen der Umstellung und langfristigen biologischen Bewirtschaftung auf Bodenkennwerte anhand ausgewählter Eigenschaften erfasst. Da Schwankungen der gemessenen Bodenkennwerte deren Interpretation erschwerten, sollte im Rahmen dieser Masterarbeit eine geostatistische Untersuchung der räumlichen Variabilität dazu dienen, die Streubreite der Messwerte zu reduzieren und die Mittelwerte besser interpretieren zu können. Darüber hinaus wurde die räumliche Korrelation zwischen den Bodenkennwerten erfasst sowie Bodenbonitätsklassen auf ihre Korrelation (nach Spearman) zu den Bodenkennwerten untersucht.

Gestörten und ungestörten Bodenproben ($n = 131$) wurden entlang eines 200 m-Transsekt im Abstand von 2 m genommen, wobei am Anfang und am Ende des Transekts über eine Länge von 10 m die Probennahmedichte auf 0,5 m verkürzt wurde. Die Proben wurden für die Bestimmung der Korngrößenverteilung (bestimmt mittels Sand, Schluff, Tongehalt), des Gesamt- und des organischen Kohlenstoffgehaltes, der Aggregatstabilität, der Trockendichte, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung bei 3 Druckstufen (30, 50, 150 hPa) herangezogen. (Geo-) statistische Analysen wurden durchgeführt, um die räumliche Variabilität der Kennwerte und deren Beziehungen zueinander aufzuzeigen.

Die Ergebnisse zeigten ein unterschiedliches räumliche Verhalten der betrachteten Eigenschaften entlang des Transekts auf: Die Korngrößenverteilung, der Gesamt- und organischen Kohlenstoffgehalt, Trockendichte und die Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung bei 3 Druckstufen wiesen eine mittlere oder starke räumliche Autokorrelation auf, während die Aggregatstabilität und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit eine schwache räumliche Autokorrelation zeigten. In Bezug auf die Korrelationsanalyse, ließen die Bodenbonitätsklassen eine starke klassische und räumliche Korrelation zu der Korngrößenverteilung, dem organische Kohlenstoffgehalt und der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung erkennen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die hohe räumliche Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit und der Aggregatstabilität - im Gegensatz zu den anderen gemessenen Parametern - nur eine eingeschränkte statistische Analyse derer zuließ. Weiters ließen sich die Bodenbonitätsklassen besser durch die Korngrößenverteilung,

den organische Kohlenstoffgehalt und die Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung als durch die weiteren Bodenkennwerten charakterisieren.

7 Literaturverzeichnis

AG BODEN, (1994): „Bodenkundliche Kartier Anleitung“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter. Hannover

AKIN H., SIEMENS H. (1998): „Praktische Geostatistik“. Springer Verlag. Berlin

BRIEFER, A. (2014): „Untersuchung von bodenphysikalischen Kennwerten biologisch bewirtschafteter Flächen in Ritzender, NÖ“. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur. Wien

BRINKMANN (2002): „Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften auf dem Landwirtschaftlichen Versuchsgut Frankenforst im Leiser Hügelland“. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. Bonn

BORUVKA, L. (2002): „Spital Distribution an Korrelation oft Soli properstes in a fiel: a Case stud.“. Rötling Verona 48. 425-432

CAMBARDELLA, C. A (1994): „Field-Scala variability of soil properties in Central Iowa2. Soil Science Society American Journal 58. 1501-1511

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

HANDBUCH EUROCODE 7 (2010): „Geotechnische Bemessung“. Beuth Verlag. Berlin

FREYER, B.(2010). „Bewertung des viehlosen biologischen Ackerbaus und seiner agrarökologischen Leistungen im österreichischen Trockengebiet.“ Institut für Ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur. Wien

HEINZINGER, M. (2013): Mündliche Quelle, Mitarbeiter am Institut für Ökologischen Landbau

IFÖL, (2014): „Informationen zum Standort Groß Enzersdorf“

http://www.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H933/Sonstiges/Informationen_Versuchswirtschaft_Grossenzersdorf.pdf (abgerufen am 2.4.2014)

IQBAL, J. et al. (2005): „Spatial Variability Analysis of Soil Physical Properties of Alluvial Soils“, Soil Science Society Of America Journal 69, p. 1-14

KEMPER, W., KOCH, J. (1966): „Technical Bulletin No 1355“. United States: Department of Agriculture: Agricultural Research Service.

KÖGLER, P. F., (1995): „Räumliche Variabilität der Aggregatstabilität im Boden und deren Korrelation zu weiteren bodenphysikalischen Parametern an einem ausgewählten Standort des Marchfeldes“. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur. Wien

LUNZER (2009): „Untersuchung des Durchlässigkeitsbeiwertes in biologisch bewirtschafteten Böden“. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur. Wien

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

MATHERON, G. (1965): „Les variables regionalisées et leur estimation“. Editions Massons et Cie. Paris

MZUKU, M., et al. (2005) „Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones“. Soil Science Society Of America Journal 69. 1572-1579

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

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

ÖNORM L 1063 (1988): „Physikalische Bodenuntersuchungen; Bestimmung der Druckpotenzial-Wasseranteilsbeziehung von ungestörten Bodenproben“. 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

ÖNORM L1080 (2002): „Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung“. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM L1084 (2002): „Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von Carbonat“, Österreichisches Normungsinstitut. Wien

PEHAMBERGER, A. (2013): „Bodenschätzung und Bodenkartierung“, Studienblätter, Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur. Wien

PENNE, C. (2009): „Räumliche Variabilität der Humusspeicherung in Abhängigkeit von der Kronendachstruktur eines Kieferbestandes“. Dissertation, Leibniz Universität, Hannover

SACHS, L. (1974): „Angewandte Statistik“. Springer Verlag. Berlin

Schaupenlehner, T. (2005): „Geostatistische Analysen zur Integration von Geländemodellen und Bodenschätzungsdaten für verbesserte digitale Bodenkarten am Beispiel einer alluvialen Landschaft“. Dissertation, Universität für Bodenkultur. Wien

SCHAFMEISTER, M.-T.(1999): „Geostatistik für die hydrologische Praxis“. Springer Verlag. Berlin

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2010): „Lehrbuch der Bodenkunde“. 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart

NIELSEN, R. (2003): „Spatial and temporal Statistics“. Catena Verlag. Reiskirchen

WOHLMUTH, M.-L. (2012): „Untersuchung des Zwischenfruchteinflusses auf Wasserhaushalt und Nachfruchtertrag“, Masterarbeit. Universität für Bodenkultur. Wien

8 Anhang

Messwerte

Standort in m	Bonität	Sandgehalt in %	Schluffgehalt in %	Tongehalt in %	GesK in %	OrgK in %	AS in %	TD in g·cm ⁻³
0	1	22,0	54,1	23,8	4,4	1,2	28,1	1,40
0,5	1						31,3	1,46
1	1						28,9	1,46
1,5	1						30,7	1,44
2	1						28,6	1,42
2,5	1						31,2	1,41
3	1						31,4	1,43
3,5	1						28,9	1,45
4	1	21,0	54,7	24,3	4,4	1,1	28,8	1,41
4,5	1						34,0	1,44
5	1						32,3	1,45
5,5	2						28,0	1,39
6	2						32,1	1,41
6,5	2						29,1	1,41
7	2						31,0	1,43
7,5	2						26,5	1,45
8	2	20,5	54,9	24,6	4,4	1,3	28,2	1,42
8,5	2						34,1	1,40
9	2						24,8	1,44
9,5	2						27,8	1,44
10	2						30,5	1,42
12	2	20,6	54,4	25,0	4,3	1,3	26,6	1,51
14	2						27,2	
16	2	20,7	54,1	25,2	4,2	1,2	28,8	1,48
18	2						28,3	
20	2	21,2	53,1	25,7	4,3	1,4	29,4	1,44
22	2						28,5	
24	2	20,2	54,7	25,1	4,4	1,4	35,8	1,41
28	2						27,9	
28	2	20,4	54,0	25,6	4,4	1,3	29,0	1,48
30	2						30,8	
32	2	21,2	53,9	24,9	4,6	1,2	29,2	1,46
34	2						23,9	
36	1	22,1	52,9	25,0	4,6	1,2	32,9	1,43
38	1						27,5	
40	1	23,1	52,3	24,6	4,6	1,0	34,8	1,46
42	1						24,8	
44	1	23,5	51,2	25,3	4,6	1,0	28,9	1,44
46	1						32,6	
48	1	24,3	49,4	26,3	4,5	0,9	26,5	1,46
50	1						30,1	

Standort in m	Bonität	Sandgehalt in %	Schluffgehalt in %	Tongehalt in %	GesK in %	OrgK in %	AS in %	TD in g·cm ⁻³
52	1	24,3	49,8	25,9	4,5	1,1	35,1	1,48
54	1						30,0	
56	1	24,5	48,8	26,7	4,5	0,9	34,2	1,47
58	1						30,8	
60	1	25,1	48,4	26,5	4,5	1,0	32,3	1,41
62	1						28,0	
64	1	24,7	48,2	27,0	4,5	1,1	33,3	1,43
66	1						27,6	
68	1	26,0	48,7	25,3	4,4	1,0	27,1	1,43
70	1						33,3	
72	2	26,0	48,9	25,1	4,4	1,1	31,8	1,43
74	2						28,4	
76	2	25,4	48,5	26,1	4,6	1,1	34,7	1,47
78	2						30,2	
80	2	25,9	47,9	26,1	4,6	1,2	26,7	1,47
82	2						23,8	
84	2	24,8	48,8	26,4	4,5	1,3	32,6	1,49
86	2						30,2	
88	2	23,2	51,0	25,8	4,5	1,1	28,8	1,47
90	2						25,4	
92	2	23,0	50,0	27,0	4,5	1,2	32,5	1,43
94	2						23,9	
96	2	20,3	52,7	27,0	4,3	1,0	29,5	1,48
98	2						27,5	
100	2	20,8	52,2	27,0	4,5	1,3	32,1	1,43
102	2						26,2	
104	2	21,2	51,4	27,4	4,4	1,3	29,6	1,47
106	2						27,3	
108	2	20,1	52,6	27,3	4,3	1,2	30,9	1,44
110	2						33,1	
112	2	19,1	53,8	27,1	4,3	1,4	27,6	1,52
114	2						22,2	
116	2	19,4	53,7	27,0	4,4	1,3	31,8	1,51
118	2						24,4	
120	2	20,6	52,9	26,5	4,4	1,3	30,8	1,53
122	2						28,5	
124	2	19,8	52,6	27,7	4,4	1,3	21,8	1,50
126	2						31,9	
128	2	21,0	50,5	28,5	4,3	1,2	30,1	1,55
130	2						31,5	
132	2	19,5	52,4	28,1	4,4	1,4	27,4	1,52
134	2						28,2	
136	2	19,8	51,8	28,5	4,4	1,3	36,1	1,52
138	2						30,5	
140	2	20,7	51,2	28,1	4,4	1,3	29,7	1,56
142	2						29,1	

Standort in m	Bonität	Sandgehalt in %	Schluffgehalt in %	Tongehalt in %	GesK in %	OrgK in %	AS in %	TD in g·cm ⁻³
146	2						30,3	
148	2	21,5	50,3	28,2	4,6	1,1	30,1	1,54
150	2						25,5	
152	2	20,7	51,6	27,8	4,6	1,2	33,3	1,54
154	2						28,0	
156	2	21,0	51,0	28,0	4,6	1,1	28,9	1,52
158	2						25,1	
160	2	20,3	51,7	28,0	4,7	1,5	30,3	1,56
162	2						25,0	
164	2	20,1	51,3	28,6	4,7	1,3	26,8	1,57
166	2						30,1	
168	2	20,0	51,6	28,4	4,7	1,3	31,6	1,57
170	2						28,7	
172	2	19,8	51,5	28,7	4,6	1,3	33,3	1,53
174	2						23,9	
176	2	19,7	52,8	27,6	4,6	1,4	32,5	1,52
178	2						32,3	
180	2	20,1	51,4	28,5	4,5	1,6	29,3	1,58
182	2						33,8	
184	2	18,3	53,9	27,8	4,5	1,5	31,3	1,55
186	2						30,0	
188	2	18,9	53,5	27,5	4,4	1,5	31,9	1,55
190	2						34,4	1,51
190,5	2						28,8	1,49
191	2						31,2	1,50
191,5	2						28,0	1,52
192	2	19,4	53,2	27,4	4,5	1,4	30,4	1,56
192,5	2						32,3	1,53
193	2						28,7	1,52
193,5	2						28,1	1,50
194	2						25,9	1,50
194,5	2						32,4	1,51
195	2						31,6	1,55
195,5	2						33,7	1,50
196	2	19,2	52,1	28,7	4,4	1,4	28,0	1,53
196,5	2						30,2	1,57
197	2						27,1	1,51
197,5	2						29,1	1,52
198	2						28,2	1,50
198,5	2						31,1	1,49
199	2						28,7	1,55
199,5	2						30,4	1,55
200	2	20,1	51,6	28,4	4,4	1,3	27,1	1,51

Standort in m	Bonität	Θ/30 hPa in %	Θ/50 hPa in %	Θ/150 hPa in %	k-Wert in m·d ⁻¹
0	1	35,7	32,7	30,8	7,0
0,5	1	35,7	33,6	31,0	4,2
1	1	34,7	33,2	30,9	2,4
1,5	1	35,8	32,9	30,3	3,4
2	1	33,7	31,9	29,5	6,1
2,5	1	34,1	32,3	30,2	1,6
3	1	34,5	32,1	30,0	3,9
3,5	1	34,6	33,1	31,0	6,5
4	1	34,1	32,5	30,7	1,0
4,5	1	34,5	32,6	30,3	2,0
5	1	34,5	33,0	31,1	2,5
5,5	2	34,5	32,6	30,2	1,2
6	2	34,9	32,9	30,8	2,1
6,5	2	34,8	32,8	30,5	4,8
7	2	35,1	32,9	30,5	4,7
7,5	2	37,3	34,2	32,1	0,5
8	2	36,1	33,9	31,6	3,2
8,5	2	35,5	33,5	31,0	3,4
9	2	35,8	34,2	32,1	6,0
9,5	2	37,5	36,5	33,7	0,7
10	2	35,8	34,4	32,3	5,4
12	2	36,0	34,9	32,5	1,1
14	2				
16	2	37,0	35,9	33,9	2,7
18	2				
20	2	37,7	36,4	33,9	0,4
22	2				
24	2	37,1	35,3	33,2	1,9
28	2				
28	2	35,4	34,4	32,0	0,9
30	2				
32	2	35,2	33,7	31,5	0,2
34	2				
36	1	33,3	31,6	29,5	2,5
38	1				
40	1	35,4	33,8	30,9	1,6
42	1				
44	1	34,4	31,8	28,8	1,8
46	1				
48	1	35,0	32,9	30,2	1,9

Standort in m	Bonität	Θ/30 hPa in %	Θ/50 hPa in %	Θ/150 hPa in %	k-Wert in m·d ⁻¹
52	1	35,3	33,2	30,2	6,3
54	1				
56	1	36,2	33,8	30,9	2,5
58	1				
60	1	34,4	32,2	29,4	8,2
62	1				
64	1	34,2	32,4	30,2	17,2
66	1				
68	1	33,7	31,5	29,1	6,5
70	1				
72	2	34,2	32,6	30,1	4,2
74	2				
76	2	33,1	31,7	29,7	16,1
78	2				
80	2	35,1	33,4	31,1	2,6
82	2				
84	2	35,6	34,8	32,0	1,7
86	2				
88	2	35,4	33,5	30,6	2,3
90	2				
92	2	36,8	34,4	31,5	3,7
94	2				
96	2	35,6	34,8	31,9	1,5
98	2				
100	2	37,1	35,2	32,3	0,8
102	2				
104	2	36,1	35,0	32,3	1,4
106	2				
108	2	34,8	33,6	31,8	11,6
110	2				
112	2	34,9	34,4	32,7	1,6
114	2				
116	2	37,1	36,1	34,4	5,2
118	2				
120	2	36,7	35,7	32,4	2,7
122	2				
124	2	36,4	35,5	32,9	1,5
126	2				
128	2	37,1	36,0	32,3	5,8
130	2				
132	2	35,9	34,9	32,3	3,4
134	2				
136	2	35,2	33,9	32,5	3,1
138	2				
140	2	36,9	36,1	34,2	0,5
142	2				

Standort in m	Bonität	Θ/30 hPa in %	Θ/50 hPa in %	Θ/150 hPa in %	k-Wert in m·d ⁻¹
146	2				
148	2	36,2	35,1	33,2	1,8
150	2				
152	2	36,0	35,1	33,4	1,6
154	2				
156	2	37,9	36,1	34,6	3,6
158	2				
160	2	35,5	34,7	33,1	6,0
162	2				
164	2	37,1	36,0	33,1	0,1
166	2				
168	2	37,1	36,3	33,5	0,9
170	2				
172	2	35,8	34,9	33,2	1,8
174	2				
176	2	34,4	33,4	31,5	3,0
178	2				
180	2	36,7	35,4	33,8	1,6
182	2				
184	2	34,9	34,3	32,6	0,9
186	2				
188	2	35,1	34,2	32,5	1,1
190	2	36,1	34,8	32,6	5,4
190,5	2	36,0	34,8	33,3	2,9
191	2	37,1	36,3	36,0	0,5
191,5	2	35,9	35,4	34,8	1,0
192	2	36,4	35,9	34,4	48,8
192,5	2	35,8	35,3	33,6	0,5
193	2	36,8	35,9	34,4	4,3
193,5	2	37,1	35,4	33,7	1,6
194	2	35,5	34,0	32,1	25,4
194,5	2	36,3	35,1	33,5	3,0
195	2	36,9	36,3	34,5	10,6
195,5	2	36,9	35,8	33,5	5,5
196	2	37,4	36,6	35,0	2,8
196,5	2	35,9	35,1	33,7	0,7
197	2	36,3	35,0	33,7	2,0
197,5	2	35,4	34,8	33,4	2,2
198	2	35,9	34,8	32,7	3,1
198,5	2	36,1	34,8	33,0	6,7
199	2	37,0	36,2	34,7	1,3
199,5	2	35,7	35,0	33,5	1,5
200	2	35,7	35,2	33,7	3,1

Abbildung 32: (Kreuz)-Semivariogrammplot 1

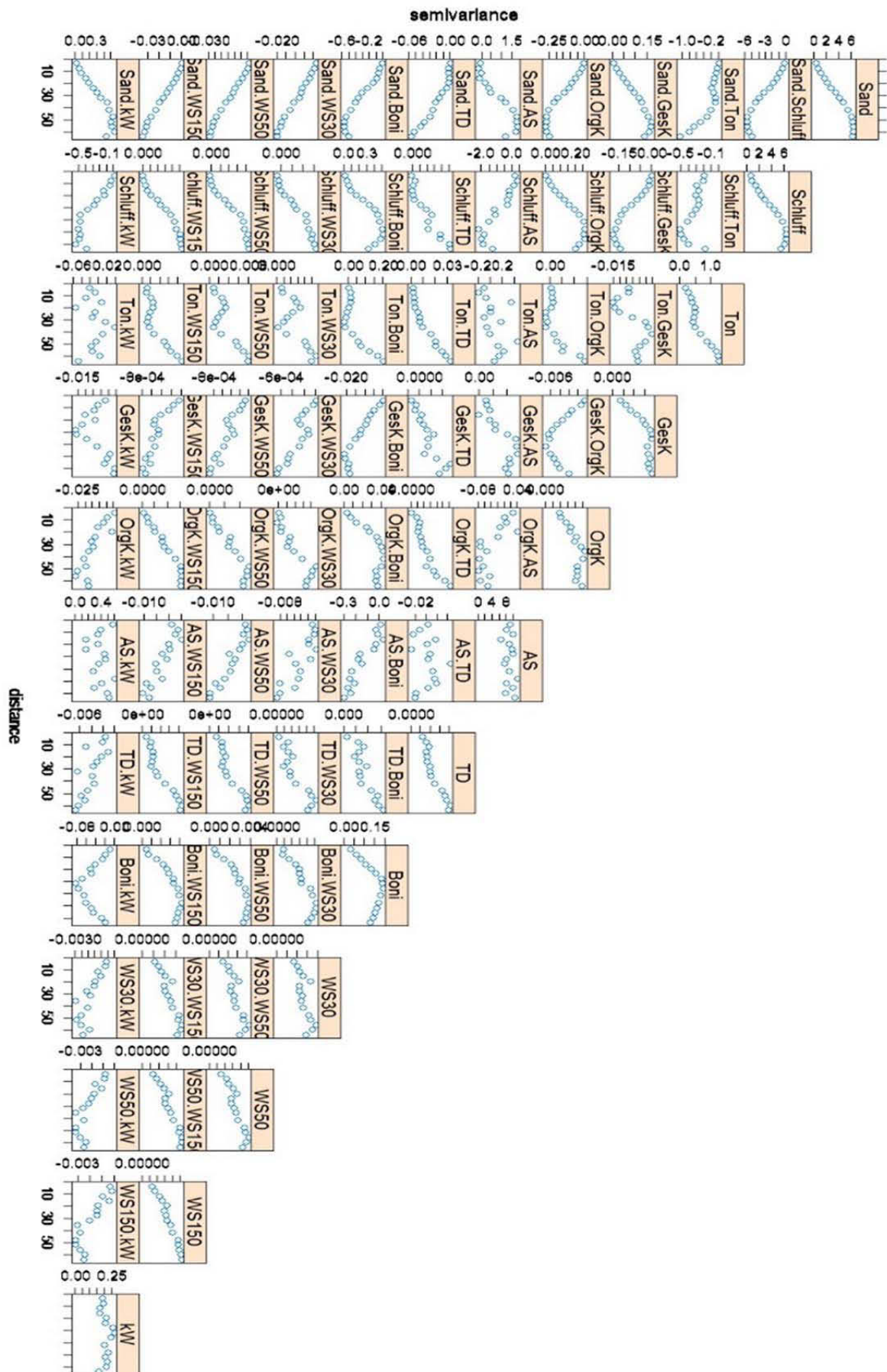


Abbildung 33: (Kreuz)-Semivariogrammplot 2

