

# MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Bestimmung von Horizonten und Horizontgrenzen einer  
Kreisgrabenverfüllung mittels Digitalfotografie“

Verfasser

Daniel Schweighoffer BA

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Geographie

Betreuerin / Betreuer:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	3
Abstract .....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis .....	7
Abkürzungsverzeichnis .....	7
1. Einleitung und Problem.....	8
1.1. Problemstellung .....	8
1.2. Gang und Ziel der Arbeit .....	9
1.3. Ziel der Arbeit.....	10
2. Study Area .....	10
2.1. Lage und Maße der Kreisgrabenanlage Hornsburg.....	10
2.2. Hornsburg und seine Einordnung in der Archäologischen Forschung.....	13
2.2.1. Kreisgrabenanlagen.....	13
2.2.2. Zeitliche Einordnung der Kreisgrabenanlagen .....	14
2.3. Naturräumliche Gliederung.....	16
2.3.1. Geologie.....	16
2.3.2. Böden .....	19
2.3.3. Klima .....	21
2.3.4. Vegetation und Fauna .....	22
3. Die Fundstelle Hornsburg: Landschafts- und Geoarchäologie.....	22
3.1. Die Verfüllungsmechanismen der Kreisgrabenanlage .....	22
3.2. Sedimentologische Untersuchungen von Hornsburg 1 Graben II.....	26
4. Grundlagen der Bodenfarbe.....	27
4.1. Physikalische Grundlagen zu Farbe und Licht .....	27
4.1.1. Licht .....	27
4.1.2. Farbe.....	29
4.1.3. Farbmeterik .....	31
4.1.4. Das Munsellfarbsystem .....	33
4.2. Bodenfarbe .....	35
4.2.1. Farbansprache .....	35
4.2.2. Bedeutung der Bodenfarbe .....	35
4.2.3. Bodenfarbe als Indikator für Bodeneigenschaften und Prozesse .....	36
4.2.4. Digitale Boden „Morphometrie“ .....	37
4.2.5. Bodenfarbe in der Digitalen Boden Morphometrie .....	37

5. Methoden.....	39
5.1. Probenahme .....	39
5.2. Laboranalytik .....	42
5.3. Bildbearbeitung .....	43
5.3.1. Georeferenzierung mit Arc Gis 10.2 .....	43
5.3.2. Bildbearbeitung mit Arc Gis 10.2 und GIMP 2.8.....	44
5.4. Statistische Auswertung .....	44
5.4.1. Hauptkomponentenanalyse .....	45
5.4.2. Faktoranalyse .....	46
5.4.3. Die Clusteranalyse .....	47
6. Resultate und Diskussion.....	51
6.1. Hierarchische Clusteranalyse mit drei Raumgruppen .....	51
6.2. Hierarchische Clusteranalyse mit fünf Raumgruppen.....	54
6.3. Schichtgrenzenbestimmung mittels „K-Means“ Clusteranalyse .....	57
6.4. Zusammenfassung der Horizontgrenzenbestimmung nach „K-Means“ .....	60
6.5. Anwendung der K-Means und Hierarchischen Clusteranalyseergebnisse auf alle Profile in höherer Auflösung.....	61
6.6. Abschließende Einschätzung .....	62
7. Schlussfolgerungen.....	66
8. Quellen .....	68
8.1. Literatur .....	68
8.2. Internetquellen.....	72

## Kurzfassung

Sediment- und Paläobodensequenzen werden in den Geowissenschaften und der Archäologie als Archive für die Paläoumweltanalysen herangezogen. In den terrestrischen und auch marinen Sequenzen werden Informationen über die Umwelt gespeichert und können von Experten analysiert und gedeutet werden. Einer dieser untersuchbaren Proxies ist die Bodenfarbe. Sie gibt Aufschluss über bodenphysikalische und bodenchemische Attribute, die wiederum Aufschluss über die zugrunde liegenden Bildungsbedingungen geben. Da sich die Beprobung, Klassifizierung und Untergliederung des Profils meist an der im Feld visuell ermittelbaren Bodenfarbe orientiert, ist sie von entscheidender Bedeutung für die Forschung.

Die Bodenfarbe wird normalerweise mit den Munsell Farbtafeln direkt im Feld oder anhand der Proben im Labor bestimmt. Es gab jedoch von geowissenschaftlicher Seite in der letzten Dekade zahlreiche Versuche, diese auch über Spektrometrie, Farbmessgeräten und Digitalfotografie zu ermitteln. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, über die RGB Werte einer Digitalfotografie im UV, IR und im VIS Bereich die Horizonte und Horizontgrenzen einer Kreisgrabenverfüllung herauszuarbeiten. Als Referenzwerte, mit welchen die Werte aus der Fotografie verglichen werden sollen, dienen RGB Werte, die aus den Bodenproben desselben Profils mit einem Spektralphotometer ermittelt wurden. Zu diesem Zweck wurde das Profil einer verfüllten Kreisgrabenanlage in Hornsburg in Niederösterreich fotografiert und beprobt. Für die Bodenproben wurde eine equidistante Beprobungsauflösung von 10 cm gewählt. Die Bodenproben wurden anschließend mit einem Farbmessgerät gemessen und die RGB Werte extrahiert.

Die folgende Bildbearbeitung geschah mittels ArcMap 10.2. und Gimp 2.8., um aus den hochaufgelösten Photographien jeweils 1 RGB Wert pro 10 cm extrahieren zu können. Diese wurden dann den RGB Werten des Farbmessgerätes gegenübergestellt. Die folgende Clusteranalyse dieser Werte hatte dann zum Ziel, die gemeinsamen Horizonte und Horizontgrenzen herauszuarbeiten.

Die resultierenden Übereinstimmungen zwischen den Laborwerten und den Fotos lagen bei bis zu 62%. Diese Ergebnisse könnten bei weiterer Verfeinerung der Methodik durchaus dafür sprechen, Digitalfotographie zum Zweck der Horizontbestimmung bei Bodenprofilen einzusetzen.

## Abstract

In geosciences and archaeology sediment- and paleosol- sequences are often used as natural archives for paleoenvironmental analysis. In terrestrial and marine sequences information about the environment is stored and can be analysed and interpreted by experts. One of these proxies soil color. It can shed light on some soil physical and soil chemical attributes which can give information about underlying forming-processes. Moreover it is a major factor for the classification of the different horizons of a soil profile in the field. Since the sampling, the classification and the segmentation of the profile in the field is often based on visual inspection of the soil color, the determination of the color is a crucial factor.

Normally soil color is distinguished by the Munsell color charts in the field or in the laboratory. In the last decade, however, several attempts have been undertaken to decide the soil color by spectrophotometry and digital photography. The main task of this thesis is to work out the horizons and its boundaries of a „Kreisgrabenverfüllung“. Therefore fotos of the profile in the UV, VIS and IR spectrum were taken and the RGB values extracted. As reference the samples were analysed by a colorimeter and the RGB values were also extracted. For that purpose samples taken every 10 cm along the profile.

In the following part image editing was performed by Gimp 2.8. and Arc Map 10.2. in order to receive one value for every 10 cm in the high resolved pictures. The values of the colorimeter and the values of the pictures were confronted with each other afterwards. With these values clusteranalysis were performed.

The resulting horizons and boundaries gave promising results. In the best case the accordances between the RGB values determined in the laboratory and the RGB values taken by foto reached up to 62%. The results could be indicative that it is possible, with a preceding sophistication of the method, to determine profile horizons and its boundaries by digital photography. This might help experts to classify a profile by quantitative means in the field already.

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Verortung der „Study Area“ (Datengrundlage: ArcMap 10.2 © ESRI) \_\_\_\_\_ 11
- Abbildung 2: (Links): Geomorphologie im Raum der Kreisgrabenanlage Hornsburg (Datengrundlage: [www.geoland.at](http://www.geoland.at)); (Rechts): Genaue Position des Profils innerhalb der Kreisgrabenanlage Hornsburg 1 (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 212, Tafel 31) (Grafik © 2009 ArcheoProspections®) \_\_\_\_\_ 12
- Abbildung 3: (oben): Rekonstruktionsmodell der Anlage Glaubendorf 2 mit Landschafts- und Siedlungsrekonstruktion (Melichar und Neubauer 2010: 132); (unten): Virtuelles Rekonstruktionsmodell der Kreisgrabenanlage Steinabrunn (Melichar und Neubauer 2010: 130) (Grafiken ©: Imagination & VIAS-Universität Wien) \_\_\_\_\_ 14
- Abbildung 4: Experimentalarchäologisch rekonstruiertes Haus im Steinzeitpark Heldenberg, bemalt in typischen Mustern und Farben der Lengyelkultur. (Quelle: <http://vias.univie.ac.at/experimental-archaeology/heldenberg/>); (rechts unten): Göbekli Tepe (Quelle: <http://ngm.nationalgeographic.com/2011/06/gobekli-tepe/musi-photography>); (rechts oben): Rekonstruktion der Kreisgrabenanlage Künzing (Bayern) (Quelle: [http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic\\_circular\\_enclosures\\_in\\_Central\\_Europe](http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic_circular_enclosures_in_Central_Europe)) \_\_\_\_\_ 15
- Abbildung 5: Geologische Zeittafel (Quelle: Schuster R. et al. 2013: 1) \_\_\_\_\_ 16
- Abbildung 6: Übersichtskarte der Geologie des Weinviertels (Quelle: Heinrich M. et al. 2004: 12-13 ) © Geologische Bundesanstalt; (Aufrufbar über: <http://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/substrat-boden/geologie-weinbau/>) \_\_\_\_\_ 17
- Abbildung 7: Geologie der direkten Umgebung von Hornsburg 1 und 2. (Datenquelle: Geologische Karte Niederösterreich 1:200000 © 2002 Geologische Bundesanstalt via „ArcMap 10.2“ © Esri ® \_\_\_\_\_ 18
- Abbildung 8: (links): Verteilung der Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich in Bezug zur Verteilung des rezentenLösses im Untergrund. ©Peticzka R.,Loiszhandl-Weisz H. und Riegler D.. (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 76); (rechts): Lage der Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich in Bezug zum Bodentyp. © ZAMG Archeo Prospections ® K. Löcker (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 74) \_\_\_\_\_ 20
- Abbildung 9: Schema der Verfüllungsphasen nach Lüning (KUPER et al., 1977) (Quelle: Loishandl-Weisz H. 2006: 6) \_\_\_\_\_ 23
- Abbildung 10: Schematischer Verfüllungsprozess nach Loishandl-Weisz (Quelle: Loishandl-Weisz H. 2006: 91, Abb.23) \_\_\_\_\_ 25
- Abbildung 11: (links): Tongehalt und CaCO<sub>3</sub> Gehalt nach Tiefe; (rechts): Korngrößenverteilung nach Tiefe (Datenquelle: Trnka 1991: 82 ff.) \_\_\_\_\_ 26
- Abbildung 12: Für den Menschen sichtbares Spektrum der Elektromagnetischen Strahlung (Quelle:[http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum)) \_\_\_\_\_ 28
- Abbildung 13: Farbwürfel des RGB und CYMK Farbraums (Quelle: Richter C. und Teichert B. 2009: 40) \_\_\_\_\_ 32
- Abbildung 14: (links): Mischungsverhältnisse der drei Grundfarben 460 nm Blau, 530 nm Grün und 650 nm Rot, die zusammen jede monochromatische Farbe ergeben. Dazu wählt man eine Wellenlänge auf der x-Achse und zieht von diesem Punkt eine Gerade parallel zur Y-Achse. Die Schnittpunkte mit den Farbkurven ergeben die jeweiligen Farbanteile. (rechts): Die

Mischungsverhältnisse von links in anderer Darstellung. Diese Form bildet die Grundlage für das CIE XYZ System. (Quelle: Falk et al. 1990: 260-261)	32
Abbildung 15: (links): Die CIE Normalfarbtafel. Im Gegensatz zur Abbildung 14 rechts gibt es bei ihr keine negativen Farbwerte mehr (Quelle: Falk et al. 1990: 262). (rechts): Farbräume die auf dem CIE Farbsystem basieren. Zu diesen gehören unter anderem RGB, NTSC und PAL. Aus diesem Grund sind diese Farbräume auch mathematisch ineinander überführbar. (Quelle: <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/8/80/CIE_RGB-CMYK-Beleucht.svg/220px-CIE_RGB-CMYKBeleucht.svg.png">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/8/80/CIE_RGB-CMYK-Beleucht.svg/220px-CIE_RGB-CMYKBeleucht.svg.png</a> )	33
Abbildung 16: (a) Munsell Farbraum; (b) RGB/CYMK Farbwürfel; (c) CIE XYZ Farbraum; (d) CIE UV und CIE LAB Farbraum (Quelle: Viscarra Rosell et al. 2006: 323)	34
Abbildung 17: Probenahme an der Kreisgrabenprofilwand in Hornsburg. Anlage Hornsburg 1 Graben 2.	40
Abbildung 18: (oben): IR Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt. (mitte): UV Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt; (unten): VIS Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt	41
Abbildung 19: (links): Verortung des Weißpunktes des D65 Referenzlichts innerhalb des CIE Normalfarbraums (Quelle: <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg#/media/File:CIE_1931xy_gamut_comparison.svg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg#/media/File:CIE_1931xy_gamut_comparison.svg</a> ); (rechts): Verwendetes Spektralphotometer der Firma „ColorLite“ (Quelle: <a href="http://www.colorlite.de/de/sph850">http://www.colorlite.de/de/sph850</a> )	42
Abbildung 20: Boxplots zur Bestimmung von Ausreißern	47
Abbildung 21: Visualisierung der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse, durchgeführt mit drei Gruppen. Ähnlichkeitsmaß: Euklidische quadratische Distanz. Methode: Ward. Ergebnisse können Tabelle 2 entnommen werden.	53
Abbildung 22: Dendrogramme der hierarchischen Clusteranalysen für das UV- (Oben links), IR- (Oben rechts), VIS-LAB- (Mitte links), MYVIS- (Mitte rechts) und VIS-Profil (unten). Die roten Blöcke visualisieren die Clustergruppenzugehörigkeiten der einzelnen Raumgruppen. Im „niedrigsten“ Fall wurde die Clusteranalyse für sieben Raumgruppen, im „höchsten“ Fall mit drei Raumgruppen durchgeführt. Die Linien bilden die Grenzen zwischen den Clusterlösungen. Je größer der „Höhenzuwachs“ von einer Gruppe zur Nächsten, desto größer der „Ellbow“ bzw. „Knick“.	55
Abbildung 23: Visualisierung der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse, durchgeführt mit fünf Gruppen. Ähnlichkeitsmaß: Euklidische quadratische Distanz. Methode: Ward. Ergebnisse können Tabelle 4 entnommen werden.	56
Abbildung 24: Visualisierung der Horizontgrenzenbestimmung nach dem „K-Means“ Clusteranalyse Verfahren. Ergebnisse können Tabelle 4 und 5 entnommen werden.	58
Abbildung 25: Bestimmung der Horizonte und ihrer Grenzen für 15*280 Pixel Auflösung.	64
Abbildung 26: Abschließende Einschätzung der Bodenhorizonte und ihrer Grenzen (e). Gegenüberstellung zu den aus den Laborergebnissen der Spektralphotometrie (a-d).	65

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Hauptkomponenten und Faktorladungen der RGB Werte über alle Profilaufnahmen</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 2: Räumliche Übereinstimmung der Clustergruppenzugehörigkeiten bei den hierarchischen Clusterlösungen mit drei Gruppen</i>	<i>52</i>
<i>Tabelle 3: Räumliche Übereinstimmung der Clustergruppenzugehörigkeiten bei den hierarchischen Clusterlösungen mit fünf Gruppen.</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 4: Ergebnisse der Horizontgrenzenbestimmung. Rot: keine Grenze, Gelb: mögliche Grenze, Grün: markante bzw. klare Grenze. Die Tabelle enthält nur 27 Grenzen, da die Grenze nach 2,80 m nicht berücksichtigt wird.</i>	<i>59</i>
<i>Tabelle 5: Räumliche Übereinstimmung zwischen den Schichtgrenzbestimmungen zu den verschiedenen Profilbildern.</i>	<i>60</i>

## Abkürzungsverzeichnis

Ma = Millionen Jahre

VIS = Steht für die RGB Werte der Digitalfotografie, die das Bodenprofil im sichtbaren Spektrum des Lichtes erfasst haben.

MYVIS = Steht ebenfalls für die RGB Werte der Digitalfotografie, die das Bodenprofil im sichtbaren Spektrum erfasst des Lichtes erfasst haben. Jedoch wurden die Werte mit einer anderen Kamera erfasst.

IR = Steht für die RGB Werte der Digitalfotografie, die das Bodenprofil im infraroten Spektrum des Lichtes erfasst haben.

UV = Steht für die RGB Werte der Digitalfotografie, die das Bodenprofil im ultravioletten Spektrum des Lichtes erfasst haben.

# 1. Einleitung und Problem

## 1.1. Problemstellung

In Profilbeschreibungen wird die dominante Bodenfarbe bzw. Matrixfarbe dazu herangezogen, um verschiedene Horizonte des Profils voneinander abzugrenzen (HARTEMINK ET AL. 2014: 308). Die Farbe wird bei der Feldansprache visuell über das „Munsell Colour space model“ von Experten bestimmt. Aus diesem Grund sind die farblichen Ansprachen der Bodenprofile subjektiv und werden beeinflusst von den vorherrschenden Lichtbedingungen, den Fraktionen der Korngröße und dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens. Einer der größten Nachteile des „Munsell“ System ist, dass es nicht direkt in numerischen Analysen verwendet werden kann (HARTEMINK ET AL. 2014: 308). Es wurden jedoch Algorithmen entwickelt, die das „Munsell“ System in den „RGB“ oder den „CIELAB“ Farbraum überführen können, mit welchen wiederum numerische Analysen möglich sind. Diese können auch mit einigen physiochemischen Eigenschaften korreliert werden und unter Umständen Aussagen über die Bodenzusammensetzung liefern (vgl. VISCARRA ROSELL ET AL. 2006a). Eine weitere Möglichkeit zur Messung von Farbwerten liefert die Spektroskopie. Hierbei werden die Intensitäten in den verschiedenen Spektralbereichen, die sich meist im VIS (380 - 780 nm) oder im NIR (780 nm – 3 µm) Bereich des Spektrums befinden, ermittelt. Die Durchführung dieser Messung kann sowohl im Feld als auch im Labor erfolgen. Die ermittelten Werte können dann ebenfalls in Farbräume überführt werden, um sie dann mit anderen Farbmessungen (z.B. Digitalkamera, „Munsell“) zu vergleichen (vgl. VISCARRA ROSSEL ET AL. 2008). Eine sehr preiswerte Methode die Bodenfarbe zu bestimmen, sind Mobiltelefone mit Kameras. Eine Studie konnte zeigen, dass die Farbbestimmung mit solch einer Mobiltelefonkamera und einer „Android“ Anwendung (App) eine geringere Fehlerquote aufweist als die visuelle Bestimmung der Bodenfarbe (GÓMEZ-ROBLEDO ET AL. 2013). Mit Digitalkameras gab es zudem positiv ausgefallene Versuche, bestimmte Bodenbestandteile direkt aus dem Bild ableiten zu können (vgl. VISCARRA ROSSEL ET AL. 2008). Für die Quartärforschung bzw. die angewandte Vergangenheitsforschung im Bereich der Geowissenschaften oder aber auch der Landschafts-/Umwelt-/Geoarchäologie spielen „natürliche“ terrestrische Archive wie z.B. Sediment und Paläoboden Sequenzen oder Grabenverfüllungen eine entscheidende Rolle, um Erkenntnisse über die Paläoumwelt zu erhalten (vgl. BARCZI A. ET AL. 2006). Normalerweise gibt es zwei Vorgehensweisen wie solche Horizontabfolgen bestimmt werden. Eine gängige Vorgehensweise ist die, dass ein Experte

aufgrund seiner Erfahrung in dem Fachgebiet das Tiefenprofil in verschiedene Horizonte einteilt. Zusätzlich werden in jedem Horizont Bodenproben genommen, die dann im Labor untersucht werden und in der Diskussion hinzugezogen werden. Es ergibt sich hierbei die Problematik, ob der Experte die Horizontabfolge auch wirklich richtig bestimmt und in Folge auch repräsentative Bodenproben entnimmt. Eine andere Möglichkeit ist es, Bodenproben in immer gleichen Abständen zu entnehmen und anhand dieser im Labor, durch Bestimmung der physiochemischen Bodenbeschaffenheit, die Horizontabfolge zu bestimmen. Hierbei können jedoch an unsinnigen Stellen Proben genommen werden, die aufgrund der zu geringen Auflösung den tatsächlichen Horizontverlauf konterkarieren. Hier wäre es also interessant zu wissen, was die beste Distanz für die Beprobung ist (vgl. PETICZKA ET AL. 2010). In diesem Kontext könnte die Digitalfotografie einen Beitrag leisten, der in dieser Arbeit untersucht werden soll. Der Arbeitstitel der Arbeit lautet: „Bestimmung von Horizonten(-grenzen) einer archäologischen Kreisgrabenverfüllung mittels Digitalfotografie“.

## 1.2. Gang und Ziel der Arbeit

Der Ablauf der eigentlichen Untersuchung gliedert sich wie folgt. Zunächst erfolgt eine Analyse der naturräumlichen Grundlagen des Raumes um Hornsburg. Daraufhin wird die Stellung von Hornsburg in der archäologischen Forschung beleuchtet. Aus den Digitalfotografien im ultravioletten (UV), sichtbaren (VIS) und infraroten (IR) Spektralbereich der Kreisgrabenverfüllung, die vom Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und virtuelle Archäologie zur Verfügung gestellt werden, sollen die Horizonte des Profils ermittelt werden. Zusätzlich wird diese Verfüllung noch mit einer eigenen Digitalkamera fotografiert. Die Pixel der Fotos werden mittels Clusteranalyse in Gruppen unterteilt werden, die wiederum die Horizonte und deren Grenzen ergeben sollen. Da die Bilder jedoch nicht unter geregelten Bedingungen gemacht wurden, werden zudem Bodenproben genommen, die spektralphotometrisch untersucht werden. Auch anhand dieser Werte erfolgt eine Gruppierung mit deren Hilfe eine Horizontabfolge bestimmt werden soll. Der Vergleich der Horizontabfolge der Laborwerte mit denen der Digitalfotographie soll dann durch einen Rastervergleich mit einem GIS erfolgen. Dies soll zeigen, ob Laboranalysen und Digitalfotografie vergleichbare Horizontabfolgen ergeben. Zu diesem Zweck werden sowohl die Clusteranalysen der Digitalfotos, als auch die der Spektralanalysen unabhängig voneinander ausgeführt. Um zu sehen wie stark der Einfluss der Bildqualität und des

Aufnahmezeitpunktes auf die Clusteranalyse des selben Profils sind, stehen zwei VIS Bilder zur Verfügung, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten, mit unterschiedlichen Methoden und mit unterschiedlichen Digitalkameras aufgenommen wurden. Die Ergebnisse aus diesen beiden Bildern sollen Aufschluss darüber geben, ob es möglich sein kann mit unterschiedlichen Kameras vergleichbare Ergebnisse für dasselbe Profil zu erhalten.

### 1.3. Ziel der Arbeit

Es ist das Ziel der vorgelegten Studie, herauszufinden, ob und inwieweit die Digitalfotografie als Hilfsmittel dienen kann, um Horizontgrenzen bzw. Horizonte bereits im Feld zu ermitteln und Ergebnisse der Horizontenteilung durch Laboranalysen und Experten bereits vorwegzunehmen. Dies könnte Laboranalytikern und Experten im Feld große Dienste bei der Horizontenteilung und gezielten Probeentnahme leisten. Außerdem würde es ermöglichen Profildaten als Grundlage von Profilanalysen heranzuziehen. Dies könnte Wissenschaftlern weltweit helfen, räumlich ungebunden, Bodenprofile auszuwerten und die Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit ihrer Ergebnisse zu ermöglichen. Angedacht wäre zudem diese Methodik in weiterer Folge auszubauen, um bereits im Feld rasch physiochemische Bodenbeschaffenheit in dem Profil qualitativ zu erkennen. Die Arbeit ist also anzusiedeln im Bereich „Proximal Sensing“ von Bodenprofilen.

## 2. Study Area

### 2.1. Lage und Maße der Kreisgrabenanlage Hornsburg

Der untersuchte Profilausschnitt befindet sich in Hornsburg in Niederösterreich. Hornsburg ist Teil der Gemeinde Kreuttal, welches sich ca. 30 km nord-nord-östlich von Wien befindet (vgl. Abbildung 1). In Hornsburg befinden sich zwei mittelneolithische Kreisgrabenanlagen. Ein dreifacher, Hornsburg 1 genannt, und ein zweifacher, der als Hornsburg 2 bezeichnet wird. Der untersuchte Profilausschnitt liegt im zweiten bzw. mittleren Graben der dreifachen Kreisgrabenanlage Hornsburg 1 (vgl. Abbildung 2). Die genaue Position wurde mittels einer Totalstation vermessen. Die Randpunkte des Profilquerschnittes erstrecken sich von den MGI 34 GK Koordinaten „8758,358; 369731,779; 299,748“ bis „8753,208; 369729,991; 299,684“.

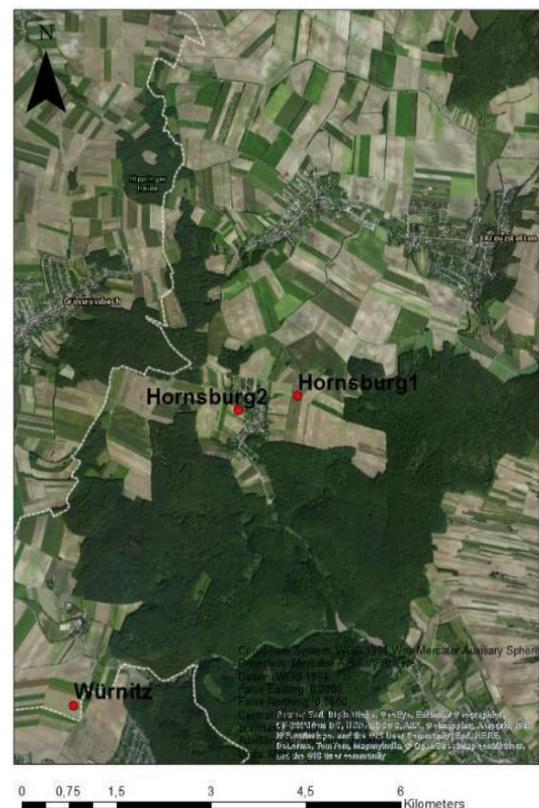
Die Tiefe des Profils wurde ebenfalls mittels Totalstation vermessen und beträgt vom höchsten zum tiefsten gemessenen Punkt 2,99 m, wobei sich der tiefste Punkt nicht mehr im Verfüllungsbereich befindet. Aus diesem Grund wurden auch nur bis zu einer Tiefe von 2,80 m Proben entnommen. Hornsburg 1 liegt etwa 500 m nordöstlich von Hornsburg auf einem Plateau (TRNKA 1991: 82). Die Flur trägt den Namen „In langen Äckern“. Bereits im September 1987 wurden hier Ausgrabungen durchgeführt. Dabei erfolgte für jeden der Gräben ein Aufschluss durch einen Schnitt in südost - nordwestlicher Richtung, mit einer Länge von 35,20 m und einer Breite von durchschnittlich 2 m (TRNKA 1991: 82). In diesem Zusammenhang wurden Korngrößenverteilung, Bodenfarbe und Kalziumkarbonatgehalt ( $\text{CaCO}_3$ ) ermittelt, sowie weitere bodenphysikalische Kenngrößen (TRNKA 1991: 82 ff.). Die Grabenbreite der drei Gräben beträgt im Durchschnitt 4 m. Die Durchmesser der einzelnen Gräben, beim Innersten beginnend, betragen 65 m, 85 m und 105 m. Diese Angaben wurden über photogrammetrische Auswertungen der Luftbilder ermittelt und konnten durch die magnetische Prospektion des Grabens im Frühjahr 1989 bestätigt werden (57 m, 83,50 m, 103,50 m). Die Anlage besitzt zwei Tore, die im Westen um  $16,5^\circ$  gegen die

Lage von Hornsburg 1 und 2



Author: Daniel Schweighöffer

Lage von Hornsburg 1 und 2



Author: Daniel Schweighöffer

Abbildung 1: Verortung der „Study Area“ (Datengrundlage: ArcMap 10.2 © ESRI).

Haupt-Himmelsrichtung abweichen. Im Osten nimmt die Abweichung zur Haupt-Himmelsrichtung vom äußersten Graben zum innersten stets ab (19°, 17,5°, 16°). Bei beiden Toren biegen sich die Gräben etwa 10 m nach innen ein. Auf diese Art entsteht eine Art Torgasse. Die Breite der Erdbrücke, die von den einbiegenden Gräben gebildet wird, schwankt zwischen 3 m und 7,50 m (zur visuellen Verdeutlichung vgl. Abbildung 2 und 3). Bei den Gräben handelt es sich ausschließlich um Spitzgräben (TRNKA 1991: 80).

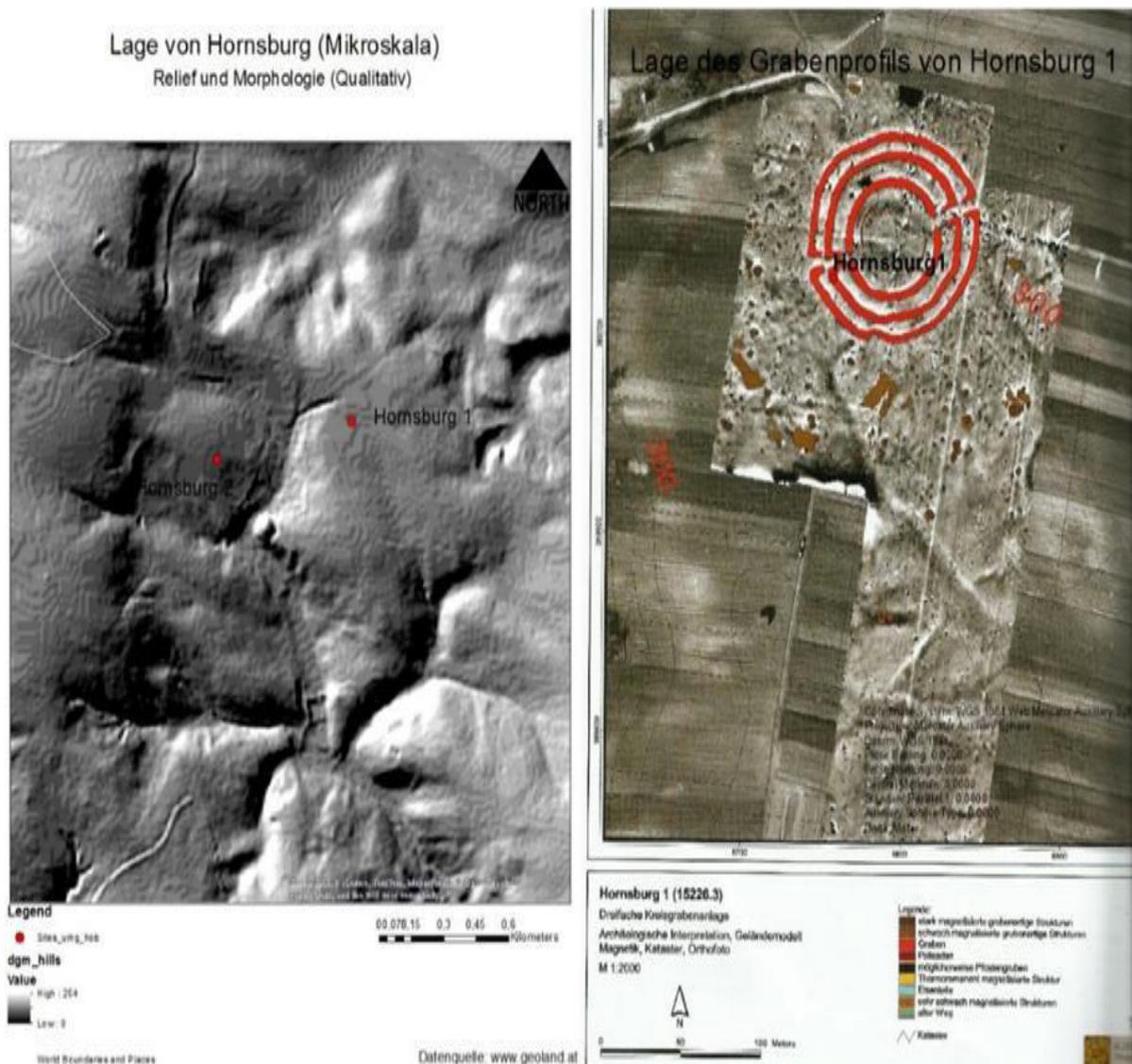


Abbildung 2: : (Links): Geomorphologie im Raum der Kreisgrabenanlage Hornsburg (Datengrundlage: [www.geoland.at](http://www.geoland.at)); (Rechts): Genaue Position des Profils innerhalb der Kreisgrabenanlage Hornsburg 1 (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 212, Tafel 31) (Grafik © 2009 ArcheoProspections®).

## 2.2. Hornsburg und seine Einordnung in der Archäologischen Forschung

### 2.2.1. Kreisgrabenanlagen

In prähistorischer Zeit wurden immer wieder große Anlagen aus Stein, Erde und Holz errichtet. Die wohl bekanntesten Vertreter dieser Anlagen sind Göbekli Tepe (siehe Abbildung 4 rechts unten), welches ins 9. Jahrtausend v. Chr. datiert wird und Stonehenge in Südengland, welches in seiner jetzt bekannten Form zwischen 2500 und 2000 v. Chr. errichtet wurde (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 15). Gleich ist diesen Anlagen, dass die Beweggründe für die Erbauung im Allgemeinen relativ unklar sind. So reichen die Überlegungen hierzu von Befestigungsanlagen über Versammlungsplätze, Viehkralen und rituellen Zentren bis hin zu astronomischen Beobachtungsanlagen (NEUBAUER UND TRNKA 2005). Neben diesen wohl bekannten Anlagen, gibt es aber auch in unseren mitteleuropäischen Breiten ähnliche Erdwerke, die schon lange vor Stonehenge, jedoch nach Göbekli Tepe, errichtet wurden (siehe Abbildung 4 rechts oben). Diese als mittelneolithische Kreisgrabenanlagen bezeichneten Erdwerke sind ausschließlich unterirdisch bzw. als Bodendenkmal erhalten geblieben. Diese Monumente wurden in der Jungsteinzeit im Zeitraum 4850/4750 bis 4650/4550 v. Chr. errichtet (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 15). Gemeinsam mit den Vertretern in der Türkei und England ist ihnen jedoch, dass sie sich als abgeschlossene kreisförmige Struktur beschreiben lassen, deren Innenraum klar vom umgebenden Außenbereich abgetrennt ist. Die mittelneolithischen Kreisgrabenanlagen sind zudem meist an einen Siedlungsverbund gekoppelt, von dem sie durch spitz zulaufende Gräben, sogenannte Spitzgräben, getrennt sind. Diese Gräben umschließen einen von einer oder mehreren Holzpalisaden umschlossenen Innenraum. Dieser abgegrenzte Innenraum ist meist frei von nachweisbaren Strukturen (siehe Abbildung 3). Der Zugang zu besagtem Innenraum war nur über schmale Zugänge möglich, die durch Unterbrechungen der Gräben an diesen Stellen ermöglicht wurden. Heute sind diese Gräben vollständig mit Material verfüllt. Aus diesem Grund und aufgrund der intensiven Landbewirtschaftung sind die Gräben im Landschaftsbild nicht mehr zu erkennen. Entdeckt wurden sie jedoch durch die Luftbildarchäologie, die seit den 1970er Jahren systematisch betrieben worden ist. (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 15) Die dichteste Häufung von Anlagen befindet sich in Niederösterreich mit den angrenzenden Gebieten in Südmähren und der Westslowakei. Weiterhin lassen sich vermehrt Anlagen in der Südwestslowakei, in Tschechien, Bayern, Sachsen und in Sachsen-Anhalt finden. Ebenfalls konnten in Südpolen und Nordungarn einige Anlagen entdeckt

werden. Vereinzelt gab es auch in Nordrheinwestfalen in Deutschland (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 16).



Abbildung 3: (oben): Rekonstruktionsmodell der Anlage Glaubendorf 2 mit Landschafts- und Siedlungsrekonstruktion (Melichar und Neubauer 2010: 132); (unten): Virtuelles Rekonstruktionsmodell der Kreisgrabenanlage Steinabrunn (Melichar und Neubauer 2010: 130) (Grafiken ©: Imagination & VIAS-Universität Wien).

### 2.2.2. Zeitliche Einordnung der Kreisgrabenanlagen

Die erste neolithische Kultur Mitteleuropas wird, aufgrund der typischen Verzierung ihrer Gefäße, als Linearbandkeramische Kultur bezeichnet (siehe Abbildung 4 links). Ihre Datierung wird angesetzt zwischen 5700/5500 und 5000/4900 v. Chr. (KRENN-LEEB ET AL. 2006: 195). Diese jungneolithische Kultur hat sich im Bereich Mähren und Niederösterreich ausgebildet und sich in der Folge recht rasch nach Norden und Westen ausgebreitet. In diesem Zeitraum werden in Mitteleuropa erstmals Flächen gerodet, auf denen auch Landwirtschaft betrieben wird. Es entstehen dort ebenfalls ständige Siedlungen und Häuser (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 16). Gegen Ende der Bandkeramischen Kultur finden sich Areale, die von Palisaden und Gräben umschlossen sind. Diese Areale sind entweder rechteckig oder annähernd rund. Sie werden als Befestigungszentren gedeutet, die eine Schutzfunktion erfüllten. Beispielhaft seien hierfür

die Anlagen in Großrußbach- Weinstieg und Asparn a.d. Thaya in Niederösterreich erwähnt (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 17). Die Erdwerke umgeben dabei ein Siedlungsareal. Es handelt sich bei den Gräben um Sohlgräben, die nahezu senkrechte Grabenwände aufweisen. Sie wurden meist in Löss gegraben. Bei der Anlage Großrußbach umschließt das Erdwerk einen Siedlungsraum von 24 Hektar. Die Zugänge werden über Erdbrücken ermöglicht (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 17). Aufgrund des Fundes von zahlreichen Skeletten in den Gräben von Asparn a. d. Thaya und Untersuchungen an diesen wird davon ausgegangen, dass die Bewohner gewaltsam ums Leben kamen. Die Siedlungstätigkeit endet mit diesem Ereignis abrupt. Mittels Radiokarbondatierungen der Skelette konnte der Zeitraum des Ereignisses auf 5070-4950 v. Chr. datiert werden (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 17). Dieses Ereignis markiert einen heftigen Einschnitt. Erst ab dem Zeitpunkt 4900/4850 v. Chr. finden sich bemalte keramische Hinterlassenschaften einer neuen Kultur, der Lengyelkultur. Die sehr aufwendigen Bemalungen der Keramik, die meist in den Farben Rot und Gelb ausgeführt wurden, unterscheiden sich grundlegend von denen der Linienbandkeramik. Mit dieser Kultur tauchen auch die mittelneolithischen Kreisgrabenanlagen in Mitteleuropa auf. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass die Entwicklung dieser Kreisgrabenanlagen nicht aus den Erdwerken der Linearbandkeramik hervorgegangen sein kann (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 17).



Abbildung 4: (links): Experimentalarchäologisch rekonstruiertes Haus im Steinzeitpark Heldenberg, bemalt in typischen Mustern und Farben der Lengyelkultur. (Quelle: <http://vias.univie.ac.at/experimental-archaeology/heldenberg/>); (rechts unten): Göbekli Tepe (Quelle: <http://ngm.nationalgeographic.com/2011/06/gobekli-tepe/musi-photography>); (rechts oben): Rekonstruktion der Kreisgrabenanlage Künzing (Bayern) (Quelle: [http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic\\_circular\\_enclosures\\_in\\_Central\\_Europe](http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic_circular_enclosures_in_Central_Europe)).

## 2.3. Naturräumliche Gliederung

### 2.3.1. Geologie

Tektonisch betrachtet befindet sich Hornsburg zwar schon im Wiener Becken, allerdings liegt es an der Grenze zwischen Flyschzone, Waschbergzone und Wiener Becken (vgl. Abbildung 6 und 7). Direkt in Nachbarschaft verläuft eine der Hauptstörungen, die Wollmannsberger Störung (Schrattenbergbruch). Hier versank die Mistelbacher Scholle um 1600 m. Beim Steinbergbruch sogar um 3000 m. Teilweise weist der zugrunde liegende Gebirgssockel

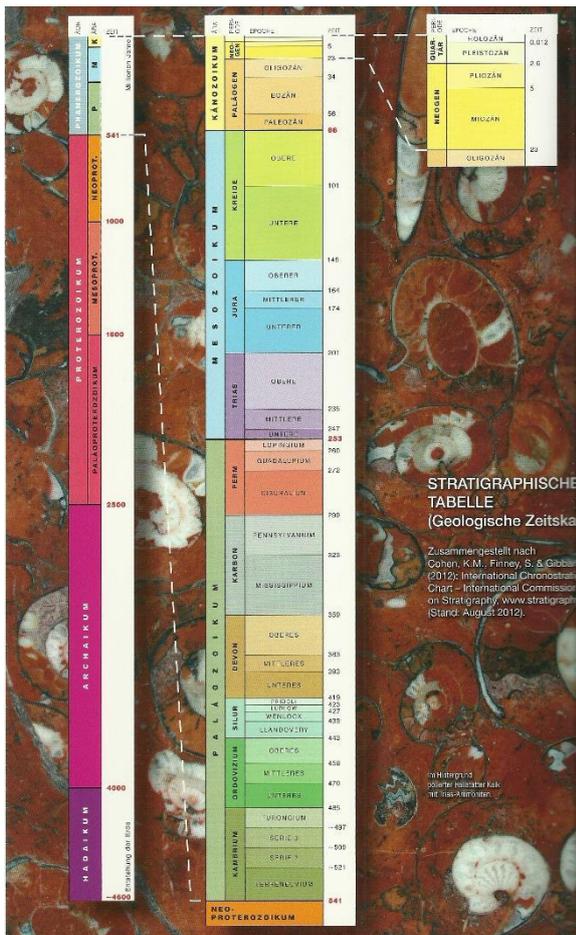


Abbildung 5: Geologische Zeittafel (Quelle: Schuster R. et al. 2013: 1).

Verwerfungen von 6000 m auf (SCHUSTER ET AL. 2013: 45-47). Diese tektonischen Störungszonen bedingten das Absinken des Wiener Beckens. Zeitlich geschah dies im Badenium (16 – 13,3 Ma), einem Teil des Miozäns (5,3 – 23,8 Ma), welches wiederum eine Untereinheit des Neogens (2,6 – 23,8 Ma) bildet (HEINRICH ET AL. 2004: 34) (zur Zeitskala siehe Abbildung 5). Nach der Geburt des Beckens wurden über einen Zeitraum von ca. 10 Ma Sedimente abgelagert (HEINRICH ET AL. 2004: 9). Die ältesten Gesteinsschichten im Untergrund des Beckens entstanden während der variszischen Grundgebirgsbildung. Diese ereignete sich bereits vor ca. 360 Ma (siehe Abbildung 5) und besteht vor allem aus Granit und Gneis (Schuster et al. 2013: 27). Es handelt sich dabei um Plutonite (Granit) und

metamorph gebildete Gesteine (Gneise) (SCHUSTER ET AL. 2013: 18). Diese sind aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung (Quarz, Feldspate) extrem verwitterungsresistent und chemisch betrachtet sehr sauer. Sie weisen also einen vergleichsweise niedrigen pH Wert auf, wenn sie in Lösung gehen, was zu nährstoffarmen Böden und zu deren Versauerung beiträgt (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 9-10, 22-23, 28-30). In Österreich sind nur in der Böhmischen Masse Teile dieses Rumpfgebirges oberirdisch erhalten geblieben. In den folgenden Jahrmillionen, ab dem Karbon (360 - 299 Ma) (siehe Abbildung 5), war der Bereich



der Hollabrunner-Mistelbacher Schotterkegel, auf welchem sich auch Hornsburg befindet (SCHUSTER ET AL. 2013: 67-69). In Randzonen kommt es, bedingt durch ein randtropisches semiarides Klima, im weiteren Verlauf zur Ausbildung von Schlierhügellandschaften, welche sich nach der Landfestwerdung entfalteteten. Diese Schlierhügelländer bildeten sich speziell an Fußflächenzonen des Flysch. Der Flysch wurde bereits zwischen der späten Kreidezeit und dem frühen Paläogen (ca. 80 - 50 Ma.) aus Ablagerungen von Turbiditen am Kontinentalrand gebildet (Heinrich et al. 2004: 8, 29-30). Die Schlierhügelländer liegen teilweise sehr hoch (540 - 420m) und wurden, durch aus den Alpen austretende Täler, in Teilräume gegliedert. Entstanden sind diese Landschaften im Neogen. Der Untergrund wird hier von

## Geologie um Hornsburg

Entnommen der Geologischen Übersichtskarte Niederösterreichs 1:200000

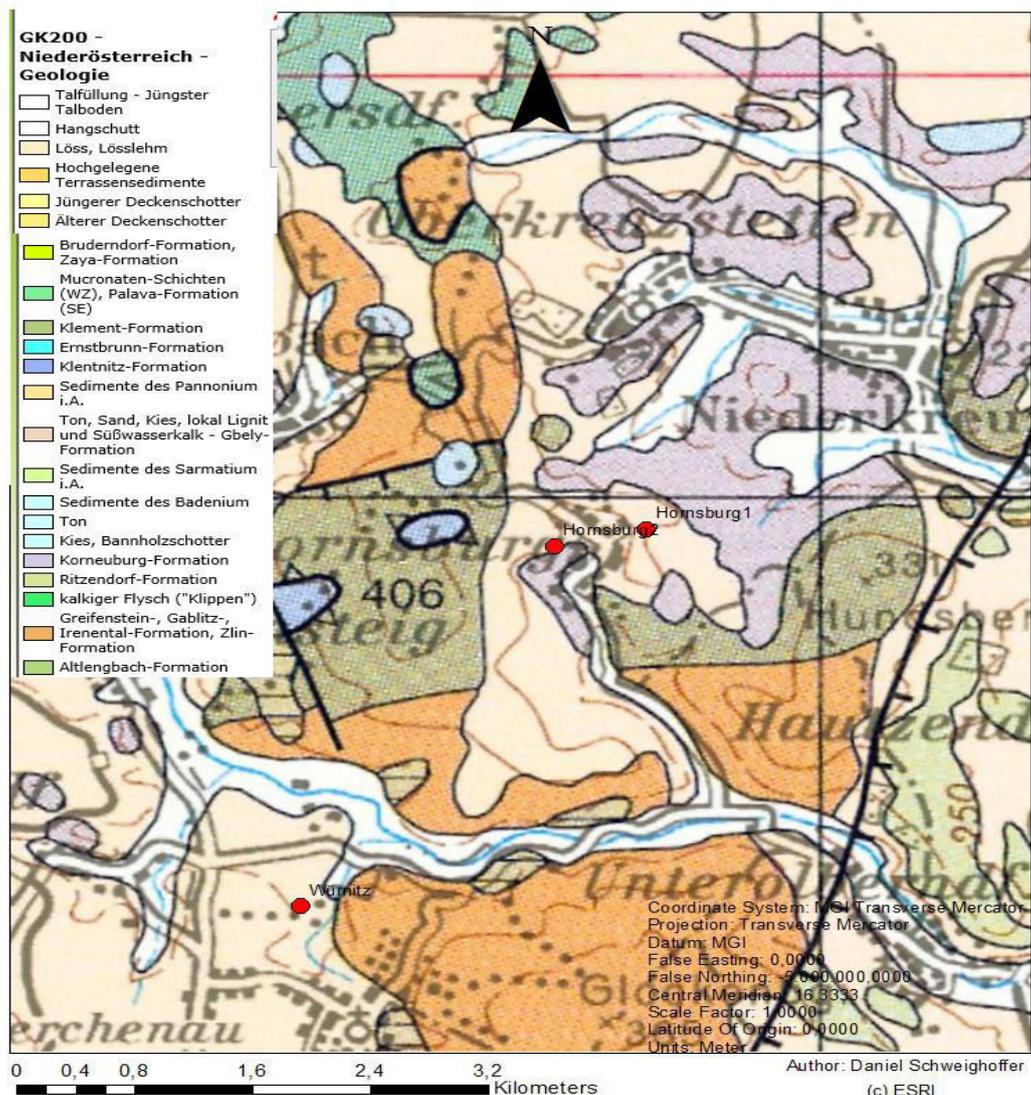


Abbildung 7: Geologie der direkten Umgebung von Hornsburg 1 und 2. (Datenquelle: Geologische Karte Niederösterreich 1:200000 © 2002 Geologische Bundesanstalt via „ArcMap 10.2“ © Esri ®.

wasserundurchlässigen Tonen gebildet (HEINRICH ET AL. 2004: 29-30). Das Weinviertler Tertiäriedelland, die Hollabrunner-Mistelbacher Schotter und die Klippenzone sind Beispiele für diese Landschaften im Bereich Niederösterreich (vgl. Abbildung 6 und 7). Man kann also sagen, dass Hollabrunn in einer derartigen Schlierhügellandschaft (30% Flysch 20% Kalk) lag bzw. liegt (HEINRICH ET AL. 2004: 29-30). Im Quartär wurden diese Flächen jedoch teilweise ausgeräumt und es bildeten sich isolierte Hügelflächen und Rücken im Donauraum. Durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten entstanden dann auch die bekannten Terrassensysteme. Heute zeichnet sich diese Gegend durch weite Ebenen aus, die hin und wieder von sanften Hügeln abgelöst werden.

### 2.3.2. Böden

Die meisten der bekannten niederösterreichischen Kreisgrabenanlagen befinden sich auf Braunerden und hierbei bevorzugt auf Parabraunerden. Ausnahmen bilden die Anlagen Wilhelmsdorf 1, Immendorf und Hornsburg 1, die sich auf Schwarzerde befinden (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 75) (siehe Abbildung 8 rechts). Für all diese Böden gilt jedoch, dass deren Ausgangssediment der Löss bildet (siehe Abbildung 8 links). Löss ist ein äolisches Sediment, welches in den kalttrockenen Phasen der Glaziale des Quartärs abgelagert wurde. Durch Gletschererosion entstandene Feinsande und Silte werden zunächst in den Kaltphasen fluvial ins Tal befördert. Dort wird das Material meist in „braided river“ Systemen transportiert und abgelagert und bei Trockenheit vom Wind weiter getragen (GLASER ET AL. 2010: 38). An den Leelagen der Hänge reicht die Kraft des Windes nicht, den Löss weiter zu transportieren und er lagert sich ab. Im Hügelland des Weinviertels sind dies vor allem die Osthänge (Heinrich et al. 2004: 16-17). Löss besteht vornehmlich aus feinem Sand (20-30%), Silt (60-70%) und Ton (10-20%) (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 34). Er weist zudem einen sehr hohen Kalkgehalt auf. Daraus ergibt sich, dass die magnetische Suszeptibilität gering ist. Die Bodenbildung fand bevorzugt in den gemäßigten Phasen des Spätglazials statt und intensivierte sich noch weiter im Holozän. Hier herrschten vermehrt feuchte und warme Bedingungen vor. Dadurch kam es zu verstärkter Verwitterung und der Löss entkalkte. Dieser gelöste Kalk sammelte sich mitunter in tiefer gelegenen StauhORIZONTEN und bildete hier Kalkkonkretionen aus. Diese werden als „Lösskindl“ bezeichnet (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 290). Die Entkalkung des Löss wiederum führte zu einer Übersäuerung, was zu verstärkter Verwitterung beitrug. Der

Kalk bildete bei diesem Prozess einen Puffer, weswegen Tongehalt und Kalkgehalt in einem Zusammenhang stehen. Bei Bodenbildung verringert sich der Kalkanteil im Boden, wogegen der Tonanteil zunimmt. So lassen sich Paläobodenbildungen nachweisen (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 288-290, 347). Der Prozess der Paläobodenbildung führte zur Genese von braun gefärbten Eisenoxiden. Dies wiederum führt zur Ausbildung eines Verwitterungshorizonts über dem Ausgangssubstrat, der eine höhere Suszeptibilität aufweist. Man nennt diesen Vorgang auch Silikatverwitterung. Er führt zu Tonbildung. Innerhalb dieses Prozesses wurde der Löss in Lösslehm überführt. Auf diesem Lösslehm bildeten sich bis ins Neolithikum fruchtbare Schwarz- und Braunerden heraus (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 75). Waren die Niederschläge höher, dann kam es zur Ausbildung von Parabraunerden (LOISHANDL-WEISZ ET AL. 2007: 145). Die meisten der Kreisgrabensiedlungen befinden auf Geländekuppen mit Nordost bis Südost Hangneigungsrichtung. Dies lässt sich damit begründen, dass der Löss in den Leelagen vermehrt abgelagert wurde. Im Untersuchungsgebiet sind dies vor allem, wie bereits erwähnt, die Osthänge (MELICHAR UND NEUBAUER 2010: 82) (siehe Abbildung 8).

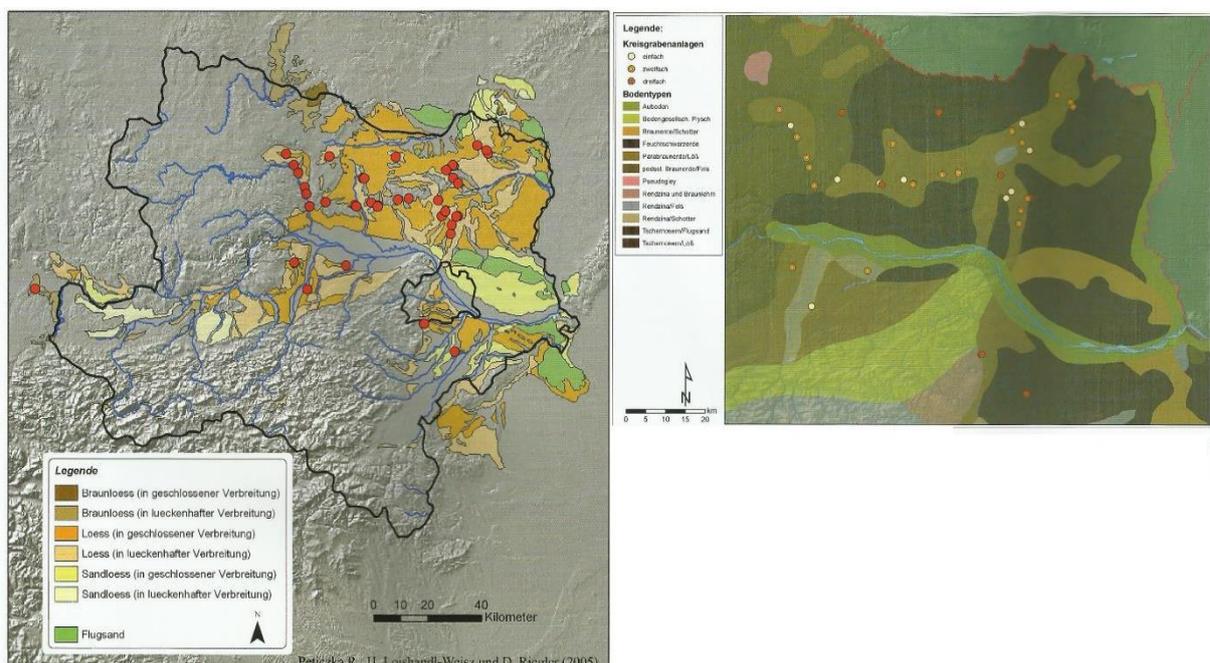


Abbildung 8: (links): Verteilung der Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich in Bezug zur Verteilung des rezenten Lösses im Untergrund. ©Peticzka R., Loishandl-Weisz H. und Riegler D.. (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 76); (rechts): Lage der Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich in Bezug zum Bodentyp. © ZAMG Archeo Prospections® K. Löcker (Quelle: Melichar und Neubauer 2010: 74).

### 2.3.3. Klima

Betrachtet man das Klima, so soll hier nicht auf das momentane Klima eingegangen werden, da dies relativ wenig Bezug zum Forschungsobjekt hat. Es soll vielmehr auf die Klimabedingungen eingegangen werden, die um 5000 v. Chr. herrschten. Insbesondere soll beleuchtet werden, was für eine Vegetation vorherrschend war und wie die Umwelt zu diesem Zeitpunkt ungefähr aussah. Zwischen 9000 und 4000 v. Chr. herrschten im Sommer warme und im Winter gemäßigte Temperaturen. Dies war eine Zeit, die auch als Klimaoptimum des frühen Holozäns bezeichnet wird (SCHÖNWIESE 2013: 303). Die orbitalen Parameter der Erdumlaufbahn um die Sonne bzw. die Aktivität der Energieerzeugung der Sonne sind hierfür die entscheidenden Parameter (SCHÖNWIESE 2013: S. 109). Erstere werden auch unter den Milankovic-Zyklen zusammengefasst. Die Zweite Gruppe wird besonders über die Sonnenaktivität bzw. das Auftreten von sogenannten Sonnenflecken gesteuert (SCHÖNWIESE 2013: S. 110-112). Diese wiederum liegen in Magnetfeldschwankungen der Sonne begründet und beeinflussen vor allem die Abstrahlung im hochenergetischen und kleinwelligen UV-Bereich (SIROCKO 2013: 126-127). Die Einstrahlungsleistung der Sonne bei 65° N lag damals, zur Zeit des Holozänen Klimaoptimums, im Juli bei 465 W/m<sup>2</sup> und damit um 10% über dem heutigen Wert. Diese Werte gelten für den Zeitraum zwischen 9500 und 8000 v. Chr. (SIROCKO 2013: 120). Diese günstigen Bedingungen führten in unseren Breiten zu ausgedehnten Eichenmischwäldern. Haselnüsse lieferten eine überall vorzufindende und lagerbare Nahrung (SIROCKO 2013: 128). Ab 5500 v. Chr. beginnt der Mensch vermehrt in die Geosphäre einzugreifen. Neolithischer Ackerbau wird vor allem auf Lössboden betrieben, wo Eichenmischwald gerodet und Getreide angebaut wird (SIROCKO 2013: 122). In der Folge kam es zu verändernden Erosionsmengen und dies kann noch heute in Form von Kolluvienmächtigkeiten nachvollzogen werden. Dieser Neolithisierungsschub ging vor allem zwischen 5500 und 5000 v. Chr. vor sich und wird zeitlich mit dem Auftreten der Kultur der Linearbandkeramik in Verbindung gebracht (SIROCKO 2013: 123). Der Neolithisierungsschub ging einher mit warmen Sommern und sehr kühlen Wintern. Dies dürfte die Notwendigkeit der Lagerung von Nahrung mit sich gebracht haben (SIROCKO 2013: 128). In der darauf folgenden Periode, von 5000-4000 v. Chr. kehrte das Klima zu den Bedingungen des Klimaoptimums zurück, was wiederum warme Sommer und gemäßigte Winter mit sich brachte (SIROCKO 2013: 128). Betrachtet man dies, so wird ersichtlich, dass der Zeitraum der Kreisgrabenanlagenbesiedlung zusammenfällt mit einem Klimaoptimum, das eine Phase mit

sehr harten Wintern und warmen Sommern ablöste (SIROCKO 2013: 128). Vor diesem klimatischen Hintergrund muss man die Anlage Hornsburg also sehen.

#### 2.3.4. Vegetation und Fauna

Wie aus Pollenprofilen geschlussfolgert werden kann, bestanden ca. 80% der Baumbestände im Boreal (8690 – 7270 v. Chr.) und auch davor im Präboreal (9610 – 8690 v. Chr.) aus der Hasel (SIROCKO 2013: 116). In Präboreal vermehrten sich Kiefer und Birken weitläufig und ersetzten damit die zuvor vorhandene Steppenvegetation nach und nach. Mit dem langsamen Verbessern der Bodenbedingungen, begünstigt durch das warme Klima und sich daraus entwickelnder fruchtbarer Böden, folgten dann Hasel, Ulme und Eiche. Die Baumarten Buchen, Eschen und Linden benötigen schon sehr gut ausgebildete Parabraunerden, um zu gedeihen (SIROCKO 2013: 117). Mit dem Beginn des Holozäns breiteten sich die Baumbestände massiv aus und es entstand ein dichter Wald. Großes Wild, wie Mammuts oder Riesenhirsche waren an diese Bedingungen nicht angepasst und starben langsam aus (SIROCKO 2013: 116). Allerdings sind auch andere Gründe für das Aussterben der Megafauna denkbar, so z.B. deren verstärkte Bejagung. Zur Zeit der ersten Neolithisierung, also ca. 5500 v.Chr. waren demnach Eichenmischwälder vorherrschend und die Megafauna war nahezu ausgestorben (SIROCKO 2013: 122).

### 3. Die Fundstelle Hornsburg: Landschafts- und Geoarchäologie

#### 3.1. Die Verfüllungsmechanismen der Kreisgrabenanlage

Um Aussagen über die Nutzungsdauer und die Stabilität der Kreisgrabenanlagen bzw. der Spitzgräben zu treffen, wurden schon in den 70er Jahren vor allem von erdwissenschaftlicher Seite aus Versuche unternommen. Man fokussierte sich dabei besonders auf die Sedimentationsphasen in Kreisgräben (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 142). Zwischen 1973 und 1978 wurde am Versuchsgelände Kinzweiler in Nordrheinwestfalen durch J. Lüning ein Erosionsversuch an Spitzgräben durchgeführt (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 142). In diesem Zusammenhang wurden zwei Spitzgräben mit einer Tiefe und Breite von 3 m samt Wall in Lössmaterial angelegt. Es zeigte sich, dass die Ausrichtung der Gräben dabei einen Einfluss

auf den Verfallsprozess hatte. Im Graben mit West-Ostausrichtung erfolgte die Abwitterung und Verfüllung symmetrisch, wogegen sie im Nord-Süd ausgerichteten Graben asymmetrisch verlief. Die wetterbedingten Einflüsse in diesem Gebiet stammen meist aus dem Westen. Dieser Westeinfluss des Wetters spiegelte sich auch sehr gut im Zustand der Gräben wieder. Die Ostwand des äußeren Grabens war am stärksten von der Verwitterung betroffen. Darauf folgte die Nordwand die stärker als die Südwand betroffen war. Die Westwand war am besten

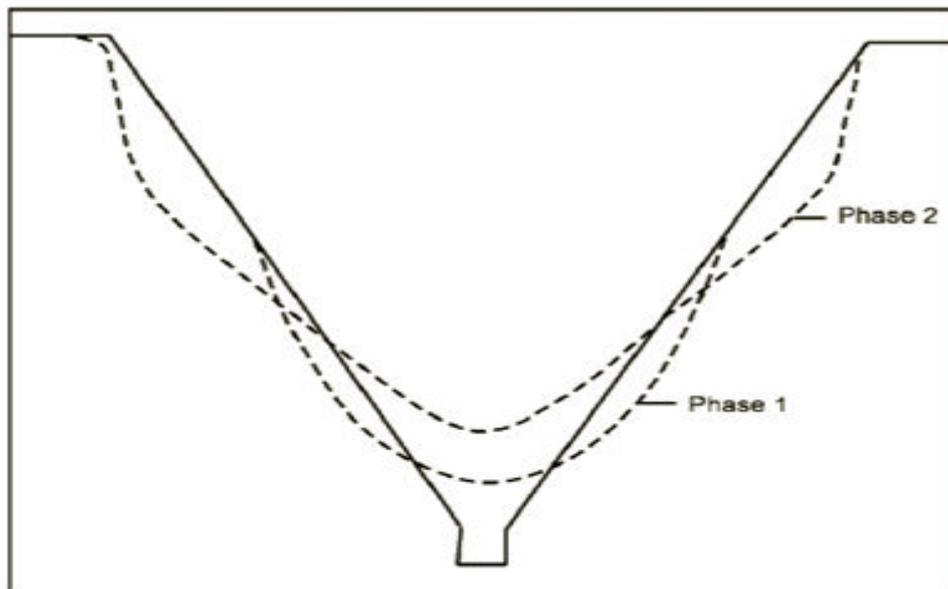


Abbildung 9: Schema der Verfüllungsphasen nach Lünig (KUPER et al., 1977) (Quelle: Loishandl-Weisz H. 2006: 6).

geschützt vom wetterbedingten Einfluss und es bildete sich hier eine geschlossene Bewuchsdecke aus, die wiederum die Erosionstätigkeit abmilderte (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 142). Dies zeigt wie elementar die Auswirkungen des Regionalklimas und die Ausrichtung des Grabens für den Verfüllungsprozess sind. Der Graben wurde innerhalb von sieben Jahren zwischen 50 cm und 80 cm hoch auf-sedimentiert. Zwei Phasen wurden dabei beobachtet (siehe Abbildung 9). Die erste Phase erstreckte sich über zwei bis drei Jahre. In diesem Zeitraum wurden die Flanken im unteren Bereich zurückverlagert. (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 142) Der Graben verlor in diesem Zeitraum seinen Spitzgrabencharakter. In der zweiten Phase, die ab dem vierten Beobachtungsjahr in Erscheinung trat, begann der obere Wandbereich zur Abbauzone zu werden. Unter dem Grashorizont entwickelte sich eine konkave Aushöhlung, deren Sturzmaterial die untere Grabenhälfte zunehmend auffüllte. In der oberen Hälfte bildeten sich an der Ostwand Stufen aus. Diese konnten einzelnen Jahren zugeordnet werden (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 142). Die bereits zuvor an Kreisgräben beobachteten asymmetrischen Verfüllungen wurden oft mit dem Vorhandensein eines Walles

in Verbindung gebracht, der aus dem Aushubmaterial gebildet worden sein soll. In seinem Werk „Kreisgrabenanlagen in Österreich“ geht R. Nikitsch davon aus, dass das Aushubmaterial höchstwahrscheinlich zwischen dem inneren und äußeren Graben und außerhalb der Anlage vermutet werden darf (NIKITSCH 1985). Wie der Versuch von J. Lüning aber zeigt, lassen sich die Asymmetrien der Verfüllung auf klimatische Einflüsse zurückführen (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 143). Über den Verbleib des Aushubmaterials kann bis heute nur gemutmaßt werden und es wird als nicht mehr nachweisbar eingestuft (LOISHANDL-WEISZ UND PETICZKA 2006: 144). Mitte der 80er Jahre wurden durch S. Verginis sedimentologische Untersuchungen an der Kreisgrabenanlage Karmegg in Niederösterreich durchgeführt. Dabei wurden Farbe, Korngrößenzusammensetzung, Karbonatgehalt, Reindichte, Rohdichte, Wassergehalt des ungestörten Bodens, Porenvolumen und Luftgehalt, maximale Wasserkapazität und Wasserdurchlässigkeit analysiert. Anhand der Analysen konnte festgestellt werden, dass die Grabenverfüllung in drei Phasen unterteilen (VERGINIS 1986). Der obere Bereich der Verfüllung fand rasch statt und weist einen episodischen Verlauf auf. Im unteren Teil des Profils erfolgte eine langsame Sedimentation. Dazwischen liegt ein Verlehmungshorizont, der den Übergangsbereich zwischen den beiden anderen Phasen markiert. Dieser Bereich muss wohl längere Zeit den Bedingungen an der Oberfläche ausgesetzt gewesen sein, denn er unterlag bereits bodenbildenden Prozessen (LOISHANDL-WEISZ 2007: 143). J. Petrasch und B. Kromer beobachteten bei der Ausgrabung der Kreisgrabenanlage Künzing-Unternberg genaueres zu den episodischen Verfüllungen. An einem einzigen Tag mit mehreren Regenfällen lagerten sich hier zwei helle und zwei dunkle Schichten ab. Ihre Gesamtmächtigkeit betrug 3 cm in einem 3,5 m tiefen Graben (PETRASCH UND KROMER 1989). Dies ließ den begründeten Verdacht aufkommen, dass die episodischen Verfüllungen nicht von feuchten und trockenen Phasen herrühren. Legt man die Sedimentationsraten dem Verfüllungsprozess zu Grunde, so wäre die Verfüllung einer 2 m tiefen Grabenspitze nach 10 - 20 Jahren abgeschlossen. Diese macht ständige Instandhaltungsarbeiten am Spitzgraben notwendig. In Künzing - Unternberg geschah diese „Erneuerung“ bis zu viermal. Dies ergibt rechnerisch eine Gesamtnutzungsdauer von 50-100 Jahren. Durch <sup>14</sup>C Datierungen wurde dieser Zeitraum bekräftigt (PETRASCH 1990: 457). In der Arbeit von Pavlů (PAVLŮ 1990), der mehrere bereits bodenkundlich untersuchte Grabenprofile vergleichend interpretierte, wird ebenfalls von drei verschiedenen Auffüllungsphasen ausgegangen. *„Die unterste besteht in der Regel aus dünnen, unregelmäßig über die Sohle verlaufenden Schichten, die bei großen Spitzgräben*

deutlich ausgeprägt sein können. Sie gehören in die Zeit des Bestehens der Gräben. Die zweite [...] enthält abwechselnd Material von der Innen- und von der Außenseite. [...] Die obere, ausgleichende Schicht, stammt immer aus einer späteren Periode, die in der Regel nach einer kürzeren oder längeren Pause, als sich die Haupteinfüllung schon deutlich gesetzt hatte.“ (PAVLŮ 1990: 177). Dieses Modell lässt sich laut Pavlů auf viele unterschiedliche Grabenanlagen anwenden. Die Größe und Form sollen dabei keine Rolle spielen (vgl. DRAGANITS, E. & PREH, A. 2014: 282-286). Diese Erkenntnisse lassen sich somit auch auf Hornsburg übertragen (vgl. Abbildung 10).

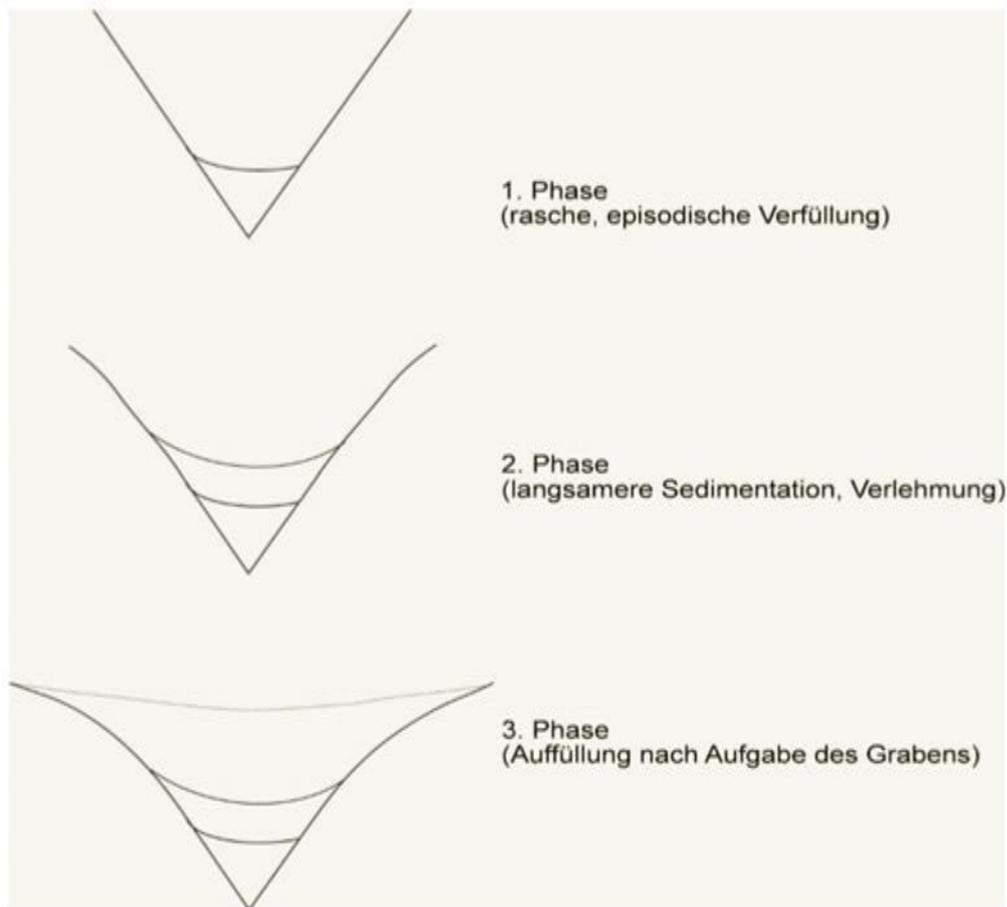


Abbildung 10: Schematischer Verfüllungsprozess nach Loishandl-Weisz (Quelle: Loishandl-Weisz H. 2006: 91, Abb. 23).

### 3.2. Sedimentologische Untersuchungen von Hornsburg 1 Graben II

Bereits 1991 wurde im Rahmen der Arbeiten von G. TRNKA (1991) die Kreisgrabenanlage Hornsburg 1 sedimentologisch untersucht. Am Grund des Profils ist zu erkennen, dass der Tongehalt von 280 cm - 250 cm abnimmt (vgl. Abbildung 11), bei gleichzeitiger Zunahme des  $\text{CaCO}_3$  - Gehalts. Unter natürlichen Bedingungen spricht dies für relativ kalte Bedingungen in denen kalkhaltiges Material abgelagert wurde und nicht genug Feuchte und Wärme für Bodenbildung vorhanden war. Da dieser Teil aber mehrmals geputzt bzw. von Erosionsmaterial der Flanken gesäubert wurde, ist hier vor allem Material zu sehen, welches vom Rand bzw. der damaligen Oberfläche stammte. Der Schluffgehalt nimmt in besagtem Bereich zu, der Sandanteil ab. Bis zu einer Tiefe von 190 cm nehmen dann sowohl Ton- als auch Kalkgehalt zu. Gleichzeitig nimmt der Schluffgehalt ab. Von 190 cm bis 160 cm sieht man dann eine Phase mit steigendem Tongehalt bei sinkendem Kalkgehalt (vgl. Abbildung 11). Dieser Phase folgt dann abrupt eine direkt gegenläufige Phase, die wiederum ab einer Tiefe 130 cm in eine Übergangsphase übergeht. Ab 100 cm beginnt dann wieder „Bodenbildung“, die sich bis zur rezenten Oberfläche ständig verstärkt (vgl. Abbildung 11). Beachtet werden müssen hierbei aber die landwirtschaftlichen Eingriffe im oberen Teil des Horizontes und die Erosionstätigkeit (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 19-27, 301, 347). Mit diesen Daten wurden Clusteranalysen durchgeführt. Zwar stammen die Werte nicht exakt von dem für diese

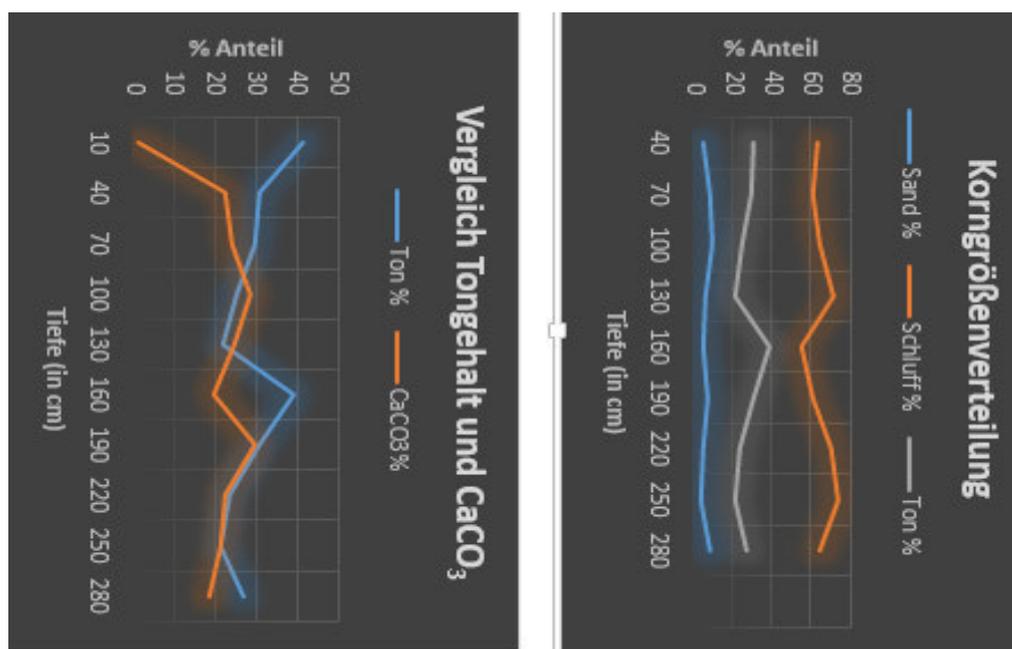


Abbildung 11: (links): Tongehalt und  $\text{CaCO}_3$  Gehalt nach Tiefe; (rechts): Korngrößenverteilung nach Tiefe (Datenquelle: Trnka 1991: 82 ff).

Arbeit beprobten Profil, allerdings aus demselben Graben derselben Kreisgrabenanlage und eigenen sich daher qualitativ für einen Vergleich (vgl. Abbildung 26)

## 4. Grundlagen der Bodenfarbe

### 4.1. Physikalische Grundlagen zu Farbe und Licht

#### 4.1.1. Licht

Da es sich bei Farbe um ein durch Licht erzeugtes Phänomen handelt, ist es zunächst notwendig, über das Wesen des Lichtes einige Gedanken anzustellen. Schon die alten Griechen beschäftigten sich mit dem Phänomen Licht. Ein Teil der Gelehrten ging davon aus, dass es sich bei Licht um einen Partikelstrahl handelt. Begründet wurde dies unter anderem durch den Philosophen Democritus (-400 v.Chr.) (NASSAU 2001: 23). Er ging davon aus, dass Materie nicht unendlich teilbar, sondern aus kleinsten Einheiten aufgebaut war. Die kleinsten unteilbaren Gebilde wurden als Atome bezeichnet. Diese Denkrichtung wurde und wird als Atomismus bezeichnet. Andere Gelehrte, wie z.B. Aristoteles, wiesen obige Denkweise zurück. Er demgegenüber ging davon aus, dass die Ursache des Lichtes in weiter Entfernung lag, jedoch durch ein Medium zu unserem Auge gelange (NASSAU 2001: 24). Euklid wiederum beschäftigte sich vornehmlich mit den geometrischen Gesetzen der Optik (3. Jh. V. Chr.), dem geradlinigen Ausbreiten und den Reflexionsgesetzen (LIEDKE UND POPP 2006: 5-7). Die geometrischen Gesetze der Lichtausbreitung wurden dann im 16. und 17. Jahrhundert erkannt. Die Regeln der Ausbreitung des Lichtes und seiner Brechung wurden von Snellius (1591-1626) und Descartes (1596-1650) bestätigt. Eine weitere Erkenntnis war die „Fresnelbeugung“, welche von Grimaldi (1618-1663) und Hooke (1635-1703) beobachtet wurde. Die Doppelbrechung wurde durch Bartholinus (1625-1698) nachgewiesen (LIPSON ET AL. 1995: 3-6). Viele dieser Erkenntnisse konnten jedoch nicht ohne weiteres in eine einheitliche Theorie des Lichtes überführt werden. Im 17. Jahrhundert entbrannte bezüglich der Frage ob es sich bei der Erscheinung des Lichtes um Teilchen oder um Wellen handelte ein wissenschaftlicher Streit. Newton (1642-1727) war der stärkste Vertreter der Teilchenhypothese (LIPSON ET AL. 1995: 4). Huygens (1629-1695) hingegen war Anhänger der Wellentheorie. Er ging davon aus, dass Licht sich wellenartig ausbreitet und zwar in einem elastischen, alles durchdringenden Medium, welches als Äther bezeichnet wurde (PEDROTTI ET AL. 2002: 3). Über Experimente von Young (1773-1829) zu Beugungsmustern am Doppelspalt

im Jahr 1801, konnte der Wellencharakter des Lichtes nachgewiesen werden. Bestätigt wurde diese Theorie durch Fraunhofer (1787-1826), der Beugungsmuster mit parallelem Licht erzeugte. Endgültig durchsetzen konnte sich die Wellentheorie des Lichtes dann 1818 durch ein Experiment von Fresnel und Arago (1786-1853), die einen hellen Fleck inmitten eines Schattens einer Scheibe finden konnten, die durch die Phasengleichheit des Lichtes an einem perfekt runden Objekt herrührt (LIPSON ET AL. 1995: 5). Ebenfalls von Fresnel konnte 1821 nachgewiesen werden, dass sich Licht in Transversalwellen ausbreitet und sich damit nicht analog zu den Longitudinalwellen des Schalls behandeln lässt (PEDROTTI ET AL. 2002: 3). Clerk Maxwell (1831 – 1879) fasste in seinen vier Maxwellgleichungen die Beschreibung von elektrischen und magnetischen Feldern zusammen. Licht konnte ab diesem Zeitpunkt als

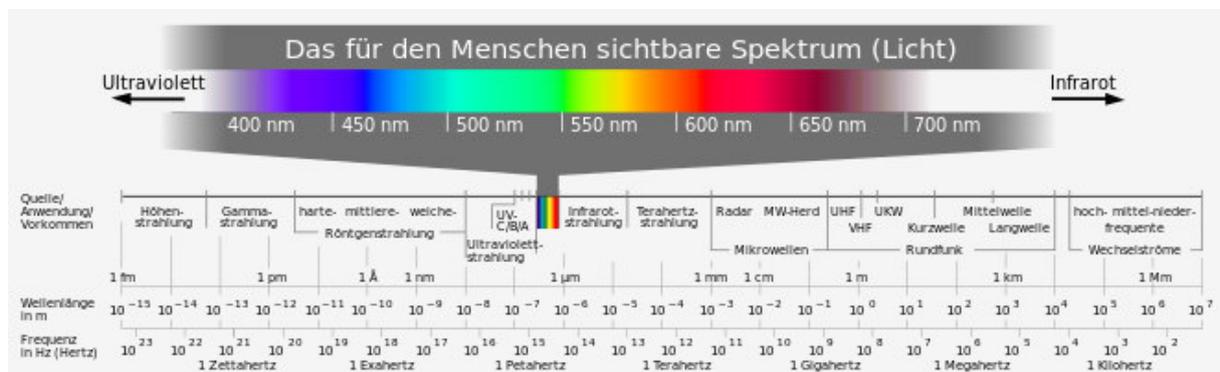


Abbildung 12: Für den Menschen sichtbares Spektrum der Elektromagnetischen Strahlung (Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum)).

elektromagnetische Welle aufgefasst werden und dadurch wurde es unter anderem möglich, die Geschwindigkeit des Lichtes vorauszusagen. Durch Maxwell wurde die Optik zu einem Teilgebiet der Elektrodynamik (KÜHLKE 2011: 1-2). Licht besteht also aus elektromagnetischen Wellen eines bestimmten Wellenbereich. Im Allgemeinen kann man sagen, dass Wellen sich räumlich ausbreitende Schwankungen einer physikalischen Größe sind (KÜHLKE 2011: 3). Im Gegenzug zu Schallwellen, wo die räumliche Ausbreitung durch Schwankungen der Dichte bzw. des Drucks in einem Medium hervorgerufen wird, geschieht dies beim Licht über die physikalischen Größen des magnetischen und elektrischen Feldes. Somit ist Licht auch in der Lage, sich ohne Medium auszubreiten (KÜHLKE 2011: 3). Das für den Menschen sichtbare Spektrum des Lichtes befindet sich im Bereich zwischen 380 nm und 780 nm (vgl. Abbildung 12). Je höher die Frequenz der elektromagnetischen Welle, desto größer ist auch die durch sie übertragene Energie. Ultraviolettes bzw. violettes Licht ist daher energetischer als rotes oder infrarotes Licht. Auch gibt es unterschiedliche Formen von Lichtquellen. Neben natürlichen Lichtquellen wie den Sternen bzw. der Sonne, die ihr Licht durch Kernfusionsprozesse

„erzeugen“, gibt es noch Temperaturstrahler und Lumineszenzstrahler. Bei Temperaturstrahlern wird zugeführte Energie zuerst in Wärmeenergie umgewandelt und im Anschluss vom erwärmten Körper als Strahlung abgeführt. Lumineszenzstrahler wiederum wandeln zugeführte Energie sofort in innere Energie um. Ein Beispiel dafür wäre die Anregung von gebundenen Elektronen in einem Atom. Die resultierende Strahlung dieses Prozesses ist für das jeweilige Atom oder Molekül charakteristisch (PEDROTTI ET AL. 2002: 4-6, 22-23). Diese angestellten Ausführungen dienen im Folgenden dem besseren Verständnis von Farbe.

#### 4.1.2. Farbe

Farbe und Farbmetrik sind ein komplexes Thema, mit welchem sich auch schon bedeutende Physiker wie Newton, v. Helmholtz und Schrödinger beschäftigt haben (BROCKES 1980: 169). Legt man die physikalische Beschreibung zu Grunde, dann handelt es sich bei Farbe um Licht einer diskreten Wellenlänge. Wenn weißes, sichtbares Licht durch ein Prisma gebrochen wird, so fächert sich der Lichtstrahl in Strahlen aller Farben des Spektrums auf. Diese verschiedenen einfarbigen Lichtstrahlen, zumindest diejenigen in dem für uns sichtbaren Spektrum, werden auch als monochromatisches Licht (griech. monos, allein; chroma, Farbe) bezeichnet. Alternativ wird auch der Begriff Spektrallicht verwendet. Dabei handelt es sich um Licht, welches idealerweise aus einer einzigen Wellenlänge besteht (FALK ET AL. 1990: 253). Allerdings lässt sich Farbe vom menschlichen Beobachter nicht eindeutig einer Wellenlänge zuordnen. Das Farbsehen wird Menschen überhaupt erst durch Photorezeptoren möglich, die durch photochemische Reaktionen in den Zellen neurale Erregungen erzeugen, die über den Sehnerv ans Gehirn weitergeleitet werden. Es sind dabei zwei Photorezeptorentypen zu unterscheiden. Zäpfchen, als die erste Kategorie, sind empfindlich für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau und Stäbchen, als die zweite Kategorie, sind für die hell-dunkel Wahrnehmung verantwortlich (LIEDKE UND POPP 2006: 101-107). Menschen nehmen Farbe nicht als exakte Wellenlänge wahr, sondern haben eher einen Farbeindruck oder auch ein Gefühl für Farbe. So ist es für uns möglich eine Farbe zu sehen, deren Wellenlänge überhaupt nicht vorhanden ist. Auch andersherum ist es möglich, dass eine Wellenlänge nicht wahrgenommen wird, obwohl sie vorhanden ist (FALK ET AL. 1990: 253). Die meisten Menschen ordnen Blau dem Wellenlängenbereich zwischen 455 nm – 485 nm zu, Gelb wird zwischen 570 nm - 590 nm wahrgenommen und Rot dem Wellenbereich oberhalb von 625 nm zugeordnet. Das reine Spektralgelb z.B. liegt jedoch bei exakt 580 nm. Die subjektive und sprachliche Ansprache von

Farben ist also sehr ungenau. Spektrallicht der Wellenlänge 600 nm wird zum Beispiel als metallisch-orange, mohnrot und als spektralorange bezeichnet, um nur einige sprachliche Differenzierungen zu nennen (FALK ET AL. 1990: 254-257). In der uns umgebenden Welt sind die meisten Farben jedoch nicht monochromatisch, sondern sie werden aus verschiedenen Wellenlängen zusammengesetzt. So erscheinen uns Pflanzen meist grün, da sie Licht im Bereich von 490 nm bis 620 nm nicht absorbieren. Die Absorptionsspektren von Chlorophyll a und b liegen außerhalb dieses Bereichs, weswegen die Strahlung im Bereich der sogenannten Grünlücke reflektiert wird. Das wahrgenommene Grün entspricht also nicht einer Wellenlänge, sondern einer ganzen Bandbreite von Wellenlängen (LIEDKE UND POPP 2006: 96-101). Es wird eine Gesamtverteilung der Wellenlängen wahrgenommen. Aus diesem Grund sehen wir auch Farben, die keinem Spektrallicht entsprechen. Zu diesen gehören u.a. Braun, Silber und schillerndes Grün (FALK ET AL. 1990: 254). Hieran wird ersichtlich, dass gerade solche Farben in der Natur recht häufig vorkommen, da sie selten monochromatisch sind, sondern einer ganzen Reihe von verschiedenen Wellenlängen entsprechen (FALK ET AL. 1990: 254). Würde man das reflektierte Licht eines grünen Pflanzenblattes an einem Prisma auffächern, so ergibt sich eine Intensitätsverteilung mit einem Peak im grünen Bereich. Grün ist zwar überwiegend vorhanden, jedoch ist auch Licht anderer nicht absorbierter Wellenlängen der Pflanzen messbar. Da das Auge gleichzeitig auftreffende Strahlen nicht trennt, sondern eine Art Mischung erzeugt, gibt es nahezu unendlich viele Möglichkeiten von Farbmischungen (FALK ET AL. 1990: 254). Daraus wird ersichtlich, dass die Bodenfarbmessung mittels Farbtafeln und dem „Munsell System“ im Feld sehr „ungenau“ bzw. hochgradig subjektiv ist, wenn es um den physikalischen Aspekt der Bodenfarbe, nämlich der Wellenlänge geht. Gerade diese Wellenlänge jedoch ist es, die qualitative Aussagen über die Bodenzusammensetzung geben kann. Zusätzlich problematisch ist, dass für das Farbsehen die Lichtquelle eine entscheidende Rolle spielt. Wir nehmen eigentlich nur Farben wahr, die durch Reflektion des Tageslichtes oder Umgebungslichtes von einem Körper in irgendeiner Form beeinflusst wird und von dort auf den Beobachter treffen. Somit kann der beobachtete Körper nur das abstrahlen, was er von außen auch erhält, sofern er kein Selbstleuchter ist. Dies bedeutet, dass die Farbe letztendlich völlig abhängig ist vom sie umgebenden Licht und den Bedingungen wie dieses auf den Körper trifft (BROCKES 1980: 169). Dies ist auch für die Fotografie ein wichtiger Faktor. Je nach Tagesuhrzeit oder Bewölkung verändert sich damit auch die Farbe im Bodenprofil. Da die Fotografien durch diesen Effekt beeinflusst werden, ist es immer

notwendig, Referenzwerte hinzuzuziehen. Im vorliegenden Fall sind diese Bezugsgrößen die Farbmesswerte aus dem Labor. Zusätzlich wird ein und derselbe Weißstandard auf jedem Foto abfotografiert und im Labor mit dem Photometer gemessen.

#### 4.1.3. Farbmimetrik

Neben dieser subjektiven und sprachlichen Einordnung von Farbe haben sich über die Zeit auch metrische Systeme entwickelt, die Farbe abzubilden versuchen. Das sehr weit verbreitete RGB System nutzt die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Aus diesen drei Farben lassen sich alle anderen Farben durch additive Farbmischung erzeugen. Additive Farbmischungen werden erzeugt, wenn Licht von Selbstleuchtern übereinander projiziert wird. Dabei wird die resultierende Farbe heller als die zur Mischung verwendeten Farben. Der Grund liegt darin, dass sich die Strahlungsenergien addieren. Mischt man grünes, blaues und rotes Licht, welches die gleiche Intensität besitzt, gleichermaßen übereinander, so erhält man weißes Licht. Man nennt die RGB Farben daher auch Lichtfarben (RICHTER UND TEICHERT 2009: 38). Das Gegenteil ist die subtraktive Farbmischung. Bei den meisten Objekten wird ein Teil des auftreffenden weißen Tageslichts, oder künstlich erzeugten Lichts, absorbiert und nur ein resultierender Rest reflektiert. Bei diesem Prozess werden vom weißen Licht bestimmte Wellenlängen entfernt bzw. subtrahiert (RICHTER UND TEICHERT 2009: 38). Wird aus weißem Licht, welches aus RGB gleicher Intensität besteht, eine der drei Farben entfernt, so erhält man die subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta und Yellow (CMY). Diese werden auch als Körperfarben bezeichnet (RICHTER UND TEICHERT 2009: 38). Beide Farbsysteme basieren auf einem dreidimensionalen Farbraum, der sich in einem sogenannten Farbwürfel darstellen lässt (siehe Abbildung 13). Die Grundlage dieses Systems wurde von der CIE (Commission Internationale d'Éclairage, dt.: Int. Beleuchtungskommision) im Jahr 1931 entwickelt und 1964 überarbeitet. Dabei handelt es sich um das CIE XYZ System und seit 1964 um das CIEUV und CIELAB System (VISCARRA ROSSEL ET AL. 2006a: 322). Dieser CIE Raum basiert auf der Annahme, dass sich alle Farben aus monochromatischem Licht der Wellenlängen 650 nm Rot, 530 nm Grün und 460 nm Blau mischen lassen. Reines Zyan lässt sich dann durch die Addition von Blau und Grün und der anschließenden Subtraktion von etwas Rot mischen. Aus der unten stehenden Abbildung (Abbildung 14 links) wird ersichtlich, dass um Gelb der Wellenlänge 579 nm zu erzeugen 36% Spektralrot, 66% Spektralgrün und -2% Spektralblau benötigt werden (FALK ET AL. 1990: 260). Eine andere Darstellungsform dieses Graphen ist in Abbildung 14

(rechts) dargestellt. Negative Farbmischungen sind aber eher ungünstig zur Berechnung von Farbwerten. Um dem Abhilfe zu schaffen, wurde auf drei imaginäre Farben, nämlich X, Y und Z zurückgegriffen. Mit diesen lässt sich nun ein Farbenzug darstellen, mit welchem sich mathematisch alle Farben ohne negative Anteile mischen lassen (FALK ET AL. 1990: 260-261). Die Spektralwertfunktionen wurden 1931 zunächst experimentell durch Beobachter erfasst und danach gemittelt und so der CIE Normalbeobachter definiert (siehe Abbildung 15 links). Die Ergebnisse wurden 1964 überarbeitet. Seitdem basieren viele andere Farbräume, wie z.B. RGB, CYMK und NTSC, auf der CIE Normalfarbtafel von 1964 (BROCKES 1980: 174) (Vgl. Abbildung 15 rechts).

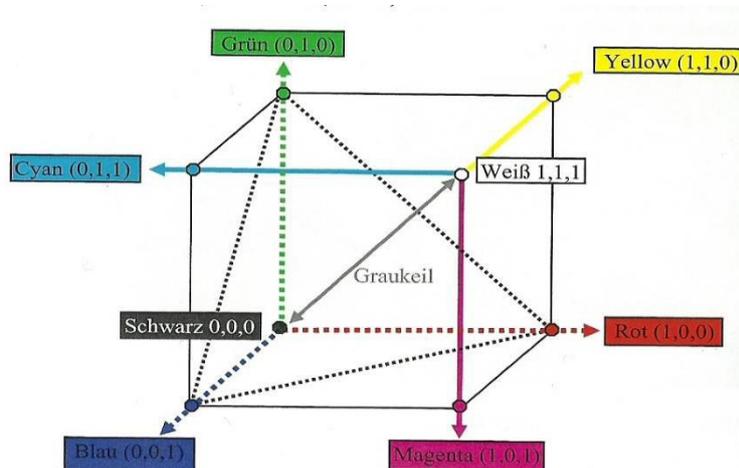


Abbildung 13: Farbwürfel des RGB und CMYK Farbraums (Quelle: Richter C. und Teichert B. 2009: 40).

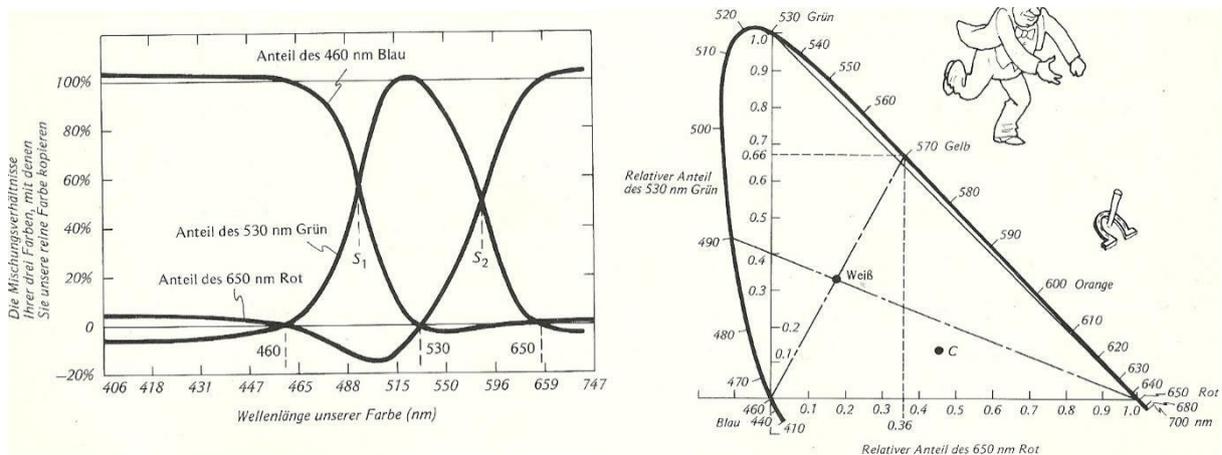


Abbildung 14: (links): Mischungsverhältnisse der drei Grundfarben 460 nm Blau, 530 nm Grün und 650 nm Rot, die zusammen jede monochromatische Farbe ergeben. Dazu wählt man eine Wellenlänge auf der x-Achse und zieht von diesem Punkt eine Gerade parallel zur Y-Achse. Die Schnittpunkte mit den Farbkurven ergeben die jeweiligen Farbanteile. (rechts): Die Mischungsverhältnisse von links in anderer Darstellung. Diese Form bildet die Grundlage für das CIE XYZ System. (Quelle: Falk et al. 1990: 260-261).

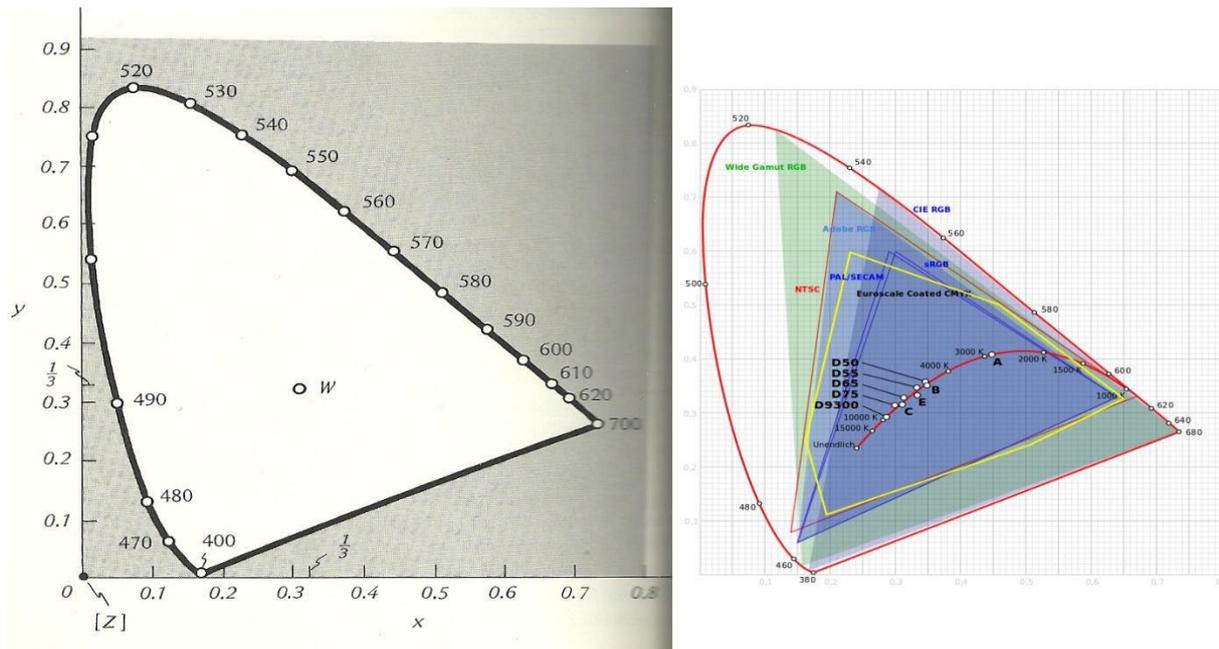


Abbildung 15: (links): Die CIE Normalfarbtafel. Im Gegensatz zur Abbildung 14 rechts gibt es bei ihr keine negativen Farbwerte mehr (Quelle: Falk et al. 1990: 262). (rechts): Farbräume die auf dem CIE Farbsystem basieren. Zu diesen gehören unter anderem RGB, NTSC und PAL. Aus diesem Grund sind diese Farbräume auch mathematisch ineinander überführbar. (Quelle: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/8/80/CIE\\_RGB-CMYK-Beleucht.svg/220px-CIE\\_RGB-CMYK-Beleucht.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/8/80/CIE_RGB-CMYK-Beleucht.svg/220px-CIE_RGB-CMYK-Beleucht.svg.png)).

#### 4.1.4. Das Munsellfarbsystem

Für die Farbensprache im visuellen Bereich zwischen 380 nm und 780 nm, wird in der Bodenkunde das „Munsell Farbsystem“ genutzt. Es werden bei diesem Farbsystem drei Parameter erfasst. Zum einen wird der Farbton ermittelt (engl. Hue). Der Farbton entspricht der vorherrschenden Hauptfarbe und unterscheidet eine Spektralfarbe von der anderen. Sie wird durch die vorherrschende Intensität festgelegt (FALK ET AL. 1990: 254). Der zweite Parameter ist die Farbtiefe, die auch als Intensität oder Sättigung bezeichnet wird (engl. Chroma). Sie bezeichnet die Reinheit der Farbe. Ist eine Farbe sehr satt, so befindet sich der Großteil der Intensität bei einer einzigen Wellenlänge (FALK ET AL. 1990: 254). Der dritte und letzte Parameter ist die Farbhelligkeit, die auch als „Dunkelwert“ oder „Grauwert“ bezeichnet wird (engl. Value) (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 265). Sie gibt Auskunft über die Gesamtintensität eines Lichtes. Sie kann von strahlend bis dämmerig reichen. Die Helligkeit wird vornehmlich dadurch bedingt, wie viel des einfallenden Lichtes von einer Oberfläche reflektiert wird (FALK et al. 1990: 255-257). Das von Munsell im Jahr 1909 ausgearbeitete Farbsystem geht dabei auf den Newton'schen Farbenkreis zurück (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL

2010: 265) (vgl. Abbildung 16). Die Komplementärfarben liegen auf diesem jeweils einander gegenüber. Es werden die Farbabschnitte Rot, Gelb, Grün und Violett unterschieden, die nach zunehmender Wellenlängenfrequenz angeordnet werden. Zwischen den jeweiligen Grundfarben ist ein Übergangsbereich, in welchem Mischungen dieser Farben abgebildet werden können. Die Darstellung der steigenden Wellenlängenfrequenz eines Farbtons erfolgt durch Ziffern 2,5; 5; 7,5 und 10 (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 265-266). Axial zum Newton'schen Farbkreis ist die Dunkelstufe bzw. der Farbwert angeordnet. Der Wert 10 entspricht dabei Weiß, der Wert 0 Schwarz. Die Intensität jeder Farbe des Farbkreises kann durch die Werte 0 bis 10 festgelegt werden, die radial zum Farbkreis aufgetragen werden. Man erhält so xyz Koordinaten, die den Farbwert im Munsell Farbraum eindeutig definieren können (siehe Abbildung 16a). Zu erwähnen ist auch, dass Übergangsbereiche abgebildet werden können z.B. durch 2.5/5 YR (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 265-266). Problematisch ist dabei, dass die Einteilung immer nach visuell subjektiven Kriterien verläuft. So kann es sein, dass dieselbe Bodenprobe von zwei Kartierern mit einer unterschiedlichen Farbe angesprochen wird. Außerdem ist es schwierig die Farbwerte des Munsell Systems in andere Farbräume zu überführen, da dieser nicht auf der CIE Normfarbtafel basiert.

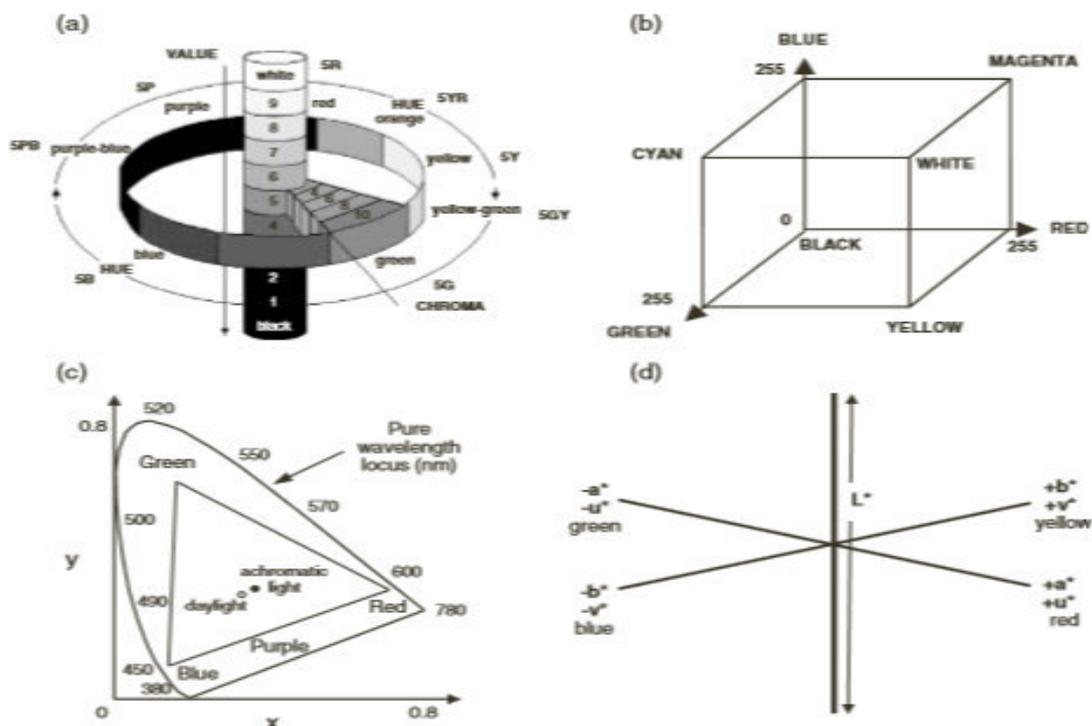


Abbildung 16: (a) Munsell Farbraum; (b) RGB/CYMK Farbwürfel; (c) CIE XYZ Farbraum; (d) CIE UV und CIE LAB Farbraum (Quelle: Viscarra Rosell et al. 2006: 323).

## 4.2. Bodenfarbe

### 4.2.1. Farbansprache

In der Bodenkunde erfolgt die Ansprache der Bodenfarbe anhand von Farbtafeln, an welchen die Farbe bzw. deren Bezeichnung festgelegt wird. In der Fachwelt durchgesetzt haben sich dafür die „Munsell Soil Color Charts“ (MUNSELL® COLOR, 2000). Die Ansprache durch die Kartierer erfolgt dabei direkt im Feld oder, im Falle des Laboranalytikers, im Labor. Die Bodenprobe muss dabei soweit durchfeuchtet sein, dass bei weiterer Befeuchtung keine Farbänderung mehr auftritt (AD-HOC-AG BODEN 2005: 109). Außerdem wird, wenn möglich, auch die trockene Bodenfarbe ermittelt. Zusätzlich wird zwischen Oberflächenfarbe und der Färbung der inneren Gefügeelemente differenziert, sollte ein offensichtlicher Unterschied bei der visuell bestimmbaren Farbe vorliegen. Handelt es sich um großflächige Bereiche von mehreren Farben nebeneinander in einem Horizont, werden die auftretenden Farben allesamt bestimmt. Gemäß ihres Flächenanteils werden sie der Reihe nach genannt. Ist das Auftreten kleinflächig, so wird gewöhnlich eine zusammenfassende Bezeichnung verwendet (AD-HOC-AG BODEN 2005: 109).

### 4.2.2. Bedeutung der Bodenfarbe

Im Oberboden (A-Horizonte) werden die meist vorherrschenden schwarzen, grauen und braunen Farbtöne größtenteils durch Huminstoffe hervorgerufen. Es lässt sich sagen, dass der Farbtrend von den „Fulvosäuren“ zu den „Huminen“ immer dunkler wird. Tonreiche Böden sind bei gleicher Färbung humusreicher wie weniger tonreiche Böden, da ihre Oberfläche größer ist. Die Bedeutung des Masseanteils der organischen Substanz für die Bodenfarbe ist ebenfalls erheblich. Bleibt der Kohlenstoffgehalt gleich, so verändert sich der Farbton zwischen 2-6 % organischer Substanz deutlich. Außerdem spielt die Feuchtigkeit eine wesentliche Rolle, da sie den Farbton generell verdunkelt. Je feuchter der Boden, desto dunkler erscheint er (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 265-266). Gelbe, braune, rote, blaue und grüne Farbtöne werden von verschiedenen Eisenmineralen hervorgerufen. Da das Eisen (Fe) aus dem mineralischen Ausgangsmaterial für die Bodenbildung stammt, sind diese für die Bodenfarbe unterhalb des A-Horizontes maßgeblich verantwortlich. Für die gemäßigten Breiten finden sich bevorzugt gelbbraun, braun und rotbraun gefärbte Böden, da hier das Goethit vorherrschend ist. Ins rötliche geht dies über, wenn Ferrihydrit vorkommt. Beispiele

für Böden mit solchen Farbtönen sind saure Braunerden, Bs-Horizonte von Podsolen und Go-Horizonte von Gleyen. In warmen Klimaten nehmen Böden oft kräftige Rottöne an. Dies wird durch Hämatit hervorgerufen. Je mehr Hämatit ein solcher Boden enthält, desto roter wird er. Der Anstieg erfolgt linear bis zu einem Hämatitgehalt von 5-10 %. Nach diesem Schwellenwert nimmt das Chroma der Farbe nicht mehr zu, da es seine Sättigung erreicht hat (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 265-266). Bei den eben erwähnten Formen liegt das Eisen in dreiwertiger Form oxidiert vor und ist schwer löslich. In reduzierter Form und der mobilen zweiwertigen Variante ist es leicht löslich und es können dabei graue, grüne und blaue Farbtöne auftreten. Diese tritt bevorzugt bei niedrigen Redoxpotentialwerten, also bei wenig Sauerstoffverfügbarkeit, auf (MORTIMER UND MÜLLER 2003: 230ff, 360ff). In der mobilen zweiwertigen Form wird das Eisen dann meist abtransportiert oder in Hydroxyverbindungen, also Verbindungen mit OH Molekülen bzw. Ionen, überführt (MORTIMER UND MÜLLER 2003: 103, 235-236). Nach Abtransport des Eisens wird die Eigenfarbe der übrigen Minerale sichtbar. Quarz erscheint fahlweiß. Lokale Calcit- und Gipsanreicherungen sowie Salzlösungen erzeugen ebenfalls weiße Verfärbungen. Tone und Silikate erscheinen meist grau. Sind kräftig blaugrüne Farbtöne anzutreffen, so kann man davon ausgehen, dass es sich um FE-hydroxy Verbindungen handelt. Bei Zufuhr von Sauerstoff, verlieren diese jedoch ihre Farbe. Die Farbtiefe und die Farbhelligkeit sind abhängig von diesen vorgestellten farbgebenden Komponenten. Der Farbton wird jedoch auch sehr stark von der Korngröße beeinflusst (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 266).

#### 4.2.3. Bodenfarbe als Indikator für Bodeneigenschaften und Prozesse

Die vorgestellten farbgebenden Komponenten dienen als Proxy für Bodeneigenschaften und vorherrschende Bodenprozesse. So kann die Verteilung der Farbtöne, der Sättigung und der Dunkelstufen als Indikator für die Intensität gewisser Prozesse der Bodengese verstanden werden. Zu diesen Prozessen zählen Verbraunung, Podsolierung, Vergleyung oder Lateritisierung (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 266). Wie schon erwähnt zeigen rote, gelbe und braune Farbtöne gewöhnlich aerobe Verhältnisse an und damit ein hohes Redoxpotential bzw. eine hohe Sauerstoffsättigung. Zusätzlich kann man dann davon ausgehen, dass der Boden selten wassergesättigt war. Böden mit hohem Hämatitanteil zeugen daher von feuchtwarmen Klimaten (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL 2010: 267). Gerade für die

Paläoumweltforschung oder die Geoarchäologie können Böden, bzw. deren Färbung, als wertvolle Klimaarchive genutzt werden.

#### 4.2.4. Digitale Boden „Morphometrie“

Da die Bodenfarbe als Proxy für verschiedene Bodeneigenschaften und Bodenprozesse herangezogen werden kann, wurden bereits zahlreiche Versuche unternommen diese nicht nur subjektiv über die Munsell Color Charts zu bestimmen. Es wurden von geowissenschaftlicher Seite mehrere Studien durchgeführt, die zum Ziel hatten, die Bodenfarbe über quantitative und digitale Methoden zu erfassen (BEN DOR E. ET AL. 2006; VISCARRA ROSSEL R.A. ET AL. 2010; STEFFENS M. UND BUDENBAUM M. 2013; MYERS D.B. 2011, McBRATNEY A.B. ET AL. 2010) Die Anwendung von Methoden und Techniken um Bodenprofilattribute quantitativ zu messen wird als „Digitale Boden Morphometrie“ bezeichnet (vgl. HARTEMINK ET AL. 2014). Die Ermittlung der Bodenfarbe ist nur ein Teilgebiet dieser Disziplin. Andere Anwendungsfelder sind unter anderem die Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit, der mineralischen Zusammensetzung und der Horizontabfolge. Zum Einsatz kommen hierzu Methoden der Geophysik, Geochemie und Fernerkundung (HARTEMINK ET AL 2014: 305-306). Der Vorteil dieser Techniken liegt in der Generierung nachvollziehbarer und reproduzierbarer Ergebnisse. Zusätzlich sind sie sowohl mit geringerem Aufwand, als auch geringeren Kosten durchzuführen als klassische Vorgehensweisen. Nichtsdestotrotz können die Anschaffungspreise dieser Geräte sehr hoch sein.

#### 4.2.5. Bodenfarbe in der Digitalen Boden Morphometrie

Mittels der Reflektionsspektroskopie lassen sich Spektren ermitteln, die für verschiedene Bodentypen und -zusammensetzungen charakteristisch sind. Auf diese Weise lassen sich somit schnell und kostengünstig bodenphysikalische, -chemische und -biologische Eigenschaften bestimmen. Bei diffuser Reflektionsspektroskopie benötigen die Proben zudem kaum Vorbereitungszeit und können ohne den Einsatz teurer Chemikalien auf Ihre Zusammensetzung untersucht werden (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 140). Die Spektren im Infrarotbereich enthalten reichhaltige Informationen über den zu Grunde liegenden Chemismus eines Stoffes. Sie liegen begründet in der Absorption von Strahlung auf molekularer Ebene (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 141). Die Frequenzen der Infrarotstrahlung

regen dabei sowohl leichtere Wasserstoffmolekülgruppen als auch Gruppen schwererer organischer Kohlenstoffverbindungen an. Ähnliches erfolgt auch bei anderen Gruppen von Mineralmolekülen. Die leichteren Wasserstoffatomgruppen werden schon im NIR Bereich zwischen 700 nm - 2500 nm stark in Schwingung versetzt, wogegen die schwereren Atome bzw. Moleküle erst später, im Bereich zwischen 2500 nm und 25000 nm, angeregt werden (SORIANO-DISLA et al. 2014: 146). Für die Aktivierung im subatomaren Bereich sind höhere Energieniveaus nötig. Im „VIS“ Bereich (480 nm - 780 nm) und „UV“ Bereich (250 nm - 380 nm) entstehen die Reflektionsspektren aufgrund von Elektronenübergängen (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 141). Problematisch kann dabei werden, dass manche Moleküle in ihrer spektralen Signatur mit anderen überlappen. Dies ist vor allem im Übergangsbereich vom sichtbaren Licht (VIS) zum Nahinfrarot (NIR) der Fall. Allerdings gibt es auch im mittleren Infrarotbereich (MIR) solche Ähnlichkeiten. Ein Beispiel dafür bilden die schon erwähnten Eisenminerale die Ihre „Peaks“, also den höchsten Intensitätsbereich ihrer Reflektion, ebenso wie andere Minerale, im Wellenlängenbereich 14286 nm bis 16667 nm haben (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 141; VISCARRA ROSSEL 2006b, 2009). Auch die Signaturen von  $-\text{COO}-$ , Frequenzen von assoziiertem Wasser und aromatische organische Gruppen im Bereich 6250 nm - 6339 nm zeigen diese Similaritäten (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 141). In zahlreichen Arbeiten wurden hierzu Messungen durchgeführt, um für verschiedene Bodenkennwerte „Libraries“ zu erstellen. Dies sind Listen oder Nachschlagewerke, die angeben, in welchen Wellenlängenbereichen Atome, Moleküle und Molekülgruppen charakteristische Reflektionsspektren und Emissionsspektren aufweisen. Es sei dafür auf SORIANO-DISLA ET AL. (2014) hingewiesen, wo diese Ergebnisse ausführlich zusammengefasst werden (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 148-156). Es lässt sich generell festhalten, dass die idealen Messräume im „MIR-NIR“ und „VIS-NIR“ Wellenlängenbereich liegen. Kombinationen des „UV-VIS-NIR“ Bereichs und „VIS-NIR-MIR“ Bereichs lieferten keine oder schlechte Ergebnisse für die Ableitung der Bodenkennwerte (SORIANO-DISLA ET AL. 2014: 172). Versuche, das Prinzip des Proximal Sensing durch Digitalfotografie durchzuführen, gab es ebenfalls. Es ergab sich, dass diese durchaus eingesetzt werden kann, um den Eisengehalt und die Menge des „organic Carbon“ zu bestimmen (VISCARRA ROSELL ET AL. 2006a). Dabei wurden Proben von Feinerde unter kontrollierten Lichtbedingungen fotografiert. Die Farbwerte, die über das Spektrometer unter denselben kontrollierten Lichtbedingungen ermittelt wurden, korrelierten dabei sehr stark und lieferten ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,98$  (VISCARRA ROSSEL ET AL. 2008). Erst kürzlich

wurde sogar eine Anwendung für Mobiltelefone entwickelt, die in der Lage war, die Bodenfarbe von RGB Farbwerten in Munsell oder CIE Farbräume zu überführen. Die Munsellfarbwerte für die Böden, die bereits zuvor bestimmt worden waren, ließen sich durch die Fotokamera samt Applikation (App) gut reproduzieren. Allerdings ist diese Technik bisher noch nicht für alle Handy-Kameras nutzbar, da unter kontrollierten Lichtbedingungen fotografiert werden muss und die Funktion sehr stark von der Kameraqualität abhängig ist (GÓMEZ-ROBLEDO ET AL. 2013). Es liegt daher nahe, die Digitalfotografie auch für die Bestimmung von Horizonten eines Bodenprofils einzusetzen. Bisher wurde lediglich versucht dies mittels Spektrometern im Feld durchzuführen. Da es sehr viele Bilder von Bodenprofilen gibt, auf denen angebliche Horizonte und deren Grenzen zu erkennen sein sollen, wäre es für viele Forscher der Geowissenschaften und (Geo-) Archäologie hilfreich und sinnvoll, eine Möglichkeit zu haben, Horizonte nachvollziehbar und reproduzierbar ermitteln zu können. Außerdem könnten so bereits im Feld Horizonte und ihre Grenzen zeitnah, mittels digitaler Morphometrie, ermittelt werden.

## 5. Methoden

### 5.1. Probenahme

Die Beprobung erfolgte am Mittwoch, den 22.10.2014 (siehe Abbildung 17). Zu erwähnen wäre, dass es in der Nacht zuvor zu heftigen stürmischen Unwettern in Niederösterreich kam, weswegen die Profilwand stark durchfeuchtet war. Die Lichtbedingungen waren aufgrund der vollständigen Bewölkung diffus. Die Temperatur lag bei ca. 7° C. In equidistanten Abständen wurde alle 10 cm eine gestörte Probe entnommen. Verwendet wurde dafür ein Handbohrer, mit dem die Proben orthogonal zum Profilverlauf entnommen wurden. Da sich dies aber als sehr mühsam herausstellte und die Probenmenge sehr gering war, wurden an den Bohrstellen zusätzlich Proben oberflächennah entnommen (siehe Abbildung 17). Beide Probentypen wurden in unterschiedlichen Behältnissen aufbewahrt. Das Digitalfoto des Profils wurde am selben Tag um 12.21 Uhr aufgenommen. Dafür wurde eine 12 Megapixel Kamera von Panasonic (Panasonic Lumix DMC-FS10) verwendet. Das vom Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und virtuelle Archäologie zur Verfügung gestellte Digitalfoto im VIS Bereich wurde am 21.10.2014 um 8.35 Uhr erstellt. Es handelt sich dabei um ein hochauflösendes Digitalfoto, welches aus verschiedenen Einzelbildern erstellt wurde (siehe Abbildung 18a). Diese wurden aus verschiedenen Positionen aufgenommen. Der Grund für



*Abbildung 17: Probenahme an der Kreisgrabenprofilwand in Hornsburg. Anlage Hornsburg 1 Graben 2.*

diese Aufnahmetechnik rührt daher, da dieses Bild aufgenommen wurde, um die „Structure from Motion“ (SfM) Technik anzuwenden. Diese dient eigentlich zur Erstellung von digitalen Geländemodellen, was jedoch für die Zwecke dieser Arbeit keine Rolle spielt. Für genaue Informationen zu dieser Technik sei jedoch auf die Arbeit von Fonstad et al. verwiesen (FONSTAD ET AL. 2013: 421-430). Die Digitalfotographie im „UV“ und „IR“ Bereich (siehe Abbildung 18 b und c) wurde mit einem UV-Filteraufsatz und Infrarotfilteraufsatz für gewöhnliche Kameras erstellt. Es sei darauf hingewiesen, dass das Profil zum Zeitpunkt der Aufnahmen durch das Ludwig Boltzmann Institut von einem Zelt überdacht war, um diffuse Lichtbedingungen zu gewährleisten. Die Aufnahmen im „UV“ und „IR“ Bereich entstanden Anfang Oktober (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: (oben): IR Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt. (mitte): UV Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt; (unten): VIS Profilaufnahme samt extrahiertem Profilausschnitt.

## 5.2. Laboranalytik

Im Labor wurden die gestörten Bodenproben zunächst luftgetrocknet. Da die Menge der mit dem Handbohrer entnommenen Proben zu gering war, wurden ausschließlich die oberflächennah entnommenen Mischproben verwendet. Im Anschluss daran wurden die luftgetrocknenen Proben mittels Mörser zerkleinert und mit einem Sieb in Petrischalen gefüllt. Die erhaltene „Feinerde“ ( $\leq 2\text{mm}$ ) stand dann für die Beprobung mit einem Farbmessgerät, dem colorLite sph850, bereit (siehe Abbildung 19 rechts). Dieses verfügt über eine Referenzlichtquelle. Es handelt sich dabei um die Normallichtart D65. Das Spektrum, das diese abstrahlt entspricht der Tageslichtphase mit der entsprechenden Farbtemperatur von  $6500^\circ\text{K}$  (Kelvin) eines schwarzen Strahlers (BROCKES 1980: 169) (siehe Abbildung 19 links). Dabei wurde jede Messung für jede Probe drei Mal durchgeführt, um Messfehler ausschließen zu

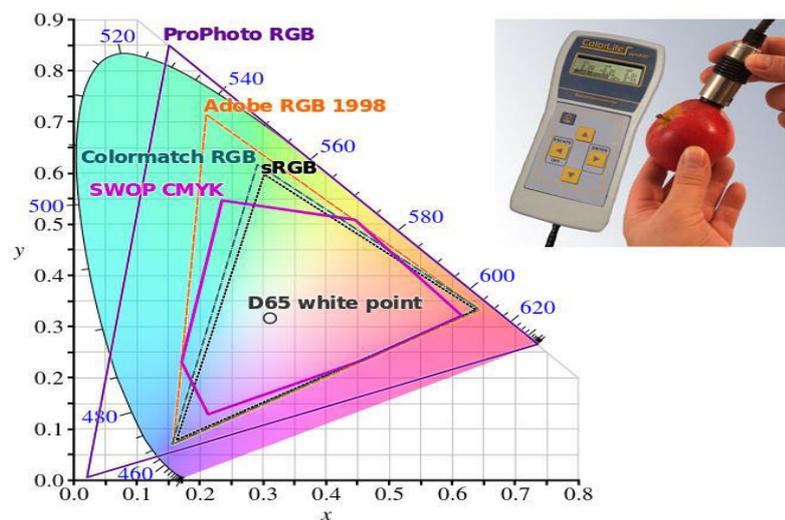


Abbildung 19: (links): Verortung des Weißpunktes des D65 Referenzlichts innerhalb des CIE Normalfarbraums (Quelle: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy\\_gamut\\_comparison.svg#/media/File:CIE1931xy\\_gamut\\_comparison.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg#/media/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg)) ; (rechts): Verwendetes Spektralphotometer der Firma „ColorLite“ (Quelle: <http://www.colorlite.de/de/sph850>).

können. Man erhält auf diese Weise Spektralwerte im „VIS“ Bereich zwischen  $400\text{ nm}$  und  $700\text{ nm}$  bzw. deren Intensitäten. Die Intensitäten werden vergleichbar gemacht durch die Zugrundelegung von einem Referenzweiß. Außerdem erhält man die Farbwerte im CIELAB Farbraum und im CIE XYZ Farbraum. Diese lassen sich über Algorithmen wiederum in den RGB Raum überführen. Für weitere Transformationen stehen ebenfalls Algorithmen zur Verfügung. Um aus den CIE XYZ Werten die RGB Werte zu erhalten, müssen diese mit einer Matrix multipliziert werden (siehe Seite 41) (VISCARRA ROSSEL ET AL. 2006A: 326-329). Die Matrix wandelt jeden Wert des CIE XYZ Farbraumes in den RGB Farbraum um. Dies wird möglich, da alle

Farbräume, die auf der Grundlage des CIE Farbraumes gründen, durch mathematische Transformation ineinander überführbar sind.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 3,240479 & -1,537150 & -0,498535 \\ -0,969256 & 1,875992 & 0,041556 \\ 0,055648 & -0,204043 & 1,057311 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

### 5.3. Bildbearbeitung

#### 5.3.1. Georeferenzierung mit Arc Gis 10.2

Zunächst werden die Bilder georeferenziert. Dies geschieht über das Programm „Arc Map 10.2“. Dazu wurden Passpunkte, die im Profil mit weißen Markerpins abgesteckt wurden, mit einer Totalstation erfasst. Diese Punkte enthalten x, y und z Koordinaten, die der Länge der Breite und der Höhe entsprechen. Die ermittelten Passpunkte werden in ein „ASCII File“ übertragen, aus welchem wiederum ein „Punkt Shapefile“ erzeugt wird. Dies geschieht mittels des Befehls „ASCII to Point“ in Arc Map 10.2 (® ESRI). Diese Passpunkte werden im Anschluss denselben, auf dem Bild zu erkennenden, Markern durch Georeferenzierung zugeordnet. Nun ist das Bild im „Realraum“ einer Koordinate zuzuordnen. Dieses erste referenzierte Bild liefert dann die Vorlage für die anderen Bilder. Da auf allen Bildern die Marker an gleicher Stelle angebracht sind, müssen die bisher unreferenzierten Bilder nur noch an den Markern des georeferenzierten Bildes ausgerichtet werden. Um das gesamte Profil ablichten zu können, waren zwei persönliche Aufnahmen notwendig. Da diese nicht frontal aufgenommen werden konnten, liegt eine Verzerrung der Bilder vor. Durch den Befehl „Rectification“ müssen diese nach erfolgter Georeferenzierung noch entzerrt werden. Im Anschluss werden mit dem Befehl „Mosaic to Raster“ beide Bilder in ein einziges überführt. Im nächsten Schritt wird ein Polygon mit dem Namen „Cutrahmen“ als Feature Class erstellt. Dies geschieht im selben Koordinatensystem, in welchem die Bilder nach der Referenzierung vorliegen. Dieser „Cutrahmen“ stellt den Bereich dar, der ausgeschnitten werden soll. Die Bilder der Profile sollen nämlich so zugeschnitten werden, dass nur der Bereich zu erkennen bzw. zu analysieren ist, in welchem beprobt wurde. Da die Probeentnahme erst ab einer Tiefe von 10 cm erfolgte, beginnt der „Cutrahmen“ erst ab einer Profiltiefe von 5cm und erstreckt sich bis zu einer Tiefe von 285 cm. Der Grund liegt darin, dass die RGB Werte beim Skalieren des Bildes gemittelt werden. Daher entspricht der Bereich für die Bodenprobe in einer Tiefe von 10 cm, im Bild dem Pixelbereich zwischen 5 cm und 15 cm. Bei der Bodenprobe aus 280 cm Tiefe liegt der

entsprechende RGB Mittelwert der Pixel zwischen 275 cm und 285 cm vor. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um die Ergebnisse zwischen Laboranalytik und Ergebnissen der Digitalfotografie vergleichbar zu machen. Mit der „Arc Map 10.2“ wird nun von jedem Bild der Bereich des „Cutrahmen“ über das ArcMap 10.2 (® ESRI) Werkzeug „Cut“ extrahiert. Die nun erhaltenen Profilbilder werden für das persönliche Foto („MYVIS“), das UV („UV“), IR („IR“) und das Foto der Archäologen („VIS“) erstellt und stehen nun zur Analyse zur bereit.

### 5.3.2. Bildbearbeitung mit Arc Gis 10.2 und GIMP 2.8

Da im Labor für jede Bodenprobe, die im Abstand von 10 cm entnommen wurde, nur ein Farbwert ermittelt worden ist, müssen auch die Bilder der Profilausschnitte auf einen Farbwert pro 10 cm reduziert werden. Dies geschieht ebenfalls mit Arc Map 10.2 (® Esri) oder mit dem Werkzeug „Bild skalieren“ in GIMP 2.8 (GÜNTHER 1999: 99). Die ausgeschnittenen Bilder der einzelnen Profile werden dabei in das „JPEG“ Format exportiert und ihre geometrische Auflösung wird angepasst. Das Bild wird auf eine Auflösung von 1\*28 skaliert. Bei „MYVIS“ bedeutet dies, dass die Auflösung von 645\*11868 und damit 96 „dots per inch“ (dpi), also Pixel pro Zoll (25,4mm), auf 1\*28 und damit 0.23 „dots per inch“ (dpi) vermindert wird (RICHTER UND TEICHERT 2009: 15). Von diesen nun neu skalierten Profilausschnitten können nun die 28 Pixelwerte mit der Arc Map 10.2 Funktion „Pixel Inspector“ ausgelesen werden und in eine Excel Tabelle überführt werden. Möglich ist es auch, diese Werte über die Funktion „Raster to ASCII“ in ein Textfile zu überführen. Man erhält so für jedes Profilbild einen einzigen RGB Wert pro 10 cm. Zusätzlich werden die 28 RGB Laborwerte ebenfalls in diese Excel Tabelle eingelesen. Alle diese Werte werden dann in eine Textdatei überführt. Nun erhält man ein Textfile für jedes einzelne Bild, das für statistische Auswertungen mit R (® CRAN PROJEKT) zur Verfügung steht.

### 5.4. Statistische Auswertung

Es ist das Ziel der Arbeit, nur über die RGB Werte der Digitalfotographie und ohne weitere Informationen das Profil in Horizonte einzuteilen. Dazu muss nun eine Möglichkeit gefunden werden, aus den 28 Werten der einzelnen Profile unterschiedliche Gruppen zu ermitteln. Da

zunächst nicht bekannt ist, wie viele mögliche Gruppen es geben kann, muss diese Einteilung statistisch erfolgen. Zunächst wird mit den RGB Werten eine Faktoren- und Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, um festzustellen, ob eine Variable ausreicht, den Großteil der Variation zu erklären. Ist dies der Fall, reicht es, eine Variable für die Clusteranalyse heranzuziehen. Da die RGB Werte miteinander hochkorreliert sind, kann dies erwartet werden (VISCARRA ROSSEL ET AL. 2008: 153).

#### 5.4.1. Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse dient dazu, mehrere Variablen auf Hauptkomponenten abzubilden, die dann den Großteil der Variationen erklären können. Ziel ist es, die gesamte Varianz einer Anzahl von  $x$  Variablen durch neue gemeinsame Variablen, die Hauptkomponenten, zu erklären. Diese repräsentieren dabei im Idealfall Gruppen von Variablen, die ähnliches aussagen. Der Grund der Durchführung einer solchen Analyse liegt darin, dass wenige Hauptkomponenten eine ganze Reihe von Variablen abbilden können, was die Handhabung großer Datensätze mit vielen Variablen erheblich erleichtert. Diese Hauptkomponenten ermöglichen dann die gesamte Variation der ursprünglichen Datenmatrix zu reproduzieren. Jede Variable lässt sich damit als Linearkombination mit der Hauptkomponente in einer Regressionsanalyse darstellen (BAHRENBURG ET AL. 2008: 193-199). Bei der Hauptkomponentenanalyse ist die gesamte Varianz aller Variablen auch die gemeinsame Varianz. Bei der Faktorenanalyse hingegen ist die Varianz aller Variablen nur ein Teil der gesamten Varianz (BAHRENBURG ET AL. 2008: 215). Man geht davon aus, dass nicht die gesamte Variation des Datensatzes durch komplexe Größen erklärt werden kann, sondern dass die Variablen für sich selbst auch noch einen Aussagewert haben, der nicht durch einen einzelnen Faktor, der die gemeinsame Variation erklärt, ausgedrückt werden kann. Selbst wenn der Korrelationskoeffizient sehr hoch ist, also  $\leq |1|$ , messen die einzelnen Variablen etwas Unterschiedliches (BAHRENBURG ET AL. 2008: 194-195). Für die statistischen Analysen, wird das Statistikprogramm Excel 2013 und „R“ mit der Erweiterung „R Commander“ verwendet (<sup>®</sup>CRAN PROJEKT - [HTTP://CRAN.R-PROJECT.ORG/](http://cran.r-project.org/)). Zur Bestimmung der nun folgenden Werte werden die Funktionen „cor“, „component loading“ und „factanal“ genutzt. Zur Berechnung der Korrelationsmatritzen wird die Berechnung nach „Spearman“ eingesetzt. Wie aus den Korrelationsmatritzen hervorgeht, sind alle drei Variablen, nämlich die R, G und B Werte,

hochkorreliert. Dies gilt für jedes der Profile, unabhängig davon, ob der VIS, IR oder UV Bereich untersucht wird. Der niedrigste ermittelte Wert unter allen Korrelationsmatrizen liegt bei 0,8950 zwischen dem R und B Wert für das VIS Profil (vgl. Tabelle 1). Generell liegt die geringste Korrelation zwischen den B und R Werten vor und zwar bei 0,9708 für die RGB Werte der Laborfarbmessung („LAB-VIS“), bei 0,9236 für das „MYVIS“ Profil und bei 0,9567 für das „IR“ Profil. Die einzige Ausnahme bildet das „UV“ Profil bei dem die geringste Korrelation zwischen dem R und G Wert zu finden ist und bei 0,9722 liegt. Es bietet sich daher an, Hauptkomponenten zu extrahieren. Es konnten dabei drei Hauptkomponenten extrahiert werden, wobei für jedes der Profilbilder eine Hauptkomponente ermittelt werden kann, die im schlechtesten Fall, bei dem VIS Profil, > 96% der gemeinsamen Varianz erklären konnte. Diese Hauptkomponente erklärt die Gesamtvariationen der drei Werte daher annähernd so gut wie alle drei RGB Variablen zusammen und kann für die Clusteranalyse herangezogen werden.

#### 5.4.2. Faktoranalyse

Die Faktoranalyse ermittelte für jedes der Profile einen Faktor, der im schlechtesten Falle, bei „MYVIS“, 95,2%, der Varianz erklärt. Die Faktorladungen wiederum zeigen, wie sehr die Varianz durch einen der Ursprungsvariablen, R, G oder B, erklärt werden kann. Wie aus der Tabelle 1 zu entnehmen ist, liegen die Faktorladungen für jeden Wert grundsätzlich mindestens über 0,942. Die geringsten Faktorladungen bei den „VIS“ und „IR“ Aufnahmen ergeben sich für die B Werte. Bei der UV Aufnahme sind es die G Werte. Durchschnittlich sind die größten Faktorladungen im G Bereich vorzufinden (0,9942), gefolgt von den R (0,9884) und B (0,9746) Werten. Insgesamt gesehen sind die Faktorladungen aber generell sehr hoch. Es erscheint daher an und für sich ausreichend nur einen Wert, nämlich entweder den R, G oder B Wert heranzuziehen, um die Clusterbildung durchzuführen, da bereits der schlechteste Wert immer noch eine Faktorladung von 0,942 aufweist und damit 94,2% der Varianz des Faktors erklären kann.

Tabelle 1: Hauptkomponenten und Faktorladungen der RGB Werte über alle Profilaufnahmen.

	VIS_LAB	VIS	MYVIS	IR	UV	Schnitt
Hauptkomponente	0.9900	0.9634	0.9664	0.9849	0.9902	
Faktor	0.987	0.957	0,952	0.981	0.985	
Faktorladung R	0.992	0.979	0.987	0.987	0.997	0.9884
Faktorladung G	0.998	0.998	0.998	0.998	0.982	0.9942
Faktorladung B	0.989	0.958	0.942	0.986	0.998	0.9746

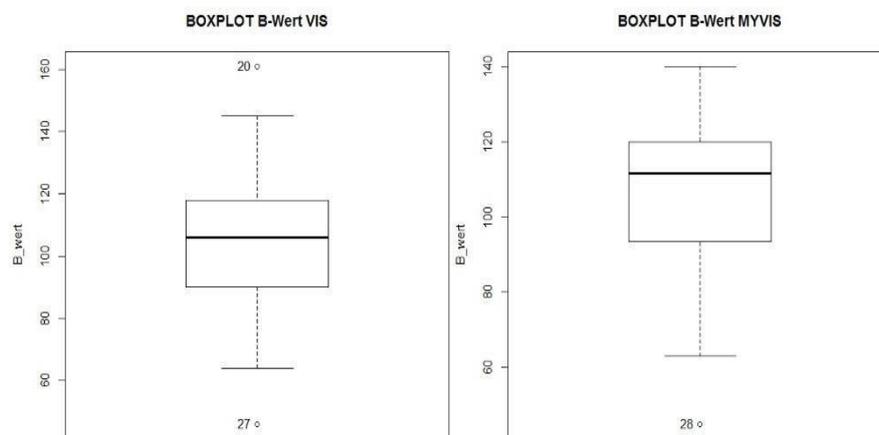


Abbildung 20: Boxplots zur Bestimmung von Ausreißern.

Um Ausreißer graphisch zu ermitteln, werden Boxplots für jede R, B und G Variable erstellt (siehe Abbildung 20). Ausreißer lassen sich dabei für die B Werte bei den Aufnahmen „VIS“ und „MYVIS“ finden. Bei der IR Aufnahme, der „UV“ Aufnahme und der Farbbestimmung im Labor lassen sich keine Ausreißer finden. Bei „MYVIS“ ist dies der Wert 28, welcher der Tiefe von 280 cm entspricht. Beim „VIS-Profil“ sind es die Werte 20 und 27. Da die B Werte aber ohnehin die geringsten, wenngleich immer noch sehr hohen Faktorladungen aufweisen und auch die Hauptkomponenten durch diese Ausreißer beeinflusst werden, soll für die Clusteranalyse ausschließlich der G oder R Wert verwendet werden. Da der G Wert die durchschnittlich höchsten Faktorladungen aufweist, soll mit ihm die Clusteranalyse durchgeführt werden.

#### 5.4.3. Die Clusteranalyse

Bei der Clusteranalyse werden die einzelnen Raumobjekte, in unserem Fall die Farbwerte je 10 cm, aufgrund bestimmter Eigenschaften zu größeren Gruppen, den Clustern

zusammengeführt. Diese Einteilung erfolgt über Ähnlichkeits- bzw. Unähnlichkeitsmaße. Jede Raumeinheit wird dabei genau einem Typ zugeordnet (BAHRENBURG ET AL. 2008: 193-199). Für den Gruppierungsvorgang lassen sich zwei Verfahren unterscheiden. Die hierarchische Clusteranalyse ermittelt schrittweise die Gruppen. Es gibt zwei Vorgehensweisen bei dieser Clustermethode. Die „Divisive“ Methode geht zu Beginn von einer einzigen Gruppe aus, in der alle Raumeinheiten vorhanden sind und gabelt diese Schritt für Schritt auf. Den umgekehrten Weg beschreitet die „Agglomerative“ Vorgehensweise. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es so viele Gruppen wie Raumeinheiten gibt und diese werden schrittweise zusammengefasst (BAHRENBURG ET AL. 2008: 261). Die nicht hierarchischen Clusterbildungsmethoden gehen von einer bereits bekannten Anzahl an Gruppen aus, für deren Gruppierung dann ein festgelegtes Ähnlichkeitsmaß angewandt wird. Diese Methode ist sehr viel rechenaufwendiger. Außerdem ist sie nicht in den gängigen Statistik Programmen implementiert (BAHRENBURG ET AL. 2008: 262). Im vorliegenden Fall wird ein „hierarchisch - agglomeratives“ Verfahren Anwendung finden, um die Gruppenanzahl zu bestimmen. Die Nähe bzw. Entfernung der Variablen zueinander wird über das von den Variablen aufgespannte Koordinatensystem festgelegt. Die Entfernung bzw. Nähe dieser Variablen innerhalb dieses Koordinatensystem wird über ein Ähnlichkeitsmaß ermittelt. Die Auswahl des Ähnlichkeitsmaßes beeinflusst dabei die Zuordnung der Cluster. Zu unterscheiden sind die Distanzmaße und die Ähnlichkeitsmaße. Zur ersteren gehört die euklidische Distanz, das Quadrat der euklidischen Distanz und die „Manhattan“ bzw. „City-Block“ Distanz. Die euklidische Distanz bestimmt die „Luftlinie“ zwischen den Variablen und wird für die meisten Fälle angewandt (BAHRENBURG ET AL. 2008: 263). Die quadratische Form dieses Algorithmus gewichtet größere Distanzen stärker (BAHRENBURG ET AL. 2008: 264). Die Manhattan bzw. City-Block Distanz nutzt als Distanzmaß die Strecke zwischen den Punkten entlang der Koordinatenachse, was zu sehr großen Empfindlichkeiten in Bezug auf Ausreißer führen kann (BAHRENBURG ET AL. 2008: 263). Die zweite Gruppe sind die Ähnlichkeitsmaße. Hierbei werden die Raumpunkte als Endpunkte eines Vektors betrachtet, die ihren Ursprung allesamt im Koordinatennullpunkt haben. Herangezogen wird in diesem Fall der Korrelationskoeffizient zwischen den Raumeinheiten. Genauer gesagt, dient der Cosinus des Winkels zwischen zwei Vektoren als Ähnlichkeitsmaß, für das die Werte der Variablen jedoch standardisiert werden müssen. Zudem sind Ähnlichkeitsmaße in den gängigen Statistikprogrammen nicht verfügbar ist (BAHRENBURG ET AL. 2008: 264). In unserem Fall soll daher ein Distanzmaß verwendet werden.

#### 5.4.3.1. Wahl des Ähnlichkeitsmaßes

Die Wahl des Ähnlichkeitsmaßes beeinflusst wie oben bereits erwähnt die schrittweise Clusteranalyse. Generell lässt sich sagen, dass die „Manhattan“ Distanz dazu tendiert, ungleichmäßige Häufigkeitsverteilungen zu erzeugen. Wenigen Clustern mit vielen Raumeinheiten stehen einige wenige mit singulären Raumeinheiten gegenüber. Das Ähnlichkeitsmaß, im Folgenden als „COR“ bezeichnet, wirkt genau umgekehrt. Hier besteht eine Neigung dazu homogene große Raumeinheiten zu erzeugen. Die Euklidische Distanz nimmt eine mittlere Stellung zwischen beiden ein (BAHRENBERG ET AL. 2008: 279). Ist man gewillt Cluster mit nur wenigen Raumeinheiten zu akzeptieren, kann die Manhattan Distanz gewählt werden. Im Normalfall jedoch bietet sich die Euklidische Distanz an (BAHRENBERG ET AL. 2008: 280). In R sind nur die Euklidische Distanz und ihre quadratische Form sowie die Manhattan Distanz verfügbar. Obwohl in der Bodenkunde teilweise sehr geringmächtige singuläre Horizonte vorhanden sein können, soll im Folgenden die euklidische Distanz verwendet werden. Da die Auflösung mit 28 Werten auf 2,80 m Profiltiefe ohnehin sehr gering ist und einzelne Werte einen Vergleich zwischen den Clustern weiter erschweren würden, soll möglichst auf Cluster mit singulären Raumeinheiten verzichtet werden. Um jedoch größere Distanzen zwischen den Variablen stärker zu gewichten, wird die euklidische Distanz im Quadrat als Ähnlichkeitsmaß herangezogen.

#### 5.4.3.2. Wahl der Methode

Die Methoden zur Clusterbildung lassen sich ebenfalls unterscheiden. Ausgehend von  $n$  Raumeinheiten werden nach und nach jene mit der größten Ähnlichkeit zusammengefasst. Zu unterscheiden sind dabei das Single Linkage Verfahren (SL), das Complete Linkage Verfahren (CL), das Average Linkage Verfahren (AL) und das Zentroid Verfahren (Z). All diese Verfahren haben gemein, dass sie die Homogenität in den Clustern indirekt maximieren und die Verschiedenheit zwischen unterschiedlichen Clustern indirekt minimieren (BAHRENBERG ET AL. 2008: 265-266). Beim Ward Verfahren geschieht dies direkt, da die schrittweise Vereinigung so erfolgt, dass immer eine minimale Heterogenität zwischen den Clustern gewährleistet wird. Dabei wird zunächst die Varianz der Raumeinheiten eines Clusters als mittlere quadratische Entfernung um das Zentrum des Clusters ermittelt. Dies geschieht für alle Cluster und die

Varianzen werden dann addiert. Diese Summe entspricht der Gesamtvarianz innerhalb der Cluster. Sie dient daraufhin als Maß dafür, welche Cluster im nächsten Schritt zusammengelegt werden. Für einen solchen Schritt wird für jede mögliche Verschmelzung von zwei Clustern geprüft, welche Größe die resultierende Gesamtvarianz aller Cluster wäre. Es werden diejenigen zusammengeführt für die dieser Wert minimal ist (BAHRENBERG ET AL. 2008: 267). Generell lässt sich sagen, dass wenn man Unterschiede in der Größe der Cluster minimieren will, das Ward verfahren herangezogen werden sollte. Möchte man jedoch auch gerne Gruppen mit singulären Einheiten gewährleisten, bietet sich die „SL“ Methode an, da diese zur Verkettung der Raumeinheiten neigt. Angefangen vom homogenisierendsten zum heterogenisierendsten Verfahren lässt sich folgende Reihenfolge für die Clusterbildungsverfahren festlegen: W, CI, AI, Z, und SL (BAHRENBERG ET AL. 2008: 281). Da bereits festgelegt wurde, dass die Clusteranalyse mit dem Ähnlichkeitsmaß des Quadrates der euklidischen Distanz durchgeführt werden soll, um homogene Gruppen ohne Cluster mit einzelnen Raumeinheiten zu ermitteln, soll die Methode „Ward“ als Clusterbildungsverfahren herangezogen werden.

#### *5.4.3.3. K-Means Algorithmus und Clusterzentrenanalyse*

Die schrittweise hierarchische Clusterung kann zu Verzerrungen führen, da die Bildung der Cluster an den jeweils vorangegangenen Schritt gekoppelt ist. Ziel ist es also, diese Verzerrungen nachträglich zu verbessern. Zu diesem Zweck wird eine Clusterzentrenanalyse durchgeführt. Für jeden Cluster wird dabei sein Zentroid bestimmt. Im Anschluss werden dann alle Raumeinheiten, unabhängig davon welchem Cluster sie zugeordnet waren, genau einem Zentroid zugeordnet. Diese Zurodnung erfolgt dann dadurch, dass eine Zielfunktion optimiert wird, die gewährleistet, dass die geringste Distanz zwischen den „Zentren“ garantiert wird. Bei der Clusterzentrenanalyse ist diese Zielfunktion die euklidische Distanz. Die Minimierung erfolgt dadurch, dass schrittweise die Raumeinheiten im Variablenraum dem nächstgelegenen Zentroid zugeordnet werden (BAHRENBERG ET AL. 2008: 275). Anhand dieses Zentroids erfolgt dann die Clusterbildung mittels des „K-Means“ Algorithmus. Dieser ist eine partitionierende Methode, die n Beobachtungen mit p Variablen in k Cluster aufteilt (PETICZKA ET AL. 2010: 173). Dabei wird die Summe der Quadrate innerhalb der Cluster zu deren jeweiligen Zentren minimiert. Da es mehrere Möglichkeiten gibt, findet dieser Algorithmus nur ein lokales

Optimum, das abhängig ist von der Anzahl der Startzufallszahlen und den Iterationen bevor der Algorithmus abgebrochen wird. Dieser Algorithmus ist sehr empfindlich gegenüber Ausreißern. Außerdem hat Multikollinearität einen großen Einfluss auf das Ergebnis (PETICZKA ET AL. 2010: 173). Da die RGB Werte hoch korreliert sind und Ausreißer im B-Wert vorhanden sind, wird auch bei dem „K-Means“ Algorithmus ausschließlich der G-Wert herangezogen. Ziel ist es, aufgrund der Anwendung des „K-Means“ Algorithmus mit 2 bis 6 Gruppen, mögliche Schichtgrenzen im Profil aufzuzeigen. Die Vorgehensweise ist dabei so, dass für jedes Profil 2 bis 6 Cluster gebildet werden und im Anschluss eine visuelle Auswertung stattfindet. An Stellen, an welchen ein Gruppensprung auszumachen ist und dieser in mindestens 4 der 5 „K-Means“ Clusterlösungen des gleichen Profils vorliegt, wird angenommen, dass es sich um eine Schichtgrenze handelt.

## 6. Resultate und Diskussion

### 6.1. Hierarchische Clusteranalyse mit drei Raumgruppen

Aufgrund der Erkenntnisse zu den Verfüllungsphasen der Kreisgräben, die bereits weiter vorne erläutert wurden (vgl. Kapitel 3.1), wurden zunächst die Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalysen für drei Gruppen untersucht. Dazu wurden die ermittelten RGB Werte über ein Textfile in „R-Commander“ geladen und eine hierarchische Clusteranalyse mit dem G-Wert für jeden einzelnen Profilbildausschnitt durchgeführt. Die Ergebnisse werden dem Textfile, in welchem schon die RGB Werte und die Hauptkomponenten abgespeichert wurden, unter der Überschrift „Cluster III“ zugefügt. Man erhält nun für jeden G-Wert jedes Profilbildes eine Clusterzugehörigkeit. Insgesamt werden also für jedes Profil 28 G-Werte den drei unterschiedlichen Gruppen zugeteilt. Diese Clustergruppen werden dann aus den jeweiligen Textdateien ausgelesen und in eine „ASCII“ Datei überführt. Mit dieser wird dann in „Arc Map 10.2“ mit dem Befehl „ASCII to Raster“ ein Profilraster für jedes Profil erstellt, wobei jede Raumeinheit gleich groß ist und gleiche Clusterzugehörigkeiten durch gleiche Farben erkenntlich werden (vgl. Abbildung 21). Anschließend wird mittels des Befehls „Raster compare“ ermittelt, wie ähnlich sich die Profilraster sind. Im Prinzip werden dabei verschiedene Variablen ausgewählt, die in beiden Clustern verglichen werden. In diesem Fall wird dazu nur die Variable „Pixel Value“ analysiert, da diese den Clusterzugehörigkeiten des Profils entspricht. Die Pixel können also die Werte eins, zwei oder drei annehmen. Die Cluster aus den Digitalkamerawerten, „VIS“ und „MYVIS“, stimmen in 17 von 28 Pixeln überein. Das

heißt, dass bei diesen in 17 Fällen dieselbe Clusterzugehörigkeit in der identischen Profiltiefe vorliegt. Das ist eine Übereinstimmung der Clusterzugehörigkeit von 60,71%. Zwischen den Clustern der Laborfarbbestimmungen („VIS-LAB“) und den Digitalkamerawerten („VIS“, „MYVIS“) ist die Übereinstimmung geringer. Zwischen den Clustern „VIS-LAB“ und „MYVIS“ liegt eine Übereinstimmung von 15 der 28 Pixel vor, also von 53,57%. Zwischen „VIS-LAB“ und „VIS“ liegt die geringste Übereinstimmung vor. Hier sind nur 13 Raumeinheiten in denselben Tiefen identisch. Also eine Übereinstimmung von 46,43%. Am ähnlichsten sind sich somit die Cluster der Profile, die aus den G-Werten des Bildes der eigenen Digitalkamera („MYVIS“) und die der Archäologen („VIS“) ermittelt wurden. Obwohl die beiden Bilder zu unterschiedlichen Zeitpunkten, bei unterschiedlichen Licht- und Wetterbedingungen und mit unterschiedlichen Digitalkameras aufgenommen wurden, stimmen die ermittelten Clustergruppen räumlich immer noch in 60,71 % der Fälle überein. Zusätzlich muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass das „MYVIS“ Foto aus zwei verschiedenen Fotos zusammengesetzt wurde und auch rektifiziert werden musste. Die Laborwerte, obwohl sehr genau und mit großer Informationsdichte, ähneln den Clustern aus den Bildern weniger. Die Cluster der „UV“ und „IR“ Fotografie stimmen beide mit „VIS-LAB“ in jeweils 12 von 28 Raumeinheiten überein, was 42,86 % entspricht. Zwischen „IR“ und „UV“ sind es sogar nur 10 Raumeinheiten die übereinstimmen bzw. 35,71%. Da „IR“ und „UV“ auch am weitesten im Spektrum voneinander entfernt sind, entspricht es durchaus den Erwartungen, dass diese beiden Profile die größten Unterschiede in den Raumgruppenzuordnungen aufweisen. Eine Übersicht der Ergebnisse bietet Tabelle 2 (vgl. Tabelle 2)

*Tabelle 2: Räumliche Übereinstimmung der Clustergruppenzugehörigkeiten bei den hierarchischen Clusterlösungen mit drei Gruppen.*

Übereinstimmung zwischen den Clusterlösungen (k=3)	UV	VIS	MYVIS	VIS-LAB	IR
UV	100 %	32,14 %	32,14 %	7,14 %	35,71 %
VIS	-	100 %	60,71 %	53,57 %	57,14 %
MYVIS	-	-	100 %	46,43 %	28,57 %
VIS-LAB	-	-		100 %	46,43 %
IR	-	-	-	-	100 %

# Hierarchische Clusteranalyse: Ward/EDQ K=3

## Legende

Value



Autor: Daniel Schweighoffer

Koordinatensystem: MGI Transverse Mercator

Erstellt unter Anwendung von Arc GIS 10.2 (C) Esri, R Version 3.1.2 (C) CRAN Projekt

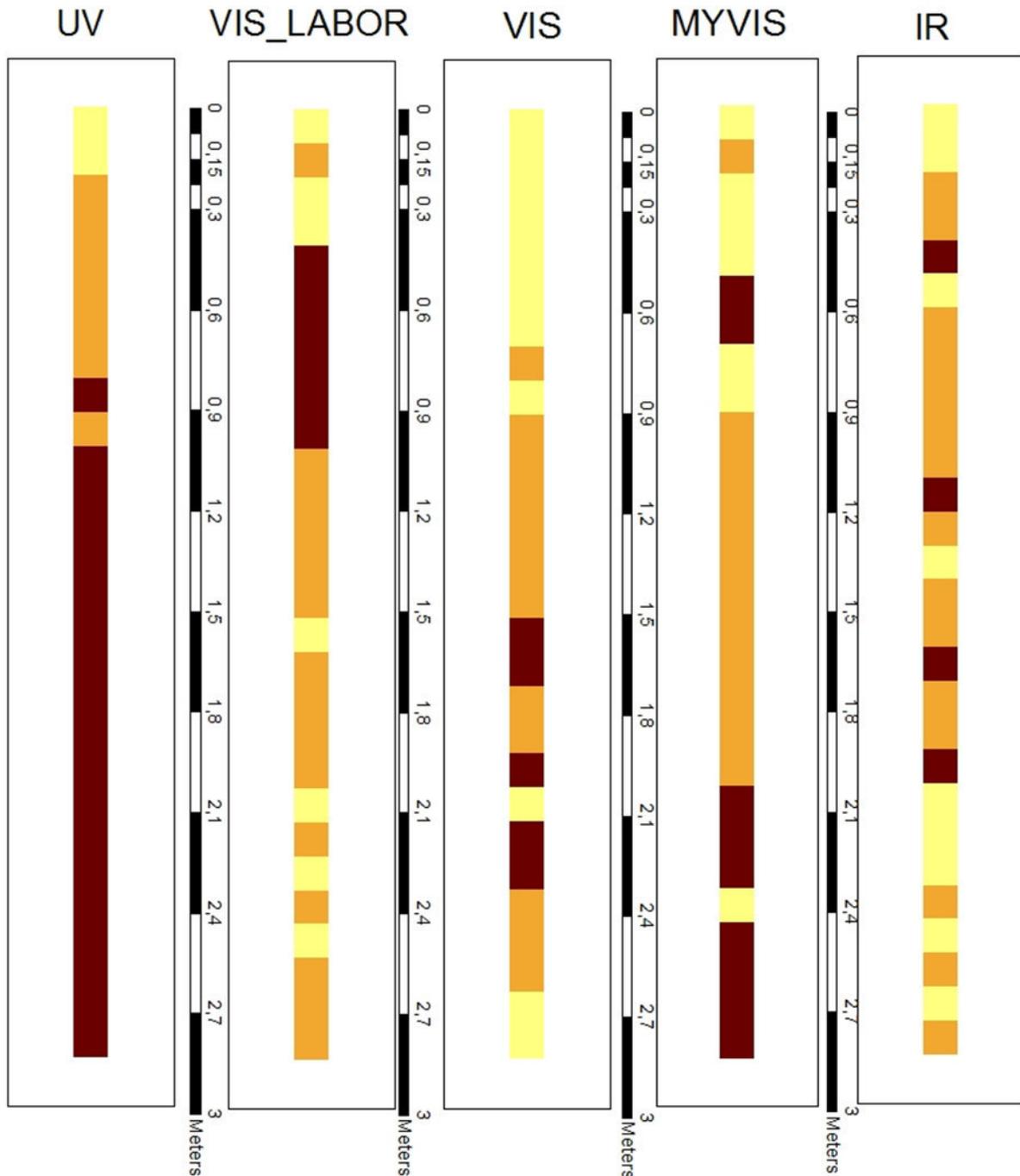


Abbildung 21: Visualisierung der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse, durchgeführt mit drei Gruppen. Ähnlichkeitsmaß: Euklidische quadratische Distanz. Methode: Ward. Ergebnisse können Tabelle 2 entnommen werden.

## 6.2. Hierarchische Clusteranalyse mit fünf Raumgruppen

Das eigentliche Ziel der Arbeit liegt nicht darin, eine vor der Analyse bekannte Anzahl von Clustergruppen anzunehmen. Es soll versucht werden, die Anzahl der Clustergruppen ausschließlich über die Farbwerte und die statistischen Methoden zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird das „Ellenbogen Kriterium“ verwendet (BAHRENBERG ET AL. 2008: 268-272). Im Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse wird dazu die Anzahl der Gruppen gegen die Distanz (Height) aufgetragen (siehe Abbildung 22). Der Punkt, an welchem diese Funktion die größte Steigungsänderung aufweist, bestimmt die Anzahl der anzunehmenden Gruppen. In den Dendrogrammen kann dies visuell ermittelt werden. Dort ist die Gruppenanzahl, bei welcher der größte Distanzzuwachs im Vergleich zur vorangegangenen Gruppenanzahl zu beobachten ist („Ellbow“ oder „Knick“), auszuwählen. Zusätzlich soll als Merkmal dienen, dass keine einzelne Raumeinheit ein eigenständiges Cluster bildet. Betrachtet man das Dendrogramm zum „UV“ Profilbild so ist zu erkennen, dass der größte „Knick“ beim Übergang sechs auf fünf Gruppen auftritt. Beim „IR“ Dendrogramm sind die „Ellbows“ beim Übergang von fünf auf vier und von sechs auf fünf Gruppen ähnlich stark ausgeprägt. Bei „VIS-LAB“ und bei „VIS“ ist dieser Punkt bei der Änderung von fünf auf vier Gruppen anzutreffen. Bei „MYVIS“ von vier auf drei. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Clustern zu gewährleisten, sollen alle Profile mit fünf Clusterlösungen verglichen werden. Für „UV“, „VIS-LAB“ und „VIS“ ist dies nach dem Ellenbogenkriterium ohnehin zutreffend. Bei „MYVIS“ bieten sich ebenfalls fünf Clustergruppen an, da sie den zweitstärksten „Knick“ von sechs auf fünf aufweist. Lediglich bei „IR“ wäre die Lösung mit vier Clustergruppen zu präferieren. Zudem wäre hier erst ab einer Clustergröße von drei gegeben, dass eine einzelne Raumeinheit kein eigenes Cluster mehr darstellt. Die Clustergruppengröße von fünf wird daher der Vergleichbarkeit halber gewählt. Auch in diesem Fall ist jede Raumeinheit gleich groß und gleiche Clusterzugehörigkeiten werden durch gleiche Farben erkenntlich gemacht (siehe Abbildung 23). Der Vergleich der Raster mit fünf verschiedenen Gruppen ergab, wie zu erwarten war, schlechtere Ergebnisse als jene mit drei Gruppen. Im Einzelnen lassen sich die Ergebnisse aus Tabelle 3 entnehmen (vgl. Tabelle 3). Die besten Übereinstimmungen, mit 39,29%, gab es wie im Fall zuvor mit „VIS“ und „MYVIS“. „VIS-LAB“ und „MYVIS“ stimmten in 28,57% der Clusterzugehörigkeiten überein, genauso wie „UV“ und „IR“. Ein Viertel der Fälle waren es zwischen „VIS-Lab“ und „IR“. Die geringste Übereinstimmung, mit 10,71%, fand sich bei den Raumgruppen der Clusterlösung zwischen „VIS-LAB“ und „UV“ und zwischen „VIS-LAB“ und „VIS“. Gerade dieser letzte Wert

ist sehr überraschend, da zwischen den „VIS-Lab“ Laborfarbwerten und den „VIS“ Farbwerten der Digitalfotografie eine höhere Übereinstimmung vermutet wurde.

Tabelle 3: Räumliche Übereinstimmung der Clustergruppenzugehörigkeiten bei den hierarchischen Clusterlösungen mit fünf Gruppen.

Übereinstimmung zwischen den Clusterlösungen (k=5)	UV	VIS	MYVIS	VIS-LAB	IR
UV	100%	32,14 %	14,29 %	10,71%	28,57 %
VIS	-	100%	39,29 %	10,71 %	14,29 %
MYVIS	-	-	100%	28,57 %	17,86 %
VIS-LAB	-	-	-	100%	25 %
IR	-	-	-	-	100%

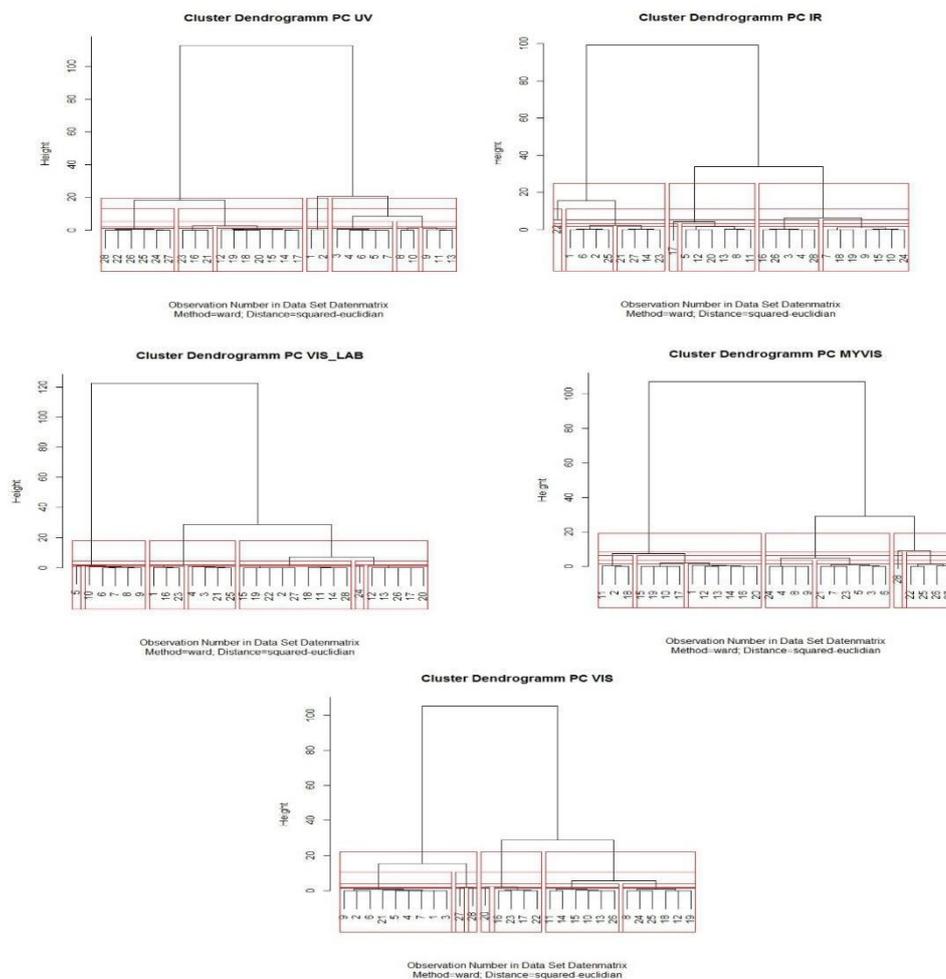
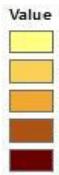


Abbildung 22: Dendrogramme der hierarchischen Clusteranalysen für das UV- (Oben links), IR- (Oben rechts), VIS-LAB- (Mitte links), MYVIS- (Mitte rechts) und VIS-Profil (unten). Die roten Blöcke visualisieren die Clustergruppenzugehörigkeiten der einzelnen Raumgruppen. Im „niedrigsten“ Fall wurde die Clusteranalyse für sieben Raumgruppen, im „höchsten“ Fall mit drei Raumgruppen durchgeführt. Die Linien bilden die Grenzen zwischen den Clusterlösungen. Je größer der „Höhenzuwachs“ von einer Gruppe zur Nächsten, desto größer der „Ellbow“ bzw. „Knick“.

# Hierarchische Clusteranalyse: Ward/EDQ

## K=5

### Legende



Autor: Daniel Schweighoffer

Koordinatensystem: MGI Transverse Mercator

Erstellt unter Anwendung von Arc GIS 10.2 (C) Esri, R Version 3.1.2 (C) CRAN Projekt

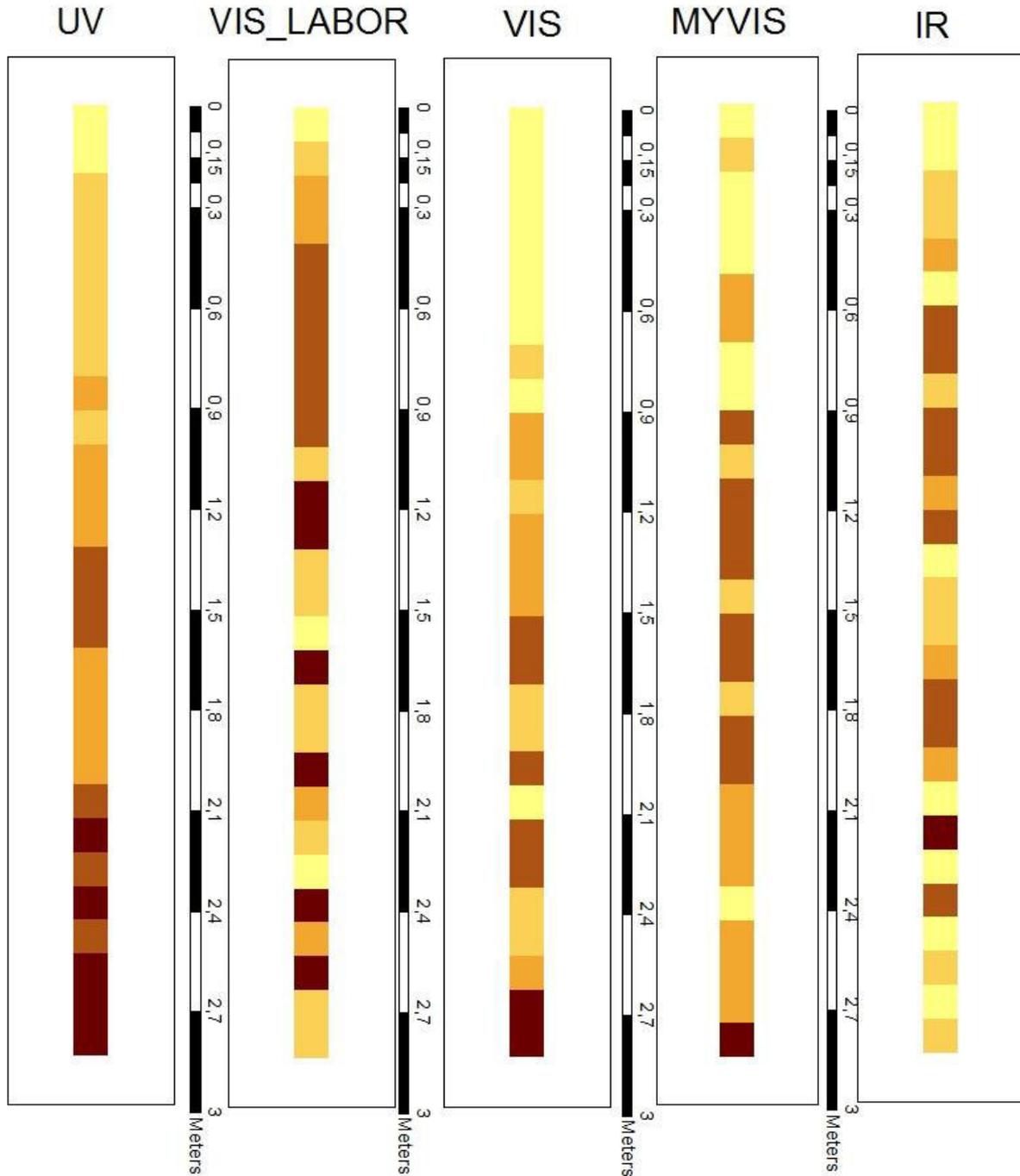


Abbildung 23: Visualisierung der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse, durchgeführt mit fünf Gruppen. Ähnlichkeitsmaß: Euklidische quadratische Distanz. Methode: Ward. Ergebnisse können Tabelle 4 entnommen werden.

### 6.3. Schichtgrenzenbestimmung mittels „K-Means“ Clusteranalyse

Wie bereits weiter oben erwähnt, dienen die Änderungen der Clustergruppenzugehörigkeit als Indikator für eine deutliche Veränderung des Farbwertes. Für jedes Profil wurden mit dem „K-Means“ Algorithmus fünf Cluster gebildet. Beginnend mit zwei Gruppen nahm die Gruppenszahl bei jeder Lösung um eins zu, sodass der erste Cluster aus zwei Gruppen, der fünfte aus sechs Gruppen bestand. Im Anschluss wurde ausgewertet, an welchen Tiefen des Profils Gruppenübergänge auftraten. Wenn mindestens vier der fünf Clusterlösungen eines Profils einen Sprung in gleicher Tiefe aufwiesen, wird dieser als Horizontgrenze betrachtet, da hier eine deutliche Änderung der Farbe anzunehmen ist. Dies deutet dann auf eine Veränderung der Bodenzusammensetzung und damit auf eine Horizontgrenze hin. Im Folgenden wird solch eine Änderung in fünf von fünf Fällen als markanter Grenzübergang bezeichnet. Bei vier von fünf Fällen wird von einem klaren Übergang bzw. von einer klaren Grenze gesprochen. Als möglicher Grenzübergang wird bezeichnet, was in drei von fünf Fällen eine Raumgruppenänderung aufweist. Interessanterweise ergaben sich bei dieser Vorgehensweise einige ähnliche Grenzen bei allen Profilen (vgl. Abbildung 24). Bei dem „UV“ Profil sind zwei klare Unterbrechungen in einer Tiefe von 1 m und 2 m vorzufinden (siehe auch Tabelle 4 und Abbildung 24). Zwei weitere mögliche finden sich in einer Tiefe von 0,2 m und 1,6 m. In den übrigen Profilen sind es deutlich mehr Grenzen und die Analyse ist komplexer. Daher soll hier nur auf die markanten Bereiche eingegangen werden, bei welchen Veränderungen in allen Profilen abzulaufen scheinen. Im Einzelnen sind dies die Bereiche zwischen 0,7 m - 0,9 m, 1,5 m – 1,7 m, 1,9 m -2,1 m, 2,3 m bis 2,4 m sowie 2,7 m (siehe Abbildung 25). Zur besseren Visualisierung dieser Ergebnisse sei auf Tabelle 4 verwiesen. Bei „VIS“ und „MYVIS“ sind klare gemeinsame Grenzen bei 0,7 m, 0,9 m, 2,0 m und 2,3 m auszumachen. Erstaunlich ist hierbei, dass im „VIS“ Profil wesentlich mehr Grenzen auszumachen sind als im „MYVIS“ Profil und dass dessen markante Veränderung im Bereich 0,2 m im „VIS“ Profil gar nicht zu Tage kommt. Die Übergänge im „IR“ Profil sind am häufigsten. Insgesamt lassen sich hier 16 Sprünge ausmachen. Der Vergleich zu den anderen Profilen fällt daher besonders schwer. Markante Grenzen gibt es acht an der Zahl. Diese befinden sich zwischen 0,4 m und 0,6 m, 1,3 m und 1,6 m sowie zwischen 2,3 m und 2,4 m. Beim „VIS-LAB“ Profil finden sich markante Sprünge bei 0,2 m und bei 1,0 m Tiefe. Im Bereich von ca. 1,5 m und 0,4 m befinden sich klare Übergänge. Ab einer Tiefe von 2,0 m wird es ähnlich unübersichtlich wie

beim „IR“ Profil. Zwischen einer Tiefe von 2,0 m und 2,6 m erfolgt alle 10 cm ein klare Raumgruppenzugehörigkeitsänderung.

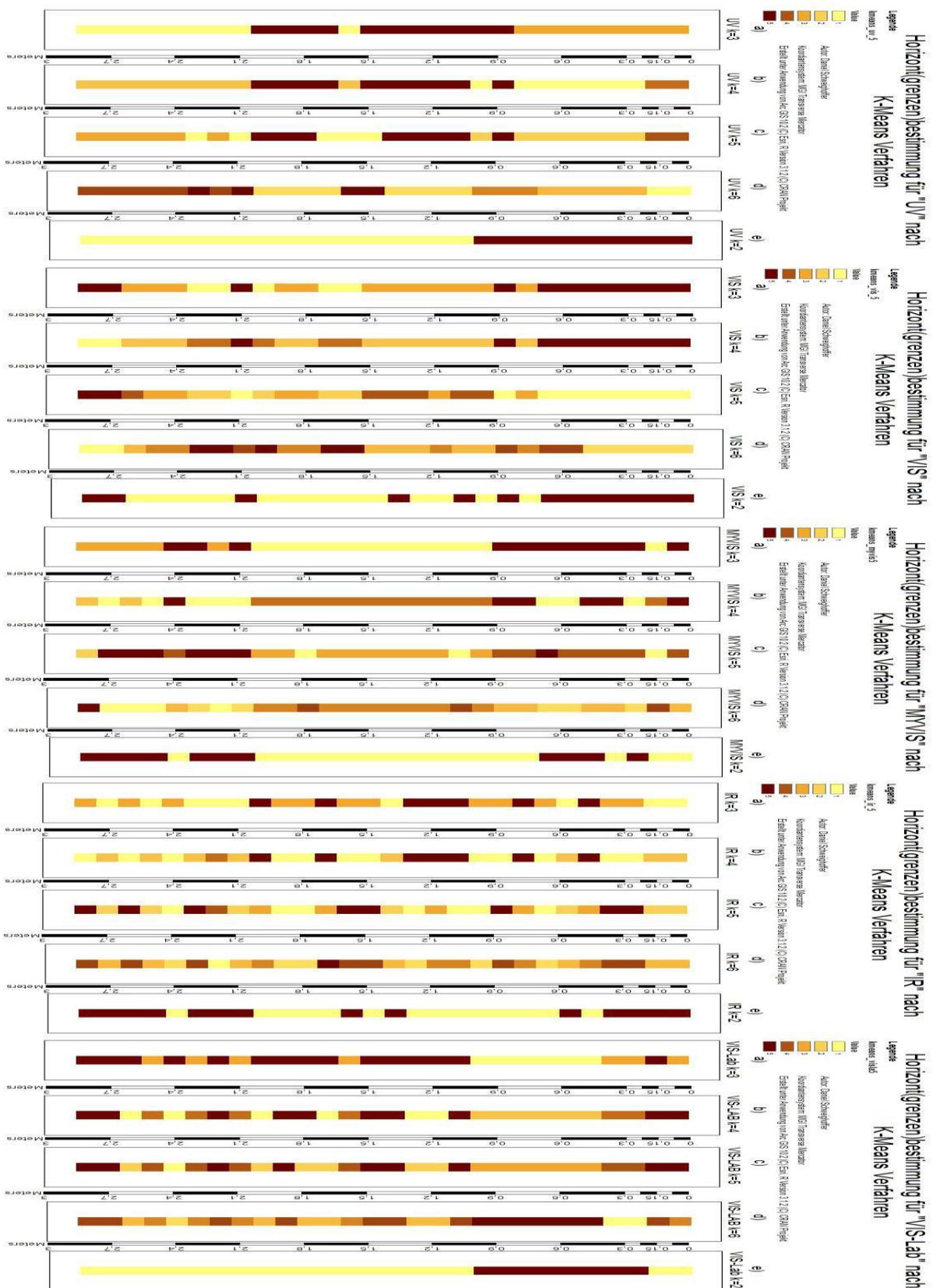


Abbildung 24: Visualisierung der Horizontgrenzenbestimmung nach dem „K-Means“ Clusteranalyse Verfahren. Ergebnisse können Tabelle 4 und 5 entnommen werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Horizontgrenzenbestimmung. Rot: keine Grenze, Gelb: mögliche Grenze, Grün: markante bzw. klare Grenze. Die Tabelle enthält nur 27 Grenzen, da die Grenze nach 2,80 m nicht berücksichtigt wird.

	UV	VIS	MYVIS	IR	VIS-LAB
10	Rot	Rot	Grün	Rot	Gelb
20	Gelb	Rot	Grün	Grün	Grün
30	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
40	Rot	Rot	Rot	Grün	Grün
50	Rot	Rot	Rot	Grün	Rot
60	Rot	Rot	Rot	Grün	Rot
70	Rot	Grün	Grün	Grün	Rot
80	Rot	Grün	Rot	Grün	Rot
90	Rot	Grün	Grün	Gelb	Rot
100	Grün	Rot	Rot	Rot	Grün
110	Rot	Gelb	Rot	Rot	Gelb
120	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
130	Rot	Rot	Rot	Grün	Gelb
140	Rot	Rot	Rot	Grün	Rot
150	Rot	Grün	Rot	Rot	Grün
160	Gelb	Rot	Rot	Rot	Grün
170	Rot	Grün	Rot	Grün	Rot
180	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
190	Rot	Grün	Rot	Grün	Gelb
200	Grün	Grün	Grün	Grün	Grün
210	Rot	Grün	Rot	Gelb	Grün
220	Rot	Rot	Rot	Rot	Grün
230	Rot	Rot	Grün	Gelb	Grün
240	Rot	Grün	Grün	Grün	Grün
250	Rot	Rot	Rot	Grün	Grün
260	Rot	Rot	Rot	Grün	Gelb
270	Rot	Grün	Gelb	Grün	Rot

Tabelle 5: Räumliche Übereinstimmung zwischen den Schichtgrenzbestimmungen zu den verschiedenen Profilbildern.

Übereinstimmung zwischen den Schichtgrenzbestimmungen	UV	VIS	MYVIS	VIS-LAB	IR
UV	100%	51,85%	66,66%	48,15%	29,63%
VIS	-	100%	62,96%	40,74%	48,15%
MYVIS	-	-	100%	44,44%	40,74%
VIS-LAB	-	-	-	100%	29,63%
IR	-	-	-	-	100%

#### 6.4. Zusammenfassung der Horizontgrenzenbestimmung nach „K-Means“

Unter der Annahme, dass eine Schichtgrenze dann vorhanden ist, wenn sie in mindestens drei der untersuchten Profilbilder bzw. Laborwerten zu Tage tritt, lassen sich die Grenzen in den Tiefen 0,2 m, 0,7 m, 0,9 m, 1,9 m, 2,0 m, 2,4 m und 2,7 m ziehen (vgl. Tabelle 4). Aus den ermittelten Grenzen wird nun eine abschließende Einschätzung getätigt, inwieweit die Grenzen mittels „K-Means“ Clusteranalyse der RGB Werte der Digitalfotografien ermittelt werden können. Um dies zu ermöglichen, muss die ermittelte Clusterhorizontlösung mit den Clustergruppenlösungen der Laborwerte verglichen werden. Da diese als Richtwert dienen, wird erneut eine „Raster Compare“ Analyse durchgeführt um zu sehen, in wie vielen Raumeinheiten eine Übereinstimmung vorliegt. Die Übereinstimmungen der Schichtgrenzen nach der verwendeten Methode liegen im besten Fall bei 66,66% und zwar zwischen dem „MYVIS“ und dem „UV“ Profil. Die zweitbeste Übereinstimmung liegt zwischen den ermittelten Grenztiefen für das „MYVIS“ und „VIS“ Profil vor und nimmt den Wert von 62,96% an. Die niedrigsten Übereinstimmungen weisen das „IR“ und „UV“ Profil sowie das „IR“ und „VIS-LAB“ Profil auf. Gerade einmal ein Drittel der Grenzen stimmen hier überein. Zwischen dem VIS-LAB Profil und den übrigen Profilen liegen die Übereinstimmungen zwischen 40% und 50%. Im Allgemeinen sind dies wie bereits schon bei der hierarchischen Clusteranalyse weiter oben niedrige Übereinstimmungswerte. Es erscheint daher schwierig aus diesen Ergebnissen

klare Grenzen für alle Profile zu ermitteln, die nicht subjektiv sind. Dennoch soll es im Folgenden aufgrund der ermittelten Ergebnisse versucht werden.

### 6.5. Anwendung der K-Means und Hierarchischen Clusteranalyseergebnisse auf alle Profile in höherer Auflösung

Die Einteilung der Horizonte soll nun anhand gemeinsamer Grenzen aller Profildaten vorgenommen werden. Sollte eine Sprungstelle der Raumgruppenzugehörigkeit in drei der fünf Profildaten auftreten, spricht dies besonders stark für eine Grenze in der Bodenbeschaffenheit, da in einem solchen Fall dann in allen drei spektralen Bereichen etwas zu „passieren“ scheint. Die erste Horizontgrenze nach diesem Verfahren lässt sich bei einer Tiefe von 20 cm ausmachen. Hier ändert sich die Gruppenzugehörigkeit bei den Profilen „VIS-LAB“, „MYVIS“ und „IR“. Lediglich die „VIS“ und „UV“ Profile weisen in dieser Tiefe keinen Sprung auf. Bei „UV“ liegt jedoch ein möglicher Sprung vor. Es spricht daher einiges für diese Unterbrechung. Die nächste Grenze, die bei nahezu allen Profilen auftritt, ist in einer Tiefe von ca. 1 m auszumachen. Hier sind klare Gruppensprünge für das „VIS-LAB“ Profil vorhanden und für das „UV Profil“. Bei „VIS“, „MYVIS“ und „IR“ liegen sie bei 0,9 m bzw. 0,8 m vor. Insgesamt scheint bei diesen drei Profilen jedoch der Bereich zwischen 0,7 m und 0,9 m von Interesse zu sein. Der dritte Sprung, der allen Profilen gemeinsam ist, findet sich in einer Tiefe von ca. 2 m. Bereits zuvor, bei ca. 1,6 m, tritt ebenfalls ein gemeinsamer Sprung auf, der nur im „MYVIS“ Profil überhaupt nicht auszumachen ist und im UV Profil nur einen „möglichen“ Sprung aufweist. Klar ersichtlich ist bei allen Profilen, außer dem „UV Profil“, eine Grenze bei 2,4 m. Dies würde für fünf Grenzschichten sprechen die in allen Profilen auftreten. Diese befinden sich, nach den zu Grunde liegenden Ergebnissen der „K-Means“ Analyse, in den Tiefen von ca. 0,2 m, 1,0 m, 1,6 m, 2,0 m und 2,4 m. Aufgrund dieser Resultate der vergleichenden K-Means Analyse, wird nun zunächst eine Clusteranalyse mit drei Clustergruppen für das „UV“ Profil durchgeführt. Bei dieser Visualisierung wird nun mit einer Auflösung von 15\*280 Pixel gearbeitet. Bei dieser finalen Gegenüberstellung aller Profile mit unterschiedlicher Clustergruppenzahl werden nun Horizontgrenzen besonders deutlich (siehe Abbildung 25). Im „UV“ Bereich sind die Grenzen besonders markant. Diese liegen in einer Tiefe von ca. 0,8 m und 2,1 m. Die Grenze bei 0,2 m erscheint hier nicht einmal im Ansatz. Bei 1,5 m jedoch deuten einige Pixel einer andern Gruppenzugehörigkeit auf eine leichte Veränderung hin. Da die 0,2

m Grenze daher nicht sicher im „UV“ belegt werden kann, erfolgt die Clusteranalyse mit fünf Clustergruppen für das „VIS“, „MYVIS“ und „IR“ Profil. Die Grenzen bei 0,8 m und ca. 2,1 m finden sich auch in den nun untersuchten Profilen, auch wenn die Ausgangsclustergruppenanzahl eine unterschiedliche ist. Das spricht ganz klar dafür, dass im Bereich von ca. 0,8 m und ca. 2,1 m Tiefe eine Veränderung in der Bodenzusammensetzung stattgefunden hat, die sich in den Reflektionsbereichen des „UV“, „VIS“ und „NIR“ widerspiegelt. Bei den Profilen „VIS“, „MYVIS“ und „IR“ ist den Grenzen in 0,8 m und 2,1 m jeweils noch ein eigenständiger Horizont vorgeschaltet. Diese befinden sich zwischen 0,7 m und 0,9 m und zwischen 1,9 m – 2,1 m Tiefe. Im „VIS“, „MYVIS“ und „IR“ Profil lässt sich zudem eindeutig eine Grenze bei ca. 0,15 m ausmachen. Zusätzlich wird ersichtlich, dass sich der Bereich zwischen 1,3 m und 1,55 m von dem darüber und darunter liegenden Abschnitt unterscheidet. Dies deutet ebenfalls auf unterschiedliche Bodeneigenschaften und bedingende Prozesse dieser hin. Ein weiterer möglicher Horizont liegt im Bereich 2,35 m – 2,45 m vor. Dieser wird ebenfalls im „VIS“, „MYVIS“, „IR“ sichtbar. Eine sehr klare Grenze bei 2,65 m, wird nur im „MYVIS“ deutlich. Fasst man diese Ergebnisse zusammen, so ergeben sich die Grenzen bei 0,15 m, 0,7m, 0,9m, 1,3m, 1,55m, 1,9m, 2,1m, 2,35m, 2,45 m und 2,65 m. Diese Schichtgrenzen wurden ebenfalls in ein Profilaraster überführt (vgl. Abbildung 25e) und den anderen Profilarastern in einer Auflösung von 15\*280 Pixel gegenübergestellt (vgl. Abbildung 25). Die Ergebnisse bestätigen weitestgehend die ermittelten Grenzen, die über die „K-means“ Analyse zu erwarten waren (vgl. Abbildung 24 und Tabelle 3).

## 6.6. Abschließende Einschätzung

Nimmt man die Ergebnisse aus Kapitel 6.4. und 6.5. zusammen so ergeben sich Grenzbereiche in den Tiefen von ca. 0,2 m, 0,7m, 0,9 m, 1,9 m, 2,1 m, ca. 2,4m und ca. 2,65 m. Es erscheint vielversprechend, dass die Grenzziehung mit zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen, in sieben von zehn Fällen in denselben Tiefen erfolgt. Diese Bereiche wären daher von besonderem Interesse für eine genaue Beprobung, um die Ursache für die Farbänderung zu erfahren. Stellt man diese Ergebnisse als Clusterlösung dar und stellt sie den Clustern der Laborwerte gegenüber sind die Ergebnisse jedoch ernüchternd (vgl. Abbildung 26). Die räumlichen Übereinstimmungen liegen beim Vergleich mit dem Cluster von Abbildung 28 a) bei gerade einmal 39,28%. Vielversprechend ist jedoch, dass die Grenzen im Bereich 0,2 m, ca.

1,0 m, ca. 2,1 m und ca. 2,6 m relativ deutlich ersichtlich werden. Der Vergleich der Clusterergebnisse der  $\text{CaCO}_3$  und Tongehaltswerte, die in Kapitel 3.2. vorgestellt wurden, ist besonders interessant (vgl. Abbildung 26). Aufgrund der Tatsache, dass für die 2,80 m nur 19 Werte für das  $\text{CaCO}_3$  und den Tongehalt zur Verfügung stehen, können die ermittelten Clusterraster nicht direkt über „Raster compare“ verglichen werden. Betrachtet man jedoch die Horizontgrenzen, so fällt auf, dass einige Grenzen an denselben Stellen zu finden sind. Besonders ins Auge fallen die Übereinstimmungen zwischen der Clusterlösung mit zwei Gruppen für das  $\text{CaCO}_3$  Profil und (Abbildung 26d) und der abschließenden Einschätzung der Horizontgrenzen (Abbildung 26e). Die Grenzen bei 0,2 m, 0,7 m, 0,9 m, 2,1 m und 2,4 m sind ihnen gemein. Zusätzlich ist in Profil in Abbildung 26d auch der Horizont zwischen 1,3 m und 1,55 m, der in der abschließenden Beurteilung außen vorgelassen wurde, zu erkennen. Abgesehen von der Grenze bei 0,7 m und 2,1 m trifft dies auch für die Clusterlösung mit drei Gruppen zu. In deren Fall tritt dafür die Grenze bei 1,9 m zu Tage. Auch für die Tongehaltsclusterprofile mit zwei und drei Gruppen lassen sich gemeinsame Grenzen erkennen. Ist es bei der Zwei-Gruppenlösung nur die Grenze in einer Tiefe von 0,7 m, so sind es bei der Drei-Gruppenlösung die Grenzen in einer Tiefe von 0,2 m, 0,7 m, 0,9 m und 1,9 m. Diese Übereinstimmung bestärkt die Analyseergebnisse der statistischen Auswertung. Die abschließende Lösung für die Horizontgrenzen ergibt damit folgendes Bild. Ein erster Horizont verläuft von 0 – 0,2 m. Er scheint bedingt durch den Ton- und  $\text{CaCO}_3$  Gehalt. Zumindest legen Abbildungen 11 und 26 c und d diesen Schluss nahe. Diesem folgt ein relativ homogener Horizont bis zu einer Tiefe von ca. 0,7 m. Dieser markiert gleichzeitig einen abrupten Übergang im UV Bereich (siehe Abbildung 25a). Der Bereich bis zu einer Tiefe von 0,9 m erscheint zumindest für die Clusterlösungen der IR und VIS Fotografie zuzutreffen (siehe Abbildung 25 a-d und Abbildung 24 a-d). Auch hierfür könnte der Ton- und  $\text{CaCO}_3$  Gehalt verantwortlich sein (siehe Abbildung 26 a-d). Auch die Grenzen bei 1,3 m, 1,6 m und 1,9 m werden bei den eben aufgeführten Clustergruppen deutlich. Besonders markant ist der Übergang bei ca. 2,1 m, der wiederum mit einer sprungartigen Grenze im UV Bereich zusammenfällt (siehe Abbildung 25a), aber auch bei den Tongehalts- und  $\text{CaCO}_3$  Clustern (siehe Abbildung 26 b-d) und sogar für die Werte der Spektralphotometrie (siehe Abbildung 24 e) auftritt. Die Unterteilung im letzten Bereich fällt am schwersten. Hier scheinen Horizonte sowohl zwischen 2,4 m und 2,5 m zu liegen als auch zwischen 2,5 m und 2,7 m. Die Gehalte des  $\text{CaCO}_3$  und des Tons scheinen hierfür eher nicht verantwortlich zu sein (siehe Abbildung 26 a-d).

**Legende**  
 MYVSI\_280\_Hie  
 Value  
 1  
 2  
 3  
 4  
 5

# Horizont(grenzen)bestimmung nach K-Means Verfahren

Autor: Daniel Schweighoffer  
 Koordinatensystem: MGI Transverse Mercator  
 Erstellt unter Anwendung von Arc GIS 10.2 (C) Esri, R Version 3.1.2 (C) CRAN Projekt

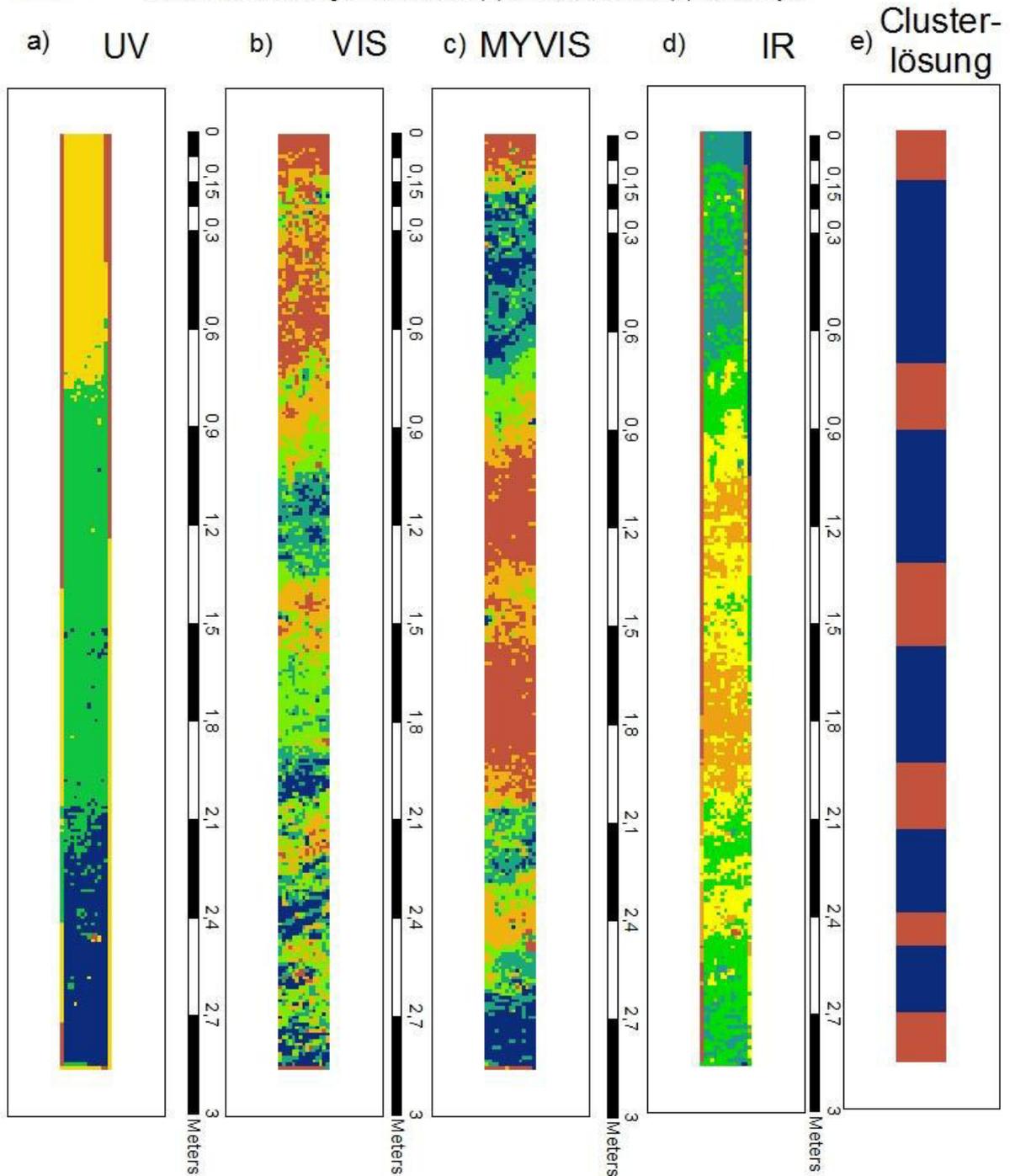


Abbildung 25: Bestimmung der Horizonte und ihrer Grenzen für 15\*280 Pixel Auflösung.

# Gegenüberstellung der Clustergruppierungen für Tongehalt und CaCO<sub>3</sub> mit der abschließenden Einschätzung der Horizontgrenzen

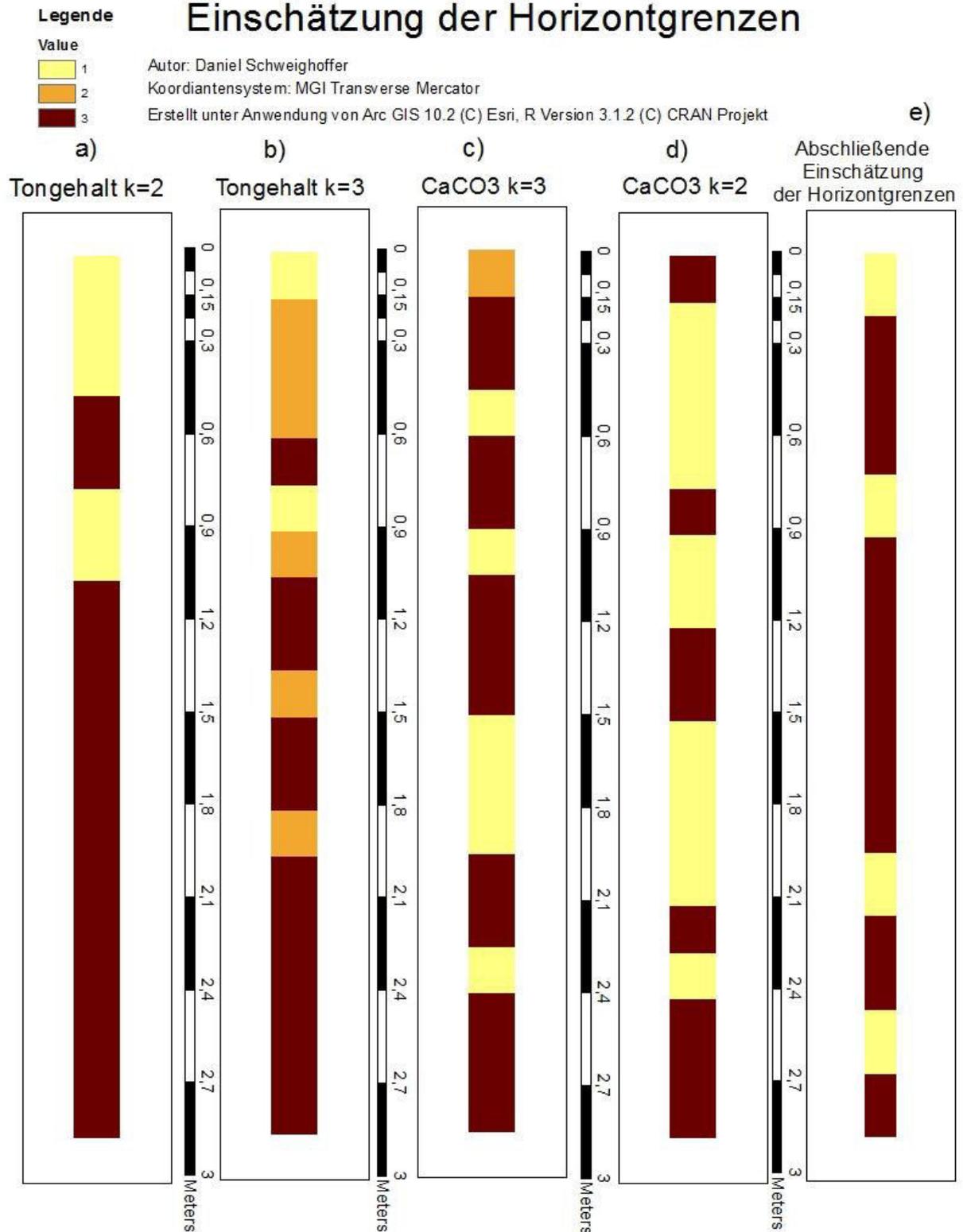


Abbildung 26: Gegenüberstellung der Clustergruppen für die Clusteranalyse nach dem K-Means Verfahren für die CaCO<sub>3</sub> Werte und den Tongehalt (Datenquelle: Trnka 1991: 82 ff).

## 7. Schlussfolgerungen

Die Bestimmung von Schichtgrenzen und Horizonten eines Bodenprofils mit Digitalfotos im UV, IR und VIS Bereich erscheint nach den Ergebnissen dieser Arbeit im Rahmen des Möglichen zu liegen. Um sichere Aussagen diesbezüglich treffen zu können, sind jedoch weitere Studien notwendig. Mittels Clusteranalysen der RGB Werte der Digitalfotos im „UV“, „VIS“ und „IR“ Bereich sowie der RGB Werte, die über die Spektralphotometrie im Labor ermittelt wurden, konnten zwei eindeutige Grenzen ermittelt werden. Diese liegen in einer Tiefe von ca. 0,8 m und 2,1 m und finden sich für jedes Profilbild. Ausschließlich im „VIS“ und „IR“ Bereich lässt sich eine Grenze zwischen 0,1 m – 0,2 m finden. Im Bereich zwischen 1,3 und 1,5 m und 2,4 m und 2,6 m lassen sich ebenfalls für den VIS und IR Bereich Grenzen finden. Aus diesen wurde ein abschließender Vorschlag für Schichtgrenzen erstellt (vgl. Abbildung 26e). Die Bestimmung der Horizonte allein über hierarchische Clusteranalysen erwies sich als schwierig. Die Übereinstimmung der Gruppenzugehörigkeit bei einer Gruppenzahl von drei lag im besten Fall bei 60,71 %. Erreicht wurde er bei den Clustern die aus den Digitalfotos im VIS Bereich („VIS“, „MYVIS“) ermittelt wurden. Dieser Wert ist vielversprechend und deutet darauf hin, dass unter geregelten Bedingungen und einer methodischen Vorgehensweise beim Ablichten noch höhere Übereinstimmungen möglich sein können. Dies bestärkt die Hoffnungen, dass Profilbilder von unterschiedlichen Teilen der Welt tatsächlich miteinander vergleichbar gemacht werden könnten. Dieser Teil der Fragestellung dieser Arbeit kann damit positiv beantwortet werden, würde aber weiterer Untersuchungen bedürfen. Ernüchternd sind die Übereinstimmungen bei den räumlichen Clustergruppenzugehörigkeiten zwischen „VIS-LAB“, dessen Farbwerte durch die Spektralphotometrie der Bodenproben im Labor ermittelt wurden, und den Digitalfotografie der Profile. Hier konnte im besten Fall eine Übereinstimmung von 53,57% erreicht werden. Es sei hierzu erwähnt, dass die Bodenproben ausschließlich im trockenen Zustand spektralphotometrisch eingemessen wurden. Für noch folgende Arbeiten könnte sich anbieten, diese Messungen sowohl bei lufttrockenen Proben als auch bei befeuchteten Proben durchzuführen, um näher an den Istzustand des Profils im Feld zu gelangen. Es könnten die Clusteranalysen dann sowohl für die Mittelwerte aus lufttrockener Probe und feuchter Probe als auch nur für die feuchten und trockenen Proben erstellt werden. Bei Viscarra Rossel et al. 2008: 150-151 erwies sich dies als sinnvoll. Zudem könnte es klären, warum die Ergebnisse des „VIS-LAB“ teilweise so stark von den RGB Werten

der Digitalfotos abweichen. Es erscheint weiterhin eine Überlegung wert, anstatt alle 10 cm eine Bodenprobe zu entnehmen dies für jeden cm zu tun, um somit eine größere Auflösung der Laborwerte zu erhalten. Gerade aus dem Grund, da die Pixelwerte der Fotografien sehr stark aufgelöst vorliegen und somit beim skalieren und verpixeln des Bildes sehr viele Informationen verloren gehen. Es sollte daher untersucht werden, ob genauere Ergebnisse auf diese Weise erzielt werden können. Sehr vielversprechend sind die Übereinstimmungen zwischen den Clusterlösungen für den Tongehalt und den CaCO<sub>3</sub> Gehalt mit der abschließenden Einschätzung der Horizontgrenzen, die aus der statistischen Analyse hervorging. Da die Werte nicht aus den für die spektralphotometrische Untersuchung verwendeten Proben ermittelt wurden, sondern von Trnka 1991: 82 ff. übernommen wurden, muss jedoch auf eine quantitative Auswertung verzichtet werden. Vor allem deswegen, da diese Werte nun fast 25 Jahre alt sind und zum anderen, da sie aus einem anderen Bereich des identischen Grabens entnommen wurden. Nichtsdestotrotz erscheint es essentiell, dass neben den Farbwerten der Spektralphotometrie zusätzlich Laborwerte für ausgewählte bodenchemische Parameter ermittelt werden, mit welchen ebenfalls Horizonte und Schichtgrenzen festgelegt werden können. Dies würde weitere Referenzwerte liefern und die Farbverläufe möglicherweise mit Stoffgehaltsverläufen in Zusammenhang bringen. Weiterhin ist von entscheidender Bedeutung eine derartige Untersuchung nicht ausschließlich an einem Profil, sondern an mehreren, sich stark unterscheidenden, Bodenprofilen durchzuführen. Die Frage, ob Digitalfotografie einen Beitrag dazu leisten kann, Horizonte und deren Grenzen bei Bodenprofilen zu ermitteln, kann daher nicht vollständig beantwortet werden. Im Sinne dieser Studie kann allenfalls davon gesprochen werden, dass die Ergebnisse vielversprechend sind und dass bei weiterer Forschung damit gerechnet werden kann, dass Digitalfotografie in der Lage ist Schichtgrenzen und Horizonte über Clusteranalysen herauszuarbeiten.

## 8. Quellen

### 8.1. Literatur

**AD-HOC-AG BODEN** (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – Hannover.

**AYDEMIR S., KESKIN S. UND DREES L.R.** (2004): Quantification of soil features using digital image pro-cessing (DIP) techniques. – Geoderma 119, 1-8.

**BARCZI A., TÓTH T.M., CSANÁDI A., SÜMEGI P. UND CZINKOTA I.** (2006): Reconstruction oft he Paleo-environment and soil evolution oft he Csípó-halom kurgan, Hungary. – In: Quaternary International 156-157, 49-59.

**BAHRENBERG G., GIESE E., MEVENKAMP N. UND NIPPER J.** (2008): Statistische Methoden in der Geographie. Band 2. Multivariate Statistik. – Stuttgart. (= Studienbücher der Geographie)

**BEN-DOR E., HELLER D. UND CHUDNOVSKY A.** (2008): A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. – In: Soil science society American Journal 72, 1113-1123.

**BROCKES A.** (1980): Was ist Farbe – kann man sie messen? – In: Physik in unserer Zeit 11 (6), 169–178.

**DRAGANITS, E., PREH, A.** (2014): Römisches Gräberfeld von Halbturn: Überlegungen zum Volumen und Verwendungszweck der entnommenen Erde aus den Begrenzungsgräbchen der Grabgärten. - In: Doneus, N. (HRSG.), Das kaiserzeitliche Gräberfeld von Halbturn, Burgenland. Teil 1: Archäologie, Geschichte und Grabbrauch. – Mainz. (= Monographien des Römisch-Germanischen Zentralmuseums 122/1), , 277-298.

**FALK D.S., BRILL D.R. UND STORK D.G.** (1990): Ein Blick ins Licht. – Basel u.a.

**FONSTAD M.A., DIETRICH J.T., COURVILLE B.C. JENSEN J.L. UND CARBONNEAU P.E.** (2012): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. – In: Earth Surface Processes and Landforms 38, 421-430.

**GLASER R., HAUTER CH., FAUST D., GLAWION R., SAURER H., SCHULTE A. UND SUDHAUS D.** (2010): Physische Geographie kompakt. - Heidelberg.

**GÓMEZ-ROBLEDO L., LÓPEZ-RUIZ N., MELGOSA M., PALMA A.J., CAPITÁN-VALLVEY L.F. UND SÁNCHEZ-MARANÓN M.** (2013): Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: an experi-ment under controlled illumination conditions. – In: Comput. Electron. Agricult. 99, 200-208.

- GROß J.** (2010): Grundlegende Statistik mit R. Eine anwendungsorientierte Einführung in die Verwendung der Statistik Software R. – Wiesbaden.
- GÜNTHER K.** (2009): GIMP. Kurz & gut. – Köln.
- HARTEMINK A.E. UND MISNASNY B.** (2014): Towards digital soil morphometrics. – In: Geoderma 230-231, 305-317.
- HEINRICH M., HOFMANN T. UND ROETZEL R.** (2004): Geologie und Weinviertel. - Wien.
- HOLLIDAY V.T.** (2004): Soils in archaeological research. – Oxford.
- KRENN-LEEB A., GRÖMER K. UND STADLER P.** (HRSG.) (2006): Ein Lächeln für die Jungsteinzeit. Festschrift für Elisabeth Ruttkay. – In: Archäologie Österreichs, 17/2, 41-69.
- KUPER R., LÜNING J., STEHLI P. UND ZIMMERMANN A.** (1977): Der Bandkeramische Siedlungsplatz Langweiler 9, Beiträge zur neolithischen Besiedlung der Aldenhovener Platte 2. – Bonn. (= Rheinische Ausgrabungen 18).
- KÜHLKE D.** (2011): Optik. Grundlagen und Anwendungen. – Frankfurt.
- LIEDTKE S. UND POPP J.** (2006): Laser, Licht und Leben. – Weinheim.
- LIPSON S.G., LIPSON H.S. UND TANNHAUSER D.S.** (1997): Optik. – Heidelberg.
- LOISHANDL-WEISZ H.** (2006): Die Verfüllungsmechanismen eines Spitzgrabens am Beispiel der mittelneolithischen Kreisgrabenanlage Steinabrunn. – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.
- LOISHANDL-WEISZ H. UND PETICZKA R.** (2007): Die Verfüllungsmechanismen des Spitzgrabens der Mittelneolithischen Kreisgrabenanlage Steinabrunn, Niederösterreich. – In: Archaeologia Austriaca 90, 141-162.
- MCBRATNEY A.B., SANTOS M.L.M. UND MINASNY B.** (2003): On digital soil mapping – In: Geoderma 117, 3-52.
- MELICHAR P. UND NEUBAUER W.** (HRSG.) (2010): Mittelneolithische Kreisgrabenanlagen in Niederösterreich. – Wien. (= Mitteilungen der Prähistorischen Kommission 71).
- MORTIMER E. UND MÜLLER U.** (2003): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. – Stuttgart.
- MUNSELL® COLOR** (2000): Munsell® Soil Color Charts. Gretag McBeth, New Windsor, Wyoming.

- MYERS D.B., KITCHEN N.R., SUDDATH K.A., MILES R.J., SADLER E.J., UND GRUNDWALD S.** (2011): Peak functions for modeling high resolution soil profile data. – In: Geoderma 166, 74-83.
- NASSAU K.** (2001): The physics and chemistry of color. The fifteen causes of color. - New York. (= Wiley Series in pure and applied optics)
- NEUBAUER W. UND TRNKA G.** (2005): Rätselhafte Monumente der Steinzeit. Geheimnisvolle Kreisgräben, Katalog zur Niederösterreichischen Landesausstellung. – Wien.
- NIKITSCH R.** (1985): Kreisgrabenanlagen in Österreich – Das Luftbild als Grundlage für Prospektionsarbeiten. - Dissertation, Universität Wien, Wien.
- PAVLŮ I.** (1990): Die charakteristischen Einfüllungen von Grabenanlagen. In: Jahresschrift für Mitteldeutsche Vorgeschichte 73. – Berlin.
- PEDROTTI F., PEDROTTI L., BAUSCH W. UND SCHMIDT H.** (2002): Optik für Ingenieure. – Heidelberg.
- PETRASCH J. UND KROMER B.** (1989): Aussagemöglichkeiten von 14C-Daten zur Verfüllungsgeschichte prähistorischer Gräben am Beispiel der Mittelneolithischen Kreisgrabenanlage von Künzing-Unternberg, Ldkr. Deggendorf. - In: Archäologisches Korrespondenzblatt 19.
- PETRASCH J.** (1990): Mittelneolithische Kreisgrabenanlagen in Mitteleuropa. - In: Berichte der Römisch-Germanischen Kommission 71/1.
- PETICZKA R., HOLAWA F. UND RIEGLER D.** (2010): Structural analysis on the modified paleosol-sequence of Stillfried B with high resolution measurements of selected laboratory parameters. – In: Quaternary International 222, 168-177.
- RICHTER C. UND TEICHERT B.** (2009): Einführung in die digitale Bildverarbeitung. – Dresden.
- SCHEFFER F. UND SCHACHTSCHABEL P.** (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. - Heidelberg.
- SCHÖNWIESE C.-D.** (2013): Klimatologie. - Stuttgart.
- SCHUSTER R., DAURER A., KRENMAYR H.G., LINNER M., MANDL G.W., PESTAL G. UND REITNER J.M.** (2013): Rocky Austria. - Wien.
- SIROCKO F.** (2013): Geschichte des Klimas. - Stuttgart.

- SORIANO-DISLA J.M., JANIK L.J., VISCARRA ROSSEL R.A., MACDONALD L.M. UND MCLAUGHLIN M.J.** (2014): The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. – In: Applied Spectroscopy Reviews 49, 139-186.
- STEFFENS M. UND BUDDENBAUM M.** (2013): Laboratory imaging spectroscopy of a stagnic Luvisol profile – high resolution soil characterisation, classification and mapping of elemental concentration. – In: Geoderma 195, 122-132.
- TRNKA G.** (1991): Studien zu mittelneolithischen Kreisgrabenanlagen. - Wien.
- VERGINIS S.** (1986): Sedimentologische Untersuchungsmethoden und deren Anwendung und Auswertung am Beispiel zweier Profile bei Kamegg, Niederösterreich. - In: Archaeologia Austriaca 70.
- VISCARRA ROSSEL R.A., MINASNY B., ROUDIER P. UND MCBRATNEY A.B.** (2006): Colour space models for soil science. – In: Geoderma 133, 320-337.
- VISCARRA ROSSEL R.A., WALVOORT D.J.J., MCBRATNEY A.B., JANIK L.J. UND SKJEMSTAD J.O.** (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. – In: Geoderma 131, 59-75.
- VISCARRA ROSSEL R.A., FOUAD Y., WALTER C.** (2008): Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. – In: Biosystems Engineering 100, 149-159.
- VISCARRA ROSSEL R.A., BUI E.N., CARITAT DE. P. UND MCKENZIE N.J.** (2010): Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible-near-infrared reflectance spectra. In: Journal of geophysical Research 115, F04031.

## 8.2. Internetquellen

N.N.: Copyright 2001 Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

<http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/gruenluecke/5112> (25.05.2015)

N.N.: Copyright Colorlite: <http://www.colorlite.de/de/sph850> (25.5.2015)

Horst Frank, Jailbird and Phrood:

[http://de.wikipedia.org/wiki/Wellenl%C3%A4nge#/media/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_c.svg](http://de.wikipedia.org/wiki/Wellenl%C3%A4nge#/media/File:Electromagnetic_spectrum_c.svg) (25.5.2015)

BenRG and cmglee:

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy\\_gamut\\_comparison.svg#/media/File:CIE1931xy\\_gamut\\_comparison.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg#/media/File:CIE1931xy_gamut_comparison.svg) (25.05.2015)

VIAS - Vienna Institute for Archaeological Science: N.N.: <http://vias.univie.ac.at/experimental-archaeology/heldenberg/> (25.5.2015)

N.N.: [http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic\\_circular\\_enclosures\\_in\\_Central\\_Europe](http://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic_circular_enclosures_in_Central_Europe) (25.5.2015)

Musi V.J.: <http://ngm.nationalgeographic.com/2011/06/gobekli-tepe/musi-photography> (25.5.2015)

N.N.: ©CRAN PROJEKT - [HTTP://CRAN.R-PROJECT.ORG/](http://CRAN.R-PROJECT.ORG/) (25.05.2015)

## Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass die ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, .....

## **Curriculum Vitae**

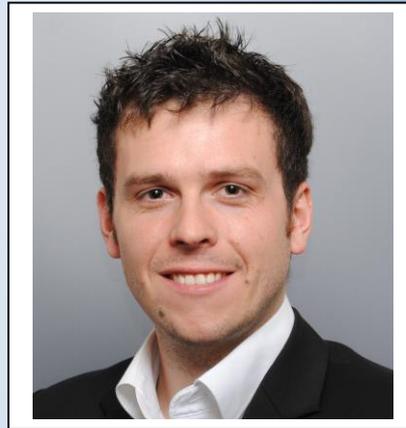
**Daniel  
Schweighoffer**

### **Master of Science (M.Sc.)**

Physische Geographie  
(Voraussichtlich 07/2015)

### **Bachelor of Arts (B.A.)**

Geschichte (Hauptfach)  
Naturwissenschaftliche  
Archäologie (Nebenfach)



Geburtsort: Mannheim

Staatsangehörigkeit: deutsch

DanielSchweighoffer@hotmail.com

## Schule & Studium

06.1996 - 06.2006	Allgäu-Gymnasium Kempten	
07.2006 - 08.2007	Wehrdienst (Bad Salzungen)	
11.2006 - 08.2007	Freiwillig verlängerter Wehrdienst bei der Bundeswehr (ABC-Abwehr, Selbstschuttschule Sonthofen) (Stabsdienst)	
	- Ordonnanz Veranstaltungsmanagement, Service	
10.2007 - 09.2012	Studium: Eberhards-Karl Universität Tübingen <i>(Tübingen, Deutschland)</i>	
10.2007 - 03.2008	B.Sc. Geowissenschaften	
04.2008 - 02.2012	B.A. Geschichte und Naturwissenschaftliche Archäologie	Abschlussnote: 1.9
	<u>Schwerpunkte:</u> <i>Chemische und physikalische Datierungsmethoden</i>	
	- <sup>14</sup> C, Dendrochronologie, Lumineszenzdatierung	
	<i>Geoarchäologie, Geophysikalische Prospektion</i>	
	- <i>Geoelektrik, Geomagnetik, Rammkernsondierung</i>	
	<i>Römische Geschichte der Kaiserzeit und Spätantike</i>	
10.2011 - 09.2012	Geschichte, Geographie (Lehramt)	
	<u>Schwerpunkte:</u>	
	- <i>Fachdidaktik, Schulpädagogik</i>	
08.2010 - 12.2010	Auslandsstudium: University of Connecticut (Storrs, Connecticut, USA)	Abschlussnote: 2.0
	<u>Schwerpunkte:</u>	
	- Astronomie	
Seit 10.2012	<b>Studium: Universität Wien (Wien, Österreich)</b> <b>M.Sc. Physische Geographie</b>	<b>Zwischennote: 1.5</b>
	<u>Schwerpunkte</u>	
	- <i>Theamtisch: Klimaänderungen, Paläoumweltanalyse, Geoökologie, Regionale Geologie, Bodenkunde</i>	
	- <i>Statistik (Clusteranalysen, Interpolation, Geostatistik)</i>	
	- <i>Fernerkundung (Spektralauswertung v. Erdoberflächenmerkmalen)</i>	
	- <i>GIS (Digitale Geländemodelle, Kartenerstellung)</i>	
	- <i>Laboranalytik (Spektrometrie, Sedimentanalysen)</i>	

## Arbeitserfahrung und Tätigkeiten

05.2002 - 05.2002	Praktikum: Stadtarchäologie Kempten
07.2004 - 02.2011	Haustechnik des „Forum Allgäu Kempten“
	- Haustechnik, Ausstellungsaufbau
10.2009 - 08.2011	Hiwi: Informationswissenschaftliche Fakultät <i>(Bildverarbeitung)</i>
02.2011 - 02.2012	Praktikum: Kulturamt Kempten <i>(Besucherstatistik via Excel)</i>
08.2012 - 08.2012	Hiwi: Paläoanthropologie <i>(EDV Wartung)</i>
10.2012 - 02.2015	Stadthalle Wien <i>(Publikumsdienst)</i>
02.2014 - 02.2014	Praktikum: Geoinformationsdienst der Bundeswehr
	- <i>Erstellung von Landeskundlichen Präsentationen</i>
	- <i>Präsentieren von Informationen vor Publikum</i>

## Berufliche Weiterbildungen

11.2011 - 12.2011	,Economic' Basics (IHK)
01.2012 - 02.2012	Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre

## Sprachen

Deutsch	Muttersprache
Englisch	Verhandlungssicher
Spanisch	Gute Kenntnisse (Unicert II, MCER B2)
Latein	Gute Kenntnisse (Latinum)

## EDV

MS Office:	
MS Word	Sehr gute Kenntnisse
MS Excel	Sehr gute Kenntnisse
MS Powerpoint	Sehr gute Kenntnisse
MS Access	Grundkenntnisse

Geoinformationssysteme:	
ArcGis 10.2.	Sehr gute Kenntnisse
QGIS 2.8.1.	Grundkenntnisse
Grass Gis 6.4.4.	Grundkenntnisse

Digitale (3D) Bildverarbeitung:	
Meshlab	Grundkenntnisse
Visual SFM	Grundkenntnisse
GIMP	Grundkenntnisse

Statistikprogramme:	
R	Grundkenntnisse
SPSS	Grundkenntnisse

Programmierung:	
Python	Grundkenntnisse

## Sonstiges

Führerschein:	Klasse B
Tauchschein:	Open Water Diver
Hobbys:	Sportschwimmen, Tauchen, Fussball Astronomie Reisen (Südafrika, USA etc.) Strategie und Aufbauspiele

Kempton, 25.05.2015

Daniel Schweighoffer