



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Struktur und Dynamik der Hofermühle-Rutschung“

verfasst von / submitted by

Bernhard Grall BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2020 / Vienna 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Geographie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass 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, am 21. August 2020

Bernhard Grall

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei allen bedanken, die mich im Verlauf dieser Masterarbeit unterstützt haben. Mein Betreuer Prof. Thomas Glade hat mich den gesamten Prozess gut unterstützt, Anregungen zu Themen und Methodik gegeben, meine Fragen schnell beantwortet und ausführliches Feedback gegeben. Dafür möchte ich mich bedanken. Mein Dank geht auch an Margherita Stumvoll, zu deren Doktorarbeit ich mit dieser Abschlussarbeit ein wenig beitrage. Sie hat sich zu Besprechungen über den genauen Ablauf und praktische Fragestellungen gerne Zeit genommen. Gerade zum Finden einer geeigneten und durchführbaren Fragestellung und Methodik, aber auch zum Beginn der Laborarbeiten war diese Unterstützung für mich sehr wichtig. Danke an Thomas Binder für die Hilfe in der Werkhalle beim Aufsperrern und beim Aufschneiden der Bohrkerne. Im Labor möchte ich im Speziellen bei Prof. Robert Peticzka für seine fundierten fachlichen Ratschläge und bei Raphael Müller für seine vielfältige praktische Hilfe und Hilfsbereitschaft bedanken. Danke auch an alle anderen Leute, die mich bei meiner Masterarbeit unterstützt haben und die ich nicht namentlich erwähnt habe. Zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, für die Finanzierung meines Studiums, besonders aber für ihr Vertrauen in mich auch in Zeiten geringer Motivation.

Inhalt

Erklärung	i
Danksagung	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis	v
Zusammenfassung.....	vi
Abstract	viii
1. Einleitung.....	1
2. Hypothesen und Forschungsfragen.....	3
3. Forschungsstand.....	5
3.1. Definitionen gravitativer Massenbewegungen	5
3.2. Klassifikationen gravitativer Massenbewegungen.....	5
3.3. Ursachen und Auslöser gravitativer Massenbewegungen.....	8
3.4. Erfassung und Monitoring gravitativer Massenbewegungen	10
4. Untersuchungsgebiet	18
4.1. Lage der Hofermühle-Rutschung.....	18
4.2. Klima der nahen Station Waidhofen an der Ybbs	19
4.3. Hydrologie der Umgebung der Hofermühle-Rutschung	21
4.4. Geologie der Hofermühle-Rutschung und der Umgebung	21
4.5. Böden im Umfeld der Hofermühle-Rutschung.....	22
4.6. Landnutzung der Hofermühle-Rutschung und im Bezirk Waidhofen	23
4.7. Allgemein über gravitative Massenbewegungen in Niederösterreich und in der Flysch- und Klippenzone	23
4.8. Die Entwicklung der Hofermühle-Rutschung	26
5. Methoden.....	33
5.1. Datenlage	33
5.2. Darstellung der Rammkernsondierungen DPH 1, 2, 3 und 5	36
5.3. Feldansprache und Laboranalyse der Bohrkerne B7, B8 und B9	36
5.4. Darstellung der Inklinometer Inkauto und Ink1	39
6. Ergebnisse.....	41
6.1. Beschreibung und Interpretation Rammkernsondierungen DPH 1, 2, 3 und 5	41
6.2. Beschreibung und Interpretation der Bohrkerne B7, B8 und B9	45

6.3.	Beschreibung und Interpretation der Inklinometer Inkauto und Ink1.....	55
7.	Diskussion.....	62
8.	Schlussfolgerung.....	70
9.	Ausblick.....	72
10.	Literaturverzeichnis.....	75
11.	Anhang.....	79
11.1.	Anhang A: Rammkernsondierungen	79
11.2.	Anhang B: Feldansprache der Bohrkerne.....	81
11.3.	Anhang C: Laborergebnisse	88
11.4.	Anhang D: Rammkernsondierungen ‚Landslide Dynamics‘ (BOUTE et al. 103-108, 135-138) 91	
11.5.	Anhang E: Bohrkerne ‚Landslide Dynamics‘ (BOUTE et al. 2019: 89-91)	99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Skizze einer Rotationsrutschung (HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 11)	8
Abbildung 2: Spezifikationen der leichten (a) und schweren (b) Rammkernsondierung (EIBFELDT 2011: 3).....	12
Abbildung 3: Schematisches Profil und Querschnitt eines Inklinometers (STARK und CHOI 2008: 340)	15
Abbildung 4: Hofermühle-Rutschung vom gegenüberliegenden Hang (eigene Aufnahme, 29.03.2019)	18
Abbildung 5: Lage der Hofermühle-Rutschung (Datengrundlage: LAND NIEDERÖSTERREICH 2020, STADT WIEN UND ÖSTERREICHISCHE LÄNDER BZW. ÄMTER DER LANDESREGIERUNG 2016)	19
Abbildung 6: Monatliche Temperaturmittel an der Wetterstation Waidhofen an der Ybbs im Durchschnitt 1981-2010 (Datengrundlage: ZAMG o.J.)	20
Abbildung 7: Monatliche Niederschlagssummen an der Wetterstation Waidhofen an der Ybbs im Durchschnitt 1981-2010 (Datengrundlage: ZAMG o.J.)	20
Abbildung 8: Geologische Karte Niederösterreichs überlagert von verschiedenen Inventaren gravitativer Massenbewegungen (BELL 2013: 469)	24
Abbildung 9: Lageplan der Hofermühle-Rutschung vom 11.12.2013 (SAUSGRUBER 2013b)	28
Abbildung 10: Profil der Hofermühle-Rutschung vom 11.12.2013 (SAUSGRUBER 2013b)	29
Abbildung 11: direkte Untergrunderkundungsmethoden verschiedener Messkampagnen am Standort Hofermühle (20170824_DPH = im August 2017 im Rahmen der Diplomarbeit von Karl (2018) durchgeführte Rammkernsondierungen, 20181019_DPH/20181019_INC/20181019_TDR/20181019_PZM = im Oktober 2018 im Rahmen des Projekts NoeSLIDE durchgeführte Rammkernsondierungen/installierte Inklinometer/Time Domain Resistance-Sonden/Piezometer, 20190328_DPH/20190329_INC = im März 2019 im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚landslide dynamics‘ durchgeführte Rammkernsondierungen/installiertes Inklinometer, ein weiteres, zu einem späteren Zeitpunkt gesetztes Inklinometer und weitere Rammkernsondierungen sind ebenfalls verzeichnet (STUMVOLL 2020)	32
Abbildung 12: Untergrunderkundungen, die in dieser Arbeit verwendet werden (im Rahmen des Projekts NoeSLIDE im Herbst 2018 durchgeführt) (Datengrundlage: NOEL GV 2009)	35
Abbildung 13: DPH 2 vom 17.09.2018	42
Abbildung 14: DPH 5 vom 17.09.2018	43
Abbildung 15: Bohrkern B7 (5,5 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018).....	45
Abbildung 16: Bohrkern B8 (3,5 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018).....	46

Abbildung 17: Bohrkern B9 (4 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018).....	46
Abbildung 18: Horizonteinteilung der Bohrkern und Darstellung der Textur der Horizonte (Fingerprobe, Bodenfarben nach DIN 4023), die Höhen stehen dabei im richtigen Maßstab zueinander, die Entfernungen nicht (genaue Lage siehe Karte Abb.12).....	48
Abbildung 19: Laborergebnisse von Bohrkern B7	49
Abbildung 20: Laborergebnisse von Bohrkern B8	51
Abbildung 21: Laborergebnisse von Bohrkern B9	52
Abbildung 22: kumulierter Versatz des automatischen Inklinometers entlang der A- und B-Achse vom 26.09.2019 im Vergleich zu Nullmessung am 14.11.2018 (y-Achse)	55
Abbildung 23: kumulierter Versatz in 0,5 m und 7 m Tiefe entlang der A- und B-Achse des automatischen Inklinometers von 14.11.2018 bis 26.09.2019	56
Abbildung 24: kumulierter Versatz der A- und B-Achse des manuellen Inklinometers zu neun Zeitpunkten im Vergleich zur Nullmessung am 18.12.2018	58
Abbildung 25: West-Ost Schnitt durch den Untergrund der Hofermühle-Rutschung mit den untersuchten direkten Methoden und einer potenziellen Gleitfläche (rote Linie)	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Bewegungstyp und Material (Datengrundlage: CRUDEN und VARNES 1996: 38)	6
Tabelle 2: Datenbasis	34

Zusammenfassung

Gravitative Massenbewegungen als Naturgefahren betreffen weltweit zahlreiche Menschen und deren Infrastruktur, sind aber auch in den Alpen relevant. Um diese Prozesse besser zu verstehen und in weiterer Folge auch für die Erstellung von Schutzmaßnahmen oder Frühwarnsystemen kann das detaillierte Monitoring einzelner betroffener Hänge helfen. Die ‚Hofermühle-Rutschung‘ ist eine seit 2011 aktive gravitative Massenbewegung in Niederösterreich nahe Waidhofen an der Ybbs. Sie befindet sich im diesbezüglich besonders anfälligen Bereich der Flysch- und Klippenzone, die großteils durch tiefgründige Verwitterungsböden und wasserundurchlässige Gesteine gekennzeichnet sind. Es handelt sich vermutlich um eine eher flachgründige, in mehrere Schollen unterteilte Rotationsrutschung, die mit einem murartigen Prozess gekoppelt ist. 2013 wurde aufgrund der Gefährdung des unterhalb befindlichen Wohngebäudes und der Straße ein Lokalausweis durch einen geologischen Gutachter durchgeführt und ein konzeptionelles Modell erstellt, wobei der Prozess in verschiedene Abschnitte unterteilt wurde (von oben nach unten ‚Initialstadium mit Rissen und Absetzungen‘, ‚Rutschkörper‘, ‚breiige Masse‘). Die Rutschung wurde und wird in weiterer Folge im Rahmen des Projekts ‚NoeSLIDE‘ der Universität Wien über einen längeren Zeitraum mit einem breiten Methodenspektrum aus Oberflächen- und Untergrunderkundung untersucht. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erkenntnis von Struktur und Aktivität des oberen, initialen Bereichs der Hofermühle-Rutschung im Zeitraum 2018/19. Dabei stellt sich auch die Frage, ob das konzeptionelle Modell von 2013 verbessert werden kann. Basis dafür sind direkte Untergrunderkundungsmethoden, namentlich Rammkernsondierungen, Bohrungen und Inklinometer. Dabei wurden drei im Rahmen des Projekts NoeSLIDE entnommene Bohrkerne aufgeschnitten und dokumentiert. Entnommene Proben wurden im Labor bezüglich Textur, Karbonatgehalt, Glühverlust und Konsistenzgrenzen analysiert. Gemeinsam mit den ebenfalls verfügbaren Daten von vier Rammkernsondierungen, einem manuellen und einem automatischen Inklinometer wurden diese Ergebnisse interpretiert. Dabei zeigte sich, dass durch die ausgewählten Verfahren auf eine Gleitfläche in etwa 2-3 m Tiefe geschlossen werden kann. Die in etwa hangparallel angeordneten Standorte legen eine großräumige laterale Erstreckung der gravitativen Massenbewegung über mehr als 70 m

nahe, das im Wesentlichen aus einem Profil in Falllinie bestehende Untergrundmodell von 2013 kann somit ergänzt werden. In Kombination mit weiteren, schon verfügbaren direkten Untergrunddaten kann auch hangauf- und abwärts eine weitere Fortsetzung des Initialstadiums der Rutschung angenommen werden. Eine genaue Abgrenzung ist jedoch nicht möglich. Ebenso erscheint für eine Validierung der Aussagen, besonders für solche, die vorwiegend auf der Basis von Rammkernsondierungen getroffen wurden, eine Kombination mit anderen Methoden und fortgesetztes Monitoring notwendig. Auch auf die Bewegung der Rutschung kann mithilfe der gewählten Methoden, insbesondere der Inklinometer, geschlossen werden. Diese liegt im Bereich von mm-cm und fand größtenteils in 1-2 kurzen (Tage-Wochen) Phasen statt. Aufgrund der nur spärlichen punktuellen Information kann aber die Kinematik der gesamten Massenbewegung nicht gut wiedergegeben werden, dafür wäre ein engmaschigeres Beobachtungsnetz notwendig. Auch der Vergleich mit Methoden der Oberflächenerkundung könnte dazu neue Aufschlüsse bieten.

Abstract

Landslides as natural hazards are affecting many people and assets not only worldwide, but also in the Alps. For a better understanding of those processes the monitoring of single slopes can be suitable. This is of further importance regarding preventive and protective measures. The 'Hofermühle-landslide' in Lower Austria near Waidhofen an der Ybbs is active since 2011. It is situated in the especially landslide-endangered 'Flysch- und Klippenzone'. This geological unit is mostly characterized by deep residual soils and impermeable rocks. The 'Hofermühle-landslide' is presumably a shallow rotational sliding process consisting of several blocks, which is coupled with a debris flow. In 2013, a building and street beneath was endangered. Therefore, an expert opinion was assigned. It included a conceptional model separating the landslide into several sections (from top to bottom initial stage with cracks and degradations, sliding mass, pasty mass). This model is mainly describing the underground with the use of a longitudinal section ca. in fall line of the slope. The Hofermühle landslide has been surveyed thereafter as part of the project 'NoeSLIDE' of the University of Vienna. This survey includes a broad field of investigations of the surface and subsurface over a longer period. Aim of this thesis is to get insight into the structure and dynamics of the initial stage of the 'Hofermühle-landslide' in the period 2018/19. Furthermore, it is of interest, if the conceptional model of 2013 can be improved. These goals are achieved through the use of direct underground investigation methods, namely 'Dynamic Probing Heavy (DPH)', 'Coring' and 'Inclinometers'. Three drill cores have been provided by the project 'NoeSLIDE'. They were cut open, registered and samples brought to the laboratory. Texture, carbonate content, loss on ignition and Atterberg limits were analyzed. The results of those methods were interpreted together with the data of four DPHs, one manual and one automatic inclinometer also made available by the project. By means of the selected methods conclusions could be drawn about a sliding plane in 2-3 m depth. The slope parallel positions of the measuring devices imply a lateral extent of the landslide of more than 70 m. The conceptional model of 2013 can therefore be complemented in another direction. A continuation of the sliding plane several 10s of meters upslope and downslope can be assumed in combination with other available direct underground data from the Hofermühle. However, an exact delineation of the sliding process in its initial state is currently not possible. Also, for the validation of the assumptions made

above, especially when relying in great parts on DPH only, the comparison with other methods and continued monitoring seems necessary. The analyzed data, in particular from the inclinometers, is also indicative of a current movement of the landslide. The displacement is likely to be in the range of mm-cm and is mainly happening in 1-2 phases of days to weeks. Due to the point-like nature of the measurements it can hardly be concluded onto the kinematics of the three-dimensional landslide. For this purpose, a more close-meshed net of observations is suggested. The comparison with surface investigations could give new insights too.

1. Einleitung

Gravitative Massenbewegungen kommen weltweit in den verschiedensten Klimaten und Geländesituationen vor (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 10). Aufgrund der Ausbreitung des Siedlungsraumes betrafen sie zunehmend den Menschen und wurden zur Naturgefahr (vgl. ZANGERL et al. 2008: 2). LI und MO (2019: 68) erwähnen Statistiken, wonach 14 % der Verletzungen und Todesfälle bei Naturkatastrophen weltweit Folge von gravitativen Massenbewegungen sind. So gab es im 20. Jahrhundert einige große Bergstürze mit zahlreichen Todesopfern. Auch die Bewohner der Alpen sind hierbei gefährdet, zum Beispiel löste ein Niederschlagsereignis im Oktober 2000 zahlreiche Muren und Rutschungen aus. (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 38) Neben der schwerwiegenden Gefahr für Menschenleben kann es aber auch zu großen Schäden an Wirtschaft und Infrastruktur kommen. So bedürfen zum Beispiel instabile Hänge oberhalb von Autobahnen besonders genauer Beobachtung (vgl. SIMEONI und MONGIOVI 2007: 653). Die Gefahr durch gravitative Massenbewegungen wird jedoch oft unterschätzt (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 38). Rutschungen im Speziellen können aufgrund der teilweise großen Masse zu hohen Schäden führen und sind schwierig zu stabilisieren, durch meist geringe Geschwindigkeiten aber selten lebensbedrohlich (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 10).

Damit solchen Naturgefahren begegnet werden kann, gibt es verschiedene Maßnahmen von der Sammlung von Informationen zur Gefährdung über die Entwicklung von Szenarien im Katastrophenfall bis hin zu Frühwarnsystemen. Zuerst müssen gravitative Massenbewegungen überhaupt einmal erkannt und ihre natürlichen und menschlichen Beeinflussungen verstanden werden. Dies kann Schwierigkeiten bereiten, da es sich um sehr unterschiedliche Prozesse handelt und die bewegte Masse auch nachträglich überformt sein kann. Die Erstellung eines Inventars bildet den ersten Schritt. Erst danach können Gefahren in Form von Zonen und Klassen identifiziert und Strategien des Risikomanagements angewandt werden. Regionale Ansätze und die Untersuchung von Einzelobjekten sind hier grundsätzlich zu unterscheiden. Letztere sind gerade für die Planung von Schutzmaßnahmen wichtig. Die Sicherung einzelner instabiler Hänge ist mit hohen Kosten verbunden, diese Maßnahme sollte daher gut vorbereitet und begründet sein. Gleiches gilt für Verbauungsmaßnahmen wie Ableitdämme. Eine weitere Möglichkeit ist die Erstellung von Modellen und Prognosen, auch

dafür liefern detaillierte Messungen am Einzelhang notwendige Parameter. (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 38-41)

Die Hofermühle Rutschung ist eine seit 2011 (wieder) aktive gravitative Massenbewegung im niederösterreichischen Mostviertel nahe Waidhofen an der Ybbs (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 2). Sie ist Teil eines Monitoring-Programms der Universität Wien, das seit 2014 läuft (vgl. ENGAGE 2020). Gemäß dem vorher gesagten wird hier beispielhaft an einem gut zugänglichen Standort am Verständnis von gravitativen Massenbewegungen und ihren Ursachen gearbeitet. Vielleicht hilft die hier gewonnene Erkenntnis ein Stück weit, dass Gefährdung und Kosten durch solche Naturgefahren in Zukunft vermindert werden können.

2. Hypothesen und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist eine verbesserte Kenntnis von Struktur und Aktivität der Hofermühle-Rutschung im Zeitraum 2018/19, soweit sich diese aus den gewonnenen direkten Untergrunddaten ableiten lassen. Dabei sollen aus der Auswertung und Zusammenführung dieser Daten Rückschlüsse auf den Bereich des Initialstadiums der Rutschung gezogen werden (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 6f).

Folgende Hypothesen sollen im Rahmen dieser Masterarbeit verifiziert werden:

H1: Eine Kombination von direkten Untergrunderkundungsmethoden kann das bestehende konzeptionelle Modell (SAUSGRUBER 2013a, 2013b) der Hofermühle-Rutschung verbessern.

Zur Beantwortung dieser Hypothese werden die folgenden Forschungsfragen gestellt, denen im Weiteren nachgegangen werden soll:

- Welche Strukturen lassen sich durch direkte Verfahren (Rammsondierungen, Bohrungen, Inklinometermessungen) im Untergrund abgrenzen?
- Welche Vorteile erbringt eine Kombination der genannten Methoden?
- Wie können diese, an einzelnen Standorten ermittelten Erkenntnisse genutzt werden, um ein 3D Untergrundmodell der Rutschung zu erstellen?
- Welche Übereinstimmungen oder Unterschiede gibt es mit dem bestehenden konzeptionellen Modell (SAUSGRUBER 2013a)?

Die erste Hypothese zielt darauf hin, die Struktur der Rutschung zu erfassen. Daten ausgewählter direkter Methoden sollen erhoben und/oder interpretiert und zusammengeführt werden, um die bisherige modellhafte Vorstellung des Untergrunds zu überprüfen und wenn möglich zu ergänzen.

H2: Eine Aktivität der Hofermühle-Rutschung kann mittels direkter Untergrunderkundungsmethoden festgestellt und abgegrenzt werden.

Zur Beantwortung dieser Hypothese werden die folgenden Forschungsfragen verfolgt:

- In welchen Bereichen und in welcher Intensität kann über direkte Verfahren (Rammsondierungen, Bohrungen, Inklinometermessungen) auf eine Bewegung der Rutschung geschlossen werden?

- Inwiefern hat sich die Bewegung, wenn feststellbar, im Messzeitraum verändert?

Die zweite Hypothese beschäftigt sich mit der Dynamik der Rutschung. Es geht darum, in den gewählten Daten Rückschlüsse auf eine Bewegung zu finden und diese wenn möglich in ihrer räumlichen und zeitlichen Variation zu beschreiben.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert. Zum Zwecke einer gemeinsamen Wissensbasis wird zunächst in den aktuellen Forschungsstand eingeführt. Im Anschluss wird das Untersuchungsgebiet und dessen Erforschung genauer beschrieben. Daraufhin werden die Daten, die Basis dieser Arbeit sind, aufgelistet. Danach wird die Methodik angeführt, die speziell im Rahmen der vorliegenden Untersuchung angewandt wurde. Es folgen die Ergebnisse dieser Analysen, die beschrieben und diskutiert werden. Am Ende kommen noch eine Schlussfolgerung und ein Ausblick.

3. Forschungsstand

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über die Forschung zu gravitativen Massenbewegungen gegeben werden. Nach einem kurzen Abriss zu Definition und Klassifikation dieser Naturereignisse folgt eine Zusammenstellung von Ursachen und Auslösern, wie sie in der Literatur erkannt wurden. Den Schwerpunkt bilden im Anschluss aktuelle Ansätze der Erfassung von gravitativen Massenbewegungen.

3.1. Definitionen gravitativer Massenbewegungen

Der Begriff „landslide“ wurde im 19. Jahrhundert in den USA in den wissenschaftlichen Gebrauch eingeführt. Davor bzw. in Großbritannien war eher der Begriff „landslip“ verwendet worden. (vgl. CRUDEN 1991: 27f)

Mit „landslide“ wurde zunehmend eine recht große Bandbreite an Prozessen bezeichnet. Auf der Basis von mehreren Vorläufern (z.B. VARNES 1958, CRUDEN 1991) definieren CRUDEN und VARNES (1996: 36) diesen Begriff vereinfacht als „the movement of a mass of rock, earth or debris down a slope“. Dennoch gibt es noch weitere Bemühungen um Klassifikationen, die die unterschiedlichen fachlichen Zugänge widerspiegeln (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 4). DIKAU und GLADE (2002: 38) definieren Massenbewegungen als „bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft.“ Ein aktuelles Beispiel liefern KAZEEV und POSTOEV (2017: 83): “a process of changes in stress-strain state of a slope ground mass leading to a mass separation and ground movement downslope, while maintaining a continuous contact between sliding mass and underlying undisturbed ground.”

3.2. Klassifikationen gravitativer Massenbewegungen

Nachdem gravitative Massenbewegungen ein sehr breites Forschungsfeld darstellen, kam es schon früh zu Versuchen der Strukturierung. Bewegungstypen, Materialtypen, Geschwindigkeiten und Wassergehalte wurden unterteilt. Zum Beispiel unterschied Baltzer 1875 fallende, gleitende und fließende Bewegungen. (vgl. LI und MO 2019: 70) Eines der gebräuchlichsten Systeme, das auf einigen dieser Vorläufer aufbaut, stellt jenes nach CRUDEN und VARNES (1996) dar. Dieses baut auf internationalen Standards auf, die durch die UNESCO-Arbeitsgruppe für die Inventarisierung von Hangrutschungen erstellt wurden (vgl. DIKAU und

GLADE 2002: 40). Intention der Klassifikation war, ein nützliches und präzises Vokabular zu schaffen, mit dem gravitative Massenbewegungen beschrieben werden können. Jede Massenbewegung wird durch zwei Nomen grundlegend beschrieben: Material (Festgestein, Schutt, Erde) und Bewegungstyp (fallen, kippen, rutschen, ausbreiten, fließen). (vgl. CRUDEN und VARNES 1996: 36f) Aus der Kombination dieser zwei Kategorien können verschiedene Typen gravitativer Massenbewegungen abgegrenzt werden. Diese sind in Tabelle 1 ersichtlich. Als zusätzliche Deskriptoren werden noch der Status, die Verteilung und die Art der Aktivität sowie Geschwindigkeit und Wassergehalt eingeführt. Der Status der Aktivität unterscheidet aktive, reaktivierte, ausgesetzte sowie verschiedene Arten von inaktiven Massenbewegungen (z.B. schlafend, reliktsch). Die Verteilung der Aktivität beschreibt die Entwicklung im Raum, also etwa vergrößernde, verkleinernde, vorstoßende oder rückschreitende Bewegung. Die Art der Aktivität zeigt an, inwiefern verschiedene Bewegungen zur gravitativen Massenbewegung beitragen. Hier werden einzelne, sukzessive, multiple, zusammengesetzte und komplexe Aktivitäten unterschieden. (vgl. ebd.: 38, 46-52) Die möglichen Geschwindigkeiten reichen von sehr schnell (m/s) bis zu sehr langsam (mm-cm/Jahr). (vgl. HUNGR et al. 2014: 169)

Tabelle 1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Bewegungstyp und Material (Datengrundlage: CRUDEN und VARNES 1996: 38)

		Material (type of material)		
		Festgestein (rock)	Schutt (debris)	Erde (earth)
Bewegungstyp (type of movement)	Fallen (fall)	Steinschlag (rock fall)	Schuttsturz (debris fall)	Erdsturz (earth fall)
	Kippen (topple)	Felskipfung (rock topple)	Schuttkippung (debris topple)	Erdkippung (earth topple)
	Gleiten (slide)	Felsrutschung (rock slide)	Schuttrutschung (debris slide)	Erdrutschung (earth slide)
	Ausbreiten (spread)	Felsdriften (rock spread)	Schuttdriften (debris spread)	Erddriften (earth spread)
	Fließen (flow)	Talzus Schub (rock flow)	Murgang (debris flow)	Erdfließen (earth flow)

Beim Fallen kommt es nach einer Ablösung nahezu ohne Scherbewegung zu einem fallenden, springenden oder rollenden Absturz, beim Kippen zu einer Vorwärtsrotation um einen Punkt unterhalb des Schwerpunkts. Gleiten ist eine hangabwärts gerichtete Bewegung auf Gleitflächen. Ausbreiten stellt eine laterale Bewegung bei gleichzeitigem Einsinken in weniger feste Schichten dar, Fließen bezeichnet eine kontinuierliche Deformation einer Masse ähnlich einer viskosen Flüssigkeit. Des Weiteren kann es zu einer Kombination der genannten Typen kommen, dies wird als komplexe Bewegung bezeichnet. (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 40)

Alternative Klassifikationen gravitativer Massenbewegungen haben einen Kontext in Geotechnik und Ingenieurwesen, wobei vor allem das involvierte Material anders eingeteilt wurde. Teilweise wurden auch spezifische Prozesstypen definiert. (vgl. HUNGR et al. 2014: 168) Die Autoren setzen sich für folgende zehn Materialtypen ein: „rock‘, ,clay‘, ,mud‘, ,silt‘, ,sand‘, ,gravel‘, ,boulders‘, ,debris‘, ,peat‘ and ,ice“ (ebd.: 169).

Weil es für das Verständnis der Hofermühle-Rutschung wichtig ist, sollen gleitende Bewegungen (=Rutschungen) im Folgenden näher beschrieben werden. VARNES (1978: 12) definiert die Bewegung folgendermaßen: “the movement consists of shear strain and displacement along one or several surfaces that are visible or may reasonably be inferred, or within a relatively narrow zone.” Es handelt sich also um sich aufbauende Spannung und anschließenden Versatz entlang einer oder mehrerer Gleitflächen. Die wichtigste Unterscheidung von Rutschungen ist jene in Translations- und Rotationsrutschungen (vgl. VARNES 1978: 13f). Erstere ist durch eine ebene oder gewellte Gleitfläche meist entlang von Diskontinuitäten gekennzeichnet, letztere durch eine gebogene oder konkave Gleitfläche in ,homogenem‘ Material. Erstes Anzeichen für Rutschungsaktivität sind Risse, die auf einen Anbruch hinweisen, am Fuß wird die ursprüngliche Bodenoberfläche möglicherweise überdeckt. (vgl. CRUDEN und VARNES 1996: 56f)

Bei Rotationsrutschungen bleibt die Masse meist relativ intakt, die Oberfläche neigt sich dem Anriss zu. Oft kommt es zu rückschreitender Aktivierung. (vgl. CRUDEN und VARNES 1996: 56f) Tiefgründige Rotationsrutschungen kommen am häufigsten in gesättigtem Material mit geringer Permeabilität, also Ton oder Schluff, vor (vgl. HUNGR et al. 2014: 176). Für eine schematische Skizze einer Rotationsrutschung siehe Abbildung 1.

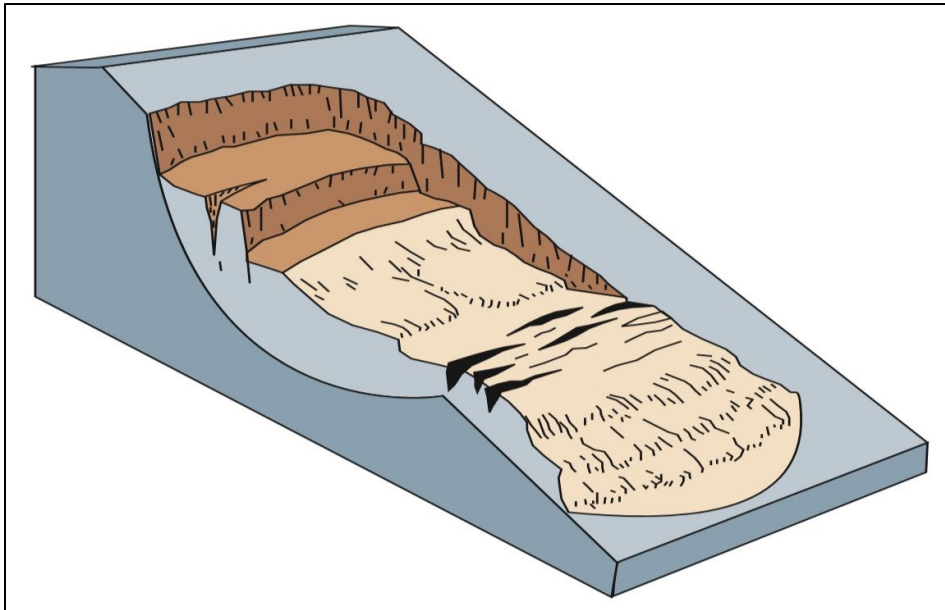


Abbildung 1: Schematische Skizze einer Rotationsrutschung (HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 11)

3.3. Ursachen und Auslöser gravitativer Massenbewegungen

Aufgrund vielfältiger vorbereitender Faktoren, Ursachen und Auslöser können gravitative Massenbewegungen fast überall vorkommen, einzelne Typen sind aber schon an bestimmte Eigenschaften (z.B. des Reliefs) gebunden (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 29).

Zunächst zu den vorbereitenden Faktoren. Sie führen zu einer unterschiedlichen Disposition gegenüber gravitativen Massenbewegungen (vgl. ENGAGE 2020). Auf den wichtigen Zusammenhang zwischen geologischen Einheiten und der Rutschungsanfälligkeit weist unter anderem OHLMACHER (2000: 10) hin. Ist ein Inventar vorhanden, so kann die Anzahl an Massenbewegungen pro Flächeneinheit (z.B. Quadratkilometer) ein gutes Maß dafür sein. Erdbeben und Erdfließen treten in einem Untersuchungsgebiet in den USA vornehmlich in feinkörnigem Material wie Mergel und unverfestigtem Alluvium auf. (vgl. ebd.) Auch die tektonischen Eigenschaften des Untergrundes können als vorbereitende Faktoren für gravitative Massenbewegungen gesehen werden. REMELLI et al. (2019: 1) weisen auf die Rolle von Brüchen und Verschiebungen hin, die die geomorphologische Entwicklung von Hängen steuern können.

Als Verwitterungsprodukt dieser geologischen Einheiten sind Böden bzw. Lockermaterial ebenfalls bedeutend im Hinblick auf gravitative Massenbewegungen. Einfluss haben dabei Bodenart- und -typ und mitunter auch Schrumpf-Schwell Zyklen (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39). Teilweise kann eine besondere Gefährdung aus geotechnischen Parametern hergeleitet

werden. Wird zum Beispiel die Anfälligkeit von Lockermaterial für Rutschungen betrachtet, so ist bei bindigen Böden die Scherfestigkeit und bei nicht bindigen der Reibungswinkel ausschlaggebend (vgl. SCHWENK 1992: 620). So sind zum Beispiel für kohäsionslose sandige Böden Reibungswinkel von 30-39° typisch. Der Reibungswinkel kann mit der Dauer der Verwitterung sinken. (vgl. FROESE und CRUDEN 2001: 12)

Dementsprechend weist OHLMACHER (2000: 10f) auch das Relief als weiteren Punkt in der Anfälligkeit für Massenbewegungen aus. Neben der Neigung sind Hangexposition und Hanghöhe ein Faktor für gravitative Massenbewegungen (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39).

Ein weiterer vorbereitender Faktor ist das Klima. Niederschlagsreiche Phasen, starke Schneeschmelze und häufige Frost-Tau-Zyklen können Hänge schwächen. (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39)

Nicht zuletzt können auch Änderungen in der Vegetationsdecke den Zustand eines Hanges langfristig verändern (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39).

Von diesen vorbereitenden Faktoren können konkrete Ursachen unterschieden werden. Dazu gehört einerseits eine erhöhte Scherspannung, die aus der Entfernung einer Stützung, zusätzlicher Last, kurzfristiger Beanspruchung, Heben oder Kippen resultieren kann. Andererseits kann die geringe Festigkeit von Material und Gefüge, aber auch die reduzierte Scherfestigkeit eine Ursache für gravitative Massenbewegungen sein. (vgl. CRUDEN und VARNES 1996: 69-71)

Häufig ist ein menschlicher Einfluss auf gravitative Massenbewegungen gegeben, festgestellt z.B. von BHASIN et al. (2002: 367), GARCIA LOPEZ-DAVALLILO et al. (2014: 395, 405) und LEUNG et al. (2011: 346). Menschliche Aktivitäten können einerseits z.B. durch Hanganschnitt oder Entfernung der Vegetation eine Stützung entfernen, andererseits den Hang z.B. durch Baumaßnahmen zusätzlich belasten. Kurzfristige Beanspruchungen entstehen durch Sprengungen, die Festigkeit des Materials kann durch Wasser (z.B. Staudamm, undichte Wasserversorgung) vermindert werden. (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39)

Werden nun die auslösenden Faktoren betrachtet, so ist Niederschlag wichtig. Langanhaltende Regenfälle sind hierbei von besonderer Bedeutung. (vgl. REMELLI et al. 2019: 1) Extremereignisse können etwa zu Clustern von Rutschungen führen (vgl. CANLI et al. 2018: 104). Im niederösterreichischen Baugrundkataster wird zum Beispiel Regen bei 76 % und

Schneesmelze bei 12 % der gravitativen Massenbewegungen als Auslöser genannt (vgl. PETSCHKO et al. 2013: 283). Weitere auslösende Faktoren umfassen schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Erdbeben und Vulkanausbrüche (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39).

Solche Auslöser führen zum Versagen des Hanges. „Versagen“ wird dabei von HUNGR et al. (2014: 167) als die signifikanteste Bewegungsepisode einer Massenbewegung definiert, währenddessen sich eine Bruchfläche voll ausbildet. Danach kann die Bewegung mehr oder weniger lang andauern. Zu den bewegungskontrollierenden Faktoren zählen Topographie, Geologie, Boden, Vegetation, Niederschlag und Hydrologie (vgl. DIKAU und GLADE 2002: 39). In weiterer Folge kann es zwischen Phasen der Aktivität auch zu inaktiven Phasen kommen (vgl. HUNGR et al. 2014: 167).

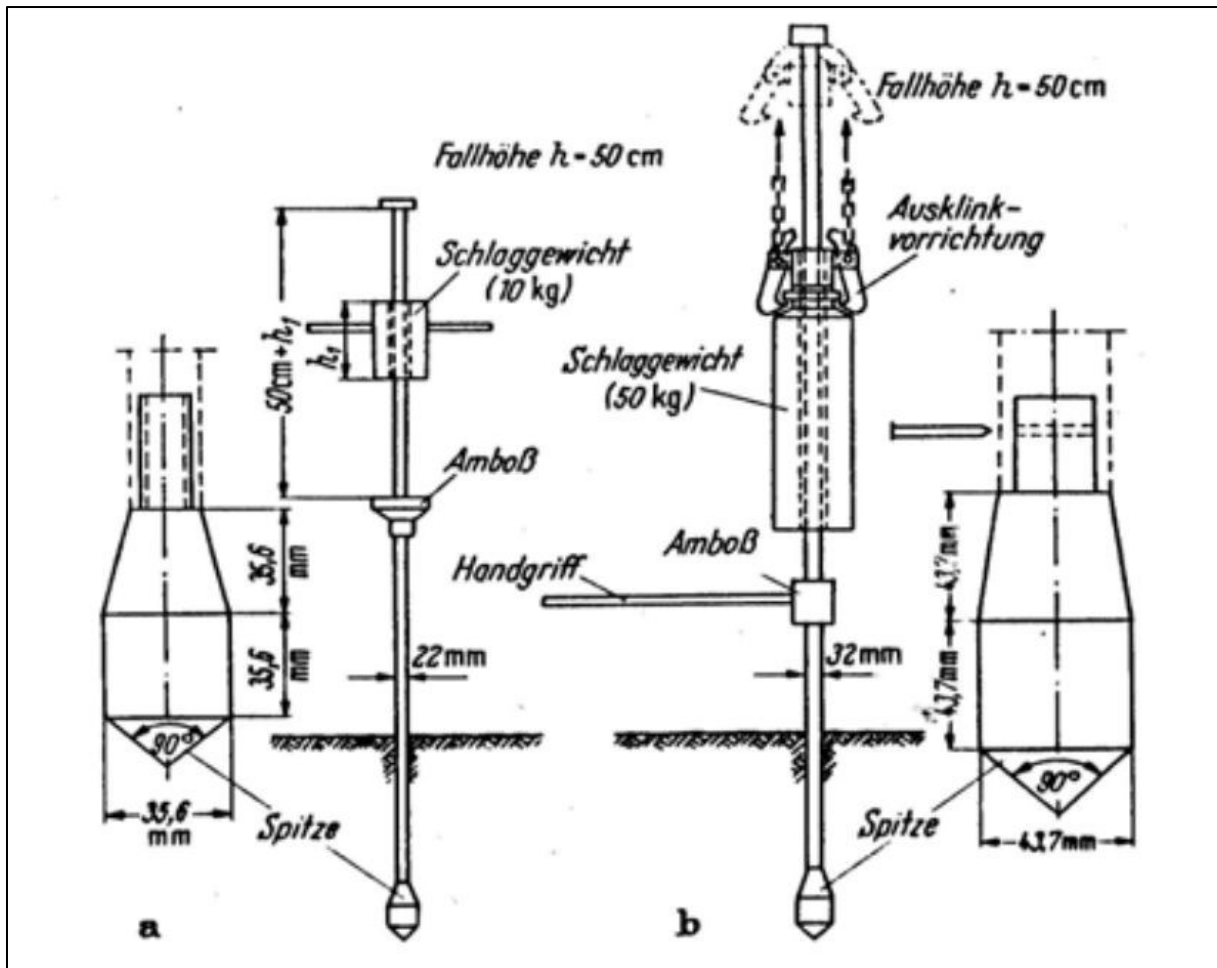
3.4. Erfassung und Monitoring gravitativer Massenbewegungen

Grundlegend kann zwischen Methoden der Untergrund- und Oberflächenexploration unterschieden werden (vgl. REFICE et al. 2019: 448).

Den Beginn der Erfassung einer gravitativen Massenbewegung an einem Einzelstandort (regionale Klassifikation soll hier nicht näher behandelt werden) kann im Studium von Karten und Luftbildern bestehen. Darauf folgt eine Feldbegehung, durchzuführende Analysen müssen geplant werden. Für die Erfassung der Oberfläche können Luftbilder, Radar- und Laserscanningdaten verwendet bzw. erhoben werden. Aus (alten und neueren) Luftbildern kann die Veränderung über einen größeren Zeitraum analysiert werden, Laserscanning bietet hohe Genauigkeiten und kann auch Vegetation durchdringen. Für die Untersuchung des Untergrundes sind unter anderem Bohrungen geeignet. Einerseits können damit Material, Tiefe der Gleitfläche und der Grundwasserspiegel analysiert werden, andererseits ist eine Installation von Instrumenten im Bohrloch möglich. Beispiele für solche Instrumente sind Inklinometer und Piezometer. Geophysikalische Messungen lassen ebenfalls auf Eigenschaften des Materials (Textur, Porosität, Verfestigung), Stratigraphie, Wassersättigung und die Tiefe des Grundgesteins schließen und sind nicht invasiv. Durch ihre zwei- oder dreidimensionalen Daten können sie Untergrunddaten zwischen Bohrungen interpolieren. (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 46f, 70f) Bei der gemeinsamen Betrachtung von Untergrund- und Oberflächendaten stellt sich die Frage der Vergleichbarkeit bzw. Zusammensetzbarkeit (vgl. REFICE et al. 2019: 448).

Im Folgenden sollen jene Methoden, die die Basis für die vorliegende Arbeit bilden, näher erläutert werden.

Eine relativ schnelle Methode der Untergrundexploration ist die Rammkernsondierung. „Sondierungen sind indirekte Aufschlüsse im Boden, die Aufschlussbohrungen nicht ersetzen, sondern ergänzen. Bei Sondierungen werden Gestänge in den Baugrund eingebracht und aus dem Eindringwiderstand indirekt auf Bodenarten, Schichtgrenzen und Festigkeiten des Untergrundes geschlossen.“ (EIBFELDT 2011: 1) Eine Standardisierung für unterschiedliche Sondiertypen ist in Normen festgehalten, für die (in dieser Arbeit behandelte) Rammkernsondierung (DP) gilt DIN EN ISO 22476-2 (vgl. ebd.). Bei Rammkernsondierungen wird das Gestänge mittels eines aus gleichbleibender Höhe fallenden Gewichtes in den Boden getrieben. Maß des Eindringwiderstands ist die Schlagzahl pro 10 cm erreichter Tiefe. (vgl. ebd.: 3) Eine Skizze der Rammkernsondierung mitsamt Abmessungen ist in Abbildung 2 zu sehen. Rammkernsondierungen wurden beispielsweise von D’AMATO AVANZI et al. (2013: 612f) im Kontext von gravitativen Massenbewegungen verwendet. Hervorgehoben wird, dass mit dieser Methode schnell und auch in schwierigem Gelände indirekt auf die mechanischen Eigenschaften von Böden geschlossen werden kann (vgl. ebd.).



Zu den Standardanalysen der Sedimentologie zählt die Korngrößenanalyse (vgl. PANEK et al. 2010: 236). „Die Korngrößenverteilung beschreibt den Boden aufgrund der mittleren geometrischen Ausdehnung seiner Bestandteile und deren Massenanteile.“ (AUGNER 2011: 2) Auch im Bereich der gravitativen Massenbewegungen wird diese häufig bestimmt. MERITT et al. (2014: 538, 541) bestimmten die Korngröße einiger Bohrkernhorizonte einer komplexen Massenbewegung in England, für die feinen Partikel wurde ein Röntgensedigraph verwendet. SALAS-ROMERO et al. (2016: 905) untersuchten eine gravitative Massenbewegung in Schweden. Dabei entnahmen sie Bohrkern, bei denen unter anderem auch eine Korngrößenanalyse mittels Siebung und Sedigraph durchgeführt wurde (vgl. ebd.: 908). Die Korngrößenverteilung wird also als grundlegende Eigenschaft eines Bodens oder Sediments oft angegeben und bestimmt das Materialverhalten, in Kontext von gravitativen Massenbewegungen etwa wie beschrieben Scherfestigkeit und Reibungswinkel.

Auch der Karbonatgehalt einer Bodenprobe wird bei der Analyse von gravitativen Massenbewegungen mitunter verwendet. FROESE und CRUDEN (2001: 5f) berichten von einigen Studien, bei denen der Karbonatgehalt im Labor bestimmt wurde. Calciumkarbonat kann eine zementierende Funktion in Lockermaterial einnehmen. Wenn mit Wasser gelöst, kann ein Kollaps des Materials ausgelöst werden. Dieser Mechanismus tritt aufgrund der höheren Durchlässigkeit verstärkt bzw. schneller in sandigen Sedimenten auf. In tonigen Böden wurde eine langsame Zunahme des Karbonatgehalts mit der Tiefe festgestellt, es kommt hier also nur zur allmählichen Auswaschung. Tonminerale werden hier als wichtigerer Faktor der Zementierung angesehen. Allgemein gilt jedoch, dass die Verwitterung tiefgreifender wirkt, je länger sie andauert. (vgl. FROESE und CRUDEN 2001: 4, 11f, 17) FRYDMAN et al. (2007: 36) untersuchten eine tonreiche gleitende Massenbewegung in Israel. Mittels Experimenten an Bodenproben wurde ein Zusammenhang zwischen Karbonatgehalt in der Tonfraktion und Reibungswinkel festgestellt. Bei niedrigem Karbonatgehalt traten auch niedrige Reibungswinkel auf, es kann dabei also schon bei geringen Hangneigungen zum Versagen kommen. (vgl. ebd.: 42f) Der Karbonatgehalt kann demnach bei der Hangstabilität verschiedene Funktionen einnehmen, es kommt auf lokale Gegebenheiten und Materialeigenschaften an. Aus dem Karbonatgehalt kann teilweise auch auf die Wasserwegigkeit im Untergrund geschlossen werden.

Schon DEAN (1974: 242) beschreibt den Glühverlust als gängiges Verfahren zur Bestimmung von Kohlenstoff in Sedimenten und Sedimentgesteinen. Bei der Erhitzung einer pulverisierten

Probe mit organischem Material beginnt dieses bei 200 °C zu verglühen und ist bei 550 °C vollständig verglüht. Eine Reaktion des Calciumkarbonats im Kalk beginnt erst bei 800 °C. Die Bestimmung des Gewichts vor und nach dem Verglühen jeweils bei Raumtemperatur wird als effizientestes Verfahren beschrieben. Auch die Genauigkeit ist hoch, wie der Vergleich mit der Bestimmung im Chromatographen zeigt. (vgl. ebd.: 242ff) Im Bereich der Untersuchung von Rutschungen wird die Methode in aktueller Literatur angeführt. PANEK et al. (2010: 235) zogen indirekt über die Sedimentation in aufgestauten Bächen Rückschlüsse auf eine große prähistorische Massenbewegung in der Slowakei. Von Horizonten geringen Glühverlusts wurde, zusammen mit anderen Indikatoren, auf verstärkte Sedimentation und die Aktivität der Massenbewegung geschlossen (vgl. ebd.:245). REMELLI et al. (2019: 3, 5) analysierten den organischen Gehalt verschiedener Bodenproben einer Rotationsrutschung im Apennin mittels Glühverlust bei 450 °C. Sehr diverse Glühverluste könnten nach Ansicht der Autoren auf eine Störung der Bodenbildung und verminderte Bodenqualität an einigen Standorten (z.B. Anriss) hindeuten, während andere davon wenig betroffen sind. (vgl. ebd.: 11) Vom Glühverlust als Maß für die Bodenbildung kann demnach indirekt auf Störungen und im Besonderen auch gravitative Massenbewegungen geschlossen werden.

Bindige Böden zeigen abhängig vom Wassergehalt verschiedene Zustandsformen. Die Fließgrenze ist der Wassergehalt des Bodens am Übergang von der flüssigen zur plastischen Zustandsform. Die Ausrollgrenze bezeichnet den Wassergehalt zwischen plastischer und halbfester und die Schrumpfgrenze zwischen halbfester und fester Zustandsform. Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen ist jeweils normiert. Es können daraus die Plastizität und Festigkeit von Böden abgeleitet werden. (vgl. AUGNER 2011: 7) Die Konsistenzgrenzen werden auch in Studien im Zusammenhang mit gravitativen Massenbewegungen untersucht, so zum Beispiel von MERITT et al. (2014: 541). FRYDMAN et al. (2007: 38) erhob diesen Parameter ebenso. Nach den Autoren wird durch hohe Wassergehalte der Konsistenzgrenzen eine starke Plastizität wie auch hohe Tongehalte der Böden angezeigt (vgl. ebd.). Die Konsistenz eines Bodens bei verschiedenen Wassergehalten lässt demnach auch auf andere, für gravitative Massenbewegungen relevante Eigenschaften schließen.

Für die Installation in Bohrlöchern kommen unter anderem Inklinometer in Frage. Inklinometer können folgendermaßen definiert werden: „A slope inclinometer is a device for monitoring the onset and continuation of deformation normal to the axis of the borehole casing by passing a probe along the casing.“ (STARK und CHOI 2008: 339) Zuerst sollte ein

möglichst vertikales und gerades Loch gebohrt werden, in das ein biegsames Rohr mit Schienen auf der Innenseite verlegt wird (z.B. aus PVC). Das Bohrloch muss neben dem Rohr vollständig ausgefüllt werden (z.B. mit Bentonit). Das untere Ende des Inklinometerrohres muss unterhalb des potenziell bewegten Materials liegen, damit nicht das gesamte Rohr bei gleichbleibender Neigung mitwandert. Eine Nullmessung dokumentiert den Verlauf des Rohres nach der Installation. Die Tiefe, in der Scherung zu späteren Zeitpunkten mit dem Inklinometer detektiert wird, entspricht dann der Tiefe der Gleitfläche. Meist wird eine biaxiale Sonde genutzt, die A-Achse liegt dabei in Hangrichtung. Die Neigungsmessung findet in regelmäßigen Abständen (am besten Radabstand der Sonde, z.B. 0,5 m) vom unteren Ende des Rohres zur Oberfläche statt. Die eigentliche Bewegung entspricht der Vektorsumme der beiden Achsen. Wenn die Sonde eine Stelle im Rohr nicht mehr passieren kann, ist dieses abgesichert und muss ersetzt werden. (vgl. ebd.) Schema und Funktionsprinzip eines Inklinometers sind auch in Abbildung 3 zu erkennen.

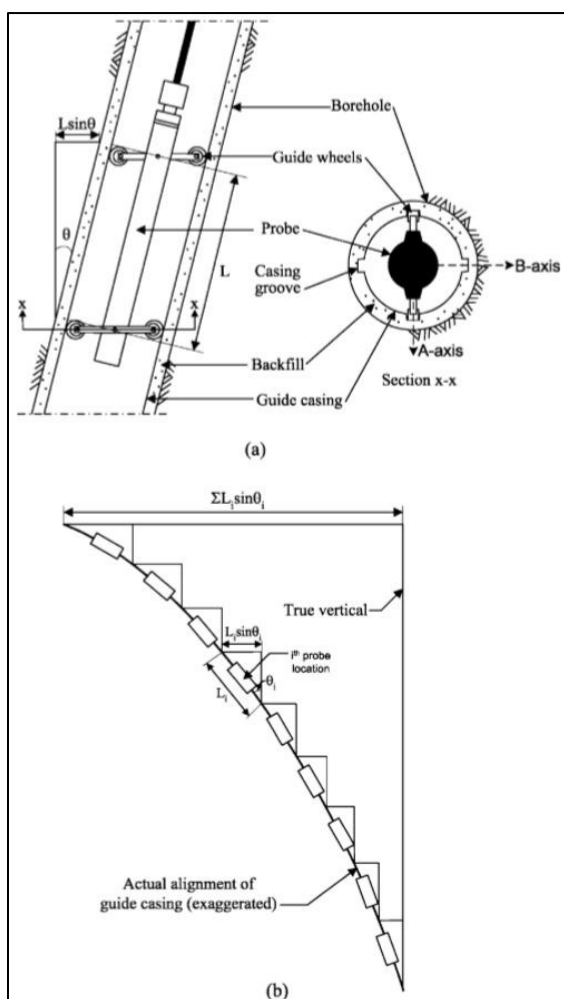


Abbildung 3: Schematisches Profil und Querschnitt eines Inklinometers (STARK und CHOI 2008: 340)

Monitoring wird in der Literatur oft als wichtiger Weg zum Verständnis einer gravitativen Massenbewegung beschrieben. Es ist oft sehr aufwendig, hilft aber die Dynamik von Massenbewegungen zu verstehen, was durch einzelne Feldaufenthalte nur schwer möglich wäre. (vgl. HIGHLAND und BOBROWSKY 2008: 74)

Demnach ist Prozessverständnis ein wichtiges Ziel des Monitorings, es gibt aber auch weiterführende praktische Implikationen. Verschiedenen Fragen kann durch Monitoringkampagnen nachgegangen werden: Wie ist die Reaktion einer gravitativen Massenbewegung auf natürliche und anthropogene Faktoren? Kann die weitere Aktivität vorausgesehen werden? Welche Schutzmaßnahmen können getroffen werden? (vgl. KAZEEV und POSTOEV 2017: 97)

In Hinsicht auf diese Fragen ist es wichtig, den genauen Zeitpunkt und die Intensität einer Bewegung zu erfassen. So kann zum Beispiel erkannt werden, wann inakzeptable (Schwellen-) werte erreicht werden. (vgl. SIMEONI und MONGIOVI 2007: 653)

Wichtige Monitoring-Parameter sind bei gravitativen Massenbewegungen die Bodendeformation, die Tiefe der Gleitfläche und die zeitliche und räumliche Charakteristik der Bewegung. Andere (möglicherweise beeinflussende) Faktoren wie Niederschlag, die Höhe des Grundwasserspiegels und anthropogene Aktivitäten können ebenfalls über längere Zeit beobachtet werden. (vgl. KAZEEV und POSTOEV 2017: 98) LEUNG et al. (2011: 341) berichtet von Messkampagnen in Hongkong, bei denen der Porenwasserdruck, der volumetrische Wassergehalt und die horizontale Spannung neben dem Bodenversatz erfasst wurden. Für das Monitoring von gravitativen Massenbewegungen werden also teilweise aufwendige technische Gerätschaften installiert.

REFICE et al. (2019: 447) weisen auf die wichtige Rolle von Inklinometern hin, da sich mit diesen auf Geschwindigkeit, Richtung, Tiefe und Art der Bewegung schließen lässt. Allerdings bedarf es der Synergie mit anderen Instrumenten, um Ursache und Verhalten der Bewegung besser zu verstehen. Dabei kommen etwa Bohrkerne und Piezometermessungen in Frage. Die Autoren nennen auch Fernerkundung als effektives zusätzliches Methodenspektrum, da damit große Flächen mit geringen Kosten bearbeitet werden können. (vgl. REFICE et al. 2019: 447, 449f)

Zunehmend werden im Monitoring ferngesteuerte bzw. automatisierte Instrumente verwendet (vgl. KAZEEV und POSTOEV 2017: 98). Das kann mitunter den angesprochenen hohen

Ressourcenaufwand etwas verringern. Insbesondere Untergrundmonitoring bleibt jedoch kostspielig und zeitintensiv (vgl. REFICE et al. 2019: 447).

Wichtig beim Monitoring gravitativer Massenbewegungen ist auch der Beobachtungszeitraum. Dieser hängt etwa vom untersuchten Prozess ab, häufig aber auch von externen Faktoren wie etwa den verfügbaren Mitteln. Daneben gibt es auch eine Abhängigkeit von den gewählten Methoden. So bieten etwa Fernerkundungsdaten lange Messreihen und teilweise auch eine hohe zeitliche Auflösung, homogene Untergrunddaten sind jedoch nur mit großem Aufwand über einen längeren Zeitraum erhebbar. (vgl. REFICE et al. 2019: 464f) Teilweise wird erst im Anschluss an eine Untersuchung erkennbar, dass ein längerer Messzeitraum notwendig (gewesen) wäre (vgl. MITTAL et al. 2008). Von Bedeutung ist innerhalb des Messzeitraums auch der Abstand zwischen den Einzelmessungen. Dieser hängt ebenfalls von Methodik und Prozess ab, bei hoher Automatisierung sind kurze Zeitintervalle möglich. SIMEONI und MONGIOVI (2007: 653) schreiben etwa von einem Monitoring-System mit Messungen alle 15 Minuten.

4. Untersuchungsgebiet

Im folgenden Kapitel soll das Gebiet, das Gegenstand dieser Arbeit ist, kurz vorgestellt werden, und zwar hinsichtlich der Lage, Geologie, Bodeneigenschaften, Landnutzung und Anfälligkeit für Massenbewegungen. Zuletzt sollen auch die bisherige Entwicklung und Erforschung der Hofermühle-Rutschung dargelegt werden. Einen Überblick der Hofermühle-Rutschung vom gegenüberliegenden Hang zeigt Abbildung 4.



Abbildung 4: Hofermühle-Rutschung vom gegenüberliegenden Hang (eigene Aufnahme, 29.03.2019)

4.1. Lage der Hofermühle-Rutschung

Die Hofermühle-Rutschung befindet sich in Niederösterreich im Gemeindegebiet von Waidhofen an der Ybbs etwa 4 km westlich von diesem nahe des Ortes Konradsheim. Sie liegt auf einem südwärts ausgerichteten Hang oberhalb des Redtenbaches. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 1f) Die Lage ist in Abbildung 5 dargestellt.

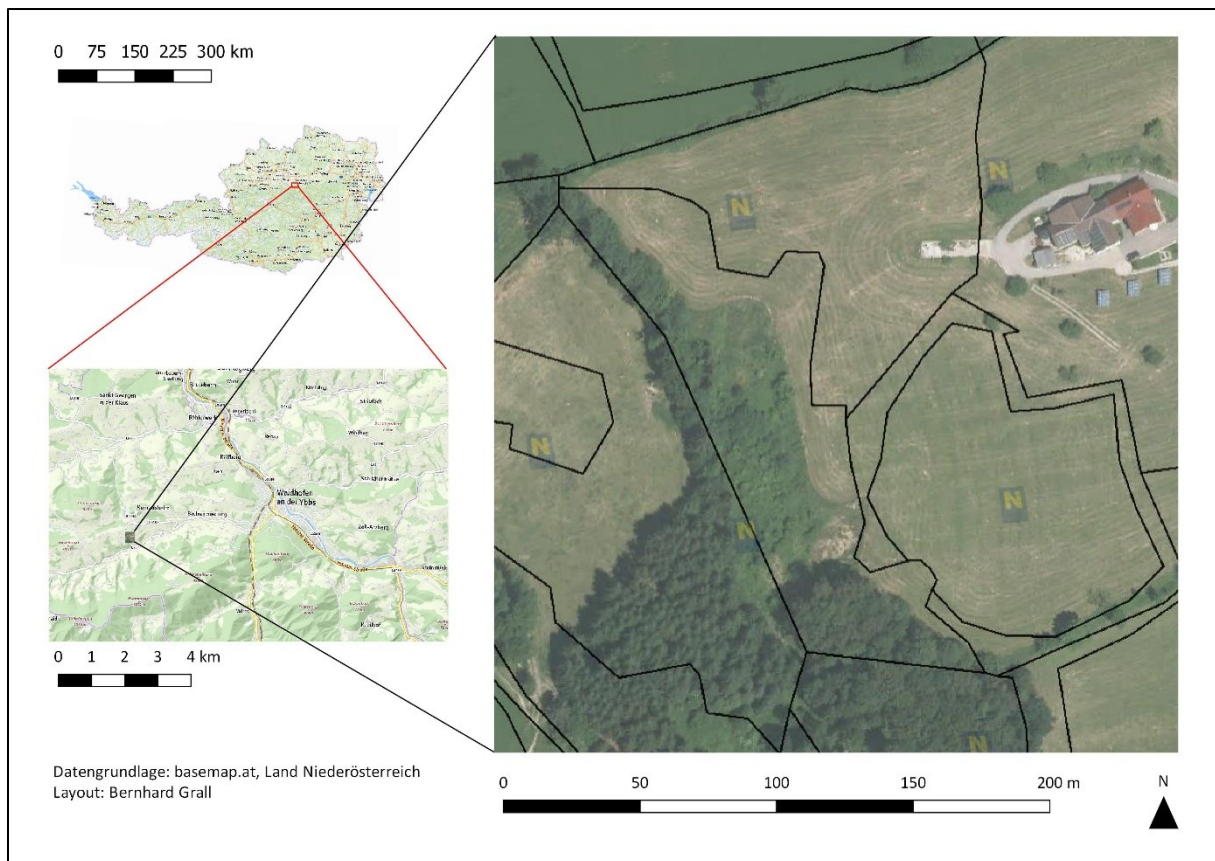


Abbildung 5: Lage der Hofermühle-Rutschung (Datengrundlage: LAND NIEDERÖSTERREICH 2020, STADT WIEN UND ÖSTERREICHISCHE LÄNDER BZW. ÄMTER DER LANDESREGIERUNG 2016)

4.2. Klima der nahen Station Waidhofen an der Ybbs

Die nächstgelegene (langjährige) Klimastation liegt in Waidhofen an der Ybbs. Die Jahresmitteltemperatur liegt im Durchschnitt der Jahre 1981-2010 bei 8,5 °C, der Jahresniederschlag bei 1165 mm. Die mittlere Lufttemperatur variiert dabei zwischen -1,5 °C im Jänner und 18,5 °C im Juli. Die durchschnittlichen Monatsniederschläge erreichen ebenfalls im Juli mit 136 mm ihr Maximum, im Februar sind sie mit 72 mm am geringsten. (vgl. ZAMG o.J.)

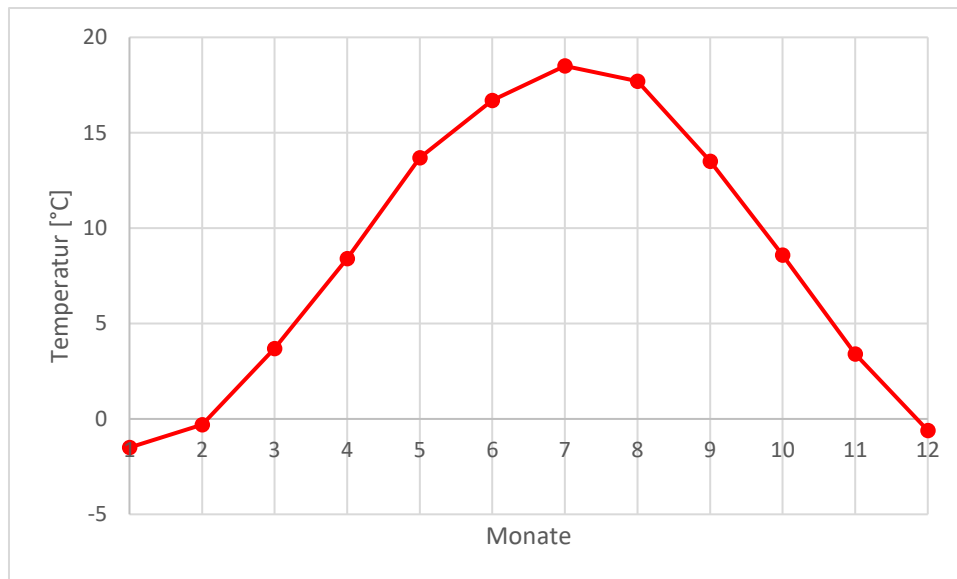


Abbildung 6: Monatliche Temperaturmittel an der Wetterstation Waidhofen an der Ybbs im Durchschnitt 1981-2010 (Datengrundlage: ZAMG o.J.)

Der monatliche Temperaturverlauf kann im Detail in Abbildung 6 studiert werden. Während die Temperatur in den Wintermonaten (Dez-Feb) unter 0°C liegt, kommt sie in den Sommermonaten (Jun-Aug) auf über 15 °C, es gibt also relativ starke saisonale Temperaturschwankungen. Die tageszeitlichen Temperaturschwankungen sind im Winter geringer als im Sommer und liegen im Mittel zwischen 7 und 12 °C. Mittleren Minima zwischen -4,5 °C und 13,1 °C stehen mittlere Maxima zwischen 2,3 °C und 24,7 °C gegenüber. Temperaturextreme reichten im Beobachtungszeitraum von -25,8 °C bis 37,9 °C. 99 Frost- und 28 Eistage gibt es in einem durchschnittlichen Jahr, dazu kommen 50 Sommertage und 10 heiße Tage. (vgl. ZAMG o.J.)

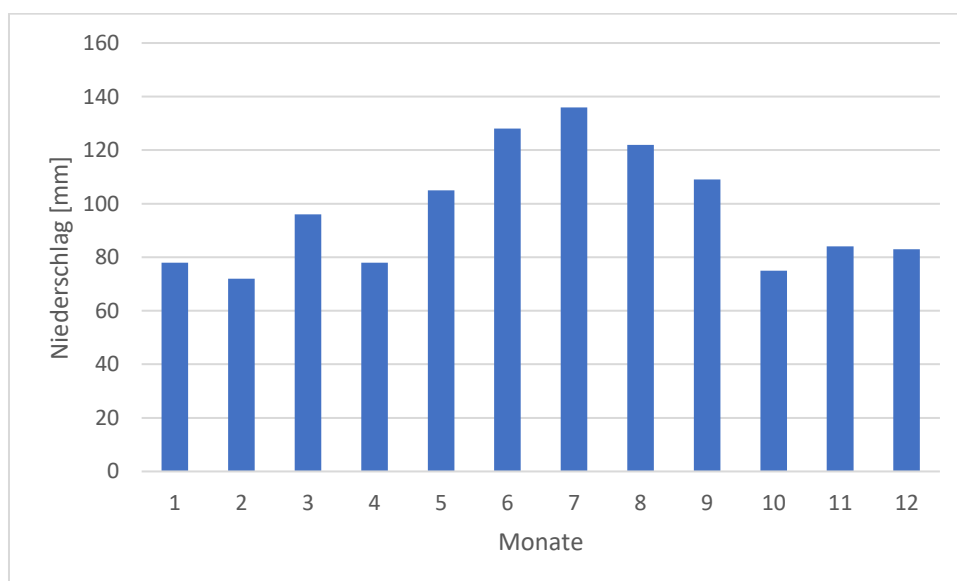


Abbildung 7: Monatliche Niederschlagssummen an der Wetterstation Waidhofen an der Ybbs im Durchschnitt 1981-2010 (Datengrundlage: ZAMG o.J.)

Zum genauen Verlauf des Niederschlags über das Jahr gibt Abbildung 7 Auskunft. Neben dem allgemeinen Niederschlagsverlauf gibt es noch zwei weitere kurze Spitzen im März und im November. Insgesamt kann jedoch von ganzjährig recht hohen Niederschlägen mit einem deutlichen Maximum im Sommer gesprochen werden. Dass diese Niederschläge oft nicht sehr ergiebig ausfallen, zeigen die durchschnittlich 142 Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag, denen nur 37 mit mindestens 10 mm gegenüberstehen. Einzelereignisse können aber durchaus recht intensiv sein, der maximale Tagesniederschlag im Zeitraum 1981-2010 beträgt 107 mm. Die maximalen Tagesniederschläge zeigen einen ähnlichen Jahresverlauf wie die monatlichen Niederschlagssummen, schwanken jedoch stärker. (vgl. ZAMG o.J.)

4.3. Hydrologie der Umgebung der Hofermühle-Rutschung

Der Hofermühlenbach, an dessen orographisch linker Seite sich die Rutschung befindet, ist ein Nebenbach des Redtenbachs. Es handelt sich um ein perennierendes Gewässer mit allerdings nur geringem Durchfluss. Er wird von der Rutschmasse blockiert und dient demnach als Wasserzufuhr zu dieser. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 5)

Beiderseits des Hofermühlbaches sind Drainagen angelegt, die in diesen entwässern. Auf der orographisch rechten Seite werden diese als nicht mehr funktionierend beschrieben. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 5)

4.4. Geologie der Hofermühle-Rutschung und der Umgebung

Die Hofermühle-Rutschung liegt in einem Übergangsgebiet zweier geologischer Einheiten, der Flysch- und der Klippenzone (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 2).

Die rhenodanubische Flyschzone wird geologisch dem Penninikum zugerechnet und befindet sich als Band am Nordrand der Ostalpen (vom Rhein bis zur Donau). Der niederösterreichische Anteil der Flyschzone ist in Abbildung 8 zu erkennen. Diese Formation entstand in der Kreide und im Tertiär im Penninischen Ozean und wurde anschließend von den Ostalpinen Decken überfahren. Bei Flysch handelt es sich lithologisch um Abfolgen von Sandstein, Siltstein, Tonstein und Mergel. Diese Ablagerungen sind das Ergebnis von Trübeströmen und Schlammlawinen, die vom Schelfrand in die Tiefsee flossen, vermutlich häufig verursacht durch Erdbeben. (vgl. SCHUSTER et al. 2013: 33f) Meist bildeten sich in der Flyschzone tiefe Verwitterungsböden, die Gesteine sind großteils wasserundurchlässig. (vgl. SCHNABEL 2002: 34)

Nach MARINOS und HOEK (2001: 10) ist Flysch durch seine Heterogenität, die Präsenz von Tonmineralen, tektonische Ermüdung und abgescherte Diskontinuitäten sowie die geringe Permeabilität gekennzeichnet.

Die Klippenzone gehört dem Helvetikum an. Während dieses weiter westlich ein Band am Nordrand der Alpen bildet, besteht es in Niederösterreich nur noch aus schmalen, länglichen Schuppen. Die Sedimentgesteine des Helvetikum bildeten sich vom Jura bis zum frühen Tertiär in einem Schelfmeer und wurden später abgeschert, gefaltet und gestapelt. Je nach Tiefe des Schelfs entstanden verschiedene Gesteine, neben kalkigem Sedimentgestein Ton-, Mergel- oder Sandstein. (vgl. SCHUSTER et al. 2013: 29) Dabei kommen laut SCHNABEL (2002: 33) in Niederösterreich eine Buntmergelserie mit roten und grünen Tonmergeln, Klippen aus dünnbankigem Kalk und Mergel sowie die Gresten-Formation aus Sandkalk und schiefrigem Tonmergel vor. Alle diese Gesteine kommen der Kartenbeilage entsprechend auch im Raum von Waidhofen an der Ybbs vor. Für eine genaue lithologische Charakterisierung der Hofermühle reicht der Maßstab 1:200.000 jedoch nicht aus.

Diesen Charakteristika entsprechend, konnten bei Untersuchungen bei der Hofermühl-Rutschung Kalkschichten aufgefunden werden (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 2). Weiter unten im Graben Richtung Redtenbach werden „orographisch links mürbe Sandsteine und Mergel“ beschrieben. „Die Schichten fallen meist mit 35° nach W bis NW ein, durch Faltung lokal auch nach SO“. (SAUSGRUBER 2013a: 2)

4.5. Böden im Umfeld der Hofermühle-Rutschung

Nach der Darstellung der digitalen Bodenkarte (eBod) ist das Gebiet um Waidhofen an der Ybbs hauptsächlich von Braunerden geprägt. Dieser Bodentyp wird auch für das gesamte Gebiet der Hofermühle-Rutschung angegeben. In der Nähe befindliche Standorte (bevorzugt Kuppen) weisen jedoch auch den Bodentyp Braunlehm auf, vereinzelt werden Ranker ausgewiesen. Wie schon im geologischen Überblick für den Flysch angegeben wurde, sind mittel- tiefgründige Böden nach der eBod im Gebiet verbreitet. Die Wasserverhältnisse werden als mäßig feucht bis wechselfeucht bezeichnet. Bodenart ist lehmiger Schluff bis lehmiger Sand. Insgesamt wird die Bodenwertigkeit als gering für Acker und mittel für Grünland angegeben. (vgl. BFW 2004) Es muss jedoch angemerkt werden, dass die zitierte Karte aus einer Abschätzung aus relativ weit voneinander entfernten Bodenprofilen (die

nächste schon knapp 1 km von der Rutschung) hervorgeht und dementsprechend generalisiert ist. Für den konkreten Standort lassen sich daher keine sicheren Aussagen treffen.

4.6. Landnutzung der Hofermühle-Rutschung und im Bezirk Waidhofen

Der Bezirk Waidhofen an der Ybbs, für den statistische Daten aus dem Jahr 2017 verfügbar sind, soll im Folgenden kurz hinsichtlich seiner Flächenaufteilung charakterisiert werden. Von insgesamt 131,6 km² sind etwas über 55 % dem Dauersiedlungsraum zuzurechnen. 0,93 % der Gesamtfläche sind dabei Baufläche, ein weitaus größerer Teil wird landwirtschaftlich genutzt, nämlich 48,87 %. Wald nimmt mit 44,18 % einen ähnlich großen Teil der Fläche des Bezirks Waidhofens ein. (vgl. LAND NIEDERÖSTERREICH 2018: 28f) Als charakteristisch für dieses Gebiet ist auch der Bereich der Hofermühle-Rutschung anzusehen. Landwirtschaftliche Flächen, konkreter Wiesen und Weiden, überwiegen, daneben gibt es noch einzelne Waldstücke und nur einzelne Häuser und Straßen.

4.7. Allgemein über gravitative Massenbewegungen in Niederösterreich und in der Flysch- und Klippenzone

In Niederösterreich verfügbare Inventare zeigen eine ungleiche Verteilung gravitativer Massenbewegungen. In Abbildung 8 werden diese Daten zusammen mit einer generalisierten geologischen Karte für ganz Niederösterreich dargestellt. In der Flyschzone und besonders in der Umgebung des Untersuchungsgebiets sind besonders viele Massenbewegungen in das Inventar aufgenommen worden.

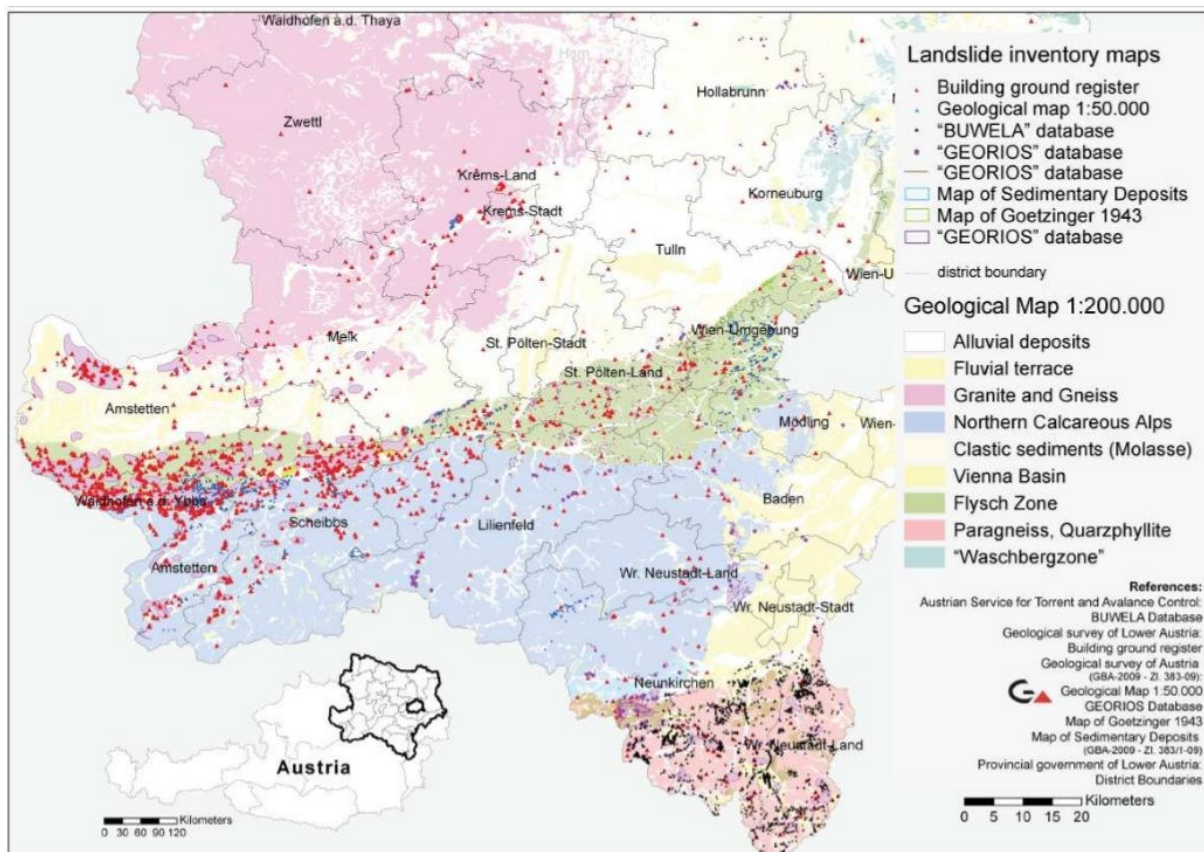


Abbildung 8: Geologische Karte Niederösterreichs überlagert von verschiedenen Inventaren gravitativer Massenbewegungen (BELL 2013: 469)

Schon SCHWENK (1992: 598f) gibt an, dass gravitative Massenbewegungen in Niederösterreich zu den häufigsten Naturereignissen zählen. Zwar werden dadurch meist kleine Bereiche zerstört, der wirtschaftliche Schaden ist durch die große Zahl aber insgesamt groß. Neben Wiesen, Feldern und Wäldern sind oft Straßen und Böschungen betroffen, seltener Häuser. (vgl. ebd.) Aus statistisch erfassten Daten (Baugrundkataster) 1953-1990 für Niederösterreich wird ersichtlich, dass Rutschungen den häufigsten Prozesstyp bilden. Es muss jedoch erwähnt werden, dass andere Prozesse (mit oft geringeren Schäden oder in weniger besiedelten Gebieten, z.B. Hangkriechen, Steinschlag) wahrscheinlich in deutlich geringerem Ausmaß erfasst wurden. Fast 42 % der gemeldeten Rutschungen traten in der Flyschzone auf, fast 19 % in der Klippenzone. Beide, besonders aber letztere, sind also im Vergleich zu ihrem Flächenanteil stark überproportional vertreten. (vgl. ebd.: 604f, 621) SCHWENK (1992: 621) weist darauf hin, dass die sich bei den geologischen Verhältnissen der Flysch- und Klippenzone bildenden feinkörnigen und mächtigen Verwitterungsdecken eine geringe Festigkeit aufweisen. Der Großteil der in Niederösterreich im oben genannten Zeitraum dokumentierten Rutschungen fand eben im verwitterten Material und nicht im Grundgestein statt. 80 % traten im tonig-mergeligen Gestein auf. (vgl. ebd.: 621f) Die durchschnittliche Neigung in der Flysch-

und Klippenzone betrug 29 ° und war (zusammen mit der Molassezone) geringer als in anderen Gebieten. Die größere Häufigkeit von Rutschungen auf nord- und südwärtsgerichteten Hängen ist auf den Gebirgsbau zurückzuführen. Die meisten der in Niederösterreich aufgetretenen Rutschungen hatten eine eher kleine Ausdehnung, weniger als ein Viertel nahm über 3000 m² ein. (vgl. ebd.: 627f) Bei der Verteilung der Schäden wird schnell deutlich, dass vor allem Infrastruktur betroffen war. Bei über der Hälfte der gemeldeten Rutschungen kam es zu Schäden an Wegen oder Straßen, bei etwas über 10 % zu solchen an Gebäuden. In der fast 40-jährigen Statistik wurden nur 22 Häuser zum Einsturz gebracht. Verletzungen wurden nicht registriert. (vgl. ebd.: 630, 632)

Spätere Untersuchungen unterstützten im Allgemeinen die beschriebene Charakteristik der gravitativen Massenbewegungen in Niederösterreich. Nach LOTTER und HABERLER (2013: 14) sind für Niederösterreich neben den Prozesstypen Fallen und Kriechen vor allem gleitende Bewegungen interessant. Besonders die Flyschzone und die Klippenzone sind den Autoren zufolge anfällig für Rutschungen. Die mechanischen Eigenschaften der dortigen veränderlich festen Gesteine wie auch die Entstehung von tiefen Verwitterungsschuttdecken werden als maßgeblich für diese Anfälligkeit beschrieben. (vgl. ebd.) Auch SCHNABEL (2002: 33f) betont vor allem bei der Buntmergelserie der Grestner Klippenzone sowie den Mergeln der Flyschzone die Rutschungsanfälligkeit.

In einer erneuten Analyse des Baugrundkatasters bis 2009 in ausgewählten Gebieten Niederösterreichs wurde in den Bezirken Amstetten und Waidhofen eine deutlich höhere Anzahl gravitativer Massenbewegungen als im Bezirk Baden festgestellt. Die Bezirke weisen eine ähnliche geologische Aufteilung auf und haben alle einen Anteil an der Flyschzone. Im Vergleich zu einer halbautomatischen Kartierung aus Laserscanning-Daten wurden außerdem ganz unterschiedliche Erfassungsqualitäten des Katasters je nach Region festgestellt. (vgl. PETSCHKO et al. 2013: 282f) STEGER (2012: 54) wertete ein Rutschungsinventar in Niederösterreich auf Basis von Laserscanning Daten aus. Von 13162 erfassten Rutschungen fanden 6218 und damit überdurchschnittlich viele in der Flyschzone statt, die Rutschungsdichte liegt bei 4,6 pro km². Die Verteilung gestaltet sich kleinräumig heterogen, großräumig ist der Südwesten der niederösterreichischen Flyschzone stärker betroffen. In dieser Region korreliert die höhere Rutschungsdichte mit einer größeren durchschnittlichen Hangneigung, einem höheren Jahresniederschlag und einem größeren Anteil von

Weidelandnutzung. Im erwähnten Baugrundkataster werden in der Flyschzone nur 0,5 Rutschungen pro km² und damit deutlich weniger ausgewiesen. (vgl. ebd.: 54-58)

Insgesamt stellen also Rutschungen in Niederösterreich einen relativ häufigen, für die Infrastruktur auch schadensanfälligen Prozess dar. Trotz unterschiedlicher Methodik und Erfassungsqualität der Erhebungen kann generell von einer besonderen Anfälligkeit der Flysch- und Klippenzone ausgegangen werden. Die Rutschungsdichte innerhalb dieser geologischen Einheiten variiert kleinräumig, scheint aber im Allgemeinen aufgrund von Klima, Relief und Landnutzung im westlichen Teil und damit in der Umgebung des Untersuchungsgebiets höher zu sein.

4.8. Die Entwicklung der Hofermühle-Rutschung

Erste Berichte über aktive Massenbewegungen entlang des Hofermühlbaches stammen aus den späten 1970er Jahren. Orographisch rechts soll zu dieser Zeit eine Rutschung stattgefunden haben. Darauffolgend kam es zur Drainagierung dieses Bereichs. 2011 kam es auf der anderen Bachseite erstmals zu Hangbewegungen im Bereich eines Waldes. Dieser wurde deswegen gefällt. Weitere Bewegungen nach einem Starkregenereignis am 19.04.2013 traten im selben Bereich auf. In Folge dieses Ereignisses bewegte sich eine breiig flüssige Masse entlang des Hofermühlbachs abwärts. Zum Schutz des Anwesens der Hofermühle am Talausgang wurde ein Damm mit 5000 m³ Fassungsvermögen errichtet. Am 23.07.2013 fand eine ingenieurgeologische Aufnahme durch Experten der Wildbach- und Lawinenverbauung statt, die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 1f)

Ein Lageplan der Hofermühle-Rutschung aus dem Jahr 2013 wird in Abbildung 9 dargestellt. Abbildung 10 zeigt ein Profil der Massenbewegung zum selben Zeitpunkt. Beim Ereignis 2013 entwickelten sich im Bereich zwischen 534 und 562 m Seehöhe mehrere Rutschungsanbrüche (in Abbildung 9 die roten halbkreisförmigen Strukturen, die mit roten Kreisen gefüllt sind), unterhalb derer eine stufenförmige Topographie zu erkennen ist. Diese Stufen können als Schollen einer Rotationsrutschung interpretiert werden. Im Bereich eines Gegengefälles konnte sich Wasser sammeln (blaue Schraffur in Abbildung 9). Oberhalb, auf der Wiese „Kroichenlehen“, waren kleine Absenkungen und Risse zu erkennen (rote Halbkreise in Abbildung 9). Dies wurde als mögliches Initialstadium weiterer Rutschungen gewertet. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 3, 5)

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wurde die Rutschung in drei Bereiche unterteilt, die im Profil in unterschiedlichen Farben eingezeichnet sind. Einen durch Niederschläge leicht mobilisierbaren Bereich stellt das breiig flüssige Material des Ereignisses von 2013 dar, das auf 3000 m³ geschätzt wird. Der zweite Bereich umfasst den eigentlichen, oben beschriebenen Rutschkörper mit stufenförmiger Topographie und steifer bis weicher Konsistenz, der 2011 erstmals aktiviert wurde. Sein Volumen wird insgesamt mit etwa 17000 m³ angegeben, eine Mobilisation als murartige Masse (wie beim Ereignis 2013) wird aber nur sukzessive in Form von Teilschollen erwartet. Im dritten Bereich, oben als Initialstadium bezeichnet, haben noch keine Scherbrüche und Absetzungen von Gleitschollen stattgefunden. Es besteht die Möglichkeit einer Bewegung als flüssige Masse Richtung Tal im Zeitraum von Jahren. (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 6f) Im Initialstadium fanden viele der Messungen statt, die im Folgenden beschrieben werden. Wie in der Zielsetzung beschrieben, ist nur dieser letzte Bereich Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Er umfasst grob gesagt die in Abbildung 9 sichtbare Wiese westlich des oberen Gebäudes bis zur Rutschmasse bzw. den umfassenden Hecken und Wäldern.

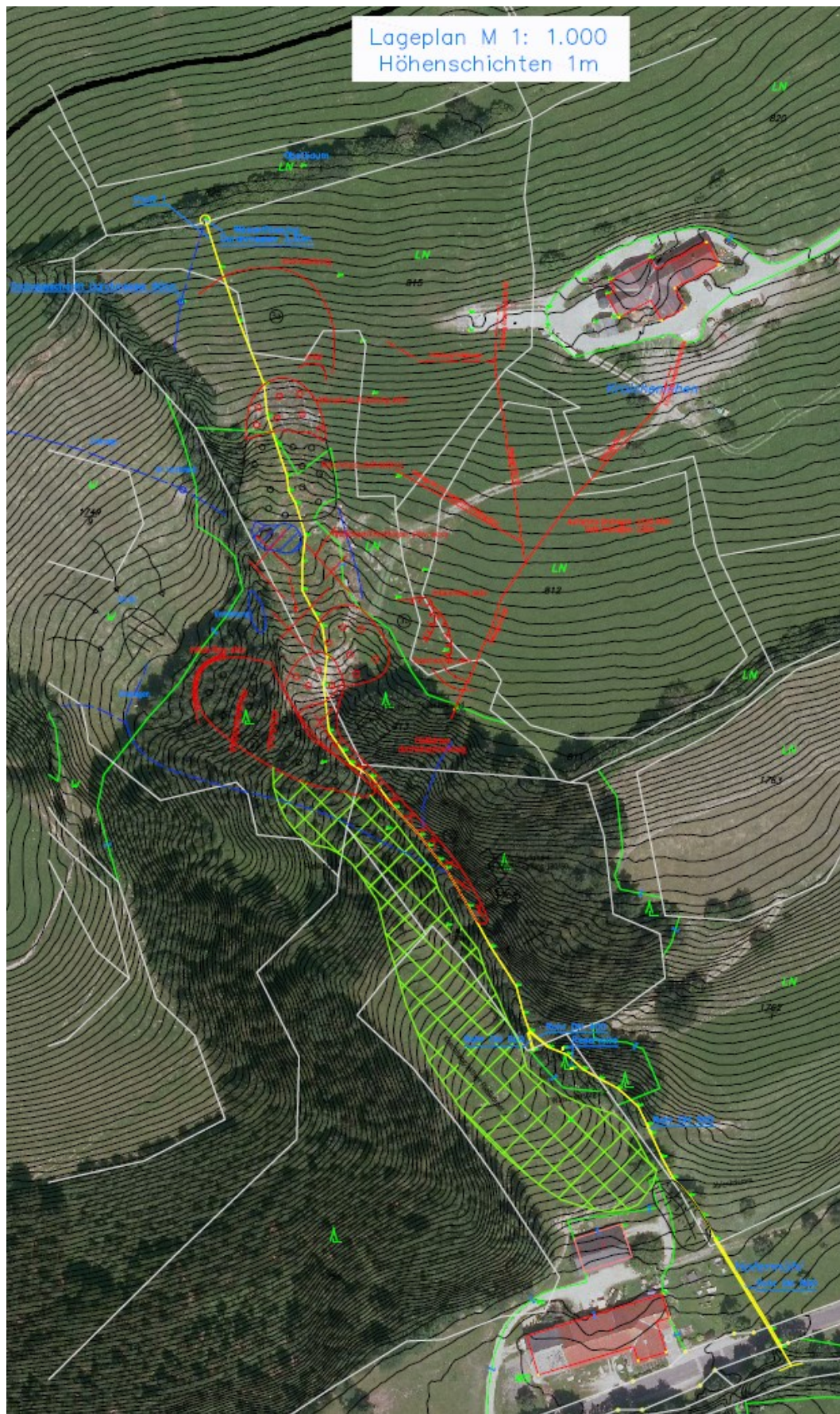


Abbildung 9: Lageplan der Hofermühle-Rutschung vom 11.12.2013 (SAUSGRUBER 2013b)

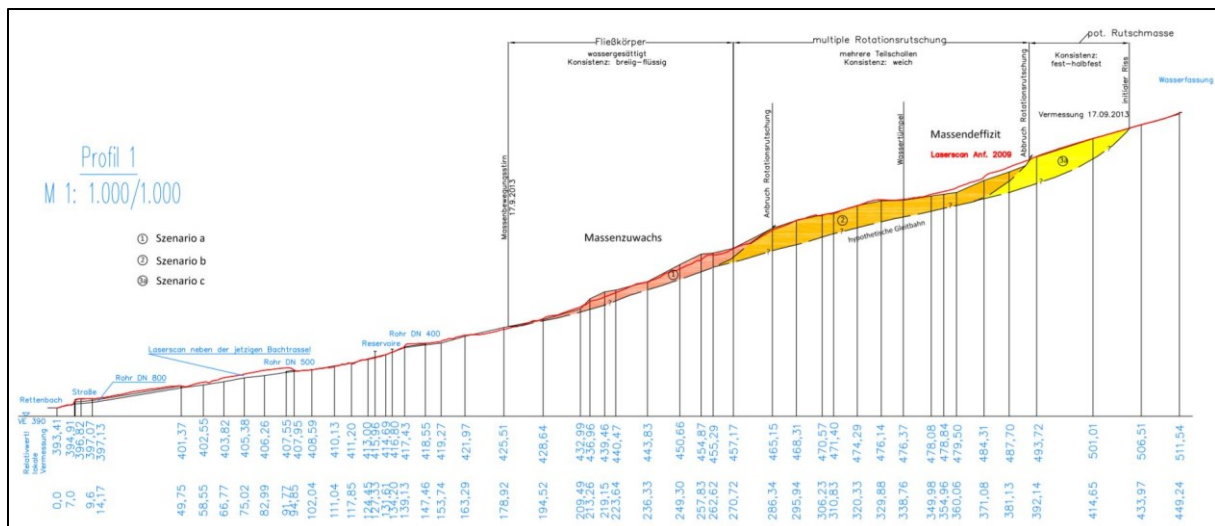


Abbildung 10: Profil der Hofermühle-Rutschung vom 11.12.2013 (SAUSGRUBER 2013b)

Bei einer weiteren Begehung durch Experten der Wildbach- und Lawinenverbauung am 11.10.2016 wurde eine fortdauernde Aktivität festgestellt. Zu den beobachteten Merkmalen zählten gekippte, lebende Bäume auf der Rutschmasse im Graben, die vertiefte Mulde in den Wiesen des Kroichenlehens und der vergrößerte östliche Anbruch der Rutschung. Material war seit 2013 aus dem Graben abtransportiert worden, dieser also weniger stark gefüllt. Eine Vernässung der Rutschmasse war weiterhin vorhanden. Bei der Begehung wurde vom oberhalb lebenden Anrainer in Erfahrung gebracht, dass dieser Entwässerungsgräben östlich der Rutschung gegraben habe. Dabei angeschnittene Wasserzüge werden mit einer Leitung in den Hofermühlgraben geführt (siehe die roten Linien in Abbildung 9). (vgl. SAUSGRUBER 2016: 2)

Die Hofermühle-Rutschung wird im Rahmen des Projekts ‚NoeSLIDE‘ (seit 2014) des Instituts für Geographie der Universität Wien in Zusammenarbeit mit der Niederösterreichischen Landesregierung untersucht. Eine automatische Wetterstation misst Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Strahlung und Schneehöhe. Für die Analyse der Oberflächenveränderungen werden in regelmäßigen Abständen (ca. monatlich) 60 Referenzpunkte mittels GNSS vermessen, UAV-Befliegungen und Laserscans vom Gegenhang durchgeführt. (vgl. ENGAGE 2020)

Im Kontext des Projekts NoeSLIDE wurden am Standort Hofermühle auch Abschlussarbeiten durchgeführt. FILA (2017: 46) führte im Rahmen einer Masterarbeit Laserscans der Hofermühle-Rutschung zu sechs verschiedenen Zeitpunkten von November 2015 bis November 2016 jeweils von zwei Standorten am Gegenhang durch. Mithilfe dieser Daten

wurde für jeden dieser Zeitpunkte ein Oberflächenmodell erstellt und Differenzen dazwischen berechnet (vgl. ebd.: 29).

Bei einer Feldbegehung im Rahmen der Diplomarbeit im Juni 2017 erkennt KARL (2018: 80f) Zeichen fortgesetzter Aktivität. Dazu zählen beim Rutschkörper frische, nicht bewachsene Anbruchkanten und schiefe Bäume. Über den Hang verteilt, besonders aber um die Anbruchkanten und oberhalb des Anbruchs sind Risse in der Vegetation zu sehen. Innerhalb der folgenden Monate wird bei weiteren Begehungen eine leichte Verbreitung der Risse (im cm-Bereich) vermutet. Wassergesättigte Stellen werden abschnittsweise direkt östlich der Rutschmasse erkannt. (vgl. ebd.) Im August und November 2017 wurden von KARL (2018: 68ff) sieben geoelektrische Profile am Standort Hofermühle gemessen und ausgewertet, wobei der spezifische elektrische Widerstand bestimmt wurde. Ein Bohrkern (Länge 4m) wurde ebenfalls entnommen. Nach einer visuellen Analyse und Horizontunterteilung folgte für acht Proben eine Analyse von Korngröße, Wassergehalt und Leitfähigkeit im Labor. Außerdem wurden im Rahmen dieser Feldaufenthalte drei Rammkernsondierungen durchgeführt (siehe Abbildung 11). (vgl. ebd.: 71-74)

Für die Analyse der Untergrundstruktur wurden im Rahmen des Projekts NoeSLIDE im Herbst 2018 vier schwere Rammkernsondierungen durchgeführt. Des Weiteren führte die Arbeitsgruppe des Instituts für Geographie im selben Zeitraum neun Bohrungen durch. Die Analyse von drei davon ist Teil einer anderen Masterarbeit an der BOKU. (vgl. STUMVOLL 2019b) Einige der so entstandenen Bohrlöcher werden für weitere Instrumentierungen genutzt. Zwei Bohrlöcher werden für Inklinometer verwendet, wobei eines manuell ca. monatlich mit einer Sonde vermessen wird und im zweiten ein Ketteninklinometer alle fünf Minuten automatisch misst. Für das Monitoring der Wasserverhältnisse im Untergrund messen neun TDR-Sonden (0,5, 1 und 2 m Tiefe) und acht Piezometer alle fünf Minuten den volumetrischen Wassergehalt und die Höhe des Grundwasserspiegels. (vgl. ENGAGE 2020) Alle diese Instrumentierungen sind in Abbildung 11 verzeichnet.

Schließlich wurde am Standort Hofermühle von 25.-29.03.2019 eine Lehrveranstaltung („landslide dynamics“) durchgeführt, bei der verschiedene Methoden von der Arbeitsgruppe vermittelt wurden. Die Standorte dieser Methoden sind in Abbildung 11 zu erkennen. Neben Laserscanning und UAV-Befliegungen als Teil der regelmäßigen Oberflächenerfassung wurde auch eine geomorphologische Kartierung durchgeführt. Zum Zwecke der

Untergrunderkundung wurden zwei Bohrkerne (DPH4a und b) entnommen und zehn schwere Rammkernsondierungen (=dynamic probing heavy oder DPH) (im weiteren LD_DPH1-10 genannt) durchgeführt. Ein weiteres manuelles Inklinometer wurde gesetzt. Entlang von acht (größtenteils hangparallelen) Linien wurden geoelektrische Messungen (ERT) durchgeführt. (vgl. BOUTE et al. 2019: 45-64) Dabei wurde die Hofermühle-Rutschung weiterhin als aktiv wahrgenommen. Sowohl der nördliche (obere) als auch der östliche Anbruch, die die eigentliche Rutschmasse vom Initialstadium abgrenzen sind weiterhin deutlich erkennbar. Der östliche Anbruch ist im Vergleich zu 2016 weiter nach oben versetzt und separiert. Eine östlich gelegene Geländestufe zeigt einen möglichen zukünftigen Anbruch an. Innerhalb der Rutschmasse sind weiterhin Stufen, unebenes Terrain und vernässte Bereiche ausgebildet, an einer Stelle sogar in Form einer Lacke. Die Absenkung auf der Wiese der Kroichenlehen zeigt sich aktiv, oberhalb des oberen Anbruches befindet sich eine kleine vegetationsfreie Geländestufe. Aber auch nördlich des Hofes gibt es eine unebene, konkave Fläche. Als auffällig wird die an einer Stelle nach unten gekurvte Hecke nördlich des Hofes beschrieben, der Ursprung ist jedoch unklar. Kleine Anbrüche und gestuftes Gelände östlich des Hofermühl-Baches unterhalb der Rutschmasse weisen ebenfalls auf (initiale) Rutschungsaktivität hin (auch schon 2013, siehe Abbildung 9). (vgl. BOUTE et al. 2019: 74-78)

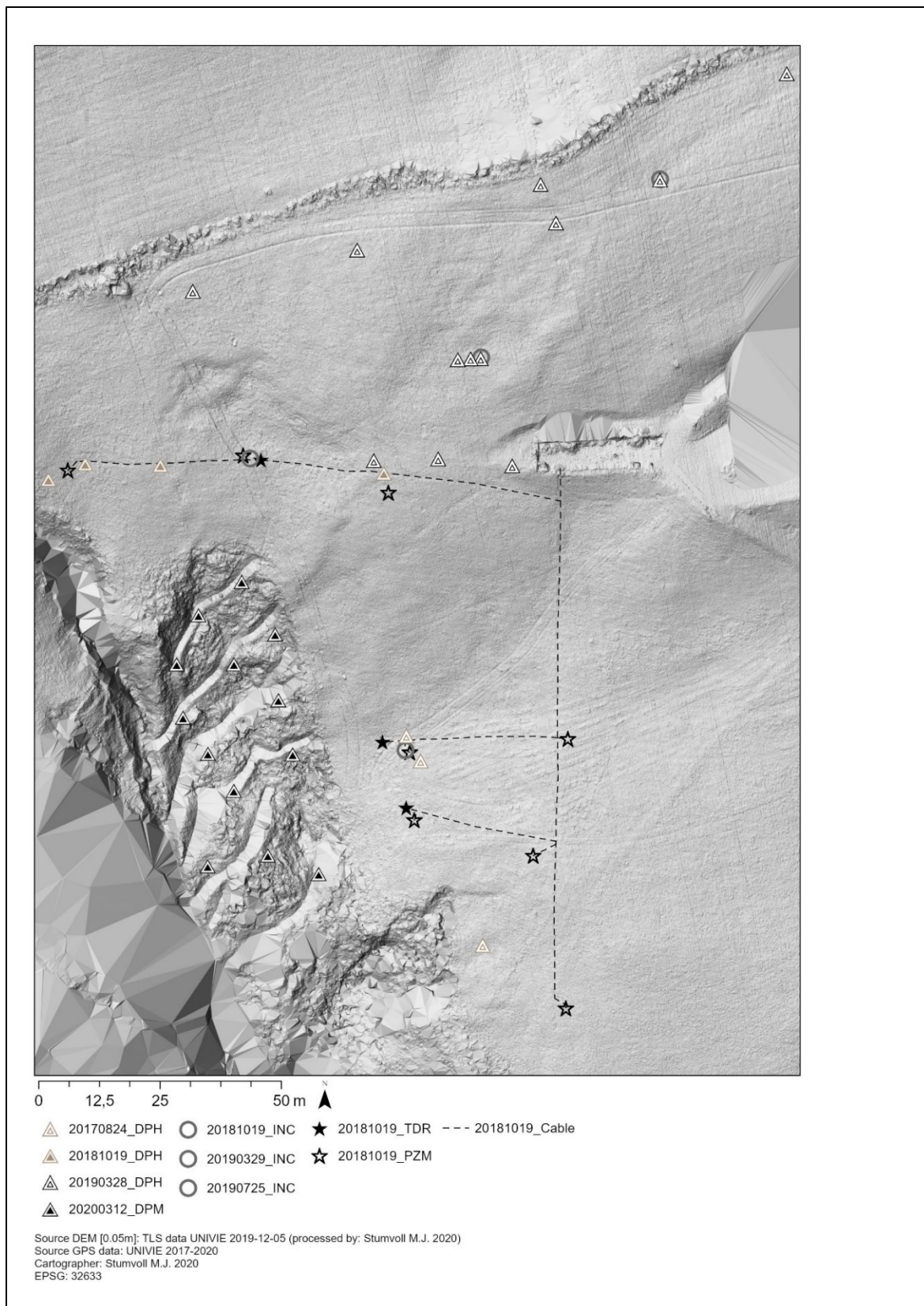


Abbildung 11: direkte Untergrunderkundungsmethoden verschiedener Messkampagnen am Standort Hofermühle (20170824_DPH = im August 2017 im Rahmen der Diplomarbeit von Karl (2018) durchgeführte Rammkernsondierungen, 20181019_DPH/20181019_INC/20181019_TDR/20181019_PZM = im Oktober 2018 im Rahmen des Projekts NoeSLIDE durchgeführte Rammkernsondierungen/installierte Inklinometer/Time Domain Resistance-Sonden/Piezometer, 20190328_DPH/20190329_INC = im März 2019 im Rahmen der Lehrveranstaltung ‚landslide dynamics‘ durchgeführte Rammkernsondierungen/installiertes Inklinometer, ein weiteres, zu einem späteren Zeitpunkt gesetztes Inklinometer und weitere Rammkernsondierungen sind ebenfalls verzeichnet (STUMVOLL 2020))

5. Methoden

Im Folgenden sollen jene Messungen und Instrumentierungen beschrieben werden, die die Grundlage für diese Arbeit bilden. Dabei werden die Lage und die Gründe für ihre Auswahl dargestellt. Anschließend werden die durchgeführten Arbeitsschritte näher erläutert.

5.1. Datenlage

Die gesamte Datenbasis samt Quellen ist in Tabelle 2 ersichtlich. Diese umfasst auch Klimadaten zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets, Kartengrundlagen und weitere Untergrunderkundungen, die in der Diskussion aufgegriffen werden. Eine Lokalisierung der verwendeten Untergrunderkundungen ist in Abbildung x möglich. Die gewählten Instrumente sind für die Untersuchung der Untergrundstruktur der Hofermühle-Rutschung besonders geeignet, weil sie einen Querschnitt durch den Hang abbilden. Sie liegen bis auf das automatische Inklinometer in etwa auf einer Linie.

Zuerst einmal fließen die Daten der vier Rammkernsondierungen DPH 1, 2, 3 und 5 (4 konnte nicht durchgeführt werden) vom 17.09.2018 in diese Arbeit ein. Sie wurden gewählt, weil sie leicht auszuwerten und für die Fragestellung speziell in Verbindung mit den anderen Methoden hilfreich sind. Deswegen liegen sie auch in der Nähe und im Fall von DPH 3 genau zwischen zwei Bohrungen, um eine Interpolation zu ermöglichen. DPH 1 und DPH 2 liegen am westlichen Rand der Wiese. Sie könnten dabei helfen, festzustellen, ob Anzeichen einer Gleitfläche auch weit abseits der an der Oberfläche sichtbaren Zeichen festgestellt werden können. DPH 3 und DPH 5 liegen jeweils knapp außerhalb einer Absenkung in der Wiese, wie auch in Abbildung 12 erkannt werden kann. Auch hier ist von Interesse, inwieweit das im Untergrund erkannt werden kann.

Von den neun Bohrkernen vom 18.10.2018 werden B7, B8 und B9 im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet. Diese Beschränkung liegt in den limitierten Kapazitäten einer Masterarbeit begründet. B8 wurde als besonders interessant bewertet, da diese Bohrung inmitten der Absenkung etwa 10-20 m zentral oberhalb des aktuellen Rutschungsanbruches und direkt neben dem manuellen Inklinometer liegt. B7 und B9 bilden dazu eine Ergänzung in westlicher und östlicher Richtung, neben den Sondierungen an den Rändern der erwähnten Absenkung.

Das manuelle Inklinometer und das Ketteninklinometer aus dem Jahr 2018 bilden ebenfalls eine Grundlage für diese Arbeit. Diese sind für die Festlegung von möglichen Gleitflächen

bedeutsam, auch im Vergleich mit den anderen Instrumentierungen. Für die Untersuchung der Bewegung der Rutschung und ihrer zeitlichen Entwicklung stellen sie das wichtigste Instrument dar. Das automatische Inklinometer liegt zwar mehr als 50 m unterhalb und damit etwas abseits, hat aber den Vorteil der höheren zeitlichen Auflösung. Die Inklinometer, von denen aufgrund der Komplexität in Installation und Anwendung nur wenige eingebaut wurden, befinden sich an Stellen, die für die weitere Entwicklung der Rutschung von Interesse sind. Einerseits neben dem Bohrkern B8 oberhalb des Anrisses, wo es zu rückschreitender Aktivierung kommen könnte. Andererseits östlich der Rutschmasse, wo es ebenfalls zur Vergrößerung kommen könnte. Etwas weiter unten haben wie beschrieben schon Absenkungen stattgefunden.

Das automatische Inklinometer reicht bis in eine Tiefe von 8 m, Messungen sind in 0,5 m - Schritten verfügbar. Das Rohr für das manuelle Inklinometer reicht bis in eine Tiefe von 4,8 m. Daten sind auch hier in 0,5 m – Intervallen verfügbar, wobei die tiefste Messung zunächst in 4,5 m Tiefe liegt. Ab dem 29.03.2019 liegt jeweils eine weitere Messung in 4,8 m Tiefe vor.

Tabelle 2: Datenbasis

Daten	Information	Quelle
Temperatur	Excel-Tabelle (1981-2010: Monatsmittel, Jahresmittel, mittlere und absolute Minima und Maxima)	ZAMG o.J.
Niederschlag	Excel-Tabelle (1981-2010: Monatssummen, Tage über 1 und 10 mm, maximale Tagesniederschläge)	ZAMG o.J.
Basiskarte	Produktaktualisierung 2020, Rasterkarte, Web Map Tile Service (WMTS), 22 Zoomstufen, 7 Kachellayer	STADT WIEN UND ÖSTERREICHISCHE LÄNDER BZW. ÄMTER DER LANDESREGIERUNG 2016
Orthofoto	Flugdatum 2016, .jpg, Auflösung 36 cm,	LAND NIEDERÖSTERREICH 2020
Digitales Geländemodell	Airborne Laserscan 2009, ESRI Floating Point Grid, Auflösung 1 m	NOEL GV 2009, zur Verfügung gestellt von der Universität Wien
schwere Rammkernsondierungen	September 2018, 4 Standorte (siehe Abb. x), 4-10,2 m Tiefe, Schlagzahlen pro 10 cm	zur Verfügung gestellt von der Universität Wien, über das Projekt NoeSLIDE finanziert (ENGAGE 2020)

schwere Rammkernsondierungen (,landslide dynamics‘)	März 2019, 10 Standorte (siehe Abb. x), 3,1-19 m Tiefe, Schlagzahlen pro 10 cm	BOUÏE et al. 2019: 45-64, zur Verfügung gestellt von der Universität Wien, über das Projekt NoeSLIDE finanziert (ENGAGE 2020)
Bohrungen	Oktober 2018, 3 Standorte (siehe Abb. x), 3,5 bis 5,5 m Tiefe, 1 m Bohrkerne in Inlinern	zur Verfügung gestellt von der Universität Wien, über das Projekt NoeSLIDE finanziert (ENGAGE 2020)
Inklinometer	November/Dezember 2018- September 2019, 2 Standorte (siehe Abb. x) 4,5 und 8 m Tiefe, Deformation in 0,5 m Schritten zu 11 Zeitpunkten bzw. alle 5 Minuten	zur Verfügung gestellt von der Universität Wien, über das Projekt NoeSLIDE finanziert (ENGAGE 2020)

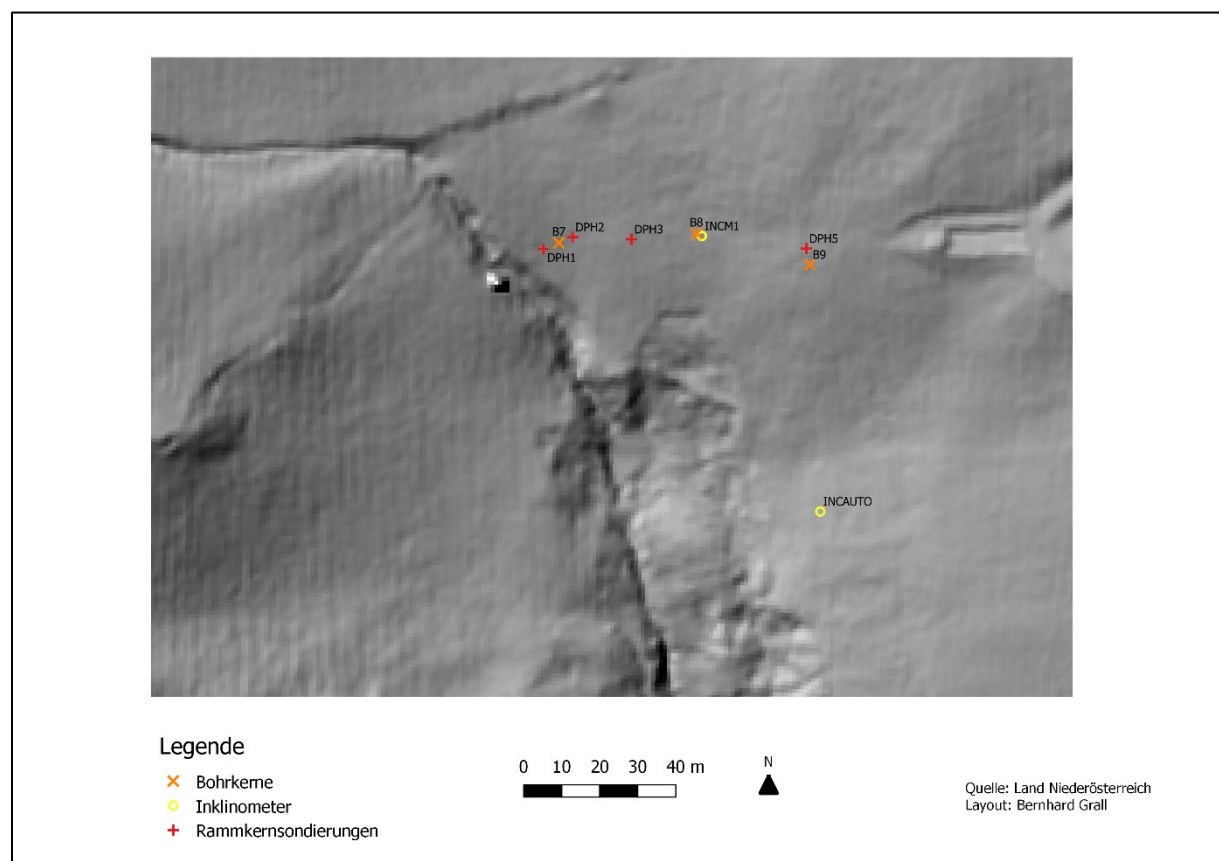


Abbildung 12: Untergrunderkundungen, die in dieser Arbeit verwendet werden (im Rahmen des Projekts NoeSLIDE im Herbst 2018 durchgeführt) (Datengrundlage: NOEL GV 2009)

5.2. Darstellung der Rammkernsondierungen DPH 1, 2, 3 und 5

Die vier Rammkernsondierungen wurden mit MS Excel von Microsoft geplottet. Dabei wird auf der x-Achse die Schlagzahl pro 10 cm, auf der y-Achse die Tiefe aufgetragen. Zur besseren Übersicht wurden die Schlagzahlen in fünf farblich markierten Klassen dargestellt.

5.3. Feldansprache und Laboranalyse der Bohrkerne B7, B8 und B9

Die Inliner mit einem Durchmesser von 5 cm wurden im Dezember 2019 aus dem Kühlschrank entnommen, auf beiden Seiten aufgeschnitten, aufgeklappt und die Bohrkerne fotografisch dokumentiert. Anschließend wurde mittels visueller und haptischer Beurteilung eine Einteilung in Horizonte unternommen und auch dies dokumentiert.

Für alle eingeteilten Horizonte wurde eine „Feldanalyse“ durchgeführt. Am Beginn stand eine verbale Beschreibung zu Farbe, Konsistenz, Feuchtigkeit, organischer Substanz und anderen Auffälligkeiten. Die Farbe wurde nach dem ersten Eindruck der frisch aufgeschnittenen Bohrkerne angegeben (z.B. hellbraun, rötlich-grau). Bei der Konsistenz wurde zwischen fester, kompakter und lockerer, bröckeliger Masse unterschieden. Die Feuchtigkeit wurde durch haptischen Eindruck in grobe Kategorien von trocken über schmierig und leicht feucht bis zu sehr feucht eingeteilt. Sofern grobe organische Substanz sichtbar war, wurde dies vermerkt. Die Anzahl, Größe und Lage von Steinen wurden angegeben. Weitere Bemerkungen zur Gesamtsituation wurden ebenfalls notiert (z.B. teilweise Kernverlust, Horizontübergänge). Anschließend wurde wenn möglich für den Horizont repräsentatives Feinmaterial entnommen, also eher in der Mitte und nicht bei den Horizontübergängen. Grundlage für die damit durchgeführten Versuche war die Bodenkundliche Kartieranleitung, nach deren Schema auch die Ergebnisse notiert wurden. Zu Beginn wurde das extrahierte Material befeuchtet und durch Abgleich mit den Farbtabelle die Bodenfarbe nach Munsell bestimmt. Daraufhin wurde die Textur mittels Fingerprobe ermittelt. Dabei wurde das Probenmaterial im plastischen, leicht feuchten Zustand so dünn wie möglich ausgerollt und weitere Eigenschaften wie Sandanteil und Glanz mit den in Tabellen angegebenen Kategorien verglichen. So kann die Korngrößenverteilung abgeschätzt werden. Für die Karbonatbestimmung wurde 10%ige Salzsäure auf eine weitere kleine Probe Feinsubstanz geträufelt. Die Reaktion kann in sieben Kategorien eingeteilt werden, denen auch ein ungefährender Massenanteil an Karbonat zugeordnet ist. Sehr geringe und sehr große Anteile können aber nicht differenziert werden.

Der Karbonatgehalt einzelner größerer Steine wurde ebenfalls bestimmt. (vgl. ECKELMANN 2005)

Im gleichen Durchgang wurden Proben für die Laborauswertung ausgewählt und entnommen. Dabei wurde pro Meter Bohrkern eine Probe entnommen, aus interessanten oder sich stark abhebenden Horizonten wurden zusätzliche Proben entnommen. Es wurde auf möglichst homogenes Probenmaterial geachtet, daher soweit möglich innerhalb (nicht an den Grenzen) eines Horizonts liegend. Außerdem wurde sehr lockeres, wahrscheinlich von weiter oben eingebrachtes Material nicht für die Probenahme in Betracht gezogen. Es wurde jeweils ein 10 Zentimeter langer Abschnitt des Bohrkerns als Ganzes entnommen. Die Probenmenge lag zwischen 200 und 300 Gramm.

Die so gewonnen Proben wurden in beschrifteten Kühlbeuteln bis zum Beginn der Laboranalysen etwa einen Monat im Kühlschrank gelagert.

Die Laborproben wurden mittels Siebung und Pipettierung auf ihre Textur hin untersucht. Es folgte eine Bestimmung des Gehalts organischer Substanz über den Glühverlust und des Karbonatgehalts mit der Scheibler-Apparatur. Zuletzt wurde die Ausrollgrenze und die Fließgrenze nach Atterberg festgelegt. Die Laboranalysen wurden von 22.01. bis 02.03.2020 im bodenkundlichen Labor des Instituts für Geographie und Regionalforschung durchgeführt.

Die Siebanalyse wurde in Anlehnung an ÖNORM L 1061-1 durchgeführt. Dabei wurden 50 g der davor im Ofen bei 105 °C getrockneten Probe (atro) in ein Schraubglas eingewogen und mit destilliertem Wasser versetzt (bis zur 80 ml- Markierung). Die Proben wurden danach für eine Stunde im Überkopfschüttler durchmischt. Siebe mit einer Maschenweite von 0,063 mm, 0,2 mm, 0,63 mm und 2 mm wurden aufeinandergestellt und die Proben mit einer Spritzflasche mit destilliertem Wasser und einem Gummiwischer gesiebt und in vorgewogene Porzellanschälchen überführt. Nach einer Nacht im Trockenofen bei 105 °C wurde wieder ausgewogen und der jeweilige Massenanteil bestimmt. Ergebnis war der Kies-, Grobsand-, Mittelsand- und Feinsandanteil der Proben.

Der zweite Teil der Korngrößenbestimmung, die Pipettierung, wurde in Anlehnung an ÖNORM L 1061-2 durchgeführt. Dabei wurden zwischen 15 und 20 g der vorher im Ofen bei 40 °C getrockneten Probe (lutro) in ein Schraubglas eingewogen. Mit einer Pipette wurden 25 ml 0,1 mol $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (Natriumpyrophosphat) hinzugegeben, um Aggregate zu lösen. Die Proben wurden mehr als sechs Stunden stehen gelassen, anschließend bis auf 80 ml mit destilliertem

Wasser aufgefüllt und sechs Stunden in den Überkopfschüttler gestellt. Anschließend wurden Siebe mit den Maschenweiten 0,063 mm und 2 mm in einem Trichter auf einen 1000 ml Standzylinder gestellt und die Probe mit destilliertem Wasser gesiebt. Kies- und Sandfraktion wurden so abgeschieden. Der mit destilliertem Wasser auf genau 1000 ml aufgefüllte Standzylinder wurde durchmischt und direkt danach und nach 00:04:38, 00:51:26 und 03:52:00 Stunden 20 ml in vorgewogene Porzellanschälchen (I-IV) pipettiert (bei der letzten Pipettierung mit 5 statt 10 cm Eintauchtiefe). Nach mindestens einer Nacht im Trockenschrank bei 105 °C wurde erneut ausgewogen und der Anteil der Korngrößen bestimmt. Das letzte Schälchen IV entspricht dabei der Tonfraktion, für den Grob-, Mittel- und Feinschluffanteil muss vom Gewicht der Schälchen I-III der Pipettierung das Gewicht des jeweils darauffolgenden Schälchens abgezogen werden. Durch Multiplikation mit 20 wurde auf den gesamten Standzylinder hochgerechnet.

Für die Bestimmung des Glühverlusts nach ÖNORM L 1079 wurde im Ofen bei 105 °C getrocknete und auf 2 mm trocken gesiebte Bodenprobe verwendet. Etwa 15 g der Probe wurde in Edelstahltiegel eingewogen und für vier Stunden in den Muffelofen bei 550 °C gestellt. Anschließend kamen die Tiegel für eine Stunde in den Exsikkator und wurden dann ausgewogen. Der Massenverlust der Probe kann hier als Indikator für die organische Substanz gelten.

Der Karbonatgehalt wurde in Anlehnung an ÖNORM L 1084 bestimmt. 1 g des bei 40 °C getrockneten und auf 2 mm gesiebten Probenmaterials wurde in eine Laborflasche eingewogen. Ein Röhrchen mit 10 ml 10 % HCL (Salzsäure) wurde auf die Laborflasche gesteckt und diese mit der Scheibler-Apparatur verbunden. Nachdem die Salzsäure auf die Probe geschüttet wird, entsteht CO₂, das im geschlossenen System an einer Skala in ml abgelesen werden kann. Die Reaktion läuft für 20 min ab, während die Laborflaschen in einem Schüttelapparat befestigt werden. Mit einer Formel kann, wenn Temperatur und Luftdruck bekannt ist, auf den Massenanteil des Kalziumkarbonats in Prozent der Trockenmasse geschlossen werden.

Zur Bestimmung der Ausrollgrenze wurde etwa 40 g frische Probe eingewogen. Es wurde so lange destilliertes Wasser beigegeben, bis eine gute Verformbarkeit gegeben, die Probe jedoch noch nicht klebrig war. Die Probe wurde anschließend durchgeknetet und in vier Teile geteilt. Größere Bestandteile (spürbare Kiesel) wurden entfernt. Jeder Teil wurde per Hand

bis zum Zerbröckeln auf einer saugfähigen Unterlage aus Papier ausgerollt. Wenn der Durchmesser beim Zerbröckeln bei 3 mm lag, wurde die Probe sofort in einem vorgewogenen Becherglas ausgewogen. Bei Zerbrechen bei einem größeren Durchmesser wurde angefeuchtet, bei einem kleineren Durchmesser noch einmal ausgerollt. Die über Nacht bei 105 °C getrockneten Proben wurden erneut ausgewogen, um den Wassergehalt zu bestimmen. Das Mittel der Wassergehalte der vier Teilproben entspricht der Ausrollgrenze des Materials, wobei die Standardabweichung nicht mehr als 5 % betragen sollte.

Zur Bestimmung der Fließgrenze wurde etwa 80-100 g frische Probe eingewogen. Auch hier wurden größere Bestandteile entfernt. Die Probe wurde in einer Schale bis zu einem pastösen Zustand mit destilliertem Wasser befeuchtet und gut durchgemischt. Die Schale eines Fließgrenzgeräts nach Casagrande wurde ca. 1 cm hoch befüllt und das Material glattgestrichen. Mit dem genormten Furchenzieher wurde die Probe geteilt. Gleich anschließend wurde die Schale mit der Handkurbel zwei Mal pro Sekunde gehoben und fallengelassen, bis zur Schließung der Furche in der Probe auf einer Länge von etwa 1,2 cm. Sofort wurde eine Teilprobe von 5-10 g in einem vorgewogenen Becherglas ausgewogen. Der Versuch wurde vierfach wiederholt, wobei die Schlagzahlen jeweils einmal zwischen 15 und 20, 20 und 25, 25 und 30 sowie 30 und 35 zu liegen hatten. Dazwischen wurde das Material entweder befeuchtet oder getrocknet, um die gewünschte Konsistenz zu erhalten. Die Teilproben wurden über Nacht bei 105 °C getrocknet und dann erneut ausgewogen, um den Wassergehalt zu bestimmen. Die vier Teilproben eingetragen in ein Koordinatensystem mit Schlagzahlen (x, logarithmisch) und Wassergehalt (y) sollten auf einer Geraden liegen. Der Wassergehalt, bei dem diese Gerade die 25-Schläge Marke schneidet, entspricht der Fließgrenze des Materials. Die Daten über Wassergehalte und Schlagzahlen wurden in das Programm GGU-ATTERBERG 6 von Civilserve eingegeben, dass automatisch mittels der am besten passenden Gerade die Fließgrenze bestimmt und einen Graph zeichnet.

5.4. Darstellung der Inklinometer Inkauto und Ink1

Daten des automatischen Inklinometers wurden mit dem Programm SAA Suite von Measurand visualisiert. Dabei wurde zuerst die kumulative Deformation in Richtung der A- und B-Achse von 26.09.2019 im Vergleich zur Nullmessung am 14.11.2018 dargestellt. In einer zweiten Grafik wurde der Verlauf der Deformation in A- und B-Richtung von der Nullmessung am 14.11.2018 bis zum 26.09.2019 dargestellt. Es wurde dabei der Versatz in 0,5 und 7 m Tiefe

dargestellt. In 0,5 m Tiefe, da es an der Erdoberfläche leichter zu externen Störungen kommen kann. 7 m entspricht der größten Tiefe, in der noch Bewegungen registriert wurden.

Die Messwerte des manuellen Inklinometers wurden mit dem Programm GLNP von Gloetzi dargestellt. Die Nullmessung erfolgte am 18.12.2018, darauf wird die Lage des Inklinometerrohres zu elf weiteren Zeitpunkten bis 01.10.2019 bezogen. Die Deformation wird wiederum in Richtung der A- und B-Achse gezeigt.

6. Ergebnisse

6.1. Beschreibung und Interpretation Rammkernsondierungen DPH 1, 2, 3 und 5

Zuerst sollen die Rammkernsondierungen vorgestellt werden. Dabei werden jene zwei, die im Sinne der Fragestellung interessanter erscheinen, im Folgenden grafisch veranschaulicht und näher erläutert. Die beiden anderen in dieser Arbeit behandelten Sondierungen werden nur kurz beschrieben, die Abbildungen sind in Anhang A ersichtlich.

Die erste schwere Rammkernsondierung der Feldtage im Herbst 2018 (hier: DPH 1) erreichte 8,5 m Tiefe. Zu Beginn ist der Widerstand extrem gering (1 Schlag für 50 cm), daraufhin kommt es jedoch zu einem raschen Anstieg der Schlagzahlen (34 pro 10 cm bei 0,9 m). Bei 1,3 bis 1,6 m gibt es eher geringe bis mittlere Werte (unter 10), danach stark schwankende Schlagzahlen mit einem Peak bei 4,2 m (50). Die Sondierung stoppt eher abrupt.

In Abbildung 13 ist DPH 2 dargestellt.

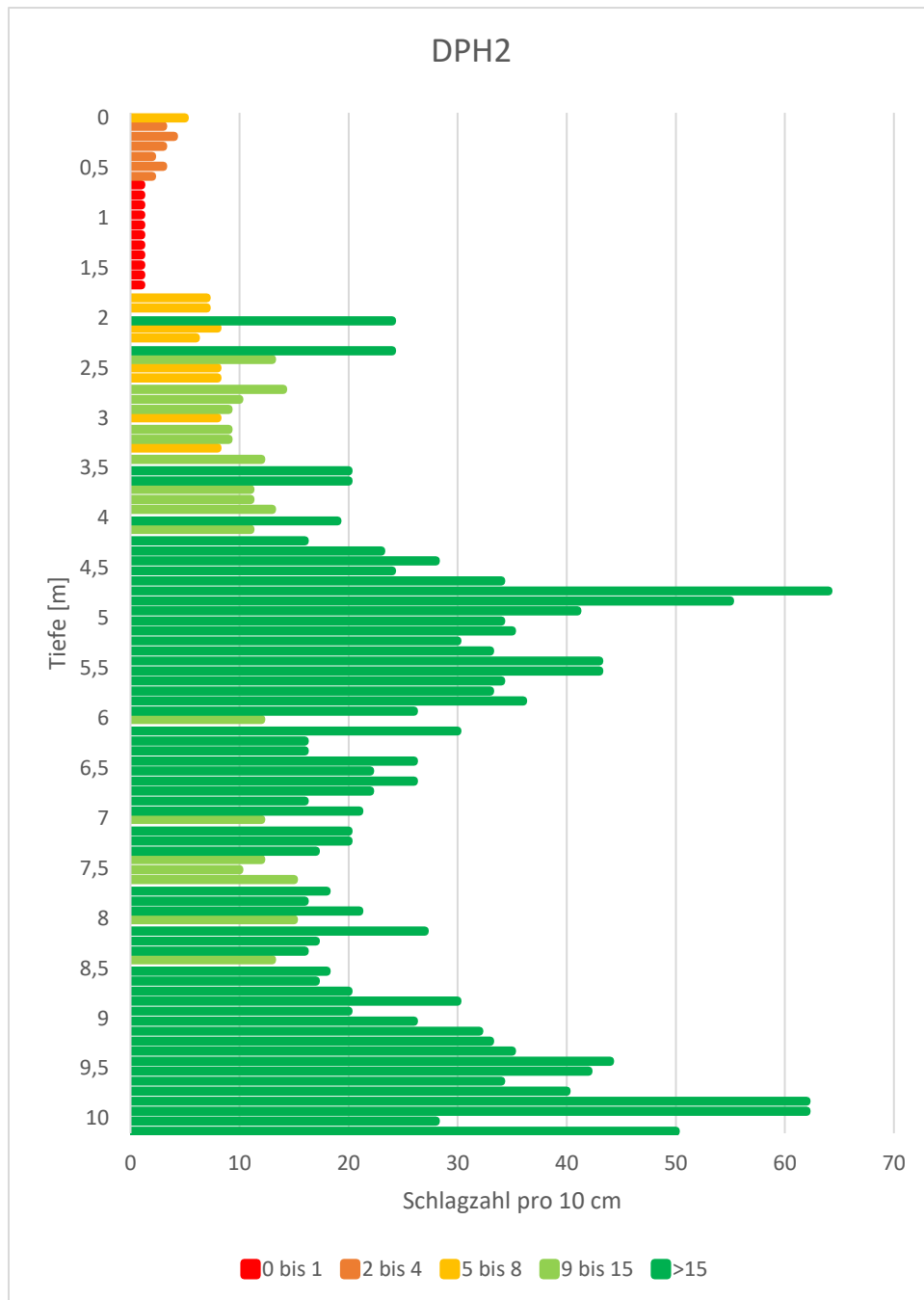


Abbildung 13: DPH 2 vom 17.09.2018

Bei DPH 2 wurde eine Tiefe von 10,2 m erreicht. Das Profil beginnt mit mittleren bis kleinen Schlagzahlen, von 0,8 bis 1,8 m Tiefe gibt es dann sehr geringen Widerstand (1 Schlag pro 10 cm). Darauf folgt ein rascher Anstieg bis zu einem Peak bei 2,1 m mit Schlagzahlen über 20. Der Widerstand geht anschließend wieder etwas zurück, bevor von 4,3 bis 4,8 m erneut ein starker Anstieg bis auf Schlagzahlen über 50 folgt. Im weiteren Verlauf der Sondierung gibt es einen allgemeinen Rückgang der Werte, gefolgt von einem erneuten langsamen Ansteigen, ohne bedeutende Ausreißer. Kurz vor dem Ende werden wieder sehr hohe Schlagzahlen erreicht.

DPH 3 wurde bis in eine Tiefe von 4 m vorgetrieben. In den ersten zwei Metern gibt es geringe bis mittlere, schwankende, Schlagzahlen, jedoch durchgehend unter 10. Danach kommt es zu einem leichten Anstieg der Widerstände mit Peaks bei 2,4 und 3,3 m. Das Ende ist sehr abrupt.

DPH 5 ist in Abbildung 14 dargestellt.

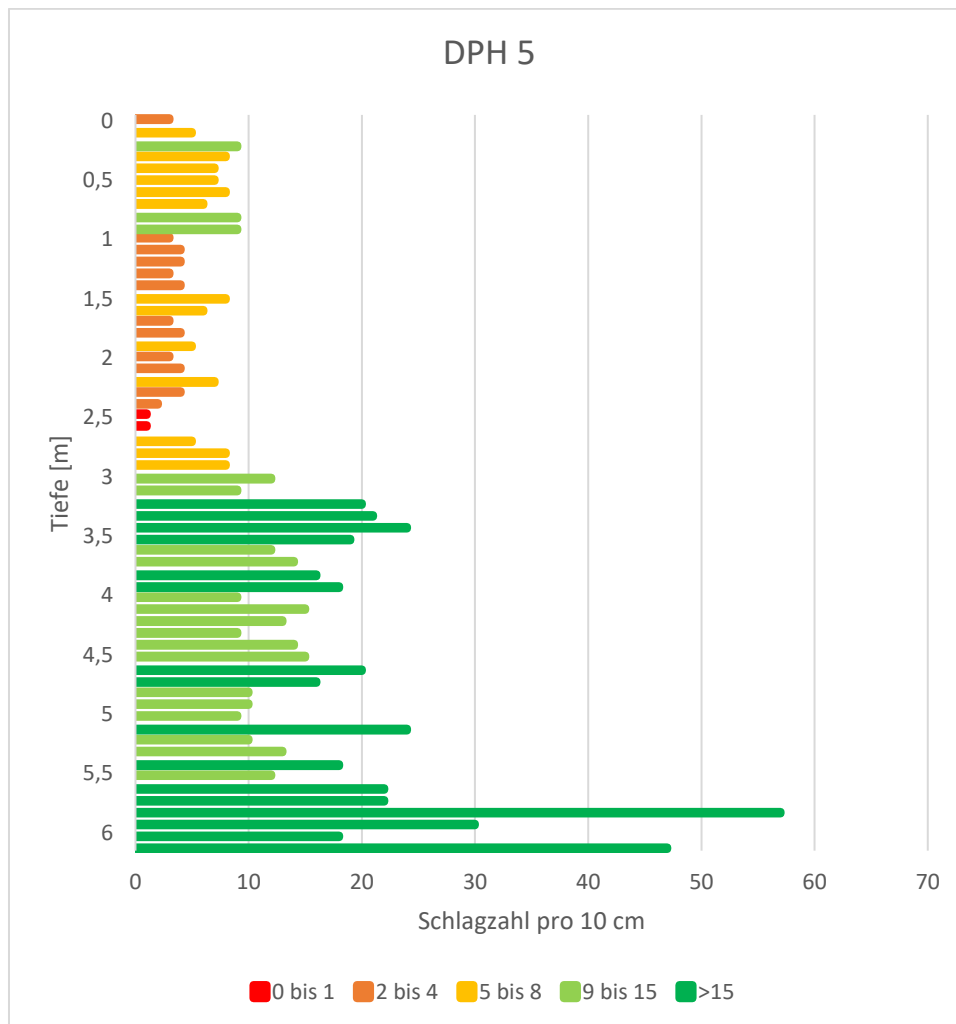


Abbildung 14: DPH 5 vom 17.09.2018

Bei DPH 5 konnte bis in eine Tiefe von 6,2 m vorgestoßen werden. Im ersten Meter treten relativ hohe Schlagzahlen auf (5-10). Danach gibt es größtenteils geringere, schwankende Werte. Bei 2,7 m wurde ein sehr geringer Widerstand verzeichnet. Daraufhin kommt es zu einem schnellen, starken Anstieg bis zu einem (nicht sehr deutlichen) Peak bei 3,5 m. Von hier bis zum Ende der Sondierung gibt es beim Vordringen mittlere bis hohe Schlagzahlen. Ein großer Peak ist noch bei 5,9 m erkennbar.

Wie können diese Ergebnisse im Sinne ihrer Aussagekraft für Hangbewegungen interpretiert werden? Einerseits muss genug Lockermaterial für eine Mobilisierung zur Verfügung stehen, dementsprechend ist tiefgründige Verwitterung maßgeblich. Andererseits ist für die Bewegungen, die am Standort Hofermühle wahrscheinlich in Form einer Rotationsrutschung auftreten, die Ausbildung einer Gleitfläche notwendig. WIEGAND et al. (2013:7, 11) führten Sondierungen in einem dichten Raster oberhalb des Anrisses einer flachgründigen Rutschung in Tirol durch. Die Autoren sehen dabei niedrige Widerstände als Anzeichen für Diskontinuitäten. An diesen Stellen könnte es zu einer Mobilisierung durch rückschreitende Erosion kommen. (vgl. ebd.)

DPH 1 und DPH 2 sind tiefgründig verwittert. DPH 2 zeigt dabei die deutlichsten Anzeichen für Rutschungsaktivität. Bis 2 m Tiefe lässt diese Sondierung auf sehr weiches Material schließen, dann kommt ein deutlicher Übergang zu härterem Material. Die Lage eher am Rand (weit versetzt) oberhalb des aktuellen Anrisses spricht eher gegen diese Annahme. Bei DPH 5 gibt es ebenfalls Anzeichen für Bewegung. Nach einem auffällig festen ersten Meter folgt sehr weiches Material mit einer möglichen Gleitfläche bei 2,8 m. Dieser Übergang ist jedoch nicht sehr deutlich, der Anstieg der Schlagzahlen verläuft eher schrittweise. Bei DPH 3 gibt es zwar eine relativ abrupte Zunahme der Festigkeit bei 3,3 beziehungsweise 4 m, das Material oberhalb ist allerdings nicht auffällig weich. Die Sondierung befindet sich direkt oberhalb des Anrisses und ist diesem somit am nächsten. DPH 1 ist bis 0,5 m extrem weich, dabei könnte es sich allerdings auch um Spuren der landwirtschaftlichen Nutzung (Bodenbearbeitung) handeln. Darunter gibt es bei zwar sehr variablem Widerstand keine Bereiche geringer Festigkeit mehr.

Nach D'AMATO AVANZI (2013: 618) kann ein starker Anstieg der Schlagzahlen z.B. auf einen kieshaltigen Horizont hinweisen. Bei der Interpretation der Schlagzahlen muss jedoch beachtet werden, dass diese dem Gesamteindringwiderstand entsprechen. Neben dem Spitzenwiderstand, der eigentlich von Interesse ist, besteht dieser auch aus der Reibung am Gestänge (=Mantelreibung). Die Mantelreibung erhöht die gemessenen Widerstände, je stärker je größer die Tiefe und besonders bei bindigen Böden. (vgl. EIBFELDT 2011: 4)

Im Vergleich weisen die drei von KARL (2018: 93) etwas unterhalb durchgeführten Rammkernsondierungen geringere Schlagzahlen auf, insbesondere in den obersten 3 m, wo sehr weiches Material vorherrscht. Markante Übergänge zu festerem Material und damit

mögliche Gleitflächen liegen hier einerseits in 3 m und andererseits in 5,5 bis 7 m Tiefe (vgl. ebd.). Die beim ‚landslide dynamics‘-Kurs durchgeführten Sondierungen zeigen teilweise sehr tiefgründig verwitterte Böden, auch hier gibt es in den obersten Metern vergleichsweise geringe Festigkeiten. Mitunter sehr markante Übergänge zu höheren Widerständen treten in etwa 2 m, teilweise in ca. 4 m Tiefe auf. (vgl. BOUTE et al. 2019: 102-109)

6.2. Beschreibung und Interpretation der Bohrkern B7, B8 und B9

Die vielfältigste und komplexeste Untergrundinformation wird von den Bohrkernen geliefert. Bohrkern B7 reicht bis in eine Tiefe von 5,5 m. Jeweils eine Hälfte des Bohrkerns (in ein Meter langen Abschnitten) ist in Abbildung 15 zu erkennen. Es fällt dabei der Kernverlust der ersten Hälfte der ersten zwei Meter und der hohe Gehalt an Kies (besonders von 2-4 m) auf. Auch das Aufschneiden der Inliner gestaltete sich bei diesem Bohrkern schwierig, da die Klinge im Kontakt mit den Steinen schnell stumpf wurde. Der Bereich von 4-5 m war etwas leichter aufzuschneiden, aber sehr nass, sodass es zum Ausrinnen kam. Der unterste Meter war zuerst nur leicht feucht, nach unten zu wieder nass. Möglicherweise ist an einigen Stellen (z.B. 1,5-1,6 m, 2-2,2 m) Material von oben in den Bohrkern eingerieselt bzw. abgeschabt worden. Dieses kann aufgrund der unklaren Herkunft nicht für die Interpretation herangezogen werden.

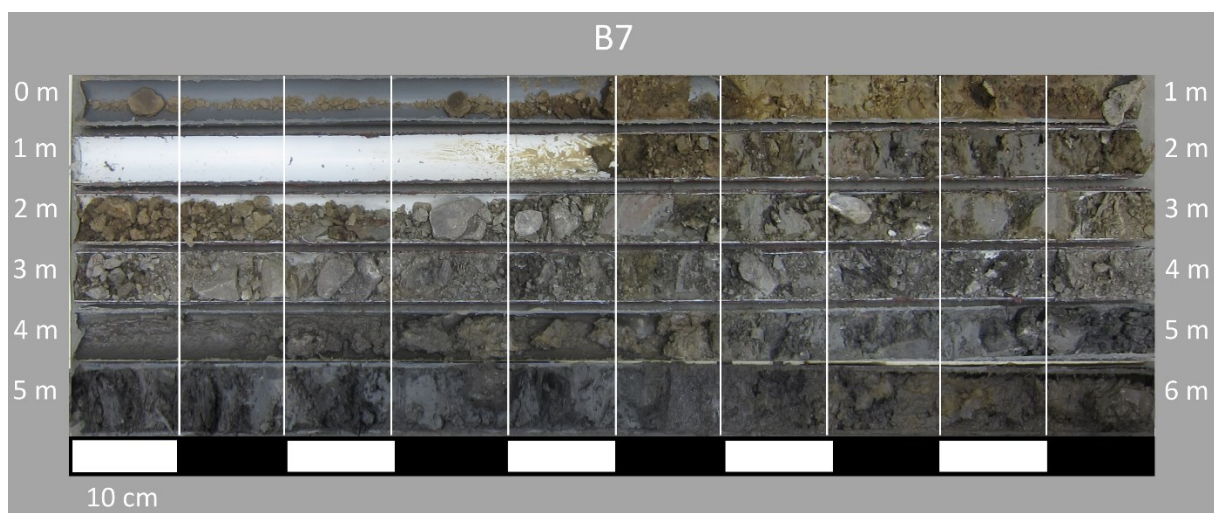


Abbildung 15: Bohrkern B7 (5,5 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018)

Bohrkern B8 ist 3,5 m tief und kann in Abbildung 16 betrachtet werden. Das Aufschneiden war hier relativ einfach, nur wenig Kies ist zu erkennen. Auffällig sind die Lücken im Material auch in den unteren Metern. Gerade im untersten Meter ließe sich das durch die erreichte Tiefe

(3,5 m, bei 4 m Bohrkernlänge) erklären. Der Großteil des Bohrkerns war bei der Ansprache trocken bis leicht feucht, nur nach unten zu stärker feucht. Es muss jedoch bedacht werden, dass es wahrscheinlich während der ein Jahr dauernden Lagerung zu einem Feuchtigkeitsverlust gekommen ist. Dementsprechend wurden auch keine Wassergehalte im Labor bestimmt. Sehr wahrscheinlich wurde das krümelige braune Material von 2,3-2,5 m von weiter oben eingebracht.

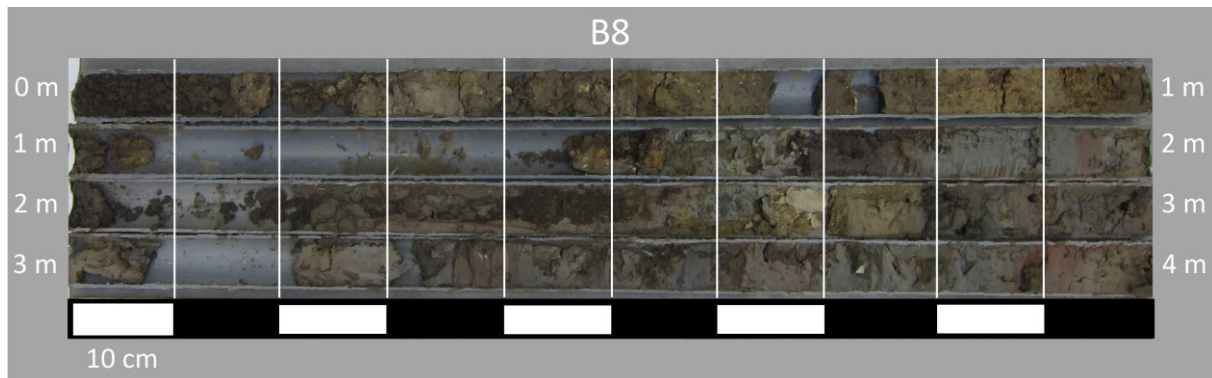


Abbildung 16: Bohrkern B8 (3,5 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018)

Bohrkern B9 erreicht eine Tiefe von 4 m. Einen Überblick gibt Abbildung 17. Gut erkennbar ist der starke Kernverlust in den ersten zwei Metern und der eher hohe Gehalt an Kies. Dies erschwerte auch hier das Aufschneiden. Der Bohrkern war größtenteils nur leicht feucht. Material in den oberen Bereichen der ersten 3 m, könnte, wenn überhaupt vorhanden, von weiter oben eingebracht worden sein.

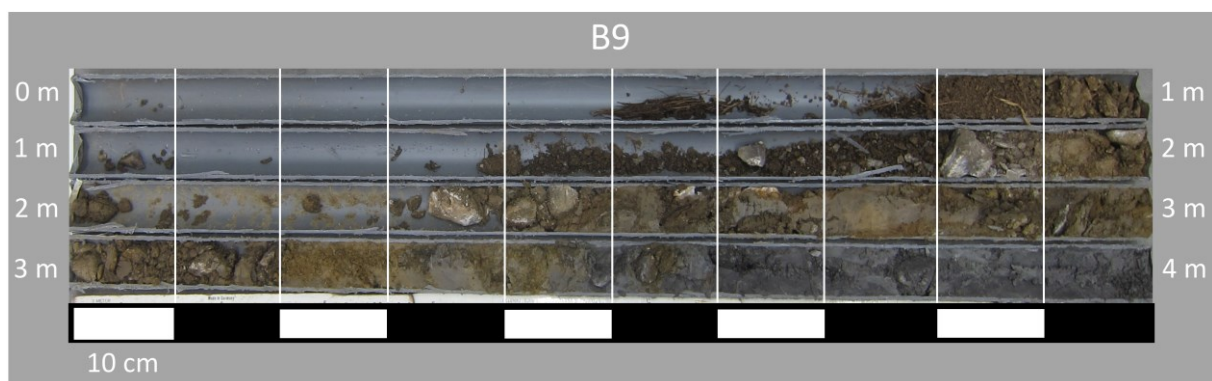


Abbildung 17: Bohrkern B9 (4 m tief, Durchmesser 5 cm, 18.10.2018)

Wie die oben dargestellten Bohrkerne in Horizonte unterteilt wurden und wie die Einschätzung der Textur dieser Horizonte mittels Fingerprobe aussieht, zeigt Abbildung 18. Daneben ist auch dargestellt, aus welchen Horizonten die Laborproben entnommen wurden. Wie die Grafik zeigt, überwiegen zumeist tonige und lehmige Bereiche in häufigem Wechsel,

wobei sich die Bohrkerne recht ähnlich sind. Im oberen Bereich gibt es teilweise sandige, bei B7 und B8 auch kiesige Horizonte. B8 hat eine etwas gröbere Textur als die anderen Bohrkerne. Bei B7 zeigen sich die einzelnen Meterabschnitte recht homogen, weswegen nur eine Probe pro Meter genommen wurde. Lediglich im letzten Meter wurde noch eine zusätzliche Probe fürs Labor vorbereitet, vor allem deswegen, weil hier ein deutlicher Übergang in der Konsistenz stattfindet (leicht feucht und sehr fest zu nass und weich). B8 ist durch eine große Vielfalt an optisch unterscheidbaren Horizonten gekennzeichnet, die auch in der Korngröße sehr divers sind. Der Horizont 167-175 sticht jedoch besonders heraus und wurde daher zusätzlich beprobt. Bei B9 wiederum war es aufgrund des Kernverlusts teilweise schwierig, genug Probenmaterial zu finden. Im ersten Meter wurde aufgrund unklarer Herkunft des lockeren Materials auf eine Laborprobe verzichtet. Dafür wurden beim vierten Meter, der sowohl in Farbe als auch in Textur einen starken Gradienten aufweist, zwei Proben genommen. Eine genauere Darstellung der Ergebnisse der Feldansprache ist im Anhang B in Tabellenform zu finden. Auch der von KARL (2018: 83) untersuchte Bohrkern von der Hofermühle-Rutschung in der Nähe des automatischen Inklinometers wies feinkörniges Material, teilweise Kernverlust und von oben eingebrachtes Material auf. Meist von schluffig-toniger, teilweise aber auch von sandiger Konsistenz sind jene Bohrkerne etwa 30 m nordöstlich von B9, die im Zuge der Lehrveranstaltung ‚landslide dynamics‘ entnommen wurden. Sie ähneln in der Variabilität der Horizonte Bohrkern B8. Auch hier trat abschnittsweise Kernverlust auf. (vgl. BOUTE et al. 2019: 89f)

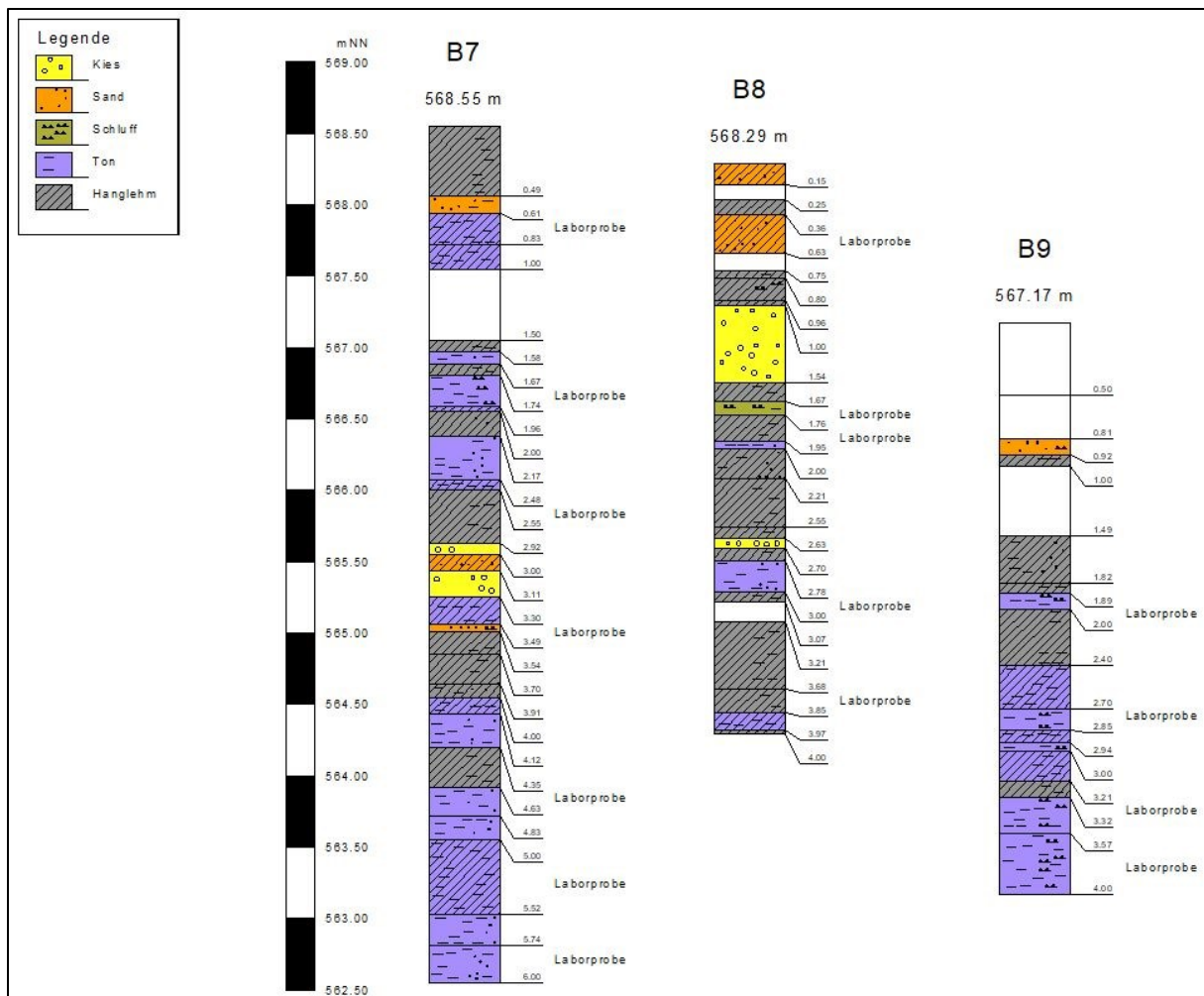


Abbildung 18: Horizontaleinteilung der Bohrkern und Darstellung der Textur der Horizonte (Fingerprobe, Bodenfarben nach DIN 4023), die Höhen stehen dabei im richtigen Maßstab zueinander, die Entfernungen nicht (genaue Lage siehe Karte Abb.12)

Im Folgenden sollen die Laborergebnisse der in Abbildung 18 in ihrer Lage spezifizierten Proben näher beschrieben werden. Die Ergebnisse finden sich in tabellarischer Form auch in Anhang C.

Bei der Korngröße handelt es sich meist um Lehm, teilweise mit dem Zusatz schluffig oder sandig. In zwei Fällen handelt es sich um lehmigen Ton (B8 52-65, B8 375-385). Daher muss in Hinsicht auf die Ansprache mittels Fingerprobe gesagt werden, dass es bei dieser Abschätzung der Korngröße oft zu einer Unterschätzung des Schluffgehalts, teilweise auch zu einer Überschätzung des Tongehalts gekommen ist. Bohrkern B8 wurde insgesamt noch am besten getroffen. Die oben beschriebenen Ergebnisse müssen dementsprechend mit Vorbehalt interpretiert werden.

In Abbildung 19 werden die Laborergebnisse für Bohrkern B7 präsentiert. Zur besseren Übersicht wurde die Horizontierung samt Textur aus der Feldansprache übernommen. Neben

einer genauen Bezeichnung der entnommenen Proben (die auch im Text verwendet wird) sind für die sieben Laborproben Textur, Karbonatgehalt, Glühverlust und Konsistenzgrenzen dargestellt. In der Grafik zum Karbonatgehalt werden zu den Werten aus den Laborproben auch Werte aus der Feldansprache gezeigt. Diese entsprechen dem Mittelwert der aus der Salzsäurereaktion abgeleiteten Kategorien (c0-c7) der bodenkundlichen Kartieranleitung (vgl. ECKELMANN 2005).

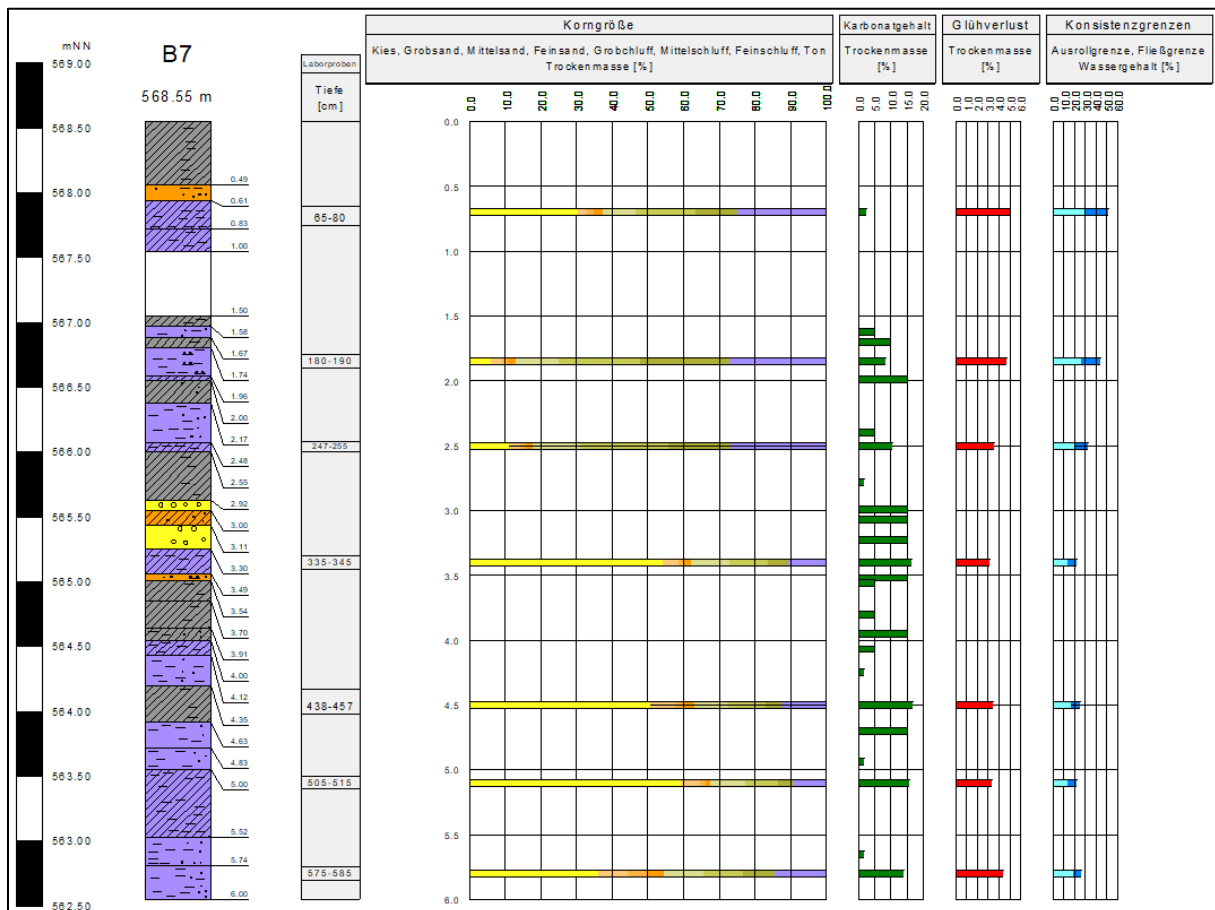


Abbildung 19: Laborergebnisse von Bohrkern B7

Die Korngrößenverteilung der Laborproben des Bohrkerns B7 gestaltet sich sehr variabel. Während B7 180-190 und 247-255 durch relativ geringe Gehalte an Kies gekennzeichnet sind, zeigen die darunterliegenden Horizonte einen extrem hohen Kiesanteil von über 50 %. Der oberste und der unterste beprobte Horizont liegen etwa in der Mitte. Der Sandanteil ist bei allen Proben gering, oft unter 10 %, und nimmt bei den unteren Laborproben eher zu. Innerhalb der Sandfraktion überwiegt meist der Grobsand. Bei den oberen drei Proben bildet der Schluff den größten Anteil mit 35-70 %. Fein- und Mittelschluff sind überproportional vertreten. Bei den anderen beprobten Horizonten von B7 nimmt er nur zwischen 20 und 30 %

ein. Hier überwiegt Grobschluff. Bei den Tongehalten gibt es eine ähnliche Aufteilung wie beim Schluff, sie liegen zwischen 10 und 25 %.

Ebenfalls im Labor analysiert wurde der Karbonatgehalt, genauer gesagt der Massenanteil von (Calcium-) karbonat an der Trockenmasse in %. Bohrkern B7 zeigt dabei eine starke Zunahme des Karbonatgehalts von 65-80 (2,5 %) bis 335-345 (16 %). Die weiter unten liegenden Proben haben einen ähnlich hohen oder etwas geringeren Karbonatgehalt. Werden die Abschätzungen der Feldansprache zu den weiteren Horizonten hinzugenommen, ergibt sich ein differenzierteres Bild. So wechseln sich Horizonte mit sehr hohem Karbonatgehalt mit solchen mit sehr geringem ab, insbesondere von 2-3 und von 4-6 m. Es stimmt aber in Bezug auf die generelle Zunahme mit der Tiefe überein, bis 1,5 m ist der Karbonatgehalt nicht nachweisbar, bei 3-3,5 m liegt er bei mindestens 15 %. Hier wird so etwas wie ein Maximum erreicht, darunter kommt es bei hoher Variabilität eher zu einer leichten Abnahme. Es muss jedoch auf die geringe Genauigkeit und mangelnde Objektivität der Schnellanalyse hingewiesen werden, sehr geringe und sehr hohe Karbonatgehalte können nicht erkannt bzw. nicht differenziert werden. Nur teilweise dadurch kann jedoch eine Unterschätzung des Karbonatgehalts erklärt werden, die im Vergleich zu den im Labor ebenfalls untersuchten Horizonten mehrheitlich auftrat. Sie ist besonders bei den beiden untersten Horizonten stark.

Eine weitere im Labor untersuchte Eigenschaft der Proben war der Glühverlust. Wird der Bohrkern B7 betrachtet, so liegt der Glühverlust in einem recht engen Bereich zwischen 3 und 5 %. Nach unten zu nehmen die Werte tendenziell ab, bei der untersten Probe 575-585 liegt er wieder höher.

Als letzte der Laboruntersuchungen sollen zwei der Atterberg-Limits, die Ausrollgrenze und die Fließgrenze, dargestellt werden. Generell zeigt sich, dass eine Fließgrenze bei hohem Wassergehalt auch mit einer Ausrollgrenze bei hohem Wassergehalt verbunden ist. Allerdings sind die Schwankungen bei der Ausrollgrenze geringer. Bohrkern B7 ist bis 335-345 durch abnehmende Wassergehalte der Konsistenzgrenzen gekennzeichnet, danach bleiben diese in etwa gleich. Liegt die Fließgrenze bei 65-80 noch über 50 % Wassergehalt, so kommt sie bei den unteren beprobten Horizonten nur auf die Hälfte. Nicht ganz so stark ist der Rückgang bei den Ausrollgrenzen (von 30 auf 15-20 %).

In Abbildung 20 sind die Laborergebnisse zu Textur, Karbonatgehalt, Glühverlust und Konsistenzgrenzen von Bohrkern B8 dargestellt. Im Folgenden werden sie erläutert.

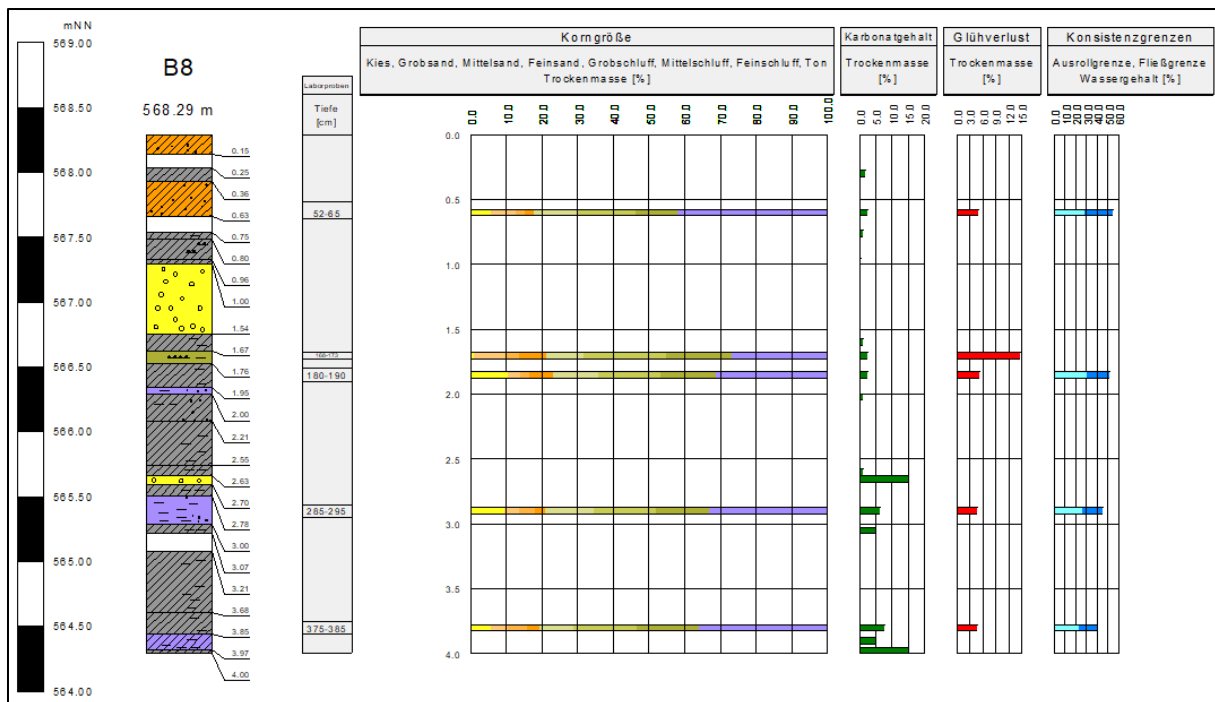


Abbildung 20: Laborergebnisse von Bohrkern B8

Die Korngrößenverteilung der Laborproben von Bohrkern B8 unterscheidet sich von B7, besonders stark im Kiesanteil. Die Gehalte an Kies sind generell gering und liegen bei maximal 10 %. B8 168-173 bildet in dieser Hinsicht aber noch einmal eine Ausnahme und ist fast frei von Bodenskelett. Der Anteil an Sand liegt recht einheitlich zwischen 10 und 15 %. Die Sandfraktion lässt sich aber unterschiedlich aufteilen. Während bei 52-65 der Grobsand dominiert, ist es bei 168-173 und 180-190 der Feinsand. Die anderen Proben haben eine gleichmäßigere Aufteilung. Schluff nimmt bei allen im Labor untersuchten Proben den größten Anteil ein, zwischen 40 und 55 %, wobei 168-173 besonders viel enthält. Die Aufteilung in Grob-, Mittel- und Feinschluff ist relativ gleichmäßig. Ebenso zeigen alle Proben von Bohrkern B8 mit mindestens 30 % relativ hohe Tongehalte, 52-65 bildet hierbei das Maximum mit über 40 %.

Die Karbonatgehalte von Bohrkern B8 sind, im Vergleich zu B7, großteils eher gering. Die im Labor ermittelten Werte liegen bis zur Probe 180-190 sehr konstant um 2,5 % und steigen dann auf 6 bis 8 %. Auch die Feldansprache aller Horizonte bestätigt den generell niedrigen Karbonatgehalt. Dieser liegt bis 2,5 m Tiefe entweder bei etwa 1-2 % oder ist nicht nachweisbar. Bei 2,65 m wird ein Peak von etwa 15 % verzeichnet, danach gibt es Gehalte um 5 % abwechselnd mit nicht nachweisbaren Mengen. In 4 m Tiefe werden wieder 15 % erreicht.

Auch hier wurden bei der Feldansprache die Karbonatgehalte im Vergleich zur Laboranalyse unterschätzt, bei den höheren Werten sogar stark.

Der Glühverlust von Bohrkern B8 ist bis auf eine Ausnahme recht konstant. Die Werte liegen dabei um 5 %, 168-173 sticht mit fast 15 % deutlich heraus.

Die Konsistenzgrenzen von Bohrkern B8 weisen in den oberen Laborproben hohe Wassergehalte auf. Sie nehmen nach unten zu ab, die Abnahme ist allerdings weniger stark als bei B7. Die Fließgrenze ist im Bereich von 40-55 %, die Ausrollgrenze von 20-30 %.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Laborproben des Bohrkerns B9 im Detail. Diese sind genauso wie bei den anderen Bohrkernen strukturiert und im Folgenden beschrieben.

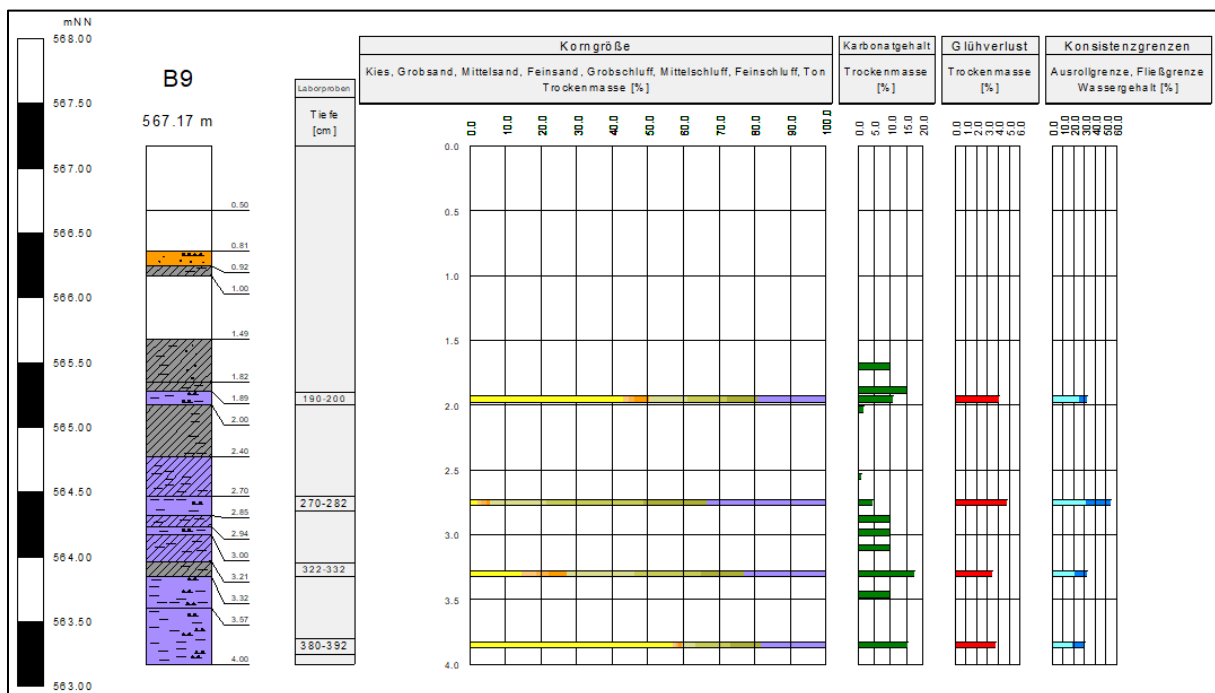


Abbildung 21: Laborergebnisse von Bohrkern B9

Die Korngröße ist bei den vier untersuchten Proben des Bohrkerns sehr variabel. Sie weisen im Besonderen extrem unterschiedliche Kiesgehalte auf. Während 380-392 über 50 % und 190-200 über 40 % Kies haben, liegt der Anteil bei 322-337 nur bei etwa 15 %, bei 270-282 unter 5 %. Der Sandanteil ist bei 270-282 und 380-392 sehr gering (deutlich unter 5 %) und auch bei den beiden anderen Proben nicht höher als 10 %. Bei 190-200 überwiegt der Grobsand, ansonsten ist die Aufteilung eher gleichmäßig. Die Schluffgehalte sind generell hoch, besonders dort, wo wenig Kies vorhanden ist. Sie liegen zwischen 20 und 60 %. Mittel-

und Feinschluff ist teilweise überproportional vorhanden. Die Tonfraktion hält bei etwa 20 % und ist damit eher klein, nur 270-282 enthält über 30 % Ton.

Bei Bohrkern B9 liegt bei der obersten Probe 190-200 der Karbonatgehalt schon über 10 Prozent. Die beiden untersten Proben haben mit über 15 % noch höhere Werte, dazwischen bildet allerdings 270-282 einen Ausreißer. Die im Allgemeinen hohen Werte werden auch mit Blick auf die übrigen Horizonte bis auf einige Ausnahmen bestätigt. In den obersten vorhandenen Horizonten lässt sich zwar kein Karbonat nachweisen, dafür liegen die Werte bei 1,5-2 m bei 10-15 %. Danach folgen jedoch von 2-2,7 m geringe Karbonatgehalte von 1-2 %. Die weiteren Horizonte erreichen Werte um 10 %. Bei denjenigen Horizonten, wo ein Vergleich möglich ist, zeigt sich eine Unterschätzung des Karbonats durch die Schnellbestimmung mittels HCL. Diese fiel teilweise jedoch nur gering aus.

Ähnlich wie bei den anderen Bohrkernen liegt der Glühverlust von B9 zwischen 3,5 und 5 %. Das Maximum liegt bei 270-282, es gibt keinen deutlichen Trend (was bei den wenigen Proben aber schwierig abzulesen ist).

Bei den Konsistenzgrenzen liegen die Wassergehalte von Bohrkern B9 in einem ähnlichen Bereich wie die anderen Bohrkern, es gibt allerdings keinen eindeutigen Trend mit der Tiefe. Die höchsten Werte werden bei 270-282 erreicht (Ausrollgrenze ca. 30 %, Fließgrenze ca. 55 %) und damit im Vergleich weiter unten. Die anderen drei Proben liegen dafür auf einem deutlich geringeren Niveau und sind sich relativ ähnlich (Ausrollgrenze 20-25 %, Fließgrenze 30-35 %).

Im Vergleich zu den eben beschriebenen Bohrkernen weist der von Karl (2018: 87) untersuchte Bohrkern in der Laboranalyse vergleichbare Ton- und Schluffgehalte, allerdings einen höheren Sand- und geringeren Kiesanteil auf.

Wie lassen sich die Ergebnisse in Hinsicht auf die Rutschungsaktivität interpretieren? Tiefgründige Verwitterung ist wie schon bei den Rammkernsondierungen erwähnt ein Faktor. Bohrkern B7 wäre in dieser Hinsicht hervorzuheben, im Vergleich zu DPH 1 und 2 wurde aber nicht so tief vorgedrungen (was auch auf die Methodik zurückzuführen sein könnte, da das Gestänge der Bohrkern einen größeren Durchmesser aufweist). Feinkörniges Material erhöht wie schon im Forschungsstand beschrieben ebenfalls die Anfälligkeit für Rutschungen. Vor allem aufgrund der geringeren Kiesgehalte kann der gesamte Bohrkern B8, besonders aber

168-173 als sehr feinkörnig beschrieben werden. Den höchsten Tongehalt aller Proben haben B8 52-65 und 375-385. Die anderen Bohrkern sind in dieser Hinsicht variabler, B7 180-190 und B9 270-282 haben aber ebenfalls einen sehr großen Anteil an feiner Substanz. Bei der Fingerprobe aufgrund der millimeterdünnen Ausrollbarkeit sehr auffällig waren beim Bohrkern B7 die Tiefen 4.07 und 5.07 m, beim Bohrkern B9 2,98 und 3,9 m. Diese wurden jedoch nicht im Labor näher untersucht.

Wie beschrieben kann ein geringer Karbonatgehalt eher als ungünstiger Faktor in Bezug auf die Sedimentstabilität gewertet werden. Durch geringen Karbonatgehalt sind besonders die obersten 2,5 m des Bohrkerns B8, aber auch manche Horizonte des Bohrkerns B7 gekennzeichnet.

Ein hoher Glühverlust lässt auf einen dementsprechend hohen Anteil an organischer Substanz schließen. Ist ein solcher in einem tief liegenden Horizont gegeben, so könnte dieser eine ehemals an der Oberfläche liegende Bodenbildung repräsentieren, die zu einem späteren Zeitpunkt überdeckt wurde, z.B. durch eine darüber gleitende Rutschmasse. Einen solchen, indirekten Hinweis für Rutschungsaktivitäten gibt es anhand der Glühverluste am ehesten bei Laborprobe B8 168-173. Etwas auffällig, aber viel weniger deutlich sind auch B7 575-585 und B9 270-282. Die Werte sind auch mit jenen vergleichbar, die REMELLI et al. (2019: 5) bei einer komplexen Rutschung in Italien erhoben hat (4-18 %). Allerdings handelte es sich dabei um oberflächliche Proben und nicht um Proben aus Bohrkernen (vgl. ebd.).

Bei den Konsistenzgrenzen verweisen höhere Wassergehalte auf ungünstige Materialbedingungen. Der Boden reagiert hier eher plastisch und weist geringere Festigkeiten auf. (vgl. AUGNER 2011: 7) (vgl. FRYDMAN et al. 2007: 38) Anders als in der Literatur angegeben kann bei den im Labor erhaltenen Werten kein schnell ersichtlicher Zusammenhang mit der Korngröße ausgemacht werden, am ehesten besteht ein Trend der Abnahme mit der Tiefe. Daher wechseln die weiter oben gelegenen Laborproben aller Bohrkern bei den höchsten Wassergehalten die Konsistenz, vergleichbare Maxima werden bei den Bohrkernen B7 und B8 bei den obersten beprobten Horizonten erreicht, bei B9 erst bei 270-282. Im Vergleich zur Analyse von FRYDMAN et al. (2007: 38) sind die Werte bei den Ausrollgrenzen vergleichbar, bei den Fließgrenzen jedoch teilweise deutlich geringer. Im mergeligen Material werden diese erst bei Wassergehalten von 80-95 % erreicht (vgl. ebd.). D'AMATO AVANZI et al. (2013: 615)

erhielt bei eher sandigen Böden aus Italien teils deutlich geringere Werte (Ausrollgrenze 15-25 %, Fließgrenze 20-40 %).

6.3. Beschreibung und Interpretation der Inklinometer Inkauto und Ink1

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der gewählten Inklinometermessungen beschrieben und diskutiert. Der erste Teil widmet sich dem automatischen Inklinometer.

Abbildung 22 zeigt den (kumulierten) Versatz vom 26.09.2019 (also dem letzten verwendeten Zeitpunkt) gegenüber dem 14.11.2018 (der Nullmessung, entspricht der Y-Achse) über die gesamte Tiefe des Inklinometers. Auf der x-Achse ist dabei die Deformation in mm, auf der y-Achse die Tiefe in m dargestellt. Es muss angemerkt werden, dass das Inklinometerrohr nicht völlig lotrecht installiert wurde, sondern dessen unterster Punkt etwa 30 cm in X-Richtung und 25 cm in Y-Richtung gegenüber dem obersten Punkt verschoben ist. Diese Schiefe wurde jedoch zur besseren Abbildung der Bewegung nicht dargestellt.

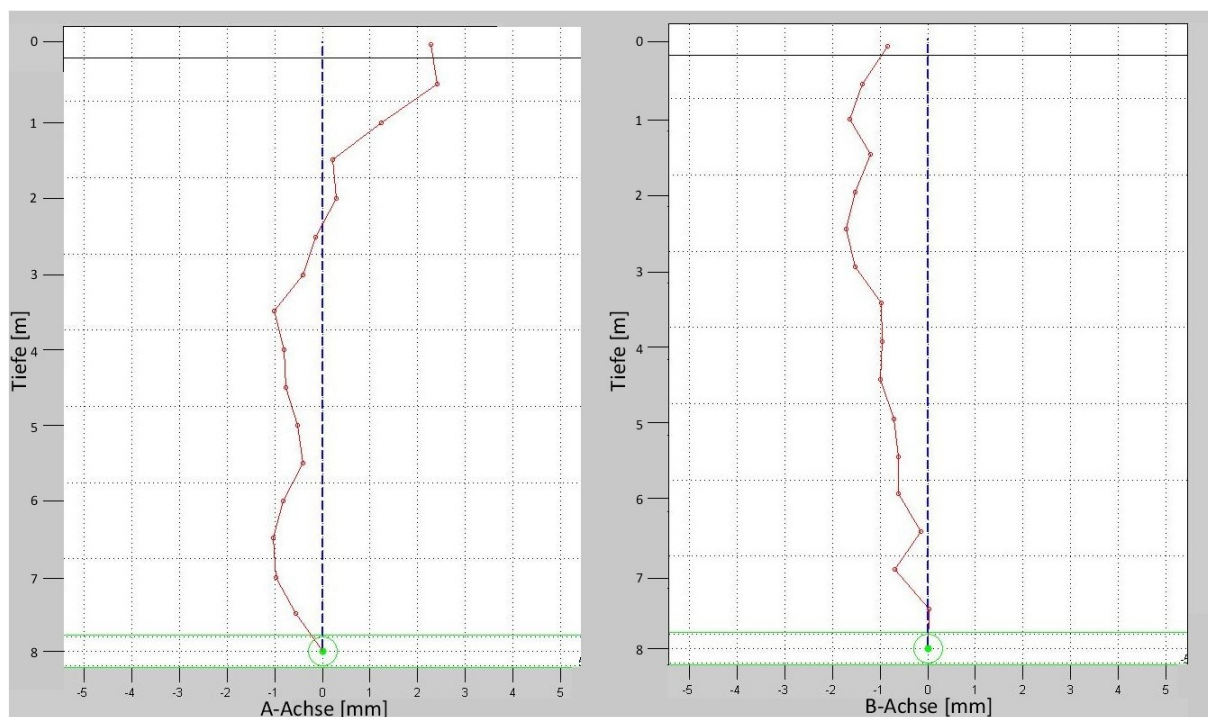


Abbildung 22: kumulierter Versatz des automatischen Inklinometers entlang der A- und B-Achse vom 26.09.2019 im Vergleich zu Nullmessung am 14.11.2018 (y-Achse)

In Abbildung 22 ist somit die Situation über das gesamte Profil am Ende des Messzeitraums erkennbar. Der Versatz von etwas über 2 mm in A-Richtung verstärkt sich sogar noch in 0,5 m Tiefe, nimmt dann aber stark ab und wechselt unterhalb von 2 m Tiefe sogar die Richtung. Hier erreicht er jedoch in Tiefen von 4 und 7 m maximal 1 mm. Der unterste Punkt des

Inklinometers bleibt stationär. Entlang der B-Achse zeigt die Bewegung durchgehend in eine Richtung. Von 1 mm an der Oberfläche verstärkt sie sich in 1,5 m und dann wieder in 3 m Tiefe fast auf 2 mm, nimmt dann weiter unten jedoch zunehmend ab.

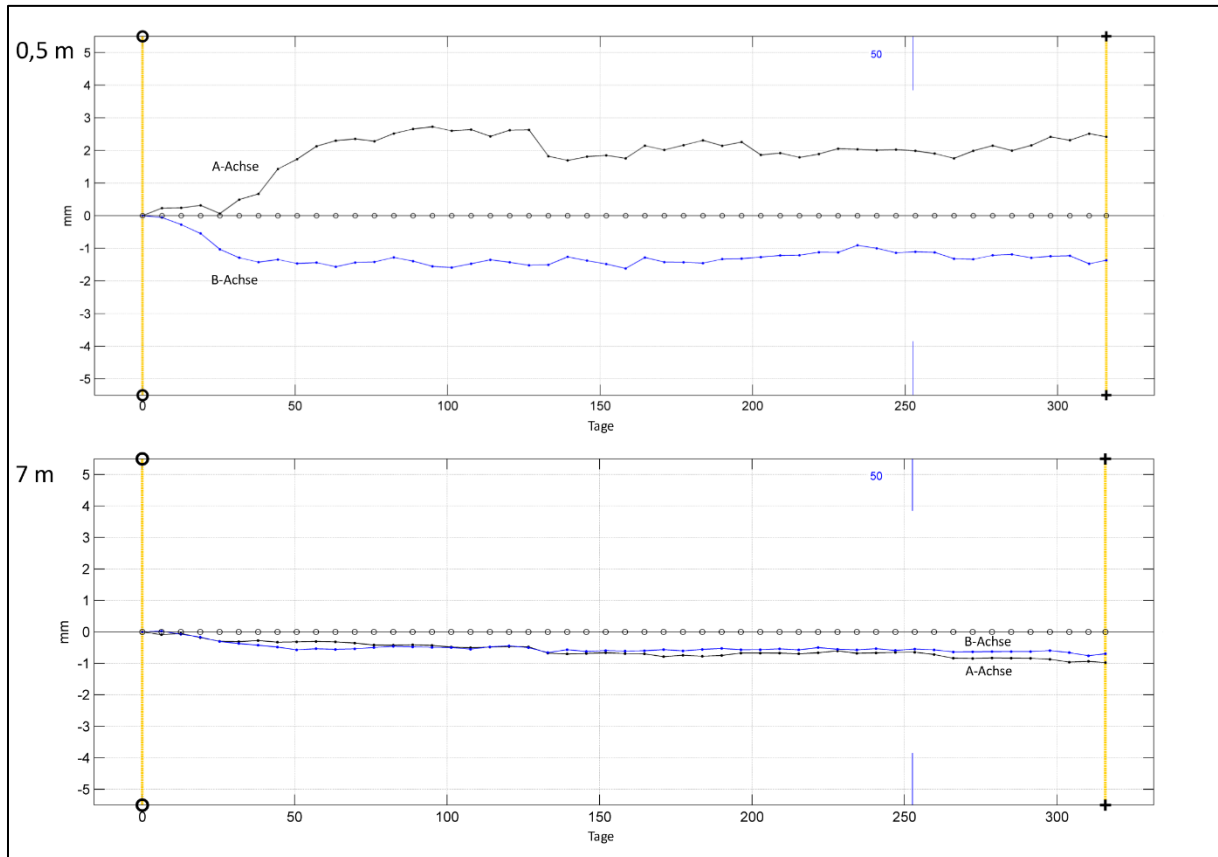


Abbildung 23: kumulierter Versatz in 0,5 m und 7 m Tiefe entlang der A- und B-Achse des automatischen Inklinometers von 14.11.2018 bis 26.09.2019

Der Verlauf dieses Versatzes in 0,5 m und 7 m Tiefe in A- und B-Richtung über den gesamten Untersuchungszeitraum ist in Abbildung 23 dargestellt. Die x-Achse zeigt dabei das Datum, die y-Achse die Deformation in mm. Die durch das Messintervall (5 min) resultierenden vielen Daten wurden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit stark gefiltert. Die vollständigen Daten sind durch ein ständiges Oszillieren im Bereich von bis zu 0,5 mm gekennzeichnet.

In Abbildung 23 lässt sich erkennen, dass nahe der Oberfläche im untersuchten Zeitraum ein Versatz von etwa 2,5 mm entlang der A-Achse und 1,5 mm entlang der B-Achse stattgefunden hat. Der größte Teil dieser Bewegung fällt bei der A-Achse jedoch auf Ende Dezember 2018 (40-50 Tage nach Beginn). Bei der B-Achse beginnt die Bewegung früher, ist aber weniger markant. 130 Tage nach Beginn (also Ende März/Anfang April 2019) gibt es entlang der A-Achse eine entgegengesetzte Bewegung, die nur allmählich und nicht vollständig wieder

rückgängig gemacht wird (am meisten nach 260 Tagen, also ab Anfang August). Die Schwankungen sind ab April 2019 aber gering. Entlang der B-Achse gibt es nach dem Beginn nur wenig markante Verschiebungen, diese sind aber auch teilweise einander entgegengesetzt.

In 7 m Tiefe sind die Bewegungsraten deutlich geringer. Am Ende des Untersuchungszeitraums nach knapp einem Jahr liegt der kumulative Versatz bei der A-Achse bei etwa 1 mm, entlang der B-Achse etwas darunter. Die Bewegung fällt dabei größtenteils in den Dezember 2018, ähnlich wie bei der B-Achse in 0,5 m Tiefe. Möglicherweise gibt es wie in geringerer Tiefe auch noch einen Versatz im Zeitraum Ende März/Anfang April 2019, ansonsten können keine markanten Bewegungen ausgemacht werden.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das automatische Inklinometer einen sehr geringen Versatz zeigt, der größtenteils zu Beginn des Messzeitraums im Dezember 2018 stattgefunden hat. Die Bewegung scheint schräg zur Falllinie verlaufen zu sein (da sie an beiden Achsen registriert wurde), eine Änderung der Bewegungsrichtung mit der Tiefe wird durch das Profil angedeutet. Der Versatz reicht möglicherweise bis in 7,5 m Tiefe. Aufgrund der geringen Werte muss der Vermutung nachgegangen werden, dass es sich um eine Verwechslung mit/Überlagerung von Messfehlern/Messungenauigkeiten handelt. STRONER et al. (2016) stellten bei Experimenten mit einem ähnlichen automatischen Inklinometer von Measurand (allerdings mit 30,5 statt 50 cm langen Segmenten) in verschiedenen Lagen (kreisförmig, horizontal, vertikal) eine Standardabweichung von 0,04-0,05 mm pro Segment fest. Die erhaltenen Werte liegen deutlich über dieser Genauigkeit, demnach handelt es sich nicht um Messungenauigkeiten. Weitere Fehlerquellen werden weiter unten allgemein für Inklinometer diskutiert.

Im Folgenden sollen die Messwerte des manuellen Inklinometers vorgestellt werden. Diese sind in Abbildung 24 dargestellt. Die x-Achse zeigt die Deformation in cm, die y-Achse die Tiefe in m. Von den elf Messungen wurden zwei (17.01. und 10.07.2019) weggelassen, da Probleme in der Darstellung auftraten, die den Vergleich mit den anderen Zeitpunkten erschweren (zeigen in die andere Richtung der x-Achse).

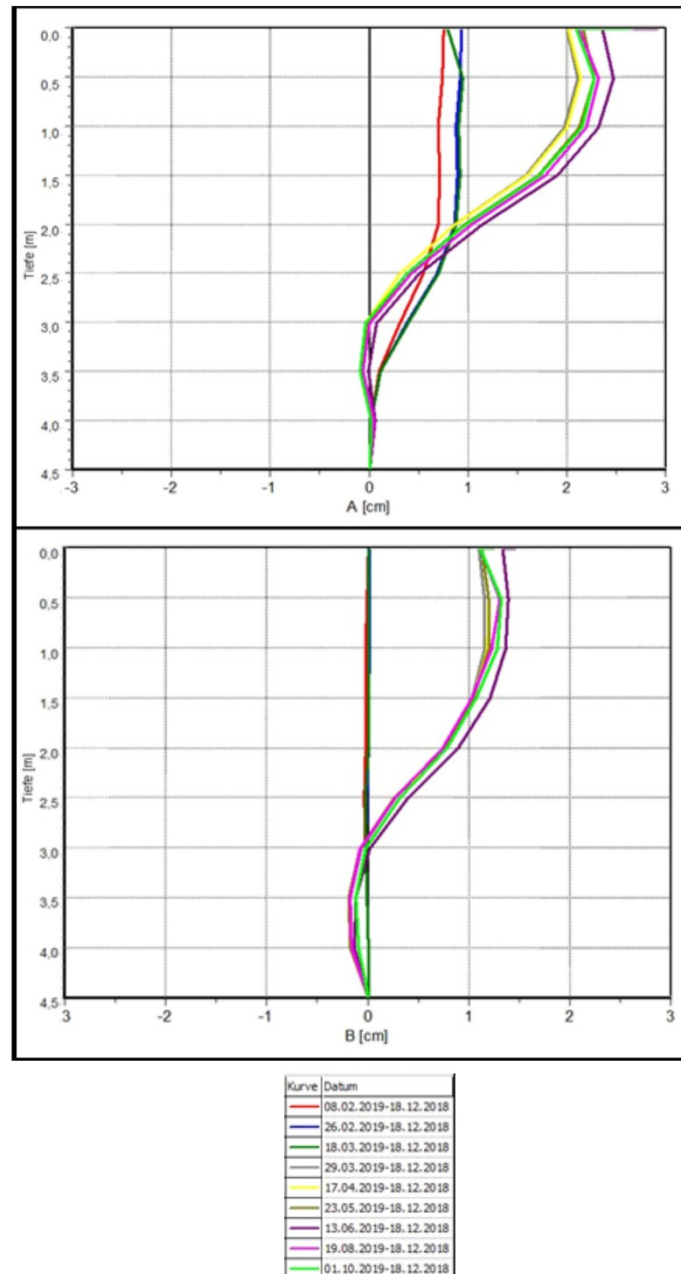


Abbildung 24: kumulierter Versatz der A- und B-Achse des manuellen Inklinometers zu neun Zeitpunkten im Vergleich zur Nullmessung am 18.12.2018

Die y-Achse in Abbildung 24 entspricht der Nullmessung am 18.12.2018. Diese ist in Wirklichkeit jedoch nicht völlig lotrecht, sondern weicht von dieser Lotrechten beim tiefsten erreichten Punkt (4,5 m) 30 cm von der A-Achse und etwa 8 cm von der B-Achse ab (wie aus dem hier nicht dargestellten Bohrlochverlauf ersichtlich wird). Alle Werte ab dem 29.03.2019 (graue Linie) müssen um einen halben Meter nach unten gerückt gedacht werden, da hier die unterste Messung 4,8 m Tiefe entspricht (und die zweitunterste 4,5 m).

Bis zum 08.02.2019 kommt es auf der A-Achse zu einer deutlichen Verschiebung. Diese beträgt an der Erdoberfläche etwa 0,7 cm, nimmt bei 2 m langsam ab und reicht bis 3,8 m Tiefe. Wahrscheinlich hat ein Großteil dieser Bewegung schon bis zum 17.01.2019 stattgefunden, dieser Messzeitpunkt ist jedoch aufgrund von Darstellungsproblemen (negative Werte auf der x-Achse) nicht in der Abbildung enthalten. Entlang der B-Achse gibt es zu Beginn des Messzeitraums keine deutliche Bewegung. Im Zeitraum bis 26.02. wird das Inklinometerrohr erneut nur in A-Richtung versetzt, allerdings nur um etwa 0,2 cm. Der Verlauf mit der Tiefe ist ähnlich wie zuvor. Vom 26.02. bis zum 18.03.2019 ist auf keiner der Achsen eine Veränderung zu erkennen. Von 18.03. bis 29.03.2019 ist der Versatz auf beiden Achsen am höchsten. Auf der A-Achse liegt er an der Oberfläche bei 1,2 cm, nimmt aber schon bei 0,5 m Tiefe beginnend ab. Bei etwa 3,5 m unterscheidet sich die Position des Inklinometers nicht von derer der Nullmessung, darunter kommt es zu einer leichten Verschiebung entgegengesetzt zu den ersten Bewegungen (max. 0,4 cm). Das untere Ende bleibt unverändert. Im Zeitraum 18.03. bis 29.03.2019 kommt es auch entlang der B-Achse zu einem Versatz. Dieser beträgt an der Oberfläche 1,1 cm und nimmt ab einer Tiefe von 1 m ab. Die Bewegung reicht hier ebenfalls bis 3,5 m Tiefe. Die folgende Messung am 17.04.2019 zeigt in beiden Richtungen einen nahezu identischen Verlauf zum 29.03. Zwischen 17.04. und 23.05.2019 findet wieder ein Versatz statt, allerdings nur entlang der A-Achse und nur etwa 0,2 cm. Dieser nimmt ab 1 m Tiefe ab und ist ab 1,5 m Tiefe kaum mehr wahrnehmbar, reicht aber möglicherweise bis 3 m. Eine weitere Bewegung, an der Oberfläche knapp 0,3 cm entlang der A-Achse und 0,2 cm entlang der B-Achse, wird von 23.05. zum 13.06.2019 verzeichnet. Der Versatz reicht sich abschwächend (0,1 cm) bis etwa 3,5-4 m Tiefe. Zum folgenden Zeitpunkt am 19.08.2019 stimmt der Verlauf allerdings nahezu mit jenem vom 23.05. überein, die vorhergehende Verschiebung wurde in beiden Richtungen wieder nahezu rückgängig gemacht (Ausnahme Tiefenbereich 0,5 m der B-Achse). Im letzten Zeitabschnitt bis 01.10.2019 gibt es keine größeren Veränderungen.

Zusammengefasst gesagt haben Verschiebungen beim manuellen Inklinometer vor allem zwischen 18.12.2018 und 08.02.2019 sowie zwischen 18.03. und 29.03.2019 stattgefunden, auf der B-Achse nur in letzterem Zeitraum. Die Versätze haben demnach in verschiedene Richtungen gewiesen. Mögliche spätere Verschiebungen müssen aufgrund der geringen Werte, vor allem aber ihrer späteren Umkehr (hangaufwärts?), kritisch betrachtet werden.

Kumuliert über den gesamten Messzeitraum kommt es zu einem Versatz von 2,3 cm in A-Richtung und 1,3 cm in B-Richtung, die Bewegung reicht bis in 3-4 m Tiefe.

Werden die beiden Inklinometer verglichen, so fällt der deutlich höhere (Faktor 10) Versatz des manuellen Inklinometers auf. Die Bewegung reicht beim automatischen Inklinometer mit etwa 7 m vermutlich deutlich weiter in die Tiefe als beim manuellen Inklinometer (etwa 3 m). Das Maximum der Bewegung reicht jeweils bis in 0,5 bis 1 m Tiefe, darunter nimmt sie bis zur eben genannten Tiefe allmählich ab. Bei der zeitlichen Einordnung der Bewegung gibt es teilweise Übereinstimmungen. Irgendwo in den Zeitraum der Bewegung des automatischen Inklinometers (zu Beginn des Beobachtungszeitraums) fällt auch die erste größere Verschiebung des manuellen Inklinometers (allerdings nur entlang der A-Achse). Wie gut die Übereinstimmung wirklich ist, lässt sich aufgrund des Messintervalls schwer sagen. Die zweite größere Bewegung des manuellen Inklinometers findet sich weniger deutlich im automatischen Inklinometer wieder (A-Achse entgegengesetzter Versatz, am ehesten entlang der B-Achse).

Nachdem die Ergebnisse vorgestellt wurden, soll noch näher auf Genauigkeit und Fehlerquellen von Inklinometern eingegangen werden. Nach SIMEONI und MONGIOVI (2007: 662) kann bei Inklinometermessungen eine Feldmessgenauigkeit von ± 8 mm pro 30 m erreicht werden. Nach denselben Autoren werden beim automatischen Inklinometer geringere Genauigkeiten erreicht (vgl. ebd.). Zumindest experimentell trifft das für das SAA-System von Measurand nicht zu, wie schon angemerkt wurde (vgl. STRONER et al. 2016). Zusätzlich zu diesen (zufälligen) Schwankungen können Fehler durch die Verwindung des Inklinometerrohres, bei der Kalibrierung und durch ungenaue Tiefenlage der Sonde entstehen (vgl. ZANGERL et al. 2008: 28). Deutliche Hinweise auf Rotation konnten in den Daten nicht erkannt werden. Zu den Fehlerquellen zählen auch Rauschen beim Datenerfasser und Schäden bei der Sonde und beim Datenerfasser (vgl. ebd.: 663). Durch Rauschen könnten zum Beispiel die 0,5 mm- Oszillationen beim automatischen Inklinometer der Hofermühle-Rutschung verursacht worden sein, die bei der Filterung von der Software herausgerechnet wurden.

Beim Vergleich mit den Inklinometermessungen von FRYDMAN et al. (2007: 38f) fällt auf, dass die Bewegung bei diesem entlang einer deutlichen Gleitfläche als Block erfolgte. Dadurch kam es auch schon bei einem Versatz von ca. 1 cm zum Bruch des Inklinometerrohres an dieser

Stelle (vgl. ebd.). Bei der Hofermühle-Rutschung kann nicht von einer Bewegung als ein Block gesprochen werden, sie nimmt eher graduell nach unten hin in einem „Scherbereich“ ab. Eine ähnliche Struktur ist im Kontext von gravitativen Massenbewegungen schon festgestellt worden, Refice et al. (2019: 451) erkennt bei Inklinometermessungen Scherbänder in verschiedenen Tiefen. Bei der Hofermühle wurde damit ein Bruch des Inklinometerrohres aber auch nach 2,3 cm Oberflächenversatz noch nicht erreicht, vielleicht hält das Rohr dieser über einen größeren Tiefenbereich verteilten Belastung eher stand. Außerdem fällt bei der Massenbewegung in Israel die viel gleichmäßigere Bewegung auf, auch wenn innerhalb eines halben Jahres ähnliche Bewegungsraten erreicht werden (vgl. FRYDMAN et al. 2007: 38f). Bei der Hofermühle sind im Untersuchungszeitraum eher Einzelereignisse maßgeblich.

7. Diskussion

Im Folgenden sollen die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse in Hinsicht auf die zu Beginn dieser Arbeit aufgestellten Forschungsfragen diskutiert werden. Im Anschluss an diese Besprechung soll abgewogen werden, inwieweit die aufgestellten Hypothesen bestätigt werden können.

Welche Strukturen lassen sich durch direkte Verfahren (Rammsondierungen, Bohrungen, Inklinometermessungen) im Untergrund abgrenzen?

Alle verwendeten Untergrundmethoden (bis auf das automatische Inklinometer, das sich deutlich tiefer befindet) sind in Abbildung 25 dargestellt. Dabei wird die recht ähnliche Höhenlage der Instrumentierungen erkenntlich. Es handelt sich wie in der Methodik beschrieben um einen in etwa hangparallelen Schnitt auf Höhe des Hofes, der im linken Bereich oberhalb des aktuellen Anrisses bis fast zum Hofermühlbach reicht. Beim Inklinometer wird die kumulative Deformation der letzten ausgewerteten Messung am 01.10.2019 im Vergleich zur Nullmessung dargestellt.

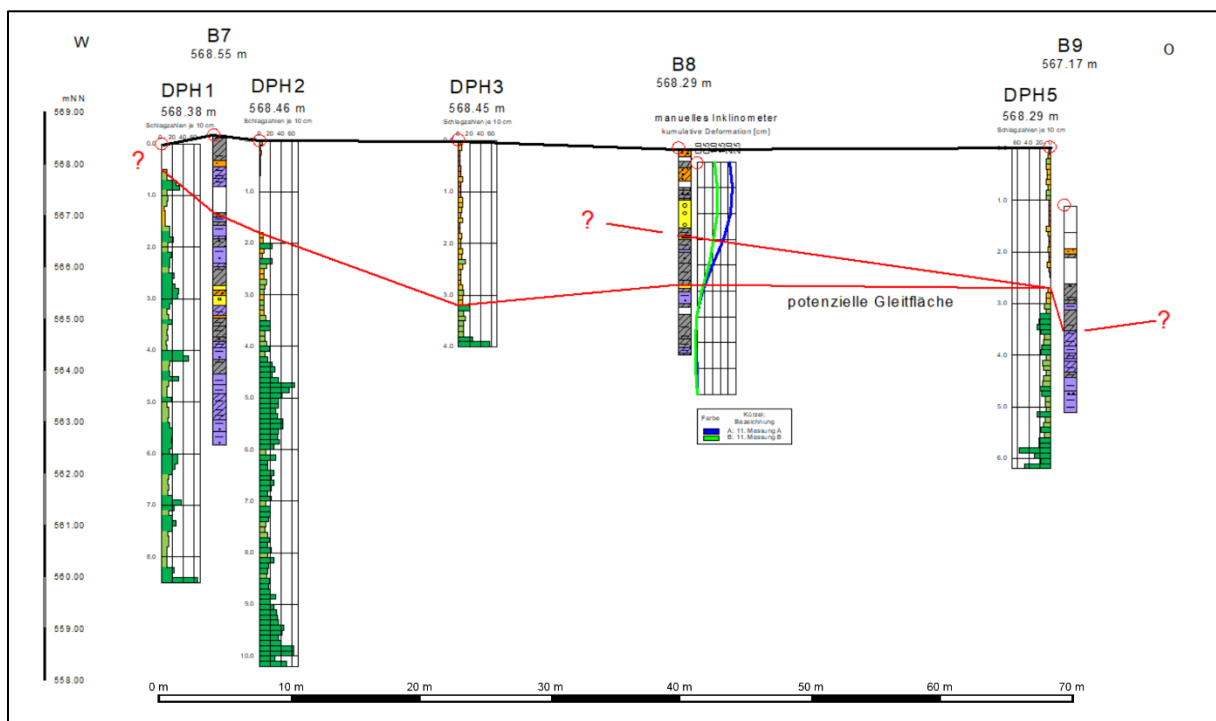


Abbildung 25: West-Ost Schnitt durch den Untergrund der Hofermühle-Rutschung mit den untersuchten direkten Methoden und einer potenziellen Gleitfläche (rote Linie)

Anhand der ausgewerteten Daten der direkten Untergrundverfahren können gewisse Strukturen vermutet werden. Eine mögliche Gleitfläche ist in Abbildung 25 rot eingezeichnet. Diese verläuft bei den Rammkernsondierungen vermutlich entlang abrupten Übergänge von weichem zu festerem Material. Bei den Bohrkernen wurde eine Gleitfläche entlang markanter Materialübergänge als am wahrscheinlichsten erachtet. Diese sind sowohl visuell erkennbar als auch durch die Korngröße und teilweise auch andere im Labor bestimmte Eigenschaften festgelegt. Die Kernverluste in Bohrkern B7 und B9 erschweren hier jedoch die Interpretation.

Aufgrund der bis auf den ersten halben Meter sehr hohen Schlagzahlen von DPH 1 erscheint nur eine sehr oberflächennahe Lage der Gleitfläche möglich. Das Vorhandensein einer solcher ist aufgrund der Lage am Rand des Hanges nicht als sicher einzuschätzen. Der nur wenige Meter östlich befindliche Bohrkern B7 reicht zwar wie DPH 1 sehr tief, ist aber auf den ersten Blick durch keine abrupten Materialübergänge oder eingeschoben erscheinende Schichten gekennzeichnet. Es gibt jedoch einige Stellen mit Kernverlust bzw. von weiter oben eingebrachtem Material, die auf lockeres Material und damit möglicherweise eine Schwachschicht hinweisen. Übergänge von solchen Schichten zu festerem Material finden sich bei 1,5; 2,47; 2,92 und 4 m Tiefe, wobei erstere in Kombination mit den benachbarten Rammkernsondierungen für eine Gleitfläche am wahrscheinlichsten erscheint. Auch die nächstliegenden Laborproben (65-80, 180-190) unterscheiden sich stark in ihren Kennwerten. Die wieder nur wenige Meter östlich liegende Rammkernsondierung DPH 2 weist einen sehr deutlichen Übergang von extrem weichen zu festerem Material in 1,9-2,1 m Tiefe auf. Weitere Übergänge in 2,4; 3,6 und 4,3 m Tiefe sind weniger deutlich, weshalb die Existenz einer Gleitfläche in 2 m Tiefe angenommen wurde. DPH 3 befindet sich mehr als 10 m entfernt. Obwohl hier in nicht so große Tiefe vorgedrungen werden konnte, ist die Festigkeit des Materials bis in über 3 m Tiefe gering. Von den Peaks in 2,4; 3,3 und 3,9 m Tiefe ist jener in 3,3 m als am deutlichsten zu erachten. Dies passt auch gut zur Tendenz der von West nach Ost zunehmenden Tiefe der Gleitfläche der potenziellen Rotationsrutschung. 15-20 m weiter östlich befinden sich in geringem Abstand Bohrkern B8 und das manuelle Inklinometer. Wie erwähnt ist die Festlegung einer eindeutigen Gleitfläche beim manuellen Inklinometer schwer möglich, Versatz hat hier ja in einer Tiefenlage zwischen 1 und 3 m stattgefunden, mit dem Maximum etwa in der Mitte. Deswegen wurden an dieser Stelle mehrere Gleitflächen in Betracht gezogen. Anzeichen dafür sind auch in Bohrkern B8 identifizierbar. Dazu zählt die beschriebene deutliche Horizontgrenze bei 1,67 m, die auf darüber geschobenes Material hindeutet, und ein weiterer

sehr markanter Farb- und Konsistenzübergang bei 2,63 m. Auch in 1,54 m Tiefe gibt es einen deutlichen Materialübergang, möglicherweise jedoch durch von oben eingebrachtes Material. Wie vom benachbarten Inklinometer und der großen Heterogenität des Materials angedeutet, hat bei Bohrkern B8 eventuell Bewegung über einen größeren Tiefenbereich stattgefunden (z.B. 1,54-2,63 m). Andererseits sprechen die deutlichen Materialgrenzen für eine Bewegung entlang mehrerer Gleitflächen. Rammkernsondierung DPH 5 und Bohrkern B9 befinden sich noch einmal knapp 30 m Richtung Osten nahe beieinander. DPH 5 weist bis zu einer Tiefe von etwa 3 m mittlere bis geringe Festigkeiten auf, die dann stark ansteigen. Andere auffällige Abschnitte existieren kaum, eine Gleitfläche ist in diesem Bereich daher am wahrscheinlichsten. Von der Tiefenlage passt dieser Befund zum unteren Ende der Bewegung beim Inklinometer, die Entfernung lässt Vergleiche aber nur schwer zu. Am besten zu DPH 5 passend lässt sich bei B9 eine Gleitfläche in 2,4 m Tiefe annehmen. Der weitreichende Kernverlust oberhalb deutet auf sehr weiches Material hin, währenddessen darunter sehr festes Material dominiert. Ebenso zeigten die oberhalb (190-200) und unterhalb (270-282) entnommenen Laborproben eine sehr unterschiedliche Charakteristik. Weitere auffällige Horizontübergänge sind in 1,82 und 3,21 m Tiefe zu finden. Wie eben gezeigt wurde, kann zwischen den analysierten Daten eine mögliche Gleitfläche und damit eine Untergrenze der Bewegung im Hang interpoliert werden. Wie die obere Grenze des Versatzes vom Inklinometer und B8 in beide Richtungen weiter verläuft, ist jedoch unklar. Denkbar ist ein Zusammenfallen in eine Gleitfläche Richtung DPH 5, wie in Abbildung 25 dargestellt ist.

Die so abgegrenzte potenzielle Gleitfläche erstreckt sich lateral über eine Länge von mindestens 70 m, wobei die genauen Ausmaße anhand der untersuchten Untergrunderkundungen nicht sicher anzugeben sind. Im Westen nahe dem Wiesenrand und dem Einschnitt des Hofermühlbaches liegt die Gleitfläche mit 0,5 m in deutlich geringerer Tiefe und scheint damit eher abgegrenzt. Im zentralen Bereich des oben dargestellten Profils reicht die Bewegung bis in 2,5 bis 3 m Tiefe. Nach Osten zu deutet sich kein Ansteigen der Gleitfläche Richtung Oberfläche an. Die Bewegung kann in diese Richtung somit nicht gut abgegrenzt werden. Zusätzliche Einsichten bringen drei weitere Rammkernsondierungen (LD_DPH1-3), welche im Zuge der Lehrveranstaltung ‚landslide dynamics‘ durchgeführt wurden. Diese sind auch in Anhang D zu finden. Sie liegen in etwa in gleicher Höhe zum dargestellten Profil im Bereich von DPH 5 und noch 10 und 20 m weiter Richtung Osten. Aufgrund dieser Daten ist eine weitere Fortsetzung der Gleitfläche in 2,5 bis 3 m Tiefe als wahrscheinlich zu erachten. Allerdings sind auch dieser

Annahme zuwiderlaufende Interpretationen möglich. An einem Standort nahe DPH5 (LD_DPH3) treten nach einem Peak in 2,3 m weiterhin niedrige Widerstände bis 5,8 m Tiefe auf, der Peak könnte also auch nur einen einzelnen Stein repräsentieren. Eine östliche Begrenzung der Rutschung ist auch mit Hilfe dieser zusätzlichen Messungen nicht ersichtlich. (vgl. BOUTE et al. 2019: 102-109)

Die weitere Fortsetzung dieser Gleitfläche hangabwärts kann aufgrund der Daten des automatischen Inklinometers vermutet werden. Dieses befindet sich etwa 70 m unterhalb von DPH5 und B9. Die mögliche Gleitfläche liegt hier mit etwa 7 m tiefer, muss aber aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten kritisch gesehen werden. Andere Bohrungen oder Rammkernsondierungen in der Nähe können bei der Prüfung dieser Annahme hilfreich sein. Weitere Aufschlüsse bringt daher der Vergleich mit den von KARL (2018: 134) untersuchten direkten Untergrunderkundungsmethoden. In der Bohrung, die wenige Meter oberhalb des automatischen Inklinometers durchgeführt wurde, wurden in etwa 2 m Tiefe Anzeichen für eine Bruchlinie gefunden. An dieser Stelle kam es zu einer deutlichen Veränderung von Farbe, Korngröße und Wassergehalt. Zwei ebenfalls durchgeführte Rammkernsondierungen liegen nahe dieser Bohrung. Eine weist durch in den obersten 3 m sehr geringe Widerstände und darauffolgenden schnellen Anstieg auf die Existenz einer Gleitfläche hin. Bei der zweiten gibt es nicht ganz so geringe Schlagzahlen, ein Übergang zu größerer Festigkeit ist aber erst bei 7 m erreicht. Eine dritte Sondierung noch einmal etwa 50 m weiter unten (nahe dem östlichen Anriss) deutet durch deutliches Ansteigen der Schlagzahlen ebenfalls auf eine Gleitfläche in 3 m Tiefe hin. Oberhalb treten sehr geringe Werte auf. (vgl. ebd.: 75, 93, 134) Demnach wäre eine weitere Erstreckung der Rutschmasse in diese Richtung wahrscheinlich. Die genaue Tiefenlage der Gleitfläche bleibt aber unklar, die verfügbaren Daten sind durch kleinräumige Variabilität gekennzeichnet.

Nach den ‚landslide dynamics‘ Daten ist auch eine weitere Erstreckung der Gleitfläche hangaufwärts als wahrscheinlich zu erachten. Die Rammkernsondierungen und Bohrkerne sind in Anhang D und E ersichtlich. Eine markante Horizontgrenze als mögliche Gleitfläche ist beim Bohrkern DPH4a, der etwa 20 m hangaufwärts nördlich der hier abgebildeten Profillinie liegt, in 1,7 m Tiefe ausgebildet. Die 2 m daneben durchgeführte Rammkernsondierung (LD_DPH4) weist in 2,2 m Tiefe einen Übergang von extrem niedriger Festigkeit zu höheren Widerständen auf. Noch einmal etwa 30 m hangaufwärts nahe der von einer Hecke gebildeten Begrenzung der Wiese erstrecken sich über eine Strecke von 130 m die

Rammkernsondierungen LD_DPH5-10 von Ost nach West, wobei LD_DPH10 sich in etwa oberhalb des Anrisses befindet. Das Material ist auch hier in den oberen Metern durch geringe Festigkeiten gekennzeichnet. Teilweise abrupte Übergänge zu höheren Widerständen und damit mögliche Gleitflächen befinden sich bei den westlichen Sondierungen in etwa 4 m Tiefe, wobei aufgrund mehrerer Peaks bzw. einer Art Stufenbau auch ein System aus mehreren Gleitflächen von 1-4 m Tiefe vorstellbar ist. Die beiden östlichen Sondierungen LD_DPH5 und 6 zeigen durch Festigkeitsübergänge in etwa 1,5 und 2,5 m Tiefe eventuelle Bewegungen an. Eine Verlängerung des potenziellen Rutschkörpers bis zu der von LD_DPH5-10 gebildeten ungefähren Profillinie (und darüber hinaus) ist denkbar. Bei LD_DPH4 noch relativ flachgründig, reicht dieser nahe der nördlichen Wiesenbegrenzung in größere, nach Osten hin abnehmende Tiefe. Die Abgrenzung der Rutschung nach Norden ist mithilfe der verfügbaren Daten aber nicht möglich. Generell ist die Ableitung einer solchen Struktur allein (oder überwiegend) aus Rammkernsondierungen mit großen Unsicherheiten behaftet und müsste mit anderen Methoden validiert werden. (vgl. BOUTE et al. 2019: 102-109)

Welche Vorteile erbringt eine Kombination der genannten Methoden?

Die behandelten Untergrundverfahren lassen sich idealerweise in einer bestimmten Staffelung sehen. Daten der Rammkernsondierung können mit einer Kenntnis der genauen Horizonteigenschaften aus den Bohrkernen besser interpretiert werden. Nach KHODAPARAST et al. (2015: 105) besteht die hauptsächliche Anwendung der Rammkernsondierung in Interpolation und Extrapolation der Daten zwischen den Bohrlöchern. So lässt sich beispielsweise der Festigkeitsübergang bei DPH5 von 2,8-3,1 m eher als Folge einer Hangbewegung interpretieren, wenn der deutliche Unterschied in den Materialeigenschaften bei Bohrkern B9 in 3,21 m Tiefe hinzugezogen wird. Schichten im Bohrkern wiederum, die auf Bewegungen im Hang hindeuten, können mit Erkenntnissen der Inklinometer erweitert werden. So wurde zum Beispiel die Annahme von Bewegung entlang von Gleitflächen, die bei Bohrkern B8 durch auffällige Horizontgrenzen wie bei 1,67 oder 2,63 m aufgestellt wurde, durch die Inklinometermessungen bestärkt. Bei größerer Entfernung der Messstandorte wird ein Schluss jedoch schwieriger und unsicherer. Der mittels Inklinometer vorgefundene Tiefenbereich der Bewegung kann zum Beispiel nicht gut für die entfernteren Bohrkern übernommen werden, weshalb die dort eingezeichnete Gleitfläche in erster Linie mit den benachbarten Rammkernsondierungen abgestimmt wurde. Auf die wichtige Rolle von

Inklinometern in Synergie mit anderen Instrumenten weist auch REFICE et al. (2019: 447) hin. Nur durch Inklinometer kann die Bewegung im Untergrund genau abgegrenzt und mit der Lithologie in Verbindung gebracht werden (vgl. ebd.: 465).

Wie können diese, an einzelnen Standorten ermittelten Erkenntnisse genutzt werden, um ein 3D Untergrundmodell der Rutschung zu erstellen?

Zu dieser Frage muss grundsätzlich gesagt werden, dass eine Ableitung einer dreidimensionalen Struktur aus eindimensionalen Daten aus punktuellen Messungen mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Das ist insbesondere aufgrund der sehr heterogenen Festigkeiten und Materialeigenschaften der Fall, wie sie bei der Hofermühle-Rutschung festgestellt wurden. Anhand der untersuchten Daten lässt sich wie oben beschrieben ein Querschnitt der Rutschung skizzieren. Auch in der Kombination mit anderen, schon ausgewerteten Messungen ist es allerdings kaum möglich, ein dreidimensionales Modell der gravitativen Massenbewegung zu erstellen. Die Dichte der Messungen ist dafür nicht groß genug. Außerdem gibt es in Richtung der Ränder der potenziellen Rutschmasse zu wenige Daten, eine für ein 3D Modell der Rutschung notwendige Abgrenzung ist somit nicht möglich. Eine bessere Abgrenzung an der Oberfläche durch Fernerkundungsdaten könnte auch für die Erstellung eines dreidimensionalen Untergrundmodells große Fortschritte bringen. Eine solche Integration von Fernerkundungsdaten und Bodendaten in ein Modell wurde von REFICE et al. (2019: 466) an der Pianello-Rutschung in Italien erfolgreich angewandt. An der Hofermühle ist eine Abgrenzung der Bewegung an der Oberfläche aber bis jetzt noch nicht möglich (vgl. FILA 2017: 81).

Welche Übereinstimmungen oder Unterschiede gibt es mit dem bestehenden konzeptionellen Modell (SAUSGRUBER 2013a)?

Die erhobenen Daten stehen im Allgemeinen nicht im Widerspruch zum 2013 erstellten Untergrundmodell. Problematisch beim Abgleichen der Messwerte mit dem Modell ist der Umstand, dass die Messwerte entlang einer annähernd horizontalen Profillinie angeordnet sind, während das Modell in erster Linie eine Abfolge von oben nach unten beschreibt. Dementsprechend zeigt die Beilage zum Bericht von SAUSGRUBER (2013) neben einem Grundriss auch ein Profil in Falllinie. Aus diesem Grund kann in dieser Arbeit kein Anspruch bestehen, ein völlig neues Modell aufzustellen, vielmehr wird mit den zusätzlichen Daten eine Ergänzung in einer weiteren Dimension (hangparallel) geliefert. Die Ausmaße der Rutschung können so

möglicherweise besser abgeschätzt werden. Bei DPH 3 schneidet das generalisierte Profil von SAUSGRUBER (2013b) die hier vorgestellten Instrumentierungen.

Die in der Kartenbeilage (SAUSGRUBER 2013b) eingezeichnete initiale Absetzung zeigt nach den untersuchten Untergrunddaten nicht das gesamte laterale Ausmaß der Rutschung an. Es kann von einer Aktivität weiter in Richtung des landwirtschaftlichen Gebäudes ausgegangen werden. Diese weiter reichende Bewegung kann sich jedoch auch erst in der Zwischenzeit entwickelt haben.

Nach den analysierten Untergrunderkundungen liegt die Gleitfläche weniger tief als in SAUSGRUBER (2013b) skizziert. Bei der dort dargestellten Struktur handelt es sich jedoch eher um ein Extremszenario, in dem die Mobilisierung des gesamten verfügbaren Lockermaterials angenommen wird (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 6f). Stellenweise noch bis weit unter das Niveau der Gleitfläche verwittertes Material wird auch durch die Rammkernsondierungen belegt.

H1: Eine Kombination von direkten Untergrunderkundungsmethoden kann das bestehende konzeptionelle Modell (SAUSGRUBER 2013a) der Hofermühle-Rutschung verbessern.

Aufgrund des eben Diskutierten kann die Hypothese bestätigt werden. Die genannten Daten können das Modell ergänzen und damit zu einem besseren Verständnis des Hanges beitragen. Es muss dabei jedoch nicht in seinen Grundzügen verändert werden.

In welchen Bereichen und in welcher Intensität kann über direkte Verfahren (Rammsondierungen, Bohrungen, Inklinometermessungen) auf eine Bewegung der Rutschung geschlossen werden?

Im Bereich der Inklinometer kann direkt auf eine Bewegung geschlossen werden. Sie liegt beim manuellen Inklinometer im Bereich von 2-3 cm und beim automatischen Inklinometer bei 2-3 mm innerhalb eines knappen Jahres. In den Daten von Bohrungen und besonders Rammkernsondierungen lassen sich nur indirekte Anzeichen für eine Bewegung finden. Bei den Bohrungen erschwert der Umstand, dass es sich um gestörte Proben handelt, diesbezüglich die Interpretation. Dazu gehört die Komprimierung des Materials, Kernverlust und das Einbringen von Material von höherliegenden Horizonten. Nichtsdestotrotz lassen sich manche Horizonte als Resultat einer Bewegung entlang einer Gleitfläche interpretieren, insbesondere B8 168-173. Bei diesem deutet der hohe Gehalt organischer Substanz auf das Überfahren einer ehemaligen

Bodenbildung hin. Bei den Rammkernsondierungen ist die geringe Festigkeit des Materials ein zu beachtender Faktor, besonders bei DPH2 und DPH3. Diese Eigenschaft in Kombination mit einem abrupten Wechsel zu höheren Widerständen kann auf Bewegungen hinweisen. Es muss jedoch bemerkt werden, dass sich durch Rammkernsondierungen und Bohrungen keine Aussage über die zeitliche Einordnung der möglichen Bewegung treffen lässt, es kann sich auch um inaktive Bewegungen handeln.

Die erwähnten Laserscans, welche von November 2015 bis November 2016 vom Gegenhang durchgeführt wurden, konnten keine Hinweise auf Oberflächenveränderungen im in dieser Arbeit behandelten Bereich bringen. Da die Genauigkeit im Bereich von wenigen cm liegt, können jedoch Bewegungen in dieser Größenordnung nicht ausgeschlossen werden. (vgl. FILA 2017: 76)

Inwiefern hat sich die Bewegung, wenn feststellbar, im Messzeitraum verändert?

Die im Messzeitraum festgestellte Bewegung war wahrscheinlich eher ungleichmäßig. Vermutlich traten zwei Bewegungsphasen im Dezember 2018 und Ende März 2019 auf. Nach den Daten des automatischen Inklinometers waren diese Bewegungsphasen nicht plötzliche Versätze, sondern über mehrere Tage und Wochen gestreckt. Die zeitliche Auflösung des manuellen Inklinometers lässt Schlüsse in dieser Hinsicht nicht zu. Die anderen Untergrunderkundungsmethoden lassen sich für die Beantwortung dieser Frage leider nicht heranziehen, andere ausgewertete Daten sind für den relevanten Zeitraum noch nicht verfügbar.

H2: Eine Aktivität der Hofermühle-Rutschung kann mittels direkter Untergrunderkundungsmethoden festgestellt und abgegrenzt werden.

Die zweite Hypothese kann teilweise bestätigt werden. Zwar kann eine Aktivität der Hofermühle -Rutschung auf Basis der Inklinometerdaten recht eindeutig festgestellt werden, eine Abgrenzung ist jedoch mittels der analysierten punktuellen Messungen kaum möglich.

8. Schlussfolgerung

Im folgenden Kapitel sollen die eben diskutierten Ergebnisse zusammengefasst und auf die wichtigsten Aussagen und Erkenntnisse daraus eingegangen werden.

Zentrum dieser Arbeit war der Untergrund der Hofermühle-Rutschung, der mittels direkter Methoden untersucht wurde. Feinkörniges Material, das durch seine Mächtigkeit auf tiefgehende Verwitterung hinweist, wurde bei den Untersuchungen vorgefunden. KARL (2018: 134) kam, auch mittels geoelektrischer Methoden, zu ähnlichen Ergebnissen. Demnach existiert eine dicke Bodenschicht von etwa 2 m, die von 10-15 m verwittertem Felsen unterlagert wird (vgl. ebd.). Auch von BOUTE et al. (2019: 102-109) wurde am Standort Hofermühle erst in Tiefen von 3-10 m, in einem Fall erst in 19 m, das Grundgestein angetroffen. Insofern konnten also Einsichten über eine grobe Gliederung und Zusammensetzung des Untergrunds gewonnen bzw. bisherige Erkenntnis bestätigt werden.

Im Besonderen waren in dieser Forschungsarbeit aber Strukturen, die auf gravitative Massenbewegungen hinweisen, von Interesse. Die Analysen der direkten Untergrunderkundungen lassen auf eine Gleitfläche in 2-3 m Tiefe schließen, die sich lateral über einen relativ breiten Bereich des Hanges erstreckt. Die Erstreckung in Falllinie konnte aufgrund der Anordnung der Untersuchungen nicht festgestellt werden. Das automatische Inklinometer weist zumindest auf eine Erstreckung hangabwärts östlich des stufenförmigen wassergesättigten Rutschkörpers hin. Eine sichere Aussage kann hier aufgrund der geringen Versätze des Inklinometers aber nicht getroffen werden. Mit den von KARL (2018: 134) untersuchten direkten Untergrunderkundungsmethoden kann eine Fortsetzung der Gleitfläche in diesem Bereich zwar als wahrscheinlich angesehen werden, Tiefe und Ausdehnung können aufgrund kleinräumiger Variabilität aber nur vage oder gar nicht angegeben werden. Eine Fortsetzung der Gleitfläche nach oben in 2-4 m Tiefe kann mithilfe der ‚landslide dynamics‘-Daten vermutet, aber nicht genau abgegrenzt werden. (vgl. BOUTE et al. 2019: 102-109) Für eine eindeutigere Interpretation fehlen auch andere Methoden der Untergrundexploration (als die verfügbaren Sondierungen) zur Validierung. Insgesamt lassen sich über die Form der Gleitfläche und damit auch über die Art der Bewegung (z.B. Translation oder Rotation) keine sicheren Aussagen treffen. Ob der Bereich des „Initialstadiums“ in Form von (noch nicht abgesetzten) Gleitschollen strukturiert ist, wie sie im darunterliegenden

Rutschkörper vorkommen, kann daher ebenfalls nicht gesagt werden. Des Weiteren folgt daraus, dass auch eine Abschätzung des Volumens noch nicht gut möglich ist.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war die Erfassung der Dynamik der Hofermühle-Rutschung aus denselben Methoden. In dieser Hinsicht konnte jedoch nur eine erste Abschätzung über einen kurzen Zeitraum getroffen werden. Im Untersuchungszeitraum kann die Rutschung als aktiv eingestuft werden, eine Bewegung im mm-cm Bereich wird angenommen. Die Bewegung ist nicht gleichförmig über den Hang verteilt, am Standort über dem Anriss wurden höhere Werte registriert. Für eine genauere Aussage der räumlichen Verteilung wären jedoch weitere Daten von zusätzlichen Inklinometern oder aus der Erfassung der Oberflächenveränderung notwendig. Der Versatz ist auch im Zeitverlauf nicht konstant, die Ursachen für die phasenweise Bewegung können hier jedoch nicht festgemacht werden. Die aufgetretenen Niederschläge und die hydrologischen Verhältnisse im Hang wären diesbezüglich von Interesse, die dafür verfügbaren Daten müssten ausgewertet und interpretiert werden. Höhere Bewegungsraten sind möglich, wenn es zur rückschreitenden Erosion der Rutschmasse und damit zur Mobilisierung des in dieser Arbeit behandelten Hanges kommt (der sich nach SAUSGRUBER 2013b im initialen Stadium befindet). Dies ist jedoch nach der bisherigen Erkenntnis nur schrittweise und über größere Zeiträume zu erwarten (vgl. SAUSGRUBER 2013a: 6f).

9. Ausblick

Im abschließenden Kapitel sollen Möglichkeiten für einen weitergehenden Erkenntnisgewinn zum Prozess der Hofermühle-Rutschung besprochen werden. Daneben stellt sich auch die Frage nach praktischen Implikationen des gesammelten Wissens.

In einem ersten Schritt ohne den Einsatz weiterer Ressourcen kann die kritische Beschau des bisher gesammelten Materials möglicherweise zu neuen Einsichten verhelfen. Andere Personen und fachliche Hintergründe bringen auch andere Sichtweisen auf die gewonnenen Daten und ihre Interpretation. Dazu gehört auch das Aufstellen von (Gegen-) Hypothesen und verschiedenen Varianten des konzeptionellen Modells, um die bestgeeignetsten herauszufiltern.

Um zu einem besseren Verständnis der Hofermühle-Rutschung zu gelangen, könnten in einem weiteren Schritt sämtliche schon vorliegenden Daten analysiert werden. Dabei handelt es sich um Oberflächendaten (Vermessung, Laserscanning und UAV), Untergrunddaten (die weiteren Bohrkerne, die Piezometerdaten) und die meteorologischen Parameter. Diese Möglichkeit ist bereits in Ausführung, viele der Messungen werden zurzeit im Rahmen der Doktorarbeit von Margherita Stumvoll betreut und untersucht.

Bei der Interpretation dieser Messungen wäre es sinnvoll, die schon ausgewerteten Daten zu berücksichtigen und das konzeptionelle Modell zu vervollständigen. Dies ist teilweise sehr schwierig, da die Daten völlig unterschiedliche Formate (z.B. punktförmig, flächenhaft) und Maßstäbe haben und auch unterschiedliche mit der Rutschung zusammenhängende Parameter messen, die sich nicht unbedingt direkt vergleichen lassen (vgl. KARL 2018: 115f).

KHODAPARAST et al. (2015: 110) beschreibt die Wiederholbarkeit von Messungen als wichtigen Parameter am Beispiel von Rammkernsondierungen. Diesem Beispiel folgend könnten an der Hofermühle weitere Sondierungen nahe den bisherigen durchgeführt werden. Es ergibt sich jedoch die Problematik, dass kleinräumige Variabilität (z.B. Steine) zu verschiedenen Ergebnissen auch bei nahe beieinander liegenden Messungen führt. Damit können keine Aussagen zur Genauigkeit der Sondierungen und möglichen Messfehlern getroffen werden.

Der bisherige Beobachtungszeitraum ist noch eher kurz. Weitere Einsichten kann es daher sehr wahrscheinlich auch durch eine Fortsetzung des Monitorings über die nächsten Jahre geben. Inklinometer sind zwar aufwendig in Installation und Betrieb, können aber am

zuverlässigsten Informationen über die Aktivität der Rutschung liefern, gerade, wenn die Bewegung sehr langsam ist. Die Installation weiterer Inklinometer zum Beispiel im Bereich des in dieser Arbeit beschriebenen Profils könnte daher zu einer Vertiefung der Kenntnisse über die Dynamik der Rutschung führen. KARL (2018: 134) vermutet, dass die Wasserverhältnisse im Hang für die Dynamik der Hofermühle-Rutschung eine große Rolle spielen. Insofern wären vielleicht weitere geophysikalische Messungen neben der Auswertung der Piezometerdaten von Interesse. Bis in größere Tiefe reichende Bohrungen könnten ebenfalls in Hinsicht auf den Wassergehalt, aber auch generell zur Kenntnis der Materialzusammensetzung bis zum Grundgestein durchgeführt werden.

Darüber hinaus könnten neue Methoden implementiert werden. Beispiele aus anderen Monitoringkampagnen von gravitativen Massenbewegungen inkludieren die Messung des Porenwasserdrucks, Spannungsmesser oder die Nutzung von Radardaten (vgl. LEUNG et al. 2011: 347) (vgl. MITTAL et al. 2008: 362) (vgl. REFICE et al. 2019: 447). Ob diese am Standort Hofermühle sinnvoll und anwendbar sind, müsste jedoch evaluiert werden.

Welche Forschungsansätze könnten sich nun (neben dem Monitoring) für weiteren Erkenntnisgewinn eignen? Eine Möglichkeit ist die Modellierung der Rutschung. GARCIA LOPEZ-DAVALILO et al. (2014: 400) nutzten zum Beispiel die gewonnenen geotechnischen Parameter für eine physikalisch basierte Modellierung. Es wurde damit überprüft, ob die so errechnete Gleitfläche der im Feld beobachteten entspricht (vgl. ebd.).

Aus dem gesammelten Wissen könnte die Gefährdung für die unterhalb der Hofermühle-Rutschung verlaufende Straße abgeschätzt werden. Dabei sollte das gesamte Einzugsgebiet abgeschätzt werden, auch der Bereich orographisch rechts des Gerinnes, in dem bereits von SAUSGRUBER (2013b) und BOUTE et al. (2019: 74-78) Anzeichen für Bewegungen festgestellt worden sind.

In weiterer Folge ist auch von Interesse, ob praktische Maßnahmen zur Gefährdungsminderung oder zum Stoppen der Bewegung beitragen könnten.

Eine am Standort schon durchgeführte Methode ist das Anlegen von Drainagen. Zur Wirksamkeit müssten Lage und Art genau abgewogen und vor allem im Vergleich zu den bisherigen Drainagierungen auch dokumentiert werden. Dazu wäre es gut, die Wasserverhältnisse im Untergrund der Hofermühle-Rutschung besser zu kennen. Auch eine

Wartung müsste gewährleistet sein, da schadhafte Drainagen das Risiko für Hangbewegungen sogar erhöhen können.

Eine andere Möglichkeit zur Gefährdungsminderung wäre ein Frühwarnsystem für die Straße. Dabei stellt sich die Frage, wie dieses ausgelöst werden könnte. Eine Möglichkeit sind Niederschlagsschwellenwerte. Eine automatische Messstation mit schneller Datenübertragung wäre dafür vorhanden. Wie von CANLI et al. (2018: 104f) angeführt wurde, ergeben sich dabei jedoch einige Schwierigkeiten. Fehlerhafte Daten sind möglich, Vorfeuchte muss berücksichtigt werden und auch andere Faktoren im Hang kontrollieren die Bewegung der Rutschung (vgl. ebd.). Eine hohe Anfälligkeit für Fehlalarme wird jedoch wahrscheinlich nicht geduldet und erhöht überdies die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem berechtigten Alarm die Anweisungen nicht befolgt werden. Nach SIMEONI und MONGIOVI (2007: 665) kann ein Frühwarnsystem nur aufgebaut werden, wenn die Messungen auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden.

Eine weitere Möglichkeit der Gefährdungsminderung, eine Sperrung und Umfahrung der Straße, scheint aufgrund der Funktion als Hauptstraße und der großen Umwege als unrealistisch. Diese Variante ebenso wie ein Tunnel an der betroffenen Stelle, wie z.B. von BHASIN et al. (2002: 367) bei einer gravitativen Massenbewegung in Indien empfohlen, ist für die Hofermühle sehr wahrscheinlich als zu aufwändig im Vergleich zum Gefährdungspotential zu bewerten.

10. Literaturverzeichnis

- AUGNER D. (2011): Laborversuche an Bodenproben - Ermittlung von Bodenkenngößen. – Rostrup .(= 62. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium).
- BELL R., GLADE T., GRANICA K., HEISS G., LEOPOLD P., PETSCHKO H., POMAROLI G., PROSKE H. und SCHWEIGL J. (2013): Landslide susceptibility maps for spatial planning in Lower Austria. – In: MARGOTTINI C., CANUTI P. und SASSA K. (Hrsg.): Landslide Science and Practice. Proceedings of the Second World Landslide Forum 2011. – Rom, 467-472.
- BHASIN R., GRIMSTAD E., LARSEN J.O., DHAWAN A.K., SINGH R., VERMA S.K. und VENKATACHALAM K. (2002): Landslide hazards and mitigation measures at Gangtok, Sikkim Himalaya. – In: Engineering Geology 64, 351-368.
- BOUTE N., GRALL B., JAKOBER D., KALTENHAUSER C., KNAUSEDER P., KNÖBEL A., KONZETT M., LEUCHTMANN V., LINDEMAIR B., LUHN J., NEZHYBA C., PROCHASKA C., SCHRITTER M. und STARK L. (2019): Landslide at Hofermühle, Lower Austria. Course Report Project Module ‚Landslide Dynamics‘. – Wien.
- BFW - BUNDESFORSCHUNGSZENTRUM FÜR WALD (2004): ebod. Digitale Bodenkarte. – Wien, <https://bodenkarte.at/#/center/13.3458,47.7132> (10.07.2020).
- CANLI E., LOIGGE B. und GLADE T. (2018): Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. – In: Natural Hazards 91, 103-127.
- CRUDEN D.M. (1991): A simple definition of a landslide. – In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43, 27-29.
- CRUDEN D.M. und VARNES D.J. (1996): Landslide types and processes. special report. – In: TURNER A.K., SCHUSTER R.L. (Hrsg.): Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation and Research Board Special Report 247. - Washington, D.C. 36–75.
- D’AMATO AVANZI G., GALANTI Y., GIANNECCHINI R., LO PRESTI D. und PUCCHINELLI A. (2013): Estimation of soil properties of shallow landslide source areas by dynamic penetration tests: first outcomes from Northern Tuscany (Italy). – In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72, 609-624.
- DEAN W.J. (1974): Determination of Carbonate and Organic Matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by Loss on Ignition: Comparison with other methods. – In: Journal of Sedimentary Petrology 44 (1), 242-248.
- DIKAU R. und GLADE T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. – In: Geographische Rundschau 54 (1), 38-45.
- ECKELMANN W. (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. – Hannover.
- EIBFELDT F. (2011): Sondierungen und deren Bewertung. Tagungsband BAW-Seminar Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation. - Hamburg.

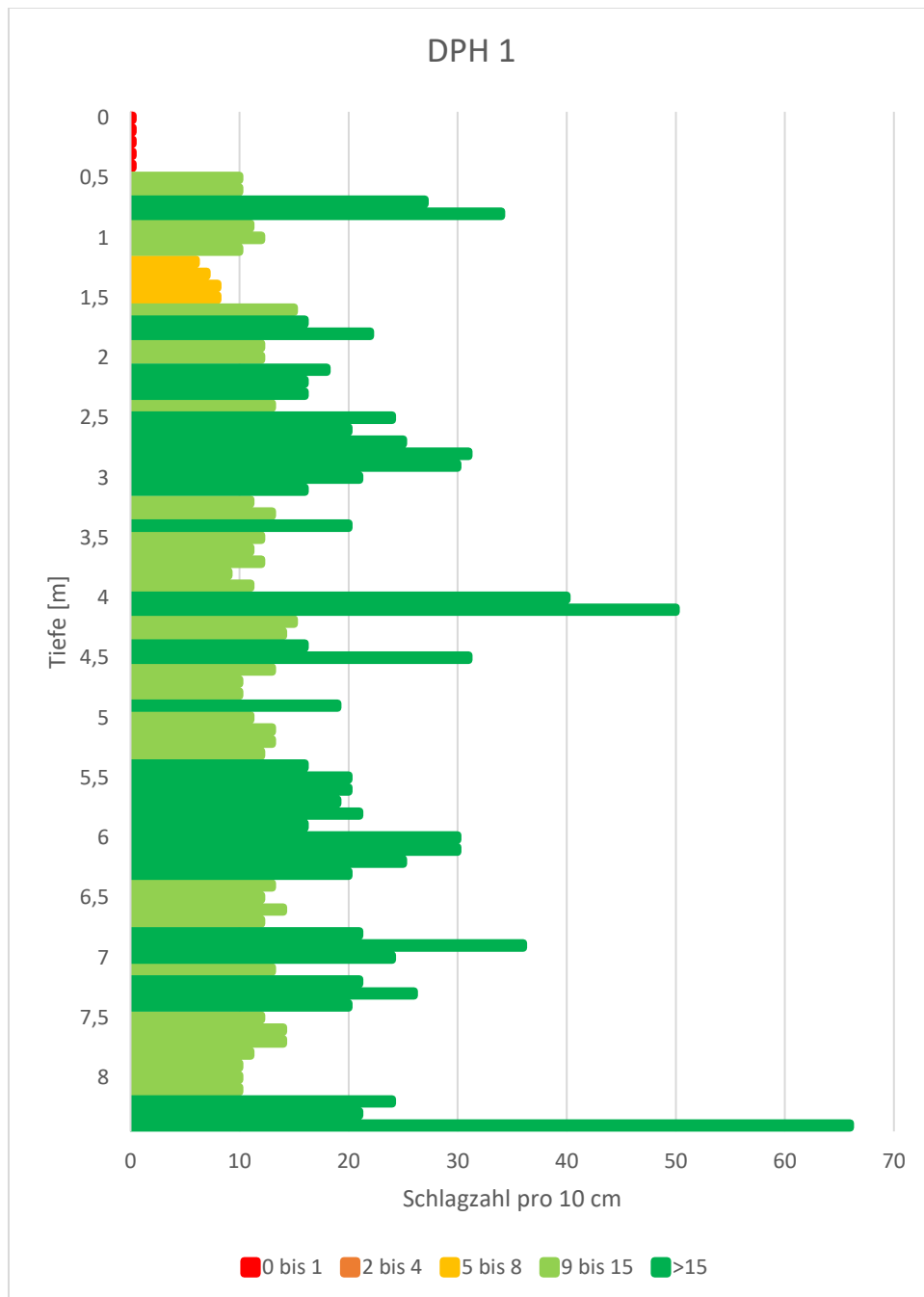
- ENGAGE - Arbeitsgruppe Geomorphologische Systeme und Risikoforschung, Institut für Geographie und Regionalforschung (2020): NoeSLIDE. Monitoring gravitativer Massenbewegungen. – Wien, <https://noeslide.at/> (10.07.2020).
- FILA K. (2017): Einsatz von terrestrischem Laserscanning zur Untersuchung der Hofermühl-Rutschung (NÖ). – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.
- FROESE C.R. und CRUDEN D.M. (2001): Landslides in Weakly-Cemented Lake Sediments, Morkill River, British Columbia. – Alberta.
- FRYDMAN S., TALESNICK M., GEFFEN S. und SHVARZMAN A. (2007): Landslides and residual strength in marl profiles in Israel. – In: Engineering Geology 89, 36-46.
- GARCIA LOPEZ-DAVALLILO J.C., MONOD B., ALVAREZ-FERNANDEZ M.I., HERRERA GARCIA G., DARROZES J., GONZALEZ-NICIEZA C. und OLIVIER M. (2014): Morphology and causes of landslides in Portalet area (Spanish Pyrenees): Probabilistic analysis by means of numerical modelling. – In: Engineering Failure Analysis 36, 390-406.
- HIGHLAND L.M. und BOBROWSKY P. (2008): The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia.
- HUNGR O., LEROUÉIL S. und PICARELLI L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update. – In: Landslides 11, 167-194.
- KARL C. (2018): Delineation of internal landslide structures using Electrical Resistivity Tomography and geotechnical investigations – case study Hofermühle, Lower Austria. – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.
- KAZEEV A. und POSTOEV G. (2017): Landslide investigations in Russia and the former USSR. – In: Natural Hazards 88 (supplement 1), 81-101.
- KHODAPARAST M., RAJABI A.M. und MOHAMMADI M. (2015): The new empirical formula based on dynamic probing test results in fine cohesive soils. – In: International Journal of Civil Engineering 13 (2), 105-113.
- LAND NIEDERÖSTERREICH (2018): Statistisches Handbuch des Landes Niederösterreich. 42. Jahrgang 2018. – St. Pölten. (=Niederösterreichische Schriften 216 – Information).
- Land Niederösterreich (2020): NÖ Atlas. – St.Pölten, [https://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/\(S\(bkumwfnscnpwix53jdakkh0a\)\)/init.aspx?karte=atlas_gst](https://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/(S(bkumwfnscnpwix53jdakkh0a))/init.aspx?karte=atlas_gst) (10.07.2020).
- LEUNG A.K., SUN H.W., MILLIS S.W., PAPPIN J.W., NG C.W.W. und WONG H.N. (2011): Field monitoring of an unsaturated saprolitic hillslope. – In: Canadian Geotechnical Journal 48, 339-353.
- LI Y. und MO P. (2019): A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. – In: Geomorphology 340, 67-83.
- LOTTER M. und HABERLER A. (2013): Geogene Naturgefahren – gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. – In: Berichte der Geologischen Bundesanstalt 100, 6-17.

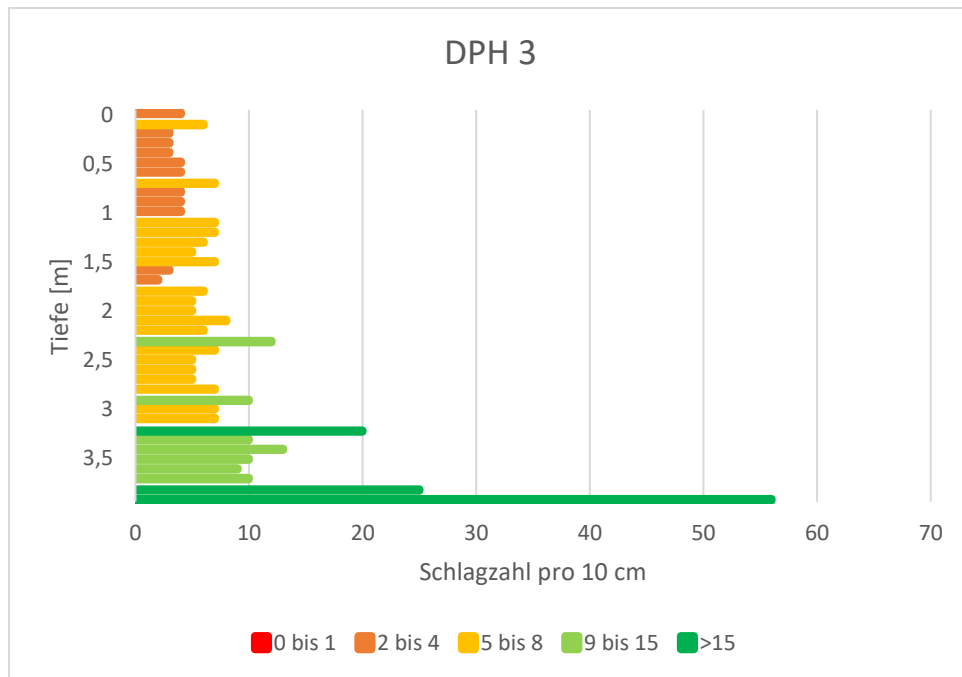
- MARINOS P. und HOEK E. (2001): Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch. – In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 60 (2), 85-92.
- MERITT A.J., CHAMBERS J.E., MURPHY W., WILKINSON P.B., WEST L.J., GUNN D.A., MELDRUM P.I., KIRKHAM M. und DIXON N. (2014): 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. – In: Landslides 11, 537-550.
- MITTAL S.K., SINGH M., KAPUR P., SHARMA B.K. und SHAMSHI M.A. (2008): Design and development of instrumentation network for landslide monitoring and issue an early warning. – In: Journal of Scientific & Industrial Research 67, 361-365.
- NOEL GV (2009): Digital elevation model (DEM) based on airborne laser scan data; raster resolution 1m. ed. Department for Hydrology and Geoinformation. Federal State Government of Lower Austria. - St. Pölten.
- OHLMACHER G.C. (2000): The Relationship Between Geology and Landslide Hazards of Atchison, Kansas, and Vicinity. – In: Current Research in Earth Sciences 244 (1), 1-16.
- PETSCHKO H., BELL R., LEOPOLD P., HEISS G. und GLADE T. (2013): Landslide inventories for reliable susceptibility maps. – In: MARGOTTINI C., CANUTI P. und SASSA K. (Hrsg.): Landslide Science and Practice. Proceedings of the Second World Landslide Forum 2011. – Rom, 281-286.
- PANEK T., HRADECKÝ J., SMOLKOVÁ V., SILHAN K., MINAR J. und ZERNITSKAYA V. (2010): The largest prehistoric landslide in northwestern Slovakia: Chronological constraints of the Kykula long-runout landslide and related dammed lakes. – Geomorphology 120, 233-247.
- REFICE A., SPALLUTO L., BOVENGA F., FIORE A., MICCOLI M.N., MUZZICATO P., NITTI D.O., NUTRICATO R. und PASQUARIELLO G. (2019): Integration of persistent scatterer interferometry and ground data for landslide monitoring: the Pianello landslide (Bovino, Southern Italy). – In: Landslides 16, 447-468.
- REMELLI S., PETRELLA E., CHELLI A., CONTI F.D., FONDON C.L., CELICO F., FRANCESE R. und MENTA C. (2019): Hydrodynamic and soil biodiversity characterization in an active landslide. – In: Water 11 (9), 1-15.
- SALAS-ROMERO S., MALEHMIR A., SNOWBALL I., LOUGHEED B.C. und HELLQVIST M. (2016): Identifying landslide preconditions in Swedish quickclays—insights from integration of surface geophysical, core sample- and downhole property measurements. – In: Landslides 13, 905-923.
- SAUSGRUBER T. (2013a): Hofermühlrutschung. Waidhofen/Ybbs. – Innsbruck.
- SAUSGRUBER T. (2013b): Hofermühle Rutschung. Ingenieurgeologische Kartierung und Profil. – Innsbruck.
- SAUSGRUBER T. (2016): Protokoll zum Lokalausweis Hangprozess Hofermühle / Hofermühlrutschung. – Innsbruck.

- SCHNABEL W. (2002): Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000. Legende und Kurze Erläuterung. – Wien.
- SCHUSTER R., DAURER A., KRENNMAYR H.G., LINNER M., MANDL G.W., PESTAL G. und REITNER J.M. (2013): Rocky Austria. Geologie von Österreich – kurz und bunt. – Wien.
- SCHWENK H. (1992): Massenbewegungen in Niederösterreich 1953 – 1990. Mit einem Beitrag von R. Spendlingwimmer und F. Salzer. – In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt 135 (2), 597-660.
- SIMEONI L. und MONGIOVI L. (2007): Inclinator Monitoring of the Castelrotto landslide in Italy. – In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133 (6), 653-666.
- STARK D.T. und CHOI H. (2008): Slope inclinometers for landslides. – In: Landslides 5 (3), 339-350.
- STEGER S. (2012): Räumliche Analyse und Gefährdungsmodellierung von Rutschungen in der rhenodanubischen Flyschzone (NÖ). – Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.
- STADT WIEN UND ÖSTERREICHISCHE LÄNDER BZW. ÄMTER DER LANDESREGIERUNG (2016): basemap. – Wien, <https://www.basemap.at/> (10.07.2020).
- STRONER M., URBAN R. und BALEK J. (2016): Test of the Precision and Accuracy of the ShapeAccelArray Sensor. – In: Geoinformatics FCE CTU 15(2), 43-58.
- STUMVOLL M. (2019a): Landslide Investigations in Lower Austria. A Geomorphic Perspective. – Presentation held on Jan. 8th, 2019.
- STUMVOLL M. (2019b): mündliche Information vom 16.07.2019.
- STUMVOLL M. (2020): persönliche Mitteilung vom 09.07.2020.
- VARNES D.J. (1978): Chapter 2. Slope Movement Types and Processes. – In: SCHUSTER R.L. und KRIZEK R.J. (Hrsg.): Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. – Washington D.C., 11-33.
- WIEGAND C., KRINGER K., GEITNER C. und RUTZINGER M. (2013): Regolith structure analysis – A contribution to understanding the local occurrence of shallow landslides (Austrian Tyrol). – Geomorphology 183, 5-13.
- ZANGERL C., PRAGER C., BRANDNER R., BRUECKL E., EDER S., FELLIN W., TENTSCHERT E., POSCHER G. und SCHOENLAUB H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. – In: Geo. Alp, 5, 1-51.
- ZAMG - ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (o.J.): Klimamittel. Klimamittelwerte für den Zeitraum 1981–2010 von rund 160 österreichischen Messstationen; <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/daten-download/klimamittel> (08.11.2019).

11. Anhang

11.1. Anhang A: Rammkernsondierungen





11.2. Anhang B: Feldansprache der Bohrkerne

P78	Farbe	
	Munsell	Bemerkungen zur Farbe
0-49	10 YR 4/4	
49-61	10 YR 6/3	dunkelbraun
61-83	10 YR 6/3	hellbraun, ocker, leicht marmoriert
83-100	7,5 YR 5/3	dunkelbraun, graubraun
100-150		
150-158	10 YR 6/2	dunkelbraun
158-167	10 YR 5/2	graubraun, leicht rötlich (158-160)
167-174	7,5 YR 5/2	rötlich-grau
174-196	10 YR 5/1	dunkelgrau, teilweise leicht hellere Einlagerungen (ocker)
196-200	10 YR 5/3	graubraun
200-217	7,5 YR 5/2	ockerbraun
217-248	10 YR 5/1	ockergrau
248-255	5 YR 5/2	dunkelgrau mit rötlich hellgrauem Muster (Detailfoto)
255-292	10 YR 5/2	dunkelgrau, etwas ocker
292-300	10 YR 5/2	graubraun
300-311	10 YR 5/2	graubraun
311-330	10 YR 4/1	grau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
330-349	10 YR 4/1	grau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
349-354	10 YR 5/1	ockergrau, Farbtafel passt gut
354-370	10 YR 6/1	grau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
370-391	10 YR 5/1	grau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
391-400	10 YR 5/1	grau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
400-412	10 YR 5/1	dunkelgrau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
412-435	10 YR 5/1	dunkelgrau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
435-463	10 YR 5/1	dunkelgrau, teilweise ockergrau, Munsell passt gut
463-483	10 YR 6/1	dunkelgrau, Munsell passt gut
483-500	10 YR 4/1	dunkelgrau, etwas heller als Munsell
500-552	10 YR 5/1	dunkelgrau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
552-574	10 YR 5/1	dunkelgrau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (diese ist zu braun)
574-600	10 YR 5/2	ockergrau bis grau, Munsell passt gut
P79		
0-15	10 YR 4/6	
15-25		
25-36	10 YR 5/3	braungrau
36-63	10 YR 5/3	braungrau
63-75		
75-80	10 YR 6/2	braun
80-96	10 YR 6/4	hellbraun (heller als die darüberliegenden Horizonte)
96-100	10 YR 5/2	graubraun
100-154	10 YR 6/4	braungrau
154-167	10 YR 6/3	grau
167-176	10 YR 4/2	dunkelbraun
176-195	10 YR 5/1	grau
195-200	10 YR 6/3	graubraun
200-221	10 YR 5/2	dunkelgrau
221-255	10 YR 5/3	graubraun mit rötlichen Schlieren
255-263	10 YR 6/2	blaugrau (deutlicher Übergang vom darüberliegenden Horizont)
263-270	10 YR 6/4	hellbraun, ocker
270-278	10 YR 6/3	ockerbraun
278-300	10 YR 5/2	graubraun, einige schwarze und rötliche Schlieren, eventuell Bänderung
300-307	10 YR 5/2	ockergrau
307-321		
321-368	10 YR 5/2	grau mit ocker-rötlichen Schlieren
368-385	10 YR 6/2	hellgrau (weniger Schlieren als der vorhergehende Horizont)
385-397	10 YR 5/4	rotgrau
397-400	10 YR 6/2	grau
P84		
0-50		
50-81	10 YR 4/4	braun
81-92	10 YR 4/4	braun
92-100	10 YR 5/3	braun
100-149		
149-182	10 YR 5/4	dunkelbraun, nicht von der Farbtafel wiedergegeben, etwas dunkler
182-189	10 YR 5/3	graubraun
189-200	10 YR 5/4	ocker
200-240	10 YR 5/3	dunkelbraun
240-270	10 YR 5/3	graubraun
270-285	10 YR 6/4	ockergrau
285-294	10 YR 5/3	graubraun
294-300	10 YR 5/3	graubraun (heller als der vorhergehende Horizont)
300-321	10 YR 5/3	graubraun, braun
321-332	10 YR 6/4	ocker
332-357	10 YR 5/2	ocker-dunkelgrau
357-400	10 YR 6/1	dunkelgrau, nicht von der Farbtafel wiedergegeben (etwas dunkler)

P78					Korngröße Feinboden (Fingerprobe)
	Formbarkeit	Zusammenhalt	Textur Kürzel	Textur Text	Bemerkungen zur Korngröße
0-49	4	4	Lt	schwach toniger Lehm	
49-61	5	5	Ts	sandiger Ton	Körner deutlich spürbar
61-83	5	5	TI	lehmiger Ton	wenige Körner fühlbar, glänzende Reibflächen
83-100	5	5	TI	lehmiger Ton	
100-150					
150-158	5	5	Lt	toniger Lehm	
158-167	5	5	Ts	sandiger Ton	sehr viel Sand
167-174	5	5	Lt	toniger Lehm	eher viel Sand
174-196	5	5	Tu	schluffiger Ton	kein Sand spürbar, sehr plastisch
196-200	5	5	TI	lehmiger Ton	wenig Sand spürbar
200-217	3	3	Ls	sandiger Lehm	viel Sand, wenig glänzend, wenig klebrig
217-248	4	4	Ts	sandiger Ton	Sand sehr deutlich, stark glänzend
248-255	5	5	TI	lehmiger Ton	wenig Sand
255-292	5	5	Lt	toniger Lehm	Sand deutlich spürbar, glänzend
292-300	0	0			zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung
300-311	3	2	SI	lehmiger Sand	wenig Feinsubstanz für die Bestimmung
311-330	0	0			zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung
330-349	5	5	TI	lehmiger Ton	bis auf den beprobten, stark verfestigten Brocken zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung
349-354	2	1	Su	schluffiger Sand	wenig Feinsubstanz für die Bestimmung, sehr viel Kies und Sand
354-370	5	5	Lt	toniger Lehm	Sand deutlich spürbar, glänzend, seifige Konsistenz
370-391	5	5	Lt	toniger Lehm	Sand deutlich spürbar, glänzend
391-400	4	4	Lts	sandig toniger Lehm	sehr viel Sand + Kies, glänzt
400-412	5	5	TI	lehmiger Ton	extrem gut formbar (mm-dünne Röllchen), trotzdem Sand spürbar
412-435	5	5	Ts3	mittel sandiger Ton	dünn ausrollbar, bricht bei Ringbildung
435-463	5	5	Lt3	mittel toniger Lehm	
463-483	4	4	Ts4	stark sandiger Ton	auf Bleistiftstärke rollbar, reißt dann, sehr viel Sand
483-500	4	4	Ts3	mittel sandiger Ton	auf halbe Bleistiftstärke rollbar, sehr viel Sand
500-552	5	5	TI	lehmiger Ton	mm-dünn ausrollbar, seifiges Gefühl, Sand deutlich spürbar
552-574	4	4	Ts4	stark sandiger Ton	reißt ca. bei halber Bleistiftstärke
574-600	5	5	Ts3	mittel sandiger Ton	gut, aber nicht perfekt rollbar, klebrig, einiger Sand
P79					
0-15	3	2	IS	mittel lehmiger Sand	
15-25					
25-36	3	3	Ls	Normallehm	
36-63	3	2	IS	lehmiger Sand	viel Sand + Kies
63-75					
75-80	4	5	Lt	toniger Lehm	
80-96	4	3	Lu	schluffiger Lehm	
96-100	4	4	Lt	toniger Lehm	
100-154	1	0			zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung
154-167	4	4	Lt	toniger Lehm	sehr klebrig, Sandkörner deutlich spürbar
167-176	3	3	Ut	toniger Schluff	keine Sandkörner fühlbar (Gegensatz zu den vorhergehenden Horizonten)
176-195	4	4	Lt	toniger Lehm	eventuell auch sandiger Ton (Ts)
195-200	5	5	Ts	sandiger Ton	
200-221	5	4	Lt	sandig toniger Lehm	
221-255	5	5	Lt	toniger Lehm	
255-263	4	4	Lt	toniger Lehm	
263-270	0	0			zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung (mehliges Pulver, Sand in kleinen Mengen)
270-278	5	5	Lt	toniger Lehm	
278-300	5	5	Ts	sandiger Ton	wenig Sand spürbar, glänzend
300-307	5	5	Lt	toniger Lehm	
307-321					
321-368	5	5	Lt	toniger Lehm	Sand sehr deutlich spürbar
368-385	4	4	Lt	schwach toniger Lehm	etwas mehr Sand, daher schlechter rollbar
385-397	5	5	TI	lehmiger Ton	wenig Sand
397-400	4	4	Lt	toniger Lehm	
P84					
0-50					
50-81					zu wenig Feinsubstanz zur Bestimmung
81-92	0	0	Su2	schwach schluffiger Sand	zerbröckelt, lässt sich nicht einmal dick ausrollen oder zu Kugel formen, organische Substanz verfälscht
92-100	4	4	Lt2	schwach toniger Lehm	extrem schwer zu zerkleinern, viel Kies, wenig Feinboden (dieser dann gut bis unter Bleistiftstärke rollbar)
100-149					
149-182	4,5	4,5	Lts	sandig-toniger Lehm	auf halbe Bleistiftstärke rollbar, reißt dann, sehr viel Sand, glänzend
182-189	5	5	Lt3	mittel toniger Lehm	gut ausrollbar, Kies + Sand deutlich spürbar
189-200	5	5	Tu2	schwach schluffiger Ton	gut ausrollbar, wenig Sand spürbar, wenig klebrig, sehr plastisch
200-240	5	5	Lt3	mittel toniger Lehm	gut ausrollbar, etwas klebrig, Sand deutlich spürbar
240-270	5	5	TI	lehmiger Ton	gut ausrollbar, plastisch, wenig Sand spürbar
270-285	5	5	Tu2	schwach schluffiger Ton	mm-dünn ausrollbar, plastisch, kaum klebrig, kein Sand spürbar
285-294	5	5	TI	lehmiger Ton	fast mm-dünn ausrollbar, plastisch, Sand deutlich spürbar
294-300	5	5	Tu2	schwach schluffiger Ton	mm-dünn ausrollbar, plastisch, kaum Sand spürbar
300-321	5	5	TI	lehmiger Ton	bis auf ca. 2 mm ausrollbar, plastisch, wenig Sand spürbar
321-332	5	5	Lt3	mittel toniger Lehm	recht klebrig, nach einiger Zeit gut ausrollbar, wenig Sand spürbar
332-357	5	5	Tu2	schwach schluffiger Ton	bis auf ca. 2 mm ausrollbar, wenig klebrig, plastisch, glänzend
357-400	5	5	Tu2	schwach schluffiger Ton	mm-dünn rollbar, kein Sand spürbar

P78	Bodenskelett		
	Steine	Tiefe der Steine	Karbonatgehalt
0-49	keine sichtbar		
49-61	1 großer Stein (5*3 cm)	57-61	c4-c7
61-83			
83-100	2 große Steine (4*2 cm, 5*1 cm)	84/85, 96-100	c4-c7
100-150			
150-158	keine sichtbar		
158-167	1 mittlerer Stein (2*2 cm)	164	c4-c7
167-174	keine sichtbar		
174-196	kleinere Steine	179, 184, 192	c4-c7 (179)
196-200	1 großer Stein (4*3 cm)	198-200	c4-c7
200-217	extrem viele kleine Steine verfälschen Fingerprobe		
217-248	extrem viele große + kleine Steine (6*4 cm, 5*3 cm, 4*3 cm (kristalline Struktur))	216-222, 231-236, 243-246	c4-c7
248-255	keine sichtbar		
255-292	einige größere (3*2 cm, 5*4 cm, 3*3 cm, 3*3 cm) + kleinere Steine	260, 269-274, 276-279, 286-288	c4-c7 (269, 286)
292-300	extrem viele große (4*4 cm, 3*3 cm) + kleine Steine	294-296, 297-299	c4-c7 (294)
300-311	viele kleine + mittlere Steine		
311-330	viele große (4*4*3 cm, 3*3*2 cm, 3*3*2 cm, 4*3*1 cm) + kleinere Steine	311-315, 317-320, 322-326, 326-328	c4-c7 (311, 326)
330-349	viele kleine, einige mittlere + große (2*4*1 cm, 2*1 cm) Steine	331-333, 345	c4-c7 (345)
349-354	einige kleine und mittlere Steine		
354-370	Stein (5*3*2 cm)	360-364	c4-c7
370-391	viele Steine verschiedener Größe (4*3*3 cm)	384-387	c4-c7
391-400	viele kleine + mittlere Steine		
400-412	kaum Steine		
412-435	einige kleine + größere Steine (2*2 cm, 5*2*2 cm)	420, 430-435	c4-c7 (430)
435-463	einige kleinere, wenige größere Steine (2*2*2 cm, 3*1 cm)	455, 459	c4-c7 (459)
463-483	viele kleine, ein paar größere Steine (2*1 cm, 3*2 cm)	271, 277/78	c4-c7 (277)
483-500	viele Steine (3*2 cm, 6*4*5 cm, 3*3*3 cm, 3*1 cm)	483-485, 487-493, 494-495, 498-500	c4-c7 (483)
500-552	einige mittlere + größere Steine (3*1 cm, 3*1 cm, 4*3*3 cm, 3*3*3 cm)	513, 524, 537-541, 543-546	c4-c7 (513, 546)
552-574	einige kleine + mittlere Steine (3*3*2 cm, 4*3*2 cm)	551-553, 560-563	c4-c7 (560)
574-600	viele kleine + mittlere Steine (4*3*1 cm, 3*2*1 cm)	494-496, 497-500	c4-c7 (497)
P79			
0-15	keine sichtbar		
15-25			
25-36	keine sichtbar		
36-63	einige mittlere Steine	42	c0
63-75			
75-80	keine sichtbar		
80-96	keine sichtbar		
96-100	keine sichtbar		
100-154	viele Steine (2*3 cm)	153	c4-c7
154-167	keine sichtbar		
167-176	keine sichtbar		
176-195			
195-200	einige Steine		
200-221	keine sichtbar		
221-255	keine sichtbar		
255-263	einige kleine Steine		
263-270	fast ausschließlich große (bis 4*2 cm) + mittlere Steine		c4-c7
270-278	keine sichtbar		
278-300	4 größere Steine (ca. 2 cm)	280/81, 283/84, 289/90, 298/99	c4-c7 (280, 298)
300-307	keine sichtbar		
307-321			
321-368	ein großer Stein	338	c4-c7
368-385	2 große Steine	372, 377	c4,c7 (372)
385-397	1 großer Stein	387	
397-400	sehr viele Steine		c0
P84			
0-50			
50-81	keine sichtbar		
81-92	keine sichtbar		
92-100	viele kleinere Steine? (zerbröckeln leicht unter Hammer, ockerfarben)		
100-149			
149-182	viele kleine, ein paar mittlere und große (2*2*1 cm, 3*1*1 cm)	162-164, 174/75	c4-c7 (162)
182-189	1 großer Stein (5*4*4 cm), darunter kleinere Steinplättchen und Feinmaterial	182-186	
189-200	Stein 3*2*1 cm	196-199	
200-240	ein paar größere Steine (5*3*3 cm, 4*2*1 cm, 5*4*3 cm)	205-210, 218-222, 235-240	c4-c7 (218)
240-270	einige große Steine (2*4*2 cm, 3*2*3 cm, 5*3*3 cm, 4*2*1 cm, 3*2*1 cm)	243-245, 246-248, 257-261, 261-263, 264-267	c4-c7 (246, 257)
270-285	keine sichtbar		
285-294	einige kleine + mittlere Steine, 1 großer (3*4*1 cm) mit auffälligem weißen kristallinen Streifen	289-292	c4-c7
294-300	2 Steinplättchen (3*3*0,5 cm, 2*1,5*0,5 cm)	294/95, 299/300	c4-c7 (294)
300-321	einige Steine (3*3*2 cm, 2*2*1 cm)	314-317, 319-321	c4-c7 (319)
321-332	keine sichtbar		
332-357	einige kleinere, plättchenförmige Steine, 2 große Steine (5*3*1 cm, 3*2*1 cm)	347-352, 354-356	c4-c7
357-400	einige Steine verschiedener Größe (3*1,5*1 cm, 4*3*2 cm: kristallin, 2*2*1 cm)	360-363, 377-381, 399-400	c4-c7 (377)

P78	Karbonatgehalt		
	Kürzel	Bezeichnung	Bemerkungen zum Karbonatgehalt
0-49	c0	karbonatfrei	
49-61	c0	karbonatfrei	
61-83	c0	karbonatfrei	
83-100	c0	karbonatfrei	
100-150			
150-158			
158-167	c3,2	karbonathaltig	
167-174	c3,3	stark karbonathaltig	
174-196	c3,3	stark karbonathaltig	
196-200	c4-c7	sehr karbonatreich	
200-217	c0	karbonatfrei	
217-248	c3,2	karbonathaltig	
248-255	c3,1	schwach karbonathaltig	
255-292	c3,1	schwach karbonathaltig	
292-300			
300-311	c4-c7	sehr karbonatreich	
311-330			
330-349			
349-354	c4-c7	sehr karbonatreich	
354-370	c3,2	karbonathaltig	
370-391	c3,2	karbonathaltig	
391-400	c4-c7	sehr karbonatreich	
400-412	c3,2	karbonathaltig	
412-435	c3,1	schwach karbonathaltig	
435-463	c4-c7	sehr karbonatreich	
463-483	c4-c7	sehr karbonatreich	
483-500	c3,1	schwach karbonathaltig	
500-552	c3,1	schwach karbonathaltig	
552-574	c3,1	schwach karbonathaltig	
574-600	c3,1	schwach karbonathaltig	
P79			
0-15	c0	karbonatfrei	schäumt nicht
15-25			
25-36	c3,1	schwach karbonathaltig	leichte, aber deutlich sichtbare Bläschen
36-63	c2	karbonatarm	schwaches Brausen, kaum sichtbar
63-75			
75-80	c2	karbonatarm	schwache Bläschen
80-96	c0	karbonatfrei	
96-100	c1	sehr karbonatarm	hörbar
100-154	c0	karbonatfrei	kleines Steinchen schäumt nicht
154-167	c2	karbonatarm	schwach sichtbar
167-176	c0	karbonatfrei	
176-195	c2	karbonatarm	
195-200	c0	karbonatfrei	
200-221	c2	karbonatarm	
221-255	c0	karbonatfrei	
255-263	c2	karbonatarm	
263-270	c4-c7	sehr karbonatreich	extrem starkes Aufschäumen
270-278	c0	karbonatfrei	
278-300	c2	karbonatarm	
300-307	c3,2	karbonathaltig	mittel aufbrausend
307-321			
321-368	c0	karbonatfrei	
368-385	c0	karbonatfrei	
385-397	c3,2	karbonathaltig	
397-400	c4-c7	sehr karbonatreich	
P84			
0-50			
50-81	c0	karbonatfrei	
81-92	c0	karbonatfrei	
92-100	c0	karbonatfrei	
100-149			
149-182	c3,3	stark karbonathaltig	
182-189	c4-c7	sehr karbonatreich	
189-200	c3,3	stark karbonathaltig	
200-240	c3,1	schwach karbonathaltig	
240-270	c2	karbonatarm	
270-285	c1	sehr karbonatarm	
285-294	c3,3	stark karbonathaltig	
294-300	c3,3	stark karbonathaltig	
300-321	c3,3	stark karbonathaltig	
321-332	c3,3	stark karbonathaltig	
332-357	c3,3	stark karbonathaltig	
357-400	c3,2	karbonathaltig	

P78		zusätzliche haptische Parameter	
	Konsistenz	Feuchte	organische Substanz
0-49			wenig, A-Horizont daher großteils verloren
49-61	feste Masse	ganz leicht feucht	
61-83	sehr feste Masse	schmierig	
83-100	feste, wenig schmierige Masse		
100-150			
150-158	bröckelig locker	trocken	
158-167	feste Masse	relativ trocken	
167-174	feste Masse	nur wenig feucht	
174-196	feste Masse	schmierig, leicht feucht	
196-200	feste Masse	relativ trocken, wenig schmierig	
200-217	bröckelig	trocken	deutlich sichtbar
217-248	bröckelig, kein Zusammenhalt	trocken	
248-255	kompakt	schmierig, leicht feucht	
255-292	kompakt	wenig schmierig, wenig feucht	
292-300	sehr locker	trocken	
300-311	locker	leicht feucht	
311-330	sehr locker	trocken	
330-349	eher locker	leicht feucht	
349-354	kompakt, sehr fest	relativ trocken und wenig schmierig	
354-370	kompakt, extrem fest und spröde, löst sich plättchenweise ab	relativ trocken und wenig schmierig	
370-391	Wechsel aus kompakten und lockeren Material (weniger kompakt als vorhergehender Horizont)	leicht feucht	
391-400	Wechsel aus kompakten und lockeren Material, undeutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont		
400-412	relativ weiche Masse	schmierig, sehr feucht	
412-435	relativ weich (leicht zu entnehmen)	sehr feucht	
435-463		sehr feucht	
463-483	sehr kompakt, glatte Schnittfläche	leicht feucht-feucht	
483-500	weniger kompakt	Feucht	
500-552	kompakt	schmierig, leicht feucht, ab ca. 530 feucht	
552-574	weich	sehr feucht	
574-600	sehr weich + plastisch	sehr feucht	
P79			
0-15	krümelig, locker	etwas feucht	deutlich, feine Wurzeln sichtbar
15-25			
25-36	sehr kompakt und fest	etwas feucht	etwas, noch einzelne kleine Wurzeln sichtbar
36-63	sehr kompakt und fest	trocken	
63-75			
75-80	kompakt, etwas weniger fest als die darüberliegenden Horizonte	leicht feucht	
80-96	kompakt	leicht feucht	
96-100	kompakt	leicht feucht	
100-154		sehr trocken	
154-167	sehr plastisch	leicht feucht	
167-176	krümelig, locker	leicht feucht, weniger schmierig als der vorhergehende Horizont	
176-195	plastisch, weniger als 154-167	leicht feucht, weniger als 154-167	
195-200			
200-221	plastisch, fest	feucht	
221-255	sehr fest	leicht feucht	deutlich (Annahme: von oben hineingefallen)
255-263	kompakt		
263-270	locker	trocken	
270-278	sehr fest	leicht feucht, schmierig	
278-300	kompakt	schmierig	
300-307	fest, plastisch		
307-321			
321-368	sehr kompakt	schmierig	
368-385	sehr kompakt	schmierig	
385-397	sehr kompakt	schmierig	
397-400		leicht feucht	
P84			
0-50			
50-81	locker	feucht	sehr deutlich, kaum zersetzte Bündel an Halmen dominieren Horizont
81-92	krümelig, locker	trocken	deutlich, feuchter Wurzelfilz, Halme
92-100	lockere Bruchstücke, diese sehr hart	trocken	feine Wurzeln sichtbar
100-149			
149-182	krümelig, locker		wenig sichtbar
182-189		leicht feucht	
189-200	kompakt	ganz leicht feucht	
200-240	bröckelig, locker	trocken - leicht feucht	sichtbar (200-206)
240-270	feste Masse	leicht feucht	
270-285	sehr kompakt	feucht, schmierig	
285-294	kompakt	leicht feucht	
294-300	kompakt	leicht feucht	
300-321	lockere Bruchstücke, diese sehr hart	leicht feucht	feine Wurzeln sichtbar
321-332	kompakt	leicht feucht	
332-357	kompakt, teilweise sehr hart	leicht feucht	
357-400	sehr fest	leicht feucht, ganz unten trocken	

P78	Probenparameter		
	Tiefe der Probe	Probe fürs Labor	Gewicht Laborprobe
0-49	20-30		
49-61	55		
61-83	70	67-80	316
83-100	90		
100-150			
150-158	154		
158-167	162		
167-174	170		
174-196	190	178-190	368
196-200	199		
200-217	210		
217-248	240		
248-255	254	247-258	308
255-292	278		
292-300	299		
300-311	307		
311-330	323		
330-349	340	335-345	365
349-354	352		
354-370	356		
370-391	380		
391-400			
400-412	407		
412-435	425		
435-463	450	438-457	351
463-483	470		
483-500	494		
500-552	507	505-515	358
552-574	565		
574-600	585	575-585	270
P79			
0-15	5		
15-25			
25-36	30		
36-63	53	52-65	333
63-75			
75-80	76		
80-96	87		
96-100			
100-154	145		
154-167	160		
167-176		168-173	72
176-195	185	180-190	300
195-200	197		
200-221	202		
221-255	234		
255-263	260		
263-270	274		
270-278	274		
278-300	293	285-295	300
300-307			
307-321			
321-368	333		
368-385	375	375-385	342
385-397	390		
397-400			
P84			
0-50			
50-81	60		
81-92	87		
92-100	97		
100-149			
149-182	170		
182-189	188		
189-200	195	190-200	212
200-240	203		
240-270			
270-285	275	270-282	289
285-294	288		
294-300	298		
300-321	310		
321-332	325	322-332	290
332-357	346		
357-400	390	380-391	345

P78	Bemerkungen zur Gesamtsituation
0-49	Kernverlust bzw. wenige trocken zusammengebackene Körner (ursprüngliche Lage nicht mehr feststellbar)
49-61	
61-83	
83-100	nicht sehr deutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont
100-150	Kernverlust
150-158	kleinere + größere Stücke aus stark verfestigtem Bodenmaterial (bis 3 cm), Annahme: von oben hingefallen, nicht ursprünglicher Ort
158-167	
167-174	undeutliche Übergänge zu den Nachbarhorizonten
174-196	
196-200	
200-217	Annahme: Horizont von oben eingebracht (abschaben, rieseln) aufgrund Konsistenz, Organik, eigentlicher Horizont Kernverlust oder nach unten kompaktiert
217-248	
248-255	sehr markanter Übergang vom vorhergehenden Horizont
255-292	teilweise stärker aufgelockert und bröckelig (270-280)
292-300	markanter Übergang vom vorhergehenden Horizont
300-311	
311-330	wenn nass, Steine dunkelgrau mit auffällig weißer Bänderung
330-349	Felsstruktur noch teilweise erkennbar, "Stein" bei 340 ist sehr festgebackenes Feinmaterial (im restlichen Horizont anders, z.B. 335 F=0, B=0)
349-354	kleinräumig heterogene Textur, visuell kein markanter Übergang
354-370	eine Inlinerhälfte sehr fest, andere deutlich lockerer, mehr Steine
370-391	Annahme: aufgelockert durchs Aufschneiden
391-400	
400-412	Kernverlust 80-90 %, eine Seite schon eingetrocknet (am Foto heller, sehr fest), markanter Übergang vom vorhergehenden Horizont
412-435	nur bis max. 50 % des Materials vorhanden, genoppte, wellige, zergliederte Oberfläche
435-463	Material nur teilweise, gegen Ende vollständig vorhanden, genoppte, strukturierte Oberfläche, gegen Ende Übergang zu glatter
463-483	
483-500	
500-552	bei 547 10 YR 6/1, nicht ganz so dünn rollbar, weniger Sand
552-574	strukturierte Oberfläche
574-600	
P79	
0-15	A-Horizont relativ gut erhalten
15-25	Kernverlust, einzelne Bruchstücke (ähnlich dem darunterliegenden Horizont), Annahme: Kompaktion des darunterliegenden Materials
25-36	
36-63	ab 47 cm bis zum Ende marmoriert mit dunklen Flecken
63-75	Kernverlust, einzelne Bruchstücke (ähnlich dem darunterliegenden Horizont)
75-80	
80-96	leicht marmoriert mit dunklen und ockerfarbenen Flecken
96-100	
100-154	größtenteils Kernverlust, am Anfang (-105) und am Ende (ab 145) Material vorhanden (marmoriert), Farbe mit 36-63 vergleichbar (Annahme: heruntergefallen, Stauchung des Darunterliegenden)
154-167	leicht gefleckt
167-176	sehr deutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont, zum darauffolgenden allmählich auslaufend
176-195	sehr deutlicher rötlicher Streifen ähnlicher Konsistenz von 192-195
195-200	
200-221	Kernverlust, einzelne Bruchstücke, setzt sich im darauffolgenden Horizont mit ähnlichem Material fort (Annahme: Kompression darunter), in der Mitte teilweise Hohlraum mit welliger Oberfläche (Annahme: Verwürgung), abschnittsweise mit krümeligem, braunem, lockerem Material gefüllt (nur hier organische Substanz sichtbar, Annahme: von einem höheren Horizont hineingefallen oder gedrückt)
221-255	in der Mitte kein Hohlraum mehr
255-263	sehr deutlicher Übergang zu den angrenzenden Horizonten, teilweise glitzernde Bruchflächen, setzt sich entlang einer Inlinerwand noch ca. 5 cm fort
263-270	
270-278	
278-300	Ast (Durchmesser 0,5 cm) bei 290 (Annahme: entweder bei der Bohrung eingebracht oder durch Rutschungsaktivität)
300-307	
307-321	Kernverlust
321-368	
368-385	undeutliche Abgrenzung zum vorhergehenden Horizont, ähnliche Konsistenz, Steine mit kristalliner Bruchfläche
385-397	undeutliche Abgrenzung zum vorhergehenden Horizont, ähnliche Konsistenz, Farbe anders
397-400	
P84	
0-50	Kernverlust
50-81	größtenteils Kernverlust (90-95 %), organische Substanz zusammen mit wenig krümeligen schwarzen Material bei 50-60 und 75-80
81-92	großer Anteil organischer Substanz (Annahme: vom Oberboden hierher gerutscht, eigentliches Material verloren/kompaktiert)
92-100	festgebackene Bruchstücke verschiedener Größe (bis 4*3*3 cm), darin Steine, Wurzeln und feine Bodensubstanz (Annahme: nicht mehr am ursprünglichen Platz)
100-149	Kernverlust (Annahme: sehr lockerer Untergrund)
149-182	nur zu ca. 10 % gefüllt, steigt von 165 bis 180 auf ca. 50 % (eine Hälfte bis 175 ganz leer) (Annahme: ortsfremder Horizont, aus dem Oberboden stammend, eigentlicher Horizont nach unten kompaktiert oder verloren)
182-189	
189-200	eine Hälfte kompakt, andere in größere Brocken zerbrochen
200-240	größtenteils Kernverlust, 200-206 und 228-240 loses Material (Annahme: ortsfremd, aufgrund lockerem Zustand und organischer Substanz wahrscheinlich hineingefallen und abgeschabt)
240-270	
270-285	glatte Schnittfläche
285-294	undeutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont
294-300	undeutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont
300-321	bis zu 3 cm große und viele kleinere Brocken (teilweise stark verfestigt) (Annahme: aufgrund Organik, Struktur von weiter oben eingebracht)
321-332	sehr deutlicher Übergang vom vorhergehenden Horizont, krümelige, strukturierte Schnittfläche
332-357	Übergang von ocker zu dunkelgrau mit mehrmaligem Wechsel, in grauen Abschnitten deutlich härter und schmieriger, glatte Schnittfläche
357-400	ziemlich homogene dunkelgrau-kompakte Masse, sehr glatte Schnittfläche, ganz am Ende trocken spröde mit Felsbruchstücken

11.3. Anhang C: Laborergebnisse

Laborproben	Trockenmasse [%]							
	Kies	Grobsand	Mittelsand	Feinsand	Grobschluff	Mittelschluff	Feinschluff	Ton
P78 65-80	30,48	2,66	1,66	2,56	9,46	16,77	11,56	24,85
P78 180-190	6,1	3,08	1,58	2,18	12,13	22,99	25,03	26,91
P78 247-255	11,1	3,14	1,72	2	13,27	24,76	17,31	26,69
P78 335-345	54,32	4,38	1,72	1,9	10,65	10,71	5,91	10,40
P78 438-457	50,86	6,8	2,98	2,54	9,53	10,49	4,44	12,35
P78 505-515	59,48	5,36	1,5	1,32	9,68	9,17	4,49	9,00
P78 575-585	36,22	8,28	5,34	4,86	10,85	11,27	8,79	14,39
P79 52-65	5,68	7,06	2,64	2,56	12,16	16,11	11,87	41,92
P79 168-173	0,96	0,57	3,68	7,50	10,42	23,32	18,23	26,80
P79 180-190	10,54	3,38	2,78	6,66	12,55	17,58	15,29	31,22
P79 285-295	9,44	4,18	4,5	3,02	13,33	17,70	14,68	33,16
P79 375-385	5,86	4,68	5,36	3,58	9,43	17,85	17,23	36,01
P84 190-200	43,28	1,56	1,42	4,24	10,83	11,15	8,51	19,02
P84 270-282	2,42	0,92	1,36	1,02	15,90	27,17	17,84	33,37
P84 322-337	14,66	4,24	3,3	5,06	18,96	18,71	12,17	22,91
P84 380-392	57,24	0,78	0,58	1,02	3,98	9,79	8,55	18,06

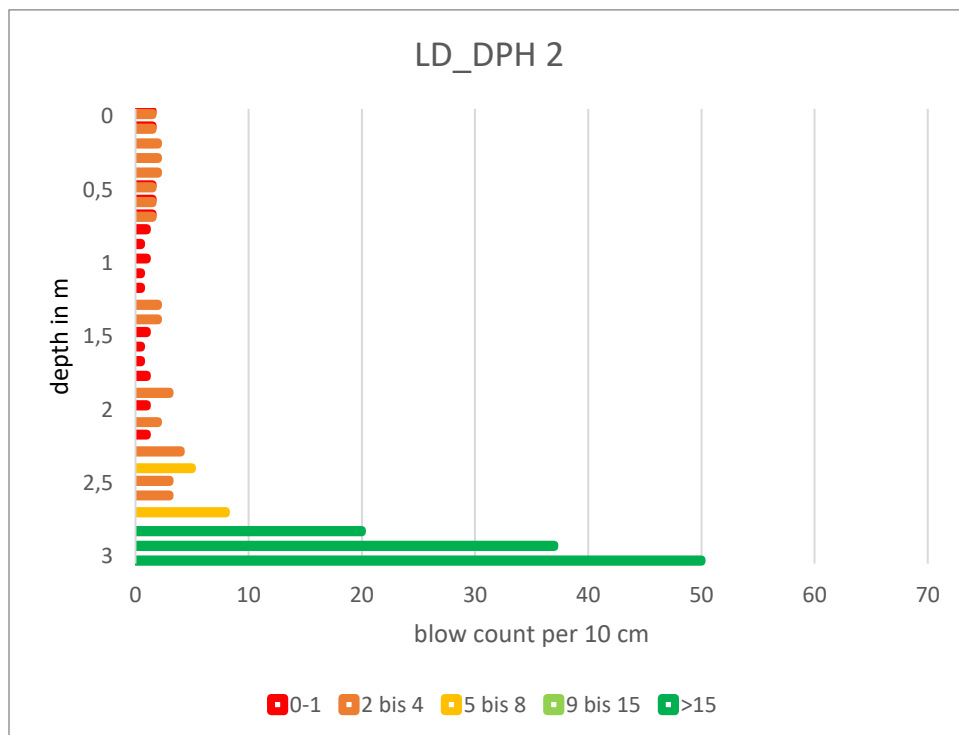
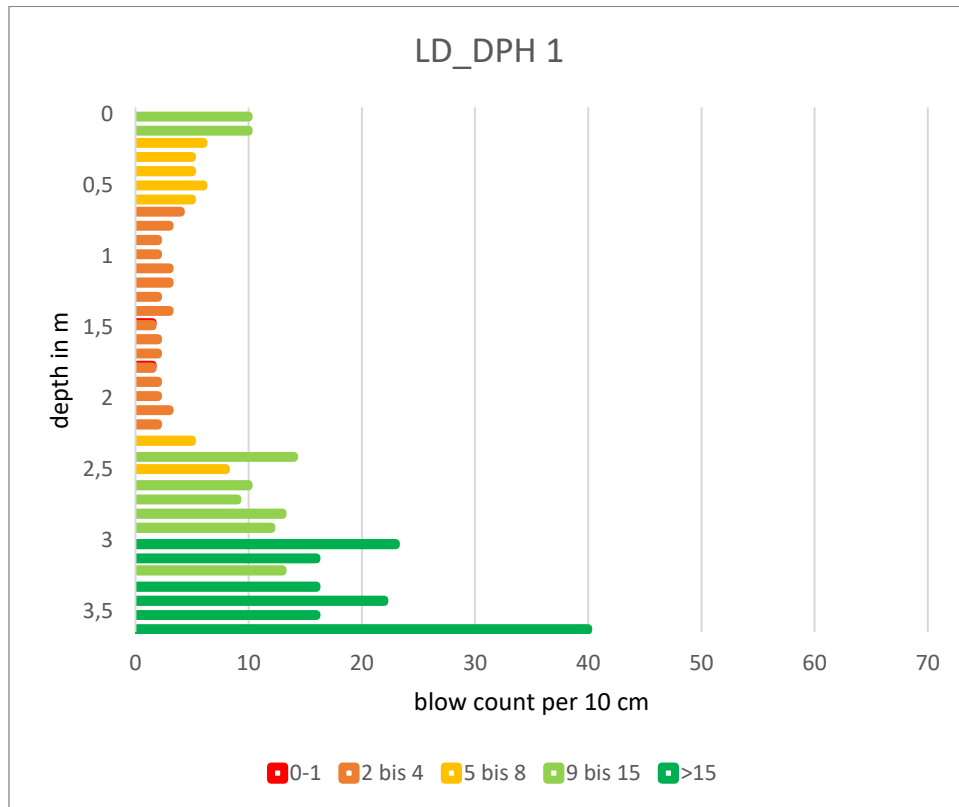
Laborproben	Trockenmasse [%]			Korngröße (nach österreichischem Texturdreieck)	
	Sand	Schluff	Ton	Abkürzung	Bezeichnung
P78 65-80	8,41	55,25	36,34	uL	schluffiger Lehm
P78 180-190	7,09	64,19	28,72	uL	schluffiger Lehm
P78 247-255	6,79	62,88	30,33	uL	schluffiger Lehm
P78 335-345	34,82	47,19	17,99	sL	sandiger Lehm
P78 438-457	29,57	46,80	23,62	sL	sandiger Lehm
P78 505-515	30,48	30,25	39,27	L	Lehm
P78 575-585	22,30	53,01	24,69	sL	sandiger Lehm
P79 52-65	13,31	42,41	44,28	IT	lehmiger Ton
P79 168-173	8,70	60,24	31,06	uL	schluffiger Lehm
P79 180-190	15,28	50,21	34,51	L	Lehm
P79 285-295	12,65	50,62	36,72	L	Lehm
P79 375-385	6,13	51,89	41,98	IT	lehmiger Ton
P84 190-200	16,17	51,62	32,21	L	Lehm
P84 270-282	5,21	61,24	33,55	uL	schluffiger Lehm
P84 322-337	11,83	60,40	27,77	uL	schluffiger Lehm
P84 380-392	2,90	39,24	31,76	L	Lehm

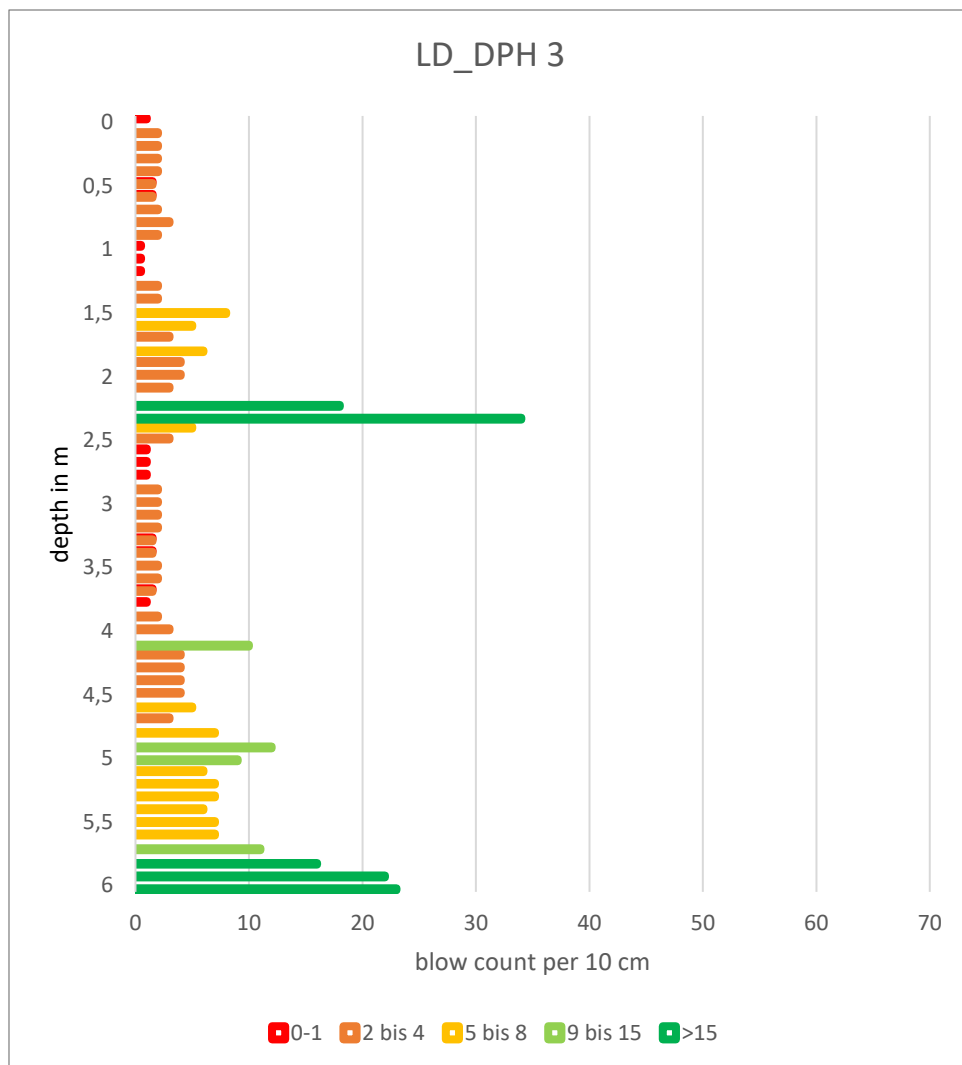
Laborproben	Glühverlust in %
P78 65-80	5,06
P78 180-190	4,73
P78 247-255	3,57
P78 335-345	3,21
P78 438-457	3,49
P78 505-515	3,38
P78 575-585	4,42
P79 52-65	4,96
P79 168-173	14,74
P79 180-190	5,24
P79 285-295	4,88
P79 375-385	4,81
P84 190-200	4,14
P84 270-282	4,89
P84 322-337	3,53
P84 380-392	3,82

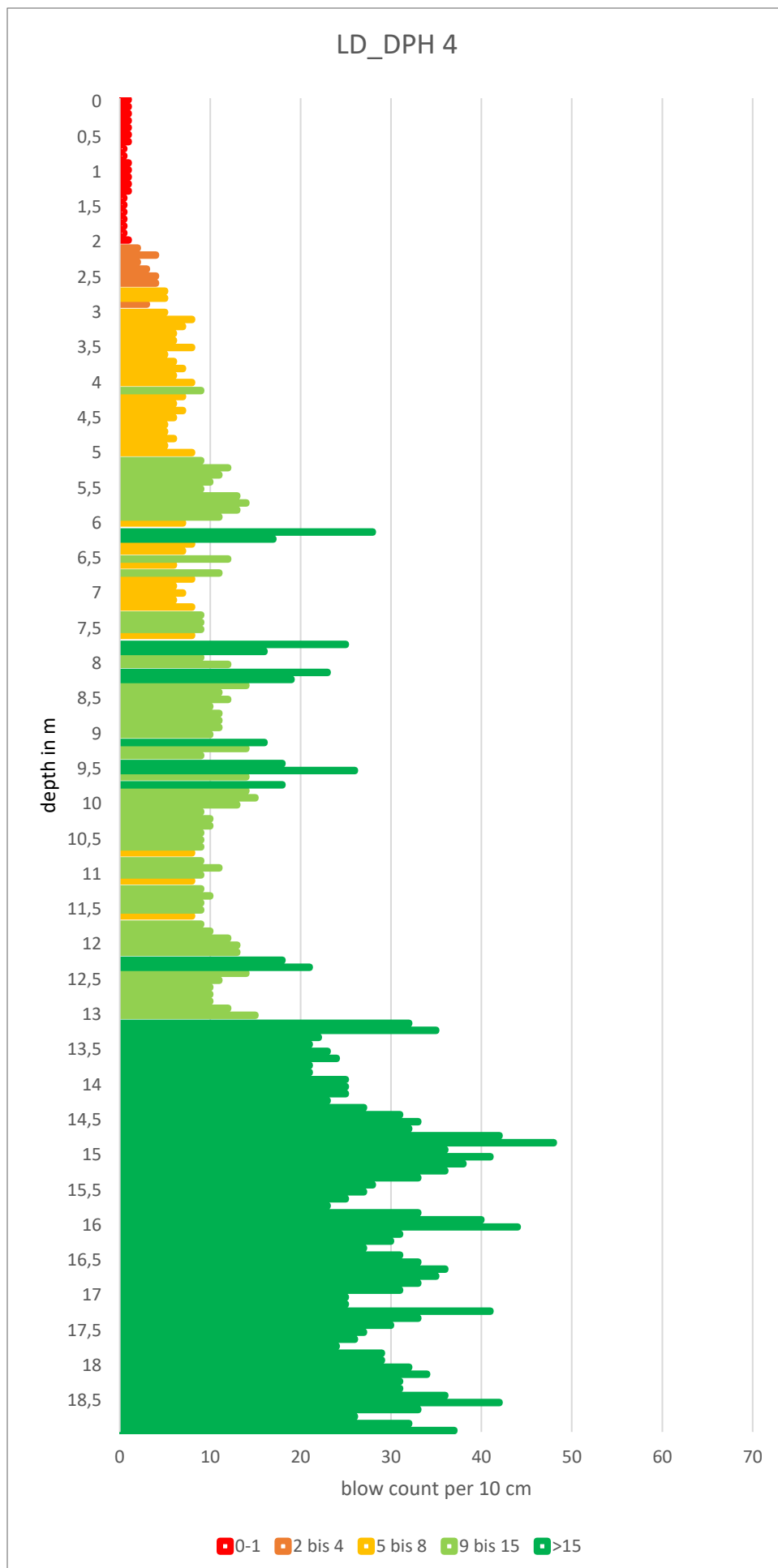
Horizonte	Massenanteil Calciumcarbonat in % Trockenmasse
P78 65-80	2,48
P78 180-190	8,48
P78 247-255	10,53
P78 335-345	16,52
P78 438-457	16,96
P78 505-515	15,94
P78 575-585	14,08
P79 52-65	2,69
P79 168-173	2,48
P79 180-190	2,48
P79 285-295	6,40
P79 375-385	7,86
P84 190-200	10,95
P84 270-282	4,55
P84 322-337	17,57
P84 380-392	15,30

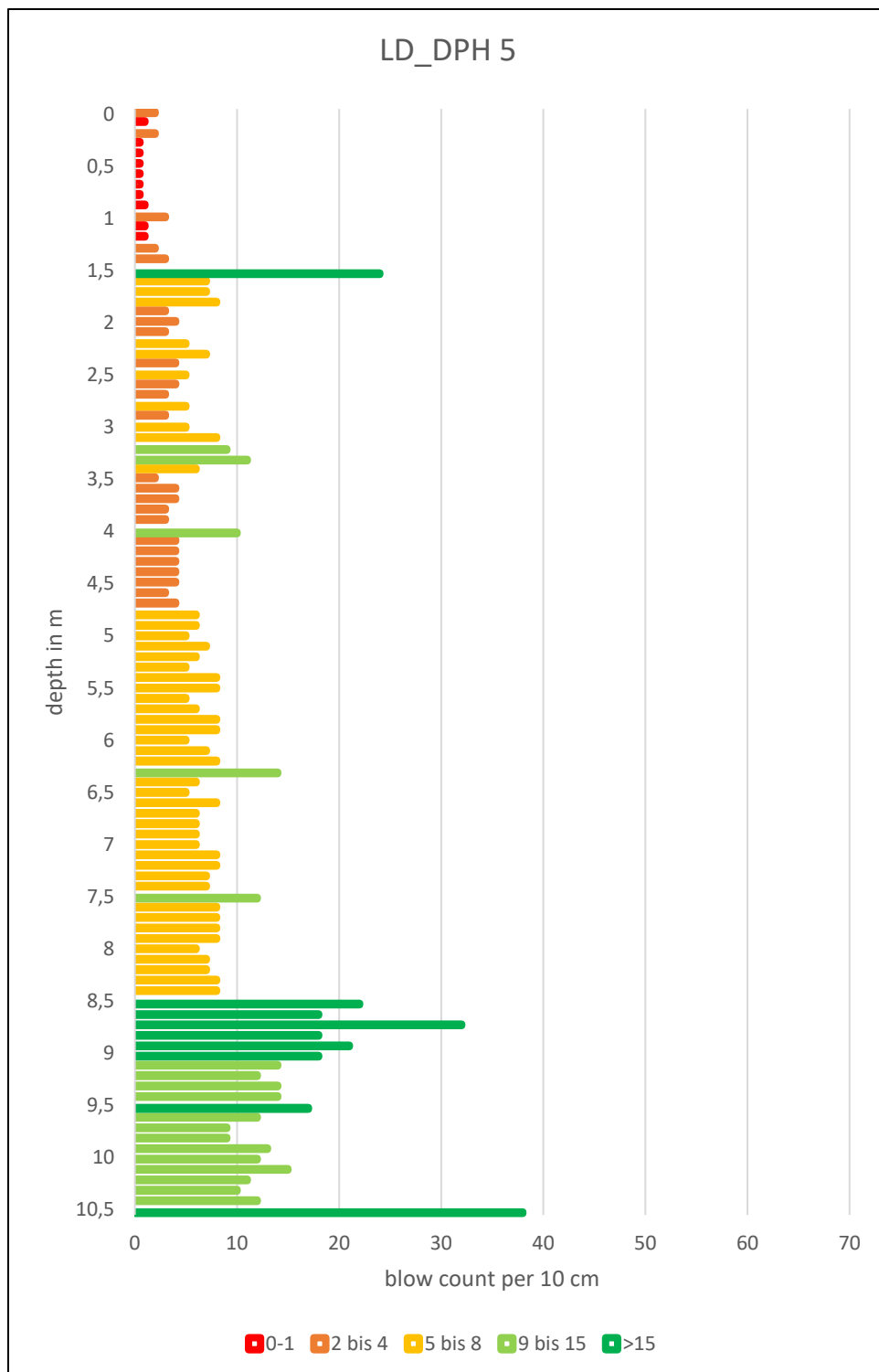
Laborproben	Wassergehalt [%]	
	Ausrollgrenze	Fließgrenze
P78 65-80	30,08	51,88
P78 180-190	26,13	43,89
P78 247-255	20,68	32,38
P78 335-345	13,85	22,38
P78 438-457	16,58	25,09
P78 505-515	14,34	22,38
P78 575-585	18,76	26,05
P79 52-65	29,05	55,05
P79 180-190	30,85	51,42
P79 285-295	26,69	44,93
P79 375-385	23,41	40,58
P84 190-200	25,56	33,08
P84 270-282	31,40	54,68
P84 322-337	21,10	32,37
P84 380-392	19,60	30,43

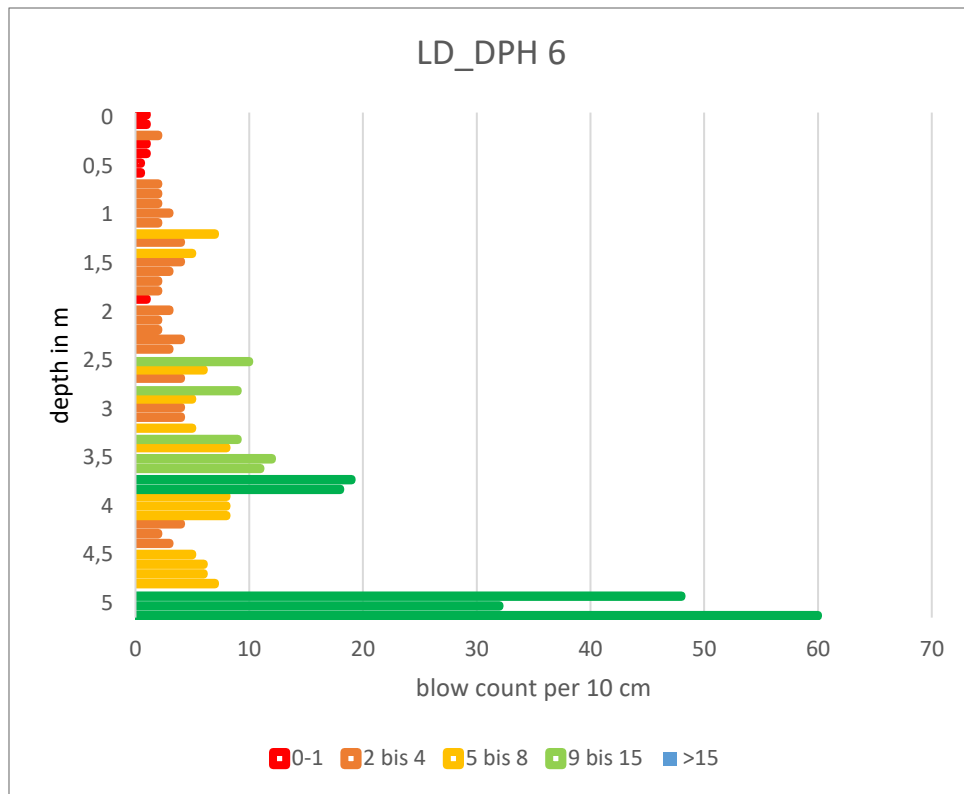
11.4. Anhang D: Rammkernsondierungen ‚Landslide Dynamics‘ (BOUÏE et al. 103-108, 135-138)

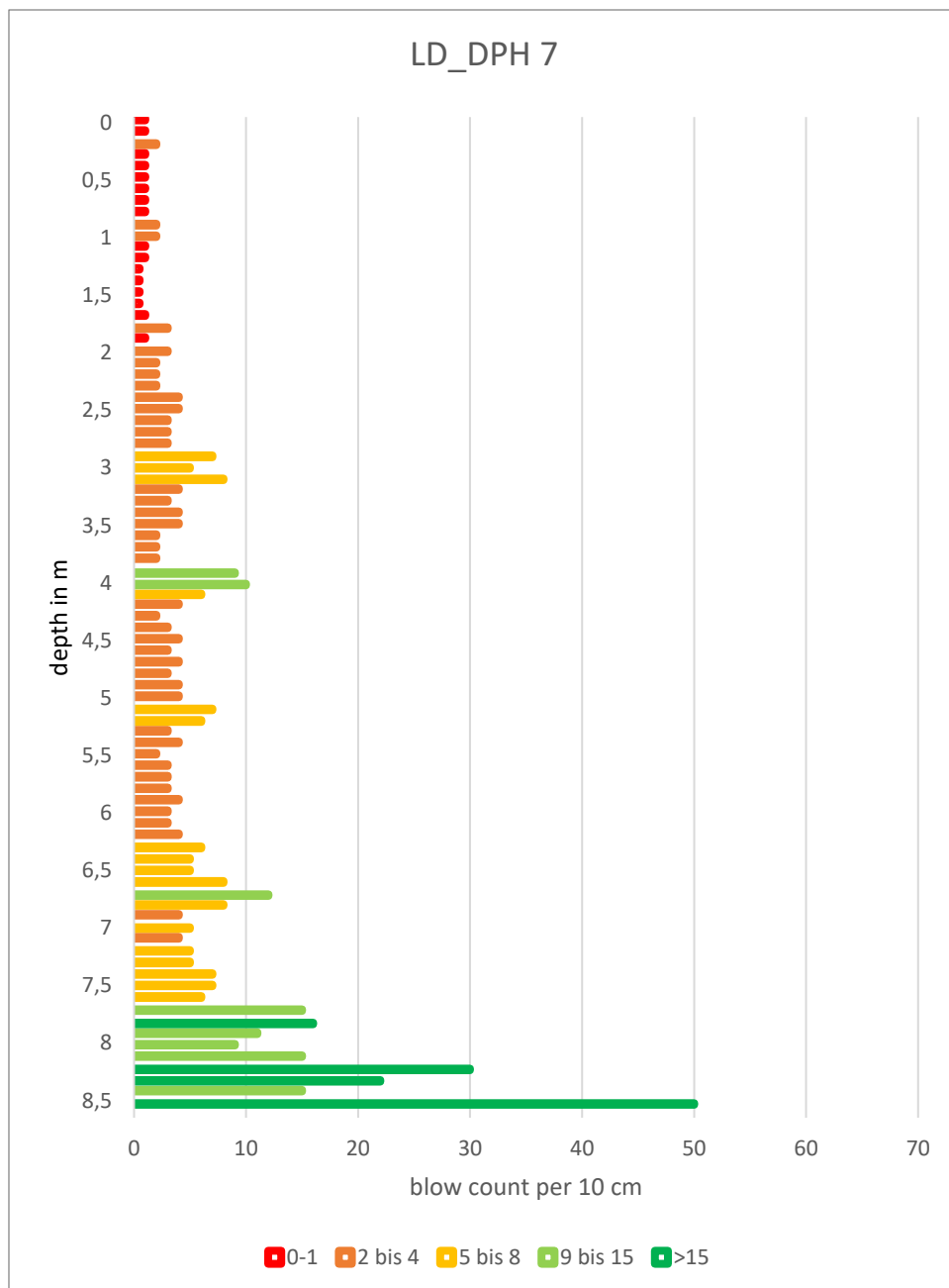


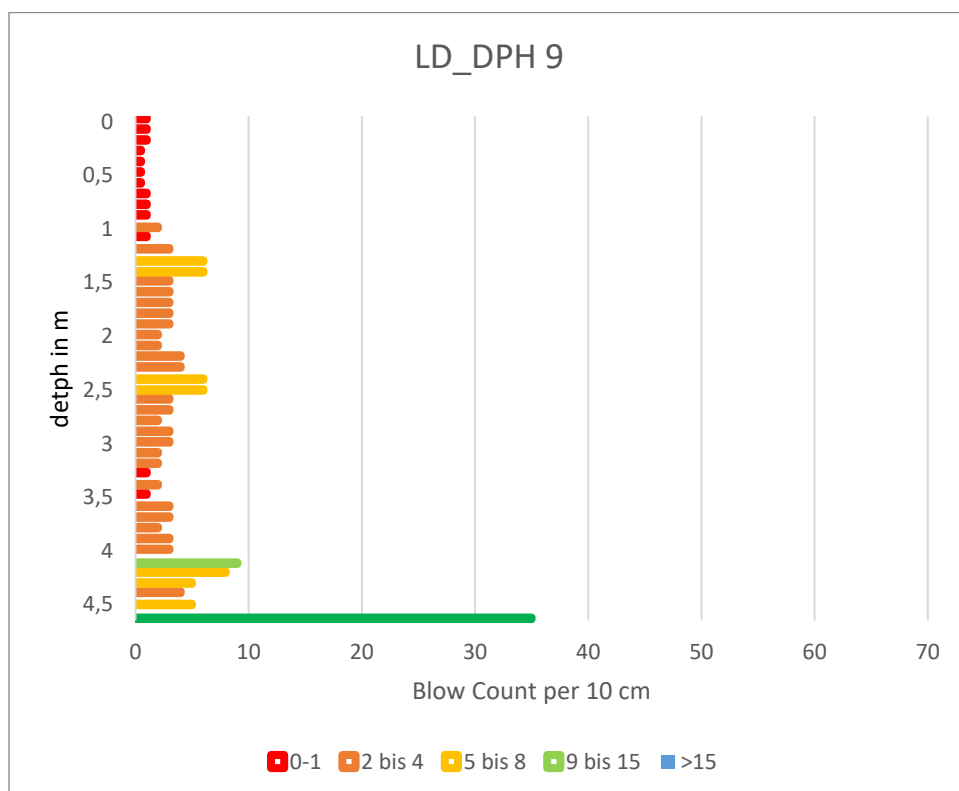
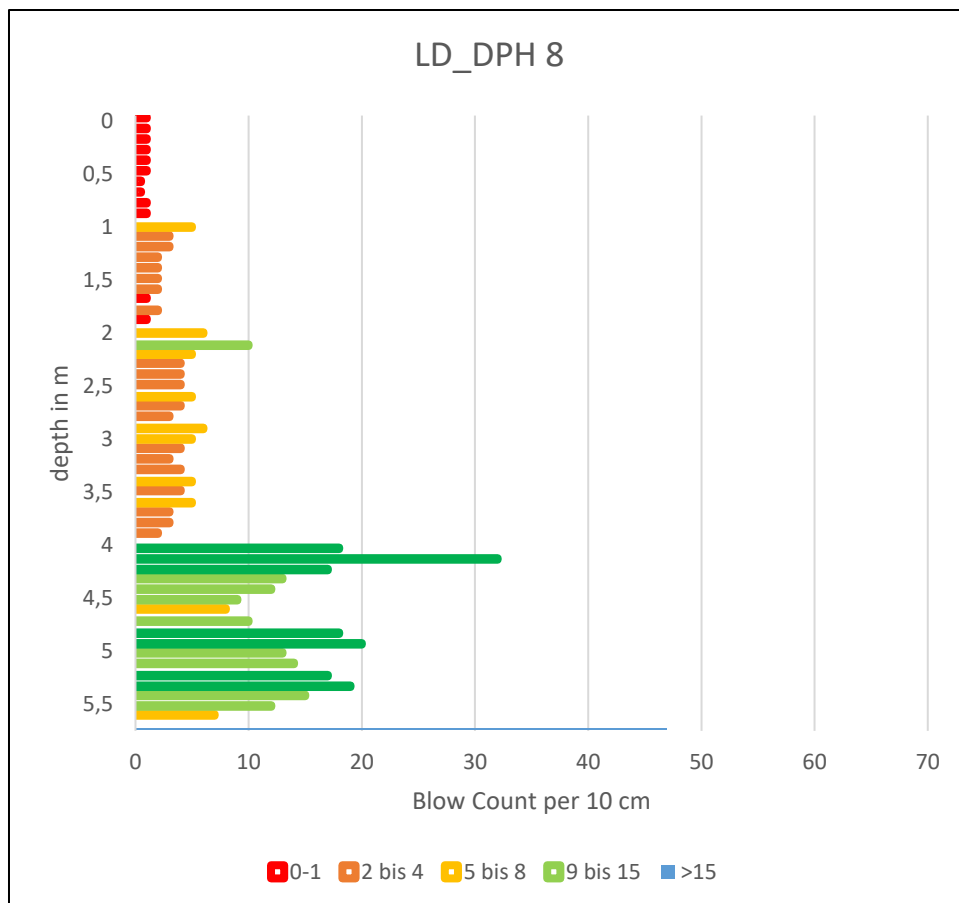


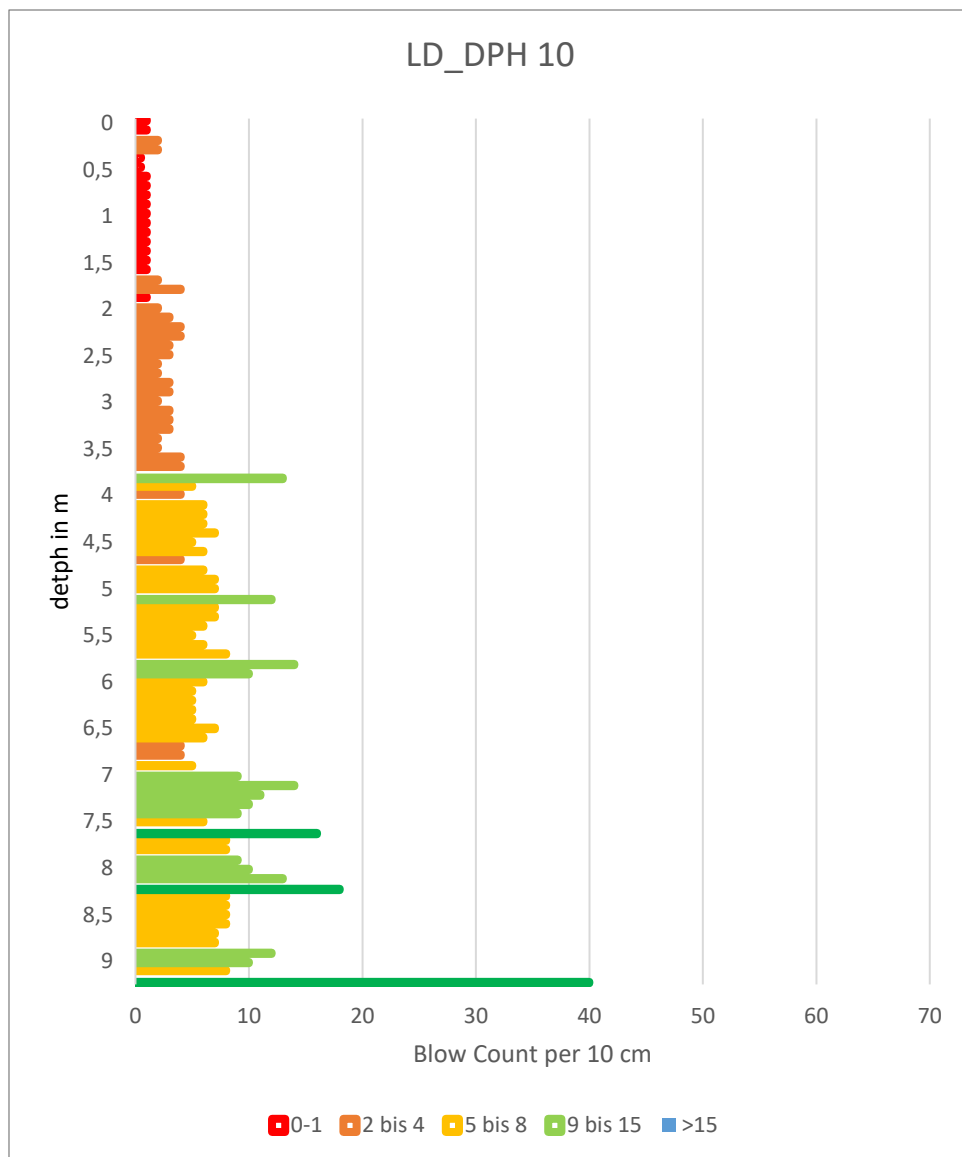












11.5. Anhang E: Bohrkerne ‚Landslide Dynamics‘ (BOUÏE et al. 2019: 89-91)

DPHa4		
Layer thickness	Soil type	soil color code
0-28 cm	/	
28-36 cm	loamy Silt	2,5 Y 4/4-olive brown
36-46 cm	loamy Silt	10 YR 3/3- reddish brown
46- 62 cm	loamy Sand	2,5 Y 4/3-olive brown
62-95 cm	loamy Clay	2,5 Y 5/3-light olive brown
95- 113 cm	/	/
113-140 cm	Loam	2,5 Y 3/2-very dark grayish brown
140-164 cm	loamy Clay	2,5 Y 3/2-very dark grayish brown
164-177 cm	loamy Clay	2,5 Y 4/2-dark grayish brown
177-255 cm	/	/
255-280 cm	loamy Sand	2,5 Y 5/3-light olive brown
280-290 cm	Loam	2,5 Y 3/1-very dark gray
300 cm	Bedrock	/

DPHa4			
Layer thickness	Composition of borehole cuts	Carbonate content	additional remark
0-28 cm	/		core loss
28-36 cm	soft and crumbly	0	gradual transition
36-46 cm	slightly plastic, crumbly	0	clear transition
46- 62 cm	medium plastic	0	sharp transition
62-95 cm	layered and plastic	0, (++) (Limestone)	colour differences (0,85-90 cm), at 75 cm limestone (2x2 cm)
95- 113 cm	/		core loss from 100-113 cm
113-140 cm	slightly plastic and crumbly	(+)	continuation from 0,95 cm, 1,2-1,4 many stones of different sizes (marl), unclear transition
140-164 cm	plastic	(+)	stone inclusion 5x3 cm at 157 cm depth, gradual very distinct transition
164-177 cm	plastic	0	like 0,95 cm => undistinct transition
177-255 cm	/	/	core loss
255-280 cm	crumbly and medium firm-stiff	0, (+)	follows up on 177cm, gravel (max. 1cm), stone 5x2cm at 272cm depth, same like in 290cm
280-290 cm	soft and slight plastic	(++)	grus (~2 cm), relatively sharp transition
300 cm	firm-stiff	(++)	Bedrock (marl,limestone), drill head stopps

DPHb4		
Layer thickness	Soil type	soil color code
0-22 cm	/	/
22-48 cm	silty Clay	7,5 YR 3/2- dark brown
48-78 cm	loamy Clay	2,5 Y 4/3-olive brown
78-94 cm	loamy Clay	2,5 Y 5/3-light olive brown
94-100 cm	clayey Silt	2,5 Y 3/2-very dark grayish brown
100-125 cm		/
125-150 cm	clayey Silt	2,5 Y 5/3-light olive brown
150-195 cm	clayey Silt	5 Y 4/1-dark gray
195-199 cm	clayey Silt	5 Y 4/1-dark gray
199-204 cm	/	/

	DPHb4		
Layer thickness	Composition of borehole cuts	Carbonate content	additional remark
0-22 cm	/	/	core loss
22-48 cm	soft, crumbly and blunt	0	humus (org. matter), bright stains in lower part
48-78 cm	slight plastic, crumbly	0	dots and coal storage in 51-53 cm, edged gravel
78-94 cm	medium plastic and shiny	0, (+)	stones, at 0,86 cm limestone (marl), distinct transition
94-100 cm	medium plastic and shiny	(++)	sharp-edged limestone and gravel storage
100-125 cm	/	/	core loss
125-150 cm	soft, medium plastic, blunt and shiny	0	rock (quartzit) barrier
150-195 cm	soft, slightly cemented and plastic	(+)	probably mass had been shifted, fine gravel
195-199 cm	crumbly and medium plastic	(+)	fine gravel fragments (limestone clast)
199-204 cm	/	(++)	limestone hindrance