



Universität für Bodenkultur Wien

DIPLOMARBEIT

**UNTERSUCHUNG DER HANGSTABILITÄT AM  
GALLENZERKOGEL**

*eingereicht von*  
**Benedikt Ennsfellner, BSc.**

*Betreuet von* **Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl**  
und **Prof. Dr. Roland Kaitna**

am  
Institut für alpine Naturgefahren  
Department für Bautechnik und Naturgefahren



Wien, September 2016



Gewidmet  
meiner Familie.

## ***Eidesstattliche Erklärung***

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß der Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

---

Datum, Unterschrift

## **Danksagung**

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern **Martha und Richard** danken, weil sie mir das Studium finanzierten, mich dabei immer unterstützten und mir zeigten, dass sie an mich glauben.

Meinem Professor **Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl** danke ich dafür, dass er es mir ermöglicht hat am Institut für alpine Naturgefahren meine Diplomarbeit zu schreiben und dass ich stets mit einer Frage zu ihm kommen durfte.

Meinem Zweitbetreuer **Prof. Dr. Roland Kaitna** danke ich für seine Erstkontrolle, seine hilfreichen Ratschläge und dafür, dass seine Tür immer für mich offen war.

Den übrigen **InstitutsmitarbeiterInnen** danke ich für eine freundschaftliche-kollegiale Zusammenarbeit.

Einen weiteren ganz besonderen Dank möchte ich an die Mitarbeiter der Wildbach- und Lawinenverbauung richten. Insbesondere **Dipl.-Ing. Christian Kienberger**, bei dem ich mich jederzeit melden durfte und der mir mit Rat und Tat beistand. Des Weiteren danke ich auch **Dipl.-Ing. Eduard Kotzmaier** welcher die Diplomarbeit überhaupt erst ermöglicht hat.

**Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr. Franz Ottner** und **Martin Grogger** danke ich für die großartige Unterstützung bei den laboratorischen Untersuchungen an der Universität. Natürlich danke ich auch allen anderen **MitarbeiterInnen** der Labore an der Universität.

Zu guter Letzt möchte ich noch **Gregor Idinger** danken, der mich bei meiner Problemstellung unterstützt hat und mich auf das Verfahren nach AUBERTIN hingewiesen hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 „Gallener Kogel Mure“	3
1.2 Zielsetzung und Methodik	3
<b>2 Untersuchungsgebiet</b>	<b>5</b>
2.1 Klima	7
2.2 Geologie	7
2.3 Vegetation	8
<b>3 Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1 Allgemeines über Rutschungen	9
3.1.1 Variable Disposition	9
3.1.2 Böschungen	9
3.2 Rutschbewegung	10
3.2.1 Charakteristische Merkmale von rutschgefährdeten Hängen	11
3.2.2 Zeitlicher Ablauf einer Rutschung	11
3.2.3 Typen von Rutschungen	12
3.2.3.1 Rotationsrutschung	12
3.2.3.2 Translationsrutschung	13
3.3 Stabilitätsparameter	14
3.3.1 Scherfestigkeit	14
3.3.1.1 Physikalische Ursachen der Scherfestigkeit	14
3.3.1.2 Mohrsche Hüllkurve	15
3.3.1.3 Coulombsche Bruchbedingung	15
3.3.2 Kohäsion	16
3.3.3 Reibungswinkel	17
3.4 Bodenwasser	17
3.4.1 Drei-Phasen-Aufbau des Bodens	17
3.4.2 Kapillarwasser	18

3.4.3	Saugspannung/Matrixpotential _____	19
3.4.4	Einfluss der Saugspannung auf teilgesättigte Böden _____	20
3.4.4.1	Spannungen im Boden _____	20
3.4.4.2	Scherfestigkeit gesättigter Böden _____	20
3.4.4.3	Scherfestigkeit teilgesättigter Böden _____	20
3.4.5	Fließgrenze _____	21
<b>4</b>	<b>Laboruntersuchungen _____</b>	<b>23</b>
4.1	Geologische Auswertung _____	23
4.1.1	Kornverteilungskurve _____	23
4.1.1.1	Ergebnisse der Kornverteilung _____	26
4.1.2	Mineralanalyse _____	26
4.1.2.1	Auswertung des Röntgendiffraktometers _____	29
4.2	Geotechnische Auswertung _____	30
4.2.1	Rahmenscherversuch _____	30
4.2.1.1	Ergebnis vom Rahmenscherversuch _____	33
4.2.2	Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen _____	34
4.2.2.1	Auswertung vom Atterberg Versuch _____	36
4.3	Modified Kovács Model – MK-Model _____	38
4.3.1	Resultate des Modified Kovács Models _____	41
4.4	Stabilitätsberechnungen _____	44
4.4.1	„SLIDE“ _____	44
4.4.1.1	Ordinary/Fellenius Methode _____	46
4.4.1.2	Das vereinfachte Verfahren nach Bishop _____	47
4.4.1.3	Das vereinfachte Verfahren nach Janbu _____	47
4.4.1.4	Korrigiertes Janbu Verfahren _____	47
4.4.1.5	Corps of Engineers 1 & 2 _____	48
4.4.1.6	Lowe-Karafiath Methode _____	48
4.4.1.7	Spencer Methode _____	49
4.4.1.8	Morgenstern-Price/General Limit Equilibrium (GLE) Methode _____	50

<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Interpretation</b>	<b>52</b>
5.1	Fragestellung 1	52
5.1.1	Simulationen	53
5.1.1.1	Simulation 1 – Sättigungsgrad: 0,388	53
5.1.1.2	Simulation 2 – Sättigungsgrad: 0,444	57
5.1.1.3	Simulation 3 – Sättigungsgrad: 0,737	59
5.1.1.4	Simulation 4 – Sättigungsgrad: 0,951	62
5.1.1.5	Simulation 5 – Sättigungsgrad: 1	65
5.1.1.6	Ergebnisse aller Simulationen	67
5.1.2	Interpretation der Ergebnisse	68
5.2	Fragestellung 2	69
5.2.1	Szenario 1	69
5.2.1.1	Ergebnis	72
5.2.2	Szenario 2	73
5.2.2.1	Ergebnis	74
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>82</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>83</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>Lebenslauf/CV</b>	<b>91</b>

## **Abstract**

On 16<sup>th</sup> of May 2014 a debris flow came off on the east side of the “Gallenzer Kogel” (Hollenstein/Ybbs) because of heavy rainfall. The debris flow silted up one property, the country road L6180 and the recipient “Hammerbach”.

In this work the reason for the collapse of the slope was the subject of investigation. The stability of the slope at different water saturations was analysed. The diploma thesis was developed in cooperation with the regional office Melk from the torrent and avalanche control of the BMLFUW. The office also provided thankfully the examined soil material.

With the aid of the program “SLIDE” of the company “Rocscience” the stability factor of the slope (factor of safety) was calculated. For each simulation a different degree of saturation of the soil was assumed. There were also simulations carried out, where a previous debris flow hit the unstable slope.

To realize these simulations it was important, that the ground material was analysed first at the laboratories of the University of Natural Resources and Life Sciences. These analyses provided the necessary parameters for the operation of the program "Slide". One main subject of investigation was to convert the parameters of full saturation of a frame shear device into parameters of partial saturation, since in a frame shear device the only output is the cohesion and the friction angle at full saturation. For this problem the formulas by Michel AUBERTIN (2003) were applied.

The aim of this work was to find a hydraulic and geotechnical context of debris flows, to verify the reason of failure and the safety precautions of the regional office.

It was found out, that the degree of saturation has great influence on the stability and the geotechnical parameters. Through this work the use of simple methods for the determination of the water retention curve was confirmed.

**Keywords:** rotational and translational slip, degree of saturation, factor of safety, water retention curve, shear strength

## **Kurzfassung**

Am 16.05.2014 ging eine Mure auf der Ostseite des Gallenzer Kogels, Gemeinde Hollenstein/Y., nach einem zweitägigen Niederschlagsereignis ab. Dabei wurde ein Anwesen, die Landesstraße L 6180 und der Hammerbach (Vorfluter) vermurt. In dieser Arbeit soll die Hangstabilität des Gallenzer Kogels in seinem jetzigen Zustand beurteilt werden. Dabei wurde überprüft, wie sich die Stabilität des Hanges bei unterschiedlicher Wassersättigung verhält. Die Diplomarbeit wird in Zusammenarbeit mit der Gebietsbauleitung Melk der Wildbach- und Lawinenverbauung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (WLV) erarbeitet. Die WLV stellt auch dankenswerterweise das zu untersuchende Bodenmaterial zur Verfügung.

Mit Hilfe des Programms „Slide“ von Rocscience wurde der Standsicherheitsfaktor („Factor of Safety“ – FOS) der Böschung berechnet. Dabei wurde bei jeder Simulation ein unterschiedlicher Sättigungsgrad des Bodens angenommen. Es wurden auch Simulationen durchgeführt, bei denen angenommen wird, dass eine vorangegangene Mure auf den instabilen Hang aufschlägt. Um diese Simulationen durchführen zu können, ist im Vorfeld das Bodenmaterial in den Laboren der Universität für Bodenkultur analysiert worden. Dadurch ergeben sich die notwendigen Kennwerte für das Programm „Slide“. Da es im Zuge dieser Arbeit nur möglich ist, einen Rahmenscherversuch durchzuführen, bei dem die Kohäsion und der Reibungswinkel nur bei Vollsättigung ausgegeben werden, wird eine Möglichkeit gesucht, wie diese Werte auf Teilsättigung umgerechnet werden können. Für dieses Problem kommen die von Michel AUBERTIN (2003) präsentierten Formeln zur Anwendung.

Ziel ist es, einen hydraulischen und geotechnischen Zusammenhang bei Muren zu finden, die möglichen Versagensursachen zu überprüfen und die geplanten Verbauungsmaßnahmen der Wildbach in ihrer Notwendigkeit zu bestärken. Es zeigt sich, dass der Sättigungsgrad großen Einfluss auf die Stabilität und die geotechnischen Parameter ausübt. Durch diese Arbeit wurde auch die Verwendung von einfachen Methoden, für die Bestimmung der Wasserretentionskurve, bestärkt.

**Keywords:** Rutschung, Sättigungsgrad, Factor of Safety, Scherfestigkeit, Wasserretentionskurve

# **1 Einleitung**

## **1.1 „Gallenzer Kogel Mure“**

Nach einem zweitägigen Niederschlagsereignis verflüssigt sich am 16. Mai 2014 zwischen 10:00 Uhr und 13:00 Uhr der Boden am Gallenzer Kogel. Aufgrund der Vorbefeuchtung entwickelte sich aus einer Rutschungen rasch eine Mure, welche sowohl die Landesstraße L6180 als auch ein Familienhaus an der orographisch rechten Seite kurz vor der Mündung in den Hammerbach erreichte. Laut Angaben des NÖ Straßendienstes wurde rund 3.500 m<sup>3</sup> – 4.000 m<sup>3</sup> Murmaterial im Talraum abgelegt. Das Österreichische Bundesheer errichtete im Anschluss der Katastrophe ein Rückhaltebecken, welches rund 1.000 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen aufweist.

Aufgrund weiterer Instabilitäten im Anrissbereich und eines Ereignisses im Jänner 2015, bei dem sich ca. 300 m<sup>3</sup> Murmaterial verflüssigte, wurde der Ruf nach mehr Sicherheit immer lauter. Nach einer erneuten geologischen Beurteilung, kamen die Experten zu dem Ergebnis, dass bei extremen Niederschlägen ca. 8.000 m<sup>3</sup> Bodenmaterial für die Speisung von Muren anfallen würden. Auf Grund dessen wurde seitens der WLW ein Projekt für etwaige Verbauungsmaßnahmen ausgearbeitet und Maßnahmen für die Sperre der L6810 getroffen.

## **1.2 Zielsetzung und Methodik**

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, herauszufinden welchen Einfluss das Bodenwasser auf die Böschungstabilität hat. Zusätzlich sollen auch etwaige Szenarien durchgespielt werden, bei denen noch zusätzliche Einflussfaktoren auf die Böschung wirken.

Die methodische Vorgehensweise in der gegenständigen Diplomarbeit gliedert sich in 4 wesentliche Arbeitsschritte:

1. Grundlagenforschung
2. Laboruntersuchungen
3. Empirische Datenerhebung
4. Auswertung und Ergebnisse

Im ersten Schritt ist in der Literatur nach Grundlageninformationen zum Thema Rutschungen vor allem aber über die Geologie und die Geotechnik, genauso aber

auch zu Bodenwasser und dessen Einfluss gesucht worden. Die Ergebnisse daraus werden im Kapitel 3 dargestellt.

Die Laboruntersuchungen erforderten gezielte Abwägungen und Entscheidungen welche Bodenparameter für die Auswertung, besser gesagt für die Simulationen, entscheidend sind. Dafür waren die zuvor gewonnen Informationen aus der Grundlagenforschung von Bedeutung. Die Versuchsdurchführungen und die Ergebnisse daraus werden in den Kapiteln 4.1, 4.2.1 und 4.2.2 geschildert.

Da aber nicht alle Kennwerte des Bodens im Labor bestimmbar waren, musste für die Bestimmung mancher Parameter ein empirischer Ansatz gewählt werden. Für die Bestimmung der Saugspannung wurde das Modified Kovács Model gewählt, welches im Kapitel 4.3 erörtert wird. Nachdem alle benötigten Parameter gefunden wurden, konnte die Böschungstabilität berechnet und ausgewertet werden.

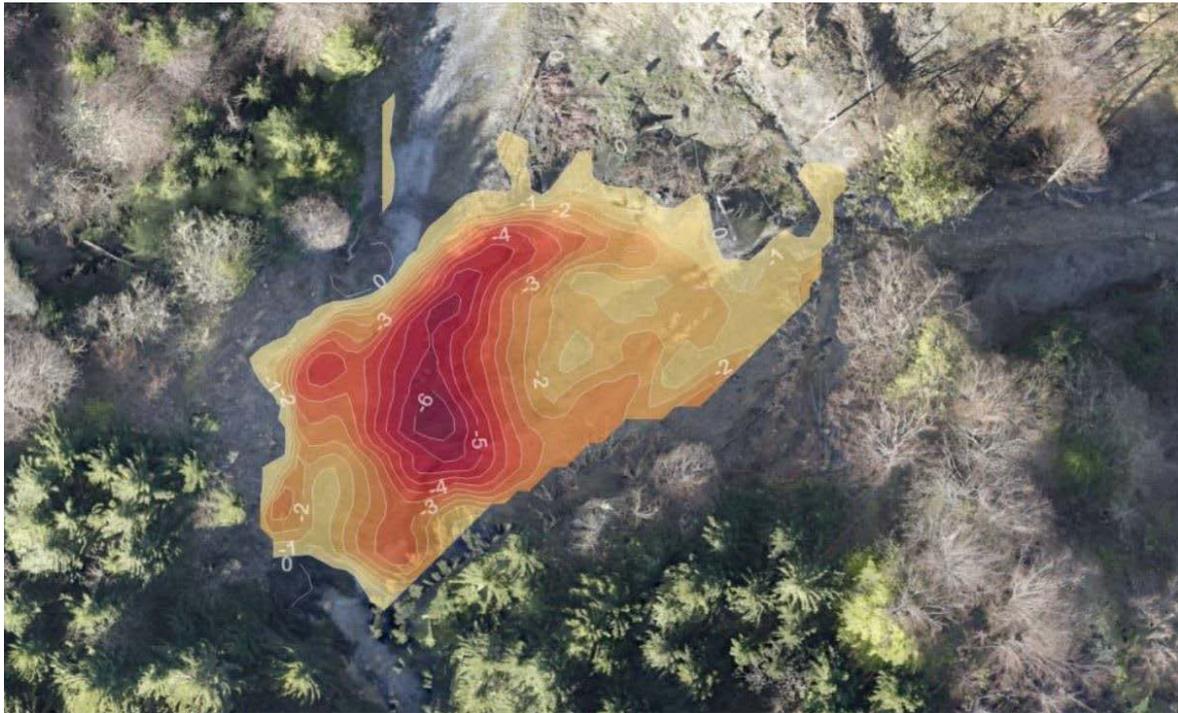
## 2 Untersuchungsgebiet

Der Gallenzer Kogel (782 müA) liegt im Südwesten von Niederösterreich in der Gemeinde Hollenstein an der Ybbs, Bezirk Amstetten. Das Untersuchungsgebiet liegt auf 660 müA von dort aus das Probenmaterial der „Gallenzer Kogel Mure“ entnommen wurde, welches später in den Laboren der Universität für Bodenkultur untersucht wurde.

Abbildung 1: Gemeindegebiet Hollenstein an der Ybbs (Kienberger, 2015)



**Abbildung 2: Luftbild inkl. modellierten Anbruchgebiet der Mure (Hübl, 2015)**



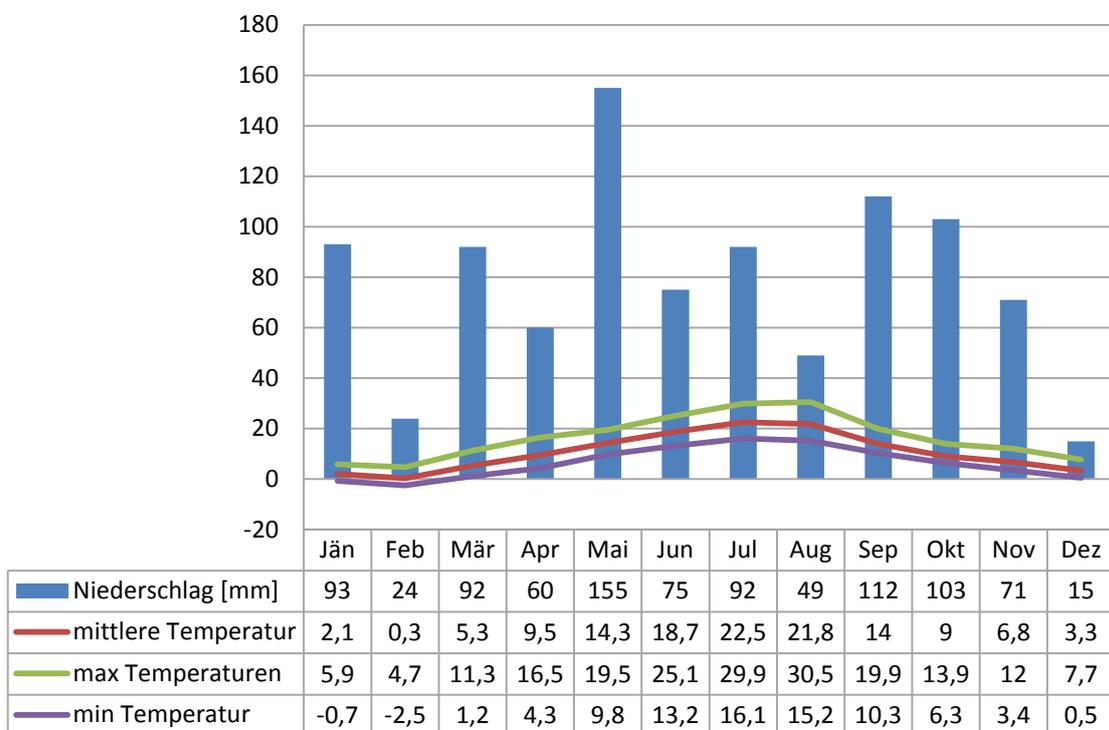
**Abbildung 3: Foto vom Anbruchgebiet der „Gallenzer Kogel Mure“, fotografiert von der orographisch rechten Seite (Sausgruber, 2015)**



## 2.1 Klima

Hollenstein an der Ybbs gehört in die subalpine Klimastufe. Es wird geprägt von warmen Sommer und kühlen Winter. Abbildung 4 zeigt ein Klimadiagramm von Waidhofen an der Ybbs. Die dortige Niederschlags- und Temperaturmessstelle liegt ungefähr 17 km Luftlinie vom Untersuchungsgebiet entfernt. Die Jahressumme des Niederschlages liegt unter 950 mm, wobei der meiste Niederschlag in den Sommer- und Herbstmonaten fällt. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 10,6 °C. Während der Wintermonate kann die Temperatur knapp unter dem Gefrierpunkt liegen.

Abbildung 4: Klimadaten (zamg.ac.at, 2016)



## 2.2 Geologie

Laut Gutachten SCHWEIGL (2015) liegt das Anbruchgebiet der „Gallenzer Kogel Mure“ auf einer Paläorutschung, einer sehr alten Rutschung. Aufgrund der Bäume vor Ort lässt sich das Alter der Paläorutschung auf deutlich über 100 Jahre schätzen. Sie kann auch mehrere tausend Jahre alt sein. Die Ablagerungen einer Paläorutschung weisen meist ein unsortiertes feines Korngefüge auf, welches gefährdet ist, bei neuerlichen Niederschlägen, sich erneut zu verflüssigen.

Geologisch befindet sich der Gallenzer Kogels und seine Umgebung in den Nördlichen Kalkalpen. Das vorherrschende Gestein gehört zu den Opponitz

Formationen der Obertrias. Laut den geologischen Karten handelt es sich beim Schichtglied um Opponitzer Rauwacke. Das bedeutet, es sind normalerweise graue, gipshaltige Kalke oder selten Dolomite vorzufinden. Meistens ist der Gips bereits ausgewaschen und deshalb haben die Kalke eine poröse, zellenartige Struktur, die eine gute Wasserführung ermöglichen (Schweigl, 2015).

Am Rande und am Ende des Murkanals findet man als anstehenden Felsen, Opponitzer Kalk. Das ist ein hellgrauer, dichter, ungeschichteter Kalk mit zahlreichen Klüften und Harnischflächen.

### **2.3 Vegetation**

Als vorherrschende Waldgesellschaft ist am Gallenzer Kogel ein Fichten-Buchenwald zu finden. Vorweg ist gleich zu bemerken, dass die angrenzenden Gehölze an die Mure größtenteils „Säbelwuchs“ aufweisen und somit ein Anzeichen für Erdbewegungen sind. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass es auf der Paläorutschung regelmäßig zu kleinen Rutschungen oder Massenbewegungen kommt.

Neben den vorherrschenden Fichten (*Picea abies*) und Buchen (*Fagus sylvatica*) ist an einigen Stellen die Grauerle (*Alnus incana*) zu finden. Jene ist sehr von Bedeutung, da sie ein typischer Feuchtigkeitszeiger ist. Als weitere Feuchtezeiger befinden sich neben der Grauerle noch die Kohldisteln (*Cirsium olerceum*), der Huflattich (*Tussilago farfara*) und die Brennnesseln (*Urtica dioica*) am Gallenzer Kogel.

Die Kohldistel und der Huflattich sind des Weiteren auch noch Zeiger für Bodenverdichtung. Dieses Phänomen zeigt auch die schlaffe Segge (*Carex flacca*), die ebenfalls am Gallenzer Kogel zu finden ist.

Aufgrund der vorhandenen Vegetation kann darauf geschlossen werden, dass es sich beim Gallenzer Kogel um einen eher feuchten Standort handelt (Ellenberg, 1992).

## **3 Grundlagen**

### **3.1 Allgemeines über Rutschungen**

Ein Hang oder eine Böschung befindet sich langfristig gesehen in einem dynamischen Gleichgewicht. Wird dieses Gleichgewicht gestört, treten Massenbewegungen auf. In diesem Zusammenhang ist die Grunddisposition ein wichtiger Begriff. Diese gibt an, wie hoch die Gefahr für Versagen ist. Das bedeutet, je geringer die Grunddisposition, desto stabiler ist der Hang. Störungen in diesem Gleichgewicht, welche zu Versagen führen können, werden auslösende Ereignisse oder variable Disposition genannt. (Mergili, 2014)

#### **3.1.1 Variable Disposition**

Die Stabilität von Bodenschichten nimmt durch Verwitterung, Änderungen im Grundwasserspiegel oder Erosion am Hangfuß meist langsam ab. Ein weiterer Faktor für die Bodeneigenschaften ist die Vegetation und deren Bewirtschaftung. Eine degenerierende oder absterbende Durchwurzelung wirkt sich negativ auf die Festigkeit des Bodens aus.

Wird eine kritische Hangstabilität erreicht ( $FOS \sim 1$ ), genügen variable Dispositionen wie starke Regenfälle (Erhöhung der Wassersättigung), Zusatzbelastungen im Oberhang (z.B.: Felssturz oder eine vorangegangene Mure) oder auch anthropogene Einwirkungen, um eine Rutschung auszulösen. (Hübl, 2010)

#### **3.1.2 Böschungen**

Natürliche Böschungen sind Geländeneigungen, welche durch endogene und exogene Prozesse entstanden sind. Bodenböschungen bilden in der Regel ausgeglichene und weiche Formen aus. Der Grenzwinkel ihrer Neigung liegt im Normalfall in einem Bereich bis  $43^\circ$ . Jedoch können Lößwände, als Ausnahmefall, sogar fast senkrecht stehen. Böschungen werden nach ihrer Steilheit in extreme Flachböschungen, Flachböschungen, mäßig steile Böschungen, Steilböschungen und übersteile Böschungen unterteilt. Letztere kommen eher nur im Bergland vor (Pregl, 1989). Verliert eine Böschung ihr Gleichgewicht, so kann die daraus

entstehende Bewegung der Rutschung in Kriech-, Rutsch-, Fließ- oder Sturzbewegung unterteilt werden.

#### Kriechbewegung

In feinkörnigen Böden zählen langsame Bewegungen, die mit der Zeit abklingen können und deren Geschwindigkeit nur mehrere Zentimeter pro Jahr sind, zu den Kriechbewegungen. (Pregl, 1989)

#### Rutschbewegung

Als Rutschungen zählen zusammenhängende Massen, die entlang einer oder mehrerer Gleitflächen abrutschen. Diese Gleitflächen bilden sich progressiv. Das bedeutet, dass sie im stärksten beanspruchten Bereich entstehen und sich von dort aus in die angrenzenden Bereiche fortpflanzen. In der Gleitkörperbewegung nimmt die Geschwindigkeit solange zu, bis schlussendlich die Rutschung beginnt. Erst wenn sich der Gleitkörper in einem neuen stabilen Gleichgewicht befindet, kommt er zum Stillstand. Es kann aber auch sein, dass die Gleitkörperbewegung, wie es im Fall der Gallenzer Kogel Mure war, in eine Fließbewegung übergeht. (Pregl, 1989)

#### Fließbewegung

Wie oben erwähnt, kann es nach einer Rutschung, welche nicht in ein stabiles Gleichgewicht gelangt, zu Fließbewegungen kommen. Für die Fließbewegung ist ein erhöhter Wasseranteil im Boden von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde auch am Gallenzer Kogel aus einer Rutschung eine Mure. (Pregl, 1989)

#### Sturzbewegung

Bei Sturzbewegungen kommt es oft zu kurzzeitigem Kontaktverlust zwischen der bewegten Masse und dem Liegenden. Dabei verliert auch die stürzende Masse selbst ihren inneren Zusammenhalt. Zu den Sturzbewegungen zählt das Gleiten, Fallen und Springen von abstürzenden Massen. (Pregl, 1989)

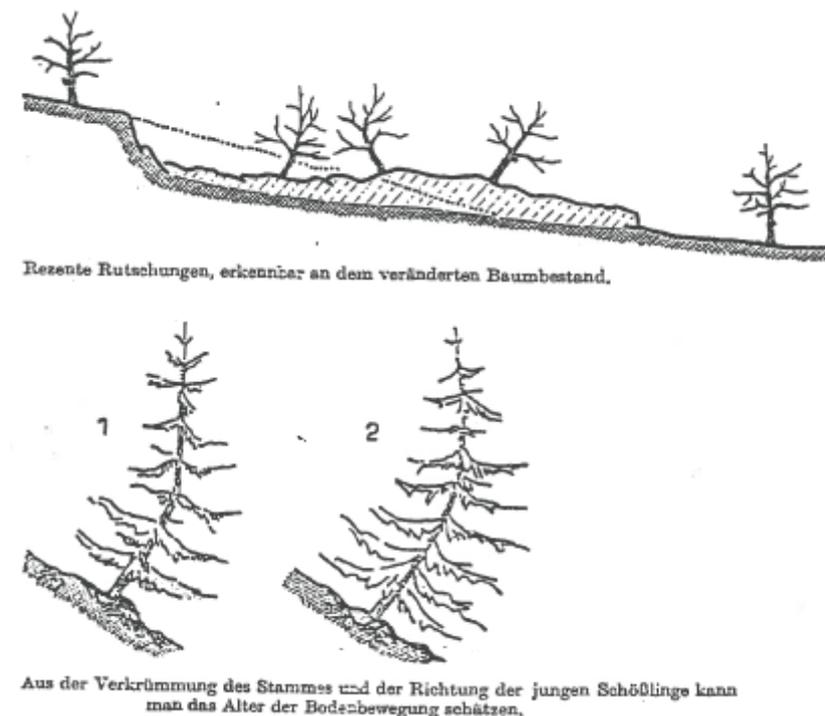
### **3.2 Rutschbewegung**

In dieser Arbeit wird der Böschungsbruch der Gallenzer Kogel Mure genauer betrachtet. Da sich diese Mure aus einer Rutschung entwickelt hat, wird an dieser Stelle nur auf die Rutschbewegung genauer eingegangen.

### 3.2.1 Charakteristische Merkmale von rutschgefährdeten Hängen

Wohl die deutlichsten Warnsignale bei der Begutachtung eines Hanges sind ein unruhiger Geländeverlauf, Quellen in der Umgebung und wasserführende Bodenschichten oder es sind krumm wachsende Bäume („Säbelwuchs“) erkennbar. Einen unruhigen Geländeverlauf zeichnen Mulden, Hohlformen, Buckel, Wellen oder Risse aus.

Abbildung 5: "Säbelwuchs" (Pregl, 1989)



Aus Abbildung 5 geht der sogenannte Säbelwuchs der Bäume hervor. Nach einer Rutschung weicht ein Baum meist von seiner vertikalen Wuchsrichtung ab (Abbildung 5 oben). Beruhigt sich der Hang wieder, kehrt der Baum mit seinen Trieben wieder in ihre ursprüngliche Wuchsrichtung zurück. Durch diesen Vorgang entsteht eine auffallende Verkrümmung am Baumstamm – der Säbelwuchs. (Pregl, 1989)

### 3.2.2 Zeitlicher Ablauf einer Rutschung

Rutschungen sind keine kontinuierlichen Massenbewegungen. Vielmehr sind es einzelne Schübe, die ihre Bewegung ausmachen. Das zeitliche Auftreten dieser Schübe hängt von den oben genannten auslösenden Ereignissen ab. Diese

Einflussfaktoren sind zeitlich variabel (z.B. Niederschlagsverhältnisse). Werden die gemessenen Hangbewegungen mit den zeitlich passenden Niederschlägen und dem Grundwasserspiegel verglichen, ist häufig ein deutlicher Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und der Bewegungsgeschwindigkeit zu finden. Natürlich ist manchmal eine zeitliche Verschiebung erkennbar. (Pregl, 1989)

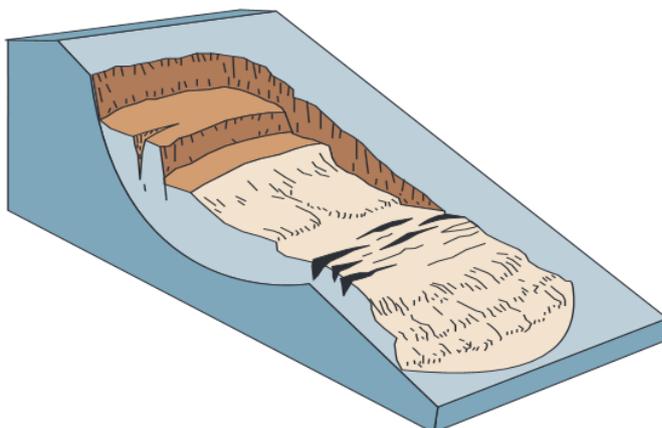
### 3.2.3 Typen von Rutschungen

#### 3.2.3.1 Rotationsrutschung

Unter einer Rotationsrutschung wird eine Rutschung mit einer konkav gekrümmten Gleitfläche, welche sich im Augenblick des Bruches ausbildet, verstanden. Die Scherfestigkeit wird überschritten und die Rotationsbewegung der Rutschmasse findet um eine hangparallele Achse statt. Der höchste Punkt des Anrisses (sog. Kopffregion) senkt sich ab und der unterste Bereich (sog. Fußregion) gleitet auf die darunterliegende Bodenschicht auf. Rotationsrutschungen treten vor allem in schwach gefestigten, homogenen Lockergesteinsböden (Ton, Schluff) und in verwitterten Felskörpern auf. (Hübl, 2010)

Es können auch mehrfache Rotationsrutschungen an einer gemeinsamen Basisfläche entstehen. Da das Gelände am Kopf bei einer Rutschung vertikal stehen bleibt, kann sich dort innerhalb kürzester Zeit eine neue Rutschung bilden. Dort ist dann nicht mehr die benötigte Standsicherheit gegeben. Diese Art von Ereignis kann vor allem in überkonsolidierten Tonen oder Schiefertönen vorkommen, wobei diese von einem festeren Boden überlagert werden müssen. (Pregl, 1989)

**Abbildung 6: Rotationsrutschung (Highland, et al., 2008)**



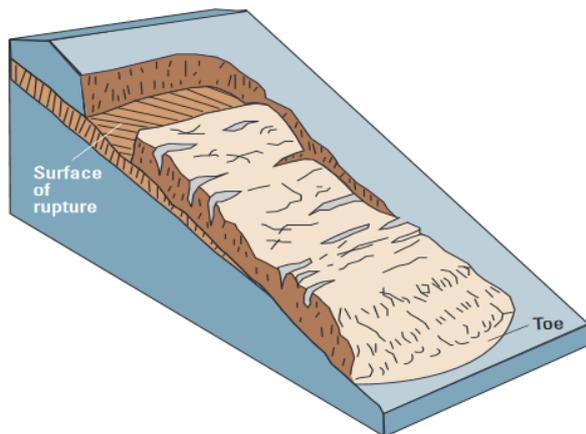
### 3.2.3.2 Translationsrutschung

Die Translationsrutschung findet auf einer annähernd ebenen und hangparallelen Gleitfläche statt. Bei den Gleitflächen handelt es sich um Diskontinuitätsflächen (Schichtgrenzen, Küften usw.), die bereits vor dem Bruch vorhanden waren. Die Größe dieses Prozesses kann Flächen von einigen m<sup>2</sup> bis mehrere km<sup>2</sup> umfassen. Dabei ist das Verhältnis zwischen Tiefe und Länge des Gleitkörpers meist nicht größer als 0,1. Vorzufinden ist die Translationsrutschung vorwiegend im Flysch, kalkigen Mergelschiefern und in metamorphen Schiefern. (Hübl, 2010)

Handelt es sich nur um eine Gleitfläche, so bleibt die Standsicherheit der Böschung bestehen. Diese Gleitfläche ist meist parallel zur Geländeoberfläche angeordnet.

Sind mehrere verschiedene Teilgleitkörper vorhanden, nimmt die Standsicherheit des Hanges auf Grund der Verlagerung des Schwerpunktes im Zuge der Bewegung zu. (Pregl, 1989)

**Abbildung 7: Translationsrutschung (Highland, et al., 2008)**



### 3.3 Stabilitätsparameter

#### 3.3.1 Scherfestigkeit

„Unter der Scherfestigkeit  $\tau_f$  eines Stoffes wird deren Eigenschaft, im ruhenden Zustand Schubspannungen aufnehmen zu können, verstanden.“ (Pregl, 1989).

Wenn z.B. eine Baugrube ausgehoben wird, so steht die ausgehobene Wand im Allgemeinen zunächst ohne Absteifung. Die Höhe dieser Wand ist bei einem sandigen Boden am geringsten und bei einem bindigen nicht wassergesättigten am höchsten. Die Ursache für dieses Phänomen, dass die Wand senkrecht stehen kann, ist die Folge der Scherfestigkeit des Bodens (Simmer, 1980). Die Scherfestigkeit eines Materials ergibt sich aus der Kohäsion und der Reibung (Kapitel 3.3.2/3.3.3).

##### 3.3.1.1 Physikalische Ursachen der Scherfestigkeit

Bei Lockergesteinen lässt sich die Scherfestigkeit aus einer Reihe von physikalischen Ursachen begründen (Pregl, 1989).

- Innere Reibung:

Sie wird durch Reibung der Kornoberfläche hervorgerufen, wobei die Ruhereibung, die Restreibung und die Rollreibung maßgebend sein können.

- Strukturfestigkeit oder Strukturkohäsion:

Aufgrund makroskopischen Auf- und Abgleiten von Partikeln ergibt sich eine Umlagerung der Bodenkörner. Diese Bewegungen verursachen einen Abbruch der Kornkanten, wodurch sich das Reibungsverhalten des Bodens ändert.

- Kapillardruck:

Der Kapillardruck ergibt sich aus der Oberflächenspannung des Wassers. Die Oberflächenspannung wird aufgrund der gegenseitigen Anziehung der Wassermoleküle verursacht. Somit presst der Kapillardruck in Folge die Bodenpartikel zusammen. Bei Bodensättigung oder vollkommener Austrocknung existiert kein Kapillardruck.

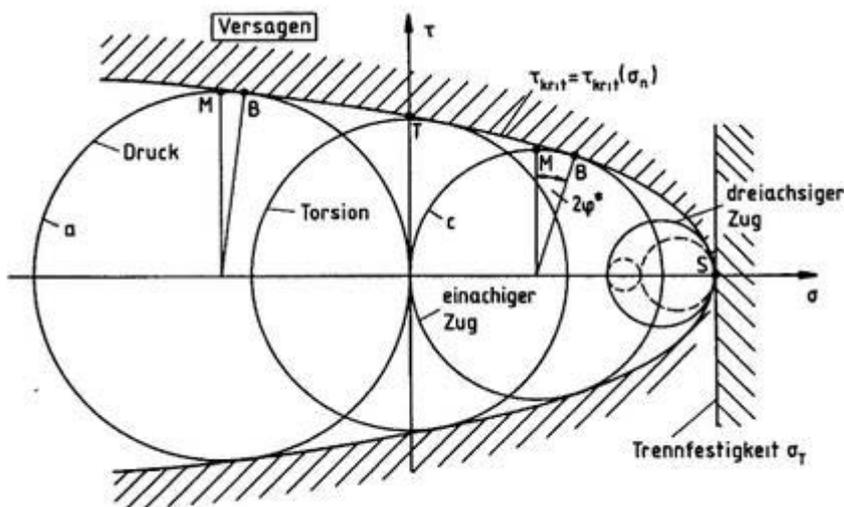
### 3.3.1.2 Mohrsche Hüllkurve

Mohr geht in seinen Überlegungen davon aus, dass die Höhe der maximal ertragbaren Schubspannung  $\tau_{\text{crit}}$  oder die Scherfestigkeit bei der ein Bruch stattfindet von der zugehörigen Normalspannung  $\sigma$  beeinflusst wird.

$$\tau_{\text{crit}} = \tau_{\text{crit}}(\sigma)$$

Diese Definition der maximal ertragbaren Schubspannung oder der Scherfestigkeit lässt sich im Mohrschen Spannungsdiaagramm als Hüllkurve über die Spannungskreise der Bruchzustände darstellen (Issler, et al., 2013).

Abbildung 8: Hüllkurve (Issler, et al., 2013)



### 3.3.1.3 Coulombsche Bruchbedingung

Laut Coulomb nimmt die Scherfestigkeit linear mit der Normalspannung zu. Dieser lineare Zusammenhang lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$(1) \quad \tau_f = c + \sigma * \tan(\varphi)$$

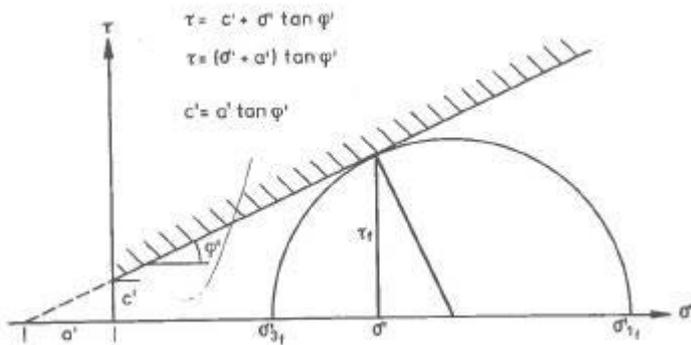
Wobei  $\tau_f$  [kN/m<sup>2</sup>] die Scherfestigkeit ist,  $c$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die Kohäsion,  $\sigma$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die Gesamtspannung und  $\varphi$  [°] ist der Reibungswinkel.

Die so definierte Bruchgerade entspricht einer Annäherung an die Mohrsche Hüllkurve der Bruchspannungskreise. Wenn eine Tangente bei einer bestimmten Spannung an die Mohrsche Bruchkurve angelegt wird, so entspricht diese der Coulombschen Bruchgeraden. Jedoch sollte in der Praxis die Bruchgerade nicht als

Tangente, sondern eher als Sehne für den maßgebenden Spannungsbereich gesehen werden. (Pregl, 1989)

Da jedoch die beiden Thesen von Mohr und Coulomb sehr ähnlich sind, wird in der Literatur oft von der Mohr-Coulombschen-Bruchbedingung gesprochen.

**Abbildung 9: Mohr-Coulomb Bruchbedingung (www.geothermie.de, 2016)**



In der Grafik ist  $\tau$  [kN/m<sup>2</sup>] die Scherfestigkeit,  $c'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die Kohäsion,  $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die Gesamtspannung welche sich aus den Hauptspannungen ( $\sigma_1$  größte und  $\sigma_3$  kleinste Hauptspannung) ergibt und  $\varphi'$  [°] ist der Reibungswinkel.

Die beiden Parameter, die Kohäsion und der Reibungswinkel, sind experimentell zu bestimmen. Darauf wird im Kapitel 4.2.1 noch eingegangen.

### 3.3.2 Kohäsion

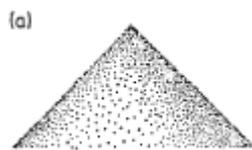
Kohäsion  $c$  ist jene Scherfestigkeit, welche bei fehlendem Normdruck ( $\sigma = 0$ ) vorhanden ist. Ursachen dafür sind die anziehenden Kräfte der Teilchen in einem Körper, die sogenannten Haftkräfte. Ihre Größe hängt von der Bindigkeit des Bodens ab. Bei stark bindigen Böden können sie größer als die Reibungskräfte sein. Dem gegenüber unterscheidet sich die Adhäsion. Dabei handelt es sich um jene Kraft, die Teilchen unterschiedlicher Körper zusammenhält. Es lässt sich zwischen echter und scheinbarer Kohäsion unterscheiden (Simmer, 1980).

Die echte Kohäsion hängt von den Oberflächenkräften der feinsten Bodenteilchen ab. Das bedeutet, sie steht im Zusammenhang mit dem Anteil der Tonminerale im Boden. Die scheinbare Kohäsion ist eine Folge des im Unterdruck stehenden Kapillarwassers. Aufgrund der scheinbaren Kohäsion kommt es zu einer Zunahme der Festigkeit im Boden. Jedoch geht diese bei Austrocknung oder Wassersättigung verloren.

### 3.3.3 Reibungswinkel

Der Reibungswinkel  $\varphi$  ist der Neigungswinkel der Bruchgeraden. Die Eigenschaft des Reibungswinkels lässt sich am besten durch ein Anschauungsbeispiel erklären. Wird trockener Sand aus einer nicht zu großer Höhe auf eine Unterlage geschüttet, so entsteht ein Kegel, dessen Seitenflächen unter dem Winkel  $\varphi$  zur Horizontalen geneigt sind. Der Grund dafür ist die bereits oben erwähnte innere Reibung (Pregl, 1989).

Abbildung 10: Reibungswinkel - Anschauungsbeispiel (Pregl, 1989)



In Abbildung 8 wird geschütteter Sand gezeigt, dessen Seitenflächen unter dem Winkel  $\varphi$  zur Horizontalen geneigt sind.

### 3.4 Bodenwasser

#### 3.4.1 Drei-Phasen-Aufbau des Bodens

Der Boden besteht aus einzelnen Körnern. Diese Körner werden als die Festsubstanz bezeichnet. Zwischen den Körnern befindet sich ein Porenraum. Da dieser mit Luft und/oder Wasser gefüllt sein kann, wird von einem Drei-Phasen-Modell gesprochen. Bei einer Phase handelt es sich immer um den homogen Teil eines Materials (Festsubstanz, Luft, Wasser).

Abbildung 11: Drei-Phasen-Modell

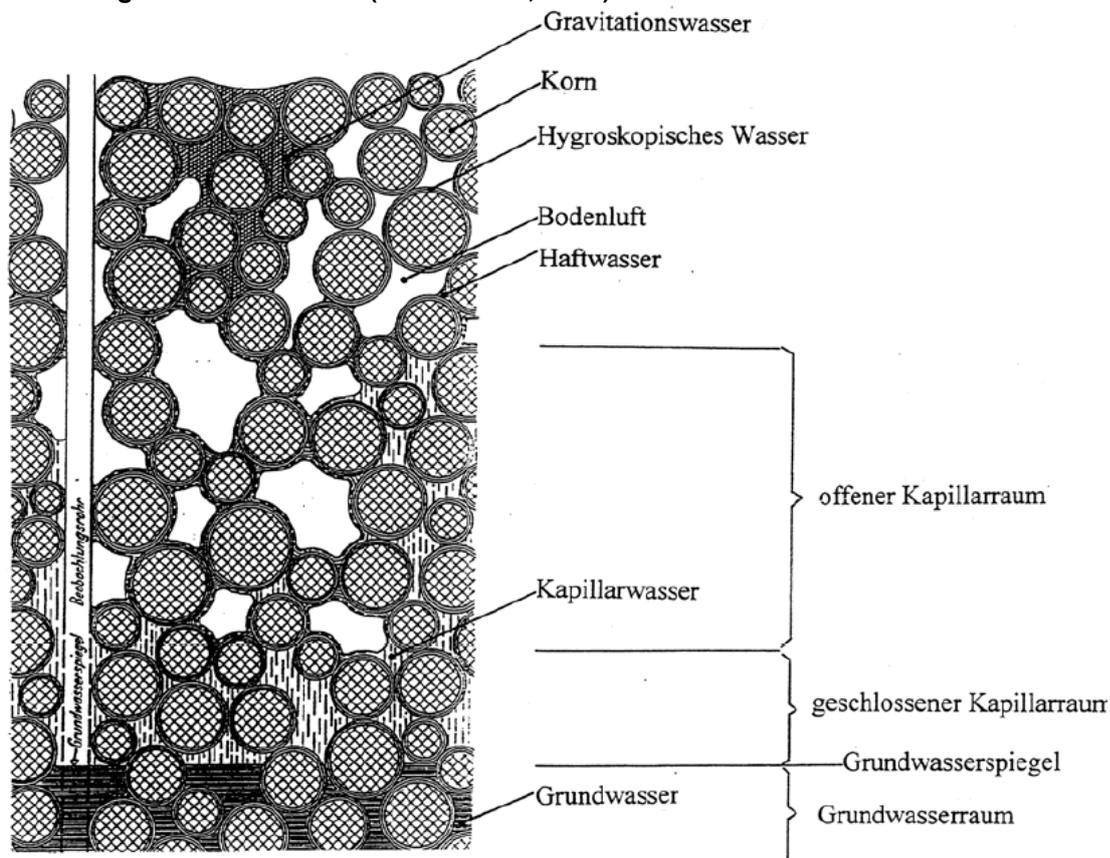


Ist der Porenraum zu Gänze mit Wasser gefüllt, ist der Boden gesättigt. Im Gegenteil dazu, liegt ein trockener Boden vor, wenn kein Wasser im Boden zu finden ist. Dazwischen ist von einem teilgesättigtem Boden die Rede. In den beiden Extremfällen (trocken/gesättigt) existieren nur 2 Phasen  $\rightarrow$  Zwei-Phasen-Modell. (Lang, et al., 2002)

### 3.4.2 Kapillarwasser

Das Wasser im Boden kann dem Grundwasser oder dem Wasser der vadosen Zone, jener Zone über dem Grundwasserspiegel, zugeteilt werden. Grundwasser füllt die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend aus und sorgt dafür, dass sie unter gleichem oder größerem Druck als in der Atmosphäre steht. Die Bewegung des Grundwassers wird von der Schwerkraft und der Reibungskraft beherrscht (Loiskandl, 2012).

Abbildung 12: Bodenwasser (Katzenbach, 2014)



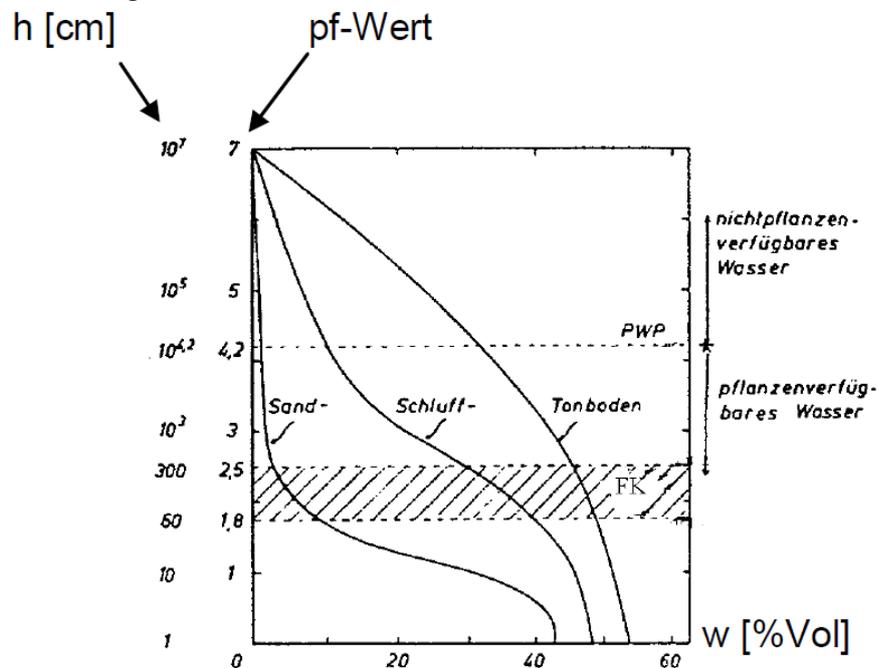
Über dem Grundwasserraum beginnt der Kapillarraum, jener der vadosen Zone. Dabei kann zwischen offenem und geschlossenem Kapillarraum unterschieden werden. Der geschlossene Raum ist der wassergesättigte Bereich direkt über dem Grundwasser. An diesen schließt der offene Kapillarraum, der nach oben hin, immer mehr Luft in seinen Poren aufweist, an (Drei-Phasen-Modell). Der Grenzbereich zwischen offenem und geschlossenem Kapillarraum ist nun jene Grenze zwischen gesättigtem und teilgesättigtem Boden (Katzenbach, 2014).

### 3.4.3 Saugspannung/Matrixpotential

Aufgrund von Adsorptions- und Kapillarkräften (ähnlich Adhäsion) wird das Bodenwasser an die Bodenmatrix gebunden. Diese Kräfte sind in bindigen, engporigen Böden am größten und deshalb erfolgt eine Entwässerung zuerst in den groben Poren. Die Saugspannung oder das Matrixpotential  $\Psi$  ist vom Wassergehalt abhängig. Der entsprechende Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt zeigt die sogenannte „Wasserretentionskurve“ oder „pf-Kurve“. Der Unterschied zwischen Saugspannung und Matrixpotential liegt lediglich am Vorzeichen. So hat die Saugspannung ein negatives Vorzeichen und das Matrixpotential ein positives. Das Matrixpotential lässt sich entweder als Druck, in Meter Wassersäule oder als pf-Wert angeben. Der pf-Wert entspricht dem Logarithmus des in cm Wassersäule angegebenen Matrixpotentials.

Saugspannungsunterschiede in unterschiedlichen Tiefenbereichen führen zu einem Potentialgefälle, welches den sogenannten ungesättigten Wassertransport nach sich zieht (Schulz, 2013).

Abbildung 13: Wasserretentionskurven der unterschiedlichen Bodentypen (Schulz, 2013)



Aus Abbildung 13 geht der unterschiedliche Verlauf der Wasserretentionskurve der verschiedenen Porengrößen der drei Bodentypen Sand, Schluff und Ton hervor. Die Ursache dafür liegt in den Kornverteilungen des jeweiligen Bodens. Je größer der Feinkornanteil, desto eher verschwindet der typische S-förmige Verlauf der Kurve.

### 3.4.4 Einfluss der Saugspannung auf teilgesättigte Böden

#### 3.4.4.1 Spannungen im Boden

Aufgrund des Drei-Phasen-Modells des Bodens (Kapitel 3.4.1) ist die Erfassung von Spannungen im Boden erst mit Hilfe der „Effektivspannungs-Konzeptes“ möglich. Das bedeutet, dass die Gesamtspannungsänderung  $\Delta\sigma$  auf das Korngerüst  $\Delta\sigma'$  (effektive Spannungsänderung) und das Wasser  $\Delta u_w$  (Porenwasserdruck) aufgeteilt werden muss (Simmer, 1980).

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u_w$$

#### 3.4.4.2 Scherfestigkeit gesättigter Böden

Aus dem gerade genannten Grund lässt sich auch die zuvor gezeigte Mohr-Coulombsche Bruchbedingung ändern in

$$(2) \quad \tau_f = c' + \sigma' * \tan(\varphi')$$

wobei  $\tau_f$  [kN/m<sup>2</sup>] die Scherfestigkeit ist,  $c'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die effektive Kohäsion,  $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die effektive Spannung mit  $\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u_w$  und  $\varphi'$  [°] ist der effektive Reibungswinkel.

Gleichung (2) zeigt, dass die Scherfestigkeit von den Parametern, effektive Kohäsion und effektiver Reibungswinkel bei einem gesättigten Zustand abhängig ist. Wird die Kohäsion und der Reibungswinkel im Labor mit einem Rahmenscherversuch (siehe Kapitel 4.2.1) erhoben, so ist das Ergebnis immer der effektive Wert der Parameter. Deshalb wird im Folgenden in den Formeln immer mit dem effektiven Werten gerechnet, da sie in diese Arbeit auch mit dem Rahmenscherversuch bestimmt werden.

#### 3.4.4.3 Scherfestigkeit teilgesättigter Böden

In teilgesättigten Böden kann das Porenwasser negative oder positive Spannungen hervorrufen. Negative Druckspannungen, die durch die oben genannte Saugspannung entstehen, wirken als allseitiger Druck auf das Korngerüst, welche die Festigkeit steigern.

Das bedeutet, dass sich bei sinkendem Wassergehalt, das Wasser in die feineren Poren zurückzieht und nur mehr die Kapillarkräfte von Bedeutung sind. Der Kapillardruck presst die Bodenpartikel zusammen und vergrößert dadurch die Scherfestigkeit. Aufgrund der Saugspannung kann deshalb ein normalerweise kohäsionsloser Boden plötzlich kohäsive Eigenschaften besitzen – scheinbare Kohäsion (Schick, 2000).

Um nun die Größenordnung dieser scheinbaren Kohäsion zu bestimmen, ist das Mohr-Coulomb Bruchkriterium mit den Überlegungen von Fredlund anzuwenden.

$$(3) \quad \tau_f = c' + c_{zus} + \sigma' * \tan(\varphi')$$

Wobei  $\tau_f$  [kN/m<sup>2</sup>] die Scherfestigkeit ist,  $c'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die effektive Kohäsion,  $c_{zus}$  ist die zusätzliche oder scheinbare Kohäsion,  $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>] ist die effektive Spannung mit  $\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u_w$  und  $\varphi'$  [°] ist der effektive Reibungswinkel.

Dabei ist die zusätzliche Kohäsion gegeben durch

$$(4) \quad c_{zus} = \Psi * S^k * \tan(\varphi')$$

mit  $c_{zus}$  [kN/m<sup>2</sup>] der zusätzliche Kohäsion,  $\Psi$  [kPa] ist die Saugspannung oder Matrixpotential,  $S$  [%] ist der Sättigungsgrad,  $k$  [-] ist ein Faktor zwischen 1 und 3,  $\varphi'$  [°] ist der Reibungswinkel.

Da sich der Sättigungsgrad immer im Bereich zwischen 0 und 1 bewegt und die Saugspannung bei Vollsättigung gleich Null ist, ergibt sich, dass die zusätzliche Kohäsion ihr Maximum bei Teilsättigung hat. (Soranzo, 2013)

### 3.4.5 Fließgrenze

Wenn ein bindiger Boden gänzlich mit Wasser gesättigt ist, kommt es zu einer Änderung der Zustandsform des Bodens. Die Aufnahme von Wasser vermindert die Reibungskräfte des Materiales, was weiters dazu führen kann, dass die Fließgrenze  $w_L$  überschritten wird.

Die Zustandsform in der ein Boden vorliegen kann, hängt von seinem Wassergehalt ab. Der Einfluss des Wassergehalts lässt sich mit den Oberflächenkräften der hygroscopischen Wasserhülle erklären. Die Bodenpartikel stehen aufgrund der sie umgebenden Wasserhülle unter Druck, der sie zusammenhält. Bei geringem

Wassergehalt ziehen die freien Oberflächenkräfte die Körner aneinander. Jedoch an jenem Punkt, an dem der Boden die Fließgrenze überschreitet, werden die Oberflächenkräfte aufgrund der Wasseraufnahme gebunden. An dieser Stelle herrschen zwischen den Bodenpartikeln nur mehr geringe Reibungskräfte (Kraft zwischen zwei sich berührenden Teilchen), wodurch der Boden auseinanderfließt. (Simmer, 1980)

Ein Boden kann sich wie oben erwähnt in unterschiedlichen Zustandsformen befinden. Die Grenzen zwischen den Phasen nennt man Atterberg'sche Zustandsgrenzen. Es ist zwischen der gerade definierten Fließgrenze, der Ausrollgrenze und der Schrumpfgrenze zu unterscheiden. Jene werden später im Kapitel 4.2.2 genauer definiert.

## 4 Laboruntersuchungen

### 4.1 Geologische Auswertung

Am Institut für angewandte Geologie der BOKU Wien wird das Probematerial der Mure für die Bestimmung der Kornverteilungskurve und der Definition des Bodentyps untersucht.

#### 4.1.1 Kornverteilungskurve

Für die Ermittlung der Kornverteilung ist es unumgänglich eine Siebanalyse durchzuführen. Da bei diesem Material sehr feine Partikel eingemischt sind ( $< 20 \mu\text{m}$ ), muss eine Nasssiebung durchgeführt werden.

**Abbildung 14: Siebgerät**



Bei der Siebanalyse werden mehrere Siebe mit unterschiedlich großer Maschenweite (2 mm – 20  $\mu\text{m}$ ) gestapelt auf einen vibrierenden Siebboden gestellt. Das Material wird als Suspension und mit Hilfe von destilliertem Wasser durch die Siebe befördert. Jenes Material, welches kleiner 20  $\mu\text{m}$  ist, wird in einem Behälter aufgesammelt und später im SediGraph weiter untersucht. Im Anschluss werden die Proberückstände aus den Sieben in einem Ofen mit 105° C getrocknet und gewogen.

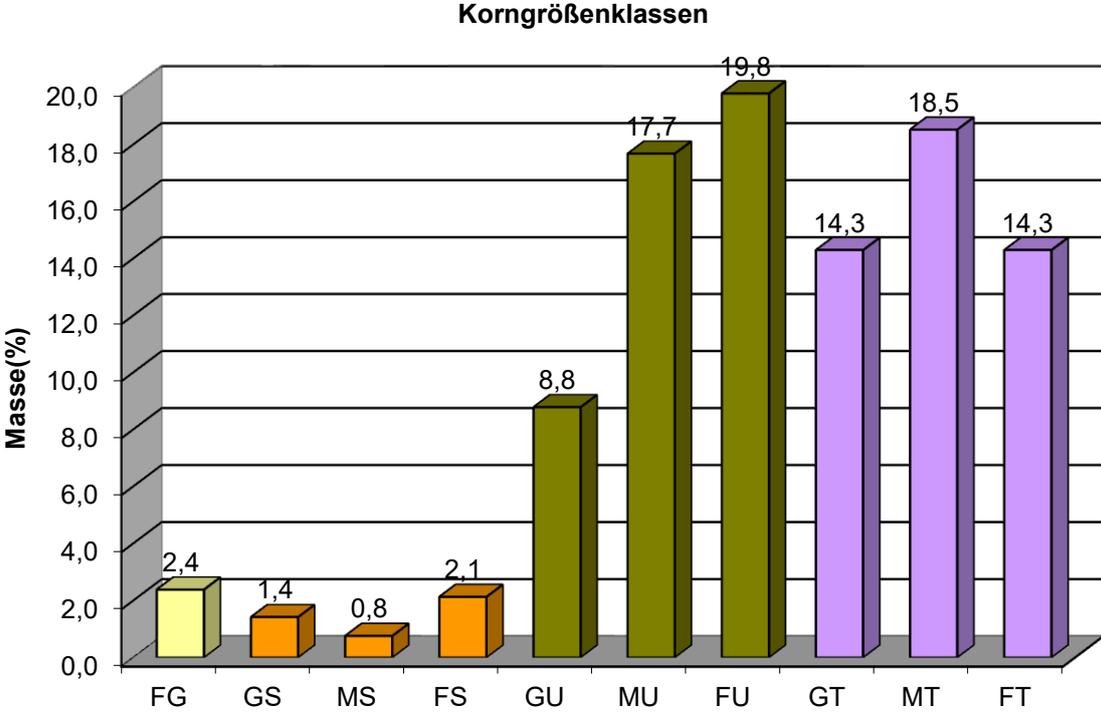
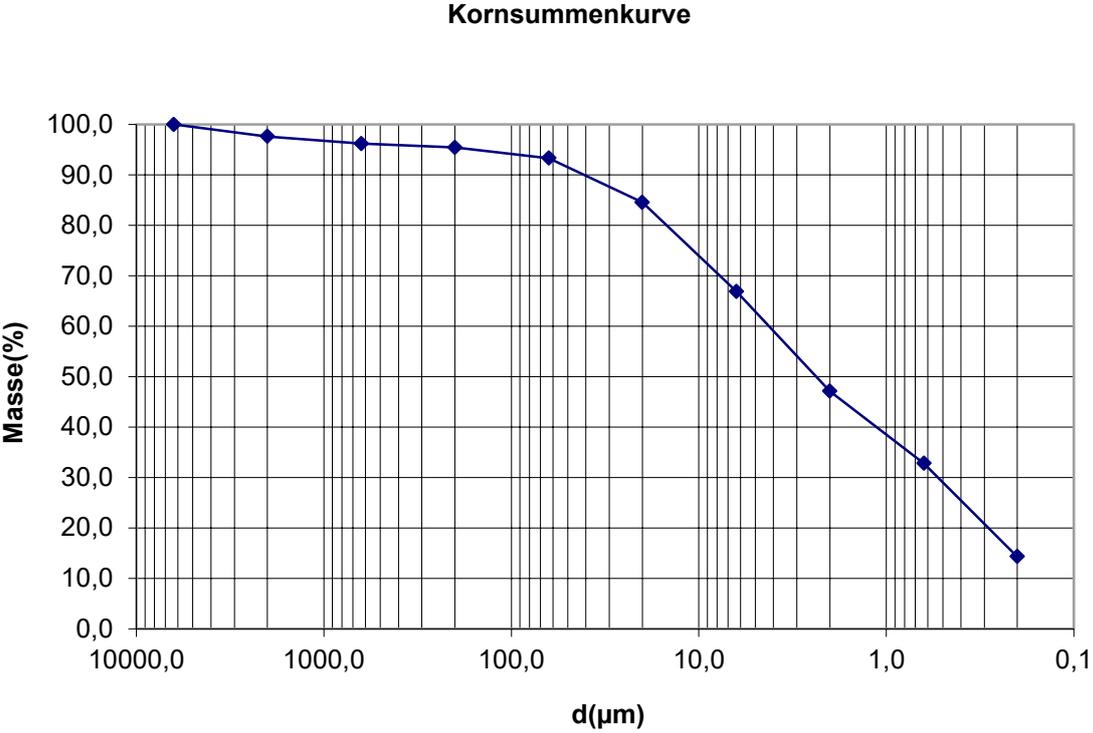
### SediGraph

Der SediGraph dient der Bestimmung der Kornfraktionen von 20 µm bis 0,2 µm. Das Gerät bedient sich dem Grundgesetz der Sedimentation (Gesetz von Stokes).

Eine durchsichtige Messzelle, in der die Probe absedimentiert, wird mit einem Röntgenstrahl von unten nach oben abgefahren. Der prozentuelle Anteil der jeweiligen Kornfraktion ergibt sich aus der Messung der Röntgenstrahlschwächung. (www.keramikinstitut.com, 2016)

Die Ergebnisse des SediGraphen und der Siebanalyse werden in der Kornverteilungskurve zusammengeführt und im nächsten Punkt gezeigt und erörtert.

Abbildung 15: Kornverteilungskurve



#### 4.1.1.1 Ergebnisse der Kornverteilung

Wie aus Abbildung 15 gut ersichtlich ist, ist der Feinkörneranteil am höchsten. Tabelle 1 soll einen Überblick über den prozentuellen Anteil der jeweiligen Bodenklasse geben.

**Tabelle 1: Bodenklassen**

Kiesanteil	Sandanteil	Schluffanteil	Tonanteil
2,4 %	4,3 %	46,2 %	47,1 %

Nach der Kornverteilungsanalyse ist es ersichtlich, dass es sich beim untersuchten Boden um einen schluffigen Ton (uT) handelt. Die Definition des Bodens ist für die spätere Zuordnung von bestimmten Eigenschaften, die jeder Bodentyp vorweist, von Vorteil.

#### 4.1.2 Mineralanalyse

Im sogenannten Röntgendiffraktometer werden eine Gesamtmineralanalyse und eine Tonmineralanalyse durchgeführt. Es handelt sich hierbei um ein Gerät, welches die Beugungsphänomene des Röntgenstrahls misst. Ein Röntgenstrahl, der auf einen Bodenkristall trifft, wird so gebeugt, dass Reflexe an diskreten Orten im Raum auftreten (www.chemie.de, 2016).

Das Gerät hat die Aufgabe, den Ort und die Intensität der Reflexe zu messen. Als Ergebnis wird eine Graphik, in der diese Reflexe aufgezeichnet werden, ausgegeben. Anhand dieser Graphik werden dann die Bestandteile der Probe bestimmen.

Auf den nachfolgenden Seiten wird die Auswertung der Röntgendiffraktometrierung dargestellt.

Abbildung 16: Gesamtmineralanalyse

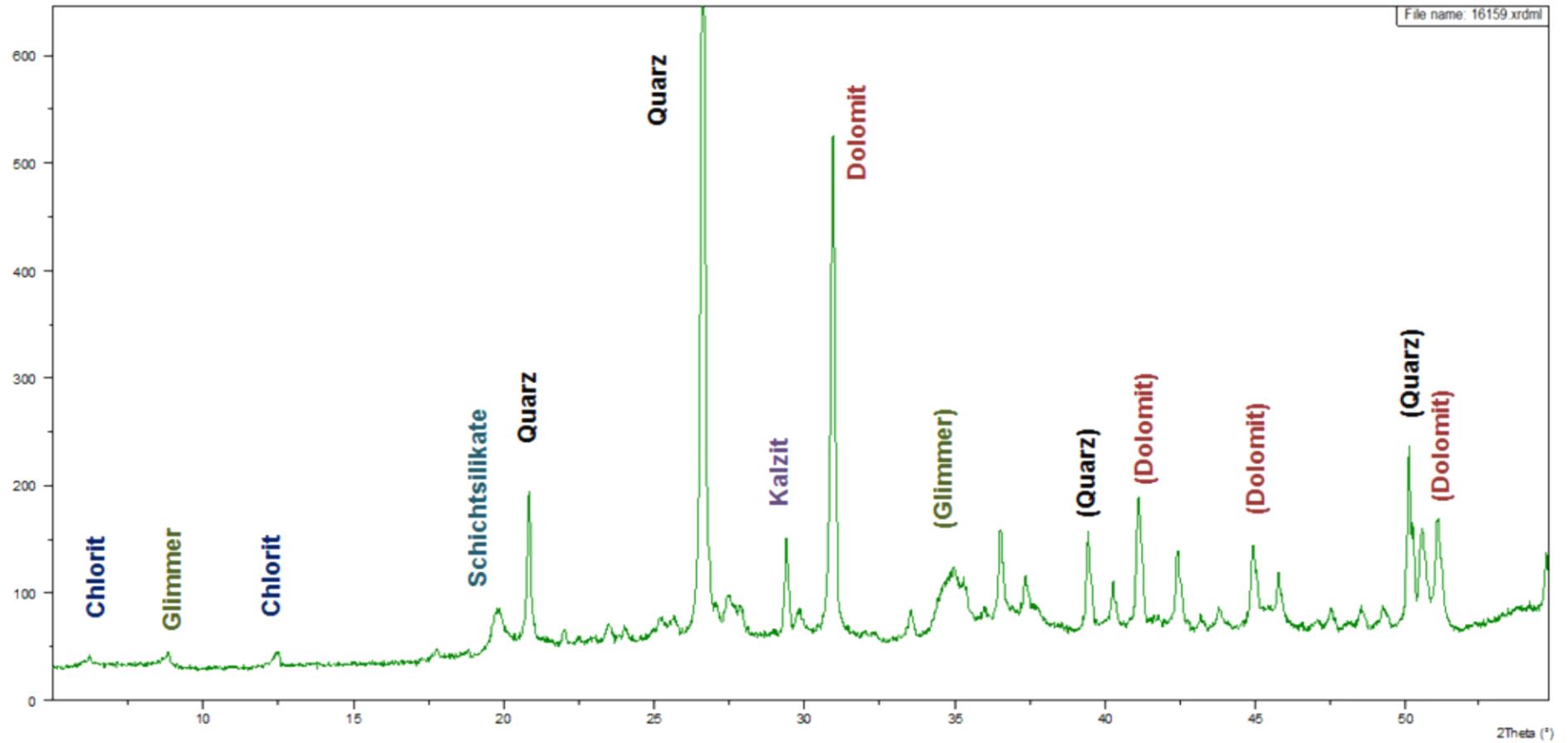
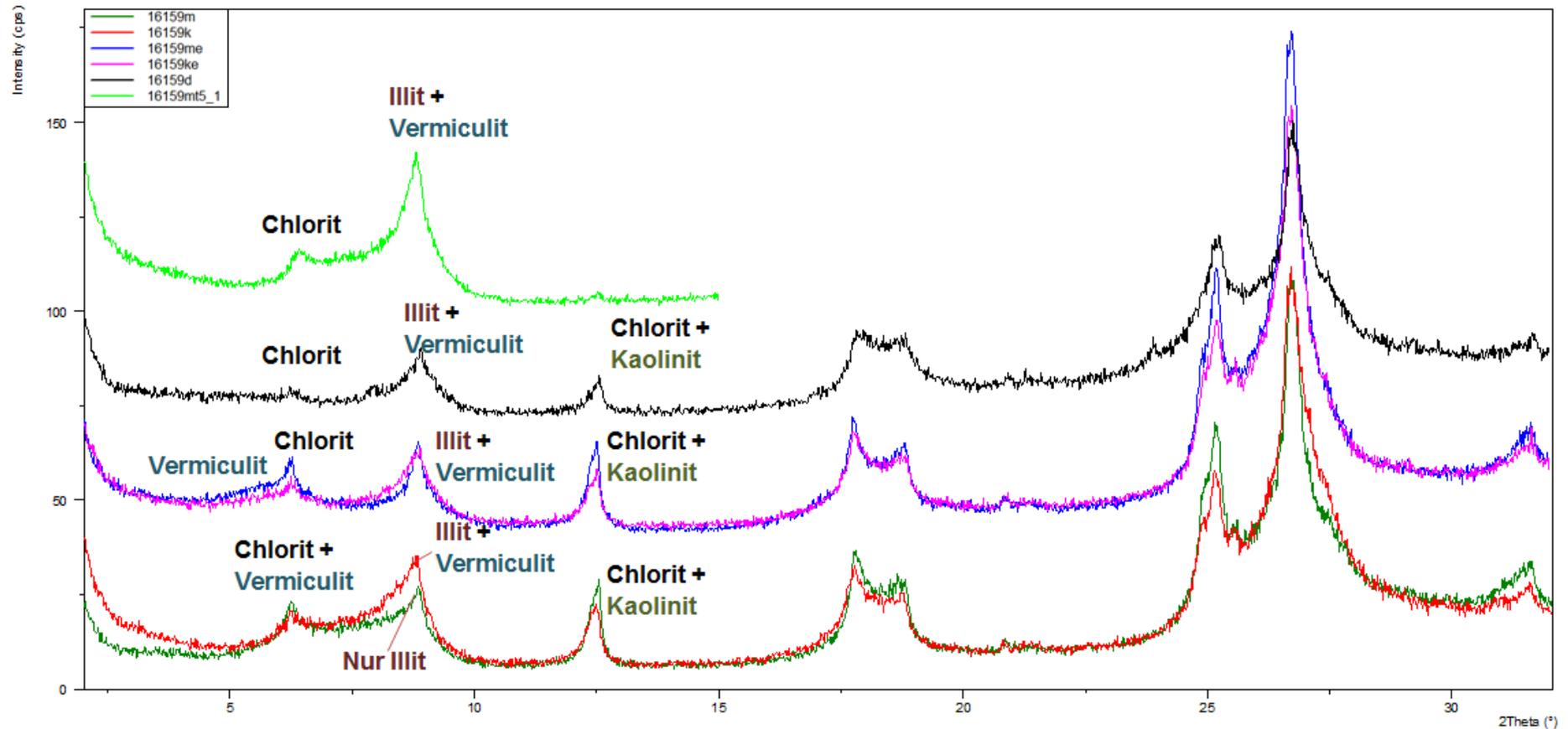


Abbildung 17: Tonmineralanalyse



- 16159m.....Plättchen mit Magnesium belegt
- 16159k.....Plättchen mit Kalium belegt
- 16159me.....Mg-Plättchen in Ethylenglycol eingelegt
- 16159ke.....K-Plättchen in Ethylenglycol eingelegt
- 16159d.....K-Plättchen in DMSO eingelegt
- 16159mt5.....MG-Plättchen bei 550° 2 Stunden getempert

Bei der Tonmineralanalyse ist es notwendig, die Tonfraktion des Probenmaterials, bevor sie in den Röntgendiffraktometer kommt, in Kalium und Magnesium einzulegen, damit diese besser zur Geltung gelangen.

#### 4.1.2.1 Auswertung des Röntgendiffraktometers

In der Abbildung 16 wird die Gesamtmineralanalyse gezeigt, in der die wichtigsten Bestandteile des Bodens aufgezeigt werden. Bei der Tonmineralanalyse ist es wichtig, die Häufigkeit der einzelnen Tonminerale zu bestimmen, da einige von ihnen quellfähig sein könnten. Quellfähig bedeutet, dass ein Tonmineral viel Wasser aufnehmen und speichern kann. Dabei nimmt das Volumen des Minerals mit zunehmendem Wassergehalt ebenfalls zu.

Schichtsilikate und hier wiederum vor allem die Dreischichtsilikate können quellfähige Eigenschaften aufweisen. Da diese in ihrer Zwischenschicht das Wasser speichern können. Höher wertige Schichtsilikate wie zum Beispiel das Vierschichtsilikat lagern in ihrer vierten Schicht Aluminium, Eisen oder Magnesium ab, welche Wasser abweisen würden.

**Tabelle 2: Tonmineralbestandteile**

Illit	Chlorit	Kaolinit	Vermiculit
59 %	21 %	8 %	12 %

Im untersuchten Boden befinden sich wie aus Tabelle 2 ersichtlich ein Zweisechichtsilikat (Kaolinit) und ein Vierschichtsilikat (Chlorit), welche wie bereits erklärt nicht für eine erhöhte Wasseraufnahme sprechen. Vorherrschendes Tonmineral ist das Dreischichtsilikat Illit. Wobei dieses in seiner Zwischenschicht Kalium ablagert, was wiederum wasserabweisend fungiert. Jedoch wurde auch 12 Prozent Vermiculit im Boden gefunden. Dieses Dreischichtsilikat ist sehr gut quellfähig. Das bedeutet, der Vermiculit fördert die Wasseraufnahme des Bodens erheblich. (www.hu-berlin.de, 2016)

## 4.2 Geotechnische Auswertung

### 4.2.1 Rahmenscherversuch

Für den Rahmenscherversuch werden die Geräte des Instituts für Geotechnik der BOKU Wien benutzt. Es handelt sich hierbei um vier Geräte, mit denen entweder frei beweglich oder parallel geschert werden kann. Bei den Versuchen wird das Probematerial in einen kreisförmigen Scherkasten mit einem Durchmesser von 10 cm eingebaut.

Die Normalkraft  $N$  wird pneumatisch (d. h. mithilfe von Druckluft) über einen Druckzylinder aufgetragen. Mithilfe eines Servomotors erfolgt der horizontale Vorschub, der die obere und untere Hälfte des Rahmens gegeneinander verschiebt. Somit entsteht erzwungenermaßen eine Gleitfläche. In dieser Gleitfläche werden die Spannung  $\sigma'$  und die Scherfestigkeit  $\tau_f$  über elektrische Kraftaufnehmer (Wägezelle) gemessen. Die Höhenänderung der Probe misst ein elektrischer Wegaufnehmer.

**Abbildung 18: Rahmenschervergeräte des Instituts für Geotechnik an der BOKU**

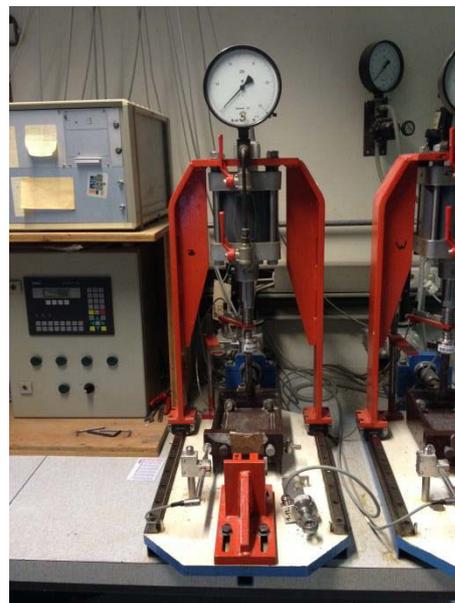


Abbildung 19: Rahmenschergerät (Wu, 2016)

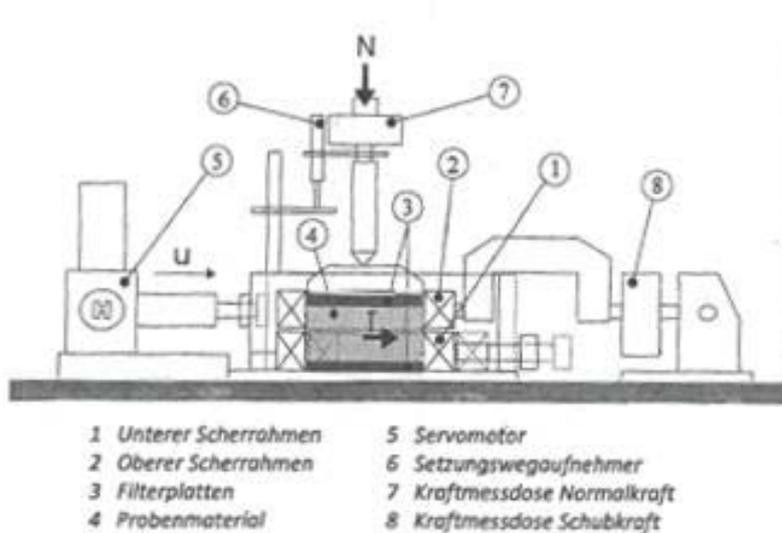
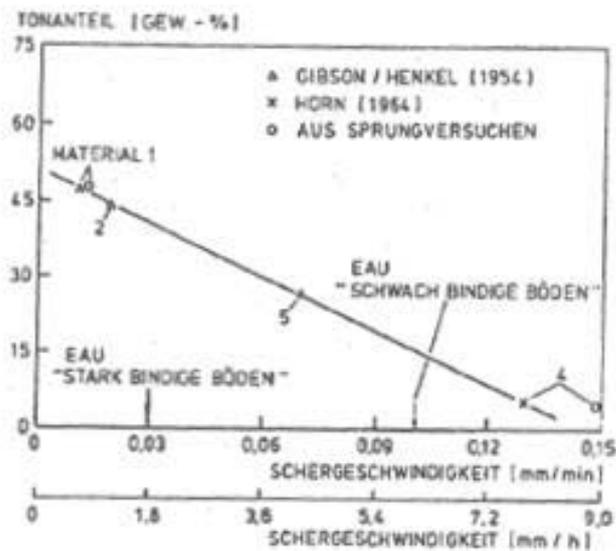


Abbildung 19 zeigt schematisch eines der 4 in Reihe stehenden Rahmenschergeräte. Jedes dieser 4 Geräte wird mit einer anderen Kraft beansprucht (50 kN, 100 kN, 200 kN, 400 kN).

Der Versuch hat 2 Phasen. Als erstes wird die Probe durch Aufbringung der Normalspannung belastet. Hierbei entsteht ein anisotroper Spannungszustand. In der zweiten Phase erfolgt nun das Verschieben der beiden Rahmen. Die Normalspannung bleibt in der zweiten Phase durchgehend konstant. Es ist an dieser Stelle darauf zu achten, dass es in senkrechter Richtung zu einer Stauchung oder einer Dehnung des Materials kommen kann. Würde der lotrechte Wegaufnehmer positive Werte messen, so zeigt dies auf eine Auflockerung hin, anderenfalls auf eine Verdichtung des Probematerials.

Die in der zweiten Phase stattfindende Scherung erfolgt mit einer Schergeschwindigkeit von 0,03 mm/min (1,8 mm/h). Bei der Wahl der Schergeschwindigkeit muss darauf geachtet werden, wie hoch der Tonanteil in der Probe ist. (Wu, 2016)

Abbildung 20: Wahl der Schergeschwindigkeit (Wu, 2016)



Es wird nur Probematerial  $\leq 4\text{mm}$  eingebaut. Dafür ist ein vorhergegangenes Sieben zwingend notwendig. Das gesiebte Material wird annähernd bei Fließgrenze eingebaut. Beim Einbau muss die Höhe des Probematerials genau abgemessen werden, da diese Information als Startgröße dem Messprogramm angegeben werden muss. Um ein Trocknen während des Versuches zu verhindern, wird der gesamte Rahmen mit Wasser umgeben.

Nach der Auswertung der Versuche werden die benötigten Parameter Kohäsion ( $c'$ ) und Reibungswinkel ( $\varphi'$ ) ausgegeben, welche nachfolgend erläutert sind.

#### 4.2.1.1 Ergebnis vom Rahmenscherversuch

Abbildung 21: Auswertung vom Rahmenscherversuch

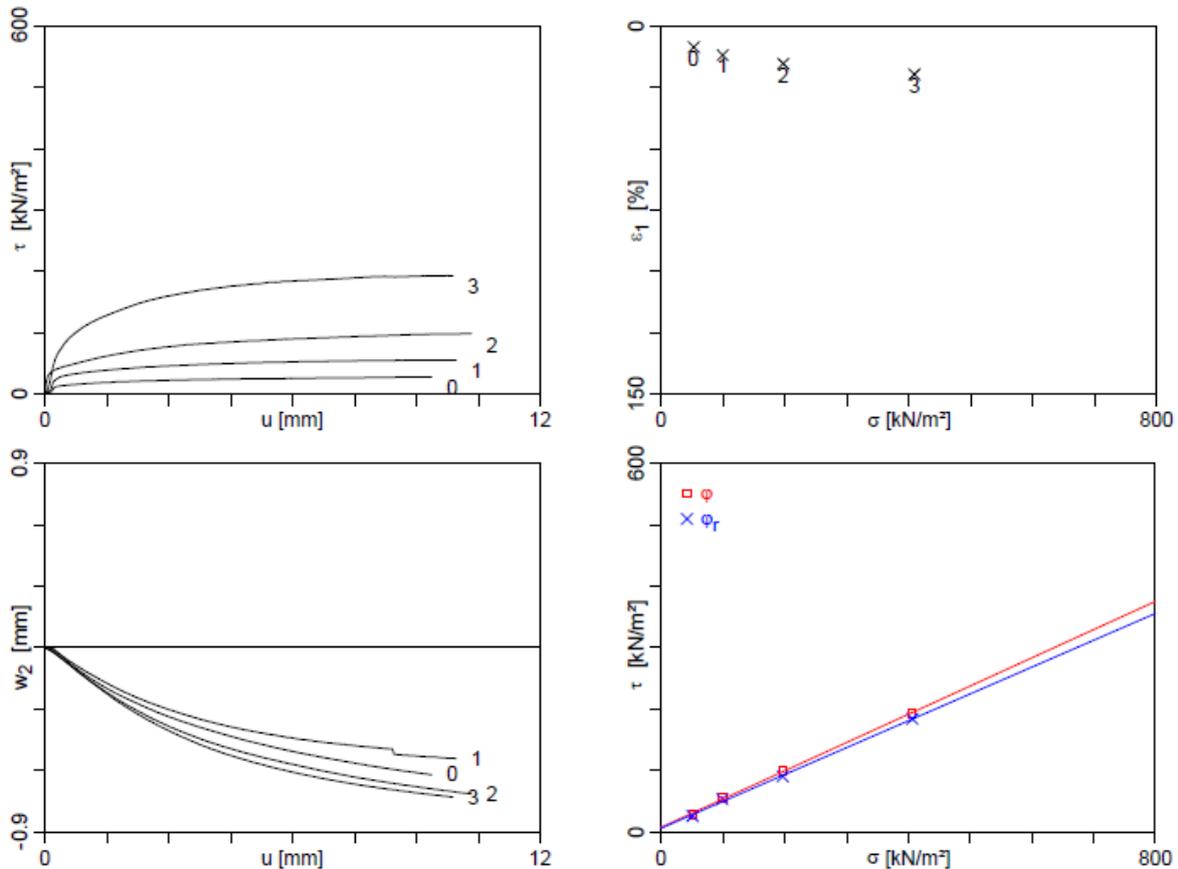


Abbildung 21 zeigt die Berechnungen vom Rahmenscherversuch, welche mit Hilfe einer Computersoftware durchgeführt wurden. Als Ergebnis der Berechnungen erhält man die Schergerade (rechts unten). Aus dieser können dann die effektive Kohäsion ( $c'$ ) mit 7,4 kN/m<sup>2</sup> und der effektive Reibungswinkel ( $\phi'$ ) mit 24,7° herausgelesen werden, welche für die Simulationen in Kapitel 5 benötigt wurden. Des Weiteren erhält man aus der blauen Gerade den Restreibungswinkel ( $\phi_r$ ), welcher aber für die nachfolgenden Berechnungen nicht benötigt wird. Als Vergleichsgrundlage zeigt Tabelle 3 typische Werte von unterschiedlichen Böden, welche anhand einer Vielzahl von Proben ermittelt wurde:

**Tabelle 3 Typische Kenngrößen für Kohäsion und Reibungswinkel (www.gb.bgu.tum.de, 2016)**

Nicht bindiger Boden	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m <sup>3</sup> ]
Sand	30 - 35	-
Kies	37,5	-
Naturschotter	40	-
Bindiger Boden	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m <sup>3</sup> ]
Ton	17,5 - 25	<10 - 25
Lehm	27,5 - 30	0-10
Schluff	27,5	-
Torf	15	5 - 10

#### 4.2.2 Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen

Ein Boden kann in folgende Zustände, welche er zum Beispiel infolge von Austrocknung durchläuft, gegliedert werden: flüssiger, bildsamer, halbfester und fester Zustand.

Die jeweiligen Grenzen zwischen den Zuständen sind: die Fließgrenze ( $w_L$ ), die Ausrollgrenze ( $w_P$ ) und die Schrumpfgrenze ( $w_S$ ).

Die Fließgrenze wird im Kapitel 3.4.5 erklärt.

Unter der Ausrollgrenze mit dem Wassergehalt  $w_P$  wird jene Grenze, die den Übergang von bildsamem zum halbfesten Zustand des Bodens kennzeichnet, verstanden. Bestimmen lässt sie sich, indem eine Probe auf einer wasseraufsaugenden, nicht fasernden Unterlage zu 3 mm dicken Walzen ausgerollt und wieder zusammengeknetet wird. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Probe bei 3 mm Dicke zerbricht. In diesem Moment muss die Probe schnell gewogen und danach in einem Ofen bei 107° Celsius getrocknet werden, damit der Wassergehalt an der Stelle bestimmt wird, an dem die Walze zerbröckelt ist. Der Versuch ist mindestens dreimal zu wiederholen, damit ein repräsentatives Ergebnis vorgewiesen werden kann.

Die Schrumpfgrenze mit dem Wassergehalt ( $w_S$ ) ist der Übergang vom halbfesten zum hartem Zustand des Bodens. Da die laboratorische Untersuchung dieses

Wertes sehr umständlich ist und der Wert im Zuge dieser Arbeit nicht benötigt wird, wird er aus einer empirischen Formel abgeleitet.

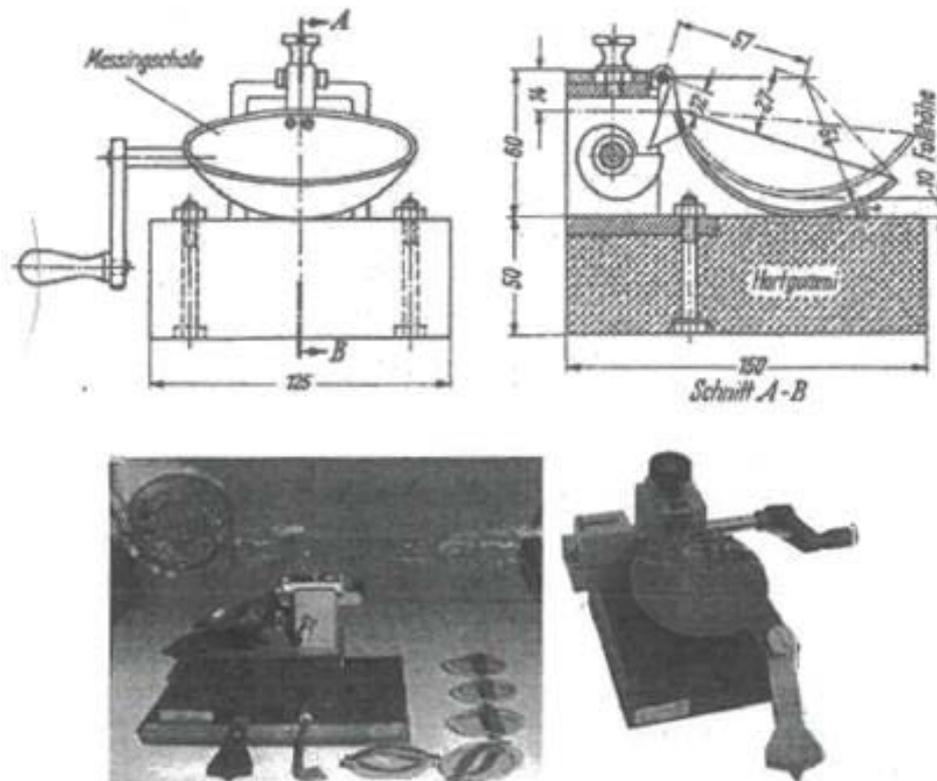
$$1 \quad w_S \approx w_L - 1,25I_P$$

Wobei  $w_S$  der Wassergehalt bei Schrumpfgrenze ist,  $w_L$  der Wassergehalt bei Fließgrenze und  $I_P$  ist die Plastizitätszahl (Bildsamkeitszahl), welche wiederum durch  $I_P = w_L - w_P$  bestimmt ist.

Bei Tonen liegt der Wassergehalt bei der Schrumpfgrenze in etwa bei 0,1 - 0,15. (Simmer, 1980)

Im Zuge dieser Arbeit kommt der Fließgrenze die größte Bedeutung zu. Jene wird mit Hilfe des Fließgrenzengerät nach Casagrande bestimmt. Ein solches Gerätes befindet sich am Institut für Geotechnik der BOKU Wien.

**Abbildung 22: Fließgrenzengerät nach Casagrande (Wu, 2016)**



Es wird eine Probemenge ( $< 0,4$  mm) von zirka 200 g gut durchgeweicht vorbereitet. Anschließend wird die Probe in die oben ersichtliche Schale gestrichen. Mit einem Furchenzieher wird senkrecht durch die Schale eine Furche gezogen. Der so befüllte Behälter wird in das Gerät eingehängt. Durch Drehen der Handkurbel mit zirka 2 U/s

wird die Schale so oft gehoben und wieder fallen gelassen, bis sich die zuvor erzeugte Furche auf einem Zentimeter wieder schließt. Danach wird die Zahl der benötigten Schläge dokumentiert.

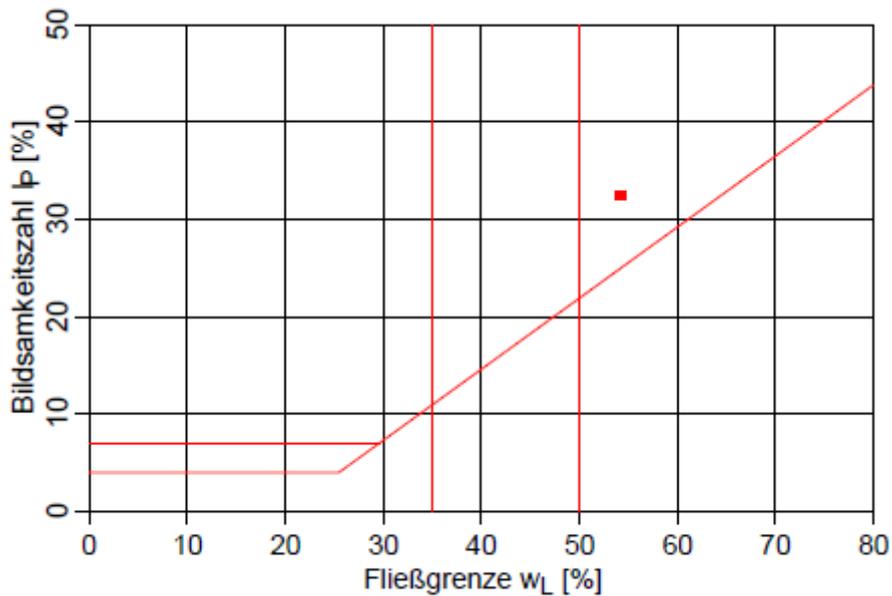
Dieser Vorgang muss mindestens 5-mal wiederholt werden, mit jeweils unterschiedlichem Wassergehalt. Die Anzahl der Schläge sollte sich immer im Bereich von 25 Schlägen befinden. Durchgänge, bei denen die Schlagzahl kleiner 10 oder größer 40 wäre, müssten verworfen werden.

Am Ende werden die Ergebnisse in einem Diagramm (siehe Anhang) mit halblogarithmischer Teilung eingetragen. War der Versuch erfolgreich, befinden sich alle Punkte im Diagramm auf einer Geraden. Die Fließgrenze ( $w_L$ ) ist nun jener Punkt bei Schlagzahl 25. Das bedeutet, es wird der Wassergehalt auf der Y-Achse, an der Stelle 25 der X-Achse, abgelesen. (Wu, 2016)

#### **4.2.2.1 Auswertung vom Atterberg Versuch**

Im nachfolgenden Bildsamkeitsdiagramm wird die Fließgrenze, die bei 54,2 % liegt, angezeigt. Das Diagramm lässt sich in 3 Teile gliedern. Der erste, welcher auf der x-Achse bis zu 35 % reicht, ist der schwach bildsame Bereich. Der mittlere Teil von 35-50 % ist der mittel bildsame Bereich. Zuletzt folgt der stark bildsame Bereich, jener in den auch der untersuchte Boden fällt. Die y-Achse zeigt die Bildsamkeitszahl an.

Abbildung 23: Bildsamkeitsdiagramm



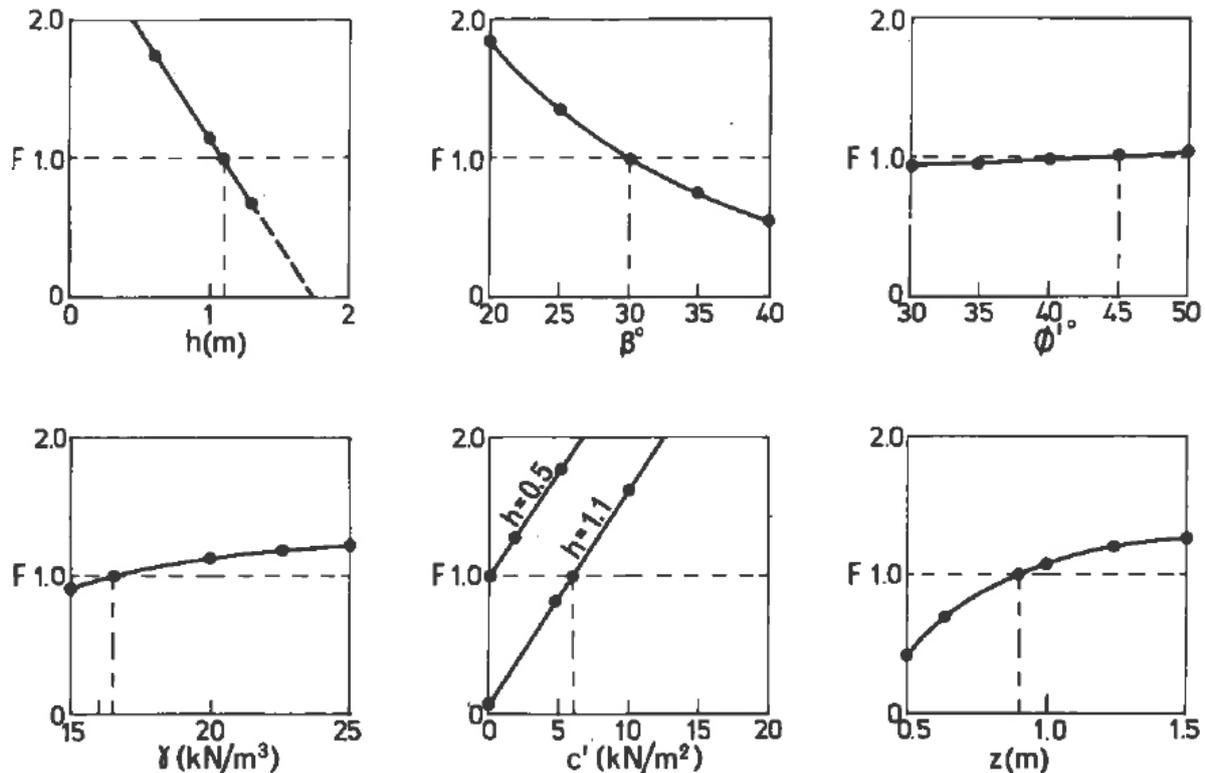
Die weiteren Ergebnisse des Atterberg Versuches sind die Ausrollgrenze ( $w_P = 21,8\%$ ) und die Schrumpfgrenze ( $w_S = w_L - 1,25I_P \rightarrow 54,2\% - 1,25 * 32,4\% \rightarrow w_S = 13,7\%$ ).

Die Bedeutung der Ergebnisse liegt darin, dass wenn ein Wassergehalt von unter 13,7 % vorliegt, der Boden sich im harten Zustand befinden würde. Darüber wäre er im halbfesten Zustand. Übersteigt der Wassergehalt die Ausrollgrenze mit 21,8 % spricht man vom bildsamen Boden. Wird noch mehr Wasser aufgenommen, sodass der Wassergehalt des Bodens über 54,2 % steigen würde, dann wäre von einem flüssigen Boden die Rede und dieser würde beginnen auseinander zu fließen.

### 4.3 Modified Kovács Model – MK-Model

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Rahmenscherveruch durchgeführt bei dem man die Kohäsion und den Reibungswinkel nur bei Vollsättigung erhält. Deshalb muss ein Verfahren gefunden werden, bei dem die gesammelten Parameter an den Sättigungsgrad des Bodens angepasst werden.

Abbildung 24: Einflussfaktoren auf die Böschungsstabilität (Selby, 1993)



$$z = 0.9; \phi' = 45^\circ; c' = 6 \text{ kN/m}^2; \gamma = 17 \text{ kN/m}^3; \gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3; h = 1.1; \beta = 30^\circ$$

Selby (1993) untersuchte dutzende Bodenproben und kam zu dem Beschluss, dass sich der FOS nicht bei jeder Variablenänderung signifikant ändert. Aus Abbildung 24 ist ersichtlich, welche Kennwerte durch ihre Änderung Einfluss auf den FOS haben. Dabei hat der Boden welche in Abbildung 24 als Beispiel dient eine Höhe von 1,1 m, eine Böschungsneigung von  $30^\circ$ , einen effektiven Reibungswinkel von  $45^\circ$ , eine Wichte von  $17 \text{ kN/m}^3$ , eine effektive Kohäsion von  $6 \text{ kN/m}^2$  und eine Dicke von  $0,9 \text{ m}$ . Auf Änderungen der eben genannten Parameter reagiert der FOS jedoch nur bei der Höhe, der Neigung, der Kohäsion und der Dicke des Bodens. Des Weiteren ändert sich bei diesen Kennwerten wiederum nur die Kohäsion mit dem Sättigungsgrad.

Obwohl es sich in dem abgebildeten Beispiel um nicht denselben Boden handelt wie in dieser Arbeit, wurde es trotzdem als sinnvoll gesehen, dass die Ergebnisse ausreichend genau wären, wenn die Kohäsion an die unterschiedlichen Sättigungsgrade angepasst wird. Dafür ist die von SORANZO (2013) gezeigte zusätzliche Kohäsion (Gl.4) zu bestimmen, welche zu der Kohäsion unter Vollsättigung addiert wird.

$$(4) \quad c_{\text{zus}} = \Psi * S^k * \tan(\varphi')$$

Wobei  $c_{\text{zus}}$  [kN/m<sup>2</sup>] die zusätzliche Kohäsion ist,  $\Psi$  [kPa] ist die Saugspannung oder Matrixpotential,  $S$  [%] ist der Sättigungsgrad,  $k$  [-] ist ein Faktor zwischen 1 und 3,  $\varphi'$  [°] ist der effektive Reibungswinkel.

Aus (4) ist ersichtlich, dass auch hier wieder die Saugspannung enthalten ist. Für die Ermittlung des Matrixpotentials wurde in dieser Arbeit das Modified Kovács Model von M. AUBERTIN (2003) gewählt, welches es ermöglicht, aus vorhandenen Parametern die Saugspannung bei unterschiedlichen Sättigungsverhältnissen zu erhalten.

Das MK-Model ist einfach zu bedienen und bietet eine gute Annäherung an die Wasserretentionskurve (WRK) für granulare und bindige Bodenmaterialien. Es erlaubt, dass die WRK unter Verwendung von einfachen Bodenkennwerten gezeichnet wird. Außerdem ist erwähnenswert, dass die Wasserretentionskurve eine Schlüsselfunktion zum Definieren von ungesättigtem Verhalten von Böden hat.

Bei tonigen Böden werden die Korndichte ( $\rho_s$ ), die Trockendichte ( $\rho_d$ ) und die Fließgrenze ( $w_L$ ) als Kennzahlen benötigt. Jene wurden im Zuge des Rahmenschersversuches und des Atterberg Versuches erhoben.

AUBERTIN (2003) gibt an, dass das MK-Model den  $h_{CO,P}$  als Referenzparameter verwendet, der die Beziehung zwischen dem volumetrischen Wassergehalt ( $\theta$ ) und dem Matrixpotential definiert. Das Model berücksichtigt, dass das Wasser auf zwei Arten im Boden gehalten werden kann. Eine dieser Möglichkeiten ist die Kapillarkraft, welche zur Kapillar-Sättigung ( $S_c$ ) führt, die andere ist die Adhäsionskraft, durch die es wiederum zur Sättigung durch Adhäsion ( $S_a$ ) kommt. AUBERTIN weist darauf hin, dass die  $S_c$  Komponente bei niedriger Saugwirkung von Bedeutung ist, hingegen bei hoher Saugwirkung die Dominanz der  $S_a$  Komponente steigt. (Aubertin, 2003)

Nachfolgend sind von (6) bis (9) die einzelnen Berechnungen der eben genannten Größen angeführt. Jedoch sind, bevor diese Gleichungen gelöst werden können, einige Parameter aus den Kennzahlen ( $\rho_s, \rho_d, w_L$ ) zu ermitteln.

$$(5) \quad e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

$$(6) \quad \xi \approx 0,15\rho_s$$

Dabei gibt  $e$  das Verhältnis zwischen Korndichte und Trockendichte an und  $\xi$  ist ein notwendiger Parameter für die Bestimmung von  $h_{CO,P}$ .

$$(7) \quad h_{CO,P} = \frac{\xi}{e} * w_L^{1,45}$$

Aus (7) geht der Referenzparameter  $h_{CO,P}$  hervor, der die Beziehung zwischen den volumetrischen Wassergehalt und dem Matrixpotential wiedergibt.  $\xi$  und  $e$  werden mit (5) und (6) ermittelt.

$$(8) \quad \Psi_r = 0,86 \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1,2} w_L^{1,74}$$

Wobei  $\Psi_r$  der Wassereintrittswert ist. Jener wird für (13) benötigt.

$$(9) \quad S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a^* (1 - S_c)$$

$$(10) \quad S_c = 1 - [(h_{CO,P}/\Psi)^2 + 1]^m e^{-m(h_{CO,P}/\Psi)^2}$$

$$(11) \quad S_a^* = 1 - (1 - S_a)$$

$$(12) \quad S_a = a_c C_\Psi \frac{(h_{CO,P}/\Psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\Psi/\Psi_n)^{1/6}}$$

mit

$$(13) \quad C_\Psi = 1 - \frac{\ln(1+\Psi/\Psi_r)}{\ln(1+\Psi_0/\Psi_r)}$$

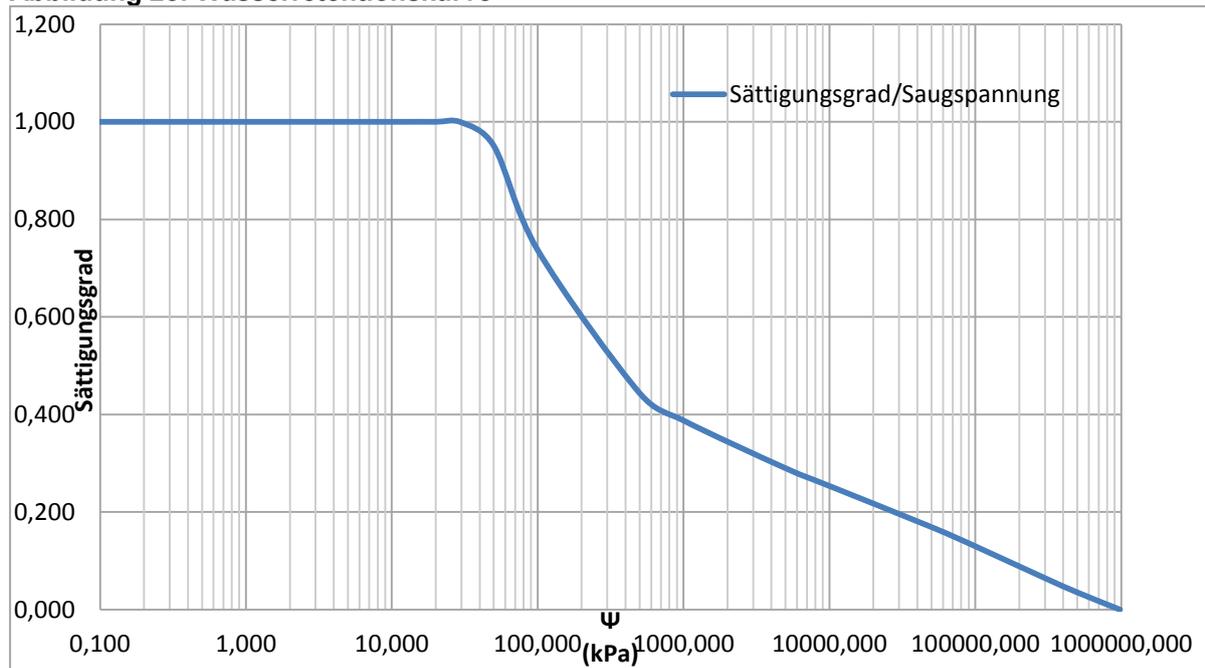
Gleichung (9) drückt den totalen Sättigungsgrad aus, indem es die kapillaren und adhäsiven Komponenten, gegeben durch (10) bis (13), kombiniert. Die in diesen Formeln verwendeten Variablen  $m$  und  $a_c$  sind Materialparameter. AUBERTIN wählte

für  $m = 3 \times 10^{-5}$  und für  $a_c = 7 \times 10^{-4}$  bei plastischen/tonigen Boden. (Aubertin, 2003)

Die Ergebnisse des MK-Modells, die Wasserretentionskurve und die daraus abgeleiteten Parameter sind im nachfolgendem Kapitele erläutert.

#### 4.3.1 Resultate des Modified Kovács Modells

**Abbildung 25: Wasserretentionskurve**



Die hier gezeichnete WRK gibt Aufschlüsse auf die gesuchten Parameter. Im Anhang ist die gesamte Ergebnistabelle angegeben. Jedoch ist nicht jeder Punkt der Grafik relevant. Der benötigte Bereich beginnt bei einer Sättigung  $< 1$  und endet an der Stelle, an der eine Saugspannung von 1500 kPa überschritten wird.

Der Grund dafür liegt am permanenten Welkepunkt. Dieser gibt den nicht mehr für Pflanzen verfügbaren Bodenwassergehalt an. Er liegt bei 1500kPa (15bar) und beschreibt jenen Punkt, an dem die Pflanzen, da sie kein Wasser mehr aus den Boden beziehen können, irreversibel zu welken beginnen. (Düntgen, et al., 2003)

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse des relevanten Bereiches angeführt.

**Tabelle 4: Ergebnisse MK-Model**

$\Psi$	$C_{\Psi}$	$S_c$	$S_a$	$S_a^*$	$S_r$
50	1,000	0,865	0,636	0,636	0,951
100	1,000	0,394	0,567	0,567	0,737
500	0,998	0,020	0,433	0,433	0,444
1000	0,996	0,005	0,385	0,385	0,388

Aus Tabelle 4 ergeben sich die zu untersuchenden Sättigungsgrade von 95,1 %, 73,7 %, 44,4 % und 38,8 %.

Die Formel von SORANZO E. ergibt zu jedem Sättigungsgrad, mit Hilfe der Saugspannung, die gesuchte zusätzliche Kohäsion. Für den Faktor k in der Formel wurde in dieser Arbeit der Wert 2,4 gewählt. Denn der Wert wurde so lange variiert, bis die Ergebnisse in den Simulationen passende FOS geliefert haben.

Das bedeutet, es wurden Simulationen durchgeführt, bei denen die eingegebene Kohäsion jener eines relativ trockenen Bodens entsprochen hat und danach wurde ein Wasserspiegel, der mit einer vollständige Sättigung gleichgesetzt werden kann, in die Simulation eingetragen. Ist bei dieser Simulation und bei der Simulation mit einem Kohäsionswert von 7,4 kN/m<sup>2</sup> (Laborwert – effektive Kohäsion bei vollständiger Sättigung) der identische Factor of Safety herausgekommen, konnte der Faktor k als korrekt angesehen werden.

Die Ergebnisse für die zusätzliche Kohäsion sind:

- Sättigungsgrad 95,1 % → **20,38 kN/m<sup>2</sup>**
- Sättigungsgrad 73,7 % → **22,12 kN/m<sup>2</sup>**
- Sättigungsgrad 44,4 % → **32,71 kN/m<sup>2</sup>**
- Sättigungsgrad 38,8 % → **47,31 kN/m<sup>2</sup>**

In nachfolgender Tabelle werden nochmal alle geotechnischen Kennwerte, welche für die Simulationen benötigt wurden und größtenteils im Labor bestimmt worden sind, aufgelistet:

**Tabelle 5: Verwendete geotechnische Parameter**

Sättigungsgrad [%]	Reibungswinkel [°]	Zusätzliche Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]	Verwendete Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]	Wichte* [kN/m <sup>3</sup> ]
100	24,7	-	7,4	27
95,1	24,7	20,38	27,8	27
73,7	24,7	22,12	29,5	27
44,4	24,7	32,71	40,4	27
38,8	24,7	47,31	54,7	27

\* Fellin (2007) gibt Standardwerte für die Wichte als typischen Bodenwert an.

## 4.4 Stabilitätsberechnungen

Stabilitätsberechnungen kontrollieren, ob die vorzufindenden Spannungen im Gelände innerhalb eines zulässigen Bereiches liegen. Sie nehmen einen Bruchmechanismus an, der eine Vorhersage über die Schubkräfte  $\tau$  in der Bruchfläche trifft. Diese Schubkraft wird dann mit der Scherfestigkeit der Böschung  $\tau_f$  verglichen und bringt als Ergebnis den sogenannten Sicherheitsfaktor („Factor of Safety“ - FOS). (Lang, et al., 2002)

$$(14) \quad FOS = \frac{\tau_f}{\tau} \rightarrow \frac{\text{ertragbare Belastung}}{\text{herrschende Belastung}}$$

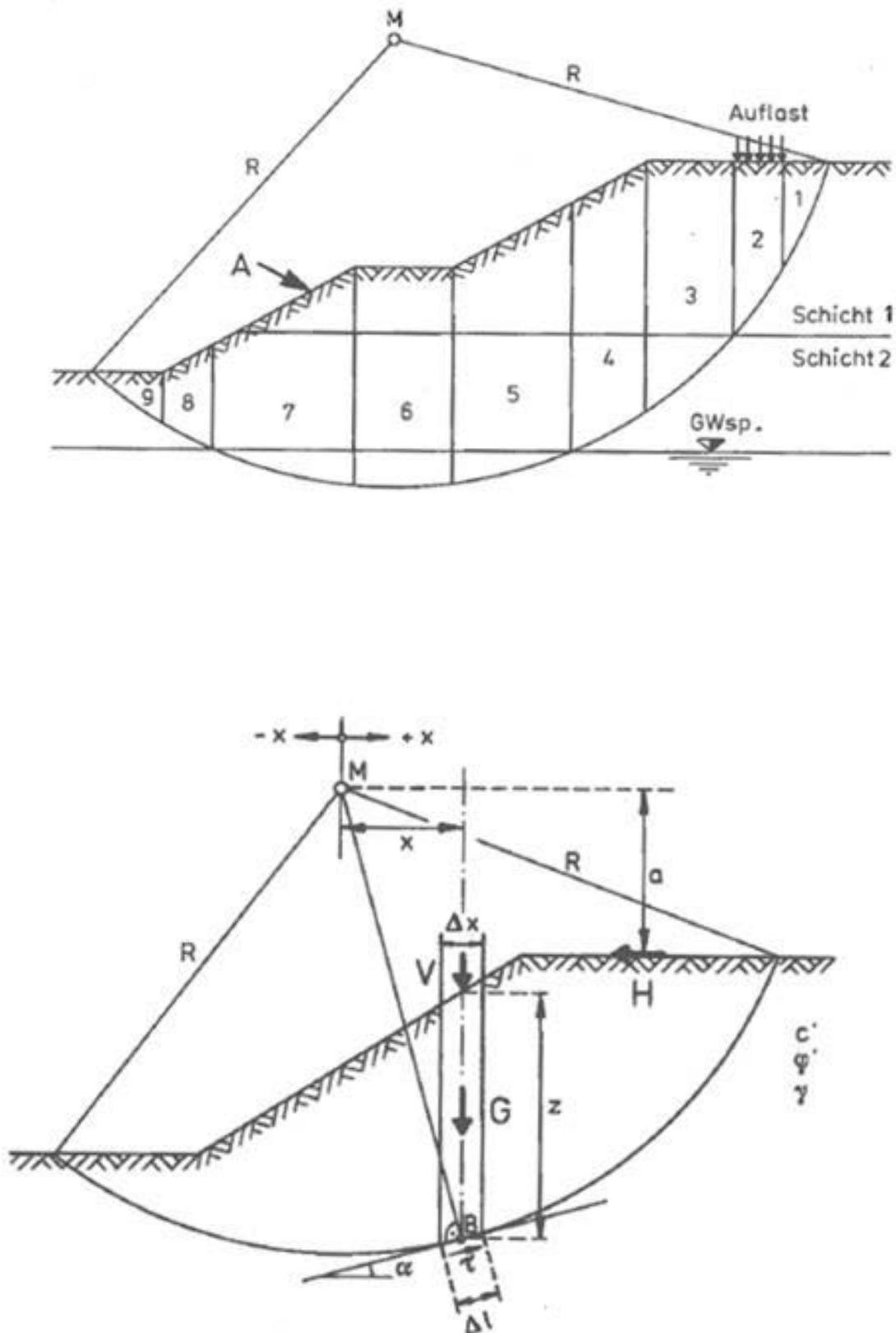
Die Qualität der Aussagekraft des Factor of Safety hängt von der Zahl der Informationen, die es über das Gelände gibt oder im Labor bestimmt worden sind, ab. Mit dem Simulationsprogramm „SLIDE“, entwickelt von „Rocscience“, wurden in der gegenständigen Diplomarbeit die Stabilitätsberechnungen durchgeführt.

### 4.4.1 „SLIDE“

„SLIDE“ ermöglicht es, eine Vielzahl an Stabilitätsberechnungen schnell durchzuführen. Dafür legt das Programm eine Menge an Bruchflächen über die zuvor definierte Böschung und scheidet dann den niedrigsten Sicherheitsfaktor aus. Denn nur dieser ist von Bedeutung. Dabei ist es möglich, eine Menge von Kriterien und Parametern zu definieren. Denn das Ergebnis ist natürlich umso genauer, je genauer die Eingangsdaten vorliegen.

Das Programm wendet für seine Stabilitätsberechnungen eine Fülle an Berechnungsmethoden aus der Literatur an. Dabei machen sich diese Methoden allesamt die Idee, dass die Bruchfläche in einzelne Lamellen zerlegbar ist, zu nutze. Da es zu kompliziert wäre, das Gleichgewicht geschlossen anzuschreiben. Das Ergebnis der Stabilitätsberechnung liefert dann die Summe aller Lamellen.

Abbildung 26: Gleitfläche und sinnvolle Lamelleneinteilung (Lang, et al., 2002)



Jedoch unterscheiden sich diese Methoden darin, dass in manchen die Lamellen untereinander interagieren, bei den anderen jedoch nicht. Außerdem erfüllen sie das

Kräftegleichgewicht in horizontaler und/oder vertikaler Richtung aber nicht jede Methode erfüllt das Momentengleichgewicht. (Lang, et al., 2002)

**Abbildung 27: Aufgliederung der Berechnungsmethoden (rocscience, 2002)**

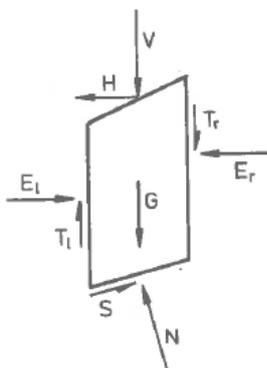
Method	Satisfaction of Force Equilibrium		Satisfaction of Moment Equilibrium
	Horizontal	Vertical	
Ordinary Method	No	No	Yes
Bishop Simplified	No	Yes	Yes
Janbu Simplified	Yes	Yes	No
Janbu Corrected	Yes	Yes	No
Corps of Engineers 1 & 2	Yes	Yes	No
Lowe and Karafiath	Yes	Yes	No
GLE	Yes	Yes	Yes
Spencer	Yes	Yes	Yes

In Abbildung 27 sind die verwendeten Methoden aus der Literatur gezeigt und welche Möglichkeiten jedes dieser Verfahren mit sich bringt. (rocscience, 2002)

#### 4.4.1.1 Ordinary/Fellenius Methode

Ordinary/Fellenius-Methode auch bekannt als die schwedische Methode der Stabilitätsberechnung berechnet den FOS nur über das Momentengleichgewicht. Die horizontalen (H) und vertikalen (E, T) Kräfte auf die Lamellen bleiben unberücksichtigt. Die Ermittlung der Kräfte in Richtung der Gleitfläche (S) und Normal dazu (N) erfolgt über die Auflast (V) und dem Eigengewicht des Bodens (G). (Lang, et al., 2002)

**Abbildung 28: Lamelle mit angreifenden Kräften (Lang, et al., 2002)**



Die dazugehörige Formel lautet:

$$(15) \quad \text{FOS} = \frac{\sum c' \cdot \Delta l + [(G+V) \cdot \cos \alpha - \Delta u \Delta l] \tan \varphi'}{\sum [(G+V) \sin \alpha]}$$

Mit  $c'$  der effektiven Kohäsion,  $\Delta l$  die Länge einer Lamelle entlang der Bruchfläche,  $G$  das Eigengewicht,  $V$  die Auflast,  $\alpha$  die Neigung von  $\Delta l$ ,  $\Delta u$  dem Porenwasserdruck und  $\varphi'$  der effektive Reibungswinkel.

#### 4.4.1.2 Das vereinfachte Verfahren nach Bishop

Beim Verfahren nach Bishop wird wie bei der schwedischen Methode das Momentengleichgewicht von Starrkörperrotationen berücksichtigt. Jedoch beinhaltet seine Berechnung auch die Lamellen-Schnittkräfte  $E$ ,  $T$  (siehe Abbildung 28). (Lang, et al., 2002)

#### 4.4.1.3 Das vereinfachte Verfahren nach Janbu

Das Verfahren nach Janbu berechnet keine Starrkörperrotationen sondern translatorische Bewegungen. Dabei wird die Rotation vernachlässigt. Das bedeutet, Janbu ist besser für Translationsrutschungen als für Rotationsrutschungen geeignet. (Lang, et al., 2002)

$$(16) \quad \text{FOS} = \frac{\sum [c' \Delta x + (G+V-u \Delta x) \tan \varphi'] \frac{1}{n_\alpha}}{\sum [(G+V) \tan \alpha] + H}$$

Wobei  $\Delta x$  die Breite der Lamelle und  $H$  die horizontale Kraft ist.  $n_\alpha$  wird iterativ bestimmt, mit  $n_\alpha = \cos^2 \alpha \left[ 1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha}{\text{FOS}} \right]$

#### 4.4.1.4 Korrigiertes Janbu Verfahren

Bei dieser Methode wird das vereinfachte Janbu Verfahren mit einer Komponente  $f_0$  multipliziert. Dadurch sollte im Vergleich zum einfachen Janbu Verfahren die Möglichkeit bestehen, Rotationsrutschungen zu simulieren.

$$(17) \quad f_0 = 1 + b_1 \left[ \frac{d}{L} - 1,4 \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right]$$

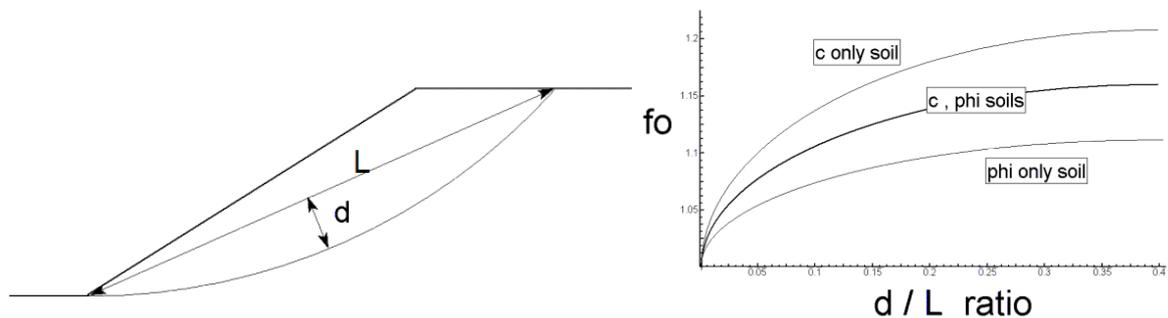
$b_1$  ist ein von Bodentyp abhängiger Wert.

$b_1 = 0,69$  bei Böden nur mit Kohäsion

$b_1 = 0,31$  bei Böden nur mit Reibungswinkel

$b_1 = 0,50$  bei Böden mit Kohäsion und Reibungswinkel

**Abbildung 29: Erklärung des korrigierten Janbu Verfahrens (RocScience, 2016)**



Die Abbildung 27 erklärt die Variablen  $d$  und  $L$ .

#### 4.4.1.5 Corps of Engineers 1 & 2

Das Corps of Engineers (COE) Verfahren berechnet den FOS mit dem Kräftegleichgewicht für nicht kreisförmige Rutschflächen. Der Gradient für die Kraft, der zwischen den Lamellen wirkt, wird geschätzt. Dabei verwendet das COE 1 die Geländeneigung und das COE 2 die Steigung einer gedachten Linie zwischen dem Schnittpunkt vom Kopfpunkt und Fußpunkt des Geländes und der Bruchfläche. (Abramson, 2002) Den Erfahrungen nach gibt die COE Methode höhere Sicherheitsfaktoren als andere (genauere) Methoden.

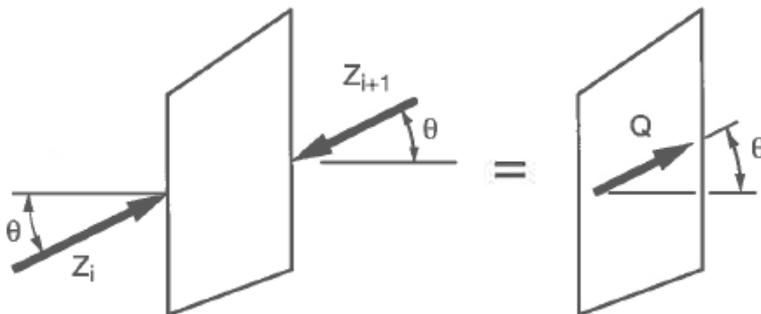
#### 4.4.1.6 Lowe-Karafiath Methode

Für die Horizontalkraft verwendet die Lowe-Karafiath Methode den Mittelwert von Boden­neigung und Gleitfläche. Die Neigung jeder Lamelle hängt von der Geometrie des Lamellenkörpers ab und unterscheidet sich deshalb von Lamelle zu Lamelle. Das Verfahren ist für jede Art von Rutschfläche anwendbar (Rotations- oder Translationsrutschung).

Obwohl dieses Verfahren nur Kräftegleichgewicht beinhaltet, sind seine Ergebnisse nahe jenen, die mit vollständigem Gleichgewicht (Momenten- und Kräftegleichgewicht) rechnen. Es gilt als das genaueste Verfahren von denen, die nur mit Kräftegleichgewicht rechnen. (Duncan, 2005)

#### 4.4.1.7 Spencer Methode

Abbildung 30: Parallel wirkende Kraft (Duncan, 2005)



Das Verfahren verfolgt den Ansatz, dass alle Kräfte zwischen den Lamellen parallel verlaufen. Die Richtung dieser Kraft ist unbekannt und ist eine Unbekannte in der lösenden Gleichungsgleichung. Des Weiteren geht Spencer davon aus, dass die Normalkraft in der Mitte jeder Lamellenbasis wirkt.

Da die Kräfte alle parallel verlaufen, kann die Ermittlung des Momentengleichgewichtes und des Kräftegleichgewichtes über die gesamte Masse vorgenommen werden.

Die aus Gleichung (18) hervorgehende Variable  $Q_i$  beschreibt den Unterschied zwischen der Zwischenlamellenkraft  $Z_i$  und  $Z_{i+1}$ . Sie zeigt demnach das Kräftegleichgewicht. (Duncan, 2005)

$$(18) \quad \sum Q_i = 0$$

$$(19) \quad Q_i = Z_i - Z_{i+1}$$

Das Momentengleichgewicht für alle Lamellen kann durch Gleichung (20) ausgedrückt werden. Dabei wird das kartesische Koordinatensystem angewendet. Natürlich muss immer der gleiche Bezugspunkt gewählt werden.

$$(20) \quad \sum Q_i * (x_{bi} * \sin\theta - y_{Qi} \cos\theta) = 0$$

Wobei  $x_{bi}$  die horizontale Komponente ist,  $\theta$  ist die Richtung der wirkenden Kraft zwischen den Lamellen,  $y_{Qi}$  ist die vertikale Komponente vom Zentrum der Lamelle aus, welche mit  $y_{bi}$  ausgedrückt werden kann:

$$y_{Qi} = y_{bi} + \frac{M_{ai}}{Q_i * \cos\theta}$$

$M_{ai}$  wird durch alle Kräfte in der Mitte der Lamellenbasis erzeugt.

Die Kraft  $Q_i$  beinhaltet alle bekannten vertikalen  $F_v$  und horizontalen  $F_h$  Kräfte. Kombiniert mit den Scherparametern, ergibt sich Gleichung (21).

$$(21) \quad Q_i = \frac{-F_v \sin\alpha - F_h \cos\alpha - \left(c' \frac{\Delta l}{FOS}\right) + (F_v \cos\alpha - F_h \sin\alpha + u \Delta l) \left(\tan \frac{\varphi'}{FOS}\right)}{\cos(\alpha - \theta) + \left[\sin(\alpha - \theta) \tan \frac{\varphi'}{FOS}\right]}$$

Dabei ist  $\alpha$  die Neigung der Bruchfläche bei der Lamelle,  $c'$  die effektive Kohäsion,  $\Delta l$  die tatsächliche Länge der Lamelle,  $u$  der Porenwasserdruck,  $\varphi'$  der effektive Reibungswinkel und  $\theta$  ist die Richtung der wirkenden Kraft zwischen den Lamellen.

Wie die oben gezeigten Formeln gut erkennbar machen, sind die beiden Unbekannten in den Formeln, der Factor of Safety und die Neigung der Zwischenlamellenkraft, nicht durch diese Gleichungen zu lösen. Deshalb wird für die Gleichungen (18-21) ein sogenanntes „Versuch und Irrtum“-Verfahren (trial-and-error procedure) angewendet. Dabei werden solange Werte eingesetzt, bis die Ergebnisse vielversprechend sind. Das Verfahren funktioniert ähnlich einem iterativen Prozess. Die Spencer Methode wurde für kreisförmige Stabilitätsberechnungen entwickelt, jedoch kann es sehr einfach auf nicht kreisförmige übertragen werden. (Duncan, 2005)

#### 4.4.1.8 Morgenstern-Price/General Limit Equilibrium (GLE) Methode

Wie auch das Verfahren nach Spencer beinhaltet diese Methode beide Gleichgewichtsberechnungen, das Momentengleichgewicht sowie auch das Kräftegleichgewicht. Morgenstern und Price implementieren eine Funktion, die die Beziehung zwischen den Schubkräften und den Normalkräften widerspiegelt.

$$(22) \quad X = \lambda f(x)E$$

Wobei  $X$  die vertikale Kraft zwischen den Lamellen ist und  $E$  die horizontale. Der Parameter  $\lambda$  ist ein Prozentsatz, um den die Schubkraft reduziert wird.

Der Unterschied zwischen der Spencer- und der Morgenstern/Price-Methode liegt darin, dass Spencer eine konstante Neigung der Krafrichtung annimmt, hingegen Morgenstern und Price eine skalierende Neigung annehmen. Würde aber  $f(x)$  konstant sein, dann sind die Resultate von Morgenstern und Price gleich jenen der Spencer Methode. (Duncan, 2005), (Abramson, 2002)

Abbildung 31: Formen der Funktion  $f(x)$  der GLE-Methode (Abramson, 2002)

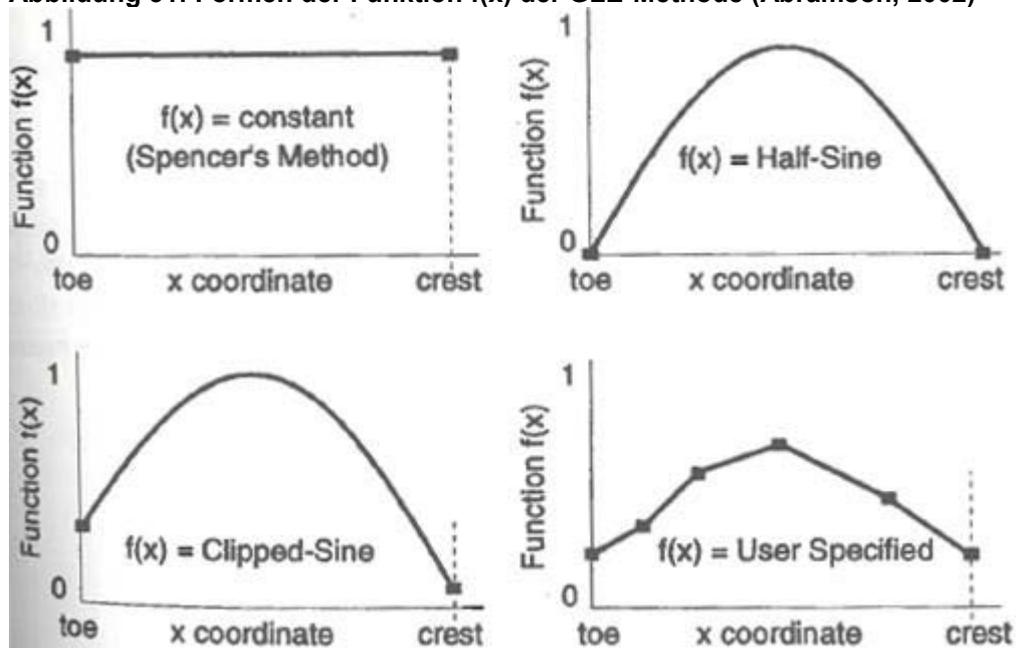
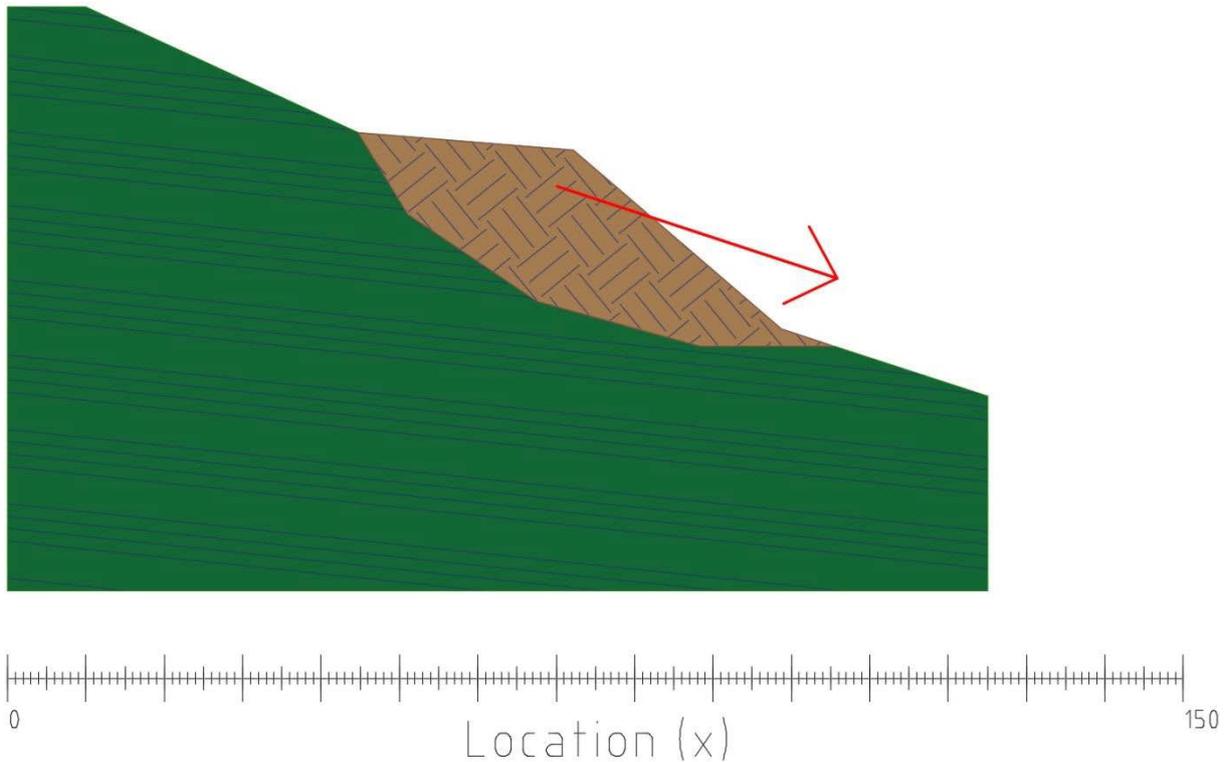


Abbildung 31 zeigt verschiedene Typen und Formen der Funktion  $f(x)$ .

## 5 Ergebnisse und Interpretation

### 5.1 Fragestellung 1

Abbildung 32: Schematische Skizze zu Fragestellung 1



Im nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen Simulationen von „SLIDE“ gezeigt und interpretiert. Dabei wird versucht, die Frage, ab welchem Sättigungsgrad die Böschung instabil wird, zu beantworten. Abbildung 32 zeigt die schematische Skizze zu diesen Überlegungen. Dabei zeigen die blauen Linien die Bodendurchfeuchtung und die braune Masse ist die instabile Böschung.

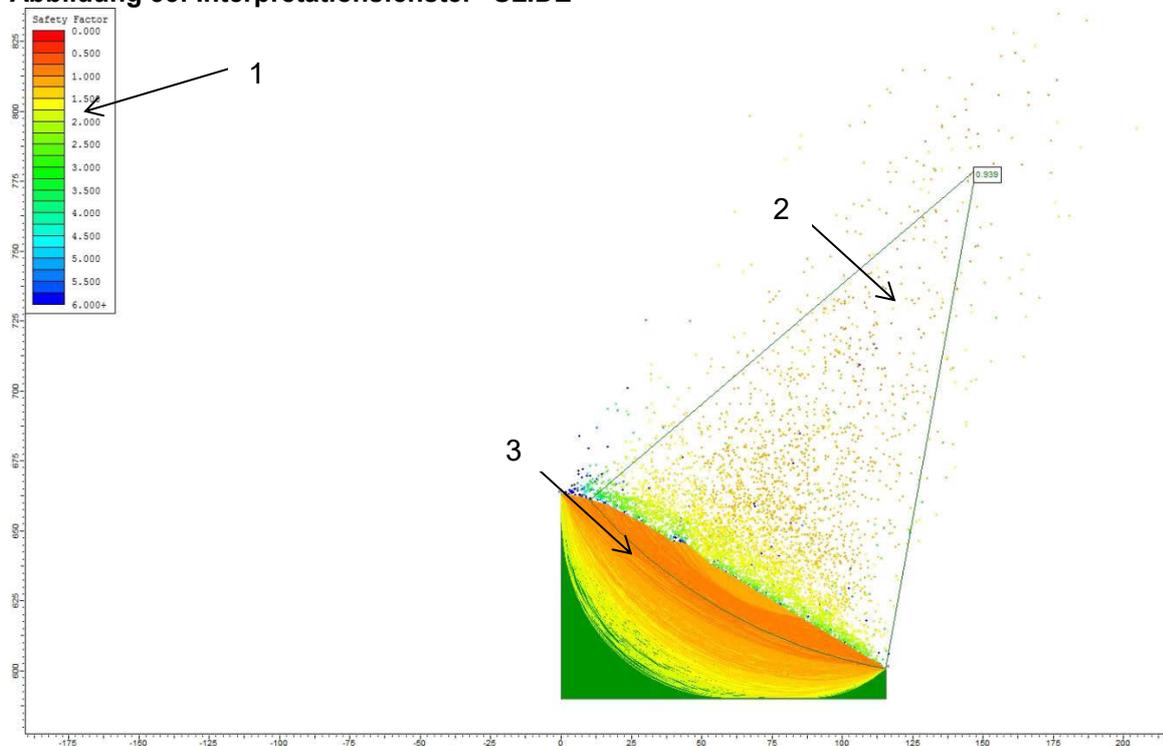
Es wurden Rotations- und Translationsrutschungen getrennt voneinander untersucht. Eine kombinierte Betrachtung ist mit dem Programm nicht möglich.

Für die Interpretation ist es wichtig zu verstehen, wie „SLIDE“ seine Ergebnisse präsentiert. Das Programm öffnet nach seinen Berechnungen mit dem in Kapitel 4.4.1 gezeigten Verfahren ein Interpretationsfenster, das für jede Methode den niedrigsten Factor of Safety darstellt.

In Abbildung 33 ist solch ein Interpretationsfenster zu sehen, wobei links die von „SLIDE“ vordefinierte Legende für den FOS [1] gezeigt wird, welche die Zuordnung

der einzelnen Stabilitätsberechnungen erleichtert. Die farbigen Punkte [2] entsprechen den Zentren der Bruchflächen. Die Halbkreise [3] zeigen, wie die Bruchflächen im Gelände verlaufen könnten, hier werden aber nur die kritischsten angezeigt.

**Abbildung 33: Interpretationsfenster "SLIDE"**



Die Simulationen sind für jeden Sättigungsgrad, der vom MK-Model ausgegeben wurde, durchgeführt worden und im Folgenden angeführt.

## 5.1.1 Simulationen

### 5.1.1.1 Simulation 1 – Sättigungsgrad: 0,388

Die Eingangsparameter für die Simulation setzten sich aus

- Sättigungsgrad [%] → MK-Model (Kapitel 4.3)
- verwendete Kohäsion [kPa] → (Soranzo, 2013)
- Reibungswinkel [°] → Rahmenscherversuch (Kapitel 4.2.1)
- Wichte [kN/m<sup>3</sup>] → FELLIN (2007) zeigt in seinen Unterlagen typische Werte für die Wichte

zusammen.

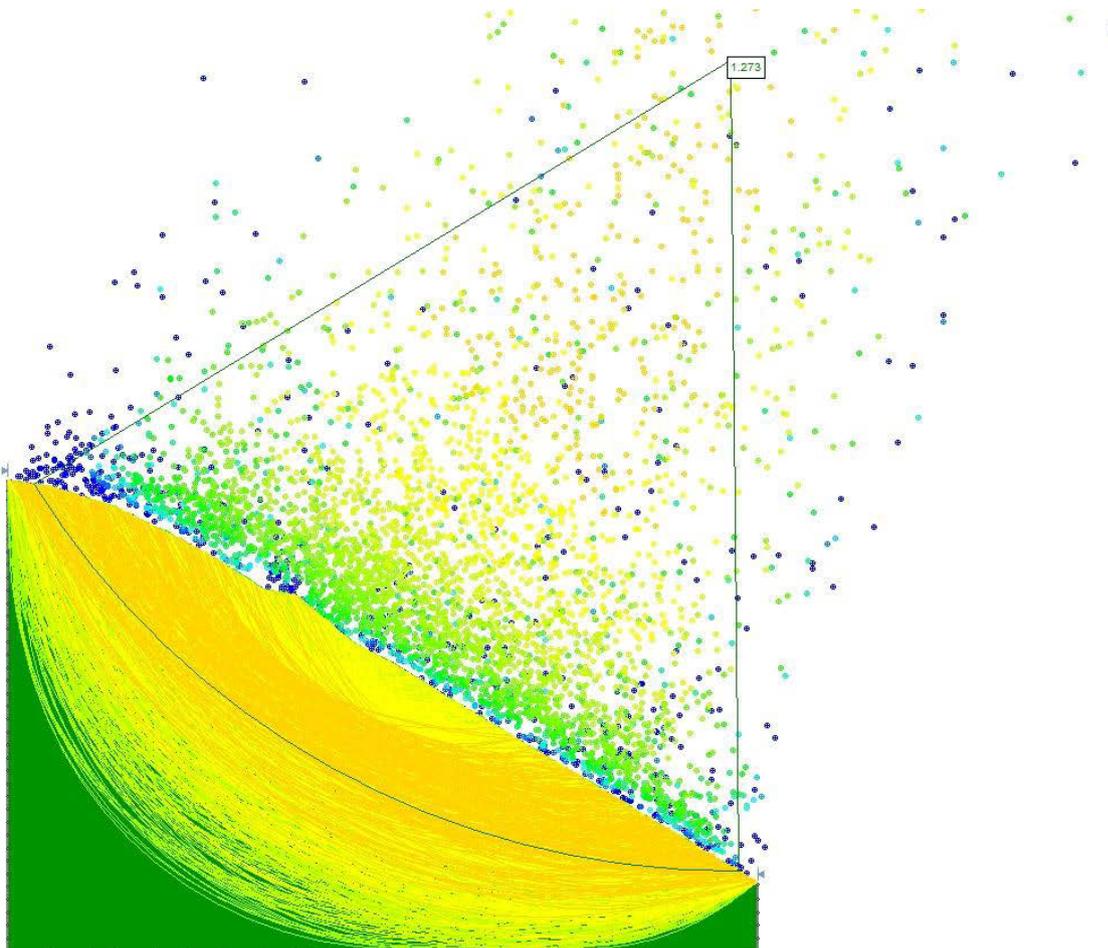
Tabelle 6: Eingangsparameter für Simulation 1

Sättigungsgrad [%]	Verwendete Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
38,8	54,7	24,7	27,0

Nach der Simulation werden die gesuchten Sicherheitsfaktoren der einzelnen Stabilitätsberechnungen jedes Verfahrens angeführt.

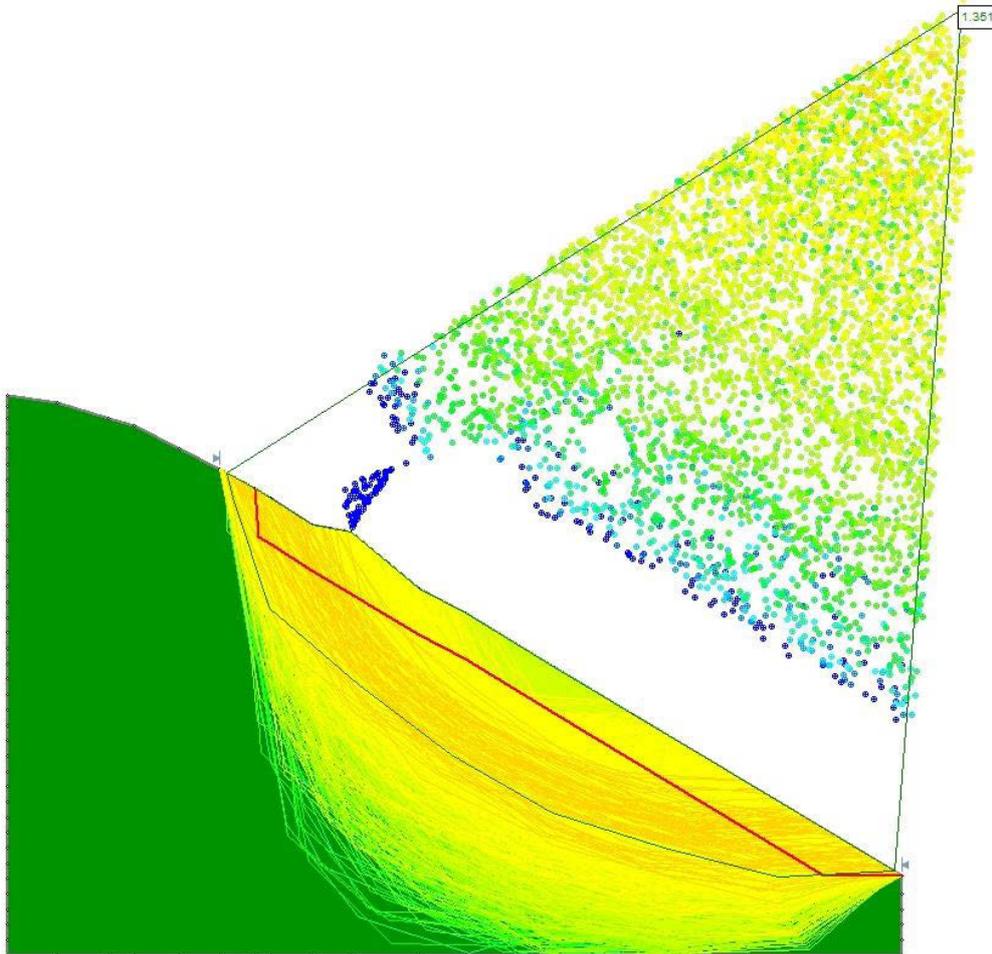
Rotationsrutschung:

Abbildung 34: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 38,8 %



## Translationsrutschung:

**Abbildung 35: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 38,8 %**



Die in Abbildung 35 eingezeichnete rote Linie ist eine von SCHWEIGL vordefinierte Gleitfläche. SCHWEIGL hat in seinem Gutachten die Tiefe einer möglichen Gleitfläche angegeben.

Die grüne Fläche ist die untersuchte Böschung am Gallenzer Kogel. Die farbigen Punkte entsprechen, wie oben bereits erklärt, den Zentren der Bruchflächen. Dabei gibt die Farbe die Stabilität der jeweiligen Bruchfläche an. Die Farben sind über eine Legende an definierte Sicherheitswerte gekoppelt. Die Halbkreise zeigen, wie die Brüche im Gelände verlaufen könnten.

**Tabelle 7: FOS jedes Verfahrens bei Rotations- und Translationsrutschung in der Simulation 1**

<b>Methode</b>	<b>Rotationsrutschung</b>	<b>Translationsrutschung</b>
<b>Ordinary/Fellini</b>	1,211	1,175
<b>Bishop simplified</b>	1,276	1,345
<b>Janbu simplified</b>	1,195	1,280
<b>Janbu corrected</b>	1,268	1,361
<b>Spencer</b>	1,272	1,360
<b>COE 1</b>	1,284	1,409
<b>COE 2</b>	1,289	1,405
<b>Lowe-Karafiath</b>	1,279	1,407
<b>Morgenstern-Price/GLE</b>	1,273	1,351

Da alle Sicherheitsfaktoren größer als 1 sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Böschung bei einer Sättigung von 38,8 % stabil bleibt. An dieser Stelle soll aber nochmals darauf hingewiesen werden, dass bei diesen Simulationen nur das Versagen im Zusammenhang mit dem Porenwasser untersucht wurde. Daraus folgt, würde eine zusätzliche Belastung (z.B. eine Auflast) hinzukommen, würden sich diese Werte deutlich verändern. Auf diesen Punkt wird später in Kapitel 5.2 eingegangen.

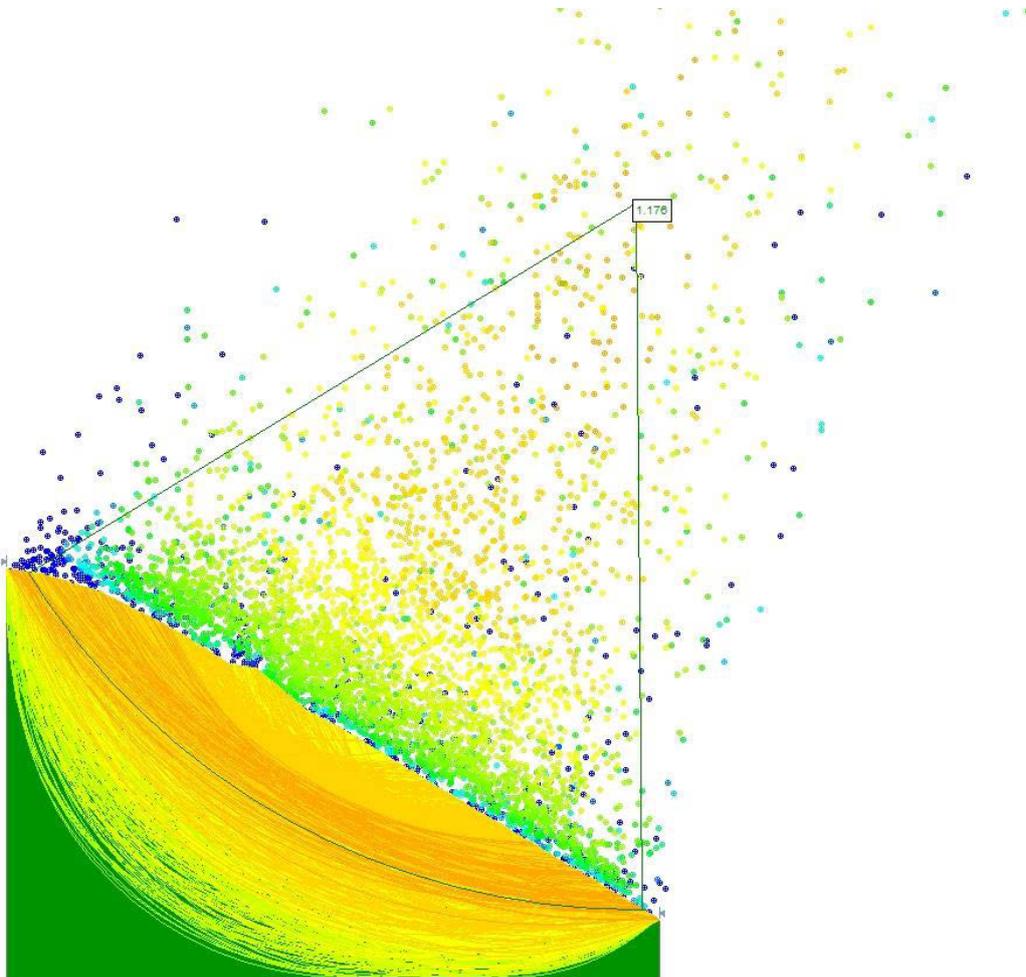
### 5.1.1.2 Simulation 2 – Sättigungsgrad: 0,444

Tabelle 8: Eingangsparameter für Simulation 2

Sättigungsgrad [%]	Verwendete Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
44,4	40,1	24,7	27,0

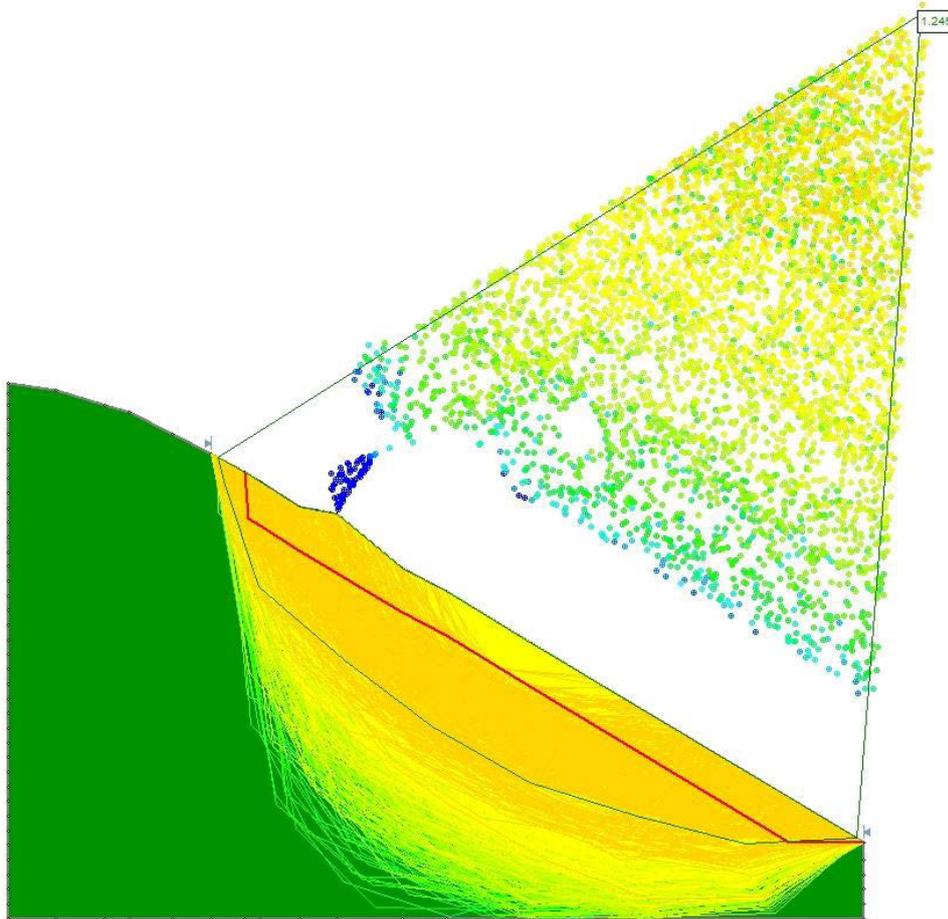
Rotationsrutschung:

Abbildung 36: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 44,4 %



## Translationsrutschung:

**Abbildung 37: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 44,4 %**



**Tabelle 9: FOS jedes Verfahrens bei Rotations- und Translationsrutschung in der Simulation 2**

Methode	Rotationsrutschung	Translationsrutschung
Ordinary/Fellinius	1,118	1,086
Bishop simplified	1,179	1,234
Janbu simplified	1,106	1,170
Janbu corrected	1,173	1,244
Spencer	1,176	1,253
COE 1	1,182	1,274
COE 2	1,187	1,270
Lowe-Karafiath	1,180	1,271
Morgenstern-Price/GLE	1,176	1,245

Die Werte des Factor of Safety sind im Vergleich zu jenen bei einem Sättigungsgrad von 38,8 % gesunken, jedoch ist die Böschung bei einer Sättigung von 44,4 % noch immer stabil.

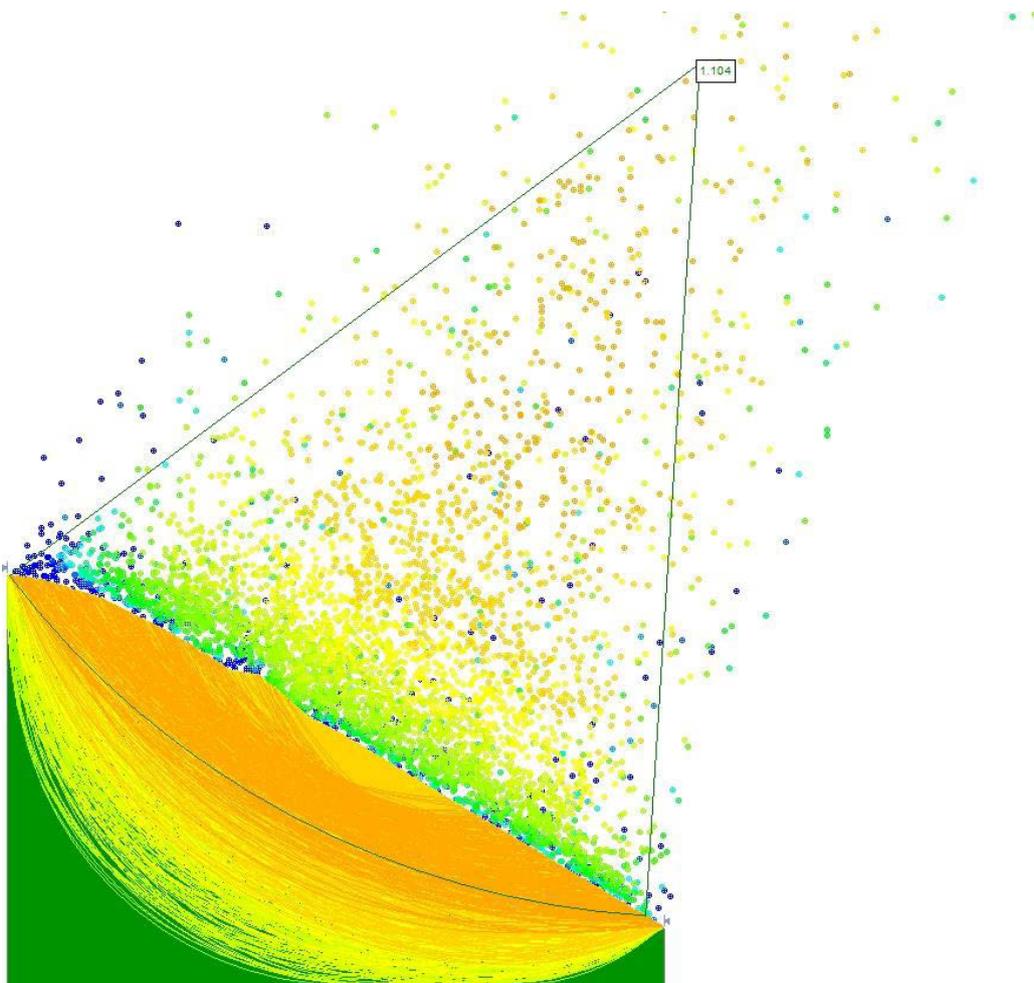
### 5.1.1.3 Simulation 3 – Sättigungsgrad: 0,737

Tabelle 10: Eingangsparameter für Simulation 3

Sättigungsgrad [%]	Verwendete Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
73,7	29,5	24,7	27,0

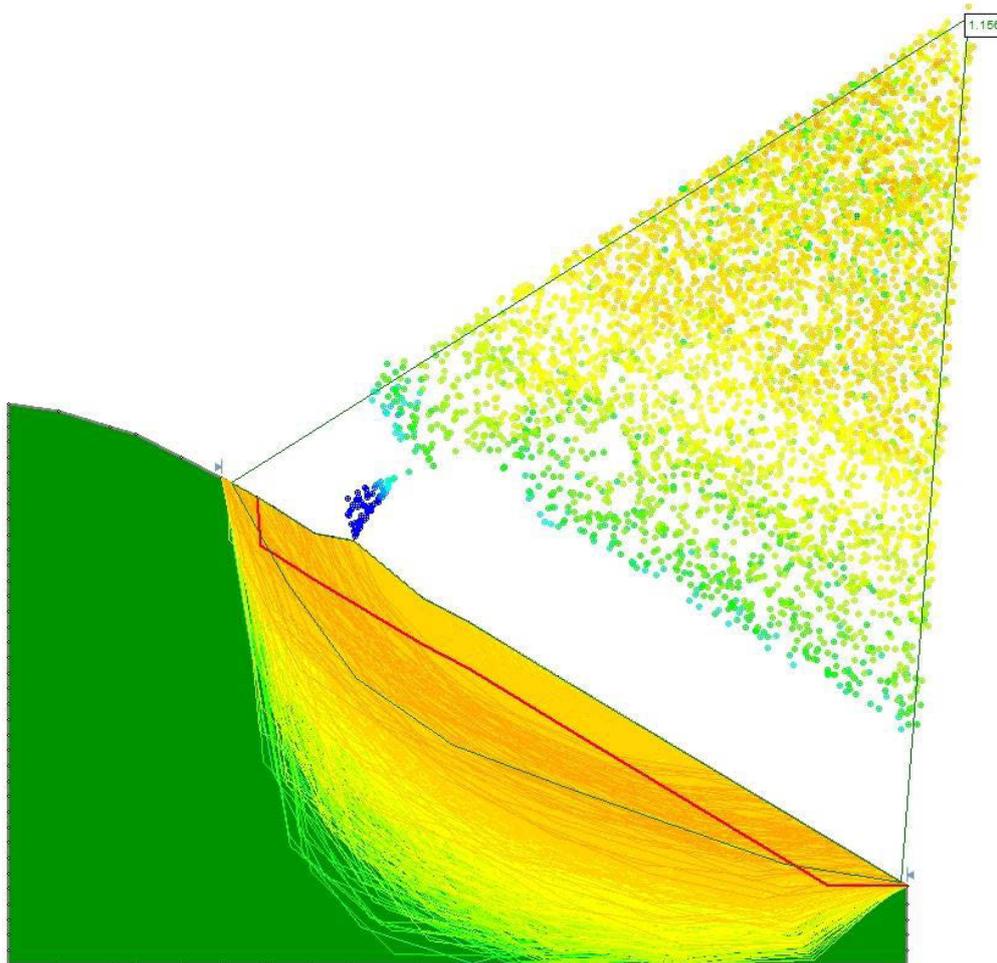
Rotationsrutschung:

Abbildung 38: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 73,7 %



Translationsrutschung:

**Abbildung 39: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 73,7 %**



**Tabelle 11: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 3**

<b>Methode</b>	<b>Rotationsrutschung</b>	<b>Translationsrutschung</b>
<b>Ordinary/Fellini</b>	1,051	1,020
<b>Bishop simplified</b>	1,106	1,154
<b>Janbu simplified</b>	1,041	1,091
<b>Janbu corrected</b>	1,104	1,159
<b>Spencer</b>	1,102	1,168
<b>COE 1</b>	1,108	1,176
<b>COE 2</b>	1,112	1,173
<b>Lowe-Karafiath</b>	1,108	1,177
<b>Morgenstern-Price/GLE</b>	1,104	1,156

Laut den Experten der WLV befindet sich der Boden des Gallenzer Kogels im Durchschnitt bei einem Sättigungsgrad von zirka 50 %. Das bedeutet, die Gefährdung zum Rutschen liegt im Normalfall zwischen den Ergebnissen von Simulation 2 und 3. Der FOS in Simulation 2 und 3 liegt in beiden Fällen über 1. Kommt es zu keinem auslösenden Ereignis, sollte der Hang im stabilen Zustand bleiben.

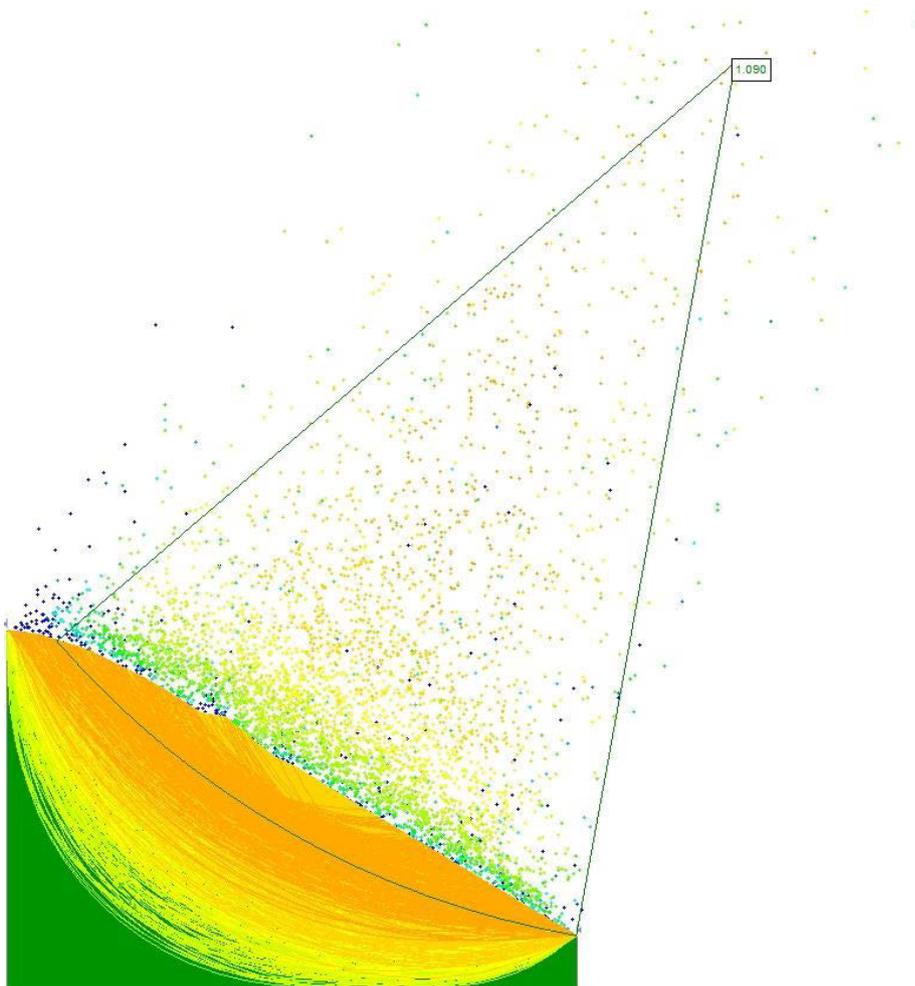
### 5.1.1.4 Simulation 4 – Sättigungsgrad: 0,951

Tabelle 12: Eingangsparameter für Simulation 4

Sättigungsgrad [%]	Verwendete Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
95,1	27,8	24,7	27,0

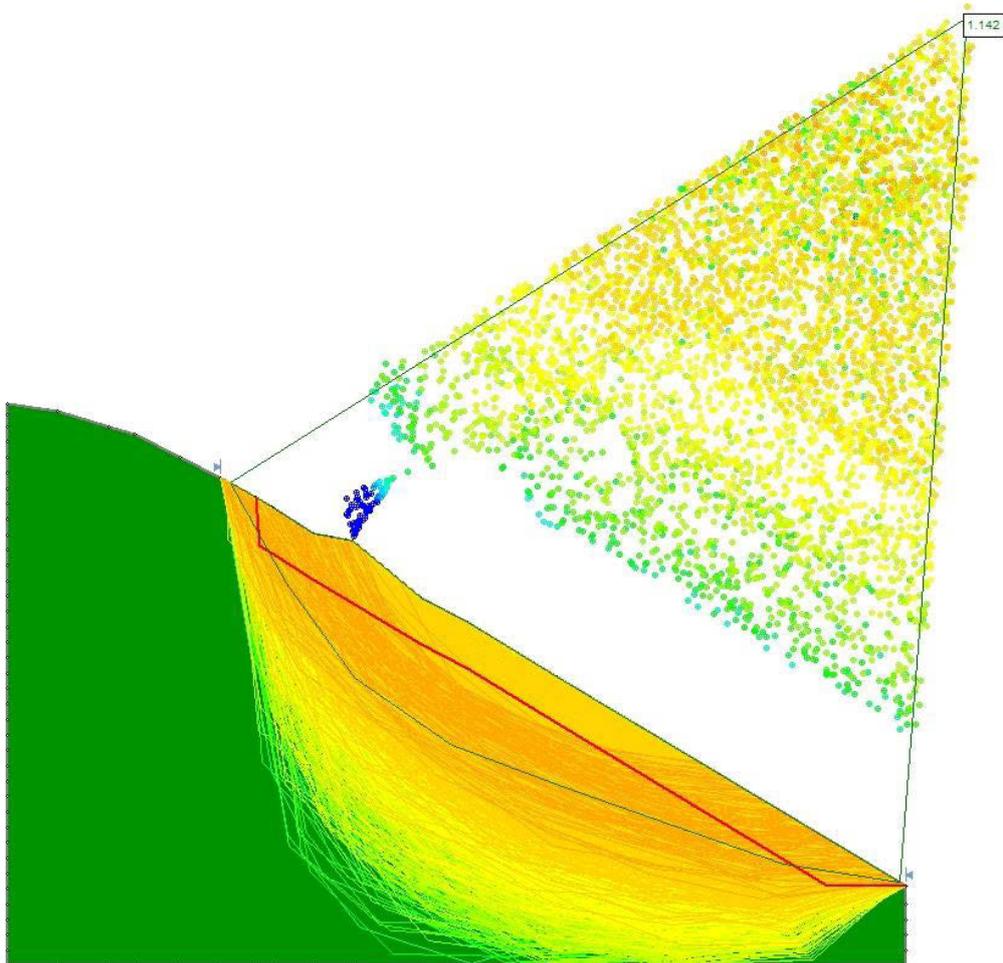
Rotationsrutschung:

Abbildung 40: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 95,1 %



Translationsrutschung:

**Abbildung 41: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 95,1 %**



**Tabelle 13: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 4**

<b>Methode</b>	<b>Rotationsrutschung</b>	<b>Translationsrutschung</b>
<b>Ordinary/Fellini</b>	1,040	1,009
<b>Bishop simplified</b>	1,092	1,141
<b>Janbu simplified</b>	1,030	1,076
<b>Janbu corrected</b>	1,092	1,145
<b>Spencer</b>	1,089	1,152
<b>COE 1</b>	1,094	1,160
<b>COE 2</b>	1,096	1,157
<b>Lowe-Karafiath</b>	1,093	1,161
<b>Morgenstern-Price/GLE</b>	1,090	1,142

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, liegen die Sicherheitsfaktoren bei einem Sättigungsgrad von 95,1 % nur mehr knapp über 1. So gesehen ist die Böschung in diesen Verhältnissen zwar noch stabil, jedoch bei der geringsten Einwirkung, könnte es zu einem Versagen kommen.

Außerdem ist eine Böschung mit einem Sättigungsgrad von 95,1 % relativ stark durchfeuchtet. Dies ist gerade bei tonigen Böden nur durch lang andauernden und intensiven Regenschauern zu erreichen. Stiege der Sättigungsgrad noch weiter, so würde der Boden vollständig gesättigt werden. Simulation 5 zeigt die Stabilität eines vollständig gesättigten Bodens.

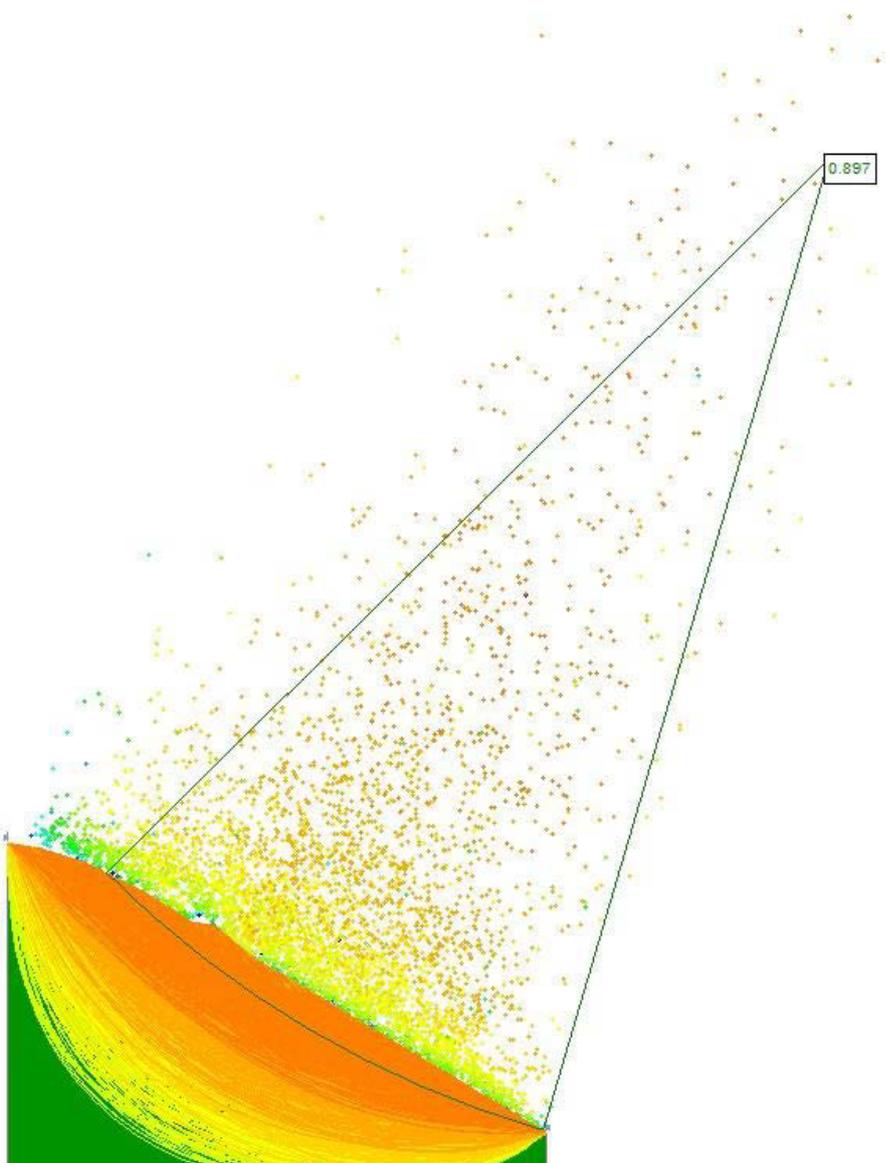
### 5.1.1.5 Simulation 5 – Sättigungsgrad: 1

Tabelle 14: Eingangsparameter für Simulation 5

Sättigungsgrad [%]	Verwendete Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
100	7,4	24,7	27,0

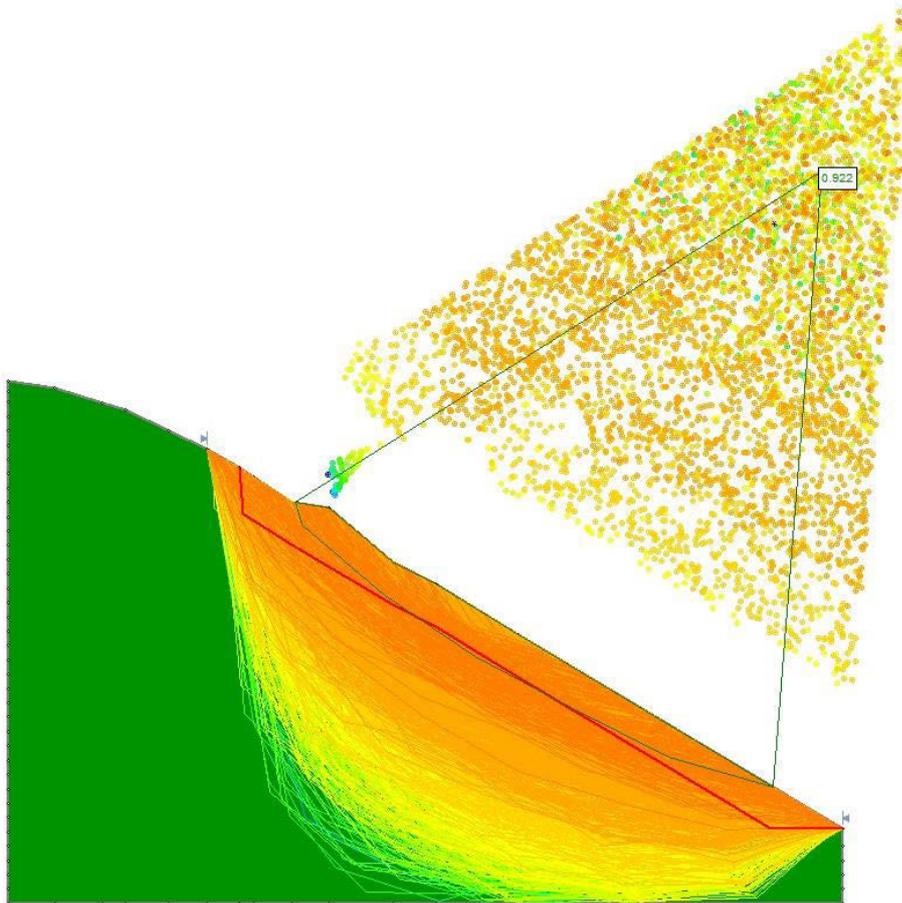
Rotationsrutschung:

Abbildung 42: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 100 %



Translationsrutschung:

**Abbildung 43: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem Sättigungsgrad von 100 %**



**Tabelle 15: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 5**

Method	Rotationsrutschung	Translationsrutschung
Ordinary/Fellinius	0,876	0,877
Bishop simplified	0,900	0,923
Janbu simplified	0,874	0,878
Janbu corrected	0,909	0,916
Spencer	0,896	0,923
COE 1	0,901	0,927
COE 2	0,901	0,928
Lowe-Karafiath	0,900	0,923
Morgenstern-Price/GLE	0,897	0,922

Bei einem Sättigungsgrad von 100 % wird bei keiner Stabilitätsberechnungsmethode ein Factor of Safety über 1 ausgeschieden. Das bedeutet, der Hang ist bei vollständiger Sättigung für Rutschungen gefährdet. Es ist nicht einmal eine zusätzliche Einwirkung erforderlich.

### 5.1.1.6 Ergebnisse aller Simulationen

Abbildung 44: Factors of Safety der GLE-Methode bei Rotationsrutschungen

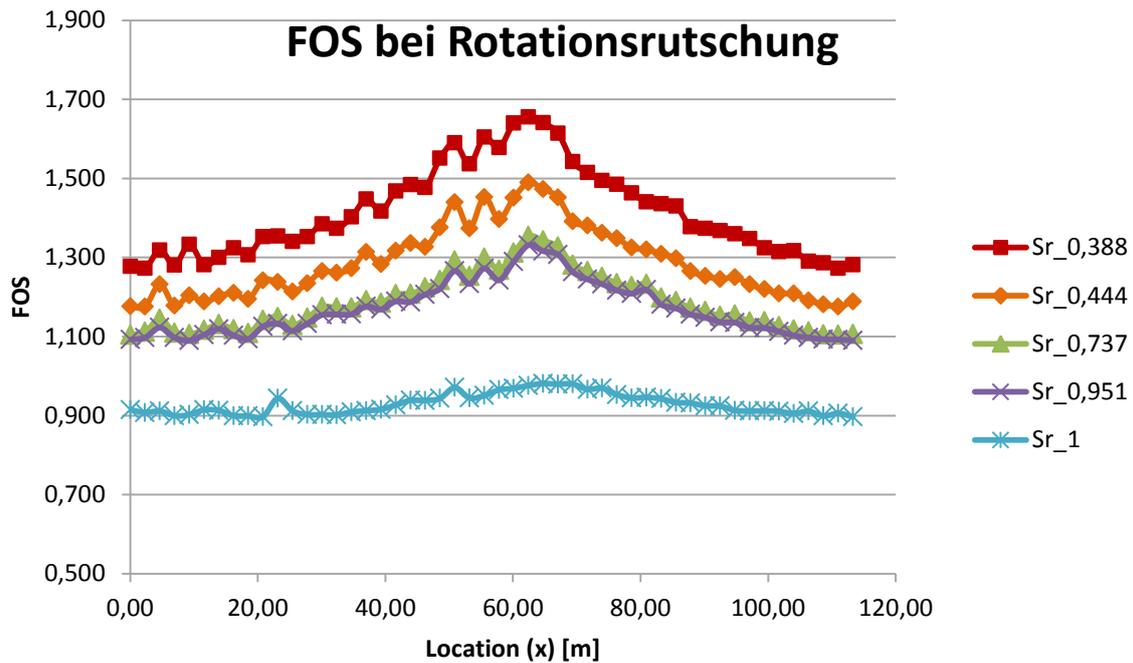
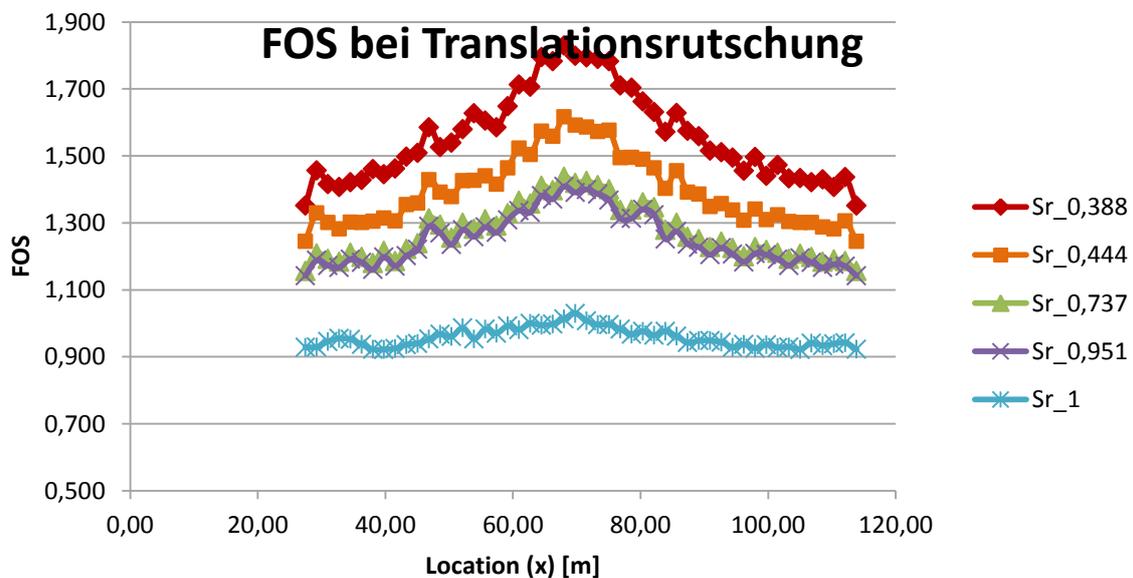


Abbildung 45: Factors of Safety der GLE-Methode bei Translationsrutschung



Aus Abbildung 44 und 45 gehen die Sicherheitsfaktoren zu jedem Sättigungsgrad über die gesamte Böschungslänge hervor. Hierbei wird der Einfluss des Wassers an jeder Position des Hanges deutlich. (Location(x) ist der horizontale Abstand vom Nullpunkt – Siehe Abbildung 32)

Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Factor of Safety bei einer möglichen Rotationsrutschung niedriger ist als bei einer Translationsrutschung. Dieses Ergebnis wird auch durch die Geländebegehung, welche direkt nach dem Ereignis von der WLW durchgeführt worden ist, untermauert. Dabei haben die Experten an den meisten Stellen im Anbruchgebiet, an dem ein Geländebruch stattgefunden hat, konkav gekrümmte Gleitflächen gefunden. Solche Gleitflächen deuten auf eine Rotationsrutschung hin.

### **5.1.2 Interpretation der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Böschung im Normalfall stabil ist. Jedoch nur im Extremfall, wenn der Boden vollständig gesättigt ist, kann es zum Geländebruch und zur Rutschung kommen. Da es sich beim Boden am Gallenzer Kogel um einen schluffigen Ton handelt, welcher noch dazu Anteile von Vermiculit beinhaltet, ist seine Wasserspeicherkapazität enorm. Auch ist die Aufnahmezeit von Wasser bei Tonen ebenfalls hoch. Das bedeutet, dass die Böschung erst dann voll gesättigt sein kann, wenn die Niederschläge lange (mehrere Tage) andauern und dabei auch noch intensiv sind. Die Ergebnisse decken sich auch mit der Praxis.

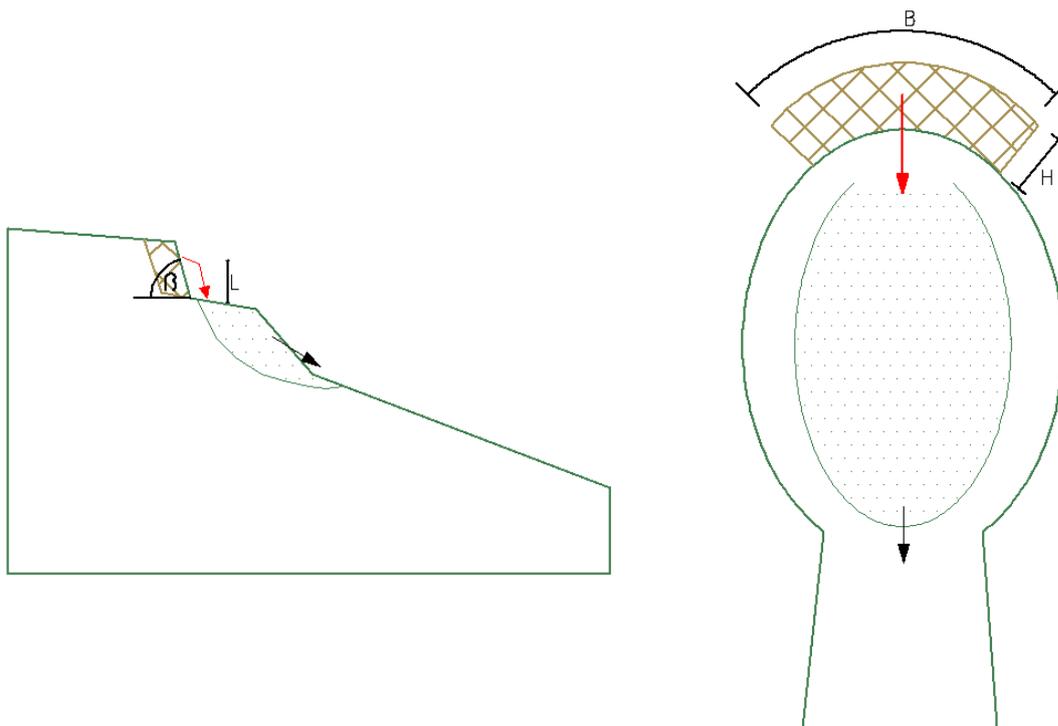
## 5.2 Fragestellung 2

In diesem Punkt wird der Frage nachgegangen, welche Auflast die Böschung verträgt und ab wann eine solche Auflast eine Rutschung auslösen kann. Dafür werden unterschiedliche Szenarien durchgerechnet, bei denen immer eine unterschiedliche Art von Auflast angenommen wird.

Natürlich handelt es sich hier nur um mögliche Szenarien, die in der Praxis so nicht vorkommen müssen. Trotzdem soll eine annähernd genaue Aussage über die Stabilität der Böschung getroffen werden können, wenn sie mit einer Auflast belastet wird.

### 5.2.1 Szenario 1

Abbildung 46: Schematische Skizze zu Szenario 1

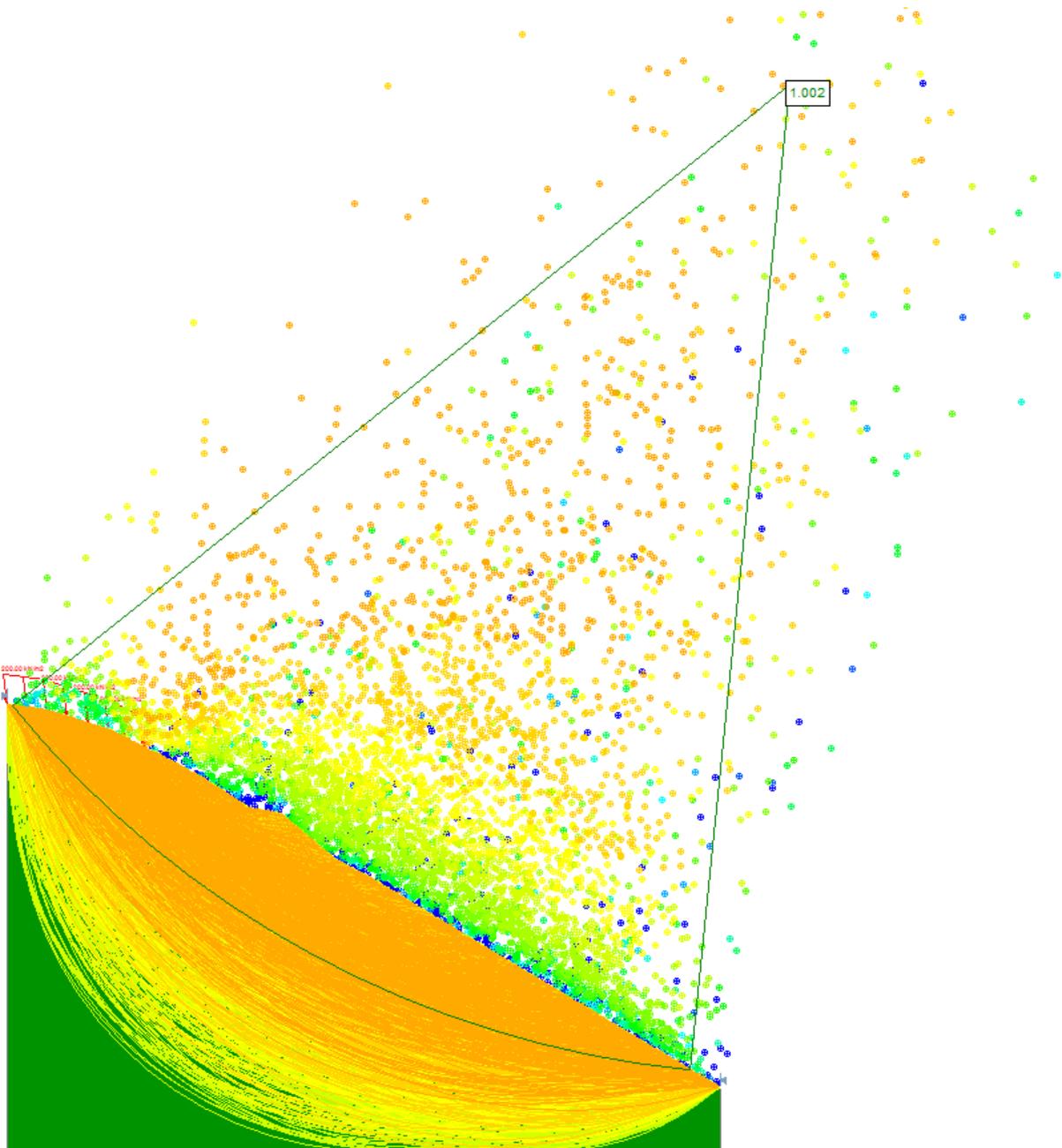


Bei diesem Anschauungsbeispiel wird eine Steilböschung direkt über der untersuchten Böschung angenommen. Bricht nun eine Masse (braune Schraffierung) aus dem Hang heraus, so belastet dies die Böschung. Dabei wird die Breite der Böschung mit 10 m, die Höhe mit 4 m und die durchschnittliche Tiefe mit 1 m angenommen. Das ergibt ein Volumen von  $40 \text{ m}^3$  oder eine Masse (Dichte = 1700

kg/m<sup>3</sup>) mit 68.000 kg. Die Frage dazu lautet, ob der Hang diese zusätzlich Auflast aushalten kann, um stabil zu bleiben.

Um hier eine Lösung zu finden, wurden wieder im Programm „SLIDE“ Stabilitätsberechnungen durchgeführt. Dabei wurde die untersuchte Böschung solange mit unterschiedlichen Kräften belastet, bis der Factor of Safety den Grenzwert 1 erreicht hat.

**Abbildung 47: Simulation von Szenario 1**



Ist ein Sicherheitsfaktor von 1 gefunden, kann mit der dazugehörigen Kraft und der Formel von BOVIS eine Rückrechnung auf die dazugehörige Masse durchgeführt werden.

Formel von BOVIS:

$$(23) \quad F = M * [2 * L * g * (\sin\beta - \cos\beta * \tan\varphi')]^{0,5} \quad (\text{Bovis, 1992})$$

Hier ist  $F[\text{kN/m}^2]$  die Auflast,  $M[\text{kg}]$  die Masse,  $L[\text{m}]$  die Distanz, die das Material zurücklegt,  $g[\text{m/s}^2]$  die Erdbeschleunigung,  $\beta[^\circ]$  die Neigung des Geländes an dem das Material hinabstürzt und  $\varphi'[^\circ]$  ist der effektive Reibungswinkel.

Wird die Formel nach den gesuchten Parameter M umgeformt, führt das zu

$$(24) \quad M = \frac{F}{[2 * L * g * (\sin\beta - \cos\beta * \tan\varphi')]^{0,5}} \quad (\text{Bovis, 1992})$$

Als Ergebnis wird für jeden Sättigungsgrad die Masse, die eine Rutschung auslöst, geliefert.

Eine Simulation für einen vollständig gesättigten Boden wird nicht vorgenommen, da dieser bereits ohne Auflast rutschen würde.

### 5.2.1.1 Ergebnis

Mit den eingesetzten Parametern für dieses Szenario lautet die Formel (24):

$$(25) \quad M = \frac{F}{[2 * 2m * 9,81ms^{-2} * (\sin(85^\circ) - \cos(30^\circ) * \tan(24,7^\circ))]^{0,5}} \quad [F=500/350/250/150 \text{ kN/m}^2]$$

**Tabelle 16: gesuchte Massen, die eine Rutschung im Szenario 1 auslösen**

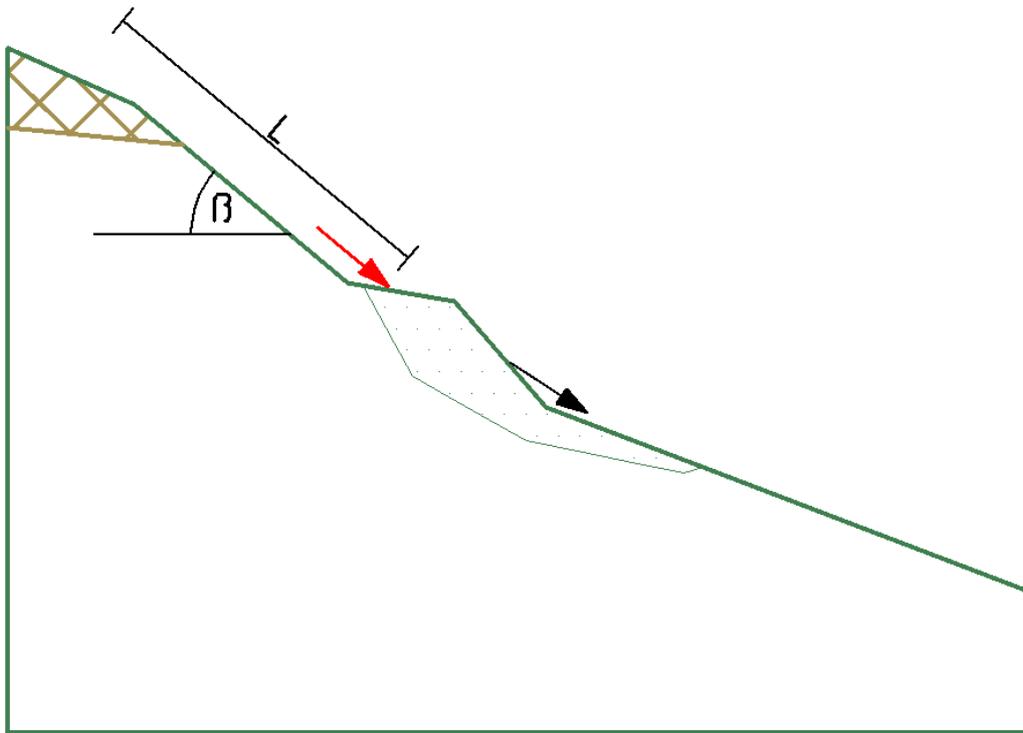
<b>Sättigungsgrad [%]</b>	38,8	44,4	73,7	95,1
<b>Auflast [kN/m<sup>2</sup>]</b>	500	300	200	150
<b>Masse [t]</b>	81,6	49	32,7	24,5
<b>Masse [m<sup>3</sup>]</b>	48	28,8	19,2	14,4

Die Ergebnisse zeigen, dass die Böschung bei einer Sättigung von 38,8 % die im Szenario angenommene Auflast ertragen würde. Jedoch bei jedem anderen Sättigungsgrad würde es zu einem Versagen der Böschung kommen.

Das Szenario 1 zeigt ein vom Gallenzer Kogel aus gesehenes praxisfernes Beispiel. Daher wurde ein Beispiel bestimmt, welches auf die Geländegegebenheiten des Kogels besser eingeht. Für die Bestimmung von Neigungen und Distanzen wurde das digitale Geländemodell herangezogen.

## 5.2.2 Szenario 2

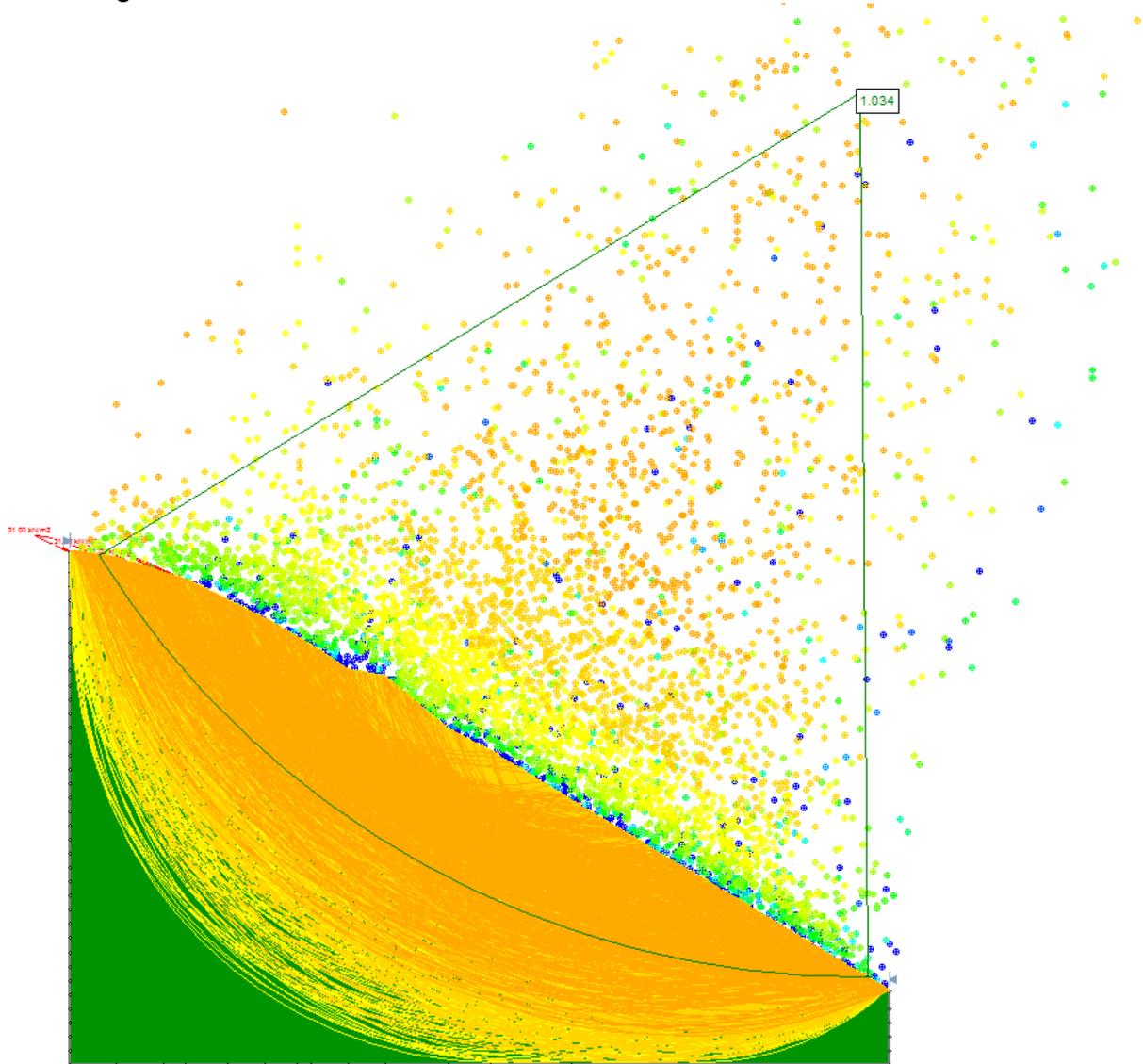
Abbildung 48: Schematische Skizze zu Szenario 2



In diesem Szenario wird eine Mobilisierung des Oberhanges angenommen. Das Material rutscht auf die untersuchte Böschung auf und fungiert dort als Auflast. Dabei legt es die Distanz  $L=150$  m zurück. Der braun schraffierte Bereich in Abbildung 48 soll das mobilisierte Material darstellen. Die Neigung wurde aus den Laserscans des Geländes heraus gemessen. Dabei wurde für  $\beta$  der Wert  $25,55^\circ$  bestimmt.

In diesem Beispiel wird die Masse, welche bei der Böschung eine Rutschung auslösen würde, gesucht. Für die Lösungsfindung wird wie im Szenario 1 vorgegangen. Zuerst werden „SLIDE“-Simulationen durchgeführt und danach eine Rückrechnung mit den zuvor gezeigten Formeln.

Abbildung 49: Simulation von Szenario 2



### 5.2.2.1 Ergebnis

Die Formel (24) mit den eingesetzten Parametern lautet in diesem Fall:

$$(26) \quad M = \frac{F}{[2 \cdot 150 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2} \cdot (\sin(25,6^\circ) - \cos(25,6^\circ) \cdot \tan(24,7^\circ))]^{0,5}} \quad [F=60/45/32/30,5 \text{ kN/m}^2]$$

Tabelle 17: gesuchte Massen, die eine Rutschung im Szenario 2 auslösen

<b>Sättigungsgrad [%]</b>	38,8	44,4	73,7	95,1
<b>Auflast [kN/m²]</b>	60	45	32	30,5
<b>Masse [t]</b>	8,7	6,5	4,5	4,4
<b>Masse [m³]</b>	5,1	3,8	2,7	2,6

Die Lösungen zeigen das klare Bild, dass im Szenario 2 die Böschung deutlich weniger aufgelastetes Material aushält. Der Grund dafür liegt erstens in der viel größeren Distanz. Das in Bewegung geratene Material nimmt eine viel größere Geschwindigkeit auf und deshalb genügen kleinere Massen, die eine größere Kraft auswirken können.

Als zweiter Grund ist die Neigung zu nennen. Jedoch hat diese auch einen positiven Einfluss. Aufgrund der Neigung beschleunigt die Masse langsamer als wenn sie direkt von oben herab stürzen würde. Andererseits, wie aus den „SLIDE“-Simulationen ersichtlich, verträgt die Böschung die horizontale Komponente der Kraft ( $F_h$ ) weniger, da diese größere Schubkräfte verursacht. Die untersuchte Böschung ist deshalb bereits bei geringerer Krafteinwirkung instabil.

## 6 Diskussion

In dieser Arbeit wurden Grundlagen für die Simulation der Stabilität von Böschungen mit einem tonhaltigen Boden geschaffen. Dabei wurde die Wassersättigung als maßgeblicher Einflussfaktor für den Böschungsbruch herausgegriffen. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchte Böschung am Gallenzer Kogel auch bei relativ hoher Wassersättigung lange stabil bleibt. Parallel dazu zeigten die Simulationen aber auch, dass, sobald eine weitere Auflast hinzukommt, zum Beispiel durch eine vorangegangene Mure, ein Geländebruch früher eintreten würde.

Die Wasseraufnahme bei einer Tonerde geschieht langsam, außerdem kann ein tonreicher Boden sehr viel Wasser aufnehmen. Da der Ton im untersuchten Hang noch zusätzlich einen relativ hohen Anteil von Vermiculit aufgewiesen hat, ist die Böschung sehr quellfähig. Das bedeutet, dass der Hang viel Wasser aufnehmen und speichern kann, was wiederum erst nach langen und intensiven Niederschlägen möglich ist.

Dies zeigte auch die ermittelte Fließgrenze. Ein  $w_L = 54,2\%$  deutet auf einen Boden hin, der sehr viel Wasser aufnehmen kann, bevor er zu fließen beginnt.

Tritt nun jenes Szenario ein, dass lange und intensive Regenfälle stattfinden, wird der tonreiche Boden vollständig gesättigt, er verliert seine Stabilität und beginnt abzurutschen. Kommt es jedoch zu keiner vollständigen Sättigung, sollte sich die Böschung gerade noch im stabilen Zustand befinden. Das wurde in Simulation 4 mit einem Sättigungsgrad von  $\sim 95\%$  gezeigt. Anhand der Simulationen kann auf folgendes Ergebnis geschlossen werden: der Gallenzer Kogel weist bei einem Sättigungsgrad von zirka 95 Prozent eine Grenze zwischen stabilen und instabilen Zustand der Böschung auf.

Bei der Frage, wie viel Auflast die Böschung verträgt, wurde es als sinnvoll erachtet, über jene ertragbare Auflast zu diskutieren, welche sich bei einem Sättigungsgrad von zirka 50 % ergeben hat. Es handelt sich hierbei um die von den Experten angegebene durchschnittliche Sättigung des Gallenzer Kogels.

Im Zuge dieser Arbeit war es aber leider nicht möglich, eine Simulation bei 50 Prozent Sättigung durchzuführen. Aus diesem Grund wurde es als ausreichend

genau angesehen, die Auflast bei 50 Prozent durch Interpolation der Werte bei einer Sättigung von 73,7 und 44,4 Prozent zu bestimmen. Beim ersten Szenario ergab sich dadurch für die Auflast ein Wert von  $280,9 \text{ kN/m}^3$  ( $\rightarrow 45,9 \text{ t}/27 \text{ m}^3$ ) und beim zweiten Szenario ergab sich eine Auflast von  $42,5 \text{ kN/m}^3$  ( $\rightarrow 6,1 \text{ t}/3,6 \text{ m}^3$ ).

Im zweiten Szenario wurde auf das Gelände am Gallenzer Kogel eingegangen, deshalb ist dieses Ergebnis genauer an die Realität angepasst. Auf Grund dessen kann davon ausgegangen werden, dass bei einer geringen Mobilisierung ( $3,6 \text{ m}^3$ ) des Oberhanges, weiter unten eine Rutschung ausgelöst wird.

Es können noch weitere Szenarien durchsimuliert werden oder andere auslösende Faktoren bestimmt werden, jedoch das Ziel, einen hydrologischen und geotechnischen Zusammenhang für die Mure am Gallenzer Kogel zu finden, wurde ausreichend erfüllt.

## 7 Schlussfolgerung

Die Simulationen in dieser Arbeit wurden mit Parametern, die mit dem Modified Kovács Models empirisch ermittelten wurden, durchgeführt. Natürlich wäre das Ergebnis genauer, wenn ein sogenannter Standard-Dreiaxialversuch, mit dem die Kohäsion und der Reibungswinkel einzelner Sättigungsgrade bestimmt werden können, durchgeführt worden wäre. Jedoch ist der Zeit- und Kostenaufwand im Labor dabei um einiges größer. Beim vorgenommenen Rahmenscherversuch liegt der Zeitaufwand bei zirka 1-2 Tagen, wobei hingegen bei einem Standard-Dreiaxialversuch die Rede von zirka 2-3 Monaten ist.

Da sich die Ergebnisse aber mit den in der Praxis gefundenen Zuständen decken, lässt sich darauf schließen, dass das MK-Model eine ausreichend genaue Annäherung an die Realität bringt.

Aufgrund des großen Vorteils, des Zeit- und Kostensparens, ist eine Empfehlung für die gewählte Methode auszusprechen. Natürlich wäre eine weitere Überprüfung der empirischen Formeln durch nachfolgende Projekte von Vorteil. An dieser Stelle ist auf die Dissertation von GREGOR IDINGER mit dem Titel „Experimental study on failure initiation in partially saturated slope“ hinzuweisen. In dieser Arbeit wird zum Teil genauso das Verhalten von Böden bei Teilsättigung untersucht und über das MK-Model diskutiert.

Ein großer Nachteil des Verfahrens mit dem MK-Model und der Simulation mit dem Programm „SLIDE“ liegt aber darin, dass auf den Porenwasserüberdruck nicht genau eingegangen werden kann. Es wird zwar der negative Porenwasserdruck als scheinbare Kohäsion mit einbezogen, aber der Porenwasserüberdruck konnte bei den Simulationen nicht berücksichtigt werden. Jedoch muss an dieser Stelle gesagt werden, dass „SLIDE“ die Möglichkeit anbietet den Porenwasserüberdruck miteinzuberechnen. Aber die Beschaffung der dafür benötigten Parameter hätte den Umfang dieser Arbeit um ein Vielfaches ausgedehnt.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abramson, Lee W. 2002.** *Slope stability and stabilization method.* s.l. : Wiley, 2002.
- Aubertin, Michel. 2003.** *Development of a model to predict the water retention curve using basic geotechnical properties.* s.l. : École Polytechnique de Montréal, 2003.
- Bovis, M.J. 1992.** *Debris flow triggering by impulsive loading: mechanical modelling and case studies.* s.l. : University of British Columbia, 1992.
- Duncan, J. Michael. 2005.** *Soil strenght and slope stability.* s.l. : Wiley, 2005.
- Düntgen, Jörg und Rieger, Max. 2003.** *Grundlegende Verfahren und Methoden der Bodenkunde.* s.l. : Ruhr-Uni-Bochum, 2003.
- Ellenberg, Heinz. 1992.** *Zeigerwert von Pflanzen in Mitteleuropa.* 1992.
- Fellin, Wolfgang. 2007.** *Bodenmechanik und Grundbau Übung, Teil 1.* s.l. : Universität Innsbruck, 2007.
- Highland, Lynn M. und Bobrowsky, Peter. 2008.** *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslide.* Virginia : U.S. Geological Survey, 2008.
- Hölzel. 2004.** *Universalatlas zu Geographie und Geschichte.* 2004.
- Hübl, Hannes. 2015.** *Vorprojekt Mure Gallenzer Kogel.* 2015.
- Hübl, Johannes. 2010.** *IAN REPORT 111: Historische Ereignisse.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2010.
- Issler, Lothar, Ruoß, Hans und Häfele, Peter. 2013.** *Festigkeitslehre - Grundlagen.* s.l. : Springer-Verlag, 2013.
- Katzenbach, Rolf. 2014.** *Studienunterlagen Geotechnik.* s.l. : TU Darmstadt, 2014.
- Kienberger, Christian. 2015.** *Übersichtskarte der Gallenzer Kogel Mure.* s.l. : Wildbach- und Lawinenverbauung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.
- Lang, Hans-Jürgen, Huder, Jachen und Amann, Peter. 2002.** *Bodenmechanik und Grundbau.* s.l. : Springer-Verlag, 2002.
- Loiskandl, Willibald. 2012.** *Skript aus Hydraulik und Hydromechanik.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2012.
- Mergili, Martin. 2014.** *Skriptum aus Gefahren durch Massenbewegungen - Rutschung.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2014.

- Pregl, Otto. 1989.** *Handbuch der Geotechnik.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 1989.
- . **1989.** *Handbuch der Geotechnik.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 1989.
- rocscience. 2002.** *A synopsis of slope stability analysis with Slide 4.0.* 2002.
- RocScience. 2016.** [www.rocscience.com/help/slide/webhelp](http://www.rocscience.com/help/slide/webhelp). [Online] 2016. [Zitat vom: 26. 08 2016.] <https://www.rocscience.com/help/slide/webhelp7/Slide.htm>.
- Sausgruber, Thomas. 2015.** *Begehungsprotokoll zur Gallenzer Kogel Mure, 11.06.2015.* 2015.
- Schick, Peter. 2000.** *Zum Einfluß negativer Porenwasserspannungen auf die Standsicherheit von Einschnittsböschungen in überkonsolidierten Böden.* s.l. : UniBw München, 2000.
- Schulz, Karsten. 2013.** *Skript aus Hydrologie und Wasserwirtschaft.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2013.
- Schweigl, Joachim. 2015.** *Gutachten BD1-G-212/022-2014.* St. Pölten : Amt der niederösterreichischen Landesregierung, 2015.
- Selby, M.J. 1993.** *Hillslope materials and processes.* s.l. : Oxford University Press Inc., 1993.
- Simmer, Konrad. 1980.** *Grundbau 1.* s.l. : B.G. Teubner Stuttgart, 1980.
- Soranzo, Enrico. 2013.** *Theoretical and Numerical Investigations on Shallow Tunnelling in Unsaturated Soils.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2013.
- Wu, Wei. 2016.** *Laboratoriumsübungen zu Bodenmechanik und Grundbau.* s.l. : Universität für Bodenkultur, 2016.
- www.chemie.de. 2016.** [www.chemie.de](http://www.chemie.de). [Online] 2016. [Zitat vom: 01. 08 2016.] <http://www.chemie.de/lexikon/R%C3%B6ntgendiffraktometer.html>.
- www.gb.bgu.tum.de. 2016.** [www.gb.bgu.tum.de](http://www.gb.bgu.tum.de). [Online] 2016. [Zitat vom: 27. 11 2016.] [https://www.gb.bgu.tum.de/fileadmin/w00bpk/www/Lehre/Studienunterlagen/Vorlesungsskript/12\\_vorlg-i.pdf](https://www.gb.bgu.tum.de/fileadmin/w00bpk/www/Lehre/Studienunterlagen/Vorlesungsskript/12_vorlg-i.pdf).
- www.geothermie.de. 2016.** [www.geothermie.de](http://www.geothermie.de). [Online] 2016. [Zitat vom: 26. 11 2016.] <http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/m/mohr-coulombsches-bruchkriterium.html>.

**www.hu-berlin.de. 2016.** www.hu-berlin.de. [Online] 2016. [Zitat vom: 26. 11 2016.]  
[https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku\\_online/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/0\\_deckblatt7935.html](https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku_online/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/0_deckblatt7935.html).

**www.keramikinstitut.com. 2016.** www.keramikinstitut.com. [Online] 2016. [Zitat vom: 01. 08 2016.] <http://www.keramikinstitut.com/home/glossar/SediGraph>.

**zamg.ac.at. 2016.** www.zamg.ac.at. [Online] 2016. [Zitat vom: 08. 09 2016.]  
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>.

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenklassen .....	26
Tabelle 2: Tonmineralbestandteile.....	29
Tabelle 3 Typische Kenngrößen für Kohäsion und Reibungswinkel.....	34
Tabelle 4: Ergebnisse MK-Model.....	42
Tabelle 5: Verwendete geotechnische Parameter .....	43
Tabelle 6: Eingangsparameter für Simulation 1 .....	54
Tabelle 7: FOS jedes Verfahrens bei Rotations- und Translationsrutschung in der Simulation 1 .....	56
Tabelle 8: Eingangsparameter für Simulation 2.....	57
Tabelle 9: FOS jedes Verfahrens bei Rotations- und Translationsrutschung in der Simulation 2 .....	58
Tabelle 10: Eingangsparameter für Simulation 3.....	59
Tabelle 11: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 3 .....	61
Tabelle 12: Eingangsparameter für Simulation 4.....	62
Tabelle 13: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 4 .....	64
Tabelle 14: Eingangsparameter für Simulation 5.....	65
Tabelle 15: FOS jedes Verfahrens bei Rotationsrutschung und Translationsrutschung in der Simulation 5 .....	66
Tabelle 16: gesuchte Massen, die eine Rutschung im Szenario 1 auslösen .....	72
Tabelle 17: gesuchte Massen, die eine Rutschung im Szenario 2 auslösen .....	74

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gemeindegebiet Hollenstein an der Ybbs .....	5
Abbildung 2: Luftbild inkl. modellierten Anbruchgebiet der Mure .....	6
Abbildung 3: Foto vom Anbruchgebiet der „Gallenger Kogel Mure“.....	6
Abbildung 4: Klimadaten .....	7
Abbildung 5: "Säbelwuchs".....	11
Abbildung 6: Rotationsrutschung.....	12
Abbildung 7: Translationsrutschung .....	13
Abbildung 8: Hüllkurve .....	15
Abbildung 9: Mohr-Coulomb Bruchbedingung .....	16
Abbildung 10: Reibungswinkel - Anschauungsbeispiel.....	17
Abbildung 11: Drei-Phasen-Modell .....	17
Abbildung 12: Bodenwasser .....	18
Abbildung 13: Wasserretentionskurven der unterschiedlichen Bodentypen .....	19
Abbildung 14: Siebgerät .....	23
Abbildung 15: Kornverteilungskurve .....	25
Abbildung 16: Gesamtmineralanalyse .....	27
Abbildung 17: Tonmineralanalyse .....	28
Abbildung 18: Rahmenschergeräte des Instituts für Geotechnik an der BOKU .....	30
Abbildung 19: Rahmenschergerät .....	31
Abbildung 20: Wahl der Schergeschwindigkeit .....	32
Abbildung 21: Auswertung vom Rahmenscherversuch .....	33
Abbildung 22: Fließgrenzengerät nach Casagrande .....	35
Abbildung 23: Bildsamkeitsdiagramm.....	37
Abbildung 24: Einflussfaktoren auf die Böschungsstabilität .....	38
Abbildung 25: Wasserretentionskurve .....	41
Abbildung 26: Gleitfläche und sinnvolle Lamelleneinteilung .....	45
Abbildung 27: Aufgliederung der Berechnungsmethoden .....	46
Abbildung 28: Lamelle mit angreifenden Kräften .....	46

Abbildung 29: Erklärung des korrigierten Janbu Verfahrens .....	48
Abbildung 30: Parallel wirkende Kraft .....	49
Abbildung 31: Formen der Funktion $f(x)$ der GLE-Methode .....	51
Abbildung 32: Schematische Skizze zu Fragestellung 1 .....	52
Abbildung 33: Interpretationsfenster "SLIDE" .....	53
Abbildung 34: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r$ von 38,8 % .	54
Abbildung 35: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r = 38,8 %$ .	55
Abbildung 36: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r$ von 44,4 % .	57
Abbildung 37: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r = 44,4 %$ .	58
Abbildung 38: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r$ von 73,7 % .	59
Abbildung 39: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r = 73,7 %$ .	60
Abbildung 40: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r$ von 95,1 % .	62
Abbildung 41: Translationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r = 95,1 %$ .	63
Abbildung 42: Rotationsrutschung mit der GLE-Methode bei einem $S_r$ von 100 %..	65
Abbildung 43: Translationsrutschung mit der GLE-Methode - $S_r =$ von 100%.....	66
Abbildung 44: Factors of Safety der GLE-Methode bei Rotationsrutschungen .....	67
Abbildung 45: Factors of Safety der GLE-Methode bei Translationsrutschung .....	67
Abbildung 46: Schematische Skizze zu Szenario 1 .....	69
Abbildung 47: Simulation von Szenario 1 .....	70
Abbildung 48: Schematische Skizze zu Szenario 2 .....	73
Abbildung 49: Simulation von Szenario 2 .....	74

# 11 Anhang

MK-Model:

$\Psi$	$C_{\Psi}$	$S_c$	$S_a$	$S_a^*$	$S_r$	$w$
0,1	1,000	1,000	1,792	1,000	1,000	0,372
1,0	1,000	1,000	1,221	1,000	1,000	0,372
1,5	1,000	1,000	1,141	1,000	1,000	0,372
2,0	1,000	1,000	1,088	1,000	1,000	0,372
2,5	1,000	1,000	1,048	1,000	1,000	0,372
3,0	1,000	1,000	1,017	1,000	1,000	0,372
4,0	1,000	1,000	0,969	0,969	1,000	0,372
5,0	1,000	1,000	0,934	0,934	1,000	0,372
6,0	1,000	1,000	0,906	0,906	1,000	0,372
7,0	1,000	1,000	0,883	0,883	1,000	0,372
8,0	1,000	1,000	0,863	0,863	1,000	0,372
9,0	1,000	1,000	0,847	0,847	1,000	0,372
10,0	1,000	1,000	0,832	0,832	1,000	0,372
11,0	1,000	1,000	0,819	0,819	1,000	0,372
13,0	1,000	1,000	0,796	0,796	1,000	0,372
20,0	1,000	1,000	0,741	0,741	1,000	0,372
30,0	1,000	0,996	0,693	0,693	0,999	0,372
50,0	1,000	0,865	0,636	0,636	0,951	0,354
100,0	1,000	0,394	0,567	0,567	0,737	0,274
500,0	0,998	0,020	0,433	0,433	0,444	0,165
1000,0	0,996	0,005	0,385	0,385	0,388	0,144
5000,0	0,981	0,000	0,290	0,290	0,290	0,108
10000,0	0,963	0,000	0,253	0,253	0,253	0,094
50000,0	0,841	0,000	0,169	0,169	0,169	0,063
100000,0	0,724	0,000	0,130	0,130	0,130	0,048
300000,0	0,433	0,000	0,065	0,065	0,065	0,024
500000,0	0,257	0,000	0,035	0,035	0,035	0,013
980600,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Gesamten Ergebnistabelle des Modified Kovács Models. Dabei ist  $\Psi$  die Saugspannung und  $S_r$  der Sättigungsgrad.  $w$  ist der volumetrische Wassergehalt.

Atterberg'sche Zustandsgrenzen-Formular:

Projektskizzenzeichnung: .....

Institut für Geotechnik Universität für Bodenkultur Wien Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. W. Wu	Formblatt Nr. 7/5 Versuchsprotokoll Nr. ....
---	---

**Atterbergsche Zustandsgrenzen**

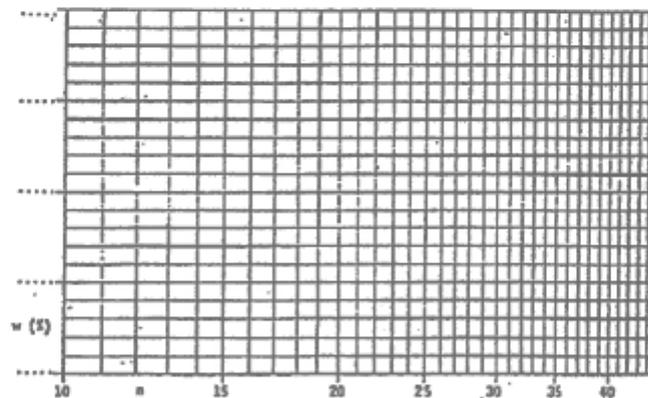
Bodenprobe Nr. .... Nicht getrocknet/luftgetrocknet/ofengetrocknet

Gesamtkornverteilung:  $w = \dots\dots\dots\%$   $D_{0,4} = \dots\dots\dots\%$   $D_{0,002} = \dots\dots\dots\%$

Durchgang 0,4 mm:  $w_{0,4} = \dots\dots\dots\%$ ,  $D_{0,002} = \dots\dots\dots\%$

Fließgrenze Gerät Nr. ....

Behälter Nr.					
Schlaganzahl n					
$m + m_c = m_1$ [g]					
$m_s + m_c = m_2$ [g]					
$m_c$ [g]					
$m_1 - m_2 = m_w$ [g]					
$m_2 - m_c = m_s$ [g]					
$m_w / m_s = w$ [g]					



Fließgrenze  $w_L = \dots\dots\dots\%$  Zustandzahl  $I_C = \dots\dots\dots$

Ausrollgrenze  $w_P = \dots\dots\dots\%$  Aktivitätszahl  $I_A = \dots\dots\dots$

Bildsamkeitszahl  $I_P = \dots\dots\dots\%$

Anmerkung: .....

Versuchsdurchführung: Datum: ..... Name: .....

Versuchsauswertung: Datum: ..... Name: .....

In der Mitte des Formulars sieht man das Diagramm mit halblogarithmischer Teilung, in dem die Schlagzahlen eingetragen werden.

Formulare des Rahmenschergerätes:

Projektskizzenzeichnung: .....

Institut für Geotechnik Universität für Bodenkultur Wien Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. W. Wu	Formblatt Nr. 8/6 Protokoll Nr. .... <u>05</u> .....
---	---

**Rahmenscherversuch**

Bodenprobe Nr. H584 =  $\rho_s$  2,750 g/cm<sup>3</sup> (Versuchswert/Schätzwert)

Dateneingabe Mensch/Elektronik Lfd. Nr. UPM60 1315 AK R07 VK 1

Gerät X

Zusätzl. Normalkraft  $N_z$  =   kN

Versuchsart: Einmaliges/mehrmaliges Abscheren

Abschergeschw.: erstes Absch.:  $v_1$  = 0,03 mm/min, weitere Absch.:  $v_2$  / mm/min

Probenform: ~~Quadrat~~ / Kreis

Einbauzustand

$h_p$  = 24,3 mm,  $\rho_p/d_p$  = 101,1 mm

$\rho_d$  =   g/cm<sup>3</sup>,  $w$  =   %

Umrechnungsfaktor

$f_N$  =   kN/E,  $f_T$  =   kN/E,  $f_w$  =   mm/E,  $f_u$  =   mm/E

Fehlerschrank für  $T_U$  =  $\pm$    E<sup>2)</sup>

Zeit t [t/h/min]	$\Delta t^{3)}$ [min]	$N_U$ [E]	$T_U$ [E]	$W_{U1}$ [E]	$W_{U2}$ [E]	$W_{U3}$ [E]	$W_{U4}$ [E]	$U_U$ [E]
	0							

<sup>1)</sup>  $h_p$  ist die Probenhöhe bei  $\Delta t = 0$  (Normalspannung entsprechend 1. Tabellenzeile)

<sup>2)</sup> Kleinere  $T_U$ -Werte werden gleich Null gesetzt.

<sup>3)</sup> Die Werte  $\Delta t$  beziehen sich auf den Beginn einer einzelnen Versuchsphasen.  $\Delta t = 0$  wird nur bei Versuchsbeginn eingegeben.

Anmerkungen: Gallenza Kopf, Handgezeichnet.

Versuchsdurchführung: Datum: 22.1 Name: .....

Institut für Geotechnik  
 Universität für Bodenkultur Wien  
 Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. W. Wu

Formblatt Nr. 8/6  
 Protokoll Nr. ....

**Rahmenscherversuch**

Bodenprobe Nr. H 5 84 =  $p_s$  21750 g/cm<sup>3</sup> (~~Versuchswert~~/Schätzwert)

Dateneingabe Manuell/Elektronik Lfd. Nr. UPM60        AK REF VK 2

Gerät Y

Zusätzl. Normalkraft  $N_z$  =        kN

Versuchsart: Einmaliges/mehrmaliges Abscheren

Abschergeschw.: erstes Absch.:  $v_1$  = 0,03 mm/min, weitere Absch.:  $v_2$         mm/min

Probenform: Quadrat/Kreis

**Einbauzustand**

$h_p$  = 24,1 mm,  $d_p$  = 101,1 mm

$\rho_d$  =        g/cm<sup>3</sup>,  $w$  =        %

**Umrechnungsfaktor**

$f_N$  =        kN/E,  $f_T$  =        kN/E,  $f_w$  =        mm/E,  $f_u$  =        mm/E

Fehlerschrank für  $T_U$  =  $\pm$         E<sup>2)</sup>

Zeit t [t/v/min]	$\Delta t$ <sup>3)</sup> [min]	$N_U$ [E]	$T_U$ [E]	$W_{U1}$ [E]	$W_{U2}$ [E]	$W_{U3}$ [E]	$W_{U4}$ [E]	$U_U$ [E]
	0							

<sup>1)</sup>  $h_p$  ist die Probenhöhe bei  $\Delta t = 0$  (Normalspannung entsprechend 1. Tabellenzeile)  
<sup>2)</sup> Kleinere  $T_U$ -Werte werden gleich Null gesetzt.  
<sup>3)</sup> Die Werte  $\Delta t$  beziehen sich auf den Beginn einer einzelnen Versuchsphasen.  $\Delta t = 0$  wird nur bei Versuchsbeginn eingegeben.

Anmerkungen: Gallenza Kopf, Hauptutschp.

Versuchsdurchführung: Datum: 22.11 Name: .....

Institut für Geotechnik  
 Universität für Bodenkultur Wien  
 Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. W. Wu

Formblatt Nr. 8/6  
 Protokoll Nr. ....

**Rahmenschererversuch**

Bodenprobe Nr.  =  $\rho_s$   g/cm<sup>3</sup> (~~.....~~/Schätzwert)

Dateneingabe  Lfd. Nr. UPM60  AK  VK

Gerät

Zusätzl. Normalkraft  $N_z$  =  kN

Versuchsart:

Abschergeschw.: erstes Absch.:  $v_1$  =  mm/min, weitere Absch.:  $v_2$   mm/min

Probenform:

**Einbauzustand**

$h_p$  =  mm,  $d_p$  =  mm

$\rho_d$  =  g/cm<sup>3</sup>,  $w$  =  %

**Umrechnungsfaktor**

$f_N$  =  kNE,  $f_T$  =  kNE,  $f_w$  =  mm/E,  $f_u$  =  mm/E

Fehlerschrank für  $T_U$  =  $\pm$   E<sup>2)</sup>

Zeit t [t/v/min]	$\Delta t^{2)}$ [min]	$N_U$ [E]	$T_U$ [E]	$w_{U1}$ [E]	$w_{U2}$ [E]	$w_{U3}$ [E]	$w_{U4}$ [E]	$u_U$ [E]
	0							

<sup>1)</sup>  $h_p$  ist die Probenhöhe bei  $\Delta t = 0$  (Normalspannung entsprechend 1. Tabellenzeile)  
<sup>2)</sup> Kleinere  $T_U$ -Werte werden gleich Null gesetzt.  
<sup>3)</sup> Die Werte  $\Delta t$  beziehen sich auf den Beginn einer einzelnen Versuchsphasen.  $\Delta t = 0$  wird nur bei Versuchsbeginn eingegeben.

Anmerkungen: Galluzer Kopf, Hauptaufschp

Versuchsdurchführung: Datum: ??? Name: .....

Institut für Geotechnik  
 Universität für Bodenkultur Wien  
 Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. W. Wu

Formblatt Nr. 8/6  
 Protokoll Nr. ....

**Rahmenscherversuch**

Bodenprobe Nr. H584 =  $\rho_s$  2,750 g/cm<sup>3</sup> (~~Versuchswert~~/Schätzwert)

Dateneingabe Manuell/Elektronik Lfd. Nr. UPM60        AK 207 VK 4

Gerät W

Zusätzl. Normalkraft  $N_z$  =        kN

Versuchsart: Einmaliges/mehrfaches Abscheren

Abschergeschw.: erstes Absch.:  $v_1$  = 0,03 mm/min, weitere Absch.:  $v_2$         mm/min

Probenform: Quadrat / Kreis

**Einbauzustand**

$h_p$  = 23,93 mm,  $d_p/d_p$  = 101,1 mm

$\rho_d$  =        g/cm<sup>3</sup>,  $w$  =        %

**Umrechnungsfaktor**

$f_N$  =        kN/E,  $f_T$  =        kN/E,  $f_w$  =        mm/E,  $f_u$  =        mm/E

Fehlerschrank für  $T_U$  =  $\pm$         E<sup>2)</sup>

Zeit t [t/h/min]	$\Delta t^{3)}$ [min]	$N_U$ [E]	$T_U$ [E]	$W_{U1}$ [E]	$W_{U2}$ [E]	$W_{U3}$ [E]	$W_{U4}$ [E]	$u_U$ [E]
	0							

<sup>1)</sup>  $h_p$  ist die Probenhöhe bei  $\Delta t = 0$  (Normalspannung entsprechend 1. Tabellenzeile)  
<sup>2)</sup> Kleinere  $T_U$ -Werte werden gleich Null gesetzt.  
<sup>3)</sup> Die Werte  $\Delta t$  beziehen sich auf den Beginn einer einzelnen Versuchsphasen.  $\Delta t = 0$  wird nur bei Versuchsbeginn eingegeben.

Anmerkungen: Gallenzer Kopf, Hautschiff

Versuchsdurchführung: Datum: 27.4 Name: .....

## 12 Lebenslauf/CV

Benedikt Ennsfellner, BSc

### LEBENS LAUF



### Persönliche Angaben

*Geburtsdatum/ -ort* 19.02.1989 in St. Pölten

*Anschrift* Ebersbergerstraße 11; 3495 Rohrendorf  
0660 / 344 32 23  
b.ennsfellner@tele2.at

*Nebenwohnsitz* Grünentorgasse 33/16; 1090 Wien

### Ausbildung

*seit 2014* Masterstudium Alpine Naturgefahren/Wildbach- und Lawinenverbauung  
an

der BOKU-Wien

*2010 – 2014* Bachelorstudium Forstwirtschaft and der BOKU-Wien

- Abschluss des Bachelorstudium im November 2014

*2004 – 2009*

SDV – Informatik – Schule, Korneuburg

- Berufsreifeprüfung an der Vienna Business School, Wien

- Abschlussprüfung der 3-jährigen SDV-Informatik-Schule

*2003 – 2004*

Handels Akademie, Krems

*1999 – 2003*

BRG Ringstraße, Krems

*1995 – 1999*

VS Rohrendorf, Rohrendorf

### Kenntnisse und Interessen

*IT-Kenntnisse* Microsoft Office, AutoCAD-Civil 3D, ArcGIS, Surfer, Rocscience SLIDE

*Fremdsprachen* Englisch

*Hobbys* Lesen, Skifahren, Wandern, Filme

*Sonstiges* B-Führerschein

### **Nebenbeschäftigung:**

- 09/2012 – 06/2014* geringfügige Beschäftigung bei der Fa.  
Obi, Hadikgasse 184, 1140 Wien
- 04/2009 – 07/2009* Aushilfe bei der Fa. Mega Baumaxx,  
Alt Weidlinger Straße 4, 3500 Krems
- 10/2008 – 02/2009* Aushilfe bei der Fa. Müller HandelsgmbH,  
Landstraßer Hauptstr. 101/2/1, 1030 Wien
- 04/2008 – 07/2008* Aushilfe bei der Fa. Mega Baumaxx

### **Berufliche Tätigkeiten und Beschreibung**

- 09/2016 - 09/2017* Befristetes Dienstverhältnis bei die.Wildbach,  
Josef Adlmanseder-Str. 4, 3390 Melk
- 09/2015* Praktikum im ZT-Büro Heller,  
Balderichgasse 1/19, 1170 Wien
- 08/2014* Praktikum bei die.Wildbach,  
Josef Adlmanseder-Str. 4, 3390 Melk
- 07/2012* Pflichtpraktikum im Forstbetrieb Stift Göttweig
- 07/2011* Ferialarbeit bei der Fa. Saubermacher,  
Altweidlingerstraße 1, 3500 Krems
- 07/2010* Ferialarbeit bei der Fa. Saubermacher
- 07/2008* Ferialarbeit bei der Fa. Saubermacher
- 07/2007* Ferialarbeit im Büro der Gemeinde Rohrendorf,  
Obere Hauptstraße 6, 3495 Rohrendorf
- 07/2006* Ferialarbeit bei der Fa. Chabek Bau Ges.m.b.H.,  
Jaidhof 22, 3542 Jaidhof
- 07/2005* Ferialarbeit bei der Fa. Soukop Karl, Holzwerk Ges.m.b.H.,  
Rechte Bahnzeile 5, 3494 Gedersdorf.
- 07/2004* Ferialarbeit bei der Fa. Soukop Karl, Holzwerk Ges.m.b.H.,