Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.



DIPLOMARBEIT Master Thesis

Numerische Untersuchungen mittels des DEM-Codes UDEC zum Einfluss des Bergwasserspiegels auf die Stabilität der Felsgleitung Misljoch (Navistal, Tirol)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh

E220

Institut für Geotechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Hauser, BSc

1026301

Ponholzweg 21 2851 Krumbach

eigenhändige Unterschrift

Wien, am 11.10.2017

Vorwort:

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen herzlich bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh der mich in fachlichen Fragen, vor allem bei den zahlreichen UDEC Problemen immer rasch und kompetent unterstützt hat.

Herrn Mag. Dr. Thomas Sausgruber von der Wildbauch- und Lawinenverbau, Sektion Tirol danke ich für die Bereitstellung sämtlicher Daten.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin Sandra und bei meinen beiden Söhnen Konstantin und Seraphin die mir immer die nötige Zeit für mein Studium gaben und mir in allen Höhen und Tiefen zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Studienkollegen mit denen ich viele Prüfungen absolvieren durfte.

Ein besonderer Dank gilt meinem guten Freund und ehemaligen Studienkollegen DIPL.-ING Mathias Hammerl, BSc der meine Arbeit Korrektur gelesen hat.

Abstract:

At Kerschbaumsiedlung which is located within the municipality of Navis in Tirol, Austria, massive damage to buildings has occurred as a result of slope instabilities which are being mainly expressed into two discrete forms: a deep sited landslide and an earth flow. The reason for these land movements is, on the one hand, a deep sited rock slide, and on the other hand, an earth flow with a thickness of up to 40 m.

Movement rates on the surface of the earth flow were determined by means of a total station and reached velocities of 1-3 cm / a. The difference in altimeter between the ridge region and the foot of the slope (Navisbach) is about 1000 m. The average slope is about 22 $^{\circ}$

The aim and challenge of this Master's Thesis was to investigate to what extend the longrange (overall) slope movement is influenced or controlled by seasonal fluctuations of the mountain water-table level.

In order to answer these questions, a numerical model was developed using the Distinct Element Code UDEC (Itasca Consulting Group). The effect of minor changes in the mountain water-table on the factor of safety has been modeled, based on hydrological data of the Torrent and Avalanche Control, Austria, and data reported in the Master's Theses of Pichler (2015) and Rieder (2016)

In the numerical investigations, the stability of the slope was systematically assessed for different mountain water-table levels, by calculating the global safety factor according to ÖNORM B4433. The safety factor was derived by means of the strength reduction method, which was applied both to the strength parameters of the intact rock as well as to the strength parameters of the discontinuities.

With the help of UDEC and the calculations carried out according to the balance equilibrium approach, it has been possible to quantify the effects of mountain water-table level fluctuations on mass movement rates, as well as, to recognize their basic mechanical relationships and interaction. It could also be shown that sliding surfaces, calculated in this Thesis compared with those reported in the work of Pichler (PICHLER, 2015), can occur at the same depth but a different failure mechanism, other than sliding on polygonal surfaces could be in effect.

Kurzfassung:

In der Gemeinde Navis in Tirol kommt es in der Kerschbaumsiedlung durch Hangbewegungen zu massiven Schäden an Gebäuden. Der Grund für diese Bewegungen ist einerseits eine tiefreichende Felsgleitmasse und andererseits ein auf Ihr lagernder 40 m mächtiger, wasserführender Schuttstrom.

Die Bewegungsraten an der Oberfläche des Schuttstromes wurden mittels Totalstation ermittelt und erreichen Geschwindigkeiten von 1-3 cm/a. Der Höhenunterschied von der Gratregion bis zum Hangfuß (Navisbach) beträgt in etwa 1000 m. Die Mittlere Hangneigung beträgt ca. 22°.

Ziel und Herausforderung der Arbeit war es, herauszufinden, wie bzw. wie stark die tiefreichende Hangbewegung durch saisonale Schwankungen des Bergwasserspiegels beeinflusst bzw. gesteuert wird.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein diskontinuumsmechanisches numerisches Modell mit Hilfe des Distinct Element Codes UDEC (Itasca Consulting Group) erstellt und der Effekt von geringfügigen Bergwasserspiegelschwankungen basierend auf den hydrologischen Daten der Wildbach und Lawinenverbauung und der Masterarbeit von Pichler (2015) und Rieder (2016) modelliert.

Bei den numerischen Untersuchungen wurde die Stabilität der Böschung systematisch für die unterschiedlichen Bergwasserspiegelverläufe mit Hilfe des globalen Sicherheitsfaktors nach ÖNORM B4433 bewertet. Die Bestimmung des Sicherheitsfaktors erfolgte mit Hilfe der Methode der Festigkeitsreduktion, welche sowohl auf die Festigkeitsparameter das Gestein als auch auf die Trennflächen angewendet wurde.

Mit Hilfe von UDEC und den durchgeführten Grenzgleichgewichtsberechnungen war es möglich, die Auswirkungen der Massenbewegung in Bezug auf den Bergwasserspiegel abzuschätzen und grundlegende mechanische Zusammenhänge der Interaktion Bergwasserspiegel-Massenbewegung zu erkennen. Es konnte auch gezeigt werden, dass die angenommenen Gleitflächen aus der Arbeit von Pichler (PICHLER, 2015) zwar dieselbe Tiefenlage besitzt aber sich ein anderer Versagensmechanismus als Gleiten auf polygonalen Gleitflächen einstellt. Inhaltsverzeichnis

Abstract

Kurzfassung

1	Ein	leitı	ing	5
	1.1	Pro	blemstellung	5
2 Ablöse und Versagensmechanismen von Böschungen				7
	2.1	Ver	sagensmechanismen im Festgestein	8
	2.2	Ver	sagensmechanismen im Lockergesteinen	13
	2.3	Aus	löser (Trigger) von Massenbewegungen	16
	2.4	Bec	bachtungsmethoden (Monitoring) von Massenbewegungen	17
3	Gro	oßha	ngbewegung Kerschbaumsiedlung, Navistal, Tirol	18
	3.1	Geo	logische und geomechanische Verhältnisse	19
	3.2	Unt	ergrunderkundung, Untersuchungen, Monitoring	21
	3.3	Hyo	lrogeologische Verhältnisse	24
4	Мо	delli	erung mittels UDEC	29
	4.1	UD	EC	29
	4.1	.1	Berechnungsablauf UDEC	30
	4.1.2		Sicherheitsdefinition nach Fellenius	33
	4.1	.3	Methode der Festigkeitsreduktion	34
	4.2	Zie	der Modellierung	36
	4.3	Unt	ersuchte Modelle	36
	4.4	Ber	echnungsablauf	37
	4.5 N		dellgeometrie	39
	4.6	Net	zgenerierung, Netzfeinheit und Randbedingungen	42
	4.6	.1	Netztyp 1	43
4.6		.2	Netztyp 2	43
	4.7	Ma	erialparameter	45
	4.7	.1	Materialparameter für Netzfeinheit 1	48
	4.7	.2	Materialparameter für Netzfeinheit 2	51
5	Bei	ech	nungsergebnisse	52
				3

5.1 Modell 1: Netztyp 1 (grobes Netz)	53
5.2 Modell 1: Netztyp 2 (feines Netz)	56
5.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 1	58
5.3 Modell 2: Netztyp 1 (grobes Netz)	62
5.4 Modell 2: Netztyp 2 (feines Netz)	66
5.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 2	68
5.5 Modell 3: Netztyp 1 (grobes Netz)	73
5.6 Modell 3: Netztyp 2 (feines Netz)	76
5.6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 3	79
5.7 Modell 4: grobes Netz - Netzfeinheit 100 m	
5.8 Modell 4: feines Netz Netzfeinheit 65 m	86
5.8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 4	
6 Interpretation und Schlussfolgerung	94
6.1 Netztyp 1	94
6.2 Netztyp 2	96
7 Zusammenfassung	99
8 Literaturverzeichnis	100
9 Verzeichnisse	103
9.1 Abbildungsverzeichnis	103
9.2 Tabellenverzeichnis	105

1 Einleitung

Massenbewegungen waren schon immer ein Problem für Menschen und deren Infrastruktur. Durch immer größere Siedlungsgebiete steigt auch die Gefahr nicht untersuchte, instabile Gebiete zu erschließen und diese in ein Wohngebiet umzuwidmen. Untersuchungen zu gefahrenabschätzungen und -prognosen werden oft aus wirtschaftlichen Gründen und Unwissenheit beteiligter Personen vernachlässigt, oder nur mit sehr geringen Aufwendungen betrieben. Die Folgen solcher Entscheidungen zeigen sich im schlimmsten Fall erst Jahre später, wenn plötzlich Risse und Schäden an Gebäuden oder der Infrastruktur auftreten. Die Folge sind hohe Kosten für aufwendige Sanierungsmaßnahmen, falls solche überhaupt noch möglich sind. Meist ist die effektivste Möglichkeit die Geschwindigkeit des Hanges zu reduzieren in den Wasserhaushalt einzugreifen. Das kann zum Beispiel durch Brunnenanlagen geschehen, durch die das Wasser kontinuierlich herausgefördert wird. Durch die Absenkung von Hangwasserdruckpotentialien können größere Kräfte im Boden übertragen werden. Es entsteht also eine Änderung des Spannungszustandes. Eine Beurteilung von Restscherwinkel und anderer Bodenparameter sind hier oft entscheidend.

Die vorliegende Arbeit untersucht den Mechanismus Felsgleiten bei einem konkreten Projekt. Bei diesem Projekt handelt es sich um einen Teil des Misljochs in Tirol. Hier ist die Kerschbaumsiedlung von einer Kriechbewegung des Hanges betroffen. Diese setzt sich aus einer tiefreichenden Felsgleitung, der ein etwa 40 m mächtiger Schuttstrom auflagert zusammen. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit dem Verschiebungsverhalten der tiefreichenden Großhangbewegung respektive der Felsgleitung. Das Hauptaugenmerk wird hier besonders auf das Trennflächensystem des Gebirges und den Bergwasserspiegel gelegt.

1.1 Problemstellung

In der Gemeinde Navis in Tirol kommt es in der Kerschbaumsiedlung durch Hangbewegungen zu massiven Schäden an Gebäuden. Der Grund für diese Bewegungen ist ein 40 m mächtiger, wasserführender Schuttstrom, welcher seinerseits auf einer tiefreichenden Felsgleitmasse lagert. Die Bewegungsraten an der Oberfläche des Schuttstromes wurden mittels Totalstation ermittelt und erreichen Geschwindigkeiten von 1-3 cm/a. Der Höhenunterschied von der Gratregion bis zum Navisbach beträgt in etwa 1000 m. Die Mittlere Hangneigung beträgt nur 22,5°.

Ziel und Herausforderung der Arbeit war es, herauszufinden, wie bzw. wie stark die tiefreichende Hangbewegung durch saisonale Schwankungen des Bergwasserspiegels beeinflusst bzw. gesteuert wird und abzuschätzen, welchen Anteil die Felsgleitung an den beobachteten Gesamtverschiebungen (Schuttstrom + Felsgleitung) hat bzw. haben kann. Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein diskontinuumsmechanisches numerisches Modell mit Hilfe des Computercodes UDEC erstellt und der Effekt von geringfügigen Bergwasserspiegelschwankungen basierend den hydrologischen Messe modelliert.

Das Ziel der Arbeit ist somit eine Aussage zu treffen, welchen Einfluss Bergwasserspiegelschwankungen auf die tiefreichenden Felsgleitmasse besitzen und in wie weit diese für die Hangbewegung verantwortlich sind.

2 Ablöse und Versagensmechanismen von Böschungen

"Eine Hangbewegung ist ein physikalisches System, dass sich im Laufe der Zeit durch mehrere Stufen entwickelt (z.B. Terzaghi 1950). Wie von Skempton und Hutchinson (1969) überprüft, umfasst die Geschichte einer Massenbewegung eine Verformungen des Hanges, das Versagen bzw. Abrutschen selbst und falls es zum Ablösen der Massenbewegung kommt zu Steinschlägen oder zu Felsstürzen . Das Vorverformen des Hanges, das Ablösen und die Steinschläge bzw. Felsstürze werden durch Versagens- oder Ablösemechanismen gesteuert. Wenn das Abrutschen zu einem vollständigen Ablösen der bewegten Masse oder Teilen davon führt können Steinschläge bzw. Felsstürze daraus resultieren " [Preh, 2017]

Massenbewegungen, auch Hangbewegungen oder Hangrutschungen, sind geomorphologische Prozesse bei denen das Grenzgleichgewicht η =1,0 zustande kommt. Kommt es zu einer Veränderung der Beanspruchung, z.B. durch das Aufbringen einer Kraft oder zur Änderung des Bergwasserspiegels, liegt im System kein Gleichgewicht mehr vor. Das bedeutet, dass die zusätzlichen Belastungen nicht mehr durch die Kohäsions- und Reibungskräfte übernommen werden können. Dadurch kommt es zu einem Versagen. Die Versagensarten können plötzlich (Sekunden z.B. Felssturz) oder langsam (Jahre z.B. Kriechen) auftreten.

Der Nutzen eines Katalogs möglicher Versagensmechanismen (Klassifizierungssystem) von Felsböschungen liegt darin begründet, dass der Kenntnis über den jeweilig vorherrschenden Mechanismus bei der Festlegung eines geeigneten Monitoringprogramms, bei der Interpretation von Messungen (Kovari, 1990), bei Standsicherheitsanalysen (analytische oder numerische Verfahren) und bei der Beurteilung von Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit grundlegende Bedeutung zukommt (PREH, 2004). Der Einfluss des Wassers auf die Standsicherheit ist groß. Bei starken Niederschlägen kann es zu einer Aufspiegelung des Bergwasserspiegels kommen, was zu Wasserinduzierten Verschiebungen führen kann.

Folgend werden anhand des Klassifizierungssystems von Poisel und Preh (2004) und Poisel und Hofmann (1998) Versagensmechanismen im Detail beschrieben.

2.1 Versagensmechanismen im Festgestein



Abbildung 2.1: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 1 (Poisel & Preh, 2004)



Abbildung 2.2: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 2 (Poisel & Preh, 2004)



Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Hangkriechens (POISEL, 1998)

In Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 sind die einzelnen Ablöse- und Bewegungsmechanismen dargestellt. Dazu sei angemerkt, dass es Übergänge zwischen den einzelnen Versagensformen geben kann oder dass eine große, komplexe Massenbewegung mehrere Versagensformen inkludieren kann. Überschneidungen und Kombinationen der einzelnen Erscheinungen sind in der Natur der Regelfall. Die einzelnen Mechanismen werden nun kurz beschrieben.

• Fallen von Kluftkörpern:

Dieses Versagen ist nur im Überhang möglich. Es findet entlang einer oder mehreren Gleitebenen statt. Dabei kommt es zu geringen Scherbewegungen bevor es zu einem Ablösevorgang des Felsteils kommt.

o Gleiten eines Kluftkörpers auf einer oder zwei Trennflächen:

Das Gleiten ist eine translatorische Bewegung eines Kluftkörpers. Hier ist zu unterscheiden ob der Gleitkörper auf einer oder mehreren Gleitflächen abrutscht.

• Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche:

Der Prozess ist ein ähnliches Versagen wie das Gleiten eines Kluftkörpers auf einer oder zwei Trennflächen. Zwischen den einzelnen Teilkörpern kommt es zu Scherbrüchen. Ein bekanntes Beispiel ist das Versagen eines Hanges in Vajont 1963.

• Rückwärtsrotation von Kluftkörpern:

Hier wirken 2 Trennflächen in Kombination. Durch die vertikale Bewegung kommt es zu einer "Sackung" bzw. zu einem Absenken der Kluftkörper im Anbruchbereich.

• Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neugebildeten Gleitfläche:

Der Versagensprozess tritt i.A. in Fels mit geringen Festigkeiten, zum Beispiel stark zerlegt, geklüftet oder verwittert, auf. Es bildet sich eine neue Bruch-, bzw. Gleitfläche und es bildet sich an der Böchungsoberkante eine Stufe. Der Fuß wird aufgestaucht. Dieser Mechanismus wird in der Literatur auch als Rotationsgleitung beschrieben.

• Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluftkörper am Rand eines kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel ("Hart auf Weich"):

Wie die Kurzbezeichnung "Hart auf Weich, beschreibt, kommt dieser Versagensmechanismus bei spröden, kompetenten Deckschichten mit hoher Festigkeit, die auf einem plastischen, weichen (inkompetenten) Sockel mit geringerer Festigkeit lagern, vor. Durch das weiche Auflager kommt es im spröden Bereich zu Zugspannung, die vom Material nicht mehr aufgenommen werden können. Dadurch bildet sich ein Kluftsystem (turmartig bzw. plattenförmig), welches in der Folge zum Abgleiten, Kippen oder Abfahren neigt.

• Rotation einzelner Kluftkörper (Torsionsbruch):

Dieser Versagensmechanismus entsteht durch das Ablösen eines Kluftkörpers, welcher außermittig lagert bzw. ein nachgiebiges Auflager besitzt. Durch das einseitige bzw. weiche Auflager kommt es zu einer Drehbewegung des Blocks. Dieser Vorgang findet bei Festgestein mit hohen Durchtrennungsgrad statt.

• Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern:

Ausknicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern tritt nur in äußerst dünnbankigen Gesteinen auf, bei Etagenhöhen ab zu 15 m. Dies setzt also ein gewisses Verhältnis von Dicke zu Höhe voraus, bis solcher Versagensmechanismus eintreten kann. Das Knickproblem ist äquivalent zu jenen aus anderen Baustoffen. Wenn die Drucklast zu groß wird, kommt es zu einem Ausweichen (um die schwache Achse) des Kluftkörpers.

• Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern:

Tritt vor allem bei niedrigen Trennflächen und hohen Gesteinsfestigkeiten auf. Die Haupttrennflächen fallen steil in den Hang ein. Der Versagensmechanismus kann beispielhaft wie das Umfallen von Dominosteinen oder das Umfallen von Büchern in einem Bücherregal beschrieben werden.

• Biegekippen:

Basis für diesen Versagensprozess sind einscharig geklüftete Körper im Festgestein, deren Trennflächen parallel zum Hang streichen und steil einfallen. An der Oberseite entsteht ein Bergzereißen. Im Schnitt gesehen kann man V-förmige Spalten erkennen. Durch das Öffnen der Spalten werden die Klultkörper wie Kragträger beansprucht. Durch dieses statisch vereinfachte Gedankenmodell kommt es sinngemäß zu Biegezugrissen im Festgestein. Dadurch entsteht ein Abkippen der neugebildeten Kluftkörper.

• Hangkriechen:

Kommt vor allem bei Festgesteinen mit geringer Festigkeit vor (z.B. Phyllit). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Bewegungsgeschwindigkeit ab. Diese Vorgänge können zum Beispiel durch Felsmassenbewegung entstehen. In der Regel bildet sich keine eindeutige Gleitfläche aus (siehe Abbildung 2.3).

• Knickbandsackung:

Der Begriff "kink band slumping" wurde von Kiefer (1998) eingeführt und beschreibt eine Sförmige Verformung von annähernd hangparallel und steiler als die Hangneigung einfallenden Gesteinslagen (siehe A. Preh, Dissertation, 2004). Für die Hangbewegungen der Kerschbaumsiedlung ist anzumerken, dass es sich um eine Kombination aus "Hart auf Weich" und Hangkriechen handelt.

2.2 Versagensmechanismen im Lockergesteinen

In Abbildung 2.4 sind die Ablöse- und Versagensmechanismen von Lockergesteinen ersichtlich. Diese werden der Vollständigkeit halber dargestellt, da es sich beim Versagensmechanismuns der Kerschbaumsiedlung um eine Kombination aus Versagen des Festgesteines (Felsgleitung) und Versagen des Lockergesteins (Schuttstrom) handelt.



Abbildung 2.4: Ablöse- und Versagensmechanismen im Lockergestein (Hofmann & Poisel, 2010)

2. Ablöse und Versagensmechanismen von Böschungen

• Translationsgleitung im Lockergestein:

Dieser Versagensmechanismus ähnelt dem Gleiten eines Kluftkörpers auf einer oder zwei Trennflächen. Der Unterschied ist, dass die Lockergesteinsmassen meist schollen- oder partienweise versagen.

• Translation mehrerer Lockergesteinskörper auf einer polygonalen Gleitfläche:

Diese wird maßgeblich von den Trennflächen zwischen den Lockergesteinskörpern beeinflusst. Der Vorgang ist ähnlich dem Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche. Berechnungsverfahren liefert z.B. die Kinematische Elemente Methode.

• Translation mehrerer Lockergesteinskörper auf einer böschungsparallelen Gleitfläche:

Für diesen Versagensmechanismus ist eine eindeutige Abgrenzung von Schichtgrenzen erforderlich. Die Bewegung erfolgt translatorisch und kann, je nach Bergwasserspiegel, in eine erdstromartige Bewegung übergehen. Berechnungsansätze finden sich in Janbu (1954) und Morgenstern (1963)

• Rotationsgleitung auf einer kreisförmigen Gleitfläche:

Dieser Versagensmechanismus ist eine der häufigsten Fälle im Lockergestein. Er ist durch die Ausbildung einer kreisförmigen Gleitfläche gekennzeichnet. Berechnungsansätze liefert z.B. das Lamellenverfahren nach Bishop. Die Verfahren nach Fröhlich (1963) und Fellenius (1927) behandeln ebenfalls diesen Mechanismus.

• Hangkriechen im Lockergestein (creep):

Dieser Prozess ist ähnlich dem des Festgesteines. Die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt mit der Tiefe kontinuierlich ab.

• Erdstrom (mud slide):

Dieser Bewegungsvorgang ist sehr stark vom Wassergehalt der Gleitmasse abhängig. Es kommt zu einer gleitenden Bewegung des meist feinkörnigen Erdstroms. Das Phänomen dieser Bewegung ist, dass diese bereits bei sehr geringen Hangneigungen ~ 5-6° stattfinden kann. Die Bewegungsgeschwindigkeiten können viele Meter pro Tag betragen. Erdströme sind, Beobachtungen zu Folge, zyklische Prozesse welche aus Bewegungen und Aufschiebungen bestehen (Poisel et al., 2011)

Wie bereits bei den Festgesteinen erwähnt, handelt es sich um einen Überblick der möglichen Versagensmechanismen von Lockergesteinen. Übergänge zu einzelnen Mechanismen und Kombinationen, kommen öfters vor. Die Abschätzung und Prognose von Versagens- und Ablösemechanismen, wie in den Kapiteln 2.1, 2.2 und 2.3 dargestellt, ist in vielen Fällen nicht einfach und setzt ein an den Versagensmechanismus angepasstes Monitoring zusammen mit einschlägiger Erfahrung voraus. Wichtig ist vor allem, eine Abschätzung der räumlichen Bewegungsrichtung und der Bewegungsgeschwindigkeiten. Für solche Abschätzungen ist ein längerer Zeitraum mit unterschiedlichen Monitoringsystemen erforderlich. Dieser Beobachtungszeitraum sollte alle Jahreszeiten abdecken, um Einflüsse wie z. B. Schneeschmelze und dergleichen zu berücksichtigen.



Abbildung 2.5: Zeit Verschiebungsverlauf von unterschiedlichen Hangbewegungsmechanismen (Zangerl C. et al., 2008)

In Abbildung 2.5 ist ein Zeit - Verschiebungsverlauf mit unterschiedlichen Bewegungsverhalten ersichtlich. Kurve A stellt eine beschleunigte Hangbewegung dar, bei der der Hang versagen würde. Kurve B stellt eine abnehmende Bewegung dar. Solche Erscheinungen können z.B. durch Entwässerungen des Hangsystems erfolgen. Kurve C stellt einen periodischen Verlauf der Verschiebungen dar. Dieser Verlauf wäre ein gutes Beispiel für die jahreszeitabhängigen Verlagerung.

2.3 Auslöser (Trigger) von Massenbewegungen

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die Auslöser von Massenbewegungen gegeben werden. Solche Auslöser werden auch als "Trigger" bezeichnet.

• Wasser:

Wasser ist eine der häufigsten Faktoren für die Entstehung von Massenbewegungen. Dabei unterscheidet man zwischen Berg-, Grund-, und Niederschlagswasser (Oberflächenwasser). Oberflächenwässer entstehen z.B. durch Niederschläge oder nach Schneeschmelzen. Das Wasser dringt in das Kluftsystem des Festgesteines ein. Dadurch kann es zu einem Strömungsdruck (bei fließendem Bergwasser) bzw. zu einem Kluftwasserdruck (hydrostatischer Wasserdruck) kommen. Des Weiteren kommt es durch das Bergwasser zu einer Änderung der Festigkeit. Dabei kommt es zu einer Abnahme der Kohäsion und zu einer Verringerung der Scherwiderstände.

In den Wasserhaushalt einzugreifen, ist meist eine der kostengünstigsten Methoden. Dabei sollte Oberflächenwässer mittels flexiblen Drainagen man ableiten. Oberflächenversiegelungen sind auch denkbar. Wichtig dabei ist eine korrekte Ausführung und Wegleitung des Wassers, da ansonsten der Hang noch zusätzlich bewässert wird. Drainagen aus Bohrungen bzw. Stollen sind für eine tiefere Hangentwässerung durchaus gut geeignet. Solche Maßnahmen können sehr wirtschaftlich die Verschiebungsgeschwindigkeiten auf 10 – 50 % reduzieren.

• Änderung der Geometrie:

Hier unterscheidet man zwischen einer natürlichen Änderung (zum Beispiel Erosion) und einer künstlichen Änderung (zum Beispiel Versteilerung, Anschnitte, Vortrieb von Lehnentunnel,...).

Eine Verhinderung der Erosion kann durch Begrünung, Netzt Spritzbeton, Sicherung des Böschungsfußes (hier muss man darauf achten, dass man keine dichte Oberfläche erzeugt sonst erhöht man zusätzlich den Wasserdruck) verhindert werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verflachung des Geländes. Hier kann man das Verfahren der schonenden Sprengung ("pre splitting") anwenden.

• Änderung der Spannungsverhältnisse:

Zu den natürlichen Mechanismen zählen die Temperatureinwirkung, der Wurzeldruck und die Eiswirkung in den Klüften.

Bei den künstlichen Mechanismen kommen z.B. die Auflast, die Errichtung einer Deponie oder die Wegnahme der Auflast am Fuß vor.

• Erschütterungen:

Erschütterungen können beispielsweise natürlich (Erdbeben) oder künstlich durch (Sprengungen) entstehen.

2.4 Beobachtungsmethoden (Monitoring) von Massenbewegungen

Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über Monitoringsysteme, welche zur Vertiefung des Prozessverständnisses und zur Überwachung von Massenbewegungen eingesetzt werden. Im Wesentlichen werden Verschiebungen, Druckänderungen und Niederschläge in Zusammenhang mit Bewegungen zahlenmäßig erfasst und ausgewertet. Es kann z.B. durch Inklinometermessungen die Lage von Gleitflächen erkundet werden. Durch Extensometer erhält man eine Verschiebungsbeurteilung. Dadurch kann man, wenn man das Material bekannt ist (z.B. bei Ankern) Rückschlüsse auf die Spannungen ziehen.



3 Großhangbewegung Kerschbaumsiedlung, Navistal, Tirol

Anschließend wird die Situation der Großhangbewegung Navistal beschrieben. Die Kerschbaumsiedlung welche sich in der Südflanke des Berghangs befindet, liegt einerseits auf einem 40 m mächtigen Schuttstrom und andererseits auf einer tieferliegenden Felsgleitmasse. Durch diese Hangbewegung sind 84 Häuser, von denen einige massive Schäden aufweisen, betroffen. Die Verschiebungsgeschwindigkeiten an der Geländeoberfläche reichen von 1 bis 3 cm/a. Am Anfang des Kapitels werden die geometrischen Eckdaten des Hanges erläutert. Anschließend werden die geologischen Verhältnisse des Misljochs ausgewertet. Danach wird der Bergwasserspiegel, durch Pegelmessungen belegt, festgelegt. Des Weiteren folgt eine kurze Übersicht über die Berechnungsmethode von UDEC. Ein großer Teil dieses Kapitel widmet sich dem Modellaufbau und der Berechnung des Modells.

Die Geometrie des Hanges ist aus Abbildung 3.1 zu entnehmen. Der Höhenunterschied von der Gratregion bis zum Navisbach beträgt in etwa 1000 Meter. Die mittlere Hangneigung beträgt 22,5. In wenigen Fällen beträgt die Hangneigung auch 40 °.



Abbildung 3.1: Geotechnisches Profil ohne Maßnahmen (HOFMANN, et al., 2017)

3.1 Geologische und geomechanische Verhältnisse

Geologisch und tektonisch gesehen liegt der Südhang des Navistal im Norden des Tauernfensters. Am Nordrand dieses Fensters treten Großhangbewegungen auf. Der Hang besteht im oberen Bereich aus Lithologien der ostalpinen Innsbrucker Quarzphyllit Decke. Der Innsbrucker Quarzphyllit kann nach Mostler et al. (1982) in drei Typen unterteilt werden: in die Quarzphyllit-Grünschiefer-Serie, die Karbonat-Serizitphyllit-Serie und die Schwarzschiefer-Karbonat-Serie. In den Bereichen der Aufschlüsse der Massenbewegung wurden vorwiegend Quarzphyllite mit hohem Quarzgehalt angetroffen.

Laut Rockenschaub et al. 2003a setzt sich der Mittel- und Unterhang der Großhangbewegung aus Lithologien der Matrei - Zone zusammen. Diese wird als Mischserie ostalpiner und penninischer Lithologien beschrieben. Bei der Großhangbewegung kommen hauptsächlich Gesteine der Bündnerschiefer-Gruppe vor.

Die metamorphe Struktur des Bündner Schiefer die vom Tal (Navisbach) bis etwa 1700 m ü.A. vorkommt, besteht hauptsächlich aus kalkarmen Phylliten und Graphitphylliten. Geomechanisch gesehen sind diese wenig fest und hoch teilbeweglich einzustufen. Der Innsbrucker Quarzphyllit im Oberhang besitzt einen sehr hohen Quarzanteil. Aus geomechanischer Sicht stellt dieser ein hartes, spröde reagierendes Gestein dar.

Nachstehend folgt eine kurze Übersicht über das Trennflächengefüge

Die Anlage und Entwicklung der Massenbewegung ist durch eine Reihe tektonisch vorgegebener, struktureller Gefüge, die sich im Zuge der alpinen Orogenese bildeten, begünstigt. Die Hauptschieferung fällt generell flach bis mittelsteil in den Hang nach NW bis N ein. Diese besitzt im Oberhang einen größeren Abstand als im Sockel. Die Schieferungsflächen besitzen einen Einfallwinkel von 30-38°. Des Weiteren wurden im Oberhang noch Talklüfte festgestellt, welche nicht durchgehend sind. Das bedeutet, dass sich immer wieder Felsbrücken zwischen den Trennflächen befinden. Bei der Modellierung des Schnittes, welche im Anschluss noch ausführlich vorgestellt wird, werden diese Bereiche als Homogenbereich festgelegt. Dieses Kluftsystem fällt mit einem Winkel von 75-90° (südeinfallend) in den Innsbrucker Quarzphyllit ein. Südeinfallende Schieferungsflächen kreuzen die zuvor beschriebenen Talklüfte mit einem Winkel von 35-50°. Die Südeinfallenden Schieferungsflächen und die Talklüfte sind nicht durchgehend und besitzen im wieder Homogenbereiche (Felsbrücken) zwischen den Trennflächen (siehe Abbildung 4.16).

3. Großhangbewegung Kerschbaumsiedlung, Navistal, Tirol



Großhangbewegung Misljoch

	Areal der Großhangbewegung (ohne Quartärbedeckung)					
Morp	ohologie/ Abtragungsformen	Akkı	umulationformen	Anthropogene Formen		
	alter Abbruch		Hangschutt	planierte Fläche		
	aktueller Abbruch	[]	Blockschutt			
	aktiver Riss		fluviatile Ablagerungen			
	inaktiver Riss		Block			
	aktiver Krichkörper/Schuttstrom	Allge	emeine Morpholog	gie		
	inaktiver Kriechkörper/Schuttstrom		Wall			
	Bewegungsrichtung		Nackental			
	zerlegte Felsschollen		Geländekante			
	Ufer- Rinnenanbruch		abflusslose Rinne			
	Ablösebereiche für Stein- und Blockschlag					

Abbildung 3.2: Digitales Geländemodell Südhang Misljoch, geomorphologische Struktur der Großhangbewegung, großtektonische Einheit (C. Pichler, 2015 und Rieder, 2016)

In Abbildung 3.2 sieht man deutlich den Bereich der Großhangbewegung. Dabei kann man der Abbildung 3.2 entnehmen wo sich der Schuttstrom, die zerlegten Felsschollen, usw. befinden. Wenn man durch den Schuttstrom (roter Bereich) einen Längsschnitt setzt erhält

man mit dem zuvor beschriebenen Trennflächensystem das ingenieurgeologische, geomechanische Modell (Abbildung 3.3)



Abbildung 3.3: Ingenieurgeologisches, geomechanisches Modell (C. Pichler, 2015)

3.2 Untergrunderkundung, Untersuchungen, Monitoring

Um zu verstehen wie das ingenieurgeologische Modell in Abbildung 3.3 erfasst werden konnte, wird ein kurzer Überblick über die Erkundungsmaßnahmen gegeben.

Die Massenbewegung wird seit 2012 eingehend untersucht. Für die Erkundung des geologischen Untergrundes, wurden vier kombinierte Refraktions- und Reflexionsseismikprofile erstellt. Des Weiteren wurden mehrere Geoelektrikprofile ausgewertet. Einen wesentlichen Hinweis auf den Zustand der Gesteine lieferten die in den Jahren 2013 und 2014 abgeteuften Kernbohrungen. Die Lage der Kernbohrungen kann man aus Abbildung 3.4 entnehmen.

Kernbohrung 1 befindet sich direkt in der Kerschbaumsiedlung (1.452 m ü.A.). Diese Bohrung wurde bis in eine Tiefe von 120 m vorgetrieben. Bis in eine Tiefe von 31,5 m wurde ausschließlich feinkörniges Lockermaterial angetroffen. Anschließend wurde klüftiger und zerscherter Fels vorgefunden. Bei dem Fels handelt es sich um kalkarmen Phyllit, welcher. abschnittsweise stark zerbrochen war. Außerdem konnte grobkiesig kantige, sandige, schluffige Störzonen an den Kernproben erkannt werden.

Die Kernbohrung 2 erfolgte im oberen Bereich der Kerschbaumsiedlung (1.666 m ü. A.). Diese wurde bis in eine Tiefe von 70 m gebohrt, wobei das Festgestein in einer Tiefe von 42 m angetroffen wurde. Bis zu dieser Tiefe ist hauptsächlich gemischtkörniges Lockergestein vorhanden. Der Fels der bei 42m angetroffen wurde, war bis in eine Tiefe von 60,4 m intensiv zerschert. Daraus lässt sich auf eine sehr geringe Festigkeit schließen. Des Weiteren wurde in 60,4 m Tiefe eine Störzone, bestehend aus einer 0,6 m mächtigen sandigen, schluffigen und gering tonigen, kiesigen Schicht vorgefunden.

Kernbohrung 3 befindet sich neben der Siedlung in einer Höhe von 1.400 m ü.A. Hier wurden 60 m in die Tiefe vorgedrungen. Der Fels befindet sich in einer Tiefe von 40,5 m und das Gestein in eine Tiefe von 49,7 m. Auch hier gibt es eine Störzone von 0,3 m. Der stark zerlegte und zerscherte Fels wurde bis in eine Tiefe von 51,3 m markiert.

Für die Erfassung der Hangbewegungen war es erforderlich, geeignete Messsysteme zu installieren. Für eine präzise Überwachung wurde am Hang gegenüber eine Totalstation angeordnet. Von dieser Station werden ca. 80 Messpunkte mehrmals täglich angesteuert. Es hat sich gezeigt, dass sich die Massenbewegung mit einer Geschwindigkeit von 1-4 cm/a talwärts bewegt (Stand 2014)

Für die Beurteilung eines gegebenfalls auftretenden Gleitkreises in der Tiefe, wurden über ein Netz von neun Inklinometern (Neigungsmesser) hergestellt. Daraus kann man bei einem auftretenden Knick in der kummuativ ausgewerteten Verschiebungslinie auf eine Gleitfläche schließen. Die Inklinometer werden vierteljährig eingemessen und ausgewertet. Aus den Messungen geht hervor, dass sich die Gleitflächen in Tiefen von etwa 14, 16 und 37 m unter der Geländeoberkante befinden. Die größte Verschiebungsrate wurde mit 2,2 mm/Monat aufgezeichnet.

Außerdem wurden 60 Pegelbohrungen hergestellt, wodurch der Bergwasserspiegel erkundet werden konnte, was in Unterkapitel 3.3 näher beschrieben wird.

Oberhalb der Siedlung wurde noch von dem Hydrologischen Dienst Tirol eine Messstation für Temperatur, Niederschlag, und Schneehöhe installiert.

3. Großhangbewegung Kerschbaumsiedlung, Navistal, Tirol



Abbildung 3.4: Lage der Kernbohrungen (nach C. Pichler, 2015)

3.3 Hydrogeologische Verhältnisse

Für die Messung des Bergwasserspiegels wurden seitens der WLV 60 Pegelbohrungen im Bereich der Massenbewegung hergestellt.



Abbildung 3.5: Lage der Brunnen und Pegelmessstellen (WLV)

In Abbildung 3.5 ist die Lage der Brunnen und Pegelbohrungen dargestellt. Die Messstellen werden Großteils ständig überwacht und ausgewertet. Im Anschluss erfolgt die Auswertung von drei Pegelbohrungen, um zu zeigen, wie sich der Bergwasserspiegel in einer gewissen Periode verändert. So wird gezeigt, wie man den Bergwasserspiegel im Schnitt, durch die erhaltenen Messdaten ermittelt.

3. Großhangbewegung Kerschbaumsiedlung, Navistal, Tirol

o Pegel P20a-15



Abbildung 3.6: Lage und Stationsdetails der ersten Messstelle (Quelle: WLV)



Abbildung 3.7: Messstelle 1: Zusammenhang Niederschlag und Bergwasserspiegel (Quelle: WLV)

In Abbildung 3.6 erkennt man die Lage der ersten Messstelle (rot markierter Punkt). Die maximale Höhendifferenz im Pegel, gemessen über ca. zehn Monate, zeigt eine Schwankungsbreite von ca. 2,0 Meter (Abbildung 3.6). Ergiebige Niederschläge wirken sich nur marginal auf den Pegelstand aus. Der Bergwasserspiegel ist wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, jedoch gefallen und erreichte seinen Tiefpunkt von 1667,8 m ü.A. Mitte März

2017. Danach kam es zu einem Anstieg von über einem Meter in einem kurzen Zeitraum von ca. einem Monat, welcher auf die Schneeschmelze zurückgeführt werden kann.

Pegel P18a-15



Stationsdetails

Stationsnummer	54
Stationsname	P18a-15
Messpunkthöhe	1606,235 <u>m.ü.A</u> .
Endtiefe	1568,085 <u>m ü.A</u> .
Stationsbetreuung	WLV

Abbildung 3.8: Lage und Stationsdetails der zweiten Messstelle (Quelle: WLV)



Abbildung 3.9: Messstelle 2: Zusammenhang Niederschlag und Bergwasserspiegel (Quelle: WLV)

Abbildung 3.8 zeigt die Lage der zweiten Messstelle. Eine Messdauer von ca. 10 Monaten zeigt eine Schwankung des Pegels um ca. 5,5 Meter (Abbildung 3.8). Im Diagramm sieht man

keinen einen Zusammenhang zwischen dem Bergwasserspiegel und den Niederschlägen in der Periode von 08.2016 bis 04.2016. Der Bergwasserspiegel ist wie in Abbildung 3.9 ersichtlich kontinuierlich gefallen und erreicht sein Minimum von 1575 m ü.A. Mitte Mai 2017. Nach einem Niederschlagsereignis im Mai 2017 stieg der Pegel wieder auf einen Wert von 1576 m. Das entspricht einer Pegelschwankung von 1 m.

o <u>Pegel P11a-15:</u>



Stationsdetails

Stationsnummer	42
Stationsname	P11a-15
Messpunkthöhe	1417,107 <u>m ü.A</u> .
Endtiefe	1395,107 <u>m ü.A.</u>
Stationsbetreuung	WLV





Abbildung 3.11: Messstelle 3: Zusammenhang Niederschlag und Bergwasserspiegel (Quelle: WLV)

Die dritte Messstelle ist in Abbildung 3.10 zu sehen. Abbildung 3.11 zeigt den Zusammenhang der dritten Messstelle zwischen Niederschlag und Bergwasserspiegel. Dieser Pegel liegt direkt in der Kerschbaumsiedlung. Nach einem Niederschlagsereignis sieht man wie der Pegelstand anschließend ansteigt. Dies ist bereits bei kleinen Regenmengen erkennbar und spiegelt sich in den Sprüngen des Verlaufes im Diagramm wieder.

Aus den Daten der Brunnen und Pegel wurde ein Bergwasserspiegel für das Modell rekonstruiert.



Abbildung 3.12: Übersicht Bergwasserspiegel (HOFMANN, et al., 2017)

In Abbildung 3.12 kann man den Bergwasserspiegel im Bereich der Siedlung entnehmen. Hier ist auch deutlich zu sehen, dass die Druckhöhe auch über den Schuttstrom hinweggeht. Die Drücke die vom Bergwasserspiegel ausgehen, können bis zu 2,5 bar (gespanntes Wasser) erreichen.

In Abbildung 3.13 sind die Verschiebungen des Hanges zusammen mit Temperatur, Niederschlag und dem Einsetzen der Schneeschmelze und des Brunnenbetriebs dargestellt. Eine Beschleunigung ist nicht bei den Niederschlägen aber nach Einsetzen der Schneeschmelze (Anzunehmende große Infiltration von Wasser in den Untergrund) festzustellen.



Abbildung 3.13: Übersicht Zusammenhang Niederschlag und Verschiebungen (Lawinen und Wildbachverbau 2013)

4 Modellierung mittels UDEC

4.1 UDEC

Der Universal Distinict Element Code (UDEC) ist eine zweidimensionale, numerische Software, welche die quasi – statische oder dynamische Reaktion auf die Einwirkungen auf Kontakt und Grenzflächen simuliert. Das diskontinuierliche Medium wird als Ansammlung von diskreten Blöcken dargestellt, während die Diskontinuitäten als Randbedingung zwischen den Blöcken behandelt werden. Es können große Verschiebungen entlang der Diskontinuitäten und Rotationen der Blöcke auftreten. UDEC nutzt ein explizites Lösungsschema, das komplexes, nichtlineares Systemverhalten modellieren kann. Die Modelle können dabei eine Mischung aus starren und deformierbaren Blöcken enthalten. Verformbare Blöcke werden durch ein Kontinuumsnetz von Finite-Differenzen-Zonen definiert, wobei sich jede Zone nach einem vorgeschriebenen linearen oder nichtlinearen Spannungs-Dehnungsgesetz verhält. Die Relativbewegung der Diskontinuitäten wird auch durch lineare oder nichtlineare Kraftverschiebungsgesetze sowohl in der Normal- als auch in der Scherrichtung bestimmt. Eigenschaften können separat zu einzelnen oder Sätzen von Diskontinuitäten zugeordnet werden.



Abbildung 4.1: Zonierung einer Blockansammlung (links: steife Blöcke, rechts: verformbare Blöcke plus Netz) (Quelle: (ITASCA, 2011))

4.1.1 Berechnungsablauf UDEC

Generell unterscheidet man bei numerischen Methoden zwischen Kontinuumsmechanik und Diskontinuumsmechanik. In der Kontinuumsmechanik bleibt der Zusammenhalt der Gesamtstruktur bei einer Formänderung erhalten. Bei der Diskontinuumsmechanik ist dies nicht der Fall. Die diskreten Elemente können sich hier frei bewegen. Zur Beschreibung von geklüftetem Fels in der Kontinuumsmechanik in FEM- oder FDM-Programmen werden verschmierte Materialmodelle verwendet. In der Diskontinuumsmechanik werden diskrete Materialmodelle in DEM-Programmen favorisiert. Für die Berechnung von Felsbrücken wurde das Programm UDEC eingesetzt. Es rechnet mit diskontinuumsmechanischen Modellen, weshalb diese im Berechnungsablauf näher beschrieben werden. In Abbildung 4.2 sieht man den Unterschied zwischen der Kontinuumsmechanik und der Diskontinuumsmechanik.



Abbildung 4.2: Flussdiagramm üblicher mechanischer Formulierungen und Materialmodelle des geklüfteten Gebirges sowie ihre numerische Umsetzung (nach Will, 1999)

Das dynamische Verhalten wird numerisch durch einen Zeitabstimmungsalgorithmus dargestellt, in dem die Größe der Zeitspanne durch die Annahme begrenzt wird, dass Geschwindigkeiten und Beschleunigungen innerhalb der Konstanten sind. Der "Timestep" der ausgeprägten Elementmethode basiert auf dem Konzept, dass die Zeitspanne ausreichend klein ist und, dass sich während eines einzigen Schrittes keine Störungen zwischen einem diskreten Element und seinem unmittelbaren Nachbarn ausbreiten können. Dies entspricht der Tatsache, dass es eine begrenzte Geschwindigkeit gibt, bei der Informationen auf jedes physikalische Medium übertragen werden können. Das Lösungsschema ist identisch mit dem von der Expliziten Finite-Differenzen-Methode für die Kontinuumsanalyse. Die zeitliche Beschränkung gilt für beide, Kontakte und Blöcke. Bei starren Blöcken definieren die Blockmasse und die Schnittstellensteifigkeit zwischen den Blöcken die zeitliche Begrenzung. Bei deformierbaren Blöcken wird die Zonengröße und die Steifigkeit des Systems verwendet und enthält Beiträge sowohl aus dem intakten Gesteinsmodul als auch aus der Steifigkeit an den Kontaktflächen. Die Berechnungen, die in der verschiedenen Elementmethode durchgeführt werden, wechseln zwischen dem Gesetz einer Zwangsverschiebung an allen Kontakten und Newtons zweitem Gesetz an allen Blöcken. Das Kraftverdrängungsgesetz wird verwendet, um Kontaktkräfte aus bekannten (und festen) Verschiebungen zu finden. Newtons zweites Gesetz liefert die Bewegung der Blöcke, die sich aus den bekannten (und fixierten) Kräften ergeben und die auf sie wirken. Wenn die Blöcke verformbar sind, wird die Bewegung an den Gitterpunkten der dreieckigen Finite-Dehnungselemente innerhalb der Blöcke berechnet. Dann gibt die Anwendung der Blockmaterial-Konstitutionsbeziehungen neue Spannungen innerhalb der Elemente. Abbildung 1.3 zeigt schematisch den Berechnungszyklus für die jeweilige Element Methode. Die Gleichungen in dieser Figur sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.



Abbildung 4.3: Berechnungsschritte der Distinkt Elemente Methode (DEM) (ITASCA, 2011)

Für Blöcke in zwei Dimensionen, die von mehreren Kräften, wie Schwerkraft, sowie den Geschwindigkeit beaufschlagt werden, lautet die Bewegungsgleichung in einem infinitesimalen Zeitschritt Δt :

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\dot{\Delta}t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\dot{\Delta}t}{2})} + \left(\frac{\sum F_i^{(t)}}{m} + g_i\right) * \Delta t$$
⁽¹⁾

Nach jedem Zeitschritt erhält man so eine neue Blockposition, bis sich schließlich ein Gleichgewicht einstellt oder kontinuierlich fortschreitendes Versagen auftritt. Der Impulsund Energieerhaltungssatz, sowie die mechanische Dämpfung der Bewegungsgleichung wird ebenfalls von UDEC berücksichtigt. Dadurch wird recht schnell ein Kräftegleichgewichtszustand unter den aufgebrachten Randbedingungen erreicht.

Für die nachfolgende Berechnung ist vor allem das Verständnis der Berechnung der Klüfte notwendig. Das Verhalten der Klüfte wird auf die Berechnung eines "Ecke-Ecke-Kontakts" beziehungsweise eines "Ecke-Kanten-Kontakts" reduziert. In UDEC stehen dafür verschiedene Materialmodelle zur Verfügung. Für den schnellsten und einfachsten Weg wird das Mohr-Coulombsche Modell herangezogen. Hier sind auch die wenigsten Eingabeparameter erforderlich. Es werden folgende lineare Beziehungen zwischen den Spannungen und den Verschiebungen verwendet:

$$\Delta \sigma_n = -k_n * \Delta u_n \tag{2}$$

4.1.2 Sicherheitsdefinition nach Fellenius

Die Sicherheit gegen Gleiten ergibt sich aus:

$$\eta = \frac{Widerstand}{Beanspruchung} = \frac{maximaler\ Scherwiderstand}{vorhandene\ Scherkraft}$$
(3)

Der Zustand des Grenzgleichgewichts hat eine Sicherheit von η =1,00. Darauf folgt, dass das System bei

$$\eta \Big\{ \begin{array}{l} \geq 1 \dots stabil \\ < 1 \dots instabil \\ \end{array} \Big\}$$

ist.

Die Sicherheitsdefinition mit dem Sicherheitsfaktor η ist das Verhältnis der tatsächlich vorhandenen Festigkeitsparameter c (Kohäsion) und φ (Reibungswinkel) eines Materials zu den jener erforderlichen Festigkeitsparameter c_{grenz} und φ_{grenz} bei welchen sich eine Grenzgleichgewicht einstellt FELLENIUS, W. [1927].

$$\eta = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{grenz}} = \frac{c}{c_{grenz}} \tag{4}$$

Durch Umformung von Formel (4) ergibt sich:

$$\varphi_{grenz} = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{\eta}\right) \quad bzw. \quad c_{grenz} = \frac{c}{\eta}$$
(5)

Diese Sicherheitsdefinition bildet die Grundlage für die Bestimmung des Sicherheitsfaktors die den numerischen Berechnungen (FDM) unter Anwendung der Methode der Festigkeitsreduktion.

4.1.3 Methode der Festigkeitsreduktion

Die Festigkeitsreduktionsmethode (ZIENKIEWICZ, 1975), (DAWSON, 1999) wird für viele verschiedene Strukturen in der Geotechnik (wie z.B. Hänge, Tunnel, ...) angewendet. Die häufigste Anwendung findet sich jedoch bei der Beurteilung von Hängen.

Bei der Methode der Festigkeitsreduktion werden die vorhandenen Festigkeitsparameter c und φ eines stabilen Systems iterativ so lange abgemindert bis man die Festigkeitsparameter für den Grenzgleichgewichtszustand c_{grenz} und φ_{grenz} erhält. Dazu werden die Formeln (6) und (7) verwendet.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} * c \tag{6}$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} * tan\phi\right) \tag{7}$$

Die Sicherheit η entspricht den erforderlichen Abminderungsfaktor für das Erreichen des Grenzgleichgewichtes.

Ein weiterer Zugang für die iterative Abminderung der Festigkeitsparameter kann auch mit Hilfe des Intervallhalbierungsverfahrens (Abbildung 4.4), auch Bisektionsverfahren genannt, erfolgen.


Abbildung 4.4: Bisektionsverfahren zur Ermittlung des Sicherheitsfaktors η (PREH, 2000)

Im ersten Schritt wird eine untere Grenze mit dem Abminderungsfaktor rf_{min} für den Geschwindigkeitszustand eines stabilen Systems ermittelt. In einem zweiten Schritt wird dann eine obere Grenze mit dem Abminderungsfaktor rf_{max} für ein instabiles System errechnet. Im nächsten Schritt wird rf_{neu} ermittelt. Dazu wird das Untersuchungsintervall zwischen oberer und unterer Grenze halbiert und der Geschwindigkeitszustand an dieser Stelle berechnet mit der Formel (8) verwendet.

$$rf_{neu} = \frac{rf_{min} + rf_{max}}{2} \tag{8}$$

Die Referenzgeschwindigkeit ist die Differenz der bei dem ersten Schritt errechneten Maximalgeschwindigkeit v_{max} und der definierten Grenzgeschwindigkeit v_{crit} (Strichlierte horizontale Linie in Abbildung 4.4). Die Referenzgeschwindigkeit ist jener Parameter um zu entscheiden ob das System an der berechneten Stelle stabil ist oder nicht und welches Intervall im nächsten Schritt halbiert werden muss. Falls die Maximalgeschwindigkeit v_{max} kleiner ist als die Grenzgeschwindigkeit v_{crit} , so liegt ein stabiler Zustand des Systems vor. Die ermittelte Stelle wird nun zur neuen unteren Grenze rf_{min} . Dadurch kann man den nächsten Untersuchungsintervall definieren und diesen erneut halbieren. Diesen Vorgang widerholt man so lange bis die Maximalgeschwindigkeit v_{max} größer ist als die Grenzgeschwindigkeit v_{crit} . Wenn man dies erreicht hat, hat man das System in Bewegung und es ist somit instabil. Diese Stelle ist nun die neue ober Grenze rf_{max} . Dieser Vorgang wird beliebig oft widerholt, um den gewünschten Sicherheitsfaktor zu ermitteln. Eine genauere Erläuterung findet man in (Zettler, et al., 1999)

Nach Anwendung des Bisektionsverfahrens erhält man die Materialparameter c_{grenz} und φ_{grenz} für den Zustand des Grenzgleichgewichts.

4.2 Ziel der Modellierung

Um herauszufinden, wie bzw. wie stark die tiefreichende Hangbewegung durch den Bergwasserspiegels beeinflusst wird, wurden 4 Modelle aufgebaut.

Die Beurteilung des Einflusses von Änderungen des Bergwasserspiegels auf die Gesamtsicherheit der Talflanke erfolgte bei den untersuchten Modellen anhand der globalen Sicherheitszahl (ÖNORM B4433: 1987)

4.3 Untersuchte Modelle

• Modell 1: Standsicherheit aufgrund der erhobenen Daten

Das Modell 1 wurde mit Hilfe der Daten der WLV und der Daten der Masterarbeit von Pichler und Rieder (RIEDER, 2016), (PICHLER, 2015), modelliert. Es wurden die Modellgeometrie, die Randbedingungen, die Materialparameter und der Bergwasserspiegel aus den vorhandenen Aufnahme- und Messdaten abgeleitet. Für die Berechnung wurde das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium sowohl für die Trennflächen als auch für das Gestein verwendet.

• <u>Modell 2:</u> 1. Schritt des Modells schwankender Bergwasserspiegel – Ermittlung der Parameter für das Grenzgleichgewicht

Die Ermittlung der erforderlichen Modellparameter für den Zustand des Grenzgleichgewichts wurden mit Hilfe der Regel von Fellenius (FELLENIUS, 1927) berechnet. Ausgehend von diesem Modell wurde, anschließend der Einfluss von Bergwasserspiegelschwankungen auf die Standsicherheit untersucht.

 <u>Modell 3:</u> 2. Schritt des Modells: Ausgehend vom Modell 2 erfolgt die Schrittweise Anhebung des Bergwassers

Für die Berechnung des Modells 3 wurde der Bergwasserspiegel jeweils um einen halben Meter angehoben bis 10 m erreicht wurden um zu zeigen, welchen Einfluss dieses Vorgehen auf den Sicherheitsfaktor besitzt. Die Materialparameter sind dieselben wie in Modell 2. Diese wurden mittels der Regel nach Fellenius (FELLENIUS, 1927) aus dem Ausgangsmodell (Modell 1) berechnet (siehe Kapitel 4.1.2.). • Modell 4: Vergleichsrechnung bei trockenen Verhältnissen

Bei diesem Modell wurde der Bergwasserspiegel bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Die Materialparameter sind dieselben wie in Modell 2.

4.4 Berechnungsablauf

Um die Massenbewegungen im Navistal mit unterschiedlichen Modellen zu untersuchen, wurde ein Berechnungsablauf (Abbildung 4.5) erstellt. Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

- 1) Erstellung der Modellgeometrie
- 2) Diskretisierung des Modells Netzfeinheit
- 3) Zuweisung der Materialparameter
 - a) geologische Homogenbereiche
 - b) Trennflächensystem
- 4) Berechnung des Sicherheitsfaktors
- 5) Interpretation der Ergebnisse
 - a) bei einem Sicherheitsfaktor > 1,00 folgt eine Adaptierung der Festigkeitsparameter
 - b) bei einem Sicherheitsfaktor < 1,00 folgt eine Adaptierung der Festigkeitsparameter
 - c) bei einem Sicherheitsfaktor = 1,00 ist die Berechnung abgeschlossen
- 6) Variation des Bergwasserspiegels und Berechnung des Sicherheitsfaktors
- 7) Auswertung der Ergebnisse mit zwei unterschiedlichen Netztypen

4. Modellierung mittels UDEC



Abbildung 4.5: Berechnungsablauf

4.5 Modellgeometrie

In Abbildung 4.6 ist die Modellerstreckung (Modellrand) abgebildet und die Tabelle 4.1 zeigt die zugehörigen Koordinaten der Eckpunkte. Die abgebildete Geometrie wurde für die Berechnung aller vier Modelle verwendet.



Punkte	х	У
[-]	[m]	[m]
1	0	0
2	0	1890
3	267	2018
4	1025	2164
5	3426	1138
6	4426	1138

Abbildung 4.6: Modellierter Schnitt in UDEC

Tabelle 4.1: Koordinaten der Eckpunkte des Modellrandes

4426

0

7

Abbildung 4.7 zeigt die Modellgeometrie inklusive Trennflächensystem. Die Schichtgrenze zwischen Bündner Schiefer und Innsbrucker Quarzphyllit wurde ebenfalls mit einer Trennfläche (crack) modelliert. Um das Modell und die Klüfte im Zuge der Modellierung mit unterschiedlichen Materialparametern ausstatten zu können, wurden sogenannte Regionen eingeführt. Mit Hilfe dieser Funktion ist es möglich, Bereichen unterschiedliche Eigenschaften zuzuweisen. Für den Bereich Bündner Schiefer und Quarzphyllit wurde jeweils eine Region erstellt. Des Weiteren wurden im Bereich des Innsbrucker Quarzphyllits die zuvor beschriebenen Talklüfte, welche 75-90° südeinfallen, als nicht durchgehend modelliert. Für die Berücksichtigung dieser Eigenschaft wurden mehrere Regionen im Modell etabliert. In einem Bereich wurde eine Trennfläche modelliert und unmittelbar darüber wurde ein Homogenbereich eingefügt (siehe Abbildung 4.8). Die gleiche Vorgehensweise wurde bei den S-einfallenden Schieferungsflächen 35°-50° südeinfallend herangezogen. In Abbildung 4.7 sind die unterschiedlichen Kluftsysteme ersichtlich. Das Kluftsystem wurde für alle vier Modelle gleich gewählt.



Abbildung 4.7: Modellgeometrie inklusive Trennflächensystem



Abbildung 4.8: Übersicht über die einzelnen Regionen ("jregions") im Quarzphyllit

Für die Zuweisungen der Materialparameter sowohl für die Substanz als auch für die Trennflächen wurden im Modell einzelne Regionen ("jregions") platziert. Jeder Region konnten so unterschiedliche Materialeigenschaften gegeben werden. Diese Funktion war nötig um die Felsbrücken zu modellieren. Abbildung 4.8 zeigt einen Ausschnitt des Modells (Quarzphyllit) mit den Regionen.

Abbildung 4.9 zeigt den in den Modellen berücksichtigten Ausgangsbergwasserspiegel welcher im weiteren Verlauf angehoben wurde. Der Verlauf des Bergwasserspiegels wurden aus den in Kapitel 3 beschriebenen Pegelmessungen abgeleitet. Der Bergwasserspiegel unterliegt natürlichen Schwankungen daher wurde der Bergwasserspiegel in der Kerschbaumsiedlung aus Abbildung 3.12 angenommen. Die Höhenannahme entspricht dem in der Siedlung maximalen Bergwasserspiegel. Im oberen Bereich wurde der Bergwasserspiegel aus dem Pegel angenommen. Der Bergwasserspiegel wurde für das Modell 1 und Modell 2 gleich gewählt. Für das Modell 3 wurde ein erhöhter Bergwasserspiegel von 0,5 m – 10 m (Schrittweise aufgespiegelt) angenommen. Dazu wurden die Punkte 2 bis 8 schrittweise jeweils um einen halben Meter angehoben bis eine Bergwasserspiegeldifferenz von 10 m erreicht wurde. Die Punkte 1 und 9 blieben bei der Anhebung immer konstant. Im Modell 4 wurde kein Bergwasserspiegel berücksichtigt.



Abbildung 4.9: Verlauf des Bergwasserspiegel

Abbildung 4.9 zeigt den Verlauf des Bergwasserspiegels.

Die Koordinaten von links nach rechts (im Schnitt gesehen) für den erhobenen Bergwasserspiegel sind in Tabelle 4.2 gelistet.

Punkte	Х	у
[-]	[m]	[m]
1	0	1890
2	1025	1890
3	1750	1780
4	2000	1680
5	2400	1550
6	2600	1430
7	3000	1300
8	3426	1138
9	3426	1138

Tabelle 4.2: Koordinaten für den Bergwasserspiegel des Ausgangsmodells

4.6 Netzgenerierung, Netzfeinheit und Randbedingungen

Die Netzgenerierung erfolgt bei UDEC durch die Zonierung (Diskretisierung) der deformierbaren Blöcke mit Hilfe von Dreieckselementen. Jeder diskrete Block wird mittels Dreieckselemente zoniert. Größe wird durch die Festlegung der max. Kantenlänge bestimmt. Die Aufteilung der Dreieckselemente (Zonierung) erfolgt automatisiert.

Ein wesentlicher Parameter für die die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse der Modelle ist die Feinheit der Zonierung (numerisches Netz). Aus diesem Grund wurden zwei unterschiedliche Netze mit unterschiedlichen Zonengrößen erstellt.

4.6.1 Netztyp 1

Für die Generierung des ersten Netztypes wird eine Netzfeinheit von 100 m gewählt, da es sich hier um einen großdimesionalen Schnitt (Schnitt durch das Gebirge inkl. Trennflächen und Bergwasserspiegel) handelt. In Abbildung 4.10 ist das generierte Netz ersichtlich.



Abbildung 4.10: Netztyp 1 – maximale Kantenlänge von 100 m

4.6.2 Netztyp 2

Zur Untersuchung der Ergebnisse in Bezug auf die Netzfeinheit wurde ein zweiter Netztyp mit unterschiedlichen Zonengrößen definiert. Je feiner das Netz gewählt wird, desto länger dauert die Berechnung aber desto genauer wird das Ergebnis. Um genauere Ergebnisse der Berechnung zu erhalten und den Rechenaufwand so gering als möglich zu halten wurde das Modell in zwei Teile aufgeteilt. Im Bereich der Böschung (oberer Bereich) wurde ein Netz mit höherer Zonendichte von 65 m (max. Kantenlänge) gewählt. Im Sockelbereich, wo die Bergwasserspiegelspitze nicht im direkten Kontakt mit den Elementen stand, wurde ein gröberes Netz mit 200 m (max. Kantenlänge) modelliert. Das generierte Netz kann Abbildung 4.11 entnommen werden.

4. Modellierung mittels UDEC



Abbildung 4.11: Netztyp 2 – maximale Kantenlänge von 65 m

Für die Berechnung sind des Weiteren Randbedingungen (Auflager) einzufügen. Die untere Kante (horizontale Linie, x-Achse) sowohl in x als auch in y Richtung festgehalten. Die linke und rechte vertikale Linie wurde nur in x Richtung gehalten und kann sich somit in der vertikalen frei bewegen. in Abbildung 4.12 sind die beschriebenen Auflagerbedingungen ersichtlich.



Abbildung 4.12: Auflagerbedingungen des Modells

4.7 Materialparameter

Für die Zuweisung der einzelnen Materialparameter den zu geologischen Homogenbereichen sowie zu den jeweiligen Trennflächenscharen, war die Aufteilung der Materialparameter auf die einzelnen, zuvor beschriebenen Regionen erforderlich. Es wurden zwei unterschiedliche Homogenbereiche eingeführt. Ein Bereich für den Innsbrucker Quarzphyllit und einer für den Bündner Schiefer. Als Bruchkriterium wurde das Gesetzt von Mohr-Coloumb sowohl für die Substanz als auch für die Trennflächen (Abbildung 4.16) gewählt. Die Zuordnung der Materialparameter für die Homogenbereiche kann Abbildung 4.13 entnommen werden. Die Zuordnung der Materialparameter für das Trennflächensystem kann der Abbildung 4.14 entnommen werden.



Abbildung 4.13: Zuordnung der Materialparameter auf die unterschiedlichen Regionen



Abbildung 4.14: Zuordnung der Materialparameter für die Trennflächen





Trennflächensystem im Innsbrucker Quarzphyllit:

Wie oben beschrieben ist das Trennflächensystem im Innsbrucker Quarzphyllit komplexer als jenes im Bündner Schiefer. Für die Modellierung der Klüfte und Felsbrücken sind daher 7 unterschiedliche Materialeigenschaften nötig, um das numerische Modell herstellen zu können. Zum einen wurden, für die nicht durchgehenden Trennflächen, ähnliche Parameter gewählt wie bei den bereits oben erwähnten Homogenbereichen. Diese variieren von Modell zu Modell und werden bei den gewählten Modellparametern näher vorgestellt. In Abbildung 4.16 ist der Aufbau des Trennflächensystems im Innsbrucker Quarzphyllit dargestellt



Abbildung 4.16: Übersicht über Modellierung des Kluftsystems im Innsbrucker Quarzphyllit

Dieser Vorgang wurde in Verbindung mit den zuvor beschriebenen eingeführten Regionen ("jregions") im Eingabecode berücksichtigt.

Trennflächensystem im Bündner Schiefer:



Abbildung 4.17: Übersicht über die Modellierung des Trennflächensystems im Bündner Schiefer

Für das Trennflächensystem im Bündner Schiefer wurde eine Schieferungsfläche von 30-33° (Abbildung 4.17) gewählt.

4.7.1 Materialparameter für Netzfeinheit 1

- Modell 1: Standsicherheit aufgrund der erhobenen Daten

Beim Modell 1 wurden für die Berechnung die Materialparameter für die Homogenbereiche der Substanz und das Trennflächensystem aus den Daten und Aufnahmen der WLV und der Masterarbeit von Pichler angenommen. Diese können, für die Homogenbereiche, aus Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 entnommen werden. Das erstellte Modell mit den Randbedingungen, dem modellierten Bergwasserspiegel und dem generierten Netz kann Abbildung 4.9 entnommen werden.

Innsbruc	<u>ker Quarzphyllit</u>	Bündner	<u>Schiefer</u>
ρ	2750,00 kg/m³	ρ	2750,00 kg/m³
С	5,20 MPa	С	0,02 MPa
φ	35,00 °	φ	29,00 °
К	85000,00 MPa	К	8500,00 MPa
G	65000,00 MPa	G	6500,00 MPa

Tabelle 4.3: Materialparameter für die Homogenbereiche für das Ausgangsmodell

Trennfläche 4 ("Homogenbereich Ouarzphyllit")	
normal stiffnes	20000,00 MPa/m
shear stiffnes	20000,00 MPa/m
φ	35,00°
C	0,01 MPa
tension	0,74 MPa
Trennfläche 5 (Talklüfte - Quarzphyllit)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
φ	22,00 °
arphir	15,00°
Trennfläche 6 ("Homogenbereich Quarzphyllit")	
normal stiffnes	20000,00 MPa/m
shear stiffnes	20000,00 MPa/m
arphi	35,00°
c	0,01 MPa
tension	0,74 MPa
	-
antithetischer Bruch (Übergangsbereich)	
antithetischer Bruch (Übergangsbereich) normal stiffnes	1000,00 MPa/m

φ 25,00°φr 15,00°

Trennflächenparamter für erste Berechnung des Ausgangsmodells

normal stiffnes 20000,00 MPa/m shear stiffnes 20000,00 MPa/m φ 35,00 ° c 0,02 MPa	Trennfläche 1 (Schieferungsfläche Quarzphyllit)	
shear stiffnes 20000,00 MPa/m φ 35,00 ° c 0,02 MPa	normal stiffnes	20000,00 MPa/m
φ 35,00 ° c 0,02 MPa	shear stiffnes	20000,00 MPa/m
c 0,02 MPa	φ	35,00 °
	с	0,02 MPa
tension 0,00 MPa	tension	0,00 MPa

Trennfläche 2 (Schieferungsfläche Bündner Schiefer)	
normal stiffnes	10000,00 MPa/m
shear stiffnes	10000,00 MPa/m
φ	29,00 °
c	0,01 MPa
tension	0,00 MPa

Trennfläche 3 (s-einfallende Schieferungsflächen)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
φ	22,00 °
φr	15,00 °

Tabelle 4.4: Materialparameter für das Trennflächensystem des Ausgangsmodells

- Modell 2: Ermittlung des Grenzgleichgewichts

Für die Ermittlung der Materialparameter des zweiten Modells musste zuerst der Sicherheitsfaktor des ersten Modells bestimmt werden. Dieser wurde mit 0,97 ermittelt. Mit Hilfe der Regel nach Fellenius konnten die Materialparameter sowohl für den Homogenbereich als auch für die Trennflächen bestimmt werden, welche bei einer erneuten Berechnung des Sicherheitsfaktors zu einem Ergebnis von 1,00 führten. Die Materialparameter welche einen Sicherheitsfaktor von 1,00 ergeben sind in Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 ersichtlich.

Innsbrucker Quarzphyllit		<u>Bündne</u>	<u>r Schiefer</u>
ρ	2750,00 kg/m³	ρ	2750,00 kg/m³
С	5,360 MPa	С	0,0206 MPa
φ	35,820°	φ	29,75 °
К	85000,00 MPa	К	8500,00 MPa
G	65000,00 MPa	G	6500,00 MPa

Tabelle 4.5: Materialparameter für die Homogenbereiche für das Modell 2 für eine vereinfachte Netzgenerierung

Trennflächenparamter für das Modell 2

Kluft 1 (Schieferungsfläche Quarzphyllit)	
normal stiffnes	20000,00 MPa/m
shear stiffnes	20000,00 MPa/m
φ	35,82 °
с	0,0206 MPa
tension	0,000 MPa

Kluft 2 (Schieferungsfläche Bündner Schiefer)	
normal stiffnes	10000,00 MPa/m
shear stiffnes	10000,00 MPa/m
φ	29,75 °
c	0,0103 MPa
tension	0,00 MPa

Kluft 3 (s-einfallende Schieferungsflächen)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
φ	22,61°
arphir	15,44 °

Kluft 4 ("Homogenbereich Quarzphyllit")	
normal stiffnes	20000,00 MPa/m
shear stiffnes	20000,00 MPa/m
φ	35,82 °
С	0,0206 MPa
tension	0,74 MPa

Kluft 5 (Talklüfte)		
I	normal stiffnes	1000,00 MPa/m
	shear stiffnes	1000,00 MPa/m
	φ	22,61°
	arphir	15,44 °

Kluft 6 ("Homogenbereich Quarzphyllit")		
normal stiffnes	20000,00 MPa/m	
shear stiffnes	20000,00 MPa/m	
φ	35,82°	
с	0,0103 MPa	
tension	0,74 MPa	

Kluft 7 (Übergangsbereich)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
arphi	25,68°
φ r	15,44°

Tabelle 4.6: Materialparameter für das Trennflächensystem des 2. Modells für eine vereinfachte Netzgenerierung

- Modell 3: Schwankender Bergwasserspiegel

Die Materialparameter des dritten Modells waren dieselben wie jene des zweiten Modells (siehe Tabelle 4.5. und Tabelle 4.6). Eine Änderung wurde ausschließlich bei der Höhe des Bergwasserspiegels vorgenommen. Das Modell mit dem Ausgangsbergwasserspiegel ist in Abbildung 4.18.



Abbildung 4.18: Übersicht über den erhöhten Bergwasserspiegel (Modell 2)

Der Bergwasserspiegel wurde in einem Intervall von 0,5 m angehoben um die Auswirkungen auf den Sicherheitsfaktor zu zeigen.

- Modell 4: Vergleichsrechnung bei trockenen Verhältnissen

Für das vierte Modell wurden die Materialparameter des zweiten Modells gewählt (siehe Tabelle 4.5. und Tabelle 4.6). Der Bergwasserspiegel wurde bei diesem Modell nicht angesetzt. Das vierte Modell ist in Abbildung 4.19 ersichtlich.



Abbildung 4.19: Übersicht Modell 4 – trocken

4.7.2 Materialparameter für Netzfeinheit 2

- Modell 1: Standsicherheit aufgrund der erhobenen Daten

Für das Modell 1 ändern sich die Materialparameter nicht. Diese können aus Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 entnommen werden.

- Modell 2: Ermittlung des Grenzgleichgewichts

Aufgrund des feineren Netzes wurde aus dem ersten Modell ein anderer Sicherheitsfaktor errechnet welcher sich auf 0,958 beläuft. Man erkennt hier bereit den Unterschied zur Netzfeinheit 1 wo der Sicherheitsfaktor 0,97 ergab. Mit dem veränderten Sicherheitsfaktor wurden die Werte mit Hilfe der Festigkeitsreduktion angepasst. Die Materialparameter welche einen Sicherheitsfaktor von 1,00 ergeben sind in Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 ersichtlich.

Innsbrucke	r Quarzphyllit	Bündne	er Schiefer
ρ	2750,00 kg/m³	ρ	2750,00 kg/m³
С	5,420 MPa	С	0,021 MPa
φ	36,140°	φ	30,02 °
К	85000,00 MPa	К	8500,00 MPa
G	65000,00 MPa	G	6500,00 MPa

Tabelle 4.7: Materialparameter für die Homogenbereiche für das Modell 2 bei einer feineren Netzgenerierung

Trennflächenprameter für das Modell 2

Kluft 1 (Schieferungsfläche Quarzphyllit)	
normal stiffnes	20000,00 MPa/m
shear stiffnes	20000,00 MPa/m
φ	36,14 °
с	0,0104 MPa
tension	0,000 MPa

Kluft 2 (Schieferungsfläche Bündner Schiefer)		
normal stiffnes	10000,00 MPa/m	
shear stiffnes	10000,00 MPa/m	
φ	30,02 °	
с	0,0104 MPa	
tension	0,00 MPa	

Kluft 3 (s-einfallende Schieferungsflächen)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
arphi	22,84 °
arphir	15,61°

Kluft 4 ("Homogenbereich Quarzphyllit")		
normal stiffnes	20000,00 MPa/m	
shear stiffnes	20000,00 MPa/m	
φ	36,14°	
С	0,0104 MPa	
tension	0,74 MPa	

Kluft 5 (Talklüfte)		
	normal stiffnes	1000,00 MPa/m
	shear stiffnes	1000,00 MPa/m
	φ	22,84 °
	arphir	15,61°

Kluft 6 ("Homogenbereich Quarzphyllit")		
normal stiffnes	20000,00 MPa/m	
shear stiffnes	20000,00 MPa/m	
arphi	36,14°	
с	0,0104 MPa	
tension	0,74 MPa	

Kluft 7 (Übergangsbereich)	
normal stiffnes	1000,00 MPa/m
shear stiffnes	1000,00 MPa/m
φ	25,93°
φ r	15,61°

Tabelle 4.8: Materialparameter für das Trennflächengefüge für das Modell 2 bei einer feineren Netzgenerierung

- Modell 3: Schwankender Bergwasserspiegel

Für die Materialparameter wurden dieselben Werte wie bei Modell 2 verwendet. Der Unterschied liegt lediglich im schwankenden Bergwasserspiegel.

- Modell 4: Vergleichsrechnung bei trockenen Verhältnissen

Für das vierte Modell wurden ebenfalls die Materialparameter des zweiten Modells verwendet.

5 Berechnungsergebnisse

Die Berechnung wurde, nach den Methoden, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, durchgeführt. Es wurde die Methode der Festigkeitsreduktion für das Ausgangsmodell angewendet. Für alle weiteren Modelle wurden anschließend die Materialparameter aus der ersten Berechnung übernommen, welche einen Sicherheitsfaktor von $\eta = 1,00$ ergab. Bei der Methode der Festigkeitsreduktion unterstützt UDEC ein manuelles und ein automatisches Lösen des Problems mittels der Methode der Festigkeitsreduktion, welches für die Berechnung von stabilitätsgefährdenden Teilen verwendet wird. Diese Methode reduziert dabei stufenweise den Reibungswinkel und die Kohäsion des Materials um die Böschung in einen Zustand des Grenzgleichgewichtes zu bringen.

5.1 Modell 1: Netztyp 1 (grobes Netz)

Das Modell wurde auf Basis der oben beschriebenen Parameter (Kapitel 4) berechnet. Laut den Berechnungen liegt bei diesem Modell ein instabiler Zustand vor. In Abbildung 5.1 ist ersichtlich, dass das Modell den Sicherheitsfaktor mit 1,00 nicht erreicht. Der berechnete Sicherheitsfaktor beträgt 0,97. Deshalb wurde ein 2. Modell erstellt welches das Grenzgleichgewicht erfüllt (Sicherheitsfaktor 1,00). Ziel der Berechnung des Modells 1 war die Ermittlung des Sicherheitsfaktors um mit diesem mit Hilfe der Regel von Fellenius (FELLENIUS, 1927) die Materialparameter für Modell 2 zu ermitteln.



Abbildung 5.1: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 1, Netztyp 1



Abbildung 5.2: Farbtodierte Geschwindigkeitsvektoren [m] – Modell 1, Netztyp 1

In Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 sind die Verschiebungen und die zugehörigen Geschwindigkeitsvektoren ersichtlich.

In Abbildung 5.3 sind die einzelnen plastifizierten Zonen dargestellt. Diese Abbildung wurde aus der Berechnung des Sicherheitsfaktors (solve fos) erstellt. Dabei kann man den sich einstellenden Versagensmechanismus nachvollziehen. Im Bündner Schiefer erkennt man die Plastifizierung des "Weichen Sockels", welche mit roten Sternen (Fließfläche) dargestellt ist. Die grünen Kreuze bedeuten, dass nach anfänglichem plastischem Fluss bei Beginn der Simulation, die nachgiebigen Elemente durch nachfolgende Spannungsumverteilung so entlastet werden, dass ihre Belastung das Bruchkriterium nicht mehr erfüllen. Im oberen Bereich des Quarzphyllits ist ersichtlich, das sich eine Gleitfläche ausbildet. Dies ist erkennbar an den Zugbeanspruchungen im Gestein. Die Zugbeanspruchungen sind mit violetten Kreisen in Abbildung 5.3 dargestellt. In Abbildung 5.4 sieht man jene Trennflächen die überbeansprucht sind (roten Linien). Das bedeutet, dass der maximale Scherwiderstand in Bezug auf die vorhandene Scherkraft kleiner ist. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung in den Trennflächen. Im Innsbrucker Quarzphyllit sind deutlich die Aktivierungen der einzelnen Trennflächen ersichtlich (Abbildung 5.4). Es wurden auch die Festigkeiten der Felsbrücken überwunden dies sieht man vor allem an den durchgehenden roten Linien in Abbildung 5.4. Es kommt zu einem Mechanismus "Hart auf Weich" (POISEL, 2016).



Abbildung 5.3: plastifizierte Zonen bei Modell 1, Netztyp 1



Abbildung 5.4: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 1, Netztyp 1

5.2 Modell 1: Netztyp 2 (feines Netz)

Für einen Vergleich der Ergebnisse in Bezug auf die Netzfeinheit wurde das Modell 1 erneut berechnet. Für die Berechnung wurde der Netztyp 2 verwendet. Der Sicherheitsfaktor errechnet sich in diesem Modell auf 0,96.



Abbildung 5.5: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 1, Netztyp 2



Abbildung 5.6: Farbkodierte Geschwindigkeitsvektoren [m/s] – Modell 1, Netztyp 2



Abbildung 5.7: plastifizierte Zonen bei Modell 1, Netztyp 2



Abbildung 5.8: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 1, Netztyp 2

In Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 sind die Verschiebungen und die zugehörigen Geschwindigkeitsvektoren für Netztyp 2 ersichtlich. Abbildung 5.7 zeigt die plastifizierten

Zonen für das Modell 1 bei Netztyp 2. In Abbildung 5.8 sind die Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes ersichtlich. Man kann erkennen, dass durch das feinere Netz mehr Trennflächen aktiviert werden.



5.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 1

Abbildung 5.9: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 1 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.10: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 1 – Netzfeinheit 2

In Abbildung 5.9 und Abbildung 5.11 sieht man den Verlauf der Ungleichgewichtskraft. Die Kräfte werden in jedem Schwerpunkt von starren Blöcken und jedem Netzpunkt von verformbaren Blöcken akkumuliert. Im Gleichgewicht oder gleichmäßigem plastischen Fließen in verformbaren Blöcken ist die Summe dieser Kräfte null. Während der Zeitschritte wird die maximale Ungleichgewichtkraft für das ganze Modell ermittelt. Diese Kraft ist also wichtig um den Zustand des Modells zu bestimmen Dieser Graph zeigt den Systemzustand – Gleichgewicht oder Bewegung. Auf der x-Achse (horizontale Achse) sind die berechneten Schritte aufgetragen. Es wurden bis zu dem Versagen 10720 Schritte berechnet. Auf der y-Achse kann man die zugehörige Kraft zu den einzelnen Schritten erkennen.



Abbildung 5.11: Versagensmechanismuns für das Modell 1 für Netztyp 1



Abbildung 5.12: Versagensmechanismus für das Modell 1 für Netztyp 2

5. Berechnungsergebnisse



Abbildung 5.13: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 1 - Netztyp 1



Abbildung 5.14: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) das Modell 1 – Netztyp 2



Abbildung 5.15: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 1 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.16: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 1 – Netzfeinheit 2

Abbildung 5.11 zeigt die Verschiebungsvektoren für das 1. Modell (Ausgangsmodell) für Netztyp 1 und Abbildung 5.12 zeigt die Verschiebungsvektoren für das 1. Modell für Netztyp 2. Aus diesen Verschiebungen können die Gleitflächen hergeleitet werden. Man kann deutlich erkennen, dass sich im Innsbrucker Quarzphyllit bei beiden Netzfeinheiten ein Keil ausbildet (Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16), welcher auf den weicheren Bündner Schiefer

drückt. Beim Modell mit dem feineren Netz sind die Trennflächen deutlicher ausgeprägt. Dadurch kommt es im Bündner Schiefer ebenfalls zu einem Versagen in einer tieferen Schicht. Dies kann man bei einem Vergleich zwischen Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 erkennen. Die plastifizierte Zone bei Modell 1 – Netzfeinheit 2 weist eine tiefer reichende Fließfläche (roter Bereich) auf als Modell 1 – Netzfeinheit 2. Im Quarzphyllit kommt es hauptsächlich zu einem Zugversagen (violette Kreise). Im Bündner Schiefer sieht man das Versagen des Hangkriechens, was an den roten Flächen erkennbar ist. Die grünen Kreuze besagen das diese Stellen im Zuge der Berechnung plastifiziert sind. Nach abschließender Berechnung sind diese aber nicht plastifiziert.

Das Versagen dieses Modells ist eine Kombination aus Blockkriechen was aus dem Geschwindigkeitsprofil herausgeht und dem Mechanismus Hart auf Weich. Außerdem kommt es zum Gleiten auf einer Gleitfläche.

5.3 Modell 2: Netztyp 1 (grobes Netz)

Mit der zuvor in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Methode wurden nun die Materialparameter so verändert, dass ein Grenzgleichgewicht von ungefähr 1,00 herrscht. Aufgrund der numerischen Berechnungen kann es zu leichten Abweichungen des Sicherheitsfaktors kommen. Dazu wurden die beiden beschriebenen Formeln (7) und (6) angewendet. Die Parameter für das Modell zwei sind in Kapitel 4.7 ersichtlich.



Abbildung 5.17: Verteilung des Porenwasserdrucks bei Netztyp 1



Abbildung 5.18: Verteilung des Kluftwasserdrucks bei Netztyp 1

In Abbildung 5.17 ist die Verteilung der Porenwasserdruck bei Netztyp 1 dargestellt. Bei dieser Abbildung ist zu beachten, dass die violette Fläche bei 0 beginnt. Abbildung 5.18 zeigt die Verteilung des Kluftwasserdrucks. Die Verteilung des Porenwasserdrucks ist ident jenem aus Modell 1, da es sich um dieselbe Höhe des Bergwasserspiegels handelt.



Abbildung 5.19: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 2, Netztyp 1



Abbildung 5.20: Farbtodierte Geschwindigkeitsvektoren [m] – Modell 2, Netztyp 1



Abbildung 5.21: plastifizierte Zonen plastifizierte Zonen bei Modell 2, Netztyp 1



Abbildung 5.22: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 2, Netztyp 1

In Abbildung 5.19 sind die Verschiebungen und in Abbildung 5.20 die Geschwindigkeitsvektoren bei einem Sicherheitsfaktor von 1.00 ersichtlich. Die Verschiebungen entsprechen dem aus Modell 1. Das kommt dadurch zu Stande das zwar andere Materialparameter verwendet wurden diese aber durch die zu Hilfenahme der Regel von Fellenius wieder abgemindert werden bis ein Grenzgleichgewicht erreicht ist. Es ist deutlich zu sehen, dass sich im Innsbrucker Quarzphyllit ein Keil ausbildet, welcher auf den Bündner Schiefer drückt. Die plastifizierten Zonen in Abbildung 5.21 zeigen sehr deutlich wo das Versagen im Bündner Schiefer eintritt. Dies ist gut an der Fließfläche (rote Kreuze) erkennbar. Des Weiteren sind noch die Klüfte, welche ihre Scherfestigkeit überschritten haben in Abbildung 5.4 ersichtlich. Auch hier sieht man die Ausbildung des Keils im Innsbrucker Quarzphyllit im Oberbereich.

5.4 Modell 2: Netztyp 2 (feines Netz)

Es wurde ebenfalls das Grundmodell mit dem Verfahren der Festigkeitsreduktion manipuliert um ein Modell mit einem Sicherheitsfaktor von ungefähr 1,00 zu erhalten.



Abbildung 5.23: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 2, Netztyp 2



Abbildung 5.24: Farbkodierte Geschwindigkeitsvektoren [m/s] – Modell 2, Netztyp 2



Abbildung 5.25: plastifizierte Zonen bei Modell 2 - Netztyp 2



Abbildung 5.26: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 2, Netztyp 2

Für die Berechnungen des Modells mit Netztyp 2 sind die Verschiebungen und die zugehörigen Geschwindigkeiten in Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24 ersichtlich. Durch das feinere Netz, sieht man deutlich eine ausgeprägtere Beanspruchung, der Trennflächen im Innsbrucker Quarzphyllit (Abbildung 5.26). Auch die plastifizierten Zonen in Abbildung 5.25 sind deutlicher zu sehen. Der Innsbrucker Quarzphyllit ist stärker beansprucht als zuvor. Man kann aber auch erkenne, dass sich wie beim gröberen Netz ein Keil ausbildet welcher auf den weicheren Bündner Schiefer drückt.

5.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 2

Bei diesem Modell wurden die Materialparameter mittels der Regel nach Fellenius so angepasst, dass eine erneute Berechnung mit den veränderten Werten für beide Netzfeinheiten einen Sicherheitsfaktor von η =1,00 ergab.

In Abbildung 5.27 und Abbildung 5.29 sieht man Verlauf der Ungleichgewichtskraft (Modell mit einem Sicherheitsfaktor von 1,00).



Abbildung 5.27: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 2 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.28: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 2 – Netzfeinheit 2



Abbildung 5.29: Versagensmechanismus für das Modell 2 für Netztyp 1



Abbildung 5.30: Versagensmechanismus für das Modell 2 für Netztyp 2


Abbildung 5.31: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) Modell 2 - Netztyp 1



Abbildung 5.32: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) Modell 2 – Netztyp 2



Abbildung 5.33: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 2 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.34: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 2 – Netzfeinheit 2

Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30 zeigt die Verschiebungsvektoren für das 2. Modell (Modell mit einem Sicherheitsfaktor von 1,00) bei unterschiedlichen Netzfeinheiten. Aus diesen Verschiebungen wurden die Gleitflächen hergeleitet. Diese sind gleich wie jenen des ersten Modells. Man kann wieder deutlich erkennen, dass sich im Innsbrucker Quarzphyllit

ein Keil ausbildet (Abbildung 5.33 und Abbildung 5.34), welcher auf den weicheren Bündner Schiefer drückt. Dadurch kommt es im Bündner Schiefer ebenfalls zu einem Versagen in einer tieferen Schicht. Bei diesem Modell werden die Trennflächen im Innsbrucker Quarzphyllit deutlich stärker beansprucht als im Modell 1. Dies sieht man an den aktivierten Trennflächen vor allem bei dem Modell mit dem feiner aufgeteilten Netz (Abbildung 5.34). Grund dafür sind die höheren Materialfestigkeiten am Beginn der Berechnung. Dadurch kommt es zu einer Zerreißung des Gesteins. In Abbildung 5.31 kann man die einzelnen plastifizierenden Zonen des Schnittes erkennen. Im Quarzphyllit kommt es hauptsächlich zu einem Zugversagen (violette Kreise). Im Bündner Schiefer ist das Versagen durch Hangkriechen ersichtlich. Dies sieht man an den roten Sternen. Das Kriechen bzw. der rote Bereich nimmt aber im Vergleich zu Modell 1 ab.

Der Versagensmechanismus ist im Prinzip der gleich wie jenes des ersten Modells.

5.5 Modell 3: Netztyp 1 (grobes Netz)

Für die Berechnung des dritten Modells wurden die Materialparameter des zuvor berechneten Modells zwei, mit einem Sicherheitsfaktor η =1,00 übernommen. Es wurde der Bergwasserspiegel schrittweise um 0,5 m angehoben bis eine Erhöhung von 10 m erreicht wurde. Als Referenzergebnisse werden anschließend die Ergebnisse bei einer Bergwasserspiegelerhöhung von 0,5 m zugrunde gelegt um zu zeigen welchen Einfluss eine geringe Erhöhung des Bergwasserspiegels auf den Sicherheitsfaktor mit sich zieht.



Abbildung 5.35: Verteilung des Porenwasserdruck bei Netztyp 1



Abbildung 5.36: Verteilung des Kluftwasserdrucks bei Netztyp 1

In Abbildung 5.35 ist die Verteilung des Porenwasserdrucks für das Modell 3 dargestellt. Bei dieser Abbildung ist zu beachten, dass die violette Fläche bei 0 beginnt. Die Verteilung des Porenwasserdrucks ist bei einer feineren Netzgeometrie gleich wie in Abbildung 5.35.



Abbildung 5.37: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 3, Netztyp 1



Abbildung 5.38: Farbtodierte Geschwindigkeitsvektoren [m] – Modell 3, Netztyp 1



Abbildung 5.39: plastifizierte Zonen plastifizierte Zonen bei Modell 3, Netztyp 1



Abbildung 5.40: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 3, Netztyp 1

In Abbildung 5.40 kann man, die im Vergleich zu Abbildung 5.26 keinen wesentlichen Unterschied bei den Verschiebungen der Trennflächen sehen. Im Bereich der S-einfallenden Schieferungsflächen im Quarzphyllit bilden sich die Verschiebungen ebenfalls am größten aus. Hier kann man auch deutlich erkennen, dass die Felsbrücken auf Zug versagen. Das bedeutet, dass es trotz des modellierten Homogenbereiches zu einer Verschiebung kommt. Dies kann auch aus Abbildung 5.39 entnommen werden, wo man im oberen Bereich (Innsbrucker Quarzphyllit) erkennt, dass es zu einem Zugversagen in den s-einfallenden Klüften kommt.

5.6 Modell 3: Netztyp 2 (feines Netz)

Um den zuvor genannten Problem mit der Netzfeinheit entgegenzuwirken wurde der Berechnungsschritt mit den stufenweise erhöhten Bergwasserspiegel am Modell 3 mit Netztyp 2 erneut durchgeführt. In Abbildung 5.41 sind die Farbkodierten Verschiebungsvektoren für das Modell mit einem erhöhten Bergwasserspiegel von 0,5 m und Netztyp 2 zu sehen. Der Sicherheitsfaktor errechnet sich für dieses Modell auf einen Wert von 0,998.



Abbildung 5.41: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 3, Netztyp 2

Abbildung 5.42 zeigt die zugehörigen Geschwindigkeitsvektoren.



Abbildung 5.42: Farbkodierte Geschwindigkeitsvektoren [m/s] – Modell 3, Netztyp 2



Abbildung 5.43: plastifizierte Zonen bei Modell 3 - Netztyp 2



Abbildung 5.44: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 3, Netztyp 2

Abbildung 5.44 zeigt die Kluftverschiebungen bei Überschreitung des Scherwiderstandes. Das Bild der Kluftverschiebungen ähnelt dem von Abbildung 5.40. Im oberen Bereich des Innsbrucker Quarzphyllit sind die Verschiebungen der Trennflächen etwas deutlicher. Dies spiegelt sich auch in den plastifizierenden Zonen. Man erkennt auch hier ein Versagen der modellierten Felsbrücken im Bereich des Innsbrucker Quarzphyllit.

5.6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 3

Um zu zeigen ob, bzw. welchen Einfluss eine Erhöhung des Bergwasserspiegels auf die Ergebnisse hat, wurde das Modell 3 mit stufenweise erhöhten Bergwasserspiegel von einem Delta 0,00 m bis 10,0 m modelliert und berechnet. Die Berechnung des Sicherheitsfaktors bei stufenweiser Erhöhung des Bergwasserspiegels ergab, dass der Sicherheitsfaktor kaum fällt. Damit ist kein bzw. nur ein sehr geringer Zusammenhang auf den Abfall des Sicherheitsfaktors bei einer Erhöhung des Bergwasserspiegels aus den numerischen Berechnungen gegeben. Für die Ergebnisse wird ausschließlich der Fall 0,5 m herangezogen.



Abbildung 5.45: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 3 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.46: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 3 – Netzfeinheit 2

In Abbildung 5.45 Verlauf der Ungleichgewichtskraft (Modell 3 mit einem erhöhten Bergwasserspiegel von 0,5 m)



Abbildung 5.47: Versagensmechanismus für das Modell 3 für Netztyp 2



Abbildung 5.48: Versagensmechanismus für das Modell 3 für Netztyp 2



Abbildung 5.49: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) Modell 3 - Netztyp 1



Abbildung 5.50: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) Modell 3 – Netztyp 2



Abbildung 5.51: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 3 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.52: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 3 – Netzfeinheit 2

Abbildung 5.47 und Abbildung 5.48 zeigt die Verschiebungsvektoren für das 3. Modell (Modell mit einem erhöhten Bergwasserspiegel von 0,5 m). Aus diesen Verschiebungen können die Gleitflächen für eine Bergwasserspiegelerhöhung von 0,5 m hergeleitet werden. Diese sind ähnlich wie die des ersten und zweiten Modells. Man kann wieder deutlich erkennen, dass sich im Innsbrucker Quarzphyllit ein Keil ausbildet (Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50), welcher auf den weicheren Bündner Schiefer drückt. Dadurch kommt es im Bündner Schiefer ebenfalls zu einem Versagen in einer tieferen Schicht. Bei diesem Modell werden die Trennflächen im Innsbrucker Quarzphyllit mehr beansprucht als im zweiten Modell. Dies sieht man vor allem im Modell mit der feineren Netzaufteilung (Abbildung 5.52). Das liegt daran, dass sich der Versagensmechanismus aufgrund des erhöhten Bergwasserspiegels leichter ausbilden kann. Dies sieht man an den aktivierten Trennflächen, welche sich stärker verschieben als im Modell zuvor. Man kann in Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50 die einzelnen plastifizierenden Zonen des Schnittes erkennen. Im Quarzphyllit kommt es, wie in den Modellen zuvor, zu einem hauptsächlichen Zugversagen (violette Kreise). Im Bündner Schiefer kommt es zum Versagen des Hangkriechens (roten Sterne). Das Hangkriechen bzw. der rote Bereich nimmt aber im Gegensatz zu Modell 2 wieder deutlich zu. Bei diesem Modell ist die Versagensform nicht eindeutig. Sie besteht einerseits aus dem Versagen Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche und andererseits Gleiten eines Kluftkörpers auf einer oder zwei Trennflächen.

5.7 Modell 4: Netztyp 1 (grobes Netz)

Zum Vergleich zu den zuvor berechneten Modellen mit Bergwasser wird ein Modell ohne Bergwasserspiegel berechnet. Dies hat den Zweck zu zeigen, welchen Einfluss das Bergwasser auf den Versagensmechanismus besitzt. Außerdem soll gezeigt werden, welcher Sicherheitsfaktor η bei diesem Modell berechnet werden kann.

In der unten angeführten Abbildung 5.53 sind die Verschiebungen ohne Bergwasser und der berechnete Sicherheitsfaktor η ersichtlich. Der Sicherheitsfaktor errechnet sich im Fall ohne Bergwasser auf 1,45. Das bedeutet, dass der Bergwasserspiegel erwartungsgemäß einen sehr hohen Einfluss auf das Ergebnis hat. Der Versagensmechanismus bildet sich ohne den Einfluss des Bergwasserspiegels deutlich anders aus wie bei den Modellen zuvor beschrieben. Im Geschwindigkeitsprofil (Abbildung 5.54) ist dies ebenfalls ersichtlich.



Abbildung 5.53: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 4, Netztyp 1



Abbildung 5.54: Farbtodierte Geschwindigkeitsvektoren [m] – Modell 4, Netztyp 1



Abbildung 5.55: plastifizierte Zonen plastifizierte Zonen bei Modell 4, Netztyp 1



Abbildung 5.56: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 4, Netztyp 1

In Abbildung 5.56 kann man die Verschiebung der Klüfte ohne Bergwasserspiegel erkennen. Hier zeigt sich das im Bereich des Innsbrucker Quarzphyllits die Talklüfte sowie die Seinfallenden Klüfte deutlich mehr beansprucht werden als zuvor. Dies kann man auch Abbildung 5.55 entnehmen, wo man die Zugversagenszonen im Oberbereich erkennen kann.

5.8 Modell 4: Netztyp 2 (feines Netz)

Bei der Berechnung des Modells mit der feineren Netzaufteilung fällt auf das der Sicherheitsfaktor η mit einem Wert von 1,47 höher ist als der des groben Netzes. Es ist anzumerken, dass die Verschiebungen Abbildung 5.57 nicht so tief laufen wie in Vergleich Abbildung 5.53 zeigt. Dies liegt an der feineren Netzaufteilung. Die zugehörigen Geschwindigkeitsvektoren sind in Abbildung 5.58 dargestellt.



Abbildung 5.57: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 4, Netztyp 2



Abbildung 5.58: Farbkodierte Geschwindigkeitsvektoren [m/s] – Modell 4, Netztyp 2



Abbildung 5.59: plastifizierte Zonen bei Modell 4 - Netztyp 2



Abbildung 5.60: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 4, Netztyp 2

Abbildung 5.59 zeigt die plastifizierenden Zonen. Diese sehen sehr ähnlich zu dem zuvor berechneten Modell mit einer gröberen Netzaufteilung aus (Abbildung 5.55). Bei den

Trennflächenverschiebungen in Abbildung 5.60 erkennt man eine Vermehrung der Verschiebungen im Gegensatz zu den zuvor berechneten Modell Abbildung 5.56.

5.8.1 Zusammenfassung der Ergebnisse Modell 4

Das Modell vier dient zur Abschätzung des Einflusses vom Bergwasserspiegel. Bei diesem Modell wurde der Bergwasserspiegel nicht berücksichtigt, und das Modell wurde trocken berechnet.



Abbildung 5.61: Ermittlung der Ungleichgewichtskraft für das Modell 3 – Netzfeinheit 1

In Abbildung 5.61 und Abbildung 5.62 Verlauf der Ungleichgewichtskraft (Modell - trocken). Die Ungleichgewichtskraft ist im Maximum deutlich höher als bei den Modellen zuvor. Das kommt daher, dass sich die Versagensmechanismen ohne Bergwasserspiegel deutlich schwerer ausbilden.



Abbildung 5.62: Ermittlung der Ungleichgewichtskraft für das Modell 4 von 65 im Böschungsbereich und 200 im Sockelbereich



Abbildung 5.63: Verschiebungsvektoren für das Modell 4 – Netztyp 1



Abbildung 5.64: Verschiebungsvektoren für das Modell 4 – Netztyp 2



Abbildung 5.65: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 4 - Netztyp 1



Abbildung 5.66: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 4 – Netztyp 2



Abbildung 5.67: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 4 – Netzfeinheit 1



Abbildung 5.68: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für das 4 Modell bei einer Netzfeinheit von 65 im Böschungsbereich und 200 im Sockelbereich

Abbildung 5.63 und Abbildung 5.64 zeigt die Verschiebungsvektoren für das Modell vier (Modell-trocken). Aus diesen Verschiebungen können die Gleitflächen nicht mehr hergeleitet werden. Die Verschiebungen unterscheiden sich zu jenen der vorherigen Modelle in ihrer Anordnung. Im Innsbrucker Quarzphyllit kommt es zu einer tiefreichenderen Beanspruchung der Trennflächen (Abbildung 5.67 und Abbildung 5.68). Der Effekt, hart auf weich kann bei diesem Modell nicht beobachtet werden. Im Bündner Schiefer kommt es zu einem Versagen in einer tieferen Schicht. Der Versagensmechanismus ohne Bergwasserspiegel bildet sich anders aus als zuvor. Dies sieht man an den aktivierten Trennflächen, welche mehr beansprucht werden als im Modell zuvor. Man kann, in Abbildung 5.65 und Abbildung 5.66, die einzelnen plastifizierenden Zonen des Schnittes erkennen. Im Quarzphyllit ist das Zugversagen (violette Kreise) weit weniger ausgeprägt als bei den Modellen zuvor. Im Bündner Schiefer kommt es zu einem Versagen durch Hangkriechen. Dies sieht man an den roten Flächen.

6 Interpretation und Schlussfolgerung

Mit Hilfe der mit UDEC durchgeführten numerischen Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass sich auch geringfügige Änderungen des Bergwasserspiegels auf die Stabilität der Felsgleitung auswirken. Jedoch ist anzumerken, dass sich eine effektive Reduzierung des Sicherheitsfaktors erst ab einer gewissen Bergwasserspiegeldifferenz einstellt und die numerische ermittelte Gesamtstandsicherheit auch eine starke Netzabhängigkeit zeigt.

6.1 Netztyp 1

Die Berechnungen mit dem Netztyp 1, mit einer schrittweisen Erhöhung des Bergwasserspiegels bis max. 10 m Differenz zum Ausgangsspiegel zeigen eine Reduktion des globalen Sicherheitsfaktors auf 0,98 bis 0,97. Wenn man von einem Anfangssicherheitsfaktor von 1,00 ausgeht, beträgt der Abfall lediglich 0,02. Daraus lässt sich schließen, dass der Bergwasserspiegel für diese Netzaufteilung einen sehr geringen Einfluss besitzt.



Abbildung 6.1: Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Bergwasserspiegels beim Netztyp 1

In Abbildung 6.1 sind die Ergebnisse des Sicherheitsfaktors in Bezug auf die Bergwasserspiegelerhöhung ΔH dargestellt. Auf der horizontalen Achse sind die stufenweisen Erhöhungen (ΔH) des Bergwasserspiegels aufgetragen. Auf der vertikalen Achse wurden die zugehörigen Sicherheitsfaktoren, welche jeweils in einer eigenständigen Berechnung ermittelt wurden, angeordnet. In dem Verlauf sieht man deutlich, dass es zwischen ΔH =0 m und ΔH =4,5 einen Bereich gibt, bei dem der berechnete Sicherheitsfaktor zwischen 1 und 1,02 pendelt. Der Sicherheitsfaktor fällt erst ab einem Bergwasserspiegel von 4,5 m unter 1,00 und fällt anschließend unter deutlichen Pendelbewegungen kontinuierlich ab. Die Pendelbewegungen kommen daher, dass die geringen Bergwasserspiegeldifferenzen im Vergleich zu dem großdimensionalen Modell nicht genau genug abgebildet werden können. Dadurch hat eine geringe Erhöhung des Bergwasserspiegels rechnerisch kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse.

Ein weiterer Grund für die Pendelbewegungen des berechneten Sicherheitsfaktors und die trägen Reaktion des Modells auf die Erhöhung des Bergwasserspiegels könnte in der Diskontinuität des Modells (Trennflächensystem), als auch in der Netzdichte begründet sein. Am diskontinuierlichen Verlauf der Porenwasserdruckverteilung (Abbildung 6.2) erkennt man den Einfluss der Netzdichte auf die von UDEC berechnete Verteilung. Wenn man die Abbildung 6.2 analysiert wird verständlich warum ein Δ H von 0,5 m kaum eine Auswirkung auf den Sicherheitsfaktor hat. Man erkennt hier, dass sich der Wasserspiegel nicht wie modelliert verhält, sondern durch die Netzfeinheit beeinflusst wird. Das bedeutet, dass die Grenzen der Zone der Verteilung des berechneten Porenwasserdrucks nichtlinear zum Bergwasserspiegel verlaufen. Ein Problem ist das großdimensionale Modell mit einer Modelllänge von 4426 m und einer Modellhöhe von 2164 m. Im Vergleich zu den Dimensionen der untersuchten Talflanke ist eine Bergwasserspiegeldifferenz von 0,5 m numerisch gesehen sehr klein.



Abbildung 6.2: Konturplot der Porenwasserdurckverteilung und Blockdiskretisierung (numerisches Netz), Netztyp 1

Dies zeigte sich auch bei Einzelrechnungen zur Ermittlung des Systemzustandes (stabil, instabil) mit den nach Fellenius abgeminderten Festigkeiten. Diese Berechnungen ermittelten den Systemzustand nach 100.000 Berechnungsschritten, Die Einzelrechnungen bestätigten den Verlauf des berechneten Sicherheistfaktors (Abbildung 6.1) und zeigten dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsfaktor und dem Bergwasserspiegelt gibt. Weitere Berechnungen mit geringen Bergwasserspiegelerhöhungen zeigten, dass es zu sehr diffusen Übergängen kommen kann. Das liegt daran, dass durch das grobe Netz die Trennflächen unterschiedlich belastet werden. Bei Netztyp 1 ist eine klarer

Wechsel von stabil zu instabil erst bei einer Bergwasserspiegelerhöhung von 4.5 m gegeben. Abbildung 6.3 zeigt die berechnete Geschwindigkeitsverteilung (Versagensmechanismus) bei einer Bergwasserspiegelerhöhung von 10 m. Es ist deutlich ersichtlich, dass auch nach 100.000 Berechnungsschritten kein stabiles System gefunden werden kann. Es liegt somit ein instabiler Zustand vor.



Abbildung 6.3: Geschwindigkeitsvektoren bei 100000 Berechnungsschritten bei einem erhöhten Bergwasserspiegel von 10 m, Netztyp 1

6.2 Netztyp 2

Die Berechnungsschritte sind äquivalent zu Netztyp 1. Im Falle einer Erhöhung des Wasserspiegels auf 10 m bezogen auf den Ursprungsbergwasserspiegels, errechnet sich der globale Sicherheitsfaktor auf 0,97 bis 0,96. Es zeigt sich, dass die berechneten Sicherheiten mit dem feineren Netz des Netztyps 2 generell etwas geringer sind. Daraus kann man ableiten, dass bei groben Netzen zu hohe Sicherheiten berechnet werden (vergleiche vorangegangene Studien, z.B. PREH & ZAPLETAL [2005]). Auch beim Netztyp 2 erkennt man, dass der Bergwasserspiegelstand eine geringe Auswirkung auf den Sicherheitsfaktor besitzt, da durch die Problematik der diskontinuumsmechanischen Berechnung ein Sicherheitsfaktor von 0,998 für das zweite Modell errechnet wurde, wurde das Modell 3 mit einem reduzierten Bergwasserspiegel nochmals berechnet. Dies war nötig um von einem stabilen Zustand auszugehen. Durch die Absenkung von 1,00 m konnte dieser Zustand erreicht werden. Das zugehörige Modell mit dem abgesenkten Bergwasserspiegel erreichte einen globalen Sicherheitsfaktor von η =1,00.



Abbildung 6.4: Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Bergwasserspiegels bei Netztyp 2

Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse der Berechnung mit unterschiedlichen Bergwasserspiegeln in Bezug auf den globalen Sicherheitsfaktor. Auf der horizontalen Achse ist die Erhöhung (Δ H) des Bergwasserspiegels aufgetragen. Auf der vertikalen Achse befindet sich der zugehörige globale Sicherheitsfaktor. Bei Betrachtung des Verlaufs fällt auf, dass sich durch das feinere Netz eine eher stetigere Reduzierung des Sicherheitsfaktors einstellt. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass bereits kleinere Bergwasserspiegeldifferenzen zu einer Reduzierung des Sicherheitsfaktors führen dadurch ist eine Auslösung von langsamen Kriechbewegungen möglich.

Abbildung 6.5 zeigt die Verteilung des Porenwasserdrucks für den Netztyp 2.



Abbildung 6.5: Verteilung des Porenwasserdrucks bei Netztyp 2

Für den Netztyp 2 wurde wie bereits erwähnt ein Modell mit stabilem Zustand gewählt. Das bedeutet, dass der Sicherheitsfaktor η größer 1,00 sein muss. Hierfür wurde das Modell 2 mit einem abgesengten Bergwasserspiegel von 1,0 m und einem Sicherheitsfaktor von 1,00 gewählt. Durch die feinere Netzgeometrie waren mehrere Berechnungsschritte nötig als bei Modell 1. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten bei 200000 Berechnungsschritten für dieses Modell bei null liegen. Somit liegt für dieses Modell ein stabiler Zustand vor. Es wurden für dieses Modell weitere Berechnungen mit erhöhtem Bergwasserspiegel durchgeführt. Man kann deutlich in Abbildung 6.6 erkennen, dass es bereits bei einer Bergwasserspiegelerhöhung von 2,00 m zu einem instabilen Zustand kommt. Zwischen dem stabilen Zustand und dem instabilen Zustand kommt es bei diesem Netztyp ebenfalls zu diffusen Übergangen was sich auch in Abbildung 6.4 wieder spiegelt. Der Verlauf ist jedoch wesentlich besser als jener des Netztyps 1. Dies liegt an der Netzverfeinerung. Dadurch werden die Trennflächen bei Erhöhung des Bergwasserspiegels besser getroffen.



Abbildung 6.6: Geschwindigkeitsvektoren bei 200000 Berechnungsschritten bei einer Bergwasserspiegelerhöhung von 2,0 m und Netztyp 2

Aus den zuvor beschriebenen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass das numerische Programm UDEC nicht uneingeschränkt für Standsicherheitsuntersuchungen bei kleinen Bergwasserspiegelschwankungen geeignet ist. Netzstudien und Einzelrechnungen mit abgeminderten Festigkeiten sind erforderlich um eine genauere Aussage des Sicherheitsfaktors in Bezug auf den Bergwasserspiegel zu geben. In der Natur wurde beobachtet wie sich die Massenbewegung bei schwankenden Bergwasserspiegel verhält (siehe Abbildung 3.13). Dabei kann man einen direkten Zusammenhang zwischen einer Niederschlagsperiode und den Hangbewegungen erkenne. Dies geht aus den Messungen der Totalstation hervor welche Verschiebungen von 1-3 cm pro Jahr aufnahm.

Die Modellrechnungen zeigen, dass kleine Änderungen des Bergwasserspiegels den Sicherheitsfaktor geringfügig aber ausreichend reduzieren um bei einem Hang im Grenzgleichgewicht die in der Natur beobachteten saisonalen Beschleunigungen und Verzögerungen der Hangbewegung Misljoch zu erklären.

7 Zusammenfassung

Die Kerschbaumsiedlung in der Gemeinde Navis in Tirol befindet sich auf einem Kriechhang. Es ist bereits zu massiven Schäden an den Gebäuden gekommen.

Zum einen ist ein 40 m mächtiger Schuttstrom für die Bewegungen verantwortlich und zum anderen gibt es im Bereich der Siedlung eine tiefreichende Felsgleitmasse. Diese

Felsgleitung, wurde im Zuge dieser Arbeit untersucht. Der Schuttstrom ist nicht Gegenstand der Diplomarbeit.

Um die Massenbewegung zu untersuchen, wurde eine diskontinuumsmechanische Berechnung mittels der Software UDEC, dass von der ITASCA CONSULTING GROUP zur Lösung geomechanischer Aufgabestellungen entwickelt wurde, verwendet.

Die Untersuchungen basieren auf der von Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) erhobenen und zur Verfügung gestellten Verschiebungsmessungen, Niederschlagsmessungen, Pegelstände, usw. Weitere Grundlagen sind die Masterarbeit von Pichler (PICHLER, 2015) und Rieder (RIEDER, 2016). Aus dieser Arbeit, wurden die Anordnungen der Trennflächensysteme, der Bergwasserspiegel und die Materialparameter der einzelnen Gesteine herausgearbeitet. Im Modell wurden sämtliche Trennflächen sowie die Felsbrücken im Innsbrucker Quarzphyllit modelliert. Des Weiteren wurde der Bergwasserspiegel als Kluftwasserdruck und Gesteinswasserdruck berücksichtigt.

Zur Untersuchung des Einflusses des Bergwasserspiegels auf die Stabilität der Felsgleitung Misljoch, wurde für den ungünstigsten Bergwasserspiegel das Grenzgleichgewicht des Modells ermittelt und ausgehend von diesem Modell die Veränderungen von Bergwasserspiegelerhöhungen auf die Gesamtstandsicherheit (ÖNORM B4433) und auf dem Versagensmechanismus untersucht. Für eine Aussage ob eine Bergwasserspiegeldifferenz eine Auswirkung besitzt, wurden insgesamt vier Modelle mit zwei unterschiedlichen Netzfeinheiten erstellt. Die Ermittlung des jeweiligen Systemzustandes (stabil, instabil) erfolgte mit Hilfe der Methode der Festigkeitsreduktion welche auf dem Grundsatz der Regel von Fellenius (FELLENIUS, 1927) basiert. Die Reduktion erfolgte sowohl für die Materialparameter der Substanz als auch für Materialparameter des Trennflächensystems.

Es zeigte sich, dass die Netzfeinheit einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse mit sich zieht. Bei einem groben Netzt kam es zu einem geringeren Sicherheitsfaktor als bei einem feineren Netz. Das bedeutet, dass man bei einem groben Netz auf der unsicheren Seite liegt. Deshalb sind Netzstudien in diesem Zusammenhang unerlässlich.

Die Modellrechnungen weisen darauf hin, dass kleine Änderungen des Bergwasserspiegels, die Ursache von saisonal bedingten Beschleunigungen und Verzögerungen der Hangbewegung sein könnten.

8 Literaturverzeichnis

ADAM D. [2016/2017], Grundlagen der Felsmechanik [Skriptum], TU Wien

ADAM D. [2016/2017], Felsbau [Skriptum], TU Wien

DAWSON, E. M. [1999], Slope Stability Analysis with Finite Elements and Finite Difference Methods. Geotechnique (in press).

DAWSON, E. M. [1999]; Finite Element Slope Analysis. In: Proc. Of the 47th Annual Geotechnical Conference, University of Minnesota, Department of Civil Engineering

FELLENIUS, W. [1927], Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion und Annahmen kreiszylindrischer Gleitflächen. Berlin, Verlag W. Ernst und Sohn.

GUSSMAN, P. [1982] Kinematical elements for soil and rocks. Proc. 4th Int. Conf. Num. Meth. in Geomech. S. 47-52

HOFMANN, R. und & SAUSGRUBER, J. [2017], Kriechverhalten und Sanierungskonzept einer Großhangbewegung, Navistal, Tirol, Österreich. Geomechanics and Tunnelling, S. 59 - 73

ITASCA [2011], UDEC (Universal Distinct Element Code), Version 5.0, Minneapolis : ITASCA Consulting Group, Inc

KONIETZKY, H. [2000], Numerische Simulation in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren. Gelsenkirchen, Itasca Consultant GmbH

KRAUTER, E. [2001], Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegung, Grundbau Taschenbuch, Teil 1, 6. Auflage, Berlin : Ernst & Sohn

LOTTER, M. [2001], Geotechnische und kinematische Untersuchungen an instabilen Felshängen im alpinen Raum. Erlangen-Nürnberg : Dissertation an der Friedrich-Alexander-Universität

MÜLLER, L. [1963], Der Felsbau-Teil 1, Stuttgart : Enke Verlag

MÜLLER, L. [1965], Talsperre Vajont. 15. Baugeologischer Bericht: Die Felsgleitung im Bereich Toc, COMMISSIONE PARLAMENTARE D'INCHIESTA sul disastro del Vajont

ÖNORM B4433 [1987], Erd- und Grundbau: Böschungsbruchberechnung, ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, Wien

PICHLER, CH. [2015], Ingenieur- und allgemeine Geologie der Großhangbewegung Misljoch (Navistal, Tirol), Innsbruck : Universität Innsbruck

POISEL R. [et al.] [2001], "Lessons learned from Gschliefgraben mudslide (Austria) / Die Lehren aus dem Erdstrom im Gschliefgraben (Österreich)", Geomechanics and Tunnelling, 4 5; S. 445 - 453.

POISEL, R. [2016], Angewandte Felsmechanik Skriptum zur Vorlesung, TU Wien :

POISEL, R. [1998], Kippen, Sacken, Gleiten - Die Geomechanik von Massenbewegungen und Felsböschungen, Felbau, S. 135-140

POISEL, R. und & EPPENSTEINER, W. [1988], Gang und Gehwerk einer Massenbewegung. Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich", Felsbau 6, S. 189-194.

POISEL, R. und & EPPENSTEINER, W. [1989], Gang und Gehwerk einer

Massenbewegung. Teil 2: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich", Felsbau 7, S. 16-20

PREH, A. [2004], "Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes (PFC)."; Betreuer/in(nen),

Begutachter/in(nen): R. Poisel, E. Brückl; Institut für Ingenieurgeologie, 2004.

PREH, A. [2000], Ermittlung von Sicherheitsfaktoren mittels des

diskontinuumsmechanischen Finite Differenzen Codes UDEC, Betreuer: Poisel R., Roth W., 203 Institut für Ingenieurgeologie

PREH, A. [2016], Studienblätter des Seminars Finite Difference Models in Geoengineering, TU Wien

PREH, A. und & MÖLK, M. [2007], Numerische Untersuchung von Sturzprozessen, TU Wien Kurs: Risiko von Naturgefahren, Wien

PREH, A.; Zapeltal M. [2006]: "The perfect mesh for FLAC3D to analyze the stability of rock slopes."; in: "Proceedings of the 4th International FLAC Symposium Madrid", issued by: P. Varona and R. Hart; Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minneapolis, 2006, ISBN: 0-9767577-0-2, 1 - 5.

PREISIG, G., EBERHARDT, M., SMITHYMAN, A. PREH, A. BONZANIGO, L. [2016], Hydromechanical Rock Mass Fatigue in Deep-Seated Landslides Accompanying Seasonal Variations in Pore Pressure; Rock Mechanics and Rock Engineering, S. 1-19

RIEDER B. [2016], Hydrogeologie der Großhangbewegung Misljoch und allgemeine Geologie im raum Pfons. Tirol, Innsbruck : Masterarbeit

ROTH, W. [2003], Dreidimensionale numerische Simulation von Felsmassenstürzen mittels der Methode der Distinkten Elemente (PFC), Dissertation der TU Wien, Wien

SAUSGRUBER, Th.[2015], Großhangbewegung Misljoch, Navis, Tirol, Exkursionsunterlagen für die TU-Wien, Institut Geotechnik.

SCHMIDT, M. [2017], Untersuchung zur Gesamtstandsicherheit der Felsgleitung Misljoch/Kerschbaumsiedlung (Bachelorarbeit), TU Wien

WLV [2016], Unveröffentlichter Bericht der Wildbach- und Lawinenverbau, Sektion Tirol, Ingenieurgeologisches Modell – Verschiebungsraten, Navis-Tirol

WLV [2013/17], Unveröffentlichter Bericht der Wildbach- und Lawinenverbau, Sektion Tirol, Pegel und Brunnenstände, Navis, Tirol

WYLLIE, D. C., MAH, C. W. [2004], Rock Slope Engineering, Spon Press

ZETTLER; A.H., POISEL, R. ROTH W. & PREH A. [1999], Slope stability analysis based on the shear reduction technique in 3D. In C. Detournay & R. Hart (eds.), FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Proceedings of the International FLAC Symposium, Minneapolis, MN, September 1999. Rotterdam: Balkema, pp. **ZISCHINSKY, U.** [1966], Bewegungsbilder instabiler Talflanken. Mitteilungen der Gesellschaft Geologie- und Bergbaustudenten, Bd. 17, S. 127-168.

ZIENKIEWICZ, O. C., HUMPHESON, C. & LEWIS, R. W. [1975], Associated and nonassociated visco-plasticity in soil mechanics. Geotechnique 25(4): 671-689.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 1 (Poisel 8	k
Рген, 2004)	8
Abbildung 2.2: Mechanische Modelle der Ablösemechanismen von Talflanken und Felsböschungen, Teil 2 (Poisel 8	,
Рген, 2004)	9
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Hangkriechens (POISEL, 1998)	10
Abbildung 2.4: Ablöse- und Versagensmechanismen im Lockergestein (Hofmann & Poisel, 2010)	13
Abbildung 2.5: Zeit Verschiebungsverlauf von unterschiedlichen Hangbewegungsmechanismen (Zangerl C. et al.,	
2008 S.19)	15
Abbildung 2.6: Übersicht von Monitoring Systemen (nach Kuntsche, 2000)	17
ABBILDUNG 3.1: GEOTECHNISCHES PROFIL OHNE MAßNAHMEN (HOFMANN, ET AL., 2017)	18
Abbildung 3.2: Digitales Geländemodell Südhang Mislioch, geomorphologische Struktur der Großhangbewegung	З,
GROBTEKTONISCHE EINHEIT (C. PICHLER, 2015 UND RIEDER, 2016)	20
Abbildung 3.3: Ingenieurgeologisches, geomechanisches Modell (C. Pichler, 2015)	21
Abbildung 3.4: Lage der Kernbohrungen (nach C. Pichler, 2015)	23
Abbildung 3.5: Lage der Brunnen und Pegelmessstellen (WLV)	24
ABBILDUNG 3.6: LAGE UND STATIONSDETAILS DER ERSTEN MESSSTELLE (QUELLE: WLV)	25
ABBILDUNG 3.7: MESSSTELLE 1: ZUSAMMENHANG NIEDERSCHLAG UND BERGWASSERSPIEGEL (QUELLE: WLV)	25
ABBILDUNG 3.8: LAGE UND STATIONSDETAILS DER ZWEITEN MESSSTELLE (QUELLE: WLV)	26
ABBILDUNG 3.9: MESSSTELLE 2: ZUSAMMENHANG NIEDERSCHLAG UND BERGWASSERSPIEGEL (QUELLE: WLV)	26
ABBILDUNG 3.10: LAGE UND STATIONSDETAILS DER DRITTEN MESSSTELLE (QUELLE: WLV)	27
ABBILDUNG 3.11: MESSSTELLE 3: ZUSAMMENHANG NIEDERSCHLAG UND BERGWASSERSPIEGEL (QUELLE: WLV)	27
Abbildung 3.12: Übersicht Bergwasserspiegel (HOFMANN, et al., 2017)	28
Abbildung 3.13: Übersicht Zusammenhang Niederschlag und Verschiebungen (Lawinen und Wildbachverbau 2013))
	29
Abbildung 4.1: Zonierung einer Blockansammlung (links: steife Blöcke, rechts: verformbare Blöcke plus Netz)	
(QUELLE: (ITASCA, 2011))	30
Abbildung 4.2: Flussdiagramm üblicher mechanischer Formulierungen und Materialmodelle des geklüfteten	
GEBIRGES SOWIE IHRE NUMERISCHE UMSETZUNG (NACH WILL, 1999)	31
ABBILDUNG 4.3: BERECHNUNGSSCHRITTE DER DISTINKT ELEMENTE METHODE (DEM) (ITASCA, 2011)	32
Abbildung 4.4: Bisektionsverfahren zur Ermittlung des Sicherheitsfaktors $ m H~$ (PREH, 2000)	35
Abbildung 4.5: Berechnungsablauf	38
Abbildung 4.6: Modellierter Schnitt in UDEC	39
Abbildung 4.7: Modellgeometrie inklusive Trennflächensystem	40
Abbildung 4.8: Übersicht über die einzelnen Regionen ("jregions") im Quarzphyllit	41
Abbildung 4.9: Verlauf des Bergwasserspiegel	42
Abbildung 4.10: Netztyp 1 – maximale Kantenlänge von 100 m	43
Abbildung 4.11: Netztyp 2 – maximale Kantenlänge von 65 m	44
Abbildung 4.12: Auflagerbedingungen des Modells	44
Abbildung 4.13: Zuordnung der Materialparameter auf die unterschiedlichen Regionen	45
Abbildung 4.14: Zuordnung der Materialparameter für die Trennflächen	46
Abbildung 4.15: Materialmodell nach Mohr Coloumb	46
Abbildung 4.16: Übersicht über Modellierung des Kluftsystems im Innsbrucker Quarzphyllit	47
Abbildung 4.17: Übersicht über die Modellierung des Trennflächensystems im Bündner Schiefer	48

Abbildung 4.18: Übersicht über den erhöhten Bergwasserspiegel (Modell 2)	50
ABBILDUNG 4.19: ÜBERSICHT MODELL 4 – TROCKEN	51
ABBILDUNG 5.1: FARBKODIERTE VERSCHIEBUNGSVEKTOREN [M] – MODELL 1, NETZTYP 1	53
ABBILDUNG 5.2: FARBTODIERTE GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN [M] – MODELL 1, NETZTYP 1	54
ABBILDUNG 5.3: PLASTIFIZIERTE ZONEN BEI MODELL 1, NETZTYP 1	55
ABBILDUNG 5.4: TRENNFLÄCHEN BEI ÜBERSCHREITUNG DES SCHERWIDERSTANDES BEI MODELL 1, NETZTYP 1	55
ABBILDUNG 5.5: FARBKODIERTE VERSCHIEBUNGSVEKTOREN [M] – MODELL 1, NETZTYP 2	56
ABBILDUNG 5.6: FARBKODIERTE GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN [M/S] – MODELL 1, NETZTYP 2	56
ABBILDUNG 5.7: PLASTIFIZIERTE ZONEN BEI MODELL 1, NETZTYP 2	57
ABBILDUNG 5.8: TRENNFLÄCHEN BEI ÜBERSCHREITUNG DES SCHERWIDERSTANDES BEI MODELL 1, NETZTYP 2	57
ABBILDUNG 5.9: VERLAUF DER UNGLEICHGEWICHTSKRAFT FÜR DAS MODELL 1 – NETZFEINHEIT 1	58
Abbildung 5.10: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 1 – Netzfeinheit 2	58
ABBILDUNG 5.11: VERSAGENSMECHANISMUNS FÜR DAS MODELL 1 FÜR NETZTYP 1	59
ABBILDUNG 5.12: VERSAGENSMECHANISMUS FÜR DAS MODELL 1 FÜR NETZTYP 2	59
Abbildung 5.13: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 1 - Netztyp 🛙	1
	60
Abbildung 5.14: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) das Modell 1 – Netztyp 2	60
ABBILDUNG 5.15: BILDUNG DER GLEITFLÄCHEN IM INNSBRUCKER QUARZPHYLLIT FÜR MODELL 1 – NETZFEINHEIT 1	61
Abbildung 5.16: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 1 – Netzfeinheit 2	61
ABBILITING 5.17: VERTEILLING DES PORENWASSERDRUCKS BEI NETZTYP 1	62
ABBILDING 5 18: VERTEILING DES KULETWASSERDRUCKS BEI NETZTYP 1	63
ABBILDUNG 5.19: FARBKODIERTE VERSCHIEBUNGSVEKTOREN [M] – MODELL 2. NETZTYP 1	64
ADDILDUNG 5.13. TARBRODIERTE VERSCHEDUNGSVERTOREN [M] WODELL 2. NETZTYD 1	64
ADDILDUNG 5.20. TARBTODIENTE GESCHWINDIGRETTSVERTOREN [N] WODELE 2, NETZTYP 1	65
	65
ADDILDUNG 5.22. TREINFLACHEN DEI ODERSCHREITUNG DES SCHERWIDERSTANDES DEI MODELL 2, NETZTTP 1	66
ABBILDUNG 5.25. FARBKODIERTE VERSCHIEBUNGSVERTOREN [M] - MODELL 2, NETZTYP 2	60
ABBILDUNG 5.24. PARBKUDIERTE GESCHWINDIGKEITSVERTOREN [M/S] - MODELLZ, NETZTYP Z	67
	67
ABBILDUNG 5.26: TRENNFLACHEN BEI ÜBERSCHREITUNG DES SCHERWIDERSTANDES BEI MODELL 2, NETZTYP 2	68
ABBILDUNG 5.27: VERLAUF DER UNGLEICHGEWICHTSKRAFT FÜR DAS MODELL 2 – NETZFEINHEIT 1	69
ABBILDUNG 5.28: VERLAUF DER UNGLEICHGEWICHTSKRAFT FÜR DAS MODELL 2 – NETZFEINHEIT 2	69 70
ABBILDUNG 5.29: VERSAGENSMECHANISMUS FUR DAS MODELL 2 FUR NETZTYP 1	70
ABBILDUNG 5.3U: VERSAGENSMECHANISMUS FUR DAS MODELL 2 FUR NETZTYP 2	70
ABBILDUNG 5.31: PLASTIFIZIERTE ZONEN, SCHERVERSAGEN (ROTE K.), ZUGVERSAGEN (VIOLETE K.) MODELL 2 - NETZTYP 1	/1
ABBILDUNG 5.32: PLASTIFIZIERTE ZONEN, SCHERVERSAGEN (ROTE K.), ZUGVERSAGEN (VIOLETE K.) MODELL 2 – NETZTYP 2	71
Abbildung 5.33: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 2 – Netzfeinheit 1	72
Abbildung 5.34: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 2 – Netzfeinheit 2	72
Abbildung 5.35: Verteilung des Porenwasserdruck bei Netztyp 1	73
ABBILDUNG 5.36: VERTEILUNG DES KLUFTWASSERDRUCKS BEI NETZTYP 1	74
ABBILDUNG 5.37: FARBKODIERTE VERSCHIEBUNGSVEKTOREN [M] – MODELL 3, NETZTYP 1	74
ABBILDUNG 5.38: FARBTODIERTE GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN [M] – MODELL 3, NETZTYP 1	75
ABBILDUNG 5.39: PLASTIFIZIERTE ZONEN PLASTIFIZIERTE ZONEN BEI MODELL 3, NETZTYP 1	75
Abbildung 5.40: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 3, Netztyp 1	76
Abbildung 5.41: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 3, Netztyp 2	77
ABBILDUNG 5.42: FARBKODIERTE GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN [M/S] – MODELL 3, NETZTYP 2	77
Abbildung 5.43: plastifizierte Zonen bei Modell 3 - Netztyp 2	78
ABBILDUNG 5.44: TRENNFLÄCHEN BEI ÜBERSCHREITUNG DES SCHERWIDERSTANDES BEI MODELL 3, NETZTYP 2	78
ABBILDUNG 5.45: VERLAUF DER UNGLEICHGEWICHTSKRAFT FÜR DAS MODELL 3 – NETZFEINHEIT 1	79
Abbildung 5.46: Verlauf der Ungleichgewichtskraft für das Modell 3 – Netzfeinheit 2	80
Abbildung 5.47: Versagensmechanismus für das Modell 3 für Netztyp 2	80
Abbildung 5.48: Versagensmechanismus für das Modell 3 für Netztyp 2	81
Abbildung 5.49: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) Modell 3 - Netztyp 1	81
ABBILDUNG 5.50: PLASTIFIZIERTE ZONEN, SCHERVERSAGEN (ROTE K.). ZUGVERSAGEN (VIOLETE K.) MODELL 3 – NETZTYP 2	82
ABBILDUNG 5.51: BILDUNG DER GLEITFLÄCHEN IM INNSBRUCKER OUARZPHYLLIT FÜR MODELL 3 – NETZFFINHFIT 1	82
ABBILDUNG 5.52: BILDUNG DER GLEITELÄCHEN IM INNSBRUCKER QUARZPHYLLIT FÜR MODELL 3 – NETZEEINHEIT 2	83
	84
ABBILDUNG 5.54: FARBTODIERTE GESCHWINDIGKFITSVFKTOREN [M] – MODELL 4, NETZTYP 1	85
ARRII DI ING 5 55' PLASTIFIZIERTE ZONEN PLASTIFIZIERTE ZONEN REI MODELLA NETZYVD 1	85
	55

Abbildung 5.56: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 4, Netztyp 1	6
Abbildung 5.57: Farbkodierte Verschiebungsvektoren [m] – Modell 4, Netztyp 2	7
Abbildung 5.58: Farbkodierte Geschwindigkeitsvektoren [m/s] – Modell 4, Netztyp 2	7
ABBILDUNG 5.59: PLASTIFIZIERTE ZONEN BEI MODELL 4 - NETZTYP 2	8
Abbildung 5.60: Trennflächen bei Überschreitung des Scherwiderstandes bei Modell 4, Netztyp 2	8
Abbildung 5.61: Ermittlung der Ungleichgewichtskraft für das Modell 3 – Netzfeinheit 1	9
Abbildung 5.62: Ermittlung der Ungleichgewichtskraft für das Modell 4 von 65 im Böschungsbereich und 200 im	
Sockelbereich	0
Abbildung 5.63: Verschiebungsvektoren für das Modell 4 – Netztyp 1	0
Abbildung 5.64: Verschiebungsvektoren für das Modell 4 – Netztyp 2	1
Abbildung 5.65: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 4 - Netztyp 1	
	1
Abbildung 5.66: plastifizierte Zonen, Scherversagen (rote K.), Zugversagen (violete K.) für das Modell 4 – Netztyp 2	
	2
Abbildung 5.67: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für Modell 4 – Netzfeinheit 1	2
Abbildung 5.68: Bildung der Gleitflächen im Innsbrucker Quarzphyllit für das 4 Modell bei einer Netzfeinheit von 6	5
IM BÖSCHUNGSBEREICH UND 200 IM SOCKELBEREICH	3
ABBILDUNG 6.1: SICHERHEITSFAKTOR IN ABHÄNGIGKEIT DES BERGWASSERSPIEGELS BEIM NETZTYP 1	4
Abbildung 6.2: Konturplot der Porenwasserdurckverteilung und Blockdiskretisierung (numerisches Netz), Netztyp	,
19	5
Abbildung 6.3: Geschwindigkeitsvektoren bei 100000 Berechnungsschritten bei einem erhöhten Bergwasserspiegel	
VON 10 M, NETZTYP 1	6
Abbildung 6.4: Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Bergwasserspiegels bei Netztyp 2	7
Abbildung 6.5: Verteilung des Porenwasserdrucks bei Netztyp 2	8
Abbildung 6.6: Geschwindigkeitsvektoren bei 200000 Berechnungsschritten bei einer Bergwasserspiegelerhöhung	
VON 2,0 M UND NETZTYP 2	9

9.2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 4.1: KOORDINATEN DER ECKPUNKTE DES MODELLRANDES	39
TABELLE 4.2: KOORDINATEN FÜR DEN BERGWASSERSPIEGEL DES AUSGANGSMODELLS	42
TABELLE 4.3: MATERIALPARAMETER FÜR DIE HOMOGENBEREICHE FÜR DAS AUSGANGSMODELL	48
TABELLE 4.4: MATERIALPARAMETER FÜR DAS TRENNFLÄCHENSYSTEM DES AUSGANGSMODELLS	49
TABELLE 4.5: MATERIALPARAMETER FÜR DIE HOMOGENBEREICHE FÜR DAS MODELL 2 FÜR EINE VEREINFACHTE NETZGENERIER	UNG 49
TABELLE 4.6: MATERIALPARAMETER FÜR DAS TRENNFLÄCHENSYSTEM DES 2. MODELLS FÜR EINE VEREINFACHTE NETZGENERIEF	RUNG
	50
TABELLE 4.7: MATERIALPARAMETER FÜR DIE HOMOGENBEREICHE FÜR DAS MODELL 2 BEI EINER FEINEREN NETZGENERIERUNG	51
TABELLE 4.8: MATERIALPARAMETER FÜR DAS TRENNFLÄCHENGEFÜGE FÜR DAS MODELL 2 BEI EINER FEINEREN NETZGENERIERL	JNG. 52